第20卷 第1期 热 带 气 象 学 报 Vol.20, No.1
2004年02月 JOURNAL OF TROPICAL METEOROLOGY Feb., 2004

文章编号：1004-4965（2004）01-0097-09

城市区域下垫面性质和位置差异对太阳辐射平衡的影响

张一平，何云玲，刘玉洪，马友鑫，
李佑荣，窦军霞，郭 萍

（中国科学院西双版纳热带植物园，云南 昆明 650223）

摘 要： 以低纬高原城市昆明为研究对象，利用城市区域内4月、8月、12月的太阳辐射观测资料，对城市区域内不同下垫面性质和位置差异的辐射平衡特征和变化规律进行了研究。结果表明：昆明地区4月的太阳辐射各分量均较高，而多云天气的8月太阳辐射分量较小；屋顶的总辐射量和净辐射量均维持较高的数值，而受周围环境、建筑物遮蔽等影响的草地和球场则数值变化较大；随时间和下垫面的不同，反射辐射呈现较大差异；有效辐射则在多云天的8月呈现较小值（分配率趋于0）。所得结果可为探讨城市气候形成机制及城市气候的深入研究提供依据，并为其它地区的研究提供参考。

关 键 词：城市； 下垫面； 辐射平衡

中图分类号：P161.1 文献标识码：A

1 引 言

辐射状况是气候形成的先决条件之一，它具有极为明显的环境效应和生物效应。人为干扰下形成的城市内的各种不同种类的下垫面，其物理性质与自然地域有很大区别，影响了城市区域的太阳辐射平衡各分量。近年来随着我国经济建设的不断发展，城市化进程越来越快，城市效应愈来愈明显。城市的扩大、地表面状况的改变、建筑物密度的加大和高层化以及大气环境的日益恶化等，在很大程度上影响着城市区域太阳辐射状况的变化。国外对中纬度地区的太阳辐射平衡特征已有一定研究[1]，但多集中在城内外状况的对比上[2~4]；而且在研究方法上利用卫星遥感资料反演下垫面太阳辐射特征也已有大量成果[5~6]。国内对城市区域内不同下垫面辐射平衡特征的研究，特别对不同季节太阳辐射特征的研究十分少见。

收稿日期：2002-06-11；修订日期：2002-08-28

基金项目：国家自然科学基金重点项目(59836250)资助

作者简介：张一平(1957－)，男，云南省人，博士，研究员，已在国内外发表论文60余篇，主要研究领域：生态气候（城市气候、森林气候、农业气象）。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文利用低纬高原城市—— 昆明市区庭院内不同下垫面太阳辐射的观测资料，分析了城市区域 4 月、8 月、12 月的不同下垫面的辐射特征和变化规律，以探讨城市区域由于下垫面性质和位置不同而造成的太阳辐射平衡的差异特征。

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（1892 m）地区，大气密度仅为海平面的 80 %。由于受地理位置和大气环流的影响，四季不分明，而干季（11～4 月）、雨季（5～10 月）区别显著。总辐射最大值出现在干季后期的 4 月，辐射量趋近于高原地区的拉萨；而在雨季，受云量的影响，总辐射减少，但也与广州相近[7]。城建区面积 148 km^2，人口 210.81 万（2000 年）[8]。近年来随着城市化进程加快，城市区域下垫面的性质、结构变化日趋复杂，影响了城市区域太阳辐射平衡特征。

2.2 观测地点

在位于昆明城区内的中国科学院西双版纳热带植物园昆明分部的办公楼屋顶、庭院内的草地、球场各设置一个观测点。屋顶、球场的下垫面均为混凝土结构；草地测点在绿化花园中，周围有稀疏树木，测点地表面为矮草。从遮蔽度（图 1）来看，屋顶的遮蔽度最小，几乎未受到遮蔽；处于庭院内的球场，以及草地的东侧和北侧有职工宿舍楼（4 层楼），南侧有办公楼（4 层楼），西侧有车库（3 层楼），四周都有房屋遮蔽，遮蔽角均较大。

