

分类号\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院

## 硕士学位论文

基于 GIS 的区域秸秆资源量预测与最优收集路径分析——以即墨市为例

张 展

指导教师 \_\_\_\_\_ 王利生 研究员 博士

\_\_\_\_\_ 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

\_\_\_\_\_ 中国科学院广州能源研究所

申请学位级别 \_\_\_\_\_ 硕士 \_\_\_\_\_ 学科专业名称 \_\_\_\_\_ 热能工程

论文提交日期 \_\_\_\_\_ 2009 年 5 月 \_\_\_\_\_ 论文答辩日期 \_\_\_\_\_ 2009 年 5 月 28 日

培养单位 \_\_\_\_\_ 中国科学院广州能源研究所

\_\_\_\_\_ 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

学位授予单位 \_\_\_\_\_ 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_ 黄宁生



**Application of GIS in the yield prediction and path optimization analysis  
of regional straw resource----A Case Study of Jimo**

A Dissertation for the Master Degree of Zhang Zhan  
in the Graduate School of Chinese Academy of Sciences

**By**  
**Zhang Zhan**

**Directed By**  
**Professor Wang Lisheng**

**Chinese Academy of Sciences**

**May, 2009**



## 关于学位论文使用权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经著作权人授权，不得将本论文转借他人并复印、抄录、拍照、或以任何方式传播。否则，引起有碍著作权人著作权益之问题，将可能承担法律责任。

---

## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院广州能源研究所所有关保存、使用学位论文的规定，即：中国科学院广州能源研究所有权保留学位论文的副本，允许该论文被查阅；中国科学院广州能源研究所可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签 名：

导师签名：

日 期：

---

## 关于学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：

导师签名：

日 期：



## 摘 要

生物质能源作为替代能源在解决我国未来能源供需、环境保护以及社会经济的可持续发展问题中有着积极的促进作用。开发和利用生物质能源过程中存在资源、技术和市场三方面瓶颈，其中资源是技术和市场的前提与基础，生物质资源量以及原料的收集、储存和运输是目前研究的热点问题。利用 GIS 等现代科学技术进行生物质秸秆资源量预测，结合区域分布特征进行最优收集、运输路径的分析与评估，能够明确区域秸秆资源能源化利用的合理方式，节约运输成本。

本文以青岛即墨市农作物秸秆资源量预测为基础，以 20MW 秸秆电厂原料收集、运输、利用以及秸秆发电系统的碳循环分析为研究对象，通过基于主成分分析的多元线性回归模型建立了即墨市主要农作物产量预测模型，完成了对即墨市 2007 年小麦与玉米产量预测，结合农作物谷草比经验算式对即墨市 2007 年小麦与玉米秸秆总量进行推算，预测值与实际值相差 0.74%，预测效果良好。利用 GIS 空间分析方法、Erdas 和 Envi 等遥感图像处理软件、ArcGIS 工作环境，通过 ArcGIS 功能组件 ModelBuilder 建立 Model 并间接生成脚本的思路，实现了基于空间思想的点对点最短路径的自动判别，本文以  $9\text{km}^2$  作为秸秆单位收集区域，通过分析秸秆原料在单位区域内的两种不同运输模式，结合 Python 语言的脚本批处理功能，完成了对即墨市拟建 20MW 秸秆电厂所需原料的最优运输路径的批量计算以及整个运输过程中的总成本分析。综合生物质的生长到最终能源化转化过程，完成了整个发电系统的碳循环分析以及秸秆发电厂的经济效益评估。

本文应用基于主成分分析的多元线性回归模型预测了研究区域内主要农作物的秸秆资源总量，弥补了直接运用多元回归方程对影响因子个数的限制与样本相对较少情况下拟合效果不佳的不足，利用 ModelBuilder 模型手段与 Python 软件的脚本批处理功能解决了 ArcGIS 中模型本身无法循环执行的实际困难，并对秸秆资源最短收集路径与有效收集成本实现了动态展示与科学估算，该方法可为秸秆电厂选址、原料收集运输提供基于空间技术的合理规划。通过对秸秆电厂的运行效率、原料利用、废气排放以及经济效益的相应分析，证明了在即墨市近郊设立 20MW 秸秆电厂的可行性。

**关键词：** 生物质能源， 秸秆资源量， 预测模型， GIS， 最优运输路径， 即墨市

## **Abstract**

Bioenergy plays an important role in energy supply-demand, exploitation efficiency, environment protection and economic development. However, 3 bottlenecks currently exist in exploitation and utilization of Bioenergy, which are resources, technology and markets and resources are the basis of the other two. Biomass production, collection, transportation and storage are the hotspot issues in current resource research area. Modern science and technology such as GIS could direct and identify the development trends of straw power utilization, with the aid of analysis and evaluation of the demographic characteristics distribution and collection routes of biomass resources. Meanwhile, the work will save transportation costs, build scientific foundations, and eventually relieve the supply-demand conflicts of straw resources and protect ecological environment.

Based on crop straw resources prediction in Jimo, this article applies Multiple Linear Regression model to the straw yield prediction, collection, transportation utilization and carbon cycle of power generation system. The yield of wheat and corn in 2007 are estimated and the straw yield of wheat and corn are further derived by ratio of grain to straw model. The result shows that the relative error between the real production and forecasted production is 0.74%. Then we also acquire the batch analysis approach of path optimization by utilizing ArcGIS model, Erdas, Envi and Python script function. Likewise we set 9km<sup>2</sup> as the units' collection area and make two different ways of transportation, i.e. inside or outside of the unit area. The proposed approach has been applied to the raw material collection, transportation and cost analysis of Jimo straw-fired power plant with 20MW productivity. The model is expected to provide a scientific approach for comprehensive utilization of straw resource on national-wide scale.

This article uses Multiple Linear Regression model which is based on the Principal Component analysis to finish the crop yield prediction of the study area. The approach successfully overcomes the disadvantages of single Multiple Linear Regression model such as influence factor restriction and poor fitting result due to fewer samples. In addition that, the article acquires the batch analysis approach of path optimization by utilizing ArcGIS model and Python script function. This method can solve the defect in the ArcGIS model self-looping execution. The dynamic illustration and estimation method provide a spatial planning for the optimal collect path of straw collection. Meanwhile, the feasibility of any plant establishment can be proved by analyzing operating efficiency; material utilization; toxic emission and economic efficiency of the straw plant.



**KEY WORDS:** Biomass and Bioenergy, quantity of straw, forecast model, GIS, optimal path analysis, Jimo

---

# 目 录

基于 GIS 的区域秸秆资源量预测与最优收集路径分析——以即墨市为例.....	i
摘 要.....	I
目 录.....	IV
图目录.....	VI
表目录.....	VII
<b>1 绪论</b> .....	1
<b>1.1 研究背景</b> .....	1
<b>1.2 国内外研究现状</b> .....	1
<b>1.2.1 GIS 技术及其应用</b> .....	2
<b>1.2.2 生物质资源量预测模型</b> .....	2
<b>1.2.3 秸秆资源最优收集、运输路径分析</b> .....	5
<b>1.2.4 秸秆发电系统及其经济性分析</b> .....	7
<b>1.3 本文主要工作</b> .....	9
<b>2 研究区域概况</b> .....	11
<b>2.1 自然资源概况</b> .....	11
<b>2.2 秸秆资源利用现状</b> .....	12
<b>3 秸秆资源量预测分析——以即墨市为例</b> .....	13
<b>3.1 资源预测模型</b> .....	13
<b>3.1.1 影响因子选择</b> .....	13
<b>3.2 模型预测与结果比较</b> .....	14
<b>3.2.1 玉米产量模型预测</b> .....	14
<b>3.2.2 小麦产量模型预测</b> .....	22
<b>3.2.3 秸秆量估算</b> .....	26
<b>3.3 小结</b> .....	27
<b>4 20MW 秸秆电厂原料最优路径分析——以即墨市为例</b> .....	28
<b>4.1 生物质秸秆电厂</b> .....	28
<b>4.1.1 秸秆电厂选择</b> .....	28
<b>4.1.2 秸秆电厂设立原理</b> .....	28

<b>4.2</b>	结合 GIS 方法的最优收集路径分析 .....	29
<b>4.2.1</b>	数据来源.....	30
<b>4.2.2</b>	最优运输路径分析过程.....	32
<b>4.2.3</b>	收集运输成本计算.....	36
<b>4.3</b>	小结 .....	39
<b>5</b>	20MW 秸秆气化发电厂经济分析与 CO <sub>2</sub> 排放评估 .....	40
<b>5.1</b>	秸秆电厂碳循环分析与 CO <sub>2</sub> 排放量估算 .....	40
<b>5.1.1</b>	农作物碳吸收以及 CO <sub>2</sub> 排放 .....	40
<b>5.1.2</b>	秸秆焚烧过程 CO <sub>2</sub> 排放量测算 .....	40
<b>5.1.3</b>	生物质秸秆发电系统的碳循环分析.....	41
<b>5.1.4</b>	20MW 秸秆电厂 CO <sub>2</sub> 减排量.....	42
<b>5.2</b>	20MW 生物质气化发电的经济效益分析.....	43
<b>5.2.1</b>	经济评价基本参数.....	43
<b>5.2.2</b>	相关经济评价分析.....	44
<b>5.3</b>	小结 .....	45
<b>6</b>	结语.....	46
<b>6.1</b>	讨论 .....	46
<b>6.2</b>	结论 .....	47
<b>6.3</b>	不足与展望 .....	47
	参考文献.....	49
	附录 1 .....	52
	致 谢.....	53

---

## 图目录

图 1 行政区划图 .....	11
图 2 $F_1$ 样本散点图 .....	18
图 3 $F_2$ 样本散点图 .....	18
图 4 $F_3$ 样本散点图 .....	18
图 5 残差分析图 .....	20
图 6 玉米估算产量与实际产量对比图 .....	22
图 7 小麦估算产量与实际产量对比图 .....	26
图 8 秸秆电厂厂点标识图 .....	28
图 9 Python 批处理流程图 .....	30
图 10 基于 GIS 模型的即墨市最优化路径分析与运输成本计算过程 .....	30
图 11 图像裁剪预处理结果图 .....	33
图 12 地理数据处理结果 .....	34
图 13 点到点最优路径分析模型 .....	34
图 14 最优收集路线排序表 .....	36
图 15 最优运输路线及其收集点 .....	36
图 16 收集区域到收集点的运输过程 .....	37
图 17 即墨市秸秆电厂原料收集运输图 .....	39

## 表目录

表 1: 统计预测模型与遥感模型主要优缺点比较.....	3
表 2: 三种秸秆发电技术主要优缺点比较.....	8
表 3: 相关影响因子参数值.....	15
表 4: 相关系数矩阵.....	15
表 5: 主成分特征值、贡献率及累积贡献率表.....	16
表 6: 初始因子荷载矩阵.....	16
表 7: 各主成分参数值.....	17
表 8: 模型概述表.....	19
表 9: 方差分析表.....	19
表 10: 偏回归系数表.....	19
表 11: 2007 年相关影响因子参数值.....	20
表 12: 实际产量、预测产量及其相对误差值.....	21
表 13: 实际产量、估算产量及其相对误差值.....	21
表 14: 相关影响因子参数值.....	22
表 15: 相关系数矩阵.....	23
表 16: 主成分特征值、贡献率及累积贡献率表.....	23
表 17: 初始因子荷载矩阵.....	24
表 18: $F_1$ 参数值.....	24
表 19: 模型概述表.....	25
表 20: 方差分析表.....	25
表 21: 偏回归系数表.....	25
表 22: 实际产量、预测产量及其相对误差值.....	26
表 23: 即墨市相关农作物参数.....	31
表 24: 坐标投影参数.....	32
表 25: 相关运输参数取值.....	37
表 26: 相关参数取值.....	38
表 27: 秸秆 $CO_2$ 吸排量关系表.....	40
表 28: 秸秆露天燃烧排放因子.....	41
表 29: 20MW 气化发电系统碳循环相关参数.....	42

---

表 30: 20MW 秸秆气化发电厂各项指标.....	43
-----------------------------	----

# 1 绪论

## 1.1 研究背景

作为世界能源消费大国,2007年我国进口原油1.63亿吨,石油对外依存度高达46.6%;能源利用总效率为33%左右,较发达国家约低10个百分点;2006年全年排放二氧化硫2588.7万吨、烟尘1088.5万吨、粉尘808.4万吨<sup>[1]</sup>。供需矛盾突出、利用效率低下、环境污染严重以及安全程度不足是我国能源发展面临的最严重挑战<sup>[2]</sup>。大力发展可再生能源特别是生物质能源,既是解决当前和未来能源供需矛盾的重要措施,又是保护环境,促进经济社会可持续发展的必然选择<sup>[3-5]</sup>。生物质能源具有可再生性、低污染性、广泛分布性,是仅次于煤炭、石油和天然气的世界第四大能源<sup>[6]</sup>。开发利用生物质能源不仅可以改变能源生产和消费方式,同时对建立可持续的能源系统,促进中国国民经济发展和环境保护也具有重大意义。从20世纪开始,世界各国已对可再生的生物质资源的开发利用给予了极大关注。许多国家制定了相应的生物质能源开发研究计划,如美国的先进能源计划、日本的新阳光计划、巴西的乙醇能源计划、欧盟的生物燃料行动计划等都提出了明确的生物质能源开发计划与发展目标<sup>[2]</sup>。

目前,开发和利用生物质能源主要存在资源、技术和市场三个方面的瓶颈,而技术和市场均以资源的稳定供给作为前提和基础。生物质资源量的掌握对实现生物质能源产业的健康有序发展是至关重要和必不可少的,其总量、时空分布及收集途径的分析和评估直接关系到生物质能源的利用方式确定。作为传统农业大国,我国拥有丰富的生物质资源,以生物质资源的主要来源之一秸秆资源为例,目前我国秸秆资源潜力折合约7亿吨标煤,可资源化利用的资源量约为1.76亿t,若完全资源化利用相当于8800万t标准煤,占全国可再生能源开发利用总量的53%<sup>[2]</sup>。然而,我国针对生物质资源分布及其收集、运输、储存的评估研究尚处于起步阶段,如何高效和准确的评估区域内的生物质资源,确定最优的生物质原料收集运输路径是当前急需解决的问题之一。

## 1.2 国内外研究现状

为解决上述问题,文本引入GIS空间技术、生物质资源量预测模型以及秸秆发电系统碳循环、经济效益评估方法进行研究分析。

### 1.2.1 GIS 技术及其应用

地理信息系统 (Geographic Information System), 简称 GIS 是指由计算机系统、地理数据和用户组成的, 通过地理数据的集成、存储、检索、操作和分析, 生成并输出各种地理信息, 从而为土地利用、资源管理、环境监测、交通运输、经济建设、城市规划以及政府各部门行政管理提供新的指示, 为工程设计和规划、管理提供决策服务。美国爱达荷大学地理系的 Kang-tsung Chang 把地理信息系统定义为用于输入、存储、查询、分析和显示地理数据的计算机系统<sup>[7]</sup>。

20 世纪 60 年代, Roger F. Tomlinson 和 Duane F. Marble 在不同地方、从不同角度提出地理信息系统的概念。近 30 多年以来, 地理信息系统得到了巨大发展, 20 世纪 90 年代已经进入了用户时代。并广泛应用于政府国土、环境、人口等资源的调查统计、分析、管理及决策, 区域规划管理和城市基础设施管理, 行业规划管理, 大型工程规划设计, 市场分析, 商业与服务管理等方面。

同时, GIS 技术在生物质能源领域方面也具有广阔的应用前景。GIS 技术的引入对大面积生物质资源的评估具有极大的优势, 利用 GIS 的空间分析功能以及空间数据库管理功能不仅可较好地结合气象数据与卫星影像了解各种生物质资源在我国的时空分布, 同时也可为生物质资源的总量预测、空间表达以及相关生物质处理工厂的原料收集、供需成本最优化等问题提供基于空间思想的科学指导。

### 1.2.2 生物质资源量预测模型

生物质资源量的估算方法包括经验法、模型法、资源密度法等, 其中模型法手段多样、精确度高、使用最为广泛。

#### 1.2.2.1 资源量预测模型

目前国内外秸秆资源量预测模型主要包括基于常规统计方法的预测模型及基于 GIS 技术的遥感估算模型。

统计学预测模型利用以往统计数据结合数学模型对各种粮食资源进行预测, 通过谷草比转化得到相应秸秆资源量。其中, 粮食产量的预测与估算是统计学模型进行农作物秸秆资源量预测的关键。从上世纪 80 年代提出利用多元线性回归模型实现对粮食产量的预测以来, 统计学模型先后引入了神经网络方法、指数平滑法、灰色理论、马尔可夫方法、混沌理论等方法, 以扩大适用预测范围以及提高预测精度, 国内主要研究成果包括史欣欣等利用多元线性回归原理计算出陕西榆林地区 2010 年粮食产量<sup>[8]</sup>; 周介铭等通过粮食生产因素的灰色分析结果, 利用线性回归模型预测了四川省 2005、2010、2015、2020、2025 和 2030 年的粮食产量<sup>[9]</sup>; 禹建丽等利用 BP 神经网络原理对我国粮食产量进行了实际预测<sup>[10]</sup>; 李葆春等利用建立的灰色预测模型对定西县 (1999—2013 年) 的粮食作物年平均产量进行预测<sup>[11]</sup>; 刘安等利用灰色—马尔可夫模型理论预测出桐城县未来 5 年冬小麦单产<sup>[12]</sup>; 迟灵



