

气候变化对重庆地区降温耗能的影响*

张天宇, 李永华, 王 勇, 程炳岩, 唐红玉
(重庆市气候中心, 重庆 401147)

摘要 利用 1971—2010 年的气象观测数据, 采用空调度日数作为评估暖季降温耗能的指标, 分析了重庆地区 1971—2010 年间空调度日数、制冷日数的分布和长期变化特征, 并评估了气温变化对重庆地区降温耗能的影响。结果表明, 重庆各地空调度日数、制冷日数空间差异明显, 沿江及河谷一带空调度日数、制冷日数相对高、多, 东南部及城口等高海拔地区空调度日数、制冷日数相对低、少; 1971—2010 年重庆各分区的空调度日数、制冷日数的时间演变与全区平均比较一致, 主要经历了先降后升的过程, 在 20 世纪 80 年代中期转折, 气温与降温耗能具有很好的同步性, 温度对降温耗能的影响程度随气温的升高而增加, 气温若升高 1 °C, 整个暖季(5~9 月)、夏季(6~8 月)中重庆全区平均的降温耗能将增加 56%、46%; 在暖季或夏季, 气温若升高 1 °C 时降温耗能增加效应量重庆各个分区由大到小依次为: 东南部、西部、西南部、中部、主城、东北部。暖季气温若升高 1 °C 时, 全区平均制冷日数将增加 16 d, 主城将增加 14 d, 其他地区将增加 15 d, 最后利用平均气温与降温耗能变率建立了一组降温耗能的一元线性回归方程评估模型。文章认为该组评估模型可以用于重庆地区降温耗能变化的定量评估和预估。

关键词 平均气温; 空调度日; 制冷日数; 降温耗能; 重庆

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2012)02-0036-06

气候变化将导致能源需求的改变^[1-2]。随着国内人们生活水平的提高和居民住房的改善, 在气候变化的大背景下, 中国生活能源消费总量呈指数增长趋势, 居民生活用电比重上升。其中主要原因是近年来冬季取暖和夏季制冷设备的普及和广泛使用, 尤其是后者对电力消费波动的影响更为显著。城镇居民用电的增加, 不仅表现为用电量的增加, 同时也造成了用电负荷在季节上的不均衡, 这与气候特点有着很大关系。重庆是中国著名的夏季高温地区, 有“火炉”之称。夏季是用电高峰, 由于空调制冷负荷猛增, 用电负荷也相应地加重。空调性负荷高峰加剧了夏季气候变化对电力供需平衡的影响。生活能源需求对气候变化敏感性的不断增加, 也使得两者的关系越来越密切。

以往有关研究大多直接利用用电量(电力负荷等)与气象因子进行相关分析, 由于所取得的电力资料有限, 一般只针对某一地区某一年或几年资料作分析研究, 因此分析结果局限性比较大^[3-6]。度日最初是用来反映农作物生长中所需热量水平的物理

量单位, 近年来发展为一个能够反映供暖和制冷所需能源的时间温度指数, 被广泛用在气候变化和能源需求的研究应用领域^[7]。很多学者利用度日这一指标研究了气候变化对不同区域能源消费的影响^[8-14]。本文采用国内普遍使用的衡量降温耗能的指标——空调度日数, 研究重庆地区空调度日数、制冷日数的分布和变化特征及制冷期温度变化对重庆地区降温耗能的影响。这样可以不受电力资料的限制, 而且采用统一的评估指标, 其结果更有普遍意义。此项研究将为今后控制建筑空调能耗的指标, 采用建筑节能技术措施奠定良好基础。

1 空调度日的定义

在《节能设计标准》^[15]中, 建筑物节能综合指标限值中的耗冷量指标和空调年耗电量是根据建筑物所在地的空调度日数确定的。该值为一年中当某天是室外日平均温度高于 26 °C 时, 将高于 26 °C 的度

* 收稿日期 2011-11-09 网络出版时间 2012-03-14 19:27:00

资助项目: 重庆市自然科学基金计划重点项目(No. CSTC2008BA0022), 中国气象局“三峡库区气候监测、预警、评估业务运行和改进”项目(2011)

作者简介: 张天宇, 男, 工程师, 硕士, 研究方向为气候变化与防灾减灾。

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120314.1927.201202.36_007.html

