

# 昆明城市建筑物外墙壁面对庭院气温的影响

张会宁<sup>1,2</sup> 张一平<sup>1</sup> 周跃<sup>2</sup>

1 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223

2 昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650093

**摘要** 以低纬度高原城市昆明市为对象, 利用冬季(1月)和夏季(7月)不同高度的建筑物外墙壁面表面温度、外墙壁面近旁气温和对应高度的庭院气温实测资料, 分析了城市建筑物外墙壁面对庭院不同高度气温的影响。得出: 建筑物外墙壁面对庭院气温垂直分布的形成有着不可忽视的热力效应, 其效应随季节、昼夜以及壁面方位、高度的不同而各异。建筑物外墙壁面与庭院大气相互影响, 昼间建筑物外墙壁面向庭院大气传热, 呈现热源效应, 随高度增加, 热源效应减小; 夜间建筑物外墙中、上部壁面从庭院大气吸收热量, 呈现热汇效应, 随高度增加, 热汇效应增大。冬季各壁面的热力效应差异显著, 昼间的热源效应南向壁面最为显著, 北向壁面热源效应为负, 夜间的热汇效应北向壁面最大; 夏季各壁面的热力效应差异小于冬季, 昼间的热源效应西向壁面较大, 夜间的热汇效应东向壁面较明显。分析表明: 城市建筑物外墙壁面的热力效应不可忽视, 其对立体城市气候的形成有着重要的贡献。

**关键词** 城市气候 建筑物外墙壁面温度 庭院气温 昆明

文章编号 1006-9585(2008)05-0663-12 中图分类号 P434 文献标识码 A

## Impact of Buildings' External Wall Surfaces on the Courtyard Air Temperature in Kunming City

ZHANG HuiNing<sup>1,2</sup>, ZHANG YiPing<sup>1</sup>, and ZHOU Yue<sup>2</sup>

1 *Xishuangbanna Tropical Botanic Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223*

2 *Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093*

**Abstract** The impact of city buildings' external wall surfaces on the courtyard air temperature was analyzed by using observational data of the courtyard air temperature, buildings' external wall surfaces' temperature, and the air temperature near the buildings' external wall surfaces in winter (January) and summer (July) in Kunming, a city located in low latitude plateau. Results indicate that, the interaction of buildings and courtyard atmosphere, with the walls of different direction, different seasons, and time differences, the discrepancy is significant. Building and the courtyard atmosphere interact each other, buildings' external wall surfaces heat the courtyard atmosphere in daytime, and the courtyard atmospheric heat buildings in nighttime. With the high increasing, the transferring heat of buildings' wall surfaces to the courtyard atmospheric reduced, the transferring heat of courtyard atmospheric to the building increased in nighttime; the temperature of air near buildings (distance is 0.5 m) approximately equals to the temperature of courtyard atmosphere.

**Key words** urban climate, temperature of buildings' external surfaces, air temperature of the courtyard, Kunming

收稿日期 2007-07-03 收到, 2008-07-11 收到修定稿

资助项目 云南省自然科学基金项目 2003D0071M 和国家自然科学基金资助项目 59836250

作者简介 张会宁, 男, 1980年出生, 硕士, 主要从事生态气候和环境工程研究。E-mail: zhanghn@xtbg.ac.cn

通讯作者 张一平, E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

## 1 引言

随着社会不断发展和城市化进程的加快,人口急剧向城市集中,导致城市规模不断扩大,人口不断增加。城市将成为人类最主要的生活场所,其建筑物呈现高层化、大型化趋势。据联合国人口和发展委员会 2005 年报告<sup>[1]</sup>,1950 年城市人口所占比例为 30%,2005 年上升到了 49%,预计到 2007 年世界将有一半人口居住在城市,而到 2030 年世界城市人口所占比例将高达 61%。统计表明:2005 年中国城市人口已占全国人口的 43.0%<sup>[2]</sup>。为使众多的人能够生活于舒适的城市环境中,城市气候的研究乃是必不可少的。

自 1818 年 Howard<sup>[3]</sup>发现了伦敦城区气温高于其四周郊区气温,提出了著名的“城市热岛”概念以来,各国学者在不同城市对城市热岛效应开展了大量研究。而在低纬度地区和中纬度地区的夏季,由于热岛效应增加了城市高温出现的频率和引起高温灾害,因此造成了巨大的经济损失。

城市热岛效应的强度与城市中的建筑物关系十分密切。Chandler<sup>[4]</sup>指出英国城市热岛效应强度在夜间与观测点周围半径 500 m 的范围内的建筑物密度正相关系数高达 0.9。在对城市建筑物的几何形状与地表温度和低层气温的关系研究中,多在城市街谷中进行观测、分析和建立模型<sup>[5-9]</sup>。

中国城市庭院的布局有别于欧美国家,多为四周是高大楼房,中间留有空地,地面为草坪、树木以及混凝土结构的道路、球场等。而此种庭院布局将导致大气垂直结构不同于欧美国家街谷的大气垂直结构。

在昆明对于城市庭院小气候已开展了研究,如分析了城市区域屋顶与地面的风速和温度特征<sup>[10]</sup>,并指出城市表面积比率很大的屋顶面上,温度和风速也存在城内外差异,影响着城市热力状况<sup>[11]</sup>;通过观测,分析了庭院小气候特征<sup>[12]</sup>;探讨了城市庭院气温垂直分布特征及不同下垫面对其的影响<sup>[13]</sup>;并且分析了城市区域内建筑物表面温度特征<sup>[14]</sup>,城市建筑物外壁表温与近旁气温的时空分布<sup>[15]</sup>,外墙壁面的向内向外的热流量特征<sup>[16]</sup>,开展了外墙壁面与地面的热力效应比较研究<sup>[17]</sup>。但是,对于城市建筑物外墙壁面的热力效

应对庭院大气的贡献及其相互关系研究尚不充分,有必要对其进行深入研究,以揭示城市立体气候的形成机制。

为此,本文利用实际观测资料,通过分析城市建筑物外墙壁面不同高度表温和近旁气温与庭院垂直气温的分布特征及其相互作用,以探讨建筑物外墙壁面与庭院气候的热力效应及其相互影响程度,为深入研究城市庭院小气候形成机制和城市热岛效应以及探讨城市生活环境改善等方面提供科学依据和参考。

## 2 研究方法

### 2.1 研究地概况

昆明市地处低纬度(25°N, 103°E),高海拔(1 892 m)地区,属亚热带气候带。处于云南滇池盆地北端。受西南季风环流和地理位置的影响及滇池水体调节作用,季节变化不明显,气候四季如春,但干季(11月~次年4月)和雨季(5~10月)的差异显著。

近年来随着昆明城市化进程加快,城市规模扩大,城区面积不断增长。1985年昆明城建区面积仅为 80.4 km<sup>2</sup>,常住人口为 139.20 万<sup>[18]</sup>;2004年城建区面积已达 190 km<sup>2</sup>,常住人口已达 226.38 万<sup>[19]</sup>。