芝分别利用指数平滑法拟合二次曲线模型和灰色预测模型法,计算出本溪市(2000—2004)年粮食产量<sup>[13]</sup>。上述模型方法在实际应用中已经较为成熟,但其仅对资源的总量进行预测,而未考虑资源的空间分布研究对资源预测与利用的重要性。基于GIS技术的遥感模型运用空间数据及地图显示方法可解决统计学模型在此方面存在的不足。

目前大多数遥感模型均以计算NPP(Net Primary Productivity)来完成对农作物资源量的估算。利用遥感技术计算NPP的遥感模型主要包括:BIOME-BGC模型、CASA模型、BEPS模型和GLO-PEM模型等。BIOME-BGC模型既考虑了光能利用又考虑了植被生理生态过程,在大量观测数据的基础上,该模型针对全球特征研究提出了一套标准参数集。CASA模型主要由植物吸收的光合有效辐射APAR和光能转化率 $\epsilon$ 两个变量确定。GLO-PEM(Global Production Efficiency Model)模型是一个完全由遥感资料驱动的生产力效率模型,基于植物光合作用和自养呼吸等生态机理过程,是最早全部使用遥感反演数据全球尺度的生产力模型。我国研究人员在遥感模型运用方面已取得一定研究成果,张晓浩等利用BIOME-BGC模型思路与Modis数据估算出2001年广东水稻总生物量为 $1.69 \times 10^{10}$  Kg,与广东省统计数据结果基本吻合,同时得到水稻生物量的空间分布<sup>[14]</sup>;王芳等利用BIOME-BGC模型与广东省光能利用率修正Modis数据,计算出2002年广东省农作物总量并转换为生物质能,其生物质能总量与统计年鉴数据相差2.69%<sup>[15]</sup>。

### 1.2.2.2 模型优缺点比较

上述模型中统计学模型数据获取难度低、方法简单、易于实现,此外应用范围较遥感模型更加广泛,特别是对于中小型或局部区域的作物产量预测结果精确度较高,但存在无法表达作物真实空间分布特征、模拟复杂系统能力有限的不足。遥感模型能真实反映作物空间分布以及具有一定的生态模拟功能,但存在(10m×10m)以内的精确遥感影像数据获取难度与成本较高、空间的尺度转换问题的不足。相关模型优缺点比较见表1。

表 1: 统计预测模型与遥感模型主要优缺点比较

Table 1: The merits and demerits comparisons between statistics model and remote sensing model

预测模型	主要优点	主要缺点
多元线性回归模型	运用简单,在小型研究区域或变量较少时预测精度较高。	模拟复杂系统的能力有限,未考虑区域资源空间分布差异,难以反映资源在空间分布上的真实状况。
BP神经网络模型	学习数据的逼近能力好。	模型局部精度高,整体精度低。未进行空间分析,难以反映资源空间分布差异。
灰色马尔可夫模型	不需要大量统计资料,短期预测精度高。	长期预测精度不高,难以反映区域资源分布的真实状况。

BIOME-BGC 模型	通过常规生态生理方法测得，数据具有实时性、有效性。展示了区域资源的空间分布差异与真实分布状况。	Modis 数据空间分辨率较低，存在时间与空间的尺度转换问题及不同数据源的不同类型数据兼容问题，数据成本较高。
CASA 模型	综合考虑了环境条件、植被本身特征与空间分布差异。	参数确定和求算过程细节存在一定的不足，植被覆盖分类系统的选择与 $\varepsilon$ 的取值对 NPP 估算结果影响很大，数据成本较高。
GLO-PEM 模型	完全由遥感资料驱动的生产力效率模型、模型结构与参数相对简单	FPAR 分别依赖于 NDVI 和 EVI 植被指数，受观测角度制约，数据成本较高。

### 1.2.2.3 秸秆资源量预测模型

为保证预测区域内农作物产量的精确性，本文选择主成分分析法与多元回归分析预测法建立即墨市农作物秸秆资源的多元线性回归预测模型。

主成分分析法是指将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法，其实质上是各变量之间互相关联的复杂关系进行简化分析的方法<sup>[16]</sup>。主成分分析法经常用于减少数据集的维数，通过忽略高阶主成分保留低阶主成分的方法保持数据集对方差贡献最大的特征，这样低阶成分往往能够保留住数据的最重要信息。在实际应用中，主成分个数的确定是以当特征值大于 1 时，能够反映原来变量 80% 以上的信息量为依据，当信息量累积贡献率大于 80% 时主成分的个数已满足条件，最常见的主成分个数为 2 到 4 个。主成分分析法把给定的一组相关变量通过线性变换转成另一组不相关的变量，这些新的变量按照方差依次递减的顺序排列。在数学变换中保持变量的总方差不变，使第一变量具有最大的方差，称为第一主成分，第二变量的方差次大，并且和第一变量不相关，称为第二主成分。依次类推，拥有  $i$  个此类变量就有  $i$  个主成分<sup>[16]</sup>。

多元回归分析预测法是指通过对两个或两个以上的自变量与一个因变量的相关分析，建立预测模型进行预测的方法。当自变量与因变量之间存在线性关系时，称为多元线性回归分析<sup>[17]</sup>。其多元线性回归模型：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (1-1)$$

假定从理论上或经验上已经知道输出变量  $y$  是输入变量  $x_1, x_2, \dots, x_m$  的线性函数，但表达其线性关系的系数是未知的，要根据输入输出的  $n$  次观察结果  $(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}, y_1)(i=1 \dots n)$  按最小二乘法原理来求出系数  $\beta_0 \dots \beta_m$  的值。

求出多元线性回归模型系数后，通常的模型检验方法包括：判定系数检验（R 检验），回归系数显著性检验（T 检验），回归方程显著性检验（F 检验）。

(1).判定系数检验（R 检验）。判定系数 R 的计算公式为：

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1-2)$$

$$\overline{R^2} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-m} \quad (1-3)$$

R 接近于 1 表明 Y 与  $X_1, X_2, \dots, X_k$  之间的线性关系程度密切; R 接近于 0 表明 Y 与  $X_1, X_2, \dots, X_k$  之间的线性关系程度不密切<sup>[17]</sup>。

(2).回归系数显著性检验 (T 检验)。在多元回归分析中, 回归系数显著性检验是检验模型中每个自变量与因变量之间的线性关系是否显著。显著性检验是通过计算各回归系数的 t 检验值进行的。回归系数的 t 检验值的计算公式为

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{S_{\hat{\beta}_j}} \quad (1-4)$$

式中  $\hat{\beta}_j$  为第 j 个自变量  $x_j$  的回归系数 ( $j=1, 2, \dots, k$ );  $S_{\hat{\beta}_j}$  是  $\hat{\beta}_j$  的样本标准差。在多元回归模型中, 某个变量回归系数的 t 检验没有通过, 说明该变量与因变量之间不存在显著的线性相关关系, 在回归分析时就可以将该变量删去, 或者根据情况作适当的调整, 而后用剩下的自变量再进行回归分析<sup>[17]</sup>。

(3).回归方程的显著性检验 (F 检验)。回归方程的显著性检验是检验所有自变量作为一个整体与因变量之间是否有显著的线性相关关系。显著性检验是通过 F 检验进行的。F 检验是通过 F 统计量检验假设  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0$  是否成立的方法。公式为

$$F = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / (m-1)}{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-m)} \quad (1-5)$$

式中的  $m-1$  是回归变差  $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  的自由度,  $n-m$  是剩余变差  $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$  的自由度。回归方程的显著性检验未通过可能是选择自变量时漏掉了重要的影响因素, 或者是自变量与因变量间的关系是非线性的, 应重新建立预测模型<sup>[17]</sup>。

目前国内专家将基于多元线性回归方法的产量预测模型广泛用于不同领域, 其中包括: 王彬等利用上海 (1995—2004) 年度垃圾产生量数据, 建立的可应用于城市垃圾预测的多元线性回归预测模型<sup>[18]</sup>; 王美石等通过对多个影响油田产量的自变量进行综合回归分析, 建立的年产油量多元线性回归预测模型<sup>[19]</sup>; 以及沙之杰等利用多元线性回归模型建立的天津市用水量预测模型等<sup>[20]</sup>。

### 1.2.3 秸秆资源最优收集、运输路径分析

由于秸秆资源自身分布的分散性, 造成秸秆在资源化利用过程中存在收集困难、运输成本较高的不足, 进行最优收集运输路径的分析可较好解决此类问题。

### 1.2.3.1 国内外在最优路径分析中的应用与不足

目前国内外基于 GIS 的最优路径分析功能主要包括 Dijkstra 及其改进算法、GIS 栅格分析、层次分析法结合栅格模型、以及直接利用 ArcGIS 的网络分析等方法实现。国内外的主要研究成果包括：康莘等利用 Dijkstra 算法结合源图层与栅格图层计算，完成了珠江三角洲范围任意栅格点到广州最短时间与最低运输费用计算<sup>[21]</sup>。王海梅等运用 Dijkstra 的改进算法 DIKB 实现基于道路网的最短路径分析<sup>[22]</sup>。Luis Panichelli 等基于 Dijkstra 基础，通过节点分析运算实现最优路径分析<sup>[23]</sup>。刘学锋等基于栅格进行了 GIS 的最优路径分析<sup>[24]</sup>。以上成果均是从算法编译出发，编程思路较为复杂，对于不熟悉 Dijkstra 算法及其语言环境的用户较难于完成。其他方法如直接利用 ArcGIS 软件的 Network 扩展模块生成最短路径分析模型虽然简单直观，但存在不能进行批量处理的不足，随着分析点的增加，计算量也成几何级数增加。

### 1.2.3.2 Python 及其在 ArcGIS 中的应用

Python 于 1991 年首次公开发布，作者是 CWI（阿姆斯特丹国家数学和计算机科学研究所以）的研究员 Guido van Rossum。Python 是一门解释性、面向对象、动态语义特征的高层语言，其被设计成易于使用，易于学习的动态脚本语言，这意味着用户不需要编译，交互式的方式可以让用户学习到许多执行层次<sup>[25]</sup>。

Python 提供了与 GIS 系统集成、跨平台、容易与其他语言混合使用（C, C++, FORTRAN, Java）的可能，python 在多语言开发的系统里是最容易成功的。目前，许多处理分析 GIS 数据的包和工具已经被开发出来。基本功能包括，操作 shapefile, grid 图像，以及更复杂的格式，如 arcsde、web 服务、数据库等。简单的说 Python 可以为用户的 GIS 工具箱提供一个完全的工具集<sup>[26]</sup>。

在路径分析中，直接运用 ArcGIS 软件中 ModelBuilder 功能建立最优化模型，模型的路径分析模块功能基于原有 Dijkstra 算法以起始点为中心向外层扩展访问节点直至终点的工作原理，实现点与点之间的最短路径分析并间接生成脚本文件，同时引入 Python 语言工具利用其脚本功能完成对数据的批量处理，从而实现复杂的空间分析功能。此研究方法较传统的编程算法简化了编程思想，以模型形式可更为直观的展现用户设计思路，用户只需掌握 Python 的基本语法即可进行项目的设计。同时利用批量处理功能，可解决 Model builder 无法自身循环的不足，有效降低了工作量与工作时间。

### 1.2.3.3 秸秆收储运问题分析

我国秸秆资源丰富，目前每年秸秆资源的可获得量为 3.5 亿~3.7 亿 t，相当于约 1.7 亿 t 标准煤<sup>[27]</sup>。但由于秸秆资源空间分布分散、能量密度小、体积大、收集手段落后、难于存储与运输的不足，限制了其在我国的有效利用，如在秸秆发电厂方面，上述问题将直接影响发电的稳定性与可持续性。

如何合理有效的收集、储存、运输秸秆资源以及准确判断最优的资源收集半径已经成为解决我国秸秆资源利用问题的关键，目前我国科研人员在这一方面已经取得了一定的成果。以农作物秸秆资源为例，傅友红等介绍了北京某成型燃料厂在进行原料收集时采用的“公司+基地+专业户”利益联结模式，并在秸秆资源收集半径问题根据条件限制得出收集半径  $R \leq 11.5\text{km}$  的结论<sup>[28]</sup>。刑爱华等提出资源岛式分布模式，在农作物资源收集过程中考虑收购成本、压缩成本、运输成本以及其它成本基础上，建立了秸秆密度、运输距离固定时的临界收集量和秸秆密度、收集量固定时的临界运输距离的计算式，讨论了秸秆收集过程中增加压缩环节是否有利于降低成本的问题，其分析结果表明运输费率、收购价格、运输距离是对收集成本影响比较敏感的参数，各参数变化 $\pm 50\%$ 均会引起收集成本变化 $\pm 17\%$ 以上<sup>[29]</sup>。杨树华等通过对生物质颗粒成型燃料生产厂合理布局的科学分析，提出了秸秆收集的经济半径、平均运输半径及满载和空载等效模型，并以 SKR-1000 颗粒燃料成型机为例计算出生产厂的最佳原料收集半径为  $R=3965.85\text{m}$ <sup>[30]</sup>。王志伟等对农作物秸秆气化发电系统投产前的最佳秸秆收集半径进行了分析，其结果表明最佳秸秆收集半径取决于电厂运行费用、运输费用、单位耕地面积秸秆年产量、秸秆收集系数等<sup>[31]</sup>。张百良等列举了中国目前秸秆收集运输的三种模式，分析了最优收集半径与秸秆电厂投资规模、生产能力的关系<sup>[32]</sup>。张艳丽等分析了在秸秆收储运过程中两种不同模式——分散型与集约型，并提出在分散型收集模式下秸秆收集半径应控制在 100km 以内，入炉价格 300 元/吨，集约型模式入炉成本约 310 元/吨<sup>[33]</sup>。

#### 1.2.4 秸秆发电系统及其经济性分析

秸秆发电是生物质资源在能源化利用中具有较大开发利用价值的一种形式，在过去 30 年内，科学家们的研究以及生物质发电厂积累的经验证明秸秆发电污染小，每两吨秸秆的热值就相当于 1 吨煤，而且平均含硫量只有 3.8%，远低于煤 1%的平均含硫量。其次，秸秆的碳灰质较高，产生的热能也大，是最适合发电的生物质<sup>[28]</sup>。我国每年秸秆资源的可获得量为 3.5 亿~3.7 亿 t，相当于约 1.7 亿 t 标准煤。如果将这些秸秆资源用于发电，相当于 0.9 亿 kW 火电机组年平均运行 5000h，年发电量为 4500 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ <sup>[27]</sup>。

##### 1.2.4.1 秸秆发电技术

秸秆直接燃烧发电、秸秆一煤混合燃烧发电、秸秆热解气化发电是目前我国主要应用的三大发电技术。

秸秆直燃发电技术是将秸秆直接送往锅炉中燃烧，产生高温高压蒸汽推动蒸汽轮机做功。直燃发电的关键技术主要包括水冷式振动炉排燃烧技术和流化床燃烧技术。直燃发电技术成熟应用简单，但由于工艺限制，发电规模应控制在 30MW 以内。

气化发电技术的基本原理是把秸秆等生物质原料在气化炉中转化为可燃气，再利用可燃气推动燃气发电设备进行发电。气化发电系统主要采用气化技术和燃气发电技术。气化

发电技术几乎不排放任何有害气体，但仍存在过程复杂、运行成本较高的不足。

秸秆—煤混合燃烧发电技术是将秸秆掺混于煤粉中，输送到锅炉中燃烧产生蒸汽，通过汽轮机或蒸汽轮机系统驱动发电机发电。目前秸秆—煤混合燃烧电厂原料来源以林业秸秆为主，包括直接混合燃烧、间接混合燃烧和并联燃烧三种方式。

上述三种秸秆发电技术在不同应用方向优劣势互异：从秸秆发电原料方面考虑，秸秆—煤混燃发电技术改造成本较低、经济效益好是比秸秆直燃和稻壳气化发电技术更可行的方案；从秸秆发电核心技术和国外技术的成熟性方面考虑，采用循环流化床秸秆直接燃烧发电技术是未来秸秆焚烧发电技术的发展方向；从秸秆发电系统的效率、系统的稳定性以及秸秆等生物质清洁利用的角度出发，气化发电远远超过秸秆焚烧发电，其生物质整体气化联合循环(B/IGCC)发电技术是目前国内外研究的热点<sup>[28, 34]</sup>。(表 2)

表 2：三种秸秆发电技术主要优缺点比较

Table 2: Comparisons of the advantages and disadvantages of the three straw biomass power generation technology

秸秆发电技术	主要优点	主要缺点
秸秆直燃发电	技术成熟、应用简单、成本低廉	发电规模较小、效率偏低
秸秆气化发电	排放物洁净程度高，热电转化效率较高	发电规模小、过程复杂、营运成本较高
秸秆—煤混合燃烧发电	改造成本较低，可降低结渣和腐蚀风险，秸秆热转化效率高，适用较大规模发电厂	营运、维护成本较高、产业化应用较少

目前秸秆发电技术在我国已初具规模，秸秆直燃发电：如国能单县 25Mw 秸秆发电厂、国能威县 25Mw 秸秆发电厂、国能成安 25MW 秸秆发电厂、国能高唐秸秆发电厂和国能垦利 25MW 秸秆发电厂等；秸秆混合燃烧发电：如山东枣庄华电国际十里泉电厂；秸秆热解气化发电：如广州能源所研制成功的 4MW 生物质气化燃气—蒸汽联合循环发电系统于 2005 年在江苏兴化建成示范工程<sup>[35]</sup>。

#### 1.2.4.2 秸秆电厂经济、环境效益分析

对于秸秆发电厂其经济影响因素主要由如下部分组成：

- (1). 电厂类型的选择以及投资状况等固定成本；
- (2). 原料的收集、储存、运输等成本；
- (3). 能耗水平与能量转换效率（发电效率）；
- (4). 上网电价。

