

基于自然冷源应用的数据中心节能潜力研究

董凯军¹, 李平界^{1,2}, 吕太², 苏林¹, 刘腾庆¹, 孙钦¹

(1.中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2.东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 数据中心高能耗问题大大阻碍了信息产业的发展,自然冷源利用是实现数据中心节能降耗的关键技术手段。文章以数据中心自然冷源利用为研究对象,确定了蒸发冷却间接供冷方式下自然冷源利用临界湿球温度的推荐值;分析了全国主要气候区自然冷源利用潜力;提出了自然冷源利用敏感性的概念;以夏热冬暖地区某典型数据中心为例进行了自然冷源利用的节能效果分析。结果表明:数据中心自然冷源利用的临界湿球温度上限为 16 °C 时,全国大部分地区的自然冷源可利用率超过 50%;温和地区自然冷源敏感性最高;夏热冬暖地区数据中心利用自然冷源时,全年综合 COP 值可提高 23.7%,节能率为 19.2%。

关键词: 数据中心; 自然冷源; 敏感性; COP; 节能率

中图分类号: TK81 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2017)09-1411-06

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2017.09.023

0 引言

随着移动互联网、物联网、云计算技术的高速发展,作为核心基础设施的数据中心的建设数量和规模也迅速增长^[1,12]。数据中心是高耗能设施,随着其数量和规模的增加,全球数据中心的整体能耗呈现爆发式增长。据统计,2010 年全球数据中心的用电量占全球总用电量的 1.3%^[3]。我国数据中心的能耗现状也不容乐观,截至目前,我国数据中心总量已超过 40 万个,2015 年的用电量约为 1 000 亿 kW·h,超过我国全社会用电量的 1.5%,相当于整个三峡电站一年的发电量^[4]。

我国数据中心的能效水平与发达国家相比还有较大差距。以信息行业通用指标——电能利用效率 PUE(Power Usage Effectiveness)进行国内外能效水平对比分析:目前,我国数据中心的 PUE 平均值在 2.2 以上,发达国家的 PUE 平均值约为 1.8;我国新建数据中心的 PUE 可达到 1.4~1.5 的水平,国外优秀数据中心的 PUE 约为 1.2,与国外先进水平相比,我国数据中心的 PUE 值仍有较大的提升空间^[4]。数据中心的冷却系统能耗占总能耗的 40%~50%,冷却系统能效水平的提高将会极大地降低数据中心的整体能耗。

自然冷源利用是指通过直接或间接方式利用环境低温空气进行冷却的一种能源利用方式。自然冷源利用是降低数据中心冷却系统能耗的重要手段。国内外对自然冷源利用的方法和技术措施进行了大量研究,提出通过直接或间接、风冷或水冷等多种技术手段实现自然冷源利用。但是,目前尚未对不同气候区域的数据中心和不同冷却技术手段的自然冷源利用开展深入的研究。本文将重点进行基于自然冷源应用的数据中心节能潜力研究和分析。

本研究是基于间接式自然冷源利用方法,根据末端精密空调送风要求,获得自然冷源利用临界温度,提出自然冷源利用敏感性的概念,分析国内各气候区典型城市自然冷源利用敏感性和利用潜力,并以夏热冬暖地区某数据中心为例,分析利用自然冷源前后综合 COP 值对比及节能效果,为数据中心自然冷源应用提供参考。

1 自然冷源利用临界温度

1.1 冷通道或机柜进风温度

研究表明,当机柜或机架采用冷热通道分离布置时,主机房的环境温度和露点温度应以冷通道的测量参数为准。ASHRAE 推荐冷通道或机柜进风温度为 18~27 °C^[5],我国最新颁布的《数据中

收稿日期: 2017-06-26。

基金项目: 广东省科技计划项目(2015B090901012;2013A011404001); 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室基金项目(Y709j11001)。