### 2.2 观测方法、要素及数据处理方法

观测地点位于昆明城区西北部中国科学院西双版纳热带植物园昆明分部庭院内。分别在 2005 年 1 月 26~28 日和 2005 年 7 月 29~31 日进行了连续昼夜观测。庭院气温的垂直观测选用大气球悬挂,将统一做了标订的 2 通道自记温湿计(TR-71 型,日本 T & D 株式会社)置于小百叶箱内,按照距地面的不同高度(2005 年 1 月,高度分别是 3、5、10、15 和 30 m;2005 年 7 月,高度分别是 3、5、10、20 和 30 m)悬挂在气球牵引绳上,记录干、湿球温度,观测时间为每 5 min 记数 1 次,连续观测 3 天。气球及它的牵引绳位于庭院中央,距建筑物外墙壁面均有一定距离(>20 m),所测气温可认为代表庭院气温值。

在办公楼的 4 面外墙距地面 0.5、1.5、6、10、14 和 17 m 高度设置观测点,测定了外墙壁面表温(505 型红外辐射温度计,日本 MIN OL-

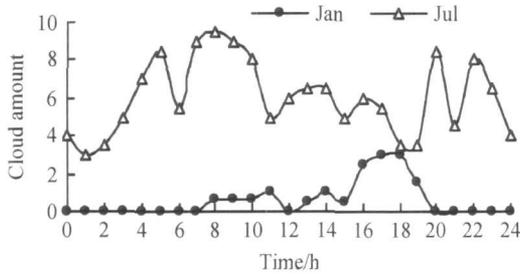


图1 2005年1和7月昆明低云量的日变化  
Fig 1 Temporal variation of low cloud amount in Kunming in Jan and Jul 2005

TA 株式会社) 和其近旁 (距墙面 0.5 m 处) 空气的干、湿球温度值 (TR-71 自记温湿计, 日本 T & D 株式会社), 观测为每小时 1 次, 昼夜连续观测。该办公楼墙体为砖石结构, 外部贴有棕色的小瓷砖。

天气状况: 1 月的观测时段基本上为晴好天气, 7 月的观测时段基本上为多云天气 (图 1), 均代表了昆明地区相应季节的典型天气状况。

在 1 月的观测过程中, 由于北向外墙壁面近旁的自记温湿计出现故障, 壁面近旁气温的数据缺失。

本研究主要针对庭院高度 (17.0 m 以下) 进行分析, 由于用气球所测庭院气温各高度与壁面表温观测高度不一致, 因此通过庭院气温数据, 作图得到垂直分布, 采用内插读取与办公楼壁面观测点相对应高度 (距地面高度为 0.5、1.5、6、10、14 和 17 m) 的庭院气温值。

观测期内, 1 月的日均风速为  $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 主要为西风, 7 月的日均风速为  $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风向不定。由于风速较大时会造成观测气球偏移, 所以分析中对因昼间较大风速所导致气球偏离垂直位置而造成的高度误差进行了校正。

### 3 观测结果及分析

#### 3.1 庭院气温、建筑物外墙壁面表温及其近旁气温垂直分布特征

图 2 显示了不同季节昼间 (1 月: 8~ 18 时; 7 月: 8~ 19 时)、夜间 (1 月: 19 时~ 次日 7 时; 7 月: 20 时~ 次日 7 时) 庭院气温的垂直分布特征。在冬季 1 月 (图 2a), 庭院昼间平均气温总体

上呈现随高度增高而减小的趋势, 气温从地面近旁的  $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$  降到屋顶面的  $15.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , 气温递减率为  $4.8 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ; 6~ 17 m 处夜间平均气温随高度增高而升高, 由  $11.1 \text{ }^\circ\text{C}$  升到  $12.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 气温递减率可高达  $-10.0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ , 呈现较为显著的逆温现象。

7 月的庭院气温垂直分布 (如图 2b 所示) 为: 昼间和夜间的平均气温垂直变化均呈随高度增高而降低的趋势, 其降低趋势昼间比夜间显著, 昼间气温值从地面处的  $26.1 \text{ }^\circ\text{C}$  降到屋顶面高度的  $24.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 气温递减率为  $7.6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ , 夜间则从  $22.1 \text{ }^\circ\text{C}$  降到  $21.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 气温递减率为  $3.0 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。

由图 3 可见, 壁面表温呈现随高度增高而降低的趋势, 且相同时段壁面表温存在方向上的显著差异。

1 月, 从昼间外墙壁面表温空间分布 (图 3a1) 可见, 由于太阳高度较低, 南向壁面照射时间较长, 受到的太阳辐射量较多, 各高度的壁面表温均以南向壁面最高, 且随高度降低变化幅度也最大 ( $\Delta t > 12.0 \text{ }^\circ\text{C}$ )。而北向壁面几乎未受辐射, 导致其壁面表温最低, 且随高度降低变化幅

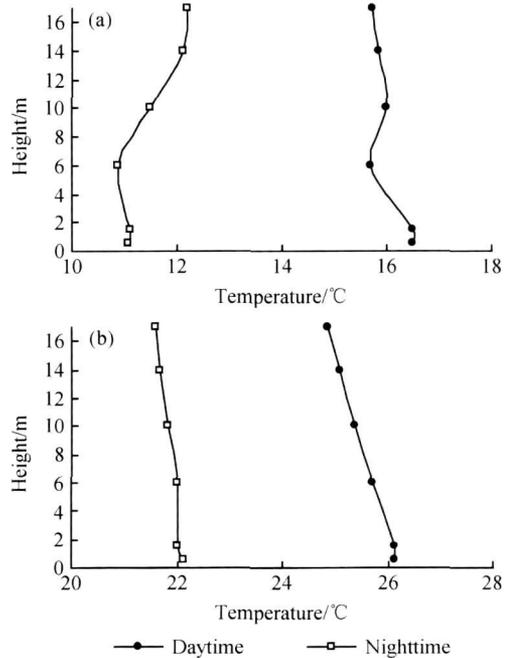


图2 庭院气温垂直变化特征: (a) 1月; (b) 7月  
Fig 2 Vertical distributions of air temperature over the courtyard: (a) Jan; (b) Jul

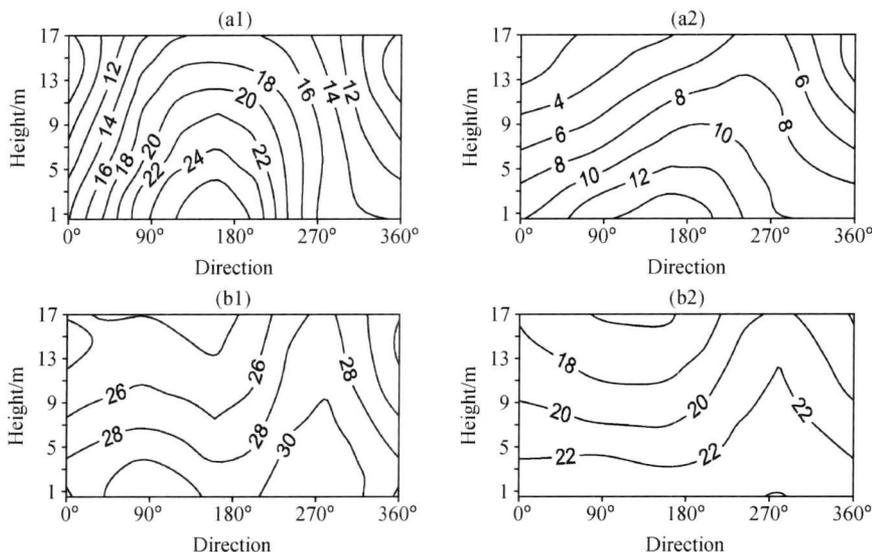


图3 建筑物外墙壁面表温空间分布 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 1月; (b) 7月。1: 昼间, 2: 夜间

