

宋建洋, 郑向东, 程兴宏, 等. 临安与龙凤山辐射数据质量及初步结果比较. 应用气象学报, 2013, 24(1): 65-74.

临安与龙凤山辐射数据质量及初步结果比较

宋建洋¹⁾ 郑向东^{1)*} 程兴宏²⁾ 马千里³⁾ 俞向明³⁾ 代鑫⁴⁾ 于大江⁴⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081) ²⁾(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

³⁾(浙江省气象局临安区域大气本底站, 临安 311300)

⁴⁾(黑龙江省气象局龙凤山区域大气本底站, 五常 150200)

摘 要

采用国际通用的辐射数据质量评估方法对 2005—2011 年浙江临安、黑龙江龙凤山两个区域大气本底站辐射观测资料进行质量评估与比较分析。结果表明: 两站辐射数据通过物理可能限制检验与极端罕见限制检验的百分比均超过 99.5%, 但通过相关要素比较限制检验的百分比上, 临安与龙凤山站分别降至 97.9% 与 95.9%; 双轴定位追踪太阳出现偏差是造成直接辐射与散射辐射数据精度降低的主要原因。CM21 表的热偏移在 $-5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以内, 而其进行热偏移订正可以显著提高数据的通过率。对应同一太阳天顶角, 临安站晴空总辐射与直接辐射均低于龙凤山站, 散射辐射则相反, 其原因是临安的大气透明系数较低, 大气浑浊度较高。2006—2011 年, 临安站的大气向下长波辐射呈下降趋势, 达到了 0.01 的显著性水平, 且其多年平均值 ($363.7 \pm 59.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 显著高于龙凤山站 ($274.9 \pm 77.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$); 龙凤山站晴空太阳总辐射呈增加趋势, 达到了 0.1 的显著性水平。

关键词: 太阳辐射; 大气向下长波辐射; 质量评估

引 言

长期准确的辐射观测是研究气候变化、评估辐射模式及开发利用太阳能资源的重要基础。我国气象部门于 1957 年建立了太阳辐射观测站网及其配套的国家级辐射计量校准与传递系统, 保证了常规辐射观测业务的运行^[1]。1990 年以前, 各辐射台站采用的是仿造前苏联的辐射观测仪器, 1990—1993 年 96 个气象台站陆续更换为国产的 DFY 系列表(总辐射表与散射辐射表采用的是 DFY-4, 直接辐射表采用的是 DFY-3), 观测日辐射曝辐量^[2]。国内外对这类辐射观测日曝辐量的质量评估方法已有了一系列研究成果。Shi 等^[2]设计了一套包括物理阈值、总辐射日照时数以及总辐射年平均时间序列的标准偏差检验等的辐射数据质量评价方案; Moradi^[3]设计了一套仅需日照时数资料即可对总辐射表每日观测数据进行质量评价的三层全自动控制算

法, 这些质量控制方法在一定程度上提高了辐射观测数据的应用水平。基于我国台站辐射观测资料的应用主要集中在研究太阳辐射的时空分布特征及与相关气象要素的联系, 或验证模式模拟及卫星反演结果等方面, 李晓文等^[4]通过资料分析发现, 1990 年前四川盆地等地区的辐射下降与大气悬浮物之间关系密切, 而这种关系则又可以进一步解释四川盆地地面温度下降的事实^[5]; 吴其重等^[6]利用辐射观测日平均资料和中尺度气象模式模拟得到我国近 20 年太阳辐射的时空分布状况; 张云林等^[7]利用太阳辐射气候学计算方法经验系数, 结合日照资料反演太阳辐射; 有研究分析了太阳辐射及其长期变化趋势的联系, 指出云和气溶胶对太阳辐射的影响最重要, 而气溶胶负载量的增长可能是导致太阳辐射呈减少趋势的主要原因之一^[8-10]。

随着观测技术的发展, 科学研究与业务应用对辐射观测及资料质量的要求也在提高。地面辐射基准站网(baseline solar radiation network, BSRN)是