作者简介: 董凯军(1971-),男,研究员,研究方向为节能及储能技术。E-mail: dongkj@ms.giec.ac.cn

心设计规范》中冷通道温度的推荐值为 18~27℃,考虑到数据中心利用自然冷源的潜力与冷通道温度正相关,本文取 27℃为冷通道或机柜进风温度。

1.2 数据中心末端供水温度的确定

文献[6],[7]指出,末端冷水式精密空调的空气-水换热温差通常为 6~8℃,本文选取 6℃温差,则末端精密空调冷冻水供水温度为 21℃。

1.3 冷却水出水温度的确定

冷却塔间接供冷时,冷却水和冷冻水之间存在换热温差。目前,高效板式换热器可达到 1℃的换热温差^[8]。本文中板式换热器冷却水进水和冷冻水出水温差取 1℃,确定冷却水出水温度为 20℃。

1.4 自然冷源利用临界温度

冷却塔出口水温是由室外空气的湿球温度决定的,冷却塔出水温度理论上可以降到室外空气的湿球温度,但是需要无限大的冷却面积才能实现。实际上冷却水出口温度总是高于当时的空气湿球温度。研究表明,湿球温度与冷却水出口水温的温差为 4℃左右^{[9]、[10]}。因此,自然冷源可利用湿球温度的临界值为 16℃,

即能够采用自然冷源供冷时的最高湿球温度为 16℃。

2 自然冷源利用潜力分析

我国气候分区为严寒地区、寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区和温和地区。本文分别选取哈尔滨、北京、武汉、广州、昆明 5 个对应不同气候区的典型城市进行自然冷源利用潜力分析。

在冷却塔或蒸发冷却装置的换热过程中,湿球温度的高低对其换热能力和换热量的影响较大。随着服务器工作环境温度要求的逐渐放宽,服务器在较高的温度下仍可高效工作,因此,数据中心机房的送风温度提升将成为一种趋势,自然冷源可利用临界湿球温度的提高将成为可能。基于以上两点,分析在不同室外湿球温度下的自然冷源可利用时长及利用率两个指标。

2.1 自然冷源利用潜力分析

2.1.1 逐月可利用时长及利用率分析

查阅我国相关气象数据,以哈尔滨代表的严寒地区为例,分析当自然冷源可利用临界湿球温度为 16℃时,严寒地区自然冷源逐月的利用潜力以及全年总利用潜力如表 1 所示^[11]。

表 1 哈尔滨自然冷源逐月可利用最大时长及利用率
Table 1 The maximum available hours by month and utilization rate of natural cold source in Harbin

可利用时长/h													利用率/%
1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年	
744	672	744	720	722	405	57	252	655	744	720	744	7 179	82

由表 1 可知,当自然冷源可利用临界湿球温度取 16℃时,哈尔滨全年可利用时长超过了 7 000 h,总利用率也超过了 80%;以哈尔滨为代表的严寒地区,在冬季和过渡季节几乎可以 100%地利用自然冷源,夏季除了最热的 7 月以外,平均每天可以利用时长超过 8 h。这充分表明严寒地区自然冷源利用的潜力巨大。

2.1.2 各气候区可利用时长及利用率对比分析

如前文所述,自然冷源最大可利用潜力所取的临界湿球温度为 16℃,此时全国各地区自然冷源可利用时长最长。图 1 显示了自然冷源可利用临界湿球温度为 16℃时,全国主要气候区典型城市的可利用时长及可利用率。

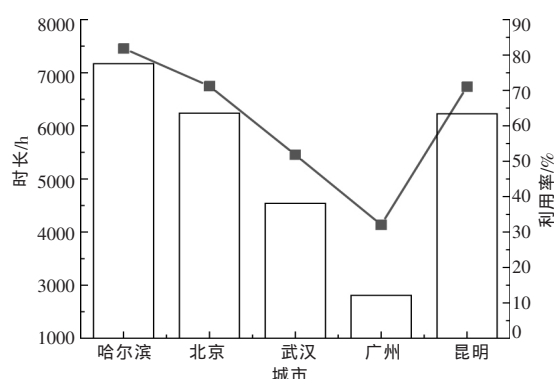


图 1 全国主要气候区典型城市自然冷源最大利用时长及利用率

Fig.1 The maximum available time and utilization rate of natural cold source in typical cities of major climatic regions in China

由图 1 可以直观地看出:以哈尔滨为例的严寒地区的年利用时长最长,超过了 7 000 h,自然冷源年利用率高达 80%;以北京为例的寒冷地区和以昆明为例的温和地区的年利用时长相当,均超过了 6 000 h,年利用率达 70%;以武汉为例的夏热冬冷地区的年利用时长超过了 4 500 h,年利用率也超过了 50%;以广州为例的夏热冬暖地