王志伟等对我国农作物秸秆气化发电系统经济性分析的研究报告指出，对秸秆气化发

电的财务净现值与内部收益率影响最大的是发电效率和上网电价，其次是原料收储运成本<sup>[31]</sup>。除了不可控的上网电价与取决于技术的发电效率外，控制原料的收储运成本可以大大降低秸秆电厂的最终成本。

秸秆发电不仅具有可观的经济效益，同时对于生态环境保护效用明显。由于秸秆中的C来自植物光合作用所固化的空气中的CO<sub>2</sub>，因此秸秆直接燃烧所排放的CO<sub>2</sub>不会增加大气中CO<sub>2</sub>净含量，同时秸秆中的硫、氮含量很低，燃烧气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>的含量较少，不挥发成分含量也较低。蒋冬梅等估算，每利用110×10<sup>4</sup>t秸秆替代煤燃烧，将减少CO<sub>2</sub>排放114×10<sup>4</sup>t、SO<sub>2</sub>排放40t、烟尘排放100t。若能将全国秸秆资源充分利用起来代替一次性能源，每年将减少419×10<sup>8</sup>tCO<sub>2</sub>、140×10<sup>4</sup>tSO<sub>2</sub>、350×10<sup>4</sup>t烟尘的排放<sup>[36]</sup>。王书肖等的研究报告同时指出若将作物秸秆露天焚烧，将会导致空气中总悬浮颗粒数量的明显升高，土壤表面温度增高，土壤微生物大量死亡，土壤的水分损失率将高达65%—80%，同时土壤板结耐旱、吸水保墒能力均将大幅度下降<sup>[37]</sup>。秸秆电厂的大力推行，可使上述问题得到较好解决，同时在秸秆电厂实际应用方面，由张忠潮等根据实测数据得出，营运一台2.5MW的生物质发电机组与同类型火电机组大约每年可减少10万吨二氧化碳排放量。秸秆电厂的全面应用可极大程度上降低二氧化碳的排放，为我国节能减排的战略布局提供有力的支持<sup>[38]</sup>。

### 1.3 本文主要工作

基于秸秆资源的区域分布特征以及收集路径的分析与评估，并针对秸秆发电系统进行碳循环过程与经济效益分析，能够正确引导和确定秸秆资源化利用的发展方向 and 趋势，节约运输成本并保护生态环境。

本文在全面了解国内外生物质资源量预测模型、GIS应用、最优路径分析、秸秆电厂CO<sub>2</sub>排放量等研究的基础上，以即墨市主要农作物秸秆资源的收集与利用为例，通过利用基于主成分分析的多元线性回归模型，建立了即墨市主要农作物产量预测模型，并完成了对即墨2007年小麦与玉米秸秆总量的估算；利用GIS空间分析方法，通过建立Model并间接生成脚本的思路完成最优路径分析，结合Python的脚本批处理功能实现了即墨全市拟建20MW秸秆发电厂所需原料的最优运输路径与运输成本的批量计算；针对20MW秸秆发电厂的原料需求，估算其CO<sub>2</sub>排放量，并完成了相应的碳循环及经济效益分析。

应用基于主成分分析的多元线性回归模型预测区域农作物秸秆资源总量，通过ArcGIS模型手段完成秸秆原料最优收集路径的分析，结合Python的批处理功能解决ArcGIS模型本身无法循环执行的不足，对秸秆资源最短收集路径与有效收集成本进行动态展示与估算，是本论文的特色与创新之处。

本论文研究成果可以为进行生物质秸秆资源量预测，秸秆电厂选址、原料运输路径规

划提供基于空间技术的科学手段与方法。



## 2 研究区域概况

### 2.1 自然资源概况

即墨市位于中国山东半岛西南部，地处东经  $120^{\circ} 07' \sim 121^{\circ} 23'$ ，北纬  $36^{\circ} 18' \sim 36^{\circ} 37'$ ，东临黄海，南依崂山，年平均温度 14 摄氏度，年平均降水量 737 毫米，年日照时数 2146 小时。至 2007 年底，全市土地总面积 1780 平方公里，滩涂 1 万多公顷，耕地面积 74104 公顷，人均占有耕地 0.07 公顷。全市林业用地总面积 23074 公顷，活立木蓄积量 467800 立方米，年蓄积生长量为 32100 立方米，林木覆盖率占 19.8%。地上水主要来源于大气降水和过境河道引入水。

即墨交通便捷，济青高速、青威高速、青银高速、即平高速、烟青一级路、滨海大道等公路相继竣工通车，目前，全市公路通车里程达 2100 公里，公路密度达每百平方公里 118 公里，构筑起了国道、省道、市乡道立体交叉、四通八达的现代化公路交通网络。

农业方面，全市农业人口 62.79 万人，2007 年末全市农业产值达 21.72 亿元，农业机械总动力 107.3 万千瓦，全年化肥施用量 18.3 万吨，农村用电量 7.3 亿千瓦时，农田有效灌溉面积 5.23 万公顷，节水灌溉 17 万亩，地膜覆盖面积 2.54 万公顷，全市人工造林面积 958 公顷，森林覆盖率达 30.5%。至 2006 年底，即墨市全年粮食总产量为 458593 吨，其中小麦 243179 吨、玉米 178762 吨共占粮食总量的 92%，是农作物秸秆资源的主要来源<sup>[39]</sup>。



图 1 行政区划图

Fig 1 Administrative division map

## 2.2 秸秆资源利用现状

即墨全境农作物秸秆资源分布分散，利用效率较低，秸秆资源主要来源于小麦秸秆与玉米秸秆。据即墨市农业局数据，即墨全市小麦秸秆大部分就地燃烧还田，玉米秸秆一半作为饲料、部分用作沼气原料，部分用于焚烧还田，其余资源多用于秸秆能源以及秸秆基质等方面。

即墨市在农作物秸秆治理和综合利用工作虽初见成效，但实施过程中仍有秸秆综合利用技术推广力度不足，监督、管理和综合利用指导的协调统一有待加强，尚未形成大规模产业化经营格局，当地人对秸秆综合利用认识不足，秸秆综合利用市场还有待于开发等问题存在。

### 3 秸秆资源量预测分析——以即墨市为例

#### 3.1 资源预测模型

本文利用主成分分析法与多元回归分析预测法建立即墨市主要农作物资源量的多元线性回归预测模型。主成份分析法主要用于去除影响因子信息重叠性，减少原始数据集的维数。多元线性回归分析法主要用于综合影响因子与产量的相关性分析，构建资源量预测模型。

##### 3.1.1 影响因子选择

由即墨市历年统计数据可知，玉米与小麦的产量在即墨市粮食总产量中占 90%以上，所以本文选择即墨市玉米与小麦为研究对象，对其产量进行模型预测，并由谷草比经验公式推算出相应的农作物秸秆资源量。其中玉米生长周期为每年 6 月至 10 月，小麦生长周期为每年 10 月底至次年 5 月<sup>[39]</sup>。

利用多元线性回归方程进行粮食作物的产量预测，影响因子的确定最为关键。从前人研究影响粮食产量因子的成果分析，发现影响粮食产量的主要制约因子因地域的不同而各不相同。长江流域以粮食播种面积为主要影响因子，河北等地区多以粮食单产为主要影响因子，内蒙古、四川等地区以化肥施用量为主要影响因子，宁夏等西北地区则以作物播种面积、有效灌溉面积为主要影响因子。因此对于不同地区，找准影响粮食产量的主要因子，才能因地制宜对该地区粮食作物产量进行预测<sup>[40]</sup>。

影响因子的确定方面，国内专家意见各异：于法稳等选择有效灌溉面积、化肥施用量、农业机械总动力、粮食播种面积和受灾面积作为影响粮食生产的因素<sup>[41]</sup>。肖海峰等将影响粮食生产能力的因素选择为粮食播种面积、其它物质费用、粮食作物播种面积和有效灌溉面积<sup>[42]</sup>；崔步礼等通过选取气温、降水量、蒸发量、粮食播种面积、农业机械动力、化肥施用量、农业人口对东营市粮食产量进行分析<sup>[43]</sup>；孙萍等设立的影响因子为粮食作物播种面积、农业机械总动力、化肥施用量、有效灌溉面积、成灾面积和农业劳动力<sup>[44]</sup>；王慧等在孙萍选择因子的基础上增加考虑耕地面积、农村用电量、农作物单产、农用科技三项费用、农业财政支出等 5 项因子<sup>[45]</sup>。

本文通过综合前人经验、当地农作物实际生长周期以及即墨市农业局相关经验数据，对即墨市农作物往年实际产量分析后，最终选择：

$X_1$ ：作物生长期平均气温（度）；

$X_2$ ：作物生长期总降水量（毫米）；

- X<sub>3</sub>: 作物生长期总日照时间 (小时);
- X<sub>4</sub>: 农作物播种面积 (公顷);
- X<sub>5</sub>: 有效灌溉面积率 (%);
- X<sub>6</sub>: 作物生长期化肥施用量 (吨);
- X<sub>7</sub>: 作物生长期农业机械总动力 (千瓦);
- X<sub>8</sub>: 农作物单位面积产量 (千克每公顷);
- X<sub>9</sub>: 农业劳动人口 (万人)

等九项指标数据作为可能影响小型区域内农作物产量的因子。

## 3.2 模型预测与结果比较

以即墨市小麦与玉米为例, 采用主成分分析法对拟定的影响因子集进行降维处理, 区分各因子对作物产量的贡献度大小, 去除因子信息的重叠性, 找出影响作物产量的综合因子, 最后利用综合影响因子结合多元线性回归分析方法建立作物产量预测模型。模型数据来源于青岛市与即墨市 1992—2007 年相关统计年鉴。

### 3.2.1 玉米产量模型预测

#### 3.2.1.1 主成分分析

主成分分析主要步骤包括: 数据收集; 指标数据标准化; 指标之间的相关性判定; 确定主成分个数; 确定各主成分表达式等五部分。

(1).此模型引用数据来源自青岛市统计年鉴与即墨市统计年鉴 1992—2006 年期间 12 年统计数据, 如表 3。

(2).指标数据标准化: 运用 SPSS 调用 Factor Analyze 过程进行分析时, 软件将自动对原始数据进行标准化处理。

(3).利用 SPSS 分析窗口 Analyze 菜单中 Data Reduction 的 Factor 过程, 导入 Y、X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>、X<sub>6</sub>、X<sub>7</sub>、X<sub>8</sub>、X<sub>9</sub> 进行主成分分析, 运行结果如表 4、表 5、表 6 所示。

(4).可以看出表 4 中玉米产量 Y 与玉米单产 X<sub>8</sub>、玉米播种面积 X<sub>4</sub>、总日照时间 X<sub>3</sub>、总降水量 X<sub>2</sub> 存在显著关系。其它许多变量之间直接的相关性也较强, 证明它们存在信息上的重叠性。

(5).进行主成分分析的目的之一是希望用尽可能少的主成分代替原来的 9 个影响因子。由累积贡献率表可以看出当特征值大于 1 时, 前 3 个主成分累计方差贡献率 E=80.78%, 大于 80%, 即这 3 个主成分所包含的信息基本可以反映原有指标的信息, 因此我们取前 3 个主成分作为综合影响因子代替原来的 9 个影响因子指标。其中第一主成份贡献率为 46.66%, 第二主成份贡献率为 18.45%, 第三主成份贡献率为 15.67%<sup>[46]</sup>。(表 5)

表 3: 相关影响因子参数值

Table 3: The parameters values of each related influence factor

Year	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	Y
玉米	/(°C)	/(mm)	/(h)	/(ha)	/(%)	/(t)	/(kw)	/(kg/ha)	/(万人)	/(t)
1992	21.4	529.1	1153	27858	50.8	56393	55368	4875	25.7	157193
1994	22.8	613.7	1220	32916	51.6	62451	73375	6534	24.5	214401
1995	21.8	525.5	1004	34018	51.7	66088	83486	6389	24.5	217078
1997	22.9	382.3	1280	28650	52.5	68610	84637	2895	25.0	82942
1998	22.8	703.3	1020	36714	52.6	72528	113507	7050	25.1	258834
1999	22.5	486.9	999	33786	53.3	71359	115295	7275	24.7	255239
2000	23.0	476.3	1052	24677	56.7	74256	94492	6387	24.6	157609
2001	22.9	763.8	1042	27445	60.1	70381	114697	6352	21.7	174317
2002	22.3	302.5	1049	27875	60.6	72139	120908	5429	17.8	151337
2004	22.5	452.7	742	34102	63.7	66784	171931	6374	16.0	217363
2005	22.7	811.6	887	39208	65.6	68033	208946	6016	14.3	235860
2006	23.3	446.8	917	38648	66.6	69263	226252	4625	13.5	178762

注: ①1993、1996、2003 年统计数据缺失

表 4: 相关系数矩阵

Table 4 Correlation Matrix

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
X1	1.000	.127	-.083	.196	.448	.632	.488	-.044	-.321	-.046
X2	.127	1.000	-.133	.355	.065	-.077	.138	.450	-.001	.524
X3	-.083	-.133	1.000	-.525	-.717	-.252	-.756	-.422	.704	-.544
X4	.196	.355	-.525	1.000	.357	-.014	.673	.211	-.499	.669
X5	.448	.065	-.717	.357	1.000	.318	.914	-.059	-.959	.047
X6	.632	-.077	-.252	-.014	.318	1.000	.315	.235	-.162	.076
X7	.488	.138	-.756	.673	.914	.315	1.000	-.005	-.923	.272
X8	-.044	.450	-.422	.211	-.059	.235	-.005	1.000	.114	.849
X9	-.321	-.001	.704	-.499	-.959	-.162	-.923	.114	1.000	-.096
Y	-.046	.524	-.544	.669	.047	.076	.272	.849	-.096	1.000

表 5: 主成分特征值、贡献率及累积贡献率表

Table 5 Total Variance Explained

组成成分	最初特征值			提取和的平方荷载		
	特征值	所占百分比	累积百分比	特征值	所占百分比	累积百分比
1	4.199	46.657	46.657	4.199	46.657	46.657
2	1.661	18.454	65.111	1.661	18.454	65.111
3	1.410	15.669	80.780	1.410	15.669	80.780
4	.907	10.077	90.856			
5	.518	5.752	96.609			
6	.192	2.135	98.743			
7	9.846E-02	1.094	99.837			
8	1.420E-02	.158	99.995			
9	4.266E-04	4.740E-03	100.000			

模型:主成分分析.

表 6: 初始因子荷载矩阵

Table 6 Component Matrix

	主成份		
	1	2	3
X1	.515	-.286	.645
X2	.198	.740	.124
X3	-.816	-.265	.148
X4	.646	.393	-.242
X5	.920	-.239	-9.60E-02
X6	.403	-.193	.816
X7	.980	-9.33E-02	-.111
X8	.150	.809	.354
X9	-.906	.223	.293

模型:主成分分析

(6).由初始因子荷载矩阵得出, 各影响因子与主成分  $F_1$  的关系表达式分别为: (表 6)

$$F_1=0.515X_1+0.198X_2-0.816X_3+0.646X_4+0.92X_5+0.403X_6+0.98X_7+0.15X_8-0.906X_9$$

$$F_2=-0.286X_1+0.74X_2-0.265X_3+0.393X_4-0.239X_5-0.193X_6-0.0933X_7+0.809X_8+0.223X_9$$

$$F_3=0.645X_1+0.124X_2+0.148X_3-0.242X_4-0.096X_5+0.816X_6-0.111X_7+0.354X_8+0.293X_9$$

### 3.2.1.2 多元线性回归分析

将上述利用主成分分析法所得出的  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  三个主成分作为玉米产量的综合影响因子, 运用 SPSS 统计分析软件进行多元线性回归分析, 建立玉米总产量的预测模型。

多元线性回归法主要步骤包括: 选择变量, 变量参数数据录入; 模型设定; 模型参数估计; 模型的验证与修订; 模型应用与误差对比等 5 部分。

(1).选择被解释变量  $Y$  和解释变量  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 。数据来源：表 3 中相关统计数据结合上述主成分表达式换算而得。(表 7)

表 7: 各主成分参数值

Table 7: The parameter values of each principal component

Year	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$Y/(吨)$
1992	94912.9	-1084.16	35107.66	157193.0
1994	118482.1	-559.49	37436.34	214401.0
1995	130705.1	-1896.77	38920.24	217078.0
1997	128604.9	-7606.68	40936.48	82942.00
1998	164584.7	-4219.41	40449.66	258834.0
1999	163983.3	-5284.03	40055.20	255239.0
2000	138704.3	-8223.33	46624.80	157609.0
2001	158797.3	-8087.10	40570.73	174317.0
2002	165638.5	-9927.63	40827.30	151337.0
2004	217932.2	-10251.5	29594.15	217363.0
2005	257911.1	-12002.8	25207.70	235860.0
2006	274701.5	-15478.7	23892.78	178762.0

(2).设立多元线性回归方程为  $Y = \beta_0 + \beta_1 F_1 + \beta_2 F_2 + \beta_3 F_3$ ; 利用 SPSS 中 Graphs 菜单的 Scatter 系列功能作出因变量  $Y$  与各个自变量  $F_i$  的样本散点图, 如图 2、图 3、图 4,