2012-06-01 收到, 2012-10-18 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(40905071), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706038, GYHY201206037)

* 通信作者, email: zhengxd@cma.gov.cn

在世界气候研究计划支持下,于1989年开始建立的,旨在提供连续、长期和高时间分辨率的辐射数据。其中总辐射表测量的不确定度从开始期间的4%提高到2%或 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,直接辐射表从1%提高到0.5%或 $1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,长波辐射表则从5%提高到2%或 $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [11-12]。BSRN站网从建立到运行过程中,不断改进,形成了一整套观测、校准以及数据质量评价的规范[13]。这些规范在满足长期、高质量的辐射数据共享的同时,也取得了一系列重要的研究成果,如2005年提出了全球从“暗”到“亮”的变化过程[14],即地表接收到的太阳辐射自1990年以来是一个增加的过程。

太阳短波辐射和向下大气长波辐射(downward long-wave radiation, DLR)是区域大气本底站观测的基本要素[15]。2005年8月根据大气本底站观测指南,浙江临安($30^{\circ}18' \text{N}$, $119^{\circ}44' \text{E}$,海拔高度为138.6 m)与黑龙江龙凤山($44^{\circ}44' \text{N}$, $127^{\circ}36' \text{E}$,海拔高度为330.5 m)两个区域大气本底站引进了国际上通用的观测仪器开始对总辐射、直接辐射、散射辐射以及大气向下长波辐射进行业务观测。针对这类1 Hz级的辐射观测数据,我国普通辐射台站观测资料的质量评估方法可能并不适用,无法满足其质量评估的精度要求。因此,本文采用BSRN推荐的适用于分钟级地面辐射观测资料的质量评估方法[13],对2005年8月—2011年12月两个区域大气本底站的辐射数据进行质量评估,形成标记包括明显错误、疑问以及合理3个级别的辐射数据集,比较分析两个站点近7年辐射数据的质量状况。在获得质量评估结果的基础上,对满足三层质量控制要求的辐射数据进行初步比较分析,以期对两个区域大气本底站辐射观测数据的整体质量状况及其反映的辐射区域本底特征有一基本了解。

1 观测仪器和数据

临安与龙凤山区域大气本底站(以下简称临安站

与龙凤山站)均采用荷兰Kipp-zonen公司的辐射仪器,总辐射与散射辐射观测为CM21型总日射表,直接辐射观测为CH1直射表,大气向下长波辐射观测则是CG4辐射表。太阳跟踪器采用的是双轴定位(2 axis position, 2AP)和四象限太阳跟踪系统。辐射表灵敏度系数的确定由国家气象计量站标准表定期对各辐射仪器进行校准来实现[11],近7年的校准结果表明:各辐射表的灵敏度系数变化非常小,变化幅度均在 $\pm 1\%$ 以内。

数据采集系统为美国的Campbell采集器,各辐射变量的采集频率为1 Hz,原始存储的数据为1 min内采集,包含辐射表所测电压的平均值、最大值、最小值、标准差等。台站值班日志提供太阳跟踪状况与数据采集系统故障、停电等信息,这些在原始记录上可能分别表现为散射与直接辐射异常或所有辐射数据的异常情况。本文结合工作日志和观测记录,将已明确的缺测与无效数据剔除,并定义这些异常数据占观测资料样本总数的比例为缺测率。

2 资料处理与辐射数据评估方法

2.1 辐射观测数据的热偏移订正处理

短波辐射表采用热电堆原理进行辐射测量。辐射表外层的半球玻璃罩暴露于大气中的温度总是略低于辐射表玻璃罩内的温度,因此,从辐射表玻璃罩内的热电堆传感器表面来看,天空是一个冷源。但辐射表半球玻璃罩需要保持热平衡状态,热电堆传感器则需向外发射红外辐射以抵消天空的辐射冷却效应,从而使得热电堆在夜间产生了负电压信号,即热偏移[16-18]。热偏移在白天是无法直接测量的,但在夜间,由于太阳辐射测值为零,热电堆负电压信号则特别明显。在PSP辐射表上的热偏移可接近 $-9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [19],但CM21表由于在设计技术及结构上进行了改进,其热偏移效应已有显著改善[16]。即使如此,本文仍对两站的总辐射和散射辐射采用类似于PSP表热偏移的处理方法[19-21]进行订正。表1给出了本文对临安与龙凤山区域大气本底站各