区,年利用时长接近 3 000 h,年利用率近 30%。由此说明,除夏热冬暖地区外,我国自然冷源年利用潜力巨大,利用率均超过 50%。

2.2 不同临界湿球温度下自然冷源逐月可用时长

以广州代表的夏热冬暖地区为例,分析在不同的自然冷源可利用临界湿球温度下,各月的可利用时长及总时长(表 2)。

表 2 广州逐月可利用时长及总时长随可利用温度上限的变化情况

Table 2 the utilization hours and total hours under different upper limit of available temperature in Guangzhou by month

温度/°C	可利用时长/h												总时长/h
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	31	42	0	0	0	0	0	0	0	0	14	26	113
8	176	119	0	0	0	0	0	0	0	4	33	126	458
10	294	243	59	0	0	0	0	0	0	28	82	326	1 032
12	442	389	170	0	0	0	0	0	0	71	134	490	1 696
14	575	492	255	4	0	0	0	0	0	150	213	602	2 291
16	671	582	336	28	0	0	0	0	0	223	286	692	2 818

如表 2 所示,随着可利用临界湿球温度的提高,自然冷源可利用时长逐渐增加。在广州,当可利用湿球温度临界值为 4 °C 时,自然冷源完全不可用;当可利用温度临界值为 6 °C 时,自然冷源几乎不可用。在最高的自然冷源可利用临界湿球温度下,冬季 12 月,1 月,2 月每月可利用时长占本月总时长的 87% 以上,可利用总时长超过 2 800 h,其中冬季大约 2 000 h,过渡季节大约 800 h。由以上分析可知:夏热冬暖地区,考虑到自然冷源利用过程中的成本,当所采取的自然冷却装置的工作温度低于 6 °C 时,不建议利用自然冷源供冷。

2.3 各气候区自然冷源利用的敏感性分析

自然冷源利用潜力除与不同气候区相关外,其可用临界湿球温度还会因为采用的自然冷却技术不同而有高低差别。本文提出自然冷源利用敏感性概念,是指某地区的自然冷源可利用时长会随可利用临界温度变化而变化,反映了自然冷却技术先进性对该地区自然冷源利用率的影响,体现了气候差别和自然冷却技术先进性的综合影响。在本研究中,将自然冷源利用的敏感性值 S 定义为自然冷源可利用时长的变化和自然冷源可利用临界温度变化的比值。

$$S = \frac{\Delta\tau}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $\Delta\tau$ 为自然冷源可利用时长的变化, h; Δt 为

可利用临界温度的变化, °C。

S 数值越大,说明自然冷源可利用温度临界值的提高越有利于当地自然冷源的利用。

当自然冷源可利用湿球温度上限为 0~16 °C 时,各气候区自然冷源可利用时长的变化情况如图 2 所示。

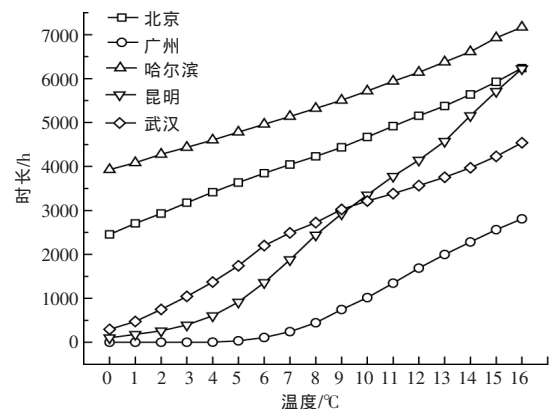


图 2 各气候区典型城市自然冷源利用敏感性对比
Fig.2 Comparison of the natural cold source sensitivity in typical city of each climate region

由图 2 可以直观地看出,在自然冷源可利用温度临界值逐渐升高的过程中,各气候区可利用时长增量随临界温度呈现不同的变化规律。例如,昆明,可利用湿球温度为 0 °C 时,可利用时长接近于零,可利用湿球温度为 16 °C 时,可利用时长与北京持平,均超过了 6 000 h,其 S 值明显高于其