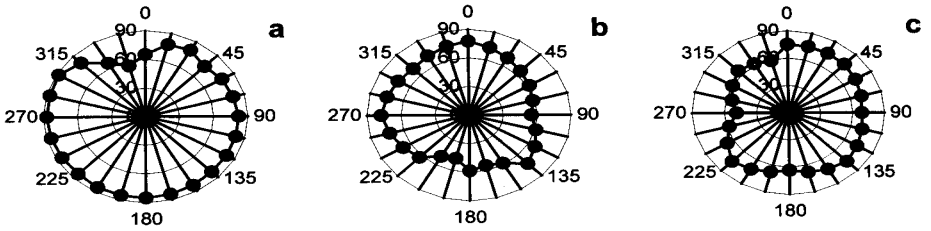

图 1 观测点遮蔽角 a. 屋顶； b. 草地； c. 球场。

2.3 观测概要

到达下垫面的太阳辐射的分配状况可由辐射平衡关系式表示

$$Rn=(1-á)Q-I \quad (1)$$

或

$$Rn=Q-Qá-I \quad (2)$$

式中 Rn 为净辐射，$Qá$ 为反射辐射，$á$ 为反射率（$Q/Qá$），Q 为总辐射，I 为有效辐射。

本研究中，净辐射（Rn）、总辐射（Q）、反射辐射（$Qá$）均为实测，利用式(1)可以求出有效辐射（I）值。研究中观测时间为北京时（早于地方时 1：13′）。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

观测要素为：总辐射和反射辐射（TBQ 型太阳辐射表，锦州 322 研究所），净辐射（MF-40 净辐射仪，日本 EKO 株式会社），1.5 m 和 0.5 m 高度干、湿球温度（TR-72 型自记温度计，日本 T and D 株式会社），表面温度（505 型红外辐射温度计，日本 MINOLTA 株式会社），风速（FV-1 型微风仪，长春气象仪器研究所）风向、云量（目测）等。除干湿球温度（5 分钟观测 1 次）外，其余要素的观测间隔为 1 小时。

观测期间分别为 1999 年 12 月 25～27 日，2000 年 8 月 3～12 日，2001 年 4 月 20～22 日。观测期间的天气状况：12 月和 4 月基本上为晴好天气，8 月基本上为多云天气（图 2），均代表了昆明地区同期的典型天气状况。

在以下分析中，其数值为所有观测天数的平均值。

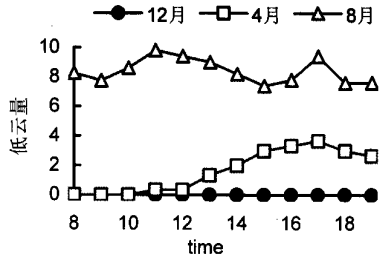

图 2　低云量时间变化

3　观测结果及分析

3.1　太阳辐射各分量的时间变化特征

各个月份不同下垫面的太阳辐射各分量的时间变化如图 3 所示，以下分别对各辐射分量的时间变化进行讨论。

3.1.1　总辐射变化特征

从不同月份屋顶、草地、球场的平均总辐射量来看，4 月由于昆明处于干季后期，天空晴朗，总辐射的时间变化较平稳；加之太阳高度较高，导致到达地面的太阳总辐射量最大；在中午 13~14 h 的最大值可接近 1000 W/m^2。而 12 月虽然也是晴好天气，总辐射的时间变化也趋于平稳，但是由于太阳高度较低，到达地面的太阳总辐射量并不高，最大值仅在 600 W/m^2 左右。8 月份昆明处于雨季，云量较多，基本上为多云天气，虽然太阳高度较高，但是受天空浮云的影响，太阳总辐射的时间波动较大，时间变化曲线起伏较明显，最大值均在 600 W/m^2 以下；在屋顶和球场，其总辐射量最大值甚至低于 12 月。这从一个侧面反映了昆明春城的形成原因。

而从不同性质的下垫面来看，太阳总辐射量的时间变化受观测位置的影响较大，屋顶由于遮蔽较小，在天气晴好的 4 月和 12 月的太阳总辐射时间变化较均匀；而球场由于西面遮蔽较大，导致太阳总辐射在下午 16 h 后会有一个急速下降的过程，并且特征在 12 月最为明显；草地则受季节的影响较大，在太阳高度较低的 12 月，下午受遮蔽影响，在 15 h 后出现总辐射急剧降低趋势，而在太阳高度较高的 4 月和 8 月，该现象则没有出现。

从以上不同下垫面各月的平均太阳总辐射的时间变化可以看出，在城市区域，不同月份、不同位置，太阳总辐射数值和时间分布特征均呈现较大差异，这必然导致各地的小气候产生差异。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