数乘以 1 d,再将此乘积累加^[16]。具体公式如下:

$$CDD = \sum_{i=1}^n rd(T_i - T_0)$$

式中 CDD 为空调度日, T_0 为基础温度等于 $26\text{ }^\circ\text{C}$; T_i 为逐日平均气温,如果日平均温度高于基础温度, rd 则为 1,否则为 0。 T_0 和 T_i 单位均为 $^\circ\text{C}$; CDD 单位为 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。年空调度日数定义为年内 5~9 月,此段时间称为暖季。逐日累计空调度日。空调度日数是对暖季高温程度的一种描述,是暖季用于空调制冷能源消耗的一个定量估算,其实是反映降温强度的指标。研究温度与能源消费的关系时,还使用空调制冷期长度这个指标,即空调制冷日数,定义是在年内 5~9 月所有需要降温的天数之和^[17]。降温耗能变率用空调度日数距平百分率来表示。2011 年重庆市政府办公厅发出《关于加强节约用电保民生的紧急通知》,要求政府机关夏季空调温度不低于 $26\text{ }^\circ\text{C}$,此温度也与基础温度一致。

重庆有 34 个国家基本气象观测站,在分区选站时,考虑当地气候背景,沿用的是 2010 年重庆市气象局对重庆市预报服务的最新分区,见封三彩图 1。其中主城区有沙坪坝、北碚、渝北、巴南等 4 个站;西部有潼南、合川、铜梁、大足、璧山、荣昌、永川等 7 个站;西南部有江津、綦江、万盛、南川等 4 个站;中部有长寿、涪陵、丰都、垫江等 4 个站;东南部有武隆、秀山、酉阳、彭水、黔江、石柱等 6 个站;东北部有忠县、梁平、万州、云阳、开县、奉节、巫山、巫溪、城口等 9 个站。本研究中,重庆全区平均空调度日数和制冷数为 34 个站的平均,各分区平均空调度日数和制冷数则是各分区所辖站的平均。

2 空调度日变化特征

图 2 给出了多年平均的空调度日数和制冷日数的空间分布。根据世界气象组织规定(WMO),气候标准值(即多年平均值)是某一气象要素连续 30 年的数学平均。现时采用的气候标准值是 1971—2000 年的平均值。因为使用的是气象资料,所以在本文中多年平均值都是指 1971—2000 年的平均值。由于重庆地区地形复杂,气候地区差异大,各地空调度日数空间差异明显。沿江及河谷一带空调度日数相对高,最高是云阳,为 $243.3\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$;东南部及东北部的城口等高海拔地区空调度日数相对低,最低是城口,仅为 $13.4\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 。重庆各地多年平均制冷日数为 $15\sim 77\text{ d}$,分布与空调度日数一致。沿江及河谷一带相对多,一般都超过 60 d ,云阳最多,达 77 d ;

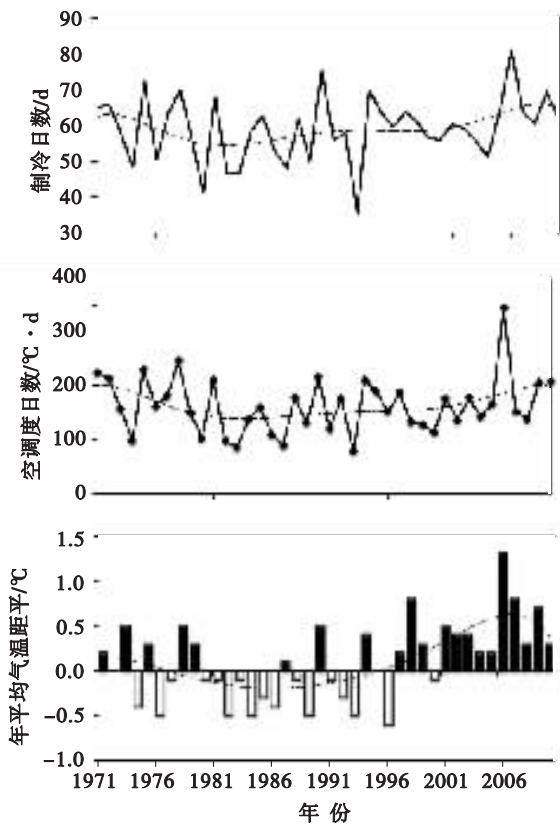
东南部及城口等高海拔地区相对少,城口最少,只有 15 d (图 2)。

图 2 重庆各地多年平均空调度日数和制冷日数分布

Fig. 2 Distribution of annual mean cooling degree day and cooling days in Chongqing region