表1 各辐射仪器的夜间热偏移

Table 1 Thermal offsets of pyranometers at night

仪器	临安站		龙凤山站	
	型号	平均值/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	型号	平均值/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
总辐射表	CM21(#051465)	-2.46 ± 1.275	CM21(#051467)	-3.07 ± 1.039
散射辐射表	CM21(#051466)	-2.12 ± 0.769	CM21(#051468)	-2.30 ± 1.155
直接辐射表	CH1(#050386)	-0.19 ± 0.218	CH1(#050387)	-0.04 ± 0.409

辐射表夜间热偏移的统计结果(样本数超过 10^6),从表 1 可知,CM21 表的热偏移基本介于 $-5 \sim -2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,平均值在 $-3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,远小于 PSP 总日射表的值。但龙凤山站的 CM21 表热偏移绝对值要高于临安站,这可能与其辐射表玻璃罩内的温度与大气环境温度的差异较大有关。本文对总日射表观测的太阳辐射数据进行热偏移订正处理后再开展质量评估。

2.2 计算太阳总辐射

为了尽量降低总日射表的热偏移效应和余弦效应产生的测量误差,除采用高精度的日射表进行观测外,国际上通用的方法还有通过水平面上的散射辐射和直接辐射之和来计算更为精确的太阳总辐射,这一方法已被广泛应用于 BSRN 中。总辐射计算公式为^[22-23]

$$E_{\text{gC}} = E_{\text{d}} + S_{\text{cos}}(\theta_{\text{e}}), \quad (1)$$

表 2 物理可能限制检验与极端罕见限制检验参数设置(单位: W/m^2)^[13]
Table 2 Parameters in the tests of physically possible and extremely rare limits(unit: W/m^2)^[13]

辐射量	物理可能限制检验		极端罕见限制检验	
	下限	上限	下限	上限
总辐射	-4	$S_{\text{a}} \times 1.5 \times \mu_0^{0.2} + 100$	-2	$S_{\text{a}} \times 1.2 \times \mu_0^{0.2} + 50$
散射辐射	-4	$S_{\text{a}} \times 0.95 \times \mu_0^{0.2} + 50$	-2	$S_{\text{a}} \times 0.75 \times \mu_0^{0.2} + 30$
直接辐射	-4	S_{a}	-2	$S_{\text{a}} \times 0.95 \times \mu_0^{0.2} + 10$
向下长波辐射	40	700	60	500

注: S_{a} 为经过日地距离订正后的太阳常数, μ_0 为太阳天顶角的余弦值。

相关要素比较限制检验主要是针对太阳短波辐射数据的判断方法,通过对一定太阳天顶角下的直接辐射、散射辐射、观测总辐射和计算总辐射之间的比率进行限制,从而了解它们之间的配合是否合理,并做出相应的质量评估(具体算法见文献[13],阈值见表 3)。这一层质量检验对各辐射量观测数据准确度的变化具有很高的灵敏性。若比率在规定的上下限范围内,则其相应的辐射量数据可被确定为可靠;若比率在上下限范围外,则暂时无法准确判断是其中哪一个(散射辐射或直接辐射)或几个辐射量数据出现问题。散射比检验为第 3 层质量控制的第一步,理论上散射辐射小于总辐射,但由于散射辐射表还会接收到周围环境的散射能量,使得 $E_{\text{d}}/E_{\text{g}}$ (E_{g} 为 CM21 总日射表测量的太阳总辐射值)的值很有可能略大于 1(特别在高太阳天顶角的情况下)。散射比检验只设有上限,只能对散射辐射观测值异常偏大的数据进行标记,因此若要进行更全面、精细的质量评估,需对通过散射比检验的数据继续进行 $E_{\text{g}}/E_{\text{gC}}$ 检验。理论上这个比率为 1,但由于仪器自