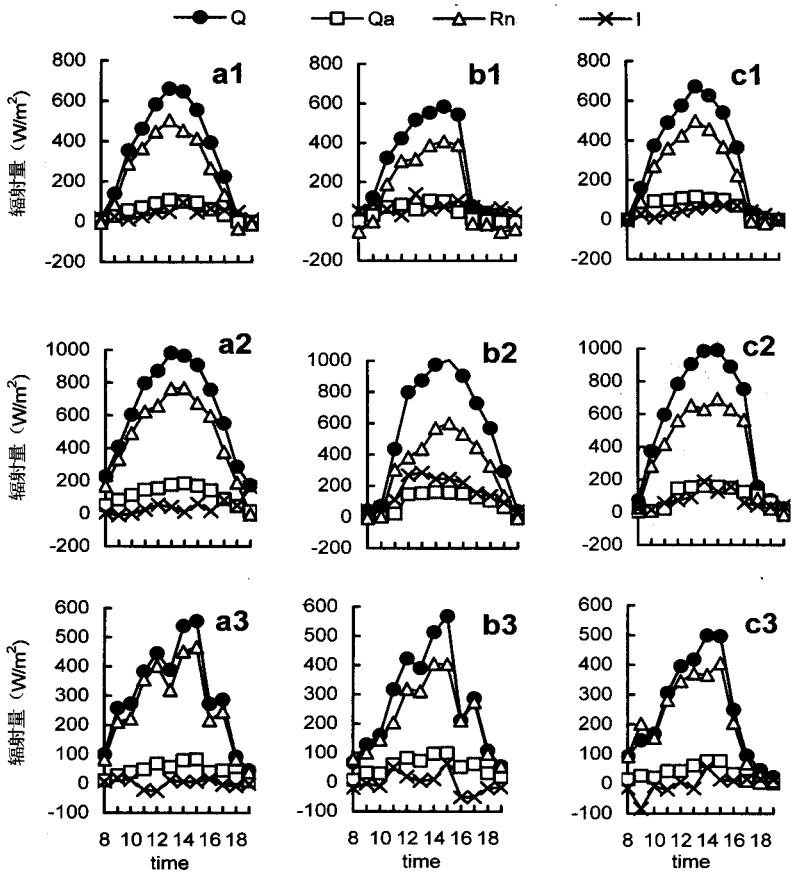

图3 太阳辐射各分量的时间变化 a. 屋顶； b. 草地； c. 球场。1. 12月；2. 4月；3. 8月。

3.1.2 反射辐射变化特征

从不同月份来看，反射辐射同样是4月最大（$Q\alpha$max>150 W/m^2），12月次之（$Q\alpha$max>100 W/m^2），而8月最小（$Q\alpha$max<100 W/m^2）。

在12月和4月，屋顶的反射辐射时间变化不大，球场的反射辐射与总辐射变化特征一致，下午有一个降低的过程，而草地的反射辐射随时间的波动较屋顶和球场明显；8月，各测点的反射辐射均有明显的波动。可见，反射辐射的变化特征与总辐射具有很好的相关关系。

3.1.3 有效辐射变化特征

有效辐射表征了地面的长波辐射平衡。图3结果表明，各测点的有效辐射的时间变化波动相对较大，最大值同样显示了4月、12月较大，8月较小的特征。不同测点间比较，有效辐射的时间变化具有不同的变化趋势，最大值出现时刻参差不齐，显示了城市内复杂环境对长波辐射的影响。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1.4 净辐射变化特征

净辐射显示了地面附近用于热量交换的能量。从图 3 可见，净辐射的时间变化趋势与总辐射相似，最大值同样呈现 4 月较大，12 月次之，8 月最小的特征。晴好天气的 4 月和 12 月，在遮蔽较小的屋顶上，净辐射的变化趋势较平稳；受到部分遮蔽的球场，下午有急剧变化；而在草地，由于受下垫面性质影响，波动较大。多云天气的 8 月，各测点的净辐射时间变化均呈现较大的起伏。

3.2 太阳辐射总量变化特征

各辐射分量由于受不同因子影响，因而出现了时间和空间变化的差异。以下通过统计各个月份观测日所有天数的平均值的昼间太阳辐射各分量，得出不同测点的太阳辐射各分量的昼间总量值（图 4），然后对其进行分析。