图 3 给出了 1971—2010 年重庆全区平均的空调度日数和制冷日数的逐年变化特征。近 40 年两者的阶段变化也比较一致,主要经历了先降后升的过程,20 世纪 80 年代中期为主要转折点。2006 年重庆遭遇百年一遇的高温热浪,空调度日数最高为 $345.7\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,制冷日数最长为 86 d ;1993 年空调度日数最低仅 $78.4\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,制冷日数最短仅 40 d 。从各年代变化来看(图 4),重庆全区平均的降温变率和制冷日数都在 70 年代和 21 世纪 00 年代偏高,00 年代偏高最甚;而在 80 年代和 90 年代偏低,80 年代偏低最多。暖季平均气温与它们各年代变化也比

较一致,略微不同的是在 90 年代平均气温接近常年。



注 图中虚线为趋势线。

图 3 1971—2010 年重庆全区空调度日数、制冷日数和年平均气温的逐年变化

Fig. 3 The annual changes of CDD, cooling days and average temperature in the average of Chongqing region from 1971 to 2010

全球变暖已经是一个不争的科学事实。2007 年 政府间气候变化专门委员会(IPCC)最新发布的第四次评估报告给出 ,最近 100 年(1906—2005 年)全球平均地表温度上升了 0.74 °C ,近 50 年气温的上升速度几乎是近 100 年的 2 倍。在全球气候变暖的背景下 ,各地的气候变化并不是一致的 ,气候变化也具有明显的地区性差异 ,同样表现出显著的区域性特征^[18]。近 50 年来重庆年平均气温整体上呈小幅度的上升趋势 ,但远远低于全国平均水平^[19]。图 3 给出 1971 年以来重庆的年平均气温变化阶段变化与空调度日数和制冷日数是比较一致的。重庆成为中央直辖市 14 年以来(1997—2010 年) ,重庆地区增暖十分显著 ,近 14 年有 13 年偏暖年份 ,城市的飞速发展可能成为重庆平均气温急剧增加的直接或间接原因^[20]。

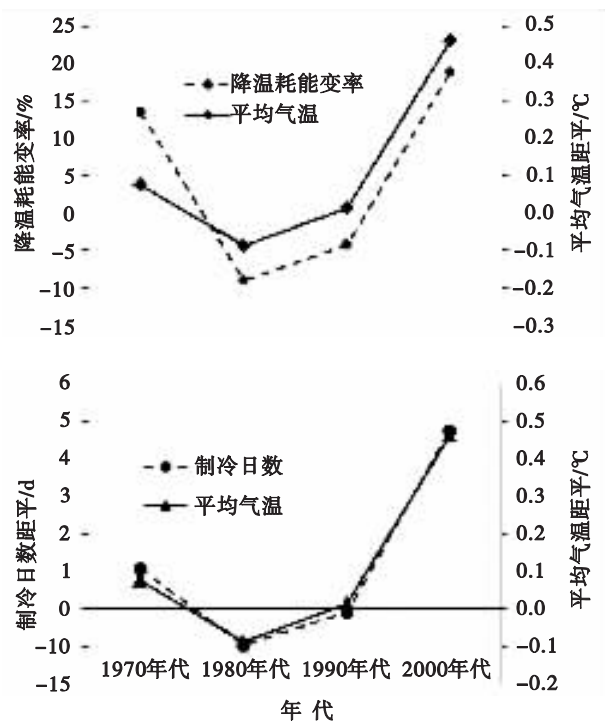


图 4 重庆全区平均的各年代暖季降温耗能变率、制冷日数距平与平均气温距平的变化

Fig. 4 The decadal change of cooling energy consumption, cooling days and average temperature in the average of Chongqing region in the warm season

3 温度变化对降温耗能的影响

研究表明^[21] ,电力消耗与气象条件的变化有关 ,空调度日和电力消耗之间更有着较高的相关关系。一段时间内的空调度日数可以用来表征该时段的降温耗能 ,空调度日数的变化也近似地反映了降温耗能电力消耗的变化。所以区域气候变暖将对该地区的降温耗能产生直接并且显著的影响。