他城市。由此说明,以昆明为例的温和地区,自然冷源可利用时长对自然冷源可利用临界湿球温度的变化更为敏感,通过技术手段改善自然冷源利用的效果更明显,因此,在温和地区推广自然冷源利用技术更具优势。

3 夏热冬暖地区某数据中心节能效果分析

3.1 项目概述

以夏热冬暖地区某数据中心为例进行自然冷源利用的节能分析。该数据中心总建筑面积约为 1.75 万 m²;机柜 1 931 个;工艺冷负荷为 9 831 kW;配备 3 台变频离心式冷水机组;现阶段负荷率 $\eta=85\%$;冷却水泵和冷冻水泵各 3 台。本文以该数据中心为例,说明数据中心利用自然冷源后的节能效果。该数据中心的主要冷却设备列于表 3。

表 3 夏热冬暖地区某数据中心冷却设备表(部分)
Table 3 Cooling equipments list of data center in hot summer and warm winter zone(portion)

设备	额定功率/kW	数量	主要技术参数
冷水主机	589	3	制冷量:3 868 kW
冷却塔	23	6	循环水量:138 L/s
冷却水泵	110	3	水流量:950 m ³ /h;扬程:26 m
冷冻水泵	110	3	水流量:750 m ³ /h;扬程:35 m

3.2 各季节冷水机组运行功率分析

不同季节冷却塔出水温度的高低对冷水机组的 COP 影响较大,本文分别计算不同季节下冷水机组的功率。

3.2.1 各季节冷水机组负荷比例

据前文的分析结果和文献[11],统计出夏热冬暖地区四季平均湿球温度和冷却塔出水温度的平均值(表 4)。

表 4 夏热冬暖地区四季平均湿球温度及冷却塔出水温度
Table 4 the average wet bulb temperature and outlet temperature of cooling tower in hot summer and warm winter zone

时间	12-2 月	3-5 月	6-8 月	9-11 月
湿球温度平均值/°C	11.2	19.9	25.5	19.7
冷却塔出水温度平均值/°C	15.2	23.9	29.5	23.7

数据中心空调系统的耗能设备除冷水机组外,还有冷却塔、冷冻水泵和冷却水泵。本文以系统 COP 进行数据中心空调系统节能分析。系统 COP 为空调系统制冷量与冷水机组、冷却塔、冷冻水泵和冷却水泵总耗电量的比值。当湿球温度低于 16 °C 时,完全使用自然冷源;当湿球温度为

16~21 °C 时,冷却塔和制冷主机联合供冷;当湿球温度高于 21 °C 时,仅开启主机供冷。根据表 4 给出的气象数据可知:冬季可以完全使用自然冷源供冷,春季和秋季实施自然冷源和主机联合供冷,夏季仅开启主机制冷。

冷冻水温度要求为 21 °C,在过渡季节的某湿球温度下,当冷却塔制得的冷却水温度不足以向板式换热器供冷,其差值部分的冷量须由冷水机组提供,因此引入 y_m 代表冷水机组承担的工艺冷负荷比例系数(冷水机组承担总冷负荷中的部分),其中: $m=1,2,3,4$ (冬季, $y_1=0$;春季, $y_2=0.78$;夏季, $y_3=1$;秋季, $y_4=0.74$)。

3.2.2 各季节冷水机组的 COP

冷水机组的 COP 值随冷却水进水温度及冷水机组负荷的变化而异。如图 3 所示:冷却水进水温度为 12~35 °C;冷水机组的 COP 值随机组负荷的增加,先增大到最高点,然后减小^[12]。

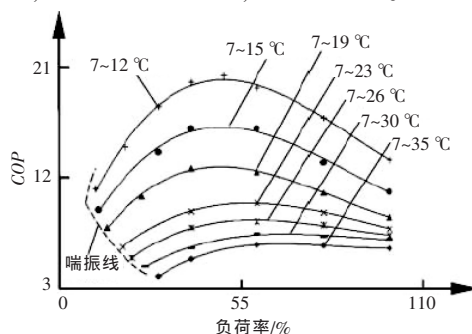


图 3 变频离心式冷水机组 COP 和冷却水进水温度及机组负荷的关系

Fig.3 Relationship among COP, cooling water inlet temperature and cooling load of centrifugal water chiller