比较各测点总辐射量（图 4 a）可以看出总辐射在 4 月呈现最大值，12 月次之，8 月最小。屋顶的各月份总辐射量均最高，4 月的总辐射可达 27.0 MJ/m^2 受到遮蔽影响的草地（24.2 MJ/m^2）和球场（23.7 MJ/m^2）的总辐射量均小于屋顶，但相差不大。12 月比较各测点辐射总量，遮蔽较小的屋顶的总辐射仍最大（14.5 MJ/m^2），而由于太阳高度角的变化，草地受遮蔽程度增加，其总辐射量（11.5 MJ/m^2）小于球场（13.8 MJ/m^2）。 8 月虽然太阳高度较高，但受到天气状况的影响，各测点的辐射总量均较小，各测点辐射总量分布特征为屋顶最高（13.0 MJ/m^2），草地（11.6 MJ/m^2）次之，球场（10.5 MJ/m^2）最小。

反射辐射量主要受总辐射量及下垫面反射率影响[1]。各观测点的反射辐射（图 4 b）基本上仍以 4 月最大，12 月次之，8 月最小，表现出与总辐射很好的相关性。由于绿化草地本身的结构性质决定了对能见光有很强吸收作用，反射率小，却对近红外辐射有很强反射作用[1]。所以在 4 月晴天，屋顶的反射辐射总量仍最大（5.0 MJ/m^2），球场次之（4.1 MJ/m^2），草地最小（4.0 MJ/m^2）。12 月份由于太阳高度较低，地表面颜色对反射辐射的影响增大，导致地表面颜色较浅的球场反射辐射总量（2.64 MJ/m^2）大于屋顶（2.3 MJ/m^2），而草地的反射辐射总量仍最小（1.9 MJ/m^2）。8 月由于天气状况（多云天）的影响，总辐射量较小，且多为散射光，反射辐射总量为草地最大（2.3 MJ/m^2），屋顶次之（1.9 MJ/m^2），球场最小（1.5 MJ/m^2）。

长波有效辐射主要受总辐射、云量、下垫面状况、下垫面温度、气温、湿度等影响，其中与下垫面温度成正比关系[1]。各观测点有效辐射总量仍以 4 月最大，12 月次之，8 月最小（图 4d）。晴天 4 月、12 月，昼间在日射影响下，各测点表面温度都高，而屋顶、球场的气温也高（高于草地）[9]；而草地的近旁有树木和建筑物阻挡，风速小于屋顶[10]，减少了热量散失，且草地表面颜色较深，反射辐射又最小[11]（图 4b），所以使得有效辐射大于屋顶和球场。而在 8 月由于低云量影响，3 个观测点总辐射量小，加之有云层的阻挡，导致有效辐射总量很小（绝对值小于 0.1 MJ/m^2），其中草地和球场的有效辐射呈现负值，但数值均较小（草地-0.1MJ/m^2，球场-0.02 MJ/m^2）。

由辐射平衡式（式（1））可以看出，净辐射受总辐射、反射辐射、大气逆辐射、地面长波辐射共同影响作用。从图 4 c 可见，各测点净辐射总量仍是 4 月最大，12 月次之，8 月最小。在 4 月和 12 月，屋顶昼间净辐射最大（20.2 MJ/m^2），球场次之（16.3 MJ/m^2），草地最小（13.4 MJ/m^2）；8 月则是屋顶（13.0 MJ/m^2）>草地（9.3 MJ/m^2）>球场（9.1 MJ/m^2）。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 不同测点昼间辐射总量差异

