

闪电回击过程中高层建筑物顶部感应电流电荷特征分析

蔡然¹ 罗欣¹ 高彦² 杜其江¹ 庄红波¹ 彭筱虹³ 傅春华³

(1 深圳市气象服务中心, 深圳 518000; 2 香港理工大学, 香港; 3 广东省东莞市气象局, 东莞 523086)

摘要: 基于深圳气象局石岩观测基地的梯度塔雷电观测影像, 以深圳市地标性建筑物、建筑物群为例, 利用COMSOL仿真软件, 建立了接近自然闪电的模拟通道, 对建筑物周围环境和观测到的实际闪电通道进行建模, 研究闪电下行先导接近地面时, 与地面凸起的物体(例如高塔和高建筑物)激发上行先导的连接过程。分析得出: 在自然闪电发展过程中, 高层建筑物对其顶部产生的感应电荷和感应电流的影响, 研究得出具体的量化指标, 即在绝大多数情况下, 高层建筑物对闪电所引起的感应电流和感应电荷的扩大系数在2.0~4.5, 同时发现有无相邻建筑物对建筑物顶部感应电荷的扩大系数影响很小。

关键词: 高层建筑, 闪电, 扩大系数, 感应电荷, 感应电流

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.028

Induced Current and Charge at the Top of High Buildings During Lightning Return Stroke

Cai Ran¹, Luo Xin¹, Gao Yan², Du Qijiang¹, Zhuang Hongbo¹, Peng Xiaohong³, Fu Chunhua³

(1 Shenzhen Meteorological Service Center, Shenzhen 518000 2 Hong Kong Polytech University, HongKong
3 Dongguan Meteorological Bureau, Dongguan 523086)

Abstract: In this paper, based on the lightning images from observation tower in Shiyan Observatory of Shenzhen Meteorological Bureau and COMSOL simulation, a simulation channel close to natural lightning is established to model the surrounding environment of the building and the observed lightning channel (taking landmark buildings and building groups in Shenzhen as an example). Meanwhile, the connection process between the downward leader and the upstream leader stimulated by the raised objects (such as towers and tall buildings) is analyzed when the downward leader approaches the ground. The influence of the high buildings on the induced charge and current on the top of the natural lightning is also analyzed, and the specific quantitative indicators are obtained. In most cases, the enlargement coefficient of high buildings to the induced charge and current caused by lightning ranges between 2 and 4.5, and that whether there are surrounding buildings or not has little influence on such coefficient.

Keywords: high buildings, lightning, enlargement coefficient, induced charge, induced current

0 引言

随着我国城市化进程的加快推进, 在全国范围内出现了越来越多的高层建筑物, 其中广泛分布着各种种类、各种型号的电子产品。在高建筑物受到直接雷击时, 不但高层建筑物自身结构会遭到破坏, 放置于建筑物内的某些精密电子产品也有很大可能受到雷电流的干扰甚至被损坏。因此, 为了保护高建筑物本身及其中的电子设备, 需要对高建筑物(高塔)闪电进行一些特性分析和研究。

近年来, 大量的科学工作者^[1-2]对雷电进行了深

入的研究。当一个下行先导(downward leader)接近地面时, 在地面上凸起的物体上(例如高塔和高建筑物)会激发上行先导(upward leader), 当这个上行先导最终和下行先导连接时, 就形成了闪电回击过程。目前, 国内外针对高层建筑物(高塔)闪电特性进行了一些研究和分析^[3-6]。一些研究^[7-9]以广州塔(高600 m)为参考对象, 分析资料得到一系列关于广州塔对于附近区域雷电发生密度、回击峰值电流、闪电极性和回击次数产生影响的结论。同时, 国外一些专家学者也针对高塔闪电进行了一些观测和研究。

然而, 目前有关高层建筑物对自然闪电电荷特性的影响仅局限于观测结果的分析, 缺乏具体的理论基础和模拟结果对实际工作中高层建筑物雷电防护进行

收稿日期: 2018年11月14日; 修回日期: 2019年4月10日
第一作者: 蔡然(1987-), Email: cairanyoyo@126.com

帮助和指导。通过合理的技术仿真及数值运算,分析量化回击过程中高层建筑对其顶部所产生的感应电流和感应电荷变化的影响特征,研究一套从高层建筑物雷电基础参数出发,针对高层建筑的高效、合理的综合防雷体系,指导城市高层建筑防雷理论建设,进而更好地为深圳城市高层建筑提供科学合理的防雷技术指导 and 依据,对今后指导高层建筑防雷设计、提升雷电防护效果等方面有着极其重要的意义。