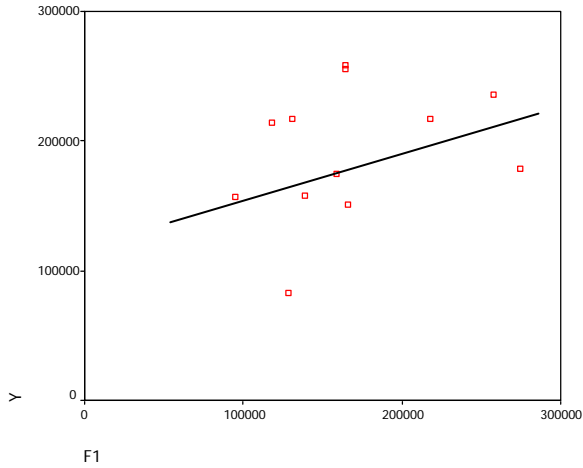


图 2  $F_1$  样本散点图

Fig 2 The scatter diagram of  $F_1$

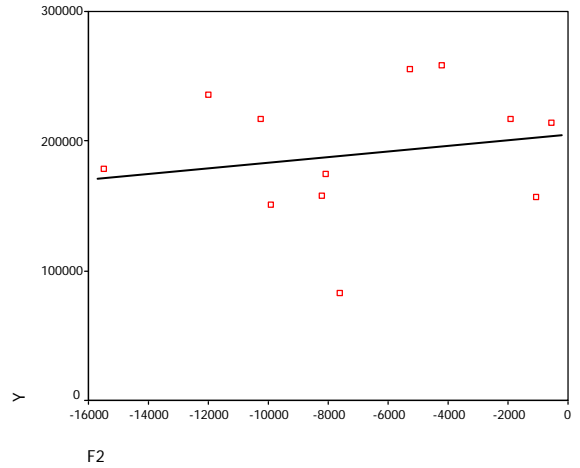


图 3  $F_2$  样本散点图

Fig 3 The scatter diagram of  $F_2$

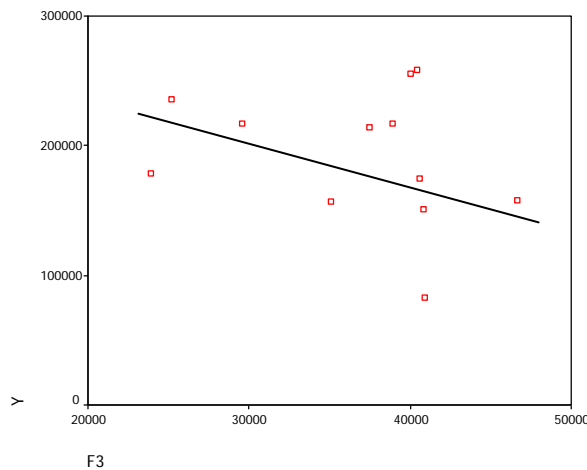


图 4  $F_3$  样本散点图

Fig 4 The scatter diagram of  $F_3$

从图 2、3、4 可以看出图中点阵大致分布于一条直线附近，线性关系较好可以采用线性回归。

(3).根据最小二乘法原理进行参数估计，求解常数项  $\beta_0$  和回归系数  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 。本文利用 SPSS 分析窗口 Analyze 菜单中 Regression 的 Linear 过程，导入 Y、 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  进行回归分析，在回归方法中选择强行进入法 (Enter)。运行后得到回归系数  $b=(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3)=(-256381.92, 2.41, 22.401, 5.497)$ ，建立回归方程

$$Y=-256381.92+2.41F_1+22.401F_2+5.497F_3 \quad (3-1)$$

(4).建立回归方程后，需要进行显著性检验，以确认建立的回归模型是否较好地拟合了



原始数据，即回归方程是否有效。常用的检验包括统计检验（如复相关系数  $R$  的检验、拟合优度检验、回归模型线性  $F$  检验、参数的  $t$  检验）以及残差图检验等。

通过 SPSS 软件求解后，输出结果如下表 8、9、10。

由表 8 可以看出，模型相关系数  $R$  的绝对值为 0.965，说明自变量与因变量之间有良好的相关性。此外决定系数  $R^2$  为 0.932（其中  $R^2$  反映出总体回归效果，越接近 1 越好），说明在因变量的变异中，有 93.2% 可由自变量的变化来解释，即方程  $R$  检验合格。

表 8: 模型概述表

Table 8 Model Summary diagram

模型	R	R 平方	校正后 R 平方	变化统计				
				R 平方变化	F 变化	自由度 1	自由度 2	Sig. F 变化
1	.965 <sup>a</sup>	.932	.907	.932	36.619	3	8	.000

a. 预测器: (常数), F3, F2, F1

表 9: 方差分析表

Table 9 Analysis of variance diagram

模型		平方和	自由度	均方	F	Sig.
1	回归	2.7E+10	3	8883802319	36.619	.000 <sup>a</sup>
	残差	1.9E+09	8	242598165		
	总计	2.9E+10	11			

a. 预测器: (常数), F3, F2, F1

表 10: 偏回归系数表

Table 10 Partial regression coefficient diagram

	未标准化系数		标准化系数	t 检验	Sig.	系数B的95%置信区间		相关性			共线性统计	
	系数B	标准误差	系数2			下界	上界	零阶	部分	局部	容忍度	方差膨胀因子
常数	-256382	72386		-3.54	.008	-423305	-89460					
F1	2.410	.255	2.616	9.438	.000	1.821	2.999	.302	.958	.869	.110	9.054
F2	22.401	2.251	2.019	9.952	.000	17.211	27.592	.162	.962	.917	.206	4.851
F3	5.497	1.225	.747	4.487	.002	2.672	8.322	-.248	.846	.413	.306	3.269

使用方差分析 Analysis of Variance 对整个回归方程作显著性检验（表 9），其结果中检验值  $F=36.619$ ， $P=0.000$ ，差异有显著性意义，即  $F$  检验合格，此回归方程有必要成立。

利用方差分析对每个因变量做偏回归分析，即关于回归系数及显著性检验的运算。（表

10) 结果中常数项显性概率为  $0.008 < 0.05$ ，表示常数项与 0 存在显著性差异，表明常数项应出现在方程中。同理，主成分  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  系数的显性概率均为 0.000 小于 0.05，表示回归方程的系数显著，符合 T 检验标准，所有系数均应出现在回归方程中。

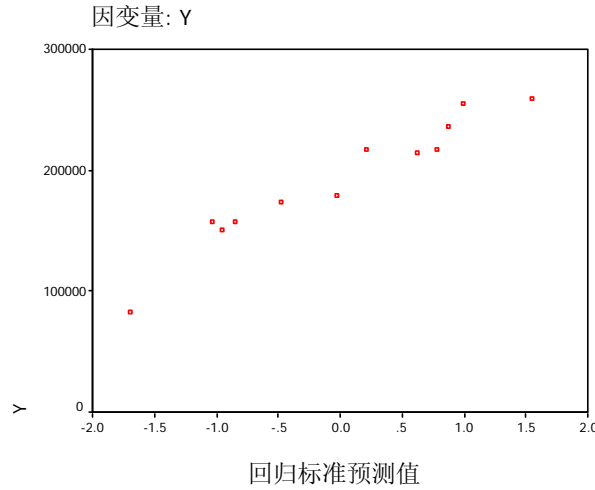


图 5 残差分析图

Fig 5 Residual analysis diagram

通过观察残差分析图发现残差大部分分布于 0 附近，说明模型模拟效果较好（图 5）。

综上检验表明，多元线性回归方程： $Y' = -256381.92 + 2.41F_1 + 22.401F_2 + 5.497F_3$  可作为玉米产量预测模型使用。

(5). 利用青岛市统计年鉴与即墨市统计年鉴 2007 年相关数据进行模型的验证，统计数据表 11 结合主成分表达式 3-1 计算得出 2007 年综合影响因子  $F_i = (F_1, F_2, F_3) = (271471.7, -15338.1, 31346.2)$ ，将  $F_i$  值带入回归方程得出 2007 年即墨市玉米总产量预测值  $Y'$  为 226586 吨，与实际值  $Y$  基本相同，相差仅 4.78%，证明模型具有较好的预测效果。（表 12）

表 11：2007 年相关影响因子参数值

Table 11: The parameter values of each related influence factor in 2007

Year	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$Y$
玉米	( $^{\circ}C$ )	(mm)	(h)	(ha)	(%)	(t)	(kw)	(kg/ha)	(万人)	(t)
<b>2007</b>	22.5	838.2	821	36469	70.8	76184	221093	6525	13.3	237959

表 12: 实际产量、预测产量及其相对误差值

Table 12: The relative error between real production and forecasted production

Year	Y':预测产量 / (吨)	Y:实际产量 / (吨)	相对误差 / (%)
2007	226586	237959	4.78

### 3.2.1.3 拟合误差分析

同理, 利用上述多元线性回归模型式 3-1 结合表 7 中相关统计数据, 可估算出即墨市往年玉米产量值  $Y'$ 。将模型估算结果  $Y'$  与统计年鉴中玉米实际产量值  $Y$  进行对比, 结果如表 13, 除 1992、1997 年相对误差高于 10% 外, 其余两者相对误差绝对值范围均控制在 8% 以内, 可见模型拟合效果达到预期要求。(图 6)

表 13: 实际产量、估算产量及其相对误差值

Table 13: The relative error between real production and estimated production

Year	Y:实际产量 / (吨)	Y':预测产量 / (吨)	相对误差 / (%)
1992	157193	141059	10.26
1994	214401	222414	-3.74
1995	217078	230072	-5.99
1997	82942	108187	-30.44
1998	258834	268100	-3.58
2009	255239	240634	5.72
2000	157609	149981	4.84
2001	174317	168178	3.52
2002	151337	144846	4.29
2004	217363	201869	7.13
2005	235860	234876	0.42
2006	178762	190248	-6.43

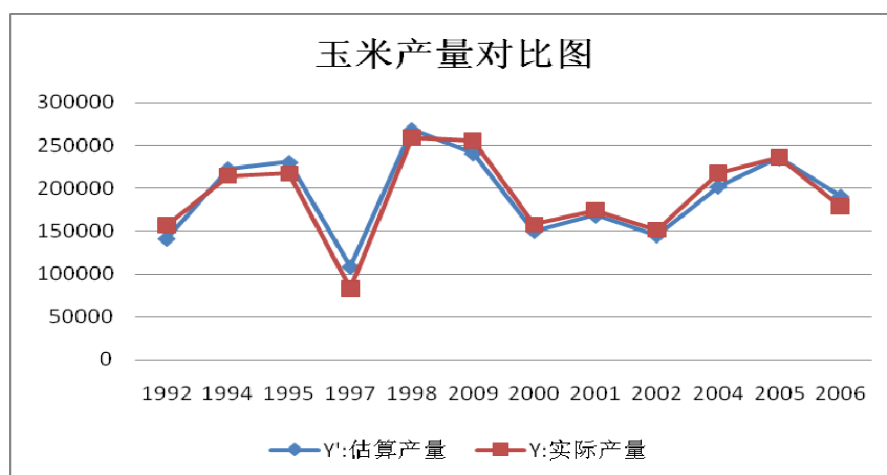


图 6 玉米估算产量与实际产量对比图

Fig 6 Corn yield comparison diagram

### 3.2.2 小麦产量模型预测

同上，利用上述模型方法结合青岛市统计年鉴与即墨市统计年鉴 1994—2006 年期间 12 年统计数据（表 14）对即墨市小麦产量进行估算。影响因子仍选择小麦种植期间的平均气温  $X_1$ （度）、总降水量  $X_2$ （毫米）、总日照时间  $X_3$ （小时）、播种面积  $X_4$ （公顷）、有效灌溉面积率  $X_5$ 、化肥施用量  $X_6$ （吨）、农业机械总动力  $X_7$ （千瓦）、单位面积产量  $X_8$ （千克每公顷）、农业劳动人口  $X_9$ （万人）等九项数据作为影响小麦产量的指标参数。

表 14：相关影响因子参数值

Table 14: The parameter values of each related influence factor

Year	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	Y
小麦	/( $^{\circ}$ C)	/(mm)	/(h)	/(ha)	/(%)	/(t)	/(kw)	/(kg/ha)	/(万人)	/(t)
1994	7.00	177	1352	54510	51.6	78951	170117	4557	24.5	248457
1995	6.70	146	1430	53660	51.7	87432	184367	4657	24.5	249928
1997	6.33	84	1589	55999	52.5	92523	231603	4929	25.0	275515
1998	6.89	203	1195	50000	52.6	96055	216417	5834	25.1	291684
1999	6.46	120	1430	50291	53.3	101540	240265	5745	24.7	288922
2000	6.69	134	1449	48345	56.7	99902	259169	5458	24.6	263864
2001	7.11	142	1433	37084	60.1	103959	216972	4982	21.7	184737
2002	7.73	245	1476	37331	60.6	98533	226692	4671	17.8	174388
2004	6.97	140	2574	30200	63.7	100994	213162	5585	16.0	168727
2005	6.56	143	1323	47520	65.6	93498	354539	5385	14.3	255895
2006	6.86	143	1334	44661	66.6	95246	366034	5445	13.5	243179
2007	8.24	126	1282	41185	70.8	106658	349558	5400	13.3	222399

注：①1996年、2003年统计数据缺失

SPSS 主成分分析结果如表 15、16、17。

表 15: 相关系数矩阵

Table 15 Correlation Matrix

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
X1	1.000	.850	.076	-.617	.275	.122	-.230	-.361	-.298	-.741
X2	.850	1.000	-.211	-.289	.064	-.083	-.197	-.202	-.148	-.341
X3	.076	-.211	1.000	-.620	.286	.287	-.212	.137	-.290	-.574
X4	-.617	-.289	-.620	1.000	-.695	-.648	-.081	-.171	.614	.869
X5	.275	.064	.286	-.695	1.000	.418	.734	.246	-.956	-.540
X6	.122	-.083	.287	-.648	.418	1.000	.236	.569	-.217	-.308
X7	-.230	-.197	-.212	-.081	.734	.236	1.000	.420	-.698	.146
X8	-.361	-.202	.137	-.171	.246	.569	.420	1.000	-.146	.333
X9	-.298	-.148	-.290	.614	-.956	-.217	-.698	-.146	1.000	.518
Y	-.741	-.341	-.574	.869	-.540	-.308	.146	.333	.518	1.000

由相关系数矩阵表可知：小麦产量与平均温度  $X_1$ 、日照  $X_3$ 、小麦播种面积  $X_4$ 、有效灌溉面积率  $X_5$ 、当地农业劳动人口  $X_9$  存在显著关系，其它变量之间直接相关性同样较强，存在信息上的重叠性。（表 15）

表 16: 主成分特征值、贡献率及累积贡献率表

Table 16 Total Variance Explained

组成成分	最初特征值			提取的平方荷载		
	特征值	所占百分比	累积百分比	特征值	所占百分比	累积百分比
1	3.617	40.187	40.187	3.617	40.187	40.187
2	2.329	25.872	66.059	2.329	25.872	66.059
3	1.521	16.900	82.959	1.521	16.900	82.959
4	1.022	11.351	94.311	1.022	11.351	94.311
5	.424	4.712	99.022			
6	5.122E-02	.569	99.592			
7	2.547E-02	.283	99.875			
8	1.126E-02	.125	100.000			
9	2.707E-05	3.008E-04	100.000			

模型: 主成分分析.

表 17: 初始因子荷载矩阵

Table 17 Component Matrix

	主成分			
	1	2	3	4
X1	.400	-.895	-6.71E-02	.138
X2	.172	-.821	-.271	.379
X3	.446	-2.69E-02	.707	-.487
X4	-.869	.326	-.348	1.363E-02
X5	.934	.108	-.274	-.171
X6	.630	.204	.448	.481
X7	.554	.564	-.600	4.221E-02
X8	.374	.612	.223	.524
X9	-.870	-2.63E-02	.369	.291

模型: 主成分分析.