为了进一步分析不同下垫面间的辐射差异特征，以遮蔽较小的屋顶为基准，求出各观测点与屋顶辐射总量的比值（图5）。

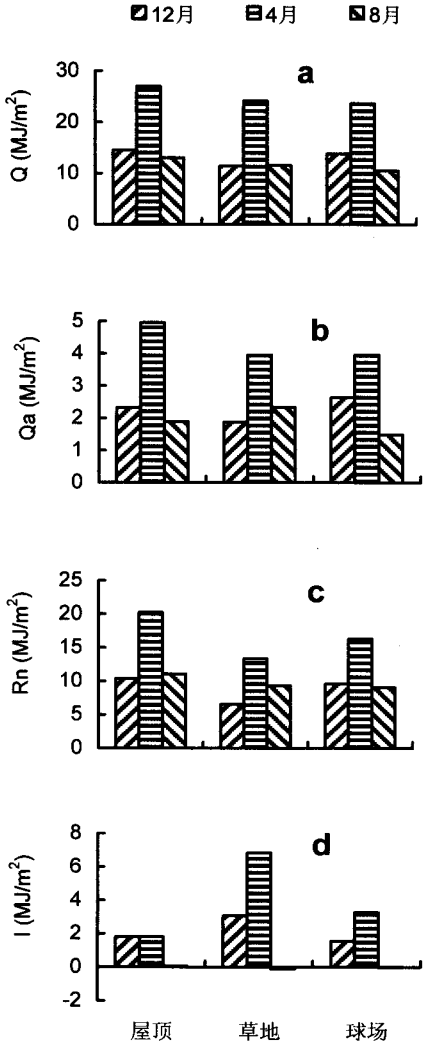

图4 不同测点间辐射总量

a. *Q*; b. *Qa*; c. *Rn*; d. I_o。

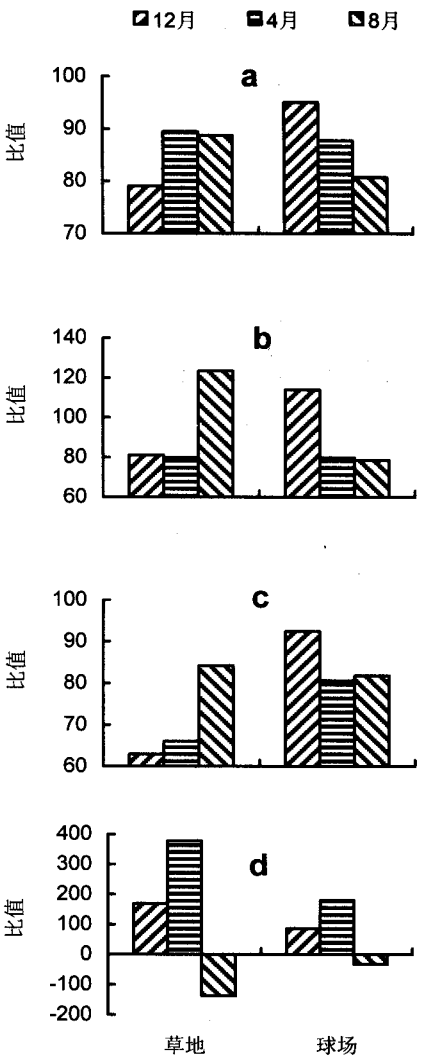

图5 草地和球场与屋顶的昼间辐射总量比值

a. *Q*; b. *Qa*; c. *Rn*; d. I_o。

从草地与屋顶的对比来看，昼间总辐射量虽然3个月份内都是草地小于屋顶，但差异以12月最明显(仅为屋顶的79.1 %)；4月和8月的比值相差不大(图5 a)。从反射辐射量的比值（图5 b）来看，8月由于多云天的影响，草地的反射辐射大于屋顶（草地为屋顶的123.4 %）；12月和4月的情况与8月相反，草地的反射辐射小于屋顶。对于有效辐射（图5 c），

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

草地 4 月昼间由于太阳辐射强，反射辐射又弱，有效辐射较大，造成与屋顶的差异极大，为屋顶的 378.0 %，12 月也是草地有效辐射大于屋顶，而 8 月草地的有效辐射为负值，就净辐射而言屋顶还是大于草地，球场与屋顶的总辐射差异（图 5 a）12 月最小，可达屋顶的 95.1 %；而在 4 月和 8 月球场由于受遮蔽大的缘故，导致球场与屋顶间总辐射差异较大，其中 8 月仅为屋顶的 80.7 %。球场 12 月反射辐射大于屋顶（为屋顶的 113.9 %），4 月和 8 月的情况与 12 月相反，球场小于屋顶。对于有效辐射，4 月昼间球场有效辐射大于屋顶，为屋顶的 180.8 %；12 月是球场小于屋顶，8 月球场的有效辐射为负值，且数值较小，与屋顶的比值也最小，仅为屋顶的-32.5 %。最后，就净辐射而言，所观测的月份都是球场小于屋顶；不过 12 月二者差异最小（91.78 %），4 月和 8 月差异稍大（80.6 %，82.3 %）。