1 资料与方法

深圳市气象观测梯度塔位于深圳市宝安区石岩气象观测基地内,集边界层气象垂直探测、大气环境监测、雷电防御科学研究、气象灾害实景监视于一体,梯度塔为桅杆结构,桅杆高度为356 m,塔身为2.5 m×2.5 m,采用PHC管桩基础和5层(65、130、195、260、325 m)纤绳固定(图1)。高塔雷电观测平台于2016年建成,开展了雷电流、快慢电场、高速摄像等多种观测试验^[10]。



图1 深圳市气象观测梯度塔实景图

Fig. 1 Shenzhen meteorological gradient tower

为了研究自然闪电的起始过程和连接过程,利用其观测数据进行分析研究。该闪电光学观测站建立在一栋三层楼房的房顶,观测站距离梯度塔的水平距离约为440 m,直线距离约为560 m。在观测站中放置了两台不同配置的Photron Fastcam高速摄像机(HC-1和HC-2)用来观测和记录梯度塔塔顶上发生的闪电发展通道。HC-1镜头的焦距为20 mm,像素大小为20 μs,其对应的空间分辨率为0.56 m。拍摄时HC-1设置的帧数为20,000 FPS,每帧的曝光时间为10 μs。每个闪电过程的记录时间为50 ms,其中回击前的预触发时间占到总记录时间的20%。HC-2镜头的焦距为14 mm,像素大小为20 μs,其对应的空间分辨率为0.8 m。拍摄时HC-2设置的帧数为370000 FPS,每帧的曝光时间为

2 μs。每个闪电过程的记录时间为50 ms,其中回击前的预触发时间占到总记录时间的12%。

通过高速摄像机观测并拍摄到发生在梯度塔上的两次上行闪电过程,从图像中得到先导的发展通道和通道长度。通过每帧图像之间的时间间隔,求得两次上行先导过程的平均速度分别为 2.2×10^5 和 1.1×10^5 m/s。基于以上雷电观测影像资料,建立接近自然闪电的模拟通道,对高塔周围环境和观测到的实际闪电通道进行建模,最终研究得到梯度塔对自然闪电发展过程中塔顶产生的电荷密度分布和电流分布的影响。同时,为了便于比较分析,选取以深圳地王——京基建筑群为代表的高层建筑物群和以深圳平安大厦为代表的超高层建筑物,利用COMSOL仿真软件模拟自然闪电过程,并对上述三种不同类型高层建筑物上感应的电流与电荷进行仿真计算。

2 电荷密度发展特征研究

在建筑物上方发生的自然闪电中携带的电荷越多,在下方建筑物上所产生的感应电荷也越多,相应建筑物上感应电荷的能量密度也越大。根据现有条件,不能在模式中直接求出自然闪电传播过程中携带的电荷量的大小,所以选用高层建筑物屋顶上感应电荷的能量密度的大小,与相同条件下没有建筑物时所产生的感应电荷能量密度的大小做比较,来求得建筑物对实际闪电电荷的影响。将有高层建筑物时建筑物屋顶上感应电荷的能量密度与无建筑物时所产生的感应电荷能量密度之间的比值定义为扩大系数,并量化该系数。研究对象示意图见图2。