Fig 3 Average external surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) of the buildings: (a) Jan; (b) Jul. 1: daytime, 2: nighttime

度也最小 ( $\Delta t > 7.0^{\circ}\text{C}$ )。夜间外墙壁面表温空间分布 (图 3a2) 与昼间类似, 但是壁面表温高值中心随高度增加发生偏移, 在建筑物下部南向壁面表温最高。随着高度增加, 壁面表温最大值向西移动; 在屋顶面附近, 壁面表温最大值出现在西向壁面处, 而北向壁面表温最低。

7月, 太阳高度升高, 昼间外墙壁面表温 (图 3b1) 以受到太阳直接辐射的东向和西向壁面较高, 东向随高度变化最大 ( $\Delta t > 8.0^{\circ}\text{C}$ ), 西向随高度变化最小 ( $\Delta t < 3.0^{\circ}\text{C}$ ); 在地面近旁北向和南向壁面表温相近, 但南向壁面表温随高度变化大, 从地面处的  $29.0^{\circ}\text{C}$  降到屋顶面附近处的  $23.0^{\circ}\text{C}$ , 相差约为  $6.0^{\circ}\text{C}$ 。夜间外墙壁面表温空间分布趋势 (图 3b2) 与昼间类似, 西向壁面的温度从地面处  $24.0^{\circ}\text{C}$  降到屋顶面附近高度的  $20.0^{\circ}\text{C}$ , 东向、南向和北向壁面表温差异不大。

从图 4 中可看出, 壁面近旁气温随高度变化梯度变化不明显, 各向壁面近旁气温存在差异。

1月建筑物外墙壁面昼间近旁气温空间分布 (图 4a1) 与壁面表温的分布趋势一致。在各向壁面中, 南向壁面近旁气温为最高, 气温垂直梯度变化也最明显, 从  $17.6^{\circ}\text{C}$  降到  $16.6^{\circ}\text{C}$ , 相差  $1.0^{\circ}\text{C}$ 。东向与南向相近, 西向气温最低, 且气温垂直梯度无明显变化, 上下均在  $15.8^{\circ}\text{C}$  左右。夜间 (图 4a2), 不同方位壁面近旁气温差异较小 ( $\Delta t < 0.5^{\circ}\text{C}$ ), 以南向壁面中部的近旁气温最高, 为

$13.0^{\circ}\text{C}$ 。

7月, 伴随建筑物外墙壁面表温的变化 (图 3), 其近旁气温的分布也呈不同的特征。昼间, 气温最高值出现在西向, 为  $26.6^{\circ}\text{C}$ , 其垂直变化也最大 ( $\Delta t > 1.3^{\circ}\text{C}$ )。北向壁面近旁气温最低, 为  $25.2^{\circ}\text{C}$ , 其垂直变化不明显。东、南向壁面近旁气温在建筑物下部相近, 南向壁面的垂直变化稍大于东向。夜间 (图 4b2) 同昼间相似, 西向壁面近旁气温最大, 为  $22.6^{\circ}\text{C}$ , 其垂直变化也最大 ( $\Delta t > 0.5^{\circ}\text{C}$ ), 东、南向相近, 北向最小。

### 3.2 不同季节建筑物外墙壁面表温与庭院气温差的时空分布

通过计算 1 月和 7 月建筑物各向外墙壁面表温与其对应高度的庭院气温的差值, 得出温差的时空分布 (图 5)。从图中可清楚地看出: 建筑物外墙壁面表温与庭院气温的差值随时间和高度的不同而有显著变化。总的来说, 昼间大部分时间差值为正, 并且在建筑物下部越接近地面, 差值就越大。夜间除地面附近处外均为负值, 而且随着高度增加, 温差绝对值增大。温差  $0.0^{\circ}\text{C}$  线呈“几”字型分布。

根据热量传递理论可知, 在差值为负的区域, 呈现庭院大气向壁面传递热量, 而在差值为正值的区域, 则为壁面向庭院大气输送热量。

冬季 1 月, 东墙壁面 (图 5a1) 温差的正值最大区域 ( $\Delta t > 12.0^{\circ}\text{C}$ ) 出现在中午 11~13 时,

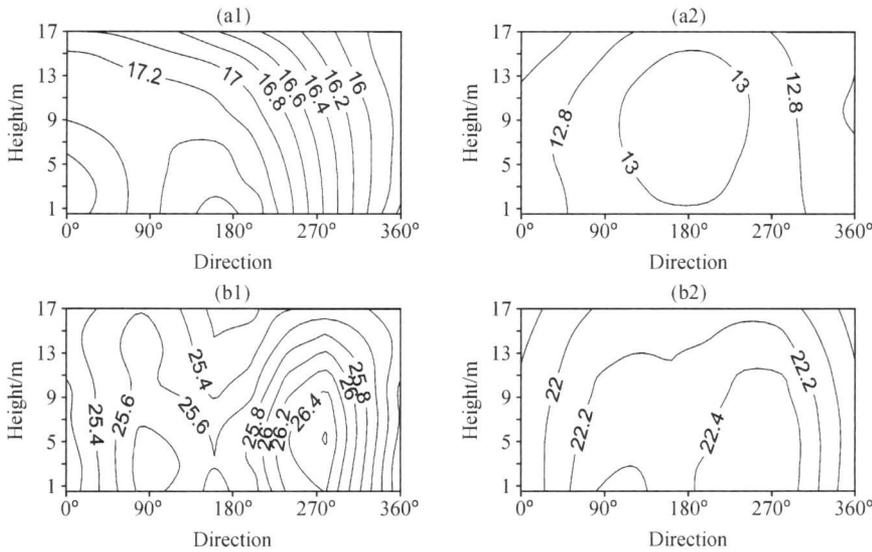


图4 建筑物外墙壁面近旁气温空间分布 (单位: °C): (a) 1月; (b) 7月。1: 昼间, 2: 夜间

Fig 4 Average air temperature (°C) near external surface of the buildings: (a) Jan; (b) Jul. 1: daytime, 2: nighttime

位于建筑物壁面下部近地面附近处; 负值中心 ( $\Delta t < -10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 在 23 时~ 次日 6 时出现在建筑物屋顶面高度附近 (14 m 之上)。8~ 10 时和 14~ 16 时温差随时间变化较大 (等温差线密集), 而垂直变化不明显。10~ 14 时温差随时间高度变化缓和, 11 时各高度处于全天最大值。在其余的时段里, 温差随时间变化不明显, 但随高度变化显著, 5 时各高度出现全天的最小值。