3.1 温度与降温耗能的关系分析

利用 5~9 月降温耗能变率与相应月份的平均气温距平作单站相关分析 ,结果见图 5。图中显示两者间存在很好的正相关关系 ,说明温度变化对重庆地区降温耗能的影响十分显著。就各站来说 ,东北部的城口、东南部的酉阳和黔江等区县相关系数相对较低。就月份而言 7、8 月关系最好 ,6、9 月次之 ,5 月相对差些 ,说明温度对降温耗能的影响程度随气温的升高而增加。

同理 ,利用重庆各区降温耗能变率与平均气温距平进行相关分析 ,结果见表 1。两者间相关也相当好 ,除了东南部 5 月外 ,全部均通过了 99.9% 的信度检验。比较而言 5 月的相关系数相对小些 ,相关系数最好的是 7、8 月 ,6、9 月次之。此结论与单站的相关分析也非常吻合。此外 ,还计算了暖季和

夏季两个时段,重庆各区降温耗能变率与平均气温距平同样有非常好的相关关系。

表 1 1971—2010 年重庆各分区降温耗能
与气温距平相关系数

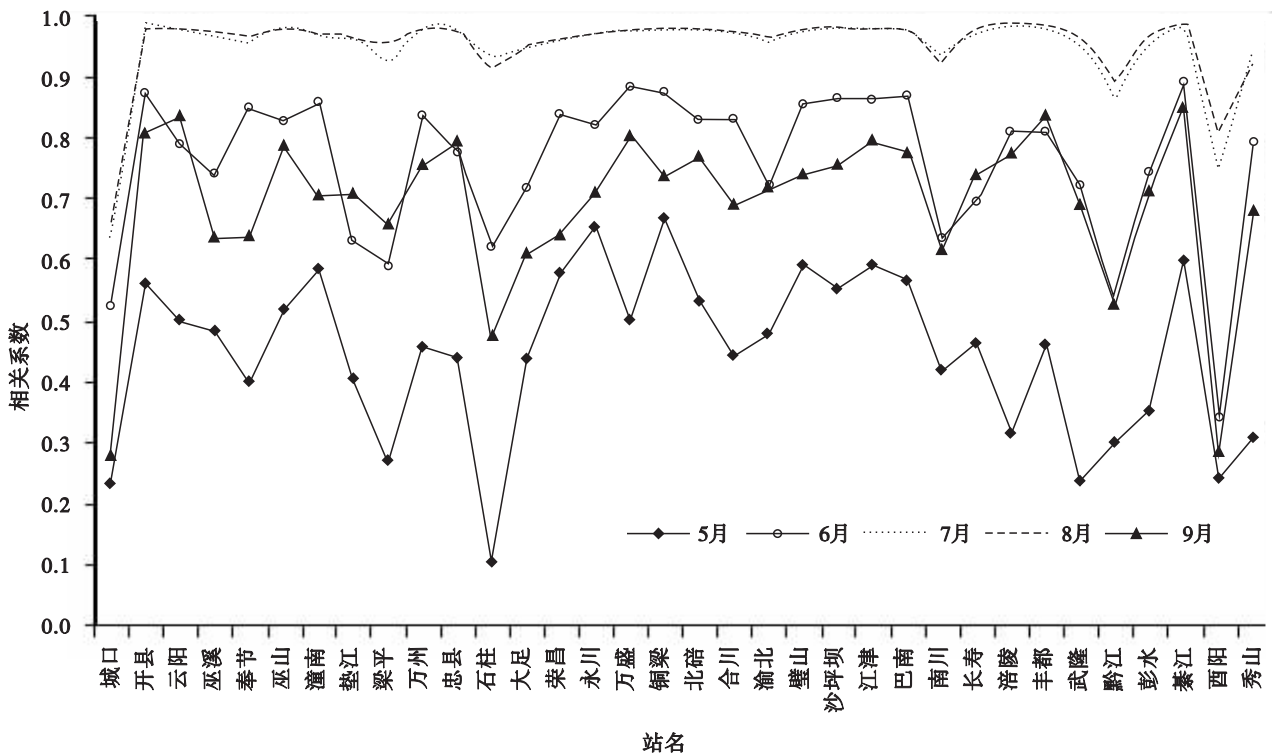
Tab. 1 The correlation coefficient between cooling energy consumption and anomaly temperature from 1971 to 2010