该数据中心冷水机组负荷率为 85%,本研究依据厂家提供的机组性能曲线和图 3 对各季节的冷水机组 COP 进行了修正,最终得到不同季节下冷水机组的 COP 实测值(表 5)。

表 5 冷水机组不同季节的 COP 实测值
Table 5 Measured value of centrifugal water chiller COP in different seasons

时间	12-2 月	3-5 月	6-8 月	9-11 月
$COP_{冷,i}$	13.2	8.6	7.4	8.7

基于以上分析,该地区不同季节的变频离心式冷水机组的功率如下:

$$W_{冷,i} = \frac{y_m Q}{COP_{冷,i}} \quad (2)$$

式中: $W_{冷,i}$ 为冷水机组功率, $i=1,2,3,4$ (即冬,

春,夏,秋),kW; Q 为工艺冷负荷; y_m 为冷水机组承担的工艺冷负荷比例系数, $m=1,2,3,4$; $COP_{冷,i}$ 为各季节变频离心式冷水机组的COP, $i=1,2,3,4$ (即冬,春,夏,秋)。

3.3 数据中心不同季节系统综合COP

某一地区数据中心系统不同季节的COP是自然冷源利用潜力的直观表现,反映了不同季节系统能效的大小,从而可以有针对性地提高系统能效,对实现系统节能具有极大的作用。

$$COP_{系,i} = \frac{Q}{W_{冷,i} + n_1 W_{塔,i} + n_2 W_2 + n_3 W_3} \quad (3)$$

式中: $COP_{系,i}$ 为各季节系统的COP, $i=1,2,3,4$ (即冬,春,夏,秋); n_1 为冷却塔数量,台; n_2 为冷冻水泵数量,台; n_3 为冷却水泵数量,台; $W_{塔}$ 为冷却塔功率,kW; W_2 为冷冻水泵功率,kW; W_3 为冷却水泵功率,kW。

根据以上公式得到该地区数据中心各季节的系统COP(表6)。由表6可知,在夏热冬暖地区,冬季完全使用自然冷源时,系统能效较高,充分利用了自然冷源免费供冷,有利于大幅降低系统COP。

表6 夏热冬暖地区某数据中心各季节系统COP
Table 6 System COP of data center in each season in hot summer and warm winter zone

时间	12-2月	3-5月	6-8月	9-11月
COP _{系统}	17.0	6.7	5.2	7.0

3.4 数据中心全年系统COP

不使用自然冷源时的全年系统COP:

$$COP = \frac{4Q}{\sum_{i=1}^4 COP_i + 4(n_1 W_{塔} + n_2 W_2 + n_3 W_3)} \quad (4)$$

使用自然冷源时的全年系统COP:

$$COP = \frac{4Q}{\sum_{i=1}^4 W_{冷,i} + 4(n_1 W_{塔} + n_2 W_2 + n_3 W_3)} \quad (5)$$

表7 夏热冬暖地区全年COP对比及节能率
Table 7 Comparison of annual COP and energy-saving rate in hot summer and warm winter zone

项目	不使用自然冷源	使用自然冷源	节能率/%
系统COP	5.9	7.3	23.7
空调系统功率/kW	1 666.3	1 346.7	19.2

如表7所示,夏热冬暖地区数据中心空调系

统充分利用自然冷源时,全年综合COP值约提高23.7%,节能率约为19.2%。

4 结论

本文确定了可再生自然冷源可利用临界湿球温度的推荐值,并依据此湿球温度,对国内各气候区代表城市(哈尔滨、北京、武汉、广州、昆明)的自然冷源可利用时长及利用率进行了对比分析,得出以下结论。

① 开式冷却塔(或蒸发冷却装置)间接供冷方式下,自然冷源可利用的临界湿球温度推荐值为16℃。

② 提出了反映气候差异和自然冷却技术对自然冷源利用综合影响的自然冷源利用敏感性的概念。在自然冷源可利用湿球温度临界值逐渐提高的过程中,温和地区自然冷源利用敏感性最高,自然冷源可利用临界温度的提高以及自然冷源利用新技术的采用,对于温和地区是最为有利的。