式(1)中, E_{gC} 为计算总辐射值, E_{d} 为散射辐射观测值, S 为直接辐射观测值, θ_{e} 为太阳天顶角, $S_{\text{cos}}(\theta_{\text{e}})$ 表示水平面上的直接辐射值。

2.3 辐射观测数据的质量评价方法

本文采用 BSRN 通用的地面辐射观测数据质量评价方法^[13]。该方法包括三层质量控制,即物理可能限制检验、极端罕见限制检验以及相关要素比较限制检验。

物理可能限制检验与极端罕见限制检验的上限仅与经过日地距离订正后的太阳常数和天顶角有关,与其他辐射量无关,主要是为了检验各辐射量的观测值是否在其物理理论最大值以及气候极值范围内。检验标准范围内的辐射数据被认为是可靠的,标准范围外的则从该层开始被标记为 ESD(erroneous and suspected data, 错误和被怀疑数据),具体检验算法^[13]见表 2。

身的一些特征,比如日射表的余弦响应、在高太阳天顶角下双轴跟踪太阳的准确性误差等会使这个比率常偏离理论值。

表 3 相关要素比较限制检验参数设置^[13]

Table 3 Parameters in the test of relevant factor comparison^[13]

变量	下限	上限	参数范围
$E_{\text{d}}/E_{\text{g}}$		1.05	$(E_{\text{g}} > 50, \theta_{\text{e}} < 75^\circ)$
$E_{\text{d}}/E_{\text{g}}$		1.10	$(E_{\text{g}} > 50, 75^\circ < \theta_{\text{e}} < 93^\circ)$
$E_{\text{g}}/E_{\text{gC}}$	0.92	1.08	$(E_{\text{gC}} > 50, \theta_{\text{e}} < 75^\circ)$
$E_{\text{g}}/E_{\text{gC}}$	0.85	1.15	$(E_{\text{gC}} > 50, 75^\circ < \theta_{\text{e}} < 93^\circ)$

3 结果分析

3.1 辐射数据的质量评估结果

3.1.1 临安站

表 4 给出了 2005—2011 年临安区域大气本底站各辐射数据的前两层质量控制通过率情况。从缺测情况来看,临安站总辐射表与长波辐射表的运行状况好,缺测以及无效数据所占的比例均低于 0.3%;散

射辐射表与直接辐射表的运行状况较好,缺测率低于5%。缺测原因是2AP跟踪器故障导致直接辐射表与散射辐射表在2006年9月—2006年12月、2008年11月产生缺测或无效数据。

表4 2005—2011年临安站各辐射量通过前两层质量检验的统计结果
Table 4 Statistics of radiation data meeting the first two steps of the quality test at Lin'an from 2005 to 2011

辐射量	样本量	缺测率/%	第1层通过率/%	第2层通过率/%
总辐射	1773290	0.25	99.99	99.95
散射辐射	1773290	4.20	99.99	99.98
直接辐射	1773290	4.20	99.93	99.75
大气向下长波辐射	3347685	0.03	99.99	99.99

图1给出了临安站散射比(E_d/E_g)、总辐射观测值与基于式(1)得到的计算总辐射之间的比率(E_g/E_{gc})随太阳天顶角的分布情况。在上下限之间的点即为通过三层质量检验,并标记为可靠数据,这些数据所占的百分比可反映该站辐射观测系统的整体运行质量状况。从图1a和图1b可知,绝大部分数据均在限制范围内,并且在高太阳天顶角下的观测样本数较多;当天顶角大于 50° 时,落在检验范围外的数据略有增加。由于散射辐射值偏大而被散射比检验标记为ESD的数据很少,主要是被 E_g/E_{gc} 检验标记出来。在未通过 E_g/E_{gc} 检验的点大部分是因为其比值超过上限,即总辐射值偏大或水平面上的直接辐射与散射辐射之和偏小;经统计,通过第3层 E_d/E_g 检验的数据百分比为99.92%,通过 E_g/E_{gc} 检验的数据百分比为97.89%。