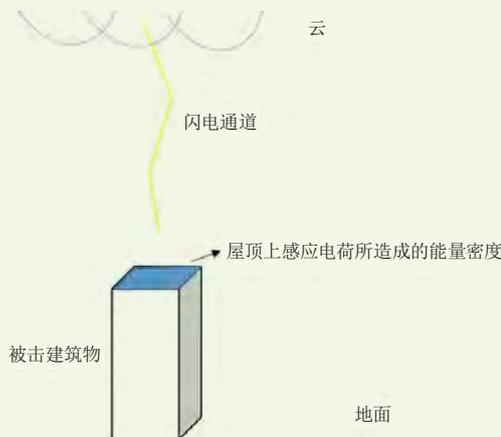


图2 研究对象示意图

Fig. 2 Sketch map of the subjects in the study

2.1 建筑物高度对扩大系数的影响

根据上文介绍的方法,仿真模拟并对模拟数据进行统计分析(图3),其中5条曲线分别代表建筑物顶部平台面积分别为6.25(边长为2.5 m)、100、

3500、10000和25000 m²时，建筑物高度和扩大系数的关系。

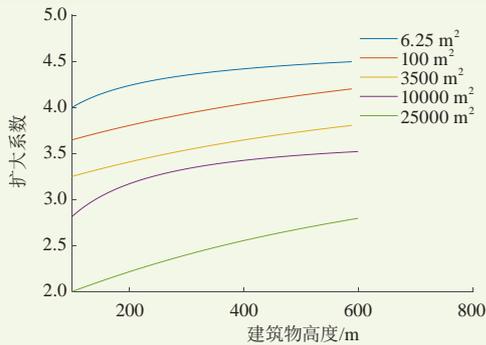


图3 建筑物高度和扩大系数的关系

Fig. 3 The relationship between enlargement coefficient and height of building

根据图3可以看出，在5条曲线中，系数都随建筑物高度的增加而增加，系数的变化范围为2.0~4.5。高层建筑对其上感应电荷的影响强度随着建筑物自身高度增加而增加，同时建筑物顶部平台面积越小，对感应电荷影响越大，但不论顶部平台面积扩大或缩小，在600 m高度的时候变化率均趋于缓和。

2.2 建筑物顶部平台大小对扩大系数的影响

图4为建筑物顶部平台面积和扩大系数的关系。图中不同颜色曲线分别代表普通建筑物（高度为50 m）、高层建筑（高度为100 m）、深圳气象梯度观测塔（356 m）和平安大厦（600 m）这4种情况。从图4中可以明显看出，4种不同高度的建筑物的扩大系数都随其顶部平台面积的增大而减小，系数的变化范围为2.3~4.5。另外随着建筑物高度越高，建筑物对地面感应电荷的影响也越高，与2.1节分析的结论一致。在建筑物不同高度和顶部面积的情况下，有无建筑物所造成的顶部感应电荷的扩大系数分布见表1所示。

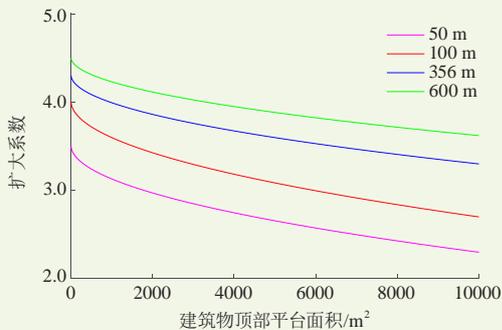


图4 建筑物顶部平台面积和扩大系数的关系

Fig. 4 The relationship between enlargement coefficient and area of roofs

2.3 建筑群对扩大系数的影响

选取深圳市内京基100大厦和地王大厦作为一个

表1 建筑物造成的电荷扩大系数

Table 1 Enlargement coefficient data by building

面积/m ²	高度/m			
	50	100	356	600
6.25	3.5	4.0	4.4	4.5
100	3.4	3.7	4.1	4.3
3500	2.8	3.2	3.6	3.9
10000	2.3	2.7	3.4	3.5
25000		2.0	2.5	2.8

建筑群，来开展对建筑物顶部感应电荷扩大系数的研究。京基100的高度为441 m、顶部面积为4900 m²；地王大厦的高度为383 m、顶部面积为2500 m²。两栋大楼的水平距离为400 m。

当京基100大楼单独存在时，其顶部平台在闪电通道下所产生的感应电荷的扩大系数为3.8；如果两栋高层建筑同时存在，京基100顶部平台感应电荷的扩大系数为3.9。另一方面，当地王大厦单独存在时，其顶部平台在闪电通道下所产生的感应电荷系数为3.7；如果两栋高层建筑同时存在，其顶部系数不变，具体数据如表2所述。当闪电通道在京基100楼顶时，地王大厦顶部产生的感应电荷为京基100楼顶所产生的感应电荷的1.8%；当闪电通道在地王大厦顶部时，京基100楼顶的感应电荷为地王大厦顶部的4.4%。