从图 5 中还可看出：草地和球场与屋顶的辐射总量比值，在不同月份呈现相反的分布趋势，各辐射量均是草地与屋顶差异大时，球场与屋顶的差异就小，如总辐射，12 月草地与屋顶的比值为 79.1 %（差异较大），而球场与屋顶的比值为 95.0 %（差异较小）；而 8 月，草地与屋顶的比值为 88.7 %（差异较小），而球场与屋顶的比值为 80.7 %（差异较大）。如此的辐射状况分布特征，势必构成城市不同下垫面的能量分布差异。

3.4　各测点辐射平衡各分量分配率

由于各测点局地因素的影响，使实际到达各点的太阳总辐射不仅辐射的量值各不相同；各辐射分量占总辐射的分配率也不尽相同。表 1 给出各下垫面的反射辐射量、有效辐射量、净辐射量的分配率（Qi/Q）。

总的来说，各下垫面在各月的太阳辐射分量的分配一般为：反射辐射和有效辐射的份额较小，均不到 30 %；净辐射占了绝大部分份额，约在 50 %以上。

表 1　各测点辐射平衡各分量分配率（%）

月份	反射辐射			有效辐射			净辐射		
	屋顶	草地	球场	屋顶	草地	球场	屋顶	草地	球场
12	16.0	16.5	19.1	12.5	27.7	11.3	71.6	56.0	69.6
4	18.4	16.6	17.4	6.7	28.3	13.8	74.9	55.3	68.8
8	14.5	20.1	14.1	0.5	-0.8	-0.2	85.0	80.7	86.1

各下垫面的反射辐射的分配率（反射率）在 14.1 %~20.1 %间变化，呈现较大的时空差异。在 12 月份球场的反射率为最高，草地次之，屋顶最小；4 月份屋顶最大，球场次之，草地最小；到了 8 月则是草地最高，屋顶略大，球场最小。不同季节，最大值、最小值出现的位置和数值均有差异，进一步构成了城市辐射的复杂性。

各下垫面的有效辐射分配率依下垫面热力性质的不同而不同，总的说来 8 月各点有效辐射所占比例都很小（均不到±1 %）；12 月是草地＞屋顶＞球场；4 月仍然是草地上有效辐射所占比例最大（28.3 %），球场居中（13.8 %），屋顶最小（6.70 %）。可见 4 月份草地有效辐射分配率达到了球场的近 2 倍，屋顶的 4 倍左右。

对净辐射分配率而言，由于前两项分配率在各测点表现均不一样，因而相应地其净辐射的份额也不一致，从不同时间来看，12 月和 4 月的分配率均较小（55 %~75 %），8 月的分配率均较大（大于 80 %）。而不同下垫面比较，屋顶的净辐射所占份额均较大（大于 70

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

%），而草地净辐射的分配率最小。显示了下垫面性质和天气状况的差异，城市地点所获得的用于各下垫面的辐射（净辐射）有着较大差异，所以如何改善下垫面的特性，使其趋于合理化，已是在城市建设中必须充分考虑的问题。

4 结语与讨论

(1) 不同下垫面的太阳辐射平衡特征具有较大时空差异（图 3），在遮蔽较小的屋顶，天气状况较好的晴天，太阳辐射各分量的时间变化较平稳；而多云天气状况下，各辐射分量的变化波动较大。受周围建筑物影响，遮蔽较大的球场和草地，各辐射分量的时间变化受太阳高度和所处位置影响，具有不同的变化特征。

(2) 城市区域内各下垫面的各辐射分量（总辐射、反射辐射、净辐射和有效辐射）总量以 4 月份最高，12 月次之，8 月最小（图 4）。显示了昆明地区干季由于晴好天气较多，获得的太阳辐射量较大，导致气温升高；而雨季由于云雨天较多，虽然太阳高度较高，但是达到地面的太阳辐射强度仍较小，使得气温不高。因此受天气状况影响，不同季节太阳辐射的差异，乃是昆明成为春城的原因之一。

(3) 草地的有效辐射在干季的 12 月和 4 月明显大于屋顶和球场，表明草地向外辐射的长波辐射量较大；而 8 月不同下垫面的有效辐射均较小，显示了在云层的影响较大时，长波辐射效应趋于平衡。