南墙壁面的温差 (图 5 b1) 与东墙类似, 高值区 ( $\Delta t > 16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 出现在中午 13~ 15 时建筑物壁面下部近地面附近处, 由于太阳辐射高度角随时间的变化, 出现的时刻比东墙晚约 2 h; 低值区 ( $\Delta t < -8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 22 时~ 次日 6 时位于建筑物屋顶面高度。8~ 13 时和 17~ 19 时温差变化较大, 垂直变化不明显。13~ 17 时温差随高度变化缓和, 14 时各高度处于全天最大值。其余时间段 (19 时~ 次日 8 时) 温差变化不明显, 垂直变化显著, 5 时为各高度全天的最小值。

西墙壁面的温差 (图 5c1), 与东墙、西墙的温差趋势有显著的差别, 差值为正的区域较小, 只是在 14~ 17 时距地面 2 m 以上处。高值区域 ( $\Delta t > 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 出现在 16 时, 位于建筑物壁面中部距地面 9 m 处。0.0 °C 线呈瘦长的“U”字状。在其余大部分区域里差值为负, 低值区域 ( $\Delta t < -6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 23 时~ 次日 6 时位于建筑物屋顶面附近高度, 全天各高度最低值出现在夜间 5 时。西

墙的极端温差值及温差变化要弱于东墙和南墙。

北墙壁面由于处于阴面, 所受的太阳辐射最小, 温差 (图 5 d1) 全天均为负值, 且变化不明显。随高度的增高温差的绝对值变大。

夏季 7 月, 东墙壁面表温与庭院气温差值的时空分布 (图 5a2) 趋势同 1 月相似。高值区 ( $\Delta t > 9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 出现在中午 11~ 13 时, 位于建筑物壁面下部地面附近处; 低值区 ( $\Delta t < -6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 19 时~ 次日 1 时出现在建筑物上部 (9 m 之上)。10~ 14 时温差随高度变化缓和, 12 时各高度处于全天最大值。在其余的时段里, 温差变化不明显, 但随高度变化显著, 0 时出现各高度全天的最小值。

南墙壁面温差的时空分布 (图 5b2) 趋势也与 1 月相似, 但等温差线较为稀疏, 显示 7 月的温差小于 1 月。高值区 ( $\Delta t > 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 出现在中午 11~ 17 时, 位于建筑物壁面下部近地面附近处; 低值区 ( $\Delta t < -6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 在 22 时~ 次日 1 时出现在建筑物屋顶面高度 (13 m 之上)。14 时各高度处出现全天最大差值。温差存在着随高度而递增 (减) 的变化趋势, 0 时出现各高度全天的最小值。

由西墙壁面温差的时空分布 (图 5c2) 可见, 负值区 ( $\Delta t < 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 占全天各高度的大部分区域。高值区 ( $\Delta t > 9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 出现在中午 15~ 17 时, 位于建筑物壁面下部近地面附近处; 低值区

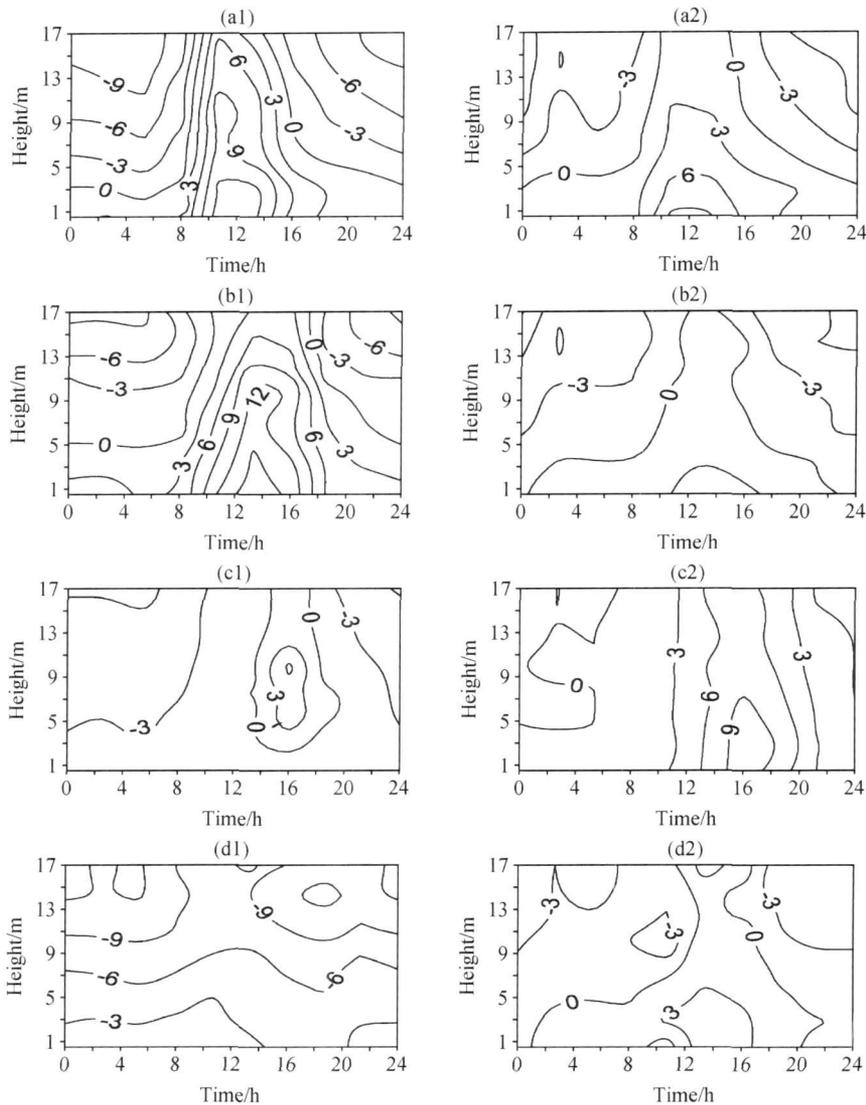


图5 建筑物外墙壁面表温与庭院气温差的时空分布 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 东向; (b) 南向; (c) 西向; (d) 北向。1: 1月, 2: 7月

Fig 5 Spatial-temporal distribution of the differences between the temperature of external wall surface and the atmosphere over the courtyard (units:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) east; (b) south; (c) west; (d) north. 1: Jan, 2: Jul

( $\Delta t < 0.0^{\circ}\text{C}$ ) 的区域较小, 21时~次日7时出现在建筑物上部 ( $> 7\text{ m}$ )。全天的温差垂直变化不明显, 10~22时变化显著。16时出现全天各高度的最大值, 最小值出现在0时。

北墙壁面温差的时空分布 (图5 b4) 与1月有所不同, 出现显著的正负值区域, 趋势与东南墙壁面类似, 呈“几”字型。低值区 ( $\Delta t < -3.0^{\circ}\text{C}$ ) 在18时~次日7时出现在建筑物上部 ( $> 9\text{ m}$ ); 高值区 ( $\Delta t > 3.0^{\circ}\text{C}$ ) 13~17时出现在建筑物壁面下部近地面附近处。10~13时和16~19时温差变化显著。13~16时温差随高度变化缓和, 14时达各高度全天最大值。其余时段温差变化不