通过观察表 16、17, 可以看出当表中特征值大于 1 时, 前 4 个主成分累计方差贡献率  $E=94.311\%$ , 大于 80%, 即这 4 个主成分所包含的信息基本可以反映原有指标的信息, 因此我们取前 4 个主成分作为小麦产量的综合影响因子代替原来的 9 个影响因子指标。相应主成分表达式如下:

$$F_1=0.4X_1+0.172X_2+0.446X_3-0.869X_4+0.934X_5+0.63X_6+0.554X_7+0.374X_8-0.87X_9$$

$$F_2=-0.895X_1-0.821X_2-0.0269X_3+0.326X_4+0.108X_5+0.204X_6+0.564X_7+0.612X_8-0.0263X_9$$

$$F_3=-0.0671X_1-0.271X_2+0.707X_3-0.348X_4-0.274X_5+0.448X_6-0.6X_7+0.223X_8+0.369X_9$$

$$F_4=0.138X_1+0.379X_2-0.487X_3+0.01363X_4-0.171X_5+0.481X_6+0.04221X_7+0.524X_8+0.291X_9$$

表 18:  $F_i$  参数值

Table 18: The parameter values of  $F_i$

Year	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	Y/(吨)
1994	98982	132428	-83751	47695	248457
1995	113025	142003	-88120	52367	249928
1997	140531	170659	-114805	56883	275515
1998	139740	161325	-102132	58570	291684
1999	156212	175997	-113917	62026	288922
2000	167251	185503	-125371	61855	263864
2001	156038	158563	-94438	61632	184737
2002	157714	162742	-102855	59289	174388
2004	158783	153905	-90146	59708	168727
2005	216704	237669	-185289	62811	255895
2006	226687	243613	-190387	64124	243179

通过 SPSS 软件对主成分  $F_i$  与小麦产量  $Y$  (相关参数如表 18 所示) 进行多元回归分析求解, 输出结果如表 19、20、21。

表 19: 模型概述表

Table 19 Model summary diagram

模型	R	R 平方	校正 R 平方	变化统计				
				R 平方变化	F 变化	自由度 1	自由度 2	Sig. F 变化
1	.960 <sup>a</sup>	.922	.869	.922	17.651	4	6	.002

a. 预测器: (常数), F4, F3, F1, F2

表 20: 方差分析表

Table 20 Analysis of variance diagram

模型		平方和	自由度	均方	F	Sig.
1	回归	1.8E+10	4	4554097645	17.651	.002 <sup>a</sup>
	残差	1.5E+09	6	258013440		
	总计	2.0E+10	10			

a. 预测器: (常数), F4, F3, F1, F2

表 21: 偏回归系数表

Table 21 Partial regression coefficient diagram

	未标准化系数		标准化系数	t	Sig.	系数B 95%置信区间		相关性			共线性统计	
	系数B	标准误差	系数2			下界	上界	零阶	部分	局部	容忍度	方差膨胀因子
常数	-343690	122604		-2.803	.031	-643690	-43689					
F1	-5.238	.693	-4.471	-7.555	.000	-6.934	-3.542	-.068	-.951	-.863	.037	26.823
F2	18.466	13.641	14.814	1.354	.025	-14.911	51.844	.201	.484	.155	.000	9172.09
F3	11.850	11.450	9.874	1.035	.041	-16.166	39.867	-.245	.389	.118	.000	6972.44
F4	-7.325	16.377	-.810	-.447	.067	-47.399	32.748	-.082	-.180	-.051	.004	251.244

由表 19 可以看出模型相关系数  $R$  的绝对值为 0.960, 说明自变量与因变量之间有较好的相关性。此外决定系数  $R^2$  的值为 0.922, 反映出模型的总体回归效果较好。表 20 是整个回归方程的显著性检验结果,  $F=17.651$ ,  $P=0.002$ , 说明差异有显著性意义, 即此多元线性回归方程有成立的必要性。表 21 是关于回归系数及显著性检验的计算结果, 偏回归系数表中常数项、 $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  系数的显性概率均小于 0.05,  $F_4$  系数的显性概率接近 0.05, 说明其

均存在显著性差异，符合 T 检验标准，应出现在回归方程之中。

结合 SPSS 回归分析结果，列出线性回归方程：

$$Y' = -343690 - 5.238F_1 + 18.466F_2 + 11.850F_3 - 7.325F_4 \quad (3-2)$$

利用式 3-2 结合表 14 中 2007 年统计数据，对即墨 2007 年小麦产量 Y' 进行预测，预测值与真实值相对误差绝对值为 9.38%（表 22），说明预测模型具有良好的模拟效果。

表 22：实际产量、预测产量及其相对误差值

Table 22: The relative error between real production and forecasted production

Year	Y':预测产量 / (吨)	Y:实际产量 / (吨)	相对误差 / (%)
2007	243270	222399	-9.38

同时利用式 3-2 与表 18 中相关统计数据，对即墨市往年小麦产量进行估算，结果如（图 7）：

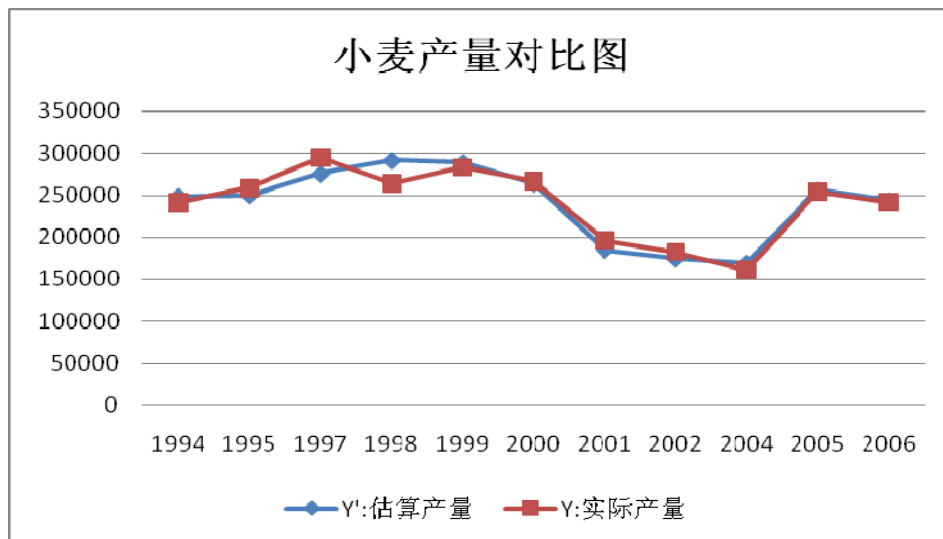


图 7 小麦估算产量与实际产量对比图

Fig 7 Wheat yield comparison diagram

### 3.2.3 秸秆量估算

目前国内外在农作物秸秆资源量的计算方面，主要采用谷草比经验算法，即农作物产量乘以相对应的谷草比可求得此类作物的秸秆资源量。

$$T_i = Q_i * r_i^{[47]} \quad (3-3)$$

$Q_i$  为第 i 类农作物产量， $r_i$  为第 i 类农作物谷草比， $T_i$  为 i 类农作物秸秆产量。

小麦和玉米秸秆是即墨市农作物秸秆资源主要组成部分，占总秸秆量的 90% 以上，由



上述多元线性回归模型式 3-1、3-2 可以预测出 2007 年即墨市的玉米产量与小麦产量分别为 226586 吨和 243270 吨，通过式 3-3 可得出 2007 年即墨市小麦与玉米秸秆资源总量约为 785479 吨，与实际值相差仅 0.74%。

### 3.3 小结

本节利用主成分分析法与多元线性回归分析法建立了即墨市小麦与玉米产量的预测模型，并完成了对 2007 年即墨市小麦及玉米秸秆资源总量的模拟估算。

分析结果表明基于主成分分析法的多元线性回归模型与实际农作物产量拟合较好，2007 年小麦与玉米产量的预测值与真实值的相对误差绝对值均小于 10%。小麦的往年产量模拟值与真实值的相对误差绝对值均小于 10%，玉米除 1992 年与 1997 年外相对误差绝对值也均保持在 8%以下。2007 年小麦与玉米的秸秆资源总量与实际值的相对误差值仅为 0.74%。

综上可知多元线性回归模型在小区域内的应用效果较为突出，可较好完成小型区域内单一农作物秸秆资源量的预测工作，为解决生物质资源瓶颈问题提供技术支持。秸秆资源量的确定同时为秸秆电厂原料的收集、运输、储存等秸秆资源化利用问题的解决提供了数据基础。

## 4 20MW 秸秆电厂原料最优路径分析——以即墨市为例

### 4.1 生物质秸秆电厂

#### 4.1.1 秸秆电厂选择

何张陈等研究报告的分析结果表明：在秸秆资源丰富的农业种植区适合建立秸秆直燃发电与混燃发电项目，而生物质气化发电对原料的要求较苛刻，主要是颗粒状的稻壳、木屑等，辅助少量的稻草等秸秆，所以此类电厂项目适合建设在粮食加工业比较发达的地区<sup>[34]</sup>。

即墨市全境农作物秸秆资源丰富，小麦与玉米秸秆资源占总资源 90%以上，同时粮食加工也较为发达。本文由发电技术成熟性出发，结合即墨当地实际情况，拟选择在即墨市建立 20MW 生物质秸秆气化发电厂为研究对象。该秸秆发电厂一般由 4×4MW 流化床气化炉、36×500kW 燃气内燃机组、4×9.5t/h 饱和汽余热锅炉及 4×500kW 螺杆膨胀发电机组构成，总装机容量为 20MW。每年发电量约为  $1.3 \times 10^8$ Wh，气化炉效率 78%、内燃机效率 30%、汽轮发电机效率 24%、系统总效率 28%，可实现年运行 6000h，年消耗各类农作物秸秆原料约 18 万吨。

#### 4.1.2 秸秆电厂设立原理

基于保证稳定水电资源供给、交通运输便利、方便就地取材、节约生产总成本，本文拟选定秸秆电厂厂址位于即墨城区附近县级公路交界处。（图 8）

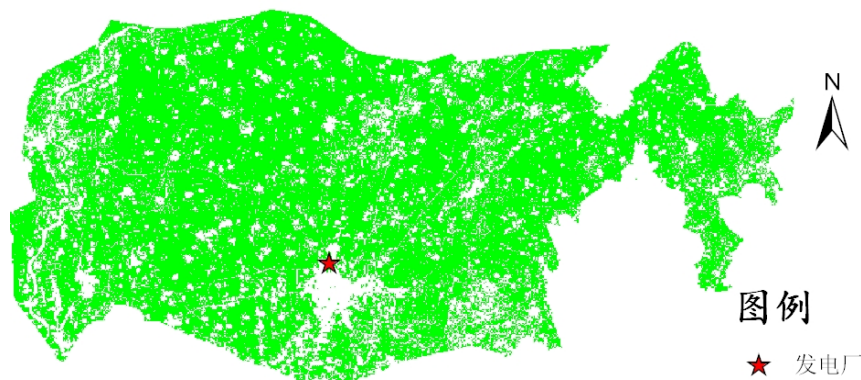


图 8 秸秆电厂厂点标识图

Fig 8 Power plant location plot

## 4.2 结合 GIS 方法的最优收集路径分析

目前国内外基于 GIS 的最优路径分析功能主要包括 Dijkstra 及其改进算法、GIS 栅格分析、层次分析法结合栅格模型、以及直接利用 ArcGIS 的网络分析等方法实现，其中 Dijkstra 算法能适应 GIS 中的网络拓扑的变化，性能稳定，在网络拓扑路径选择以及 GIS 中得到广泛的应用。在实际应用中 Dijkstra 算法多用于计算一个源节点到其他所有节点的最短代价路径，它是按路径长度递增的次序来产生最短路径的算法，其编程思路相对复杂，对于不熟悉 Dijkstra 算法及其语言的用户较难完成。其他方法如直接利用 ArcGIS 的 Network 扩展模块生成最短路径虽然简单直观，但存在不能进行批量处理的不足，随着分析点的增加计算量也成几何级数增加。

本文直接运用 ArcGIS 中 ModelBuilder 功能建立最优化路径分析模型，模型的路径分析模块基于原有 Dijkstra 算法以起始点为中心向外层扩展访问节点直至终点的工作原理<sup>[48-50]</sup>，实现点与点之间的最短路径分析并间接生成脚本，引入 Python 语言工具<sup>[26]</sup>利用其脚本功能完成数据的批量处理，从而实现复杂的空间分析功能（图 9）。本研究较传统的编程算法简化了编程思想，以模型形式可更为直观的展现用户设计思路，用户只需掌握 Python 的基本语法即可进行项目的设计。同时利用批量处理功能，可解决 ModelBuilder 无法自身循环的不足，有效降低工作量与工作时间。

本文以青岛即墨市为例，通过 ERDAS 和 ENVI 遥感图像处理软件对相关地理数据进行预处理加工，运用 ArcGIS 的模型手段和 Python 语言的脚本功能实现点对点最短路径的自动判别，完成对即墨市拟建 20MW 秸秆发电厂的原料最优收集运输路线分析，并结合即墨市相关统计资料和经验数据，推算出秸秆发电厂的原料运输总成本。（图 10）

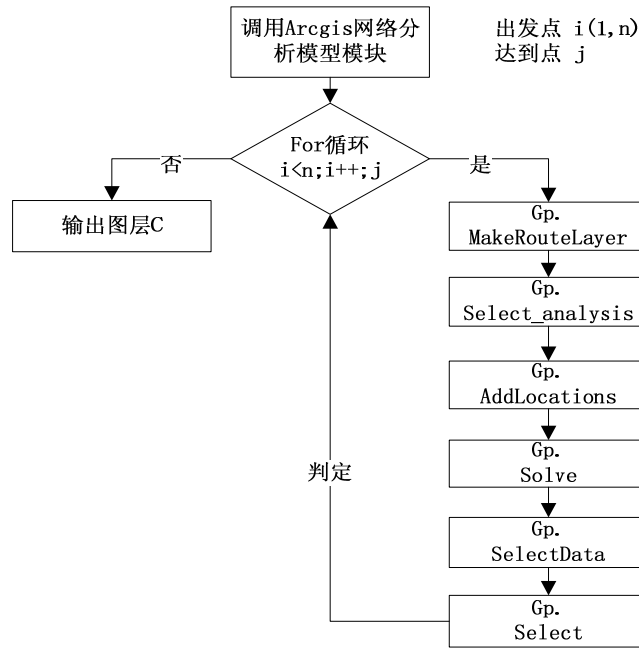


图 9 Python 批处理流程图

Fig 9 Flow Chart of batch process by python

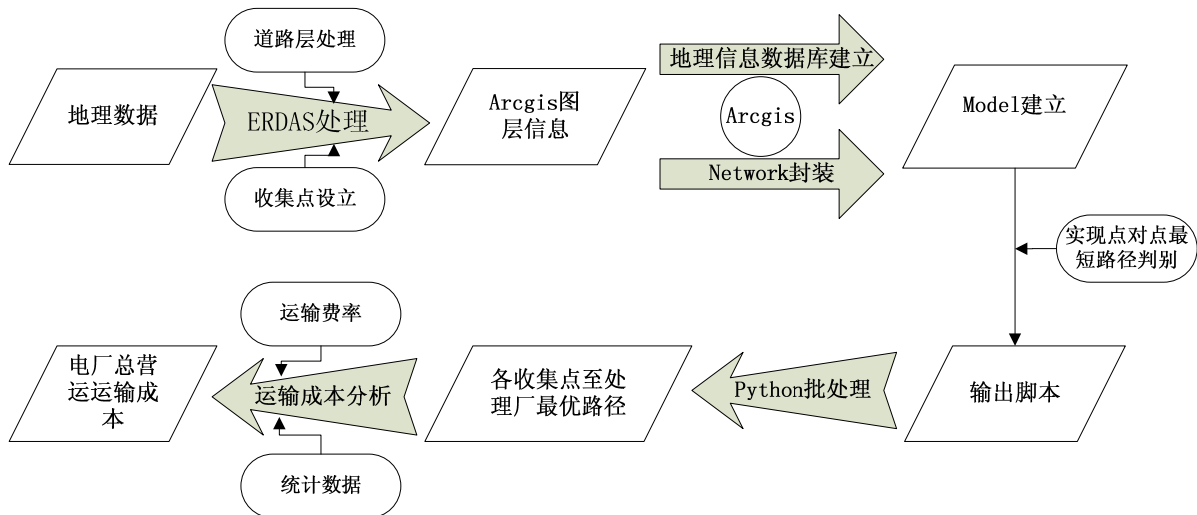


图 10 基于 GIS 模型的即墨市最优化路径分析与运输成本计算过程

Fig 10 Path optimization and transportation cost analysis of Jimo based on a GIS model

#### 4.2.1 数据来源

本文数据由统计数据与地理数据组成。统计数据来源于青岛 2007 年统计年鉴，地理数据则包括卫星影像、行政界线区划图、交通运输图与植被分布图，分别来源于 Landsat tm

卫星影像 2006 (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu/index.shtml>)、全国乡镇界线图、黄河流域 1:100 万交通数据库图 (2005) (<http://www.geodata.cn/Portal/>) 与山东省 1:100 万植被分布图 (2000)。

由统计数据可知即墨市占地总面积为 1727km<sup>2</sup>，农作物秸秆资源主要来源于小麦、玉米、花生与地瓜的秸秆收集，其中小麦与玉米秸秆占秸秆总量的 90%以上。本文利用即墨市 2006 年小麦、玉米、花生与地瓜产量结合对应农作物谷草比 (表 23)，估算出即墨市 2006 年主要农作物秸秆总资源量 T 约为 76 万吨，假设其均可用较好收集并可用作秸秆发电，式 (4-1)。

$$T = \sum_{i=0}^3 Q_i r_i \approx 76 \text{ 万吨}^{[47]} \quad (4-1)$$

$Q_i$  为第  $i$  类农作物产量， $r_i$  为第  $i$  类农作物谷草比， $T$  为农作物秸秆资源总量， $0 \leq i \leq 3$ ；

表 23: 即墨市相关农作物参数

Table 23: The crop parameters of Jimo

作物	作物产量/ ton	谷草比	秸秆热值/MJ/kg(自然风干)
小麦	243179	1:1.366	15.36
玉米	178762	1:2.000	15.54
花生	88246	2:1.000	约 14.90
地瓜	26815	1:1.000	约 14.84

数据来源：青岛市 2006 年统计年鉴及相关资料<sup>[29, 51, 52]</sup>

基于收集运输成本与运输效率的不同，本文将秸秆资源的收集运输过程分为如下两步：第一步是对于资源密集区按一定面积的正方形区域进行收集，并运输至位于其几何中心的秸秆收集点进行集中存储——即单位收集区域内资源到收集点的收集运输过程；第二步是将每个秸秆收集点所存储原料运输至秸秆发电厂的过程。

基于收集运输方式的不同，同时为满足即墨市电力输出，20MW 规模的秸秆电厂农作物秸秆年均需求量  $Q$  约 18 万吨 (秸秆电厂原料消耗量按每天消耗 600 吨秸秆资源，每年运行 6000 小时计)<sup>[53-55]</sup>，对收集运输过程做如下假设：

(1). 农作物秸秆资源的生产周期以年为单位，且保证秸秆资源可良好储存；忽略秸秆种类的不同：即墨市主要农作物秸秆来源包括玉米、小麦、花生与地瓜四类，玉米秸秆与小麦秸秆占秸秆总量的 90%以上。在自然风干情况下，四类产品湿度与热值基本相同，即可将其视为同一产品供秸秆发电厂进行处理。(表 23)

(2). 即墨市境内每个正方形收集区域面积为 9km<sup>2</sup>，秸秆资源在收集范围内平均分布，将作物种植面积扩展到整个收集区域，保持区域内的资源总产量不变，且忽略不同收集区

间的经济差异，区域内秸秆资源有效收集率为 0.9，单一收集区域有效收集量  $M = \frac{T}{186} \times 0.9 \approx 3677$  吨（表 26）。忽略省级道路、县级道路级别差异，且只计算车辆载重时的单向运输成本。