(4) 不同下垫面，不同时间，反射辐射量和反射率呈现较大差异，反射辐射量 12 月球场最大，4 月屋顶为最大，而 8 月则是草地最大。

(5) 在所观测的 3 个月份中，屋顶的总辐射量和净辐射量都是最高（图 4）。

(6) 各下垫面在各个月份的太阳辐射分量的分配一般为：反射辐射和有效辐射的份额较小，多在 20 %以下；净辐射占了绝大部分份额，多在 50 %以上，特别是 8 月可达 80 %以上。有效辐射的各下垫面分配率依下垫面热力性质的不同，所观测的 3 个月份内，都是草地最高，球场和屋顶相差不大。而净辐射分配率则是草地最小，屋顶较高。反射辐射分配率（反射率）在各月份各测点的表现有较大差异。

由以上的结果可以看出，在城市区域，受下垫面状况、周围环境条件、建筑物等遮蔽物以及太阳高度角、天气状况等因素的影响，城市内不同下垫面的太阳辐射的各分量均呈现较为复杂的分布特征和变化规律，充分显示了城市区域辐射的复杂性和特殊性。特别是占城市总表面积很大比例的屋顶，与附近地面相比，其辐射平衡各分量（总辐射、反射辐射、有效辐射和净辐射）以及辐射分配率均呈现较显著的时间、空间变化，显示了占城市表面积很大比率的屋顶在城市气候研究中具有特殊作用，对其进行深入研究将是今后的课题。随着城市化进程加快，建筑物密度加大，城市不同下垫面太阳辐射分布状况的差异，势必影响城市内不同地域的小气候特征。如何把握城市不同地域的太阳辐射分布特征，进而揭示城市小气候的形成机制；及其在城市环境数值模式和遥感反演等领域的应用，将需要进行更深入的研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献:

[1] 周淑贞，束 炯. 城市气候学[M]. 北京：气象出版社，1994. 244-344.

[2] PETTERSON J T, STOFFEL T L. Analysis of Urban-rural solar radiation data from St. Louis, Missouri [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1980, **19**: 275-283.

[3] SANDERSON M, KUMANAN I, TANGUAY T, et al. Three aspects of urban climate of Detroit Windsor [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, **12**: 629-638.

[4] OKE T R, FUGGLE R F. Comparison of urban /rural counter and radiation at night [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1972, **2**: 290-308.

[5] RAO P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1972, **53**: 647-648.

[6] WHITE J M, EATON F D, AUER A H JR. The net radiation budget of the St. Louis Metropolitan Area [J]. *Journal of Applied* Meteorology, 1978, **17**: 593-599.

[7] 张一平. 城市区域光热资源特征[J]. 城市环境与城市生态，1999，**12**（1）：40-43.

[8] 云南省统计局. 云南统计年鉴（2001）[Z]. 北京：中国统计出版社，2001. 397-399.

[9] 张一平. 城市区域内不同下垫面的有效辐射特征[J]. 气象科学，1997，**17**（2）：168-174.

[10] 张一平，彭贵芬，张庆平. 城市区域屋顶与地上的风速和气温特征分析[J]. 地理科学，1998，**18**（1）：45-52.

[11] FUGGLE R F, OKE T R. Long–wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere (**II**) Above roof–level [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1976, **10**: 113-120.

INFLUENCES OF UNDERLYING SURFACE' S CHARACTERISTICS AND LOCATIONS ON SOLAR RADIATION BALANCE IN URBAN AREA

ZHANG Yi-ping, HE Yun-ling, LIU Yu-hong, MA You-xin,
LI You-rong, DOU Jun-xia, GUO Ping

(Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China)

Abstract: According to observations of solar radiation in April, August and December in Kunming, a city situating in low latitude plateau, characteristics and variations of solar radiation balance are studied for underlying surface of different characteristics and locations in urban area. Results shows that the values of each radiation factor in the radiation equation are the largest in April, and smallest in August, when it is cloudy. For the total radiation and net radiation, they are largest on the rooftop, and fluctuate greatly on the ground and lawn due to the influences of the surroundings and building shading. The reflective radiations vary greatly with time and different surfaces. Meantime, the net long wave radiation is the smallest in August (the percentage in total is almost zero). These results not only can be served as scientific foundation for more research on urban climate and the mechanism for causing it, but also may be reference for studying the urban climate concerning other regions.

Key words: city; underlying surface; radiation balance

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net