	5月	6月	7月	8月	9月	夏季 (6~8月)	暖季 (5~9月)
全区平均	0.61	0.80	0.97	0.98	0.77	0.97	0.89
主城	0.54	0.85	0.98	0.98	0.76	0.97	0.91
西部	0.59	0.84	0.97	0.97	0.69	0.97	0.90
西南部	0.60	0.86	0.97	0.98	0.81	0.96	0.91
中部	0.43	0.78	0.98	0.98	0.77	0.97	0.90
东北部	0.57	0.79	0.98	0.98	0.78	0.97	0.89
东南部	0.26	0.71	0.93	0.95	0.67	0.93	0.83

注:40年相关系数95%信度临界值为0.31,99%信度临界值为0.40,99.9%信度临界值为0.50

3.2 气温升高 1 °C 的降温耗能效应

为了定量地评估气温对重庆地区降温耗能的影响,表 2 给出了平均气温升高 1 °C 重庆各分区降温耗能的增加效应量。由表 2 可见,气温升高 1 °C,重庆各分区降温耗能对温度变化的响应有所差别。就各月比较而言,6 月各地降温耗能变率相对较大,全区平均为 60%,即 6 月平均气温若升高 1 °C,重庆全区平均的降温耗能将增加 60%。盛夏(7~8 月)各地降温耗能变率相对较小,除东南部外,其余地区在盛夏期间因温度变化引起的降温耗能波动小,对电力生产和调配等都较为有利。就各分区而言,东南部在 6~9 月降温耗能变率都达最大,这表明温度相对较低的地区降温耗能对温度变化更为敏感,而温度较高的地区气温升高相同幅度,对降温耗能的影响相对要小些。



注:40年相关系数95%信度临界值为0.31,99%信度临界值为0.40,99.9%信度临界值为0.50。

图 5 1971—2010 年 5~9 月各月重庆各站降温耗能与气温距平相关系数

Fig. 5 The correlation coefficients between cooling energy consumption and anomaly temperature from May to September, 1971—2010

气温若升高 1 °C,整个暖季重庆全区平均的降温耗能将增加 56%,夏季全区平均将增加 46%。各个区域对比而言,在暖季或夏季,气温若升高 1 °C 降温耗能增加效应量由大到小依次为东南部、西部、西南部、中部、主城和东北部。同理,计算了重庆各分区暖季气温距平与制冷日数的相关系数,都超过了

0.80,相关关系甚好,评估气温对重庆地区制冷日数的影响发现若暖季平均气温升高 1 °C,全区平均制冷日数将增加 16 d,主城将增加 14 d,其它地区都将增加 15 d。

3.3 降温耗能评估模型

由上可知,平均温度与降温耗能存在非常好的

正相关关系,建立起降温耗能对平均温度的回归方程。本文主要给出了有关 6~8 月、夏季和暖季重庆各区的降温耗能的一组评估模型(表 3)。利用模型结合未来的气候预测可以对重庆地区降温耗能的变化进行定量的评估和预估。

根据专家预估^[22],21 世纪重庆市有显著增暖趋势,未来夏季重庆地区 21 世纪初期(2011—2040 年)、中期(2041—2070 年)和后期(2071—2100 年)年平均气温可能分别升高 1、2 和 3℃,根据降温耗能模型近似估算,未来重庆地区 21 世纪初期、中期和后期的夏季降温耗能分别将增加 46%、92% 和 138%。