明显, 但随高度变化显著, 0时各高度均出现全天的最小值。

### 3.3 不同季节建筑物外墙近旁气温与庭院气温差的时空分布

通过计算1月和7月建筑物各向外墙近旁气温与其对应高度的庭院气温差值, 得出其时空分布 (图6, 1月观测中因仪器故障缺失北向数据)。

从图6中可清楚地看出, 建筑物外墙壁面表温与庭院气温差值随季节不同而有明显的差别。相对来说, 1月差值为正值的区域占绝大部分, 昼夜间的差值有差异, 夜间差值随高度的变化明显, 而昼间差值则是随时间的变化显著。7月昼

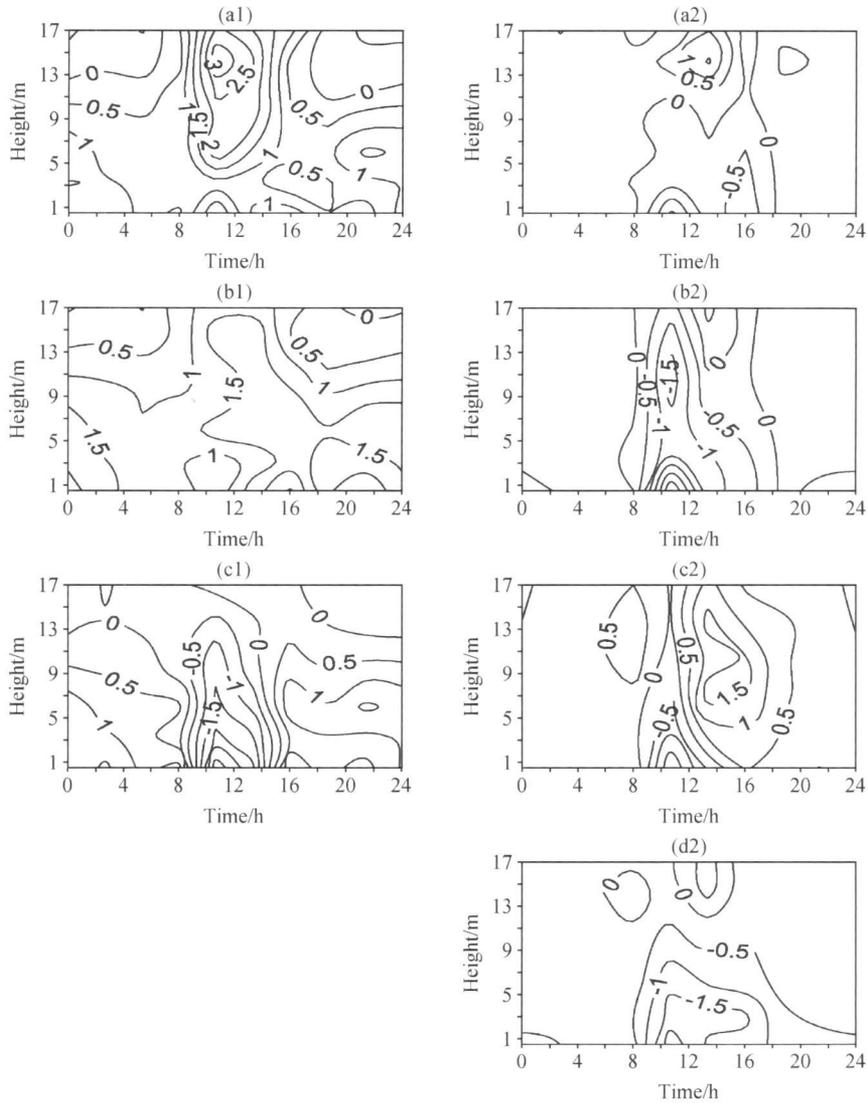


图6 同图5, 但为建筑物外墙壁面近旁气温

Fig 6 Same as Fig 5, but for the temperature of air near the external wall

间差值存在着较为显著的时间变化, 夜间差值较小, 时空变化也不明显, 即外墙近旁气温同庭院气温基本相同。

### 3.3.1 1月的时空分布

从东墙壁面温差的时空分布(图6a1)中可见, 昼间(8~16时)温差梯度变化较明显, 特别是在8~10时及14~16时, 在11时达到全天各高度的最高值, 温差随高度增高而变大, 高值区( $\Delta t > 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )出现在11时的13~15m处。夜间, 温差梯度随高度变化较明显, 从地面往上差值由约1.5 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐减小, 到屋顶面附近高度达-0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。低值区( $\Delta t < 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )23时~次日1

时出现在屋顶面附近高度。

南墙壁面温差的分布特征(图6b1)同东向相似, 差值强度稍小。昼间(8~16时)温差梯度随时间变化较明显, 特别是在8~11时及15~17时, 在12时达到全天各高度的最高值, 温差随高度变化不大。夜间, 温差梯度随高度变化较明显, 0时为全天各高度的最低值, 从地面起差值由约2.0 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐减小, 到屋顶面附近为0.0 $^{\circ}\text{C}$ 。低值区( $\Delta t < 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )20时~次日0时出现在屋顶面附近高度。

从西墙壁面温差的分布特征(图6c1)中可看出与东南向有差别。在屋顶面附近昼夜间温差很

小;而在近地面处,昼间(9~15时)温差为负值,夜间温差为正值。低值区( $\Delta t < -3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )出现在上午11时的地面附近高度处。在9~16时温差梯度随高度、时间变化较明显,11时达到全天各高度的最高值,温差随高度增加而变大。

### 3.3.2 7月的时空分布

由东墙壁面温差的时空分布(图6a2)可见,昼间(8~18时)温差随高度增高而变大,在离地面14m处温差的最大值为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,13时达到全天各高度的最大值,高值区( $\Delta t > 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )出现在13时的13~15m处。夜间(18时~次日8时)温差很小( $\Delta t < 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),可以忽略。

南墙壁面温差的分布特征(图6b2)同东向相似,但差值强度稍大。昼间(8~18时)温差随高度增高而变大,13时屋顶面附近温差的最大值为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在11时达到全天各高度的最低值,低值区( $\Delta t < -3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )出现在11时地面近旁处。夜间(18时~次日8时)温差很小( $\Delta t < 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

西墙壁面温差的时空分布如图6c2。昼间温差上下午有明显的正负差别,上午(8~12时)温差为负值,而下午温差为正值。上午11时,地面附近出现极低值区( $\Delta t < -1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),14时在7~15m之间出现极高值区( $\Delta t > 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。而夜间温差很小,这同东、南向类似。

北墙壁面温差的时空分布(图6d2)同以上分析类似。昼间温差随高度变化较明显,随高度增加,差值从 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增到 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,13时达到各高度的最大值。极低值区( $\Delta t < -2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )11时出现在地面附近,极高值区( $\Delta t > 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )13时位于屋顶面附近高度。而夜间温差很小。