#### 4.2.2 最优运输路径分析过程

##### (1).数据预处理

##### 1).坐标系转换

本文在 ArcGIS 环境下运用 Arc toolbox 中 Data Management 的坐标转换功能对 TM 卫星数据、交通道路数据、政界区划图及植被分布图进行投影坐标转换，使其处于同一坐标体系之中。投影参数如下，（表 24）

表 24：坐标投影参数

Table 24: Coordinate project parameter

参数项	参数值
Projection	Transverse_Mercator
False_Easting	500000.000000
False_Northing	0.000000
Central_Meridian	117.000000
Scale_Factor	0.999600
Latitude_Of_Origin	0.000000
Linear Unit	Meter
Datum	D_WGS_1984

##### 2).图像裁剪预处理

为将研究范围缩小至青岛即墨市，本文运用 ERDAS 图像处理工具进行图像初始处理，利用其预处理工具中 AOI 模块的热点区域功能将 TM 卫星数据、黄河流域交通数据与全国乡镇界限图进行裁剪叠加，（图 11）并将道路层数据存为线层数据 B。

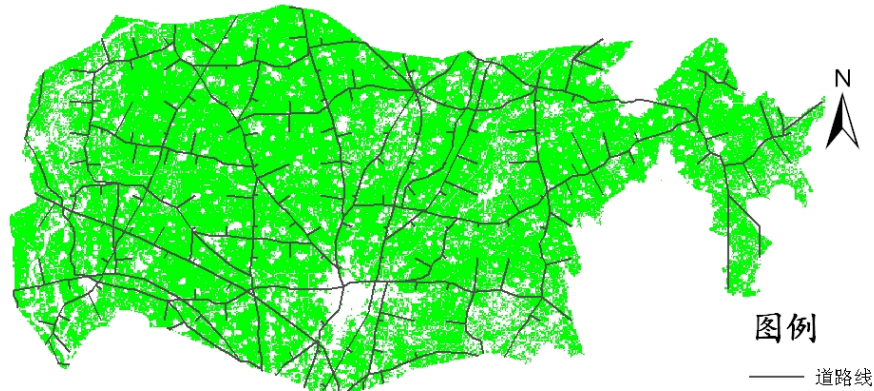


图 11 图像裁剪预处理结果图

Fig 11 Image preprocessing result plot

### 3). 图像加工处理及收集点设立

基于即墨市农作物资源分布密度较大，本文通过即墨市农业局提供信息结合当地实际情况，利用 ArcGIS 软件中 workstation 组件的 fishnet 功能完成对于上述剪接图像的鱼网格分布处理，初步设立面积为  $9\text{km}^2$  正方形区域作为局部秸秆收集单元，共计 338 个分布于即墨全境，每一正方形的几何中心为其局部资源收集点。

由于城区、森林、河流等区域不存在农作物的大面积种植情况，位于该区域的收集单元将会对研究产生干扰，本文利用 ERDAS 软件的分类模块工具按照色差原则对即墨市的 TM 卫星数据进行分类处理，同时结合山东省植被分布图去除位于城区、森林、河流附近的干扰收集区域，最终确定 186 个有效收集区域，将其几何中心的收集点存为点层数据 A。

将 A、B 层叠加，为完成原料从区域收集点到秸秆电厂的运输，必须保证 A 层中所有收集点均与道路线相连接，本文引入 A 层中每一收集点到最近道路线的垂线段作为运输路径，（由于此类垂线段运输距离较短，均在 0.1—3.0 公里以内，即可忽略曲折因子进行此种假设），将垂线段路线存于道路数据层 B 中。

为保证正确计算最优路径，本文提取每两条相交线段的交点作为路径节点。但当两条以上交线交于同一点时，将在同一点位置处产生重复的路径节点，导致模型在选择最优路径时产生无法正确识别路径节点的问题。

为克服上述方法存在的不足，本文从空间检索思路出发，利用 ArcGIS 环境中自带的 VBA 平台进行程序编写，解决了两条以上交线交于一点所产生的重复交点问题。

完成去重复点工作后，将收集点与去重复点后的交点数据一并存入点层数据 A 中，并添加字段名 Z 用于标识不同点数据，令收集点 Z 值为 2，交点 Z 值为 1，将厂址点字段 Z 标记为 Z=0。数据处理结果如（图 12）



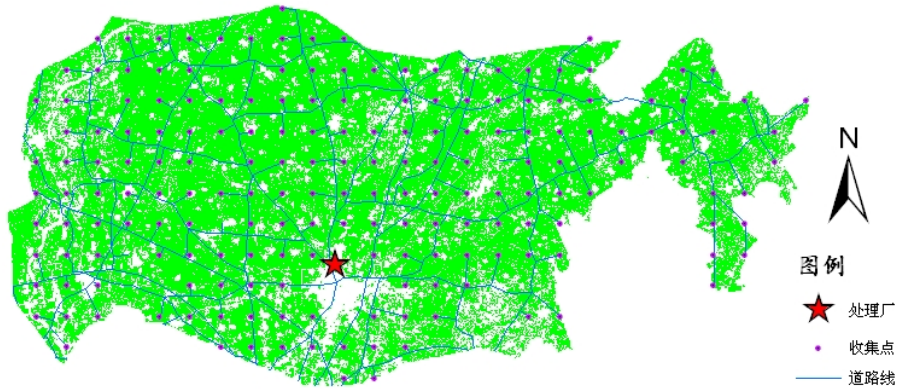


图 12 地理数据处理结果

Fig 12 Geographic data result plot

## 2. 收集点到秸秆电厂之间的最优路径选择

本文提出在 ArcGIS 工作环境中，建立网络结构，利用软件 ModelBuilder 功能建立最优收集模型，完成两点之间的最优路线选择，具体过程如下：（图 13）

在 ArcGIS 工作环境中，首先进行网络的构建与网络要素数据集的加载，将 A、B 层输入至 Personal Geodatabase 再通过 Network Dataset 完成各层数据的封装，形成网络数据集，此时网络数据集中不仅包括了线状要素、点状要素，还包括了拓扑关系、空间属性和状态属性等内容，可实现网络分析功能。同时结合 ArcToolbox 中相关的模块命令建立分析模型：

- (1). 利用 Make route layer 模块对封装的线层 B 进行线层处理；
- (2). 利用 Select 模块在 A 层中任意选出一处收集点及厂点；
- (3). 利用 Add locations 模块将上述处理结果进行叠加；
- (4). 利用 Solve 模块进行最优路径选择并保存；
- (5). Select Data 模块选中线层数据；
- (6). Select 模块将最优路径从线层数据中选出。

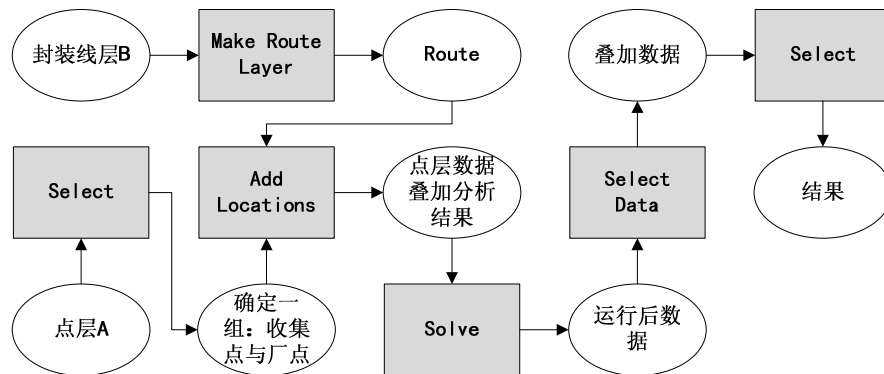


图 13 点到点最优路径分析模型



Fig 13 Point-to-point path optimization model

利用上述模型分析方式，通过点与点之间的路径生成，可完成单一收集点到秸秆电厂间的最优距离判别与计算，但 ModelBuilder 工具每次只能完成单一路径判断，存在无法实现基于多点的最优路径的自动循环计算功能。

为解决上述问题，本文引入 ArcGIS 中自带 Python2.4 的脚本功能，结合 model 输出的脚本信息与 toolbox 中必要的网络分析模块命令，实现基于 ArcGIS 环境的模型数据批处理，完成每个收集点到厂点的最优路径计算。具体步骤如下：

(1).运行 Python2.4，引入 sys、string、os、arcgisscripting 命名空间。

(2).创建 arcgisscripting 对象；利用 Check Out Extension 方法验证网络分析许可，加载 arctoolbox 中 Network Analyst、Data Management、Analysis Tools、Conversion Tools 等模块；加载个人数据库网络要素数据集，包括线数据与点数据。

(3).利用 for 循环语句，结合上述 Modelbuilder 工具所实现的单一最优距离分析功能，完成 186 个收集点分别到电厂的最优距离计算。代码如下：

```

1. import sys, string, os, arcgisscripting
2. gp = arcgisscripting.create()
3. gp.CheckOutExtension("Network")
4. gp.AddToolbox("f:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Network Analyst Tools.tbx")
5. gp.AddToolbox("f:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Data Management Tools.tbx")
6. gp.AddToolbox("f:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Analysis Tools.tbx")
7. gp.AddToolbox("f:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Conversion Tools.tbx")
8. net_ND = "f:\\workspace\\network.mdb\\net\\net_ND"
9. jion_point = "f:\\workspace\\network.mdb\\net\\jion_point"
#执行循环
10. for i=491 j in range(1,199)
11. if i<>j:
12.     jion_point_select = "f:\\workspace\\network.mdb\\net\\jion_point_sel_" + str(i) + "and" + str(j)
13.     Route = "Route" + str(i) + "and" + str(j)
14.     Routes = Route + "\\Routes"
15.     gp.MakeRouteLayer_na(net_ND, Route, "length", "FIND_BEST_ORDER","PRESERVE_BOTH",
        "NO_TIMEWINDOWS", "length", "ALLOW_UTURNS", "", "NO_HIERARCHY", "", "TRUE_LINES_
        WITH_MEASURES", "")
16.     gp.Select_analysis(jion_point, jion_point_select, "[OBJECTID_1]=" + str(i) + "OR [OBJECTID_1]=" + str(j))
17.     gp.AddLocations_na(Route, "Stops", jion_point_Select, "", "5000 Meters", "", "I SHAPE;jion_point
        SHAPE;net_ND_Junctions NONE", "MATCH_TO_CLOSEST", "APPEND", "NO_SNAP", "5 Meters")
18.     gp.Solve_na(Route, "SKIP")
19.     gp.SelectData_management(Route, "Routes")
20.     gp.Select_analysis(Routes, test_shp, "")

```

将处理后的路线数据存为线层数据 C，并通过 Attribute 的 Total\_length 字段对路线距离进行排序（图 14），由上述假设可知每一收集点平均获得秸秆资源量 M 为 3677 吨（表

26), 为满足秸秆电厂的正常运行,  $N = Q / M = 48.9 \approx 49$ , 所需 49 处收集点进行资源供给, 选取图 14 中前 49 条路径为秸秆电厂所需秸秆资源量的最佳运输路径 (图 14、15)。

FID	Shape *	Name	Total leng
126	Polyline M	Location 1 - Location	2175.722307
147	Polyline M	Location 1 - Location	5526.234217
146	Polyline M	Location 1 - Location	5875.614557
99	Polyline M	Location 1 - Location	6560.531637
145	Polyline M	Location 1 - Location	6829.337337
125	Polyline M	Location 1 - Location	6928.450544
112	Polyline M	Location 1 - Location	7238.79954
169	Polyline M	Location 1 - Location	7629.106007
127	Polyline M	Location 1 - Location	7848.733986
168	Polyline M	Location 1 - Location	8932.812265
164	Polyline M	Location 1 - Location	9106.839031
167	Polyline M	Location 1 - Location	9713.292724
113	Polyline M	Location 1 - Location	9787.592055
170	Polyline M	Location 1 - Location	10344.627768
111	Polyline M	Location 1 - Location	10372.505415
100	Polyline M	Location 1 - Location	10664.288535
148	Polyline M	Location 1 - Location	10683.271452
144	Polyline M	Location 1 - Location	10717.673759
97	Polyline M	Location 1 - Location	11221.097257
153	Polyline M	Location 1 - Location	11341.57562
124	Polyline M	Location 1 - Location	11454.742492
6	Polyline M	Location 1 - Location	11521.913456
5	Polyline M	Location 1 - Location	12359.383808

图 14 最优收集路线排序表

Fig 14 Table list of the candidate route

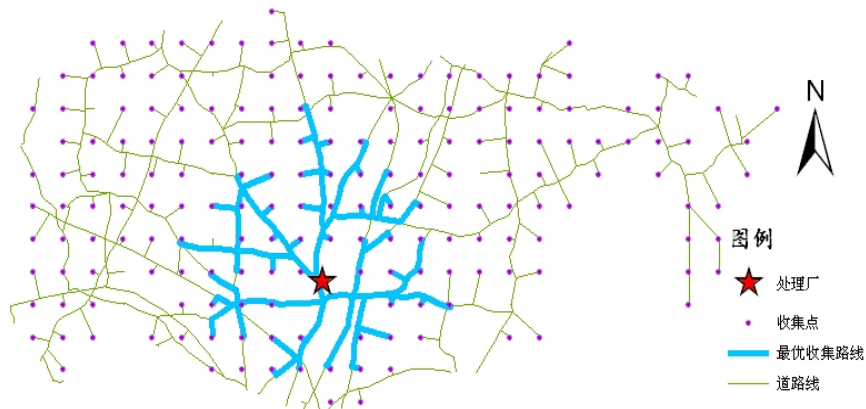


图 15 最优运输路线及其收集点

Fig 15 Illustration of the collection spot and the optimal transportation route

#### 4.2.3 收集运输成本计算

秸秆电厂的原料成本主要包含：原料购买成本、运输成本与其他费用成本。其中运输成本可变性最大，正确的设立秸秆资源收集方式与动态最优化的选择运输路线可极大减少秸秆电厂的原料成本，从而降低电厂运行总成本。

秸秆的收集运输包括：单位收集区域内到收集点，收集点到秸秆电厂两个运输过程，由于运输工具及运输方法的不同，运输成本互异。

## (1).单位收集区域内到收集点的运输过程:

此过程使用普通 195 农用拖拉机及牛车等小型运输工具, 根据即墨市农业局提供相关数据, 运输耗油率经折算约为  $0.025\text{L}/\text{t}\cdot\text{km}$  (表 25)。为方便单位收集区域内运输成本计算, 本文做如下近似处理: 作正方形的内切圆, 将正方形收集区域近似为圆形收集区域, 并保持区域内的秸秆资源均匀分布且总量不变, 收集面积由  $9\text{km}^2$  缩小至约  $7.07\text{km}^2$ 。利用定积分微元法 (图 16), 计算运输成本如下:

$$Y' = \int_0^R 2\pi\alpha kr^2 dr = \frac{2\pi\alpha kR^3}{3} \quad (4-2)$$

其中  $\alpha = M / 7.07 = 519.8 \text{ t}/\text{m}^2$  为收集区域可收集秸秆密度,  $k=0.1525 \text{ 元}/\text{t}\cdot\text{km}$  为单位距离收集成本,  $Y'$  为单个收集点收集成本。49 个最佳收集点区域内运输总成本为

$$Y_1 = \sum Y' = 49 \times Y' \approx 27400 \text{ 元} \quad (4-3)$$

表 25: 相关运输参数取值

Table 25: Parameters involved in transportation

运输工具种类	运输油耗率/ $\text{L}/(\text{t}\cdot\text{km})$	单位油价/ 元/L	单位距离收集成本/ $\text{元}/\text{t}\cdot\text{km}$
农用卡车	0.060	90#汽油 5.66	$k=0.3396$
普通 195 拖拉机或牛车	0.025	0#柴油 6.10	$K_1=0.1525$

数据来源: 即墨农业局及相关资料<sup>[29]</sup>

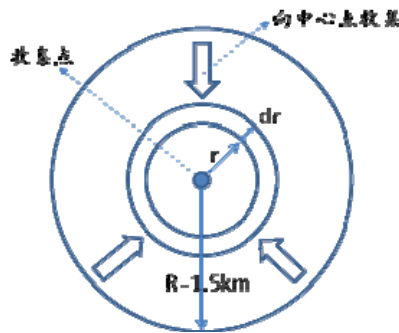


图 16 收集区域到收集点的运输过程

Fig 16 Transportation procedure of the regional collection

## (2).收集点到秸秆电厂的运输过程:

此过程以农用卡车 (使用 90 # 汽油, 当地油价 5.66 元/升) 作为运输工具, 油料费用折合为  $0.06\text{L}/(\text{t}\cdot\text{km})$  (表 25)。

邢爱华等研究报告表明在秸秆密度和收集量一定的情况下，运输成本与运输距离成正比，密度越低，运输距离对收集运输成本的影响越大；另外秸秆压缩与否对于总成本的影响与运输距离同样有着密切关系<sup>[29]</sup>。由上述研究资料可知，在原料收集点到秸秆电厂的运输过程中，运输距离在 30km 以内秸秆适于不压缩运输，当运输距离大于 30km 秸秆压缩处理后运输成本较不压缩时下降很多，所以本文规定在收集点到秸秆电厂运输环节，当最短运输距离小于 30km 时不做压缩处理（未压缩时所收集的秸秆密度约为 0.1t/m<sup>3</sup>）；当运输距离大于 30km 时在收集点将对秸秆进行压缩处理后再运往秸秆电厂。此过程运输成本为：

$$Y_2 = M \times K_1 \times \sum_i L_{1i} + M \times K_2 \times \sum_i L_{2i} \quad (4-4)$$