表2 两个相邻高建筑物对建筑物顶部感应电荷扩大系数的影响

Table 2 Induced charge expansion coefficient for two adjacent buildings

	建筑物高度/m	平台面积/m ²	单建筑物系数	建筑群系数
京基100	441	4900	3.8	3.9
地王大厦	383	2500	3.7	3.7

进一步把建筑物C（高度500 m，顶部平台面积900 m²）纳入研究范围，研究三个建筑物构成的超高建筑物群在闪电发生时的相互影响作用。三个超高建筑物所对应的分布如图5所示。三个建筑物之间互相影响的结果如表3所示。当闪电通道在京基100楼顶时，地王大厦顶部产生的感应电荷为京基100楼顶

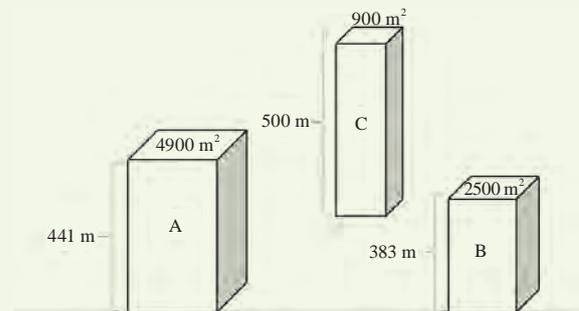


图5 建筑物群示意图

Fig. 5 Sketch map of the buildings

所产生的感应电荷的1.8%，建筑物C上的感应电荷为京基100上的0.8%；当闪电通道在地王大厦顶部时，京基100楼顶的感应电荷为地王大厦顶部的4.3%，建筑物C上的感应电荷为地王大厦的2%；而当闪电通道在建筑物C头顶时，地王大厦的感应电荷和京基100的感应电荷均为建筑物C的2.2%。

表3 三个相邻高建筑物对建筑物顶部感应电荷系数的影响
Table 3 Induced charge expansion coefficient for three adjacent buildings

	高度/m	面积/m ²	单建筑物系数	建筑群系数
建筑物A(京基)	441	4900	3.8	3.9
建筑物B(地王)	383	2500	3.7	3.7
建筑物C	500	900	3.7	3.8

建筑物A为京基100大厦；建筑物B为地王大厦；建筑物C高度为500 m，顶部平台面积为900 m²。

根据对这一建筑物群的研究，可以发现：

1) 有无相邻建筑物对建筑物顶部感应电荷的扩大系数影响很小；

2) 闪电通道在复杂地面上所产生的感应电荷，主要集中于正下方建筑物平面上。随着闪电通道离地面越来越近，其他建筑物顶部产生的感应电荷与通道正下方建筑物顶部产生的感应电荷的比率越来越小。

3 电流发展特征影响

选取深圳气象梯度塔为研究对象，固定塔高为356 m，研究塔顶平台面积不同时，感应电流系数的变化(图6)。当塔顶平台面积为6.25 m²时，高塔对闪电所引起的感应电流的扩大系数为4.3，而当平台面积增大至10000 m²时，其扩大系数下降至3.4，这与表1的数据结论一致。这说明高层建筑对闪电通道内电流的影响趋势与对电荷的影响趋势一致。

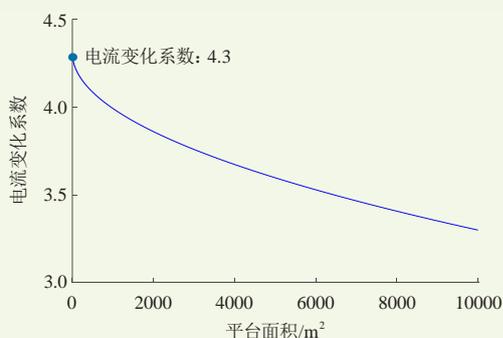


图6 电流扩大系数分布

Fig. 6 The current enlargement coefficient

另外，根据电流与电荷的关系公式 $I=\rho \times V$ ，当感应电荷密度 ρ 一定时，感应电流 I 的大小与传播速度 V 成正比。以深圳塔观测到的两个自然闪电个例为例：个例一发生于2016年7月30日15时35分38秒，先导传