表 3 重庆分区降温耗能评估模型

Tab. 3 The cooling energy consumption assessment model in Chongqing region

	6 月	7 月	8 月	夏季(6-8 月)	暖季(5-9 月)
全区平均	$Y_6 = 59.7X_6 + 0.9$	$Y_7 = 38.9X_7 - 0.3$	$Y_8 = 33.6X_8 + 2.6$	$Y_{夏季} = 46.3X_{夏季} + 1.0$	$Y_{暖季} = 56.3X_{暖季} - 1.8$
主城	$Y_6 = 59.0X_6 + 0.2$	$Y_7 = 34.0X_7 - 0.3$	$Y_8 = 29.0X_8 + 2.4$	$Y_{夏季} = 40.9X_{夏季} + 1.4$	$Y_{暖季} = 50.8X_{暖季} - 1.4$
西部	$Y_6 = 61.6X_6 + 0.3$	$Y_7 = 43.1X_7 - 0.1$	$Y_8 = 36.4X_8 + 4.2$	$Y_{夏季} = 50.1X_{夏季} + 2.3$	$Y_{暖季} = 62.8X_{暖季} - 1.2$
西南部	$Y_6 = 58.7X_6 + 0.9$	$Y_7 = 36.2X_7 - 0.1$	$Y_8 = 33.9X_8 + 2.8$	$Y_{夏季} = 44.1X_{夏季} + 1.9$	$Y_{暖季} = 54.0X_{暖季} - 1.2$
中部	$Y_6 = 62.1X_6 + 1.0$	$Y_7 = 35.7X_7 - 0.1$	$Y_8 = 30.3X_8 + 2.3$	$Y_{夏季} = 43.4X_{夏季} + 0.9$	$Y_{暖季} = 51.7X_{暖季} - 1.9$
东北部	$Y_6 = 56.9X_6 + 0.6$	$Y_7 = 35.4X_7 - 0.7$	$Y_8 = 30.2X_8 + 1.6$	$Y_{夏季} = 40.4X_{夏季} - 0.2$	$Y_{暖季} = 48.6X_{暖季} - 2.3$
东南部	$Y_6 = 71.4X_6 + 5.5$	$Y_7 = 50.0X_7 - 0.5$	$Y_8 = 48.4X_8 + 3.3$	$Y_{夏季} = 62.7X_{夏季} + 1.2$	$Y_{暖季} = 75.2X_{暖季} - 2.2$

注:Y 为降温耗能变率(单位:%),X 为平均气温距平(单位:℃)。

4 结论

通过上述分析,本研究的主要结论如下。

1)重庆地区地形复杂,气候地区差异大,各地空调度日数和制冷日数空间差异明显。沿江及河谷一带空调度日数、制冷日数相对高、多,东南部及东北部的城口等高海拔地区空调度日数、制冷日数相对低、少。

2)1971—2010 年重庆全区空调度日数、制冷日数主要经历了先降后升的过程,在 20 世纪 80 年代中期为主要转折点。1971—2010 年重庆各分区的空调度日数、制冷日数时间演变与全区平均比较一致。

3)重庆地区降温耗能变率与平均气温存在很好的正相关关系,温度变化对重庆地区降温耗能的影响十分显著。气温与降温耗能具有很好的同步性,温度对降温耗能的影响程度随气温的升高而增加。气温若升高 1℃,整个暖季重庆全区平均的降温耗能将增加 56%,夏季全区平均将增加 46%。各个区域对比而言,在暖季或夏季,气温若升高 1℃降

表 2 气温增加 1℃重庆各分区的降温耗能效应

Tab. 2 The effects of the temperature increasing 1℃ on the cooling energy consumption in Chongqing region %

	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	夏季 (6~8 月)	暖季 (5~9 月)
全区平均	62	60	39	34	58	46	56
主城	49	59	34	29	48	41	51
西部	62	62	43	36	59	51	63
西南部	62	59	36	34	57	44	54
中部	44	62	36	30	50	43	52
东北部	52	57	35	30	53	40	49
东南部	39	71	50	48	70	63	75

温耗能增加效应量由大到小依次为东南部、西部、西南部、中部、主城和东北部。若暖季平均气温升高 1℃,全区平均制冷日数将增加 16 d,主城将增加 14 d,其它地区都将增加 15 d。

4)本研究利用平均气温与降温耗能变率建立了一组降温耗能的一元线性回归方程评估模型,结合未来的气候预测可以对重庆地区降温耗能变化进行定量评估和预估。

参考文献:

- [1] 陈峪,黄朝迎. 气候变化对能源需求的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(增刊): 11-19.
- [2] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 755-766.
- [3] 严智雄,陈以洁. 气候对南昌市电量需求的影响分析[J]. 气象, 1994, 20(2): 44-46.
- [4] 辛红. 武汉盛夏高温与供电关系[J]. 湖北气象, 1995(2): 45.
- [5] 陈正洪,洪斌. 华中电网四省日用电量与气温关系的评估[J]. 地理学报, 2000, 55(11): 34-38.