## 3.4 建筑物外墙壁面表温、外墙壁面近旁气温与庭院气温差的空间分布

### 3.4.1 1月的空间分布

1月建筑物外墙壁面表温与庭院气温差的空间分布如图7a1、b1、c1。可见,昼间(图7a1)差值存在显著的方位差异,东向和南向的差值全为正值,且高度越低,差值越大,近地面处差值最大( $\Delta t > 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。而在北向,差值全为负,随高度增高差值的绝对值增大,最大为屋顶面近旁处( $\Delta t < -8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),西向差别不明显。夜间(图7b1),其差值在北向和南向的各高度及东向

和南向的较高位置处全为负值,仅在东向和南向的5m之下为正值,显示了夜间建筑物外墙壁面从庭院大气中吸收热量。其差值绝对值随高度增高而增大,且在北向最大( $|\Delta t| > 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ );而在南向壁面近地处,仍有热量从壁面向近旁大气输送( $\Delta t > 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。从全天(图7c1)来看,西向和北向其差值全为负,随高度增高差值绝对值增大,最大区域 $|\Delta t| > 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而在东向和南向,建筑物壁面的上部,差值为负,最大区域 $|\Delta t| > 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而在建筑物壁面下部差值为正,最大区域 $\Delta t > 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以上分析结果显示,从日平均来看,1月建筑物北侧和西侧壁面呈现热汇效应,而东向和南向壁面上部为热汇,下部为热源。

1月建筑物外墙壁面近旁气温与庭院气温的气温差空间分布(图7a2、b2、c2)显示。昼间,东向、南向温差为正,随高度变化不大;西向温差不明显,多为负值( $|\Delta t| < 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。夜间,东向、南向和西向其温差基本上为正值,温差随高度增高而减小,在近地面附近差值最大,约为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从全天来看差值多为正值,说明整体上建筑物外墙东、南、西向壁面的近旁大气是向庭院大气传递热量,呈现热源效应。

### 3.4.2 7月的空间分布

7月建筑物外墙壁面表温与庭院气温差的空间分布如图8a1、b1、c1所示。昼间(图8a1)差值在西向的各高度均为正,地面附近差值最大( $\Delta t > 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。而东、南、北向地面附近温差为正,随高度增加温差逐渐减小,进而变为负值,其温差 $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线出现在9m处。夜间(图8b1)各向的气温差值相似,近地面层(3m下)差值为正,而较高位置(3m到最高所测量高度)差值为负,且随高度增加差值的绝对值变大。在各向中东向的温差最显著( $|\Delta t| > 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。从全天(图8c1)看,除西向各高度差值均为正呈热源现象外,其他3个方向随高度增加温差由正值变为负值,呈现上下相反的热力作用特征,约以7m为分界,其下为正呈热源,其上为负呈热汇。

外墙壁面近旁气温与庭院气温差的空间分布如图8a2、b2、c2。昼间(图8a2),西向温差各高度全为正,而另外3个方向的温差为上部正下部负,这同图8a1中的情况正好相反。夜间(图

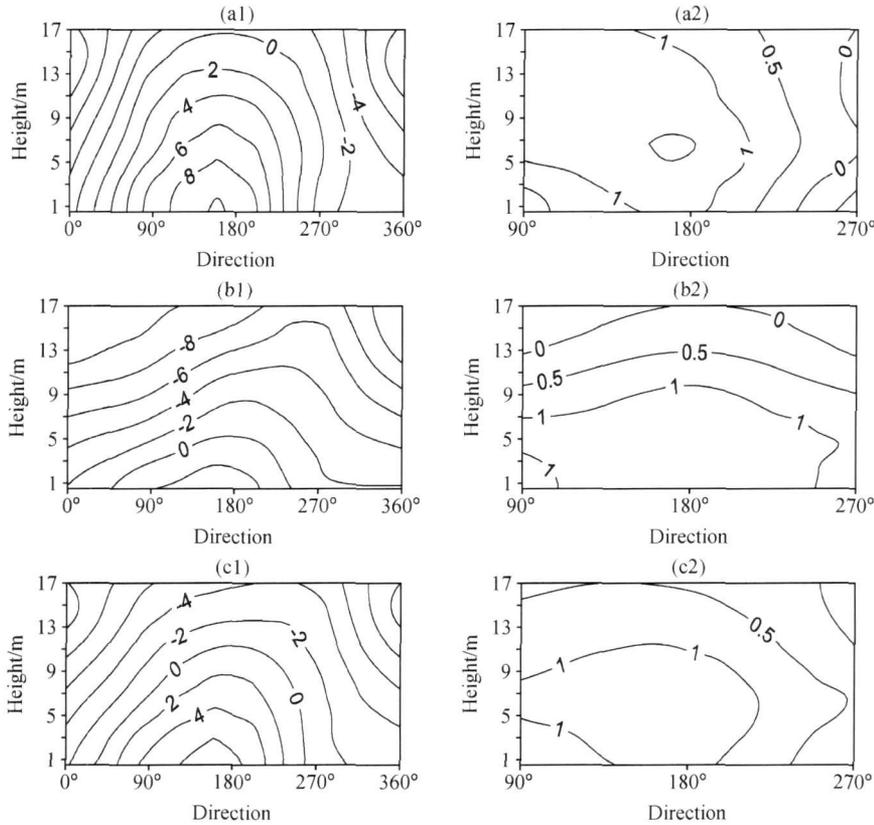


图7 1月建筑物外墙壁面表温、外墙壁面近旁气温与庭院气温差的空间分布(单位:℃): (a) 昼间; (b) 夜间; (c) 全天。1: 壁面表温与庭院气温差, 2: 壁面近旁气温与庭院气温差

Fig. 7 The differences of average external surface temperature and average air temperature near external surface between average courtyard air temperature in Jan (units: °C): (a) daytime; (b) nighttime; (c) all day. 1: The differences of average external surface temperature between average courtyard air temperature, 2: The differences of average air temperature near external surface between average courtyard air temperature

8b2), 除北墙壁面近旁气温低于庭院气温外, 东、南、西向其差值均为正, 但差别不大 ( $|\Delta t| < 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ )。从全天(图8c2)来看, 趋势同昼间的趋势类似。

#### 4 结语与讨论

城市庭院大气温度与人们的日常生活密切相关, 同时, 庭院气温也是城市大气热岛的重要组成部分。在城市中, 除不同下垫面热力特征<sup>[20]</sup>、大气中的温室气体、人为热等<sup>[21, 22]</sup>成为城市热岛形成的诱因外, 城市中建筑物壁面对热岛的影响也不容忽视。城市中的建筑物对城市大气环境有着直接的影响, 壁面的表面温度是其接受太阳辐射所产生的热力效应的一个直接表征。其中, 建筑物外墙壁面直接影响着它周围的空气温度, 进

而影响到庭院气温的垂直分布。建筑物外墙壁面近旁空气可以看成是建筑物壁面对庭院大气影响的中介和过渡。

比较图2a和2b, 可以看出对于昆明城市庭院大气温度, 1月和7月的垂直分布有着较大的差异。冬季夜间, 随高度增高气温呈增高的趋势, 表现为逆温分布; 冬季昼间及夏季的昼夜间, 随高度增高气温递减。显示了屋顶面对庭院大气的热力作用冬季显著。特别值得注意的是, 1月昼间, 庭院大气温度在屋顶面高度以下(6~10m)存在较明显的逆温, 显示了建筑物壁面和屋顶面的热力效应对庭院大气温度的影响。如此不同的庭院大气温度分布特征, 势必影响到城市大气垂直分布; 同时也进一步验证了张一平等<sup>[12]</sup>和张会宁等<sup>[13]</sup>对城市大气垂直分布特征形成原因的解释。