③ 以夏热冬暖地区某典型数据中心为例,对开式冷却塔(或蒸发冷却装置)进行的自然冷源利用节能效果分析表明:充分利用自然冷源冷却的数据中心全年综合COP值约提高23.7%,节能率约为19.2%。

参考文献:

- [1] Cho J, Kim B S. Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers [J]. Energy & Buildings, 2011, 43(9): 2145-2155.
- [2] Shehabi A, Masanet E, Price H, et al. Data center design and location: Consequences for electricity use and greenhouse-gas emissions [J]. Building & Environment, 2011, 46(5): 990-998.
- [3] Mitchell-Jackson J, Koomey J G, Blazek M, et al. National and regional implications of internet data center growth in the US [J]. Resources Conservation & Recycling, 2002, 36(3): 175-185.
- [4] 工业和信息化部,国家机关事务管理局,国家能源局. 三部门联合印发国家绿色数据中心试点工作方案 [J]. 石油和化工节能, 2015(3): 1-4.
- [4] MIIT, GOASC, NEA. National green data center pilot program issued by the three departments [J]. Petroleum & Chemical Energy Conservation, 2015(3): 1-4.
- [5] ASHRAE TC 9.9-2011, Thermal Guidelines for Data Processing Environments - Expanded Data Center

- Classes and Usage Guidance [S].
- [6] 陈杰.利用自然冷源制冷对通信基站节能降耗的研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [6] Chen Jie. Research on energy saving for the telecommunication base station by using free cooling[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [7] 张磊.某中央空调系统节能改造研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [7] Zhang Lei. Research on the energy-saving improvement of a certain central air-conditioning system[D].Harbin, Harbin Institute of Technology, 2013.
- [8] 李竞.过渡季节冷却水的节能应用研究[D].上海:同济大学,2007.
- [8] Li Jing. The application of free cooling in off-seasons [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [9] 毛路,王伟,曹连华,等.中国人寿数据中心水冷空调系统的节能方案及实施 [J]. 建筑技术, 2016, 47(2): 126-130.
- [9] Mao Lu, Wang Wei, Cao Lianhua, et al. Energy conservation of water-cooling air-conditioningsystem for data center [J]. Architecture Technology, 2016, 47(2): 126-130.
- [10] 牛润萍,由世俊,陈其针,等.用于供冷的闭式冷却塔换热模型与性能分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007(3):453-456.
- [10] Niu Runping, You Shijun, Chen Qizhen, et al. Modeling and performance analysis of the closed cooling tower[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2007(3):453-456.
- [11] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [11] Chinese Meteorological Bureau Meteorological Information Center Room. China Thermal Environment Analysis of Meteorological Data[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [12] 谭建明,刘华,张治平.永磁同步变频离心式冷水机组的研制及性能分析[J].流体机械,2015(7):82-87.
- [12] Tan Jianming, Liu Hua, Zhang Zhiping. Development and performance analysis of the permanent-magnetic synchronous frequency-convertible centrifugal chiller[J]. Fluid Machinery, 2015(7):82-87.

Study on the energy-saving potential of natural cold sources in data centers

Dong Kaijun¹, Li Pingjie^{1,2}, Lv Tai², Su Lin¹, Liu Tengqing¹, Sun Qin¹

(1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The high energy consumption of data center presents a major barrier to the development of information industry, while the utilization of natural cold sources is very important to realize energy-saving and consumption-reduction. This paper mainly studies the utilization of natural cold sources in data center. The recommended values of the critical wet bulb temperature of natural cold sources under evaporative cooling conditions are determined. The utilizing potential of natural cold source in major climate regions of China is analyzed in detail. Moreover, the concept of natural cold source sensitivity is introduced. In addition, a typical data center in hot summer and warm winter zone is taken as an example to analyze the energy-saving effect of natural cold sources. The result indicates that natural cold source utilizing ratio in data centers exceeds 50% in most regions at a critical wet bulb temperature of 16 °C. However, the temperate region had the highest sensitivity concerning the natural cold source. Annual comprehensive *COP* value of data centers increases by 23.7%, and the energy saving rate is about 19.2% when using natural cold sources in hot summer and warm winter zone.

Key words: data center; natural cold source; sensitivity; *COP*; energy efficiency