- [6] 刘健, 陈星, 彭恩志, 等. 气候变化对江苏省城市系统用电量变化趋势的影响[J]. 气象, 2005, 14(5): 546-550.
- [7] Kadioglu M, Sen Z. Degree-day formulations and applied in Turkey[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(6): 837-846.
- [8] 李永安, 常静, 戎卫国, 等. 山东省采暖空调度日数及其空间分布特征[J]. 可再生能源, 2006(126): 13-15.
- [9] 姜逢清, 胡汝骥, 李珍. 新疆主要城市的采暖与制冷度日数 1. 空间变化特征[J]. 2006, 29(6): 773-778.
- [10] 谢庄, 苏德斌, 虞海燕. 北京地区热度日和冷度日的变化特征. 应用气象学报[J]. 2007, 18(2): 232-236.
- [11] 任永建, 刘敏, 陈正洪, 等. 华中区域取暖降温度日的年代际及空间变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 424-428.
- [12] 郝全成, 孙周军. 近 57 年广东地区度日分布及变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(2): 223-226.
- [13] 李丽光, 王宏博, 赵先丽, 等. 辽宁中部城市群度日的变化特征[J]. 气象科学, 2010, 30(3): 387-392.
- [14] 李艳兰, 何如, 杜尧东, 等. 华南区域降温度日和采暖度日的时空变化特征[J]. 热带地理, 2011, 31(1): 14-20.
- [15] 中华人民共和国建设部. 《民用建筑节能设计标准 (JGJ2695)》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [16] 陈国义, 雷丽英, 郎四维, 等. 居住建筑节能设计标准 (夏热冬冷地区) 宣贯教材[M]. 北京: 中国计划出版社, 2001: 45-60.
- [17] 袁顺全, 千怀遂. 气候对能源消费影响的测度指标及计算方法[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 125-130.
- [18] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis, summary for policymakers[R]. Geneva: IPCC, 2007.
- [19] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 张天宇, 程炳岩, 刘晓冉, 等. 重庆极端高温的变化特征及其对区域性增暖的响应[J]. 气象, 2008, 34(2): 69-76.
- [21] 陈峪, 叶殿秀. 温度变化对夏季降温耗能的影响[J]. 应用气象学报, 2005, 16(S1): 97-104.
- [22] 程炳岩, 刘晓冉, 张天宇, 等. 基于全球气候系统模式结果的重庆 21 世纪气候变化预估分析[J]. 气象科技, 2009, 37(4): 415-419.

Resources , Environment and Ecology in Three Gorges Area

Impact of Climate Change on Cooling Energy Consumption in Chongqing

ZHANG Tian-yu , LI Yong-hua , WANG Yong , CHENG Bing-yan , TANG Hong-yu

(Chongqing Climate Center , Chongqing 401147 , China)

Abstract : By using the meteorological data from 1971 to 2010 , made the cooling degree-days (CDD) as a factor of the cooling energy consumption assessment in the warm season , we analyzed changing characteristics and the attribution of CDD and cooling days in Chongqing region , and assessed the effects of the temperature change on the cooling energy consumption of Chongqing. The results showed that there were significant differences between CDD and cooling days in Chongqing region , CDD and cooling days in regions along the river or in the valleys were more compared to the southeast part and Chengkou county where have a high altitude. In the recent 40 years , the evolution of CDD and cooling days in all districts of Chongqing were basically the same as the average value in this region ; they all had experienced the process of rise after the first drop , and a turn in the middle of 1980s. The temperature and the cooling energy consumption had a significant synchronization , the effects of temperature on the cooling energy consumption increased with the higher temperature. The average cooling energy consumption in Chongqing regions in the warm season (May to September) / summer (June to August) will increase by 56% / 46% if the temperature rises 1 °C. In the warm season or in summer , the cooling energy consumption value in all sections in Chongqing with 1 °C higher will be descending in the follow order : southeast , west , southwest , central part , the urban area , the northeast section. If the temperature in the warm season rises 1 °C , the cooling days in the area would increase by 16 days , the urban area would increase by 14 days , and the other regions would increase by 15 days. Finally , we set a cooling energy consumption assessment model by using the changing rate between the average temperature and the cooling energy consumption , so people can give assessment and quantitative estimates to the cooling energy consumption changes in Chongqing regions.

Key words : average temperature ; cooling degree-days (CDD) ; cooling days ; cooling energy consumption ; Chongqing

(责任编辑 方 兴)