播时拍摄到的高速摄像照片如图7a所示。根据对应的高速摄像资料，得到这一个例传播过程中的速度为 2.2×10^5 m/s。个例二发生于同一日的15时42分03秒，拍摄到的高速摄像照片如图7b所示，其对应的二维速度为 1.1×10^5 m/s。

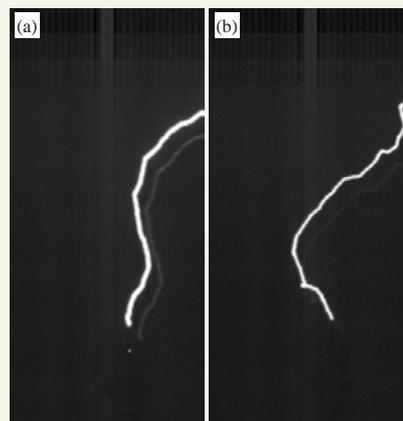


图7 2016年7月30日深圳塔上发生的两次自然闪电过程
(a) 15时35分38秒；(b) 15时42分03秒

Fig. 7 Two processes occurred on Shenzhen Meteorological Gradient Tower: (a) 15:35:38, (b) 15:42:03

根据电流公式，这两次过程中电流和电荷的对应关系如图8所示。从图8中可知，不同自然闪电过程中，先导的传播速度不同，对最终感应电流的大小也有很大影响。

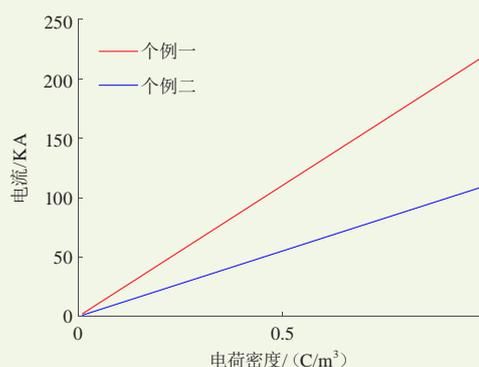


图8 感应电荷密度和感应电流大小的关系

Fig. 8 The relationship between induced charge and induced current

4 结论

通过上述分析，得到以下结论：

1) 高层建筑感应电流的影响趋势与对感应电荷的影响趋势一致，其影响程度与建筑物自身高度呈正比，同时与建筑物顶部平台面积成反比，对绝大多数情况而言，其扩大系数在2.0~4.5；

2) 有无相邻建筑物对建筑物顶部感应电荷的扩大系数影响很小；

3) 闪电通道在复杂地面上所产生的感应电荷，

主要集中于正下方建筑物平面上。随着闪电通道离地面越来越近,其他建筑物顶部产生的感应电荷与通道正下方建筑物顶部产生的感应电荷的比率越来越小。由于先导的传播速度不同,对最终感应电流的大小也有很大影响。

目前对深圳市内高塔和高建筑物上发生的自然闪电的观测资料有限,本文中所使用的仿真资料主要局限于自然闪电的光学图像资料,利用这些资料进行仿真计算并给出一些初步的结论。未来计划逐步完善深圳气象局石岩观测基地的高塔闪电综合观测站,对发生在深圳气象梯度塔上的闪电过程进行快慢电场、电流、磁场和光学等各方面的综合观测。利用综合观测资料,针对例如高层建筑对自然闪电的传播速度是否会有影响,进而影响闪电通道内的电流扩大系数等问题进行深入的研究和分析。