其中  $Y_2$  为收集点到秸秆电厂运输总成本， $K_1$  为未压缩运输成本， $K_2$  为压缩处理后运输成本， $L_{1i}$  表示收集点到电厂最优路径小于 30km 的路线， $L_{2i}$  表示收集点到电厂最优路径大于 30km 的路线。由图 14 可知，本文所选 49 处最佳收集点中，到秸秆发电厂的最长运输距离为 16.98km，所以运输方式均选择不压缩直接运输

$$L = \sum_{i=1}^{49} L_{1i} = 578.9 \text{ km} \quad (4-5)$$

总运输距离为 578.9km（表 26）。推出，

$$Y_2 = M \times K_1 \times L \approx 72.228 \text{ 万元} \quad (4-6)$$

综上所述（图 17），即墨市 20WM 秸秆电厂的最优运输总成本为  $Y = Y_1 + Y_2 \approx 75$  万元。

表 26：相关参数取值

Table 26: Value of the relevant parameters

相关参数	取值
即墨市 2006 年秸秆总量 T	76 万吨
单一收集点秸秆资源量 M	3677 吨
秸秆电厂原料年均消耗量 Q	18 万吨
运输总长度 L	578.9 千米

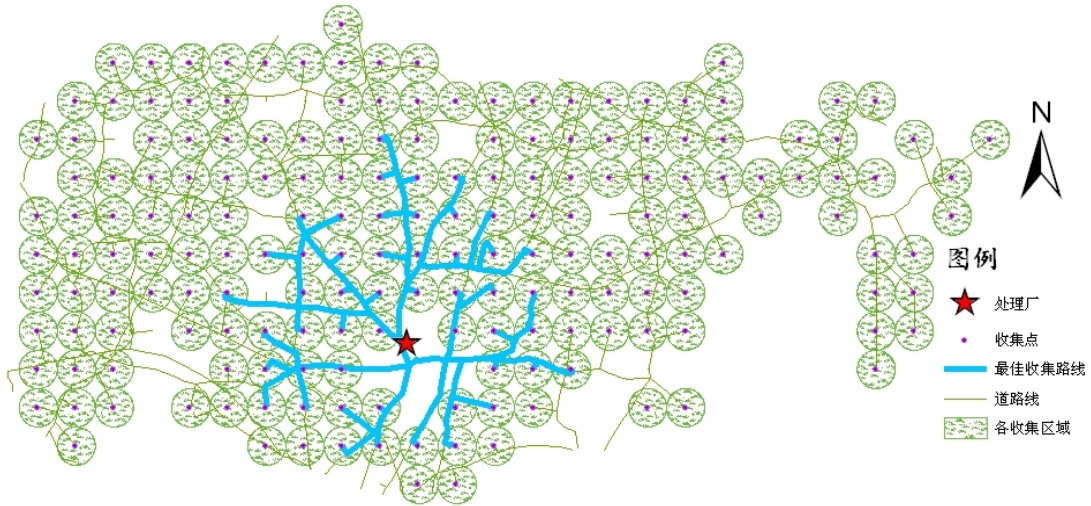


图 17 即墨市秸秆电厂原料收集运输图

Fig 17 Raw material collection and transportation of Jimo straw-fired power plant

### 4.3 小结

上述工作利用 ArcGIS 的 Model Builder 建立了最短路径分析模型，并结合 Python 语言脚本功能实现了模型数据的批量处理，解决了 ArcGIS 中 Network analysis 无法实现循环处理的缺陷，实现了对即墨市原料需求量约 18 万吨的 20MW 秸秆发电厂最优收集点及最佳运输路线的选取，并结合单位区域内到收集点、收集点到厂点的两步收集运输方式，得出原料总运输成本为 75 万元的结论。同时，实现了秸秆运输路线选择中基于地图数据的动态化模拟，并可根据秸秆电厂消耗秸秆能力的变化动态选择最优路径的收集区域，进行最佳收集点的判断与设立。

在秸秆的资源化利用过程中，结合 ArcGIS 的空间分析功能不仅可为探索区域生物质资源的收集与综合利用提供科学指导，同时为合理选择运输路径、有效控制运输成本提供了技术支持，为秸秆电厂厂址选择、动态需求量最优路径模拟、碳循环分析、经济成本预算等方面提供了基于空间思想的解决思路。

## 5 20MW 秸秆气化发电厂经济分析与 CO<sub>2</sub> 排放评估

### 5.1 秸秆电厂碳循环分析与 CO<sub>2</sub> 排放量估算

#### 5.1.1 农作物碳吸收以及 CO<sub>2</sub> 排放

近几十年来人类活动、农林资源和矿物燃料的过度消耗，致使二氧化碳等温室气体排放量急剧上升，由此引起的温室效应将对农作物生产产生间接和直接的影响。实验研究表明，随着大气二氧化碳浓度的上升，将不同程度地促进作物光合作用、干物质积累和产量的提高，作物对大气中二氧化碳的吸收量必然随之增长<sup>[56]</sup>。此时加大对农作物秸秆等相关生物质资源的能源化利用，不仅可解决目前能源供需紧张的矛盾，同时也具有良好的生态效益。

农作物秸秆燃烧所排放的二氧化碳主要来源于农作物本身通过光合作用所固定的大气中的 CO<sub>2</sub>，不同作物在生长期对 CO<sub>2</sub> 的吸收量各不相同，由于作物的生物产量和经济产量都是光合作用的产物，所以可根据作物产量和干物重来推算 CO<sub>2</sub> 的吸收量。由王修兰等的研究报告表明我国目前粮食单位面积的作物碳吸收量约为 4.38 (t/ha)，其中提供秸秆资源供应 70% 以上的水稻、高粱、玉米、小麦的单位面积碳吸收量分别为 5.87 (t/ha)、5.24 (t/ha)、5.08 (t/ha) 与 3.71 (t/ha) <sup>[56]</sup>。

同时由何珍<sup>[57]</sup>、王修兰<sup>[56]</sup>、谭支良<sup>[58]</sup>、冯超<sup>[59]</sup>等的研究报告可知，秸秆每产出 100kg 相对应的二氧化碳吸收量与释放量如表 27 所示：

表 27：秸秆 CO<sub>2</sub> 吸排量关系表

Table 27: Absorbing and releasing of CO<sub>2</sub> between different straws

秸秆种类 (/100kg)	吸收 CO <sub>2</sub> (/kg)	释放 CO <sub>2</sub> (/kg)
水稻秸秆	167.60	15.63
小麦秸秆	172.15	21.31
玉米秸秆	161.27	6.35

#### 5.1.2 秸秆焚烧过程 CO<sub>2</sub> 排放量测算

目前我国的秸秆利用率普遍偏低，秸秆资源存在大面积的浪费现象。在农村地区，由



于农作物抢收以及秸秆本身分布分散、密度小、难于收集储存运输的特性，导致人们除将部分作物秸秆作为生活燃料外，其余大部分均就地焚烧或用于肥田。秸秆的就地焚烧不仅会导致空气中总悬浮颗粒数量的明显升高，并产生大量含有 CO、SO<sub>2</sub> 等的有毒有害气体以及含有 CO<sub>2</sub> 等的温室气体，同时秸秆焚烧后还会使土壤表面温度增高，烧死大量的土壤微生物，土壤水分损失高达 65%—80%，同时使土壤板结耐旱、吸水保墒能力均大幅度下降。由王书肖<sup>[37]</sup>、曹国良<sup>[60]</sup>等的研究结果表明目前国内对秸秆露天焚烧的一次污染物排放量按照式 5-1 计算

$$U_i = Q \times EF_i \quad (5-1)$$

其中  $U_i$  为  $i$  类污染物排放量， $Q$  为秸秆总量， $EF_i$  为  $i$  类污染物排放因子。

表 28: 秸秆露天燃烧排放因子

Table 28: Emission factors for crop residue open burning

污染物	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NMVOC	CO	BC	OC	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	PM <sub>2.5</sub>
排放因子 (g·kg <sup>-1</sup> )	1 445	0.56	3.37	8.17	68.33	0.46	4.49	0.78	3.5	20.27

以即墨市 20MW 规模的秸秆发电厂每年 18 万吨的原料需求量（其中小麦秸秆与玉米秸秆各 9 万吨）为例，若此类原料秸秆资源全部就地焚烧<sup>[37]</sup>，由表 28 中数据及式 5-1 推算可知<sup>[60]</sup>，将产生约 26 万吨的 CO<sub>2</sub> 排放量。

### 5.1.3 生物质秸秆发电系统的碳循环分析

生物质秸秆发电系统的碳循环分析是将植物的光合作用到目标能源利用过程作为完整的系统，即对生物质能源循环系统中各个相对独立的碳消耗与循环过程进行综合考虑分析。采用生命周期评价方法，选定秸秆气化发电厂对秸秆利用的碳循环为分析目标，最终确定此过程中的总碳排放量以及净固碳能力的大小。

生物质碳循环的生命周期评价（以农作物为例）包括农作物从最初的生长直到转化为可利用能的全过程即全部生命周期<sup>[57]</sup>。本文选取作物生长、原料运输、秸秆转化利用三方面作为碳循环研究的对象模块。

在农作物生长阶段农田生态系统的碳平衡包括输入和输出两个过程，以输入输出差值 NEP（农作物生长过程的净固碳量）作为模块的研究对象，忽略凋落物与农田土壤呼吸作用只考虑农作物本身的净固碳量<sup>[57]</sup>。在原料运输阶段，主要考虑运输方式、运输距离和燃料种类等参数，用于计算运输生物质原料过程中所消耗的化石燃料向大气所排放的碳量。在秸秆转化利用方面，除考虑秸秆被转化时的碳排放，还要考虑秸秆电厂运行设备所消耗燃料的碳排放<sup>[57]</sup>。

本研究以即墨市 20MW 规模的秸秆气化发电厂为例，分析秸秆发电系统的碳循环过程

并进行净碳收支量计算。由第四章数据可知，即墨市 20MW 秸秆电厂所需原料约 18 万吨，按照小麦与玉米秸秆各 9 万吨计算，秸秆原料运输过程分为两步，单位区域内收集运输过程使用普通 195 拖拉机或牛车，按照零号柴油计算折合运输油耗率为 0.025L/(t•km)，收集点到秸秆电厂的运输过程考虑使用农用卡车，按照 0#柴油计算折合运输油耗率为 0.06L/(t•km)，且假设燃料完全燃烧。

(1).由冯超等研究报告可知产出 100kg 小麦秸秆将吸收 CO<sub>2</sub>172.15kg，释放 CO<sub>2</sub>21.31kg；产出 100kg 玉米秸秆，将吸收 CO<sub>2</sub>161.27kg，释放 CO<sub>2</sub>6.35kg<sup>[59]</sup>。（表 27）同理推算，1t 小麦秸秆的净碳固定量约 411.38kg，1t 玉米的净碳固定量约为 422.51kg。综合计算，18 万吨秸秆原料在生长过程中净碳固定总量约 75050.10t。

(2).秸秆原料运输过程的碳排量计算。过程 I：单位面积区域内运输的碳排放量，由式 4-3 可知此过程运输总费用为 27400 元，消耗柴油 4841L，由于柴油密度 ρ 为 0.85kg/L，含碳量为 85.55%，推出此过程碳排放量为 3520.2kg；过程 II：收集点至秸秆发电厂运输过程的碳排放量，由于 90#汽油含碳量数据不确定性较大，故选择柴油替代 90#汽油作为燃料，此过程运输总费用为 779073 元，消耗柴油 127716L，推出此过程碳排放量为 92872kg。

(3).秸秆利用过程中碳排量计算。此过程碳排放量由发电过程的碳转化排放量与粉碎干燥秸秆碳排放量两部分组成。综合何珍等研究报告的经验数据可知，20MW 秸秆电厂在发电过程碳转化排放量为 63270t，粉碎干燥秸秆的折算碳排量为 6444t<sup>[57]</sup>。

综上所述可知，20MW 秸秆气化发电系统其原料秸秆生长过程净碳固定量约为 75050.10t，系统总过程碳排放量约为 69810t，系统净碳收支量为 5240.1t。秸秆电厂总发电量约 1.38×10<sup>8</sup>kW•h，可知其单位发电量的碳排量约为 0.506kgC/kW•h，单位发电量的净碳收支量约为 0.038kg/kW•h。（表 29）

表 29：20MW 气化发电系统碳循环相关参数

Table 29: Relevant parameters in the carbon cycle of 20MW straw gasification power plant

规模 类型	原料 类型	发电过程	粉碎干	运输过程	生长过	发电	发电量	单位发电量	单位发电量
		碳转化排 放	燥过程 碳排量	碳排量	程净碳 固定量	效率		的碳排量	净碳收支量
		/t	/t	/t	/t	/%	/10 <sup>8</sup> kW•h	/kgC/kW•h	/kg/kW•h
20MW 气化	小麦 玉米	63270.0	6444.0	96.4	75050.1	28	1.38	0.506	0.038

### 5.1.4 20MW 秸秆电厂 CO<sub>2</sub> 减排量

20MW 秸秆电厂的投产使用，可完成理论发电量 1.5×10<sup>4</sup> 万千瓦时，按照厂用电率 8% 计算，可实现对外供电量约 1.38×10<sup>4</sup> 万 kW•h。按照国内一般火力发电厂每生产 1 度电消



耗约 350g 标煤，1 吨标煤约排放 2.6 吨 CO<sub>2</sub> 标准计算，20MW 规模秸秆发电厂较同等发电规模的火力发电厂可减少 CO<sub>2</sub> 排放约 12.56 万吨。

## 5.2 20MW 生物质气化发电的经济效益分析

本文选取 20MW 规模的秸秆气化发电厂作为研究对象，对其进行经济效益分析。

### 5.2.1 经济评价基本参数

20MW 秸秆气化发电厂各项指标参数如表 30。其中发电系统经济性影响因子包括发电效率、上网电价、原料价格、运输费用、固定成本等。

表 30：20MW 秸秆气化发电厂各项指标

Table 30: Indexes about 20MW straw gasification for power plant

项目指标	单位	数值
秸秆电厂容量	MW	20
年运行时间	h	6000
单位容量投资	万元/MW	900
设计运行年数	a	15
气化效率	%	78
发电效率	%	28
运行人员	人	100
年运行人员工资总量	万元/a	200
秸秆收集系数		0.9
秸秆原料用量	万吨	18
秸秆价格（预处理后）	元/t	200
+ 秸秆运输费用		
单位区域内运输费用	元/t · km	0.1525
收集点到电厂运输费用	元/t · km	0.3396
上网电价	元/KW · h	0.594
电厂设备维护费用	万元	200
每年交易排放量及补贴收入	万元	500
每年化肥收入	万元	150
内部基准收益率	%	8

数据来源：即墨市农业局、山东省物价局及相关资料<sup>[31]</sup>

用财务评价所需的基本参数表示，主要包括固定资产、运行成本和收益。

(1).固定资产：生物质气化发电所需的气化设备、发电设备以及基础建设等投资；

(2).运行成本：包括原料收购与收集运输成本，人员工资，维修费用等；

(3).运行收益：生物质气化发电厂发电收益与年发电量和销售电价有关，其中山东地区秸秆发电经由国家政策补贴后，上网电价为 0.594 元/千瓦时。（数据来源：山东省物价局）

### 5.2.2 相关经济评价分析

运用财务评价的方法，对 20MW 生物质秸秆气化的基本经济参数进行分析，估算该项目的投资回收期以及长期综合效益。

#### 5.2.2.1 投资回收期

投资回收期是使累计的经济效益等于最初的投资费用所需的时间，即指通过资金回流量来回收投资的年限。本文通过式 5-2，计算 20MW 秸秆发电厂的投资回收期<sup>[31, 36]</sup>

$$n_0 = \log_{1+r} \frac{1}{1 - \left( \frac{C_p + C_m + C_w + C_d - I_e - I_r - I_m}{I_e + I_r + I_m - C_m - C_w - C_d} \right)^r} + 1 \quad (5-2)$$

其中  $C_p$  为建厂一次性投入； $C_m$  为设备维修费用； $C_w$  为每年支付工资费用； $C_d$  为每年原料费用； $I_e$  为每年理论发电总收入； $I_r$  为每年交易污染建排量及其他补贴； $I_m$  为每年的肥料收入； $r$  为贴现率（按照投资收益率的经验估计）；

由表 17 与式 5-2 算得

$$\begin{aligned} n_0 &= \log_{1+r} \frac{1}{1 - \left( \frac{C_p + C_m + C_w + C_d - I_e - I_r - I_m}{I_e + I_r + I_m - C_m - C_w - C_d} \right)^r} + 1 \\ &= \log_{1+0.08} \frac{1}{1 - \left( \frac{18000+200+200+(3600+75)-8197-500-150}{8197+500+150-200-200-(3600+75)} \right)^{0.08}} + 1 \\ &\approx 4.26(\text{年}) \end{aligned}$$

即此 20MW 秸秆发电厂在正式投产发电约 4.26 年后才能取得较良好的经济效应，说明生物质发电的效率具有滞后性。

#### 5.2.2.2 长期综合效益

利用式 5-3 对秸秆电厂可持续发电的综合效益进行估算<sup>[36]</sup>

$$Y = (I_e + I_r + I_m - C_m - C_w - C_d) \times \left( 1 + \frac{1}{r} \right) - C_p \quad (5-3)$$

其中  $Y$  为长期综合收益，其它指标同上。

由表 17 数据与式 5-3 推算可知：

$$\begin{aligned} Y &= (I_e + I_{tr} + I_m - C_m - C_w - C_d) \times (1 + \frac{1}{r}) - C_p \\ &= (8197 + 500 + 150 - 200 - 200 - 3600 - 75) \times (1 + \frac{1}{0.08}) - 18000 = 46422(\text{万元}) \end{aligned}$$