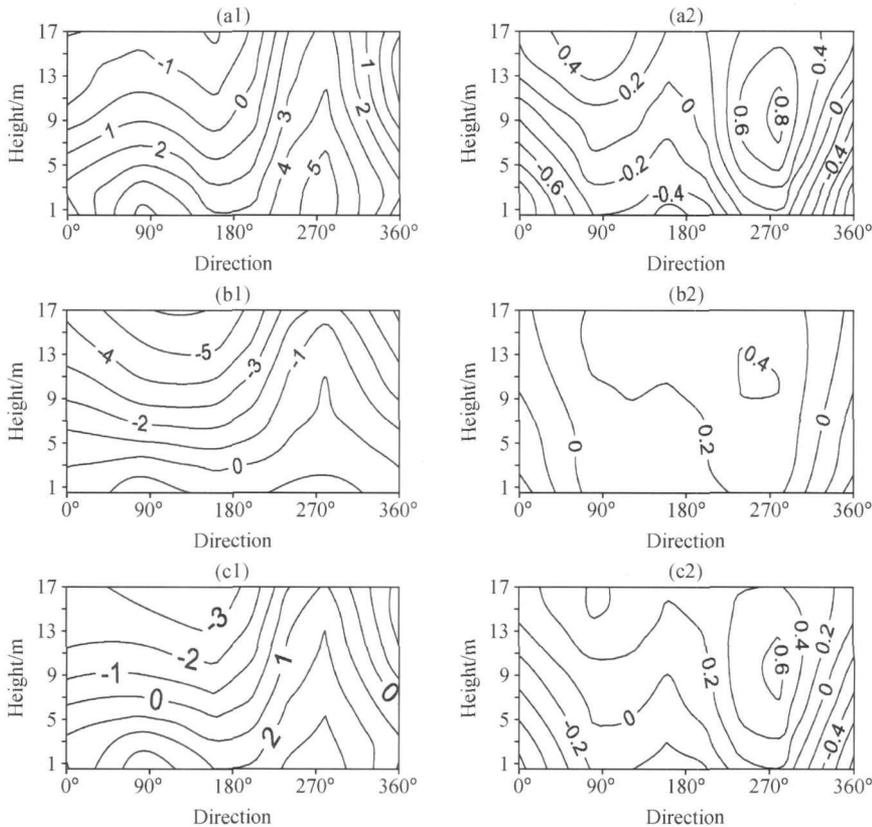


图 8 同图 7, 但为 7 月

Fig 8 Same as Fig 7, but for Jul

从建筑物外墙壁面表温的空间分布(图 3)可见, 由于不同壁面受太阳辐射量和多次反射作用以及地面对大气的长波辐射的共同影响, 建筑物壁面表温随壁面方位、高度、季节而有较大差异。昼间、夜间的平均壁面表温, 冬季均是南向壁面最高, 而夏季则是西向壁面最高。这说明冬季太阳直射南半球, 南向壁面接受到的太阳辐射量远高于其他壁面<sup>[16]</sup>, 导致南向壁面表温最高; 并且由于昼间所吸收的热量, 在墙壁内存储的热量也较多, 使得夜间墙壁内部向外放出的热量也较多, 因而南向壁面表面温度高于其他壁面。在夏季, 太阳高度较高, 东西向接受到较多的太阳辐射<sup>[16]</sup>, 并且西向壁面是在下午温度较高时再受到太阳的直接照射, 使得西向壁面表温呈现较高值; 另外, 昆明夏季的多云雨天气也是影响各个壁面表温差异的原因。

建筑物外墙壁面近旁气温的空间分布表现出的特征同外墙壁面表温一致。同样, 冬季南向壁面气温最高, 夏季南向壁面气温最低。但是气温

的垂直变化不明显(图 4)。

通过对建筑物外墙壁面近旁气温与庭院气温的比较(图 6~ 8)可以看出, 壁面近旁气温值介于建筑物外墙壁面表温与庭院气温之间, 与庭院气温相比同样存在温差, 昼、夜及全天壁面近旁气温与庭院气温的平均差值冬季最大可超过 1.5 °C, 夏季差值也达 0.8 °C。说明, 建筑物外墙壁面 0.5 m 处的气温受到建筑物壁面热力效应的影响, 相对于庭院气温来说, 同样具有其热力效应, 且冬季大于夏季。

对于建筑物外墙壁面对庭院气温的影响, 通过壁面表温与庭院气温差来体现。以上分析(图 5)显示, 冬季, 昼间中午左右时段, 壁面表温高于庭院气温, 建筑物向庭院气温传热, 表现为热源。并且, 温差随高度而增大, 热源的强度也随之增大。昼间由于太阳辐射的原因, 壁面的建筑物接受辐射的能力远高于空气, 其升温快, 在近地面处建筑物多, 壁面及壁面间辐射经过吸收、反射、再反射等过程, 再加上地面对周围的短波

辐射, 使得近地面处的壁面表温在昼间显著高于相同高度处庭院气温。北向壁面表温全天低于庭院气温的原因是处于背阳面, 昼间壁面受不到太阳辐射, 而庭院大气在接受太阳辐射同时还受到建筑物壁面的辐射影响, 导致庭院气温高于北向壁面表温。夜间建筑物外墙壁面表温基本上低于庭院气温, 特别是北向壁面, 其表温全天低于庭院气温 (图 5)。说明是庭院大气在向建筑物传热, 建筑物表现为热汇。随高度增加, 差值的绝对值增大, 热汇的强度也就越大。

夏季, 壁面表温与庭院气温差的时空变化趋势与冬季相似, 但其温差强度小于冬季。原因可能是夏季降雨较多, 空气湿度大, 热量通过潜热转换的多。同时, 夏季建筑材料的湿度大, 导致其比热容  $c$ 、导热系数  $\lambda$  随之增大, 从而使材料的蓄热系数  $S_1$  升高, 这种热惰性的增大, 使得夏季建筑壁面表温值随时间变化但变化趋势缓和。另外由于夏季正午太阳高度角小于冬季, 致使建筑物外墙单位面积所接受的太阳辐射的截面小于冬季; 而且, 夏季太阳辐射强度较大, 故地面反射的辐射强度大, 导致更高位置处空气温度升高, 与壁面表温相近。

比较建筑物各向外墙壁面日平均表温与庭院日平均气温的相互影响 (图 7) 可见, 冬季, 南向壁面其差值最高, 差值多为正, 总体表现为热源; 北向壁面其差值最低, 多为负值, 总体表现为热汇。夏季, 西向壁面其差值最高, 总体表现为热源; 北向壁面其差值最低, 其总体表现为热汇。

通过以上讨论, 可以得出建筑物外墙壁面对庭院气温的影响如下:

(1) 建筑物壁面对城市庭院立体气候的形成有着不可忽视的热力效应, 其效应随季节、昼夜、壁面方位和高度的不同而各异。

(2) 建筑物外墙壁面昼间向庭院大气传热, 而夜间庭院大气向建筑物外墙壁面传热。

(3) 昼间, 随高度增加, 建筑物外墙壁面向庭院大气传热减小; 夜间则反之, 随高度增加, 庭院大气向建筑物传热增加。

(4) 建筑物外墙壁面对庭院气温的影响, 各向壁面影响差异显著。冬季, 昼间南向壁面对庭院大气放热最多, 夜间北向壁面对庭院气温影响最大, 并且全天对壁面放热。夏季, 昼间西向壁

面对庭院大气的放热最大, 夜间东、南、北向壁面对庭院气温的影响相近, 南向壁面对庭院气温的影响最小。

(5) 建筑物外墙壁面近旁气温受建筑物壁面的影响, 相对于庭院气温, 同样具有其热力效应。

致谢 中国科学院西双版纳热带植物园的刘玉洪老师和研究生窦军霞、宋富强、赵双菊、王馨、刘洋、宋清海、杨振、高进波、林华、李成春、吴毅以及昆明理工大学的杨顺才、徐梦春等同学参加了观测, 在此表示感谢。

### 参考文献 (References)

[ 1 ] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population division. Population Challenges And Development Goals. New York, United Nations, 2005, 10

[ 2 ] 国家统计局. 中华人民共和国 2005 年国民经济和社会发展统计公报. 国家统计局, 2006  
National Bureau of Statistics of China. Statistical Communique on the 2005 National Economic and Social Development (in Chinese). National Bureau of Statistics of China, 2006

[ 3 ] Howard L. International association for urban climate. The Climate of London, 1, London, 1818

[ 4 ] Chandler T J. Urban Climate Inventory and Prospect. Paper presented at WMO Symposium on Urban Climate and Building Climatology, Brussels, Belgium, 1969

[ 5 ] Nakamura Y, Oke T R. Wind, temperature and stability conditions in an east west oriented urban canyon. *Atmos. Environ.*, 1988, **22** (12): 2691~ 2700

[ 6 ] Eliasson I. Urban geometry, surface temperature and air temperature. *Energy and Buildings*, 1991, **16**: 144 ~ 145

[ 7 ] 桑建国, 刘辉志, 王保民, 等. 街谷环流和热力结构的数值模拟. 应用气象学报, 2002, **13** (特刊): 69~ 81  
Sang Jianguo, Liu Huizhi, Wang Baomin, et al. Numerical simulation of the flow field and thermal structure over a street canyon. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Suppl.): 69~ 81

[ 8 ] Liu Huizhi, Liang Bi, Zhu Fengrong. A laboratory model for the flow in urban street canyons induced by bottom heating. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (4): 554~ 564

[ 9 ] 刘翥懿, 刘克旺. 株洲城市街区夏日温度分布与街道特征关系的研究. 湖南林业科技, 2005, **32** (2): 11~ 13  
Liu Xijie, Liu Kewang. Research on relationship between street-characteristics and temperature condition in Zhuzhou City. *Hunan Forestry Science and Technology* (in Chr

- nes), 2005, **32** (2): 11~ 13
- [10] 张一平, 彭贵芬, 张庆平. 城市区域屋顶上与地上的风速和温度特征分析. 地理科学, 1998, **18** (1): 45~ 51  
Zhang Yiping, Peng Guifen, Zhang Qingping, et al. A study on the characteristic of wind and temperature over the rooftop and the ground in urban area. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 1998, **18** (1): 45~ 51
- [11] 张一平, 彭贵芬, 张庆平. 城内外屋顶面附近风·温特征的初步分析. 气象科学, 1998, **18** (1): 56~ 62  
Zhang Yiping, Peng Guifen, Zhang Qingping, et al. A primary analysis on the characteristic of temperature and wind over the rooftop between the urban and the suburban. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **18** (1): 56~ 62
- [12] 张一平, 李佑荣, 刘玉洪, 等. 城市庭院小气候特征季节变化初探. 高原气象, 2002, **21** (4): 381~ 388  
Zhang Yiping, Li Yourong, Liu Yuhong, et al. A preliminary study on seasonal variation of microclimatic characteristic of city courtyard. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21** (4): 381~ 388
- [13] 张会宁, 张一平, 何云玲, 等. 昆明城市庭院气温垂直分布特征及不同下垫面对其影响的研究. 热带气象学报, 2007, **23** (3): 293~ 299  
Zhang Huining, Zhang Yiping, He Yunling, et al. Vertical distributions characteristics of air temperature of the atmosphere over the courtyard and influences of different underlying surface in Kunming city. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2007, **23** (3): 293~ 299
- [14] 张一平, 李佑荣. 城市区域内建筑物表面温度特征. 城市环境与城市生态, 1997, **10** (1): 39~ 42  
Zhang Yiping, Li Yourong. A study on the characteristic of temperatures on the different surface of building in the urban area. *Urban Environment & Urban Ecology* (in Chinese), 1997, **10** (1): 39~ 42
- [15] 张一平, 何云玲, 刘玉洪, 等. 昆明城市建筑物外壁表面热力效应研究——不同季节建筑物外墙壁面表温和近旁气温时空分布特征. 地理科学, 2004, **24** (5): 597~ 604  
Zhang Yiping, He Yunling, Liu Yuhong, et al. Thermal effects of building's external surfaces in Kunming City-Characteristics of external surface temperature and nearby air temperature. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **24** (5): 597~ 604
- [16] Zhang Yiping, He Yunling, Liu Yuhong. Thermal effects of building's external surfaces in city-Characteristics of heat flux into and out of external wall surfaces. *Chinese Geographical Science*, 2004, **14** (4): 343~ 349
- [17] 何云玲, 张一平, 窦军霞, 等. 城市建筑物外壁表面热力效应研究(3)——建筑物外墙壁面与地面的热力效应比较. 推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会2004年年会论文集(上册), 气象出版社, 2004. 271~ 282  
He Yunling, Zhang Yiping, Dou Junxia, et al. Thermal effects of building's external surfaces in city (3) - the thermal effects comparison between building walls and ground surface. *Promote Meteorological Scientific and Technological Innovation, Speed up the Development of Meteorology - Chinese Meteorological Society 2004 Annual Proceedings* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 271~ 282
- [18] 云南省统计局. 云南统计年鉴(1985). 北京: 中国统计出版社, 1986  
Yunnan Bureau of Statistics. *Yunnan Statistical Yearbook* (1985)(in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 1986
- [19] 云南省统计局. 云南统计年鉴(2005). 北京: 中国统计出版社, 2006. 640~ 644  
Yunnan Bureau of Statistics. *Yunnan Statistical Yearbook* (2005) (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2006. 640~ 644
- [20] Kimura F, Takahashi S. The effects of land use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment. *Atmos. Environ.*, 1991, **25B** (2): 155~ 164
- [21] 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 城市人为热对北京热环境的影响. 气候与环境研究, 2004, **9** (3): 409~ 421  
Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (3): 409~ 421
- [22] 蒋维维, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科学, 2007, **31** (1): 37~ 47  
Jiang Weimei, Chen Yan. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 37~ 47