参考文献

- [1] 李国梁,李俊,李享. 一次强雷电天气特征分析. 气象科技进展, 2018, 8(5): 19-24.
- [2] 许洪泽,周梅. ADTD异常对闪电定位资料影响分析. 气象科技进展, 2018, 8(1): 33-37.
- [3] Warner T A. Upward leader development from tall towers in response to downward stepped leaders// International Conference on Lightning Protection. IEEE, 2010: 1-4.
- [4] Gao Y, Lu W, Ma Y, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. Atmospheric Research, 2014, 149: 193-203.
- [5] Jiang R, Qie X, Wang C, et al. Propagating features of upward positive leaders in the initial stage of rocket-triggered lightning. Atmospheric Research, 2013, 129-130: 90-96.
- [6] Wang Z, Qie X, Jiang R, et al. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(24): 307-315.
- [7] 吕伟涛,张长秀,陈绿文,等. 不同高度建筑物对周围闪电活动影响程度的对比. 第34届中国气象学会年会, 2017.
- [8] 宿志国,吕伟涛,陈绿文,等. 建筑物高度对地闪回击电磁场影响的模拟. 应用气象学报, 2018, 29(4): 487-495.
- [9] 陈绿文,吕伟涛,张义军,等. 下行先导对高层建筑上行先导起始和发展的影响模拟//第34届中国气象学会年会, 2017.
- [10] 杨悦新,邱宗旭,郭宏博,等. 深圳市气象观测梯度塔雷电流测量配置及初步结果. 广东气象, 2017, 39(6): 51-55.
- [40] 吴蔚,余锦华. GFDL_RegCM 对21世纪西北太平洋热带气旋活动的情景预估. 热带气象学报, 2011, 27(6): 843-852.
- [41] Jacob D J, Winner D A. Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment, 2009, 43(1): 51-63.
- [42] 刘峰,朱永官,王效科. 我国地面臭氧污染及其生态环境效应. 生态环境学报, 2008, 17(4): 1674-1679.
- [43] 黄亮. 我国臭氧污染特征及现状分析. 环境保护与循环经济, 2014, 34(5): 64-66.
- [44] 殷文军,彭晓武,宋世震. 深圳市空气污染与居民心血管疾病发病相关性的研究. 公共卫生与预防医学, 2009, 20(2): 18-21.
- [45] Liu T, Li T T, Zhang Y H, et al. The short-term effect of ambient ozone on mortality is modified by temperature in Guangzhou, China. Atmospheric Environment, 2013, 76(3): 59-67.
- [46] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学(第2版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [47] Liao K J, Tagaris E, Manomaiphiboon K, et al. Sensitivities of ozone and fine particulate matter formation to emissions under the impact of potential future climate change. Environmental Science & Technology, 2007, 41(24): 8355-8361.
- [48] Bernard S M, Samet J M, Grambsch A, et al. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States. Environmental Health Perspectives, 2001, 109(S2): 199-209.
- [49] 银朗月,黎军,廖东铭,等. 广西宜州市1950—2010年疟疾防治效果评价. 公共卫生与预防医学, 2011, 22(4): 19-21.
- [50] 杨坤,王显红,吕山,等. 气候变暖对中国几种重要媒介传播疾病的影响. 国际医学寄生虫病杂志, 2006, 33(4): 182-187.
- [51] 吴德仁,谢平. 我国亚热带地区登革热流行概况. 应用预防医学, 2009, 15(3): 190-192.
- [52] 俞善贤,李兆芹,滕卫平,等. 冬季气候变暖对海南省登革热流行潜势的影响. 中华流行病学杂志, 2005, 26(1): 25-28.
- [53] 杜尧东,吴晓绚,王华. 华南地区温度变化及其对登革热传播时间的影响. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3174-3181.
- [54] Hales S, Dewet N, Maindonald J, et al. Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. Lancet, 2002, 360(9336): 830-834.
- [55] 冯业荣,朱科伦,纪忠萍,等. 广州大气环境因素与 SARS 疫情短期变化关系的研究. 热带气象, 2005, 21(2): 191-198.
- [56] 杨智聪,杜琳,王鸣,等. 气压与气温对 SARS 发病流行的影响分析. 中国公共卫生, 2003, 19(9): 1028-1030.
- [57] Bi P, Wang J, Hiller J E. Weather: driving force behind the transmission of severe acute respiratory syndrome in China? Internal Medicine Journal, 2007, 37(8): 550-554.
- [58] 张强,叶殿秀,杨贤为,等. SARS流行期高危气象指标的研究. 中国公共卫生, 2004, 20(6): 647-648.
- [59] 范伶俐. 广州禽流感流行的气象条件分析. 气象科技, 2005, 33(6): 580-582.
- [60] 张庆阳,琚建华,王卫丹,等. 气候变暖对人类健康的影响. 气象科技, 2007, 35(2): 245-248.

(上接189页)