此 20MW 秸秆发电厂的长期综合效益约为  $46422 \times 10^4$  元。

### 5.3 小结

本节以 20MW 秸秆气化发电厂为例，进行碳循环与相关经济效益分析，结果表明此类秸秆电厂可实现单位发电量的净碳收支量  $0.038\text{kg/kW}\cdot\text{h}$ ，正式投产运行发电约 4.26 年后可取得良好的经济效益，相对同等规模的火力发电厂可减少 CO<sub>2</sub> 量排放约 12.56 万吨。秸秆电厂的大规模应用，不仅可增加我国的能源供给，同时还对生态环境保护起到积极的推动作用。

## 6 结语

### 6.1 讨论

本文基于生物质能源在解决我国未来能源供需、效率利用、环境保护以及促进社会经济的可持续发展问题中的巨大潜力，指出了开发和利用生物质能源主要存在资源、技术和市场三个方面瓶颈，其中资源是技术和市场的前提与基础，生物质资源量以及原料的收集、储存和运输是目前研究的热点问题。同时，通过引进 GIS 等空间分析技术，介绍了其在生物质资源的空间分布、产量预测以及秸秆原料最佳的收集方式、运输路径、存储方案等方面的独特优势。

本文以青岛即墨市农作物秸秆资源产量预测及其原料收集、运输、利用为例，通过基于主成分分析的多元线性回归模型建立了即墨农作物产量预测模型，完成了对即墨市 2007 年的小麦与玉米产量预测以及 1992—2006 年期间 12 年的小麦与玉米产量同比估算，并结合其相应农作物谷草比算式对即墨市 2007 年小麦与玉米秸秆总量进行推算，约为 785479 吨，与实际产量值相差仅 0.74%。利用基于主成分分析的多元回归模型进行产量预测，可弥补直接运用多元回归方程对影响因子个数的限制与样本相对较少情况下拟合效果不佳的不足。同时利用 GIS 空间分析方法、Erdas 和 Envi 等遥感图像处理软件、ArcGIS 工作环境，通过 ArcGIS 功能组件 ModelBuilder 建立 Model 并间接生成脚本的思路，完成了基于空间思想的最优路径分析，结合 Python 语言的脚本批处理功能实现了对即墨市拟建 20MW 秸秆电厂所需原料的最优运输路径的批量计算以及整个运输过程中的总成本分析。此过程解决了 ArcGIS 中模型本身无法循环执行的不足，并对秸秆资源最短收集路径与有效收集成本进行了动态展示与估算，为秸秆电厂选址、原料收集运输提供了基于空间技术的合理规划。同时通过分析秸秆电厂的原料利用、废气排放以及相应的经济效益评估，证明了在即墨市设立 20MW 秸秆电厂的可行性。

进行生物质秸秆资源量预测，结合区域分布特征以及收集路径的分析与评估，能够正确引导并确定秸秆资源化利用的发展方向和趋势，节约运输成本，为解决秸秆资源供需矛盾与保护生态环境寻找科学方法。

同时本研究选取即墨市为研究对象，其所属的县级行政单位是中国地方二级行政区域，作为中国基础行政区域的县级行政单位一直是区域科学研究中的基本单位，本文对于即墨市农作物秸秆资源量估算、原料最优运输路径以及秸秆电厂设立的相关研究，可为今后生物质资源的区域资源化利用起导向作用。

## 6.2 结论

综上所述, 本文得出结论如下:

(1). 基于主成分分析的多元线性回归模型适于进行小区域内单一作物产量的预测, 2007年即墨小麦与玉米产量预测值与实际值的相对误差绝对值均保持在10%以内, 同时即墨市2007年小麦与玉米秸秆总量预测值与实际秸秆量相差仅0.74%, 证明模型具有较好的模拟效果。

(2). 基于 ArcGIS 软件环境、ModelBuilder 功能组件模型手段、Dijkstra 算法判定原理、Python 脚本批处理功能的即墨市秸秆原料最优收集运输路径的分析方法可以解决 ArcGIS 中网络分析无法完成循环处理的缺陷, 实现秸秆运输路线选择中基于地图数据的动态化模拟, 为未来生物质资源的空间化收集、运输、储存奠定了基础。

(3). 计算结果表明即墨市 2006 年农作物秸秆资源实际年产量约 76 万吨, 可满足 20MW 规模的秸秆电厂年均消耗 18 万吨农作物秸秆的理论标准。

(4). 即墨市 20MW 秸秆电厂的投产使用, 可完成理论发电量  $1.5 \times 10^4$  万 kW·h, 其中对外供电量约  $1.38 \times 10^4$  万 kW·h, 其单位发电量的净碳收支量约为 0.038kg/kW·h, 正式投产约 4.26 年后可实现投资回收, 与同等规模火力发电厂相比较预计可降低 CO<sub>2</sub> 排放量约 12.56 万吨, 在能源供给与环境保护方面有着积极的推动作用。

## 6.3 不足与展望

本研究对农作物秸秆资源量预测、空间最优运输路径分析以及秸秆电厂利用方面进行了较为细致的研究, 但仍存在下列问题亟待解决。

(1). 本文选择统计学模型中的多元线性回归模型对即墨市主要农作物秸秆产量进行预测, 结果表明基于主成分分析的多元线性回归模型可较好完成小型区域内单一农作物秸秆资源量的预测工作, 但仍存在不能描述资源量空间分布特征的不足。利用遥感模型对诸如青岛即墨市等小型研究区域面积进行农作物产量预测, 需分辨率在 10m×10m 以内的遥感影像作为数据来源制作土地利用分布图, 此类数据获取成本较高是遥感模型运用的一大阻碍。且即墨市农作物均以旱地耕种为主, 存在 NPP 计算周期内同一土地不同作物交替耕种, 所以实际计算中应考虑具体的植被覆盖类型及其相应的植物生理参数, 这将有助于提高 NPP 的估算精度。在未来生物质秸秆资源量预测的研究中, 统计学模型与遥感模型有机的结合, 将是解决生物质资源问题的重要手段。

(2). 本文在即墨市 20MW 秸秆电厂原料最佳收集路径的分析中, 提出以 9km<sup>2</sup> 正方形区域面积作为单位收集面积是基于即墨当地农业运输条件而定, 而在不同地区单位收集面积的选择亦不相同, 建立适合当地自身条件的单位面积收集模型, 是将来解决生物质资源收

集问题的有效方法。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2007 [M]. 北京; 中国统计出版社. 2007.
- [2] “十五”国家高技术发展计划能源技术领域专家委员会. 能源发展战略研究 [M]. 北京; 化学工业出版社. 2004.
- [3] 朱清时. 生物质洁净能源 [M]. 北京; 化学工业出版社. 2001.
- [4] GROSS R L M, BAUEN A. Progress in renewable energy [J]. *Environment International*, 2003, 29(1): 105-22.
- [5] 江泽民. 对中国能源问题的思考 [J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(3): 345-59.
- [6] 吴创之. 生物质能现代化利用方式 [M]. 北京; 化学工业出版社. 2003.
- [7] 马劲松, 黄杏元. 地理信息系统概论 [M]. 北京; 高等教育出版社. 2008.
- [8] 史欣欣, 朱灵益. 灰色模型与多元非线性回归模型在榆林地区粮食产量预测上的比较 [J]. *陕西林业科技*, 1998, (3): 55-8.
- [9] 周介铭, 彭文甫. 影响四川省粮食生产因素的灰色分析与粮食产量预测 [J]. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 28(3): 350-3.
- [10] 禹建丽, 黎娅. 基于人工神经网络的粮食产量预测模型 [J]. *河南农业科学*, 2005, (7): 44-6.
- [11] 李葆春, 马琦. 灰色  $gm(1:1)$  模型在定西县粮食产量预测中的应用 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2005, 40(5): 660-3.
- [12] 刘安, 赵姝, 张燕平. 基于灰色-马尔可夫模型的粮食产量预测 [J]. *计算机技术与发展*, 2007, 17(6): 191-3.
- [13] 迟灵芝. 本溪市粮食产量的动态灰色预测 [J]. *本溪冶金高等专科学校学报*, 2000, 2(4): 46-8.
- [14] 张晓浩, 黎夏, 施迅, et al. 广东省水稻生物质能的估算 [J]. *遥感信息*, 2007, 1(26-9).
- [15] 王芳, 黎夏, SHI, et al. 农作物生物质能的遥感估算——以广东省为例 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 870-8.
- [16] 何晓群. 现代统计分析方法与应用 [M]. 北京; 中国人民大学出版社. 2007.
- [17] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析(第2版) [M]. 北京; 中国人民大学出版社. 2007.
- [18] 王彬, 李川, 李兰, et al. 多元线性回归预测模型在城市垃圾产量预测中的应用 [J]. *新疆环境保护*, 2006, 28(3): 37-9.
- [19] 王美石, 陈祥光, 李宇峰. 用于油田产量预测的多元线性回归和自回归模型 [J]. *石油规划设计*, 2005, 16(3): 19-21.
- [20] 沙之杰, 周金峰. 多元线性回归模型预测天津市用水量 [J]. *西昌学院学报: 自然科学版*, 2008, 22(2): 32-5.
- [21] 康苹, 刘高焕. 基于耗费距离的公路网络路径分析模型研究——以珠江三角洲公路网为例 [J]. *地球信息科学*, 2007, 9(6): 54-8.
- [22] 王海梅, 周献中. 网络系统中的最短路径分析及其应用研究 [J]. *兵工学报*, 2006, 27(3): 515-8.
- [23] PANICHELLI L, GNANSOUNOU E. GIS-based approach for defining bio-energy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources

- competition between facilities [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32(4): 83-4.
- [24] 刘学锋 孟 李 赵 黄. 基于栅格 gis 的最优路径分析及其应用 [J]. *测绘通报*, 2004, (6): 43-5.
- [25] 高森, 莫迟. *Python 网络编程基础* [M]. 北京; 电子工业出版社. 2007.
- [26] 王亚卿, 方龙. 浅析 python 在地图处理中的运用 [J]. *华东森林经理*, 2008, 22(1): 83-4.
- [27] 于晓波. 秸秆发电原料的收集储存运输管理模式的探讨 [J]. *农村牧区机械化*, 2008, (5): 45-6.
- [28] 傅友红, 樊峰鸣, 傅玉清. 我国秸秆发电的影响因素及对策 [J]. *沈阳工程学院学报: 自然科学版*, 2007, 3(3): 206-10.
- [29] 邢爱华, 刘罡, 王垚, et al. 生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析 [J]. *过程工程学报*, 2008, 8(2): 305-13.
- [30] 杨树华, 雷廷宙, 何晓峰, et al. 生物质致密冷成型原料最佳收集半径的研究 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 132-4.
- [31] 王志伟, 白炜, 师新广, et al. 农作物秸秆气化发电系统经济性分析 [J]. *可再生能源*, 2007, (6): 25-8.
- [32] 张百良, 王许涛, 杨世关. 秸秆成型燃料生产应用的关键问题探讨 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 296-300.
- [33] 张艳丽, 王飞, 赵立欣, et al. 我国秸秆收储运系统的运营模式、存在问题及发展对策 [J]. *可再生能源*, 2009, 29(1): 1-5.
- [34] 何张陈, 袁竹林. 农作物秸秆发电的各种技术路线分析与研究 [J]. *能源研究与利用*, 2008, (2): 29-33.
- [35] 刘首元, 余英, 赵碧光, et al. 我国秸秆发电产业化发展前景 [J]. *水利电力机械*, 2007, 29(12): 207-10.
- [36] 蒋冬梅, 诸培新, 李效顺. 生物质秸秆资源发电的综合效益量化分析——以江苏省射阳县秸秆发电厂为例 [J]. *资源科学*, 2008, 30(9): 1307-12.
- [37] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布 [J]. *中国科技论文在线*, 2008, 3(5): 329-33.
- [38] 张忠潮, 王曼, 孟蕊. 秸秆发电的问题与对策 [J]. *生态经济(学术版)*, 2008, (2): 10-1,16.
- [39] 即墨市统计局. *2007 即墨统计年鉴* [M]. 北京; 中国统计出版社. 2007.
- [40] 鲁欣, 秦大庸, 刘俊, et al. 宁夏粮食产量主要影响因子分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(6): 65-70.
- [41] 于法稳. 影响粮食生产的因素分析及政策建议 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2005, 21(2): 133-5.
- [42] 肖海峰, 王姣. 我国粮食综合生产能力影响因素分析 [J]. *农业技术经济*, 2004, (6): 45-9.
- [43] 崔步礼, 常学礼, 陈雅琳, et al. 粮食产量变化及影响因素分析——以山东省东营市为例 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(11): 2549-50.
- [44] 孙萍, 陈锐. 影响粮食产量的因素分析及对策建议 [J]. *天津理工大学学报*, 2008, 24(5): 51-3.
- [45] 王慧. 影响河南粮食产量的因子分析与发展对策 [J]. *农业经济*, 2008, (8): 45-7.
- [46] 范通达, 江兵, 范戊均, et al. 基于主成分分析的多元线性回归用水量模型研究——以安徽省为例 [J]. *基建优化*, 2007, 28(2): 53-5.



- [47] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9-19.
- [48] 吴秀芹, 何政伟, 许辉熙, et al. ArcGIS 9 地理信息系统应用与实践 [M]. 北京; 清华大学出版社. 2007.
- [49] 马德涛, 刘建忠, 王锐, et al. 基于 ArcGIS Server 的城市道路最短路径分析方法研究 [J]. 海洋测绘, 2007, 27(5): 58-61.
- [50] 吴柏清, 何政伟, 许辉熙, et al. 城市交通网络最佳路径分析 [J]. 资源开发与市场, 2008, 24(4): 309-11.
- [51] 刘岗, 郝德海, 董玉平. 生物质秸秆收集成本研究及实证分析 [J]. 技术经济, 2006, (2): 85-8.
- [52] LI JINGJING B J, AND RALPH OVEREND. Assessment of Biomass Resource Availability in China [M]. Beijing; China Environmental Science Press. 1999.  
[M]. Beijing; China Environmental Science Press. 1999.
- [53] 贾友见, 余志, 吴创之. 4MWe 生物质气化联合循环发电系统的寿命周期评价 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 56-62.
- [54] SHI X, ELMORE A, LI X, et al. Using spatial information technologies to select sites for biomass power plants: A case study in Guangdong Province [J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(1): 35-43.
- [55] D. VOIVONTAS, D. ASSIMACOPOULOS, KOUKIOS E G. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method [J]. Fuel and Energy Abstracts, 2002, 43(2): 101-12.
- [56] 王修兰. 全球农作物对大气 co<sub>2</sub> 及其倍增的吸收量估算 [J]. 气象学报, 1996, 54(4): 466-73.
- [57] 何珍, 吴创之, 阴秀丽. 秸秆生物质发电系统的碳循环分析 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 705-10.
- [58] 谭支良. 秸秆资源的开发利用潜力及途径 [J]. 自然资源学报, 1995, 10(1): 73-8.
- [59] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 711-5.
- [60] 曹国良, 张小曳, 王亚强, et al. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算 [J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-31.

## 附录 1

### 攻读硕士期间发表论文及参与项目

[1].张展,王利生,张培栋,et al. 地理信息系统在秸秆资源化利用中的应用 [J]. 可再生能源, 2008, 6. (中文核心, 已发表)

[2].张展,王利生,张培栋,et al. 区域秸秆资源最优化收集路径与运输成本分析——以即墨市为例 [J]. 可再生能源. (中文核心, 已接收待发表)

2006 年至 2009 年于中国科学院学习期间, 参与山东省科技计划重大专项“农业秸秆多联产综合利用中试系统”; 中科院知识创新工程方向性项目, “中国生物能源技术现状评估与发展预见”等。主要负责项目的经济可行性分析、预测模型研究、GIS 空间技术分析、数据的收集整理与分析等工作。

## 致 谢

在中国科学院三年的研究生学习生活中，我不仅强化了能源及其相关领域的专业知识，同时得到了来自老师、同学、朋友以及亲人的无私帮助。值此论文完成之际，特向那些给予我学习和生活关怀与帮助的人们致以深深的谢意，我的每一分收获都离不开你们辛勤的汗水。

我首先要感谢的是我的导师王利生研究员，他在能源发展战略、生物能源转化等研究领域丰富的理论知识、一丝不苟的治学态度、大胆创新的进取精神对我产生了极其重要的影响。在我的论文选题、文章架构、模型设计、数据整理以及论文完成的整个过程中，导师一直给予我细致而耐心的指导，协助我解决了论文中遇到的种种困难。在生活上导师同样给予了我无微不至的关怀，在找工作的期间，老师中肯的建议以及每一句鼓励之词均使我感触良多、受益匪浅。

其次需要感谢的是郑永红研究员、张培栋副研究员、杨静副研究员和郭阳耀助理在我论文的撰写上给予我的大量支持与无私帮助。尤其是张培栋副研究员，在我论文的总体构思把握、模型数据验证、GIS 空间分析以及能耗估算等方面提供了极其宝贵的建议，并对我的论文进行了细心的修改。

另外，我还要感谢给予我论文数据支持的即墨市统计局、即墨市农业局、青岛市统计局等相关工作人员，你们的积极配合使我保证了论文基础数据的准确性。

同时，论文的完成同样离不开我父母及女友全心全意的支持，是家人的无私奉献、细心关怀与耐心鼓励，才使我能够克服学习与生活上的种种困难，取得如今的科研成果。

最后，向在百忙中抽出时间对本文进行论文评审并提出宝贵意见的各位专家表示衷心地感谢！

张展

2009 年 5 月