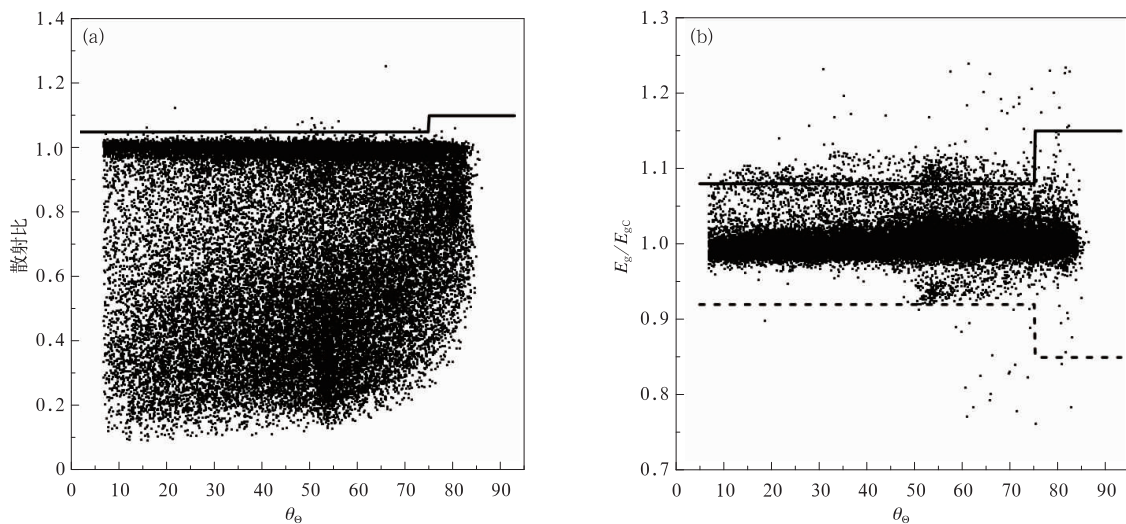


图1 临安站第3层质量检验结果分布(实线为检验上限,虚线为检验下限)

(a) 散射比检验, (b) E_g/E_{gc} 检验

Fig. 1 Distributions of the radiation data meeting the third step of the quality test at Lin'an (solid and dotted lines denote testing maximum and minimum limits, respectively)

(a) diffuse ratio examination, (b) E_g/E_{gc} examination

图2给出了临安站三层质量控制检验数据通过率的逐月变化情况。从图2可知,临安站辐射观测资料除2008年11月—2009年6月通过三层质量控制检验的数据百分比偏低,在70%~93%外,其余时段均在98%以上。总辐射观测不受双轴定位太阳跟踪器的准确性影响,被相关要素比较限制检验标记为ESD的概率很小;直接辐射与散射辐射的观测需要双轴定位,故被标记为ESD的概率较大,因而第3层质量控制的检验结果更多反映直接辐射

与散射辐射的质量状况。

3.1.2 龙凤山站

表5给出了2005—2011年龙凤山区域大气本底站各辐射数据的前两层通过率情况。从表5可知,龙凤山站总辐射表与长波辐射表的运行状况较好,缺测以及无效数据所占的比例均不足1.5%;散射辐射与直接辐射观测系统的运行状况较差,缺测率分别达到了13.3%与21.5%。主要原因包括:①2005—2011年龙凤山站2AP系统多次因出现故障

(2006 年下半年、2008 年 9 月—2009 年 2 月、2009 年 12 月—2010 年 3 月)而无法跟踪太阳,导致散射辐射表与直接辐射表产生了较长时间的缺测或无效数据;②2006—2009 年直接辐射表与数据采集器的连接时常出现异常,导致采集到的直接辐射有较多的缺测或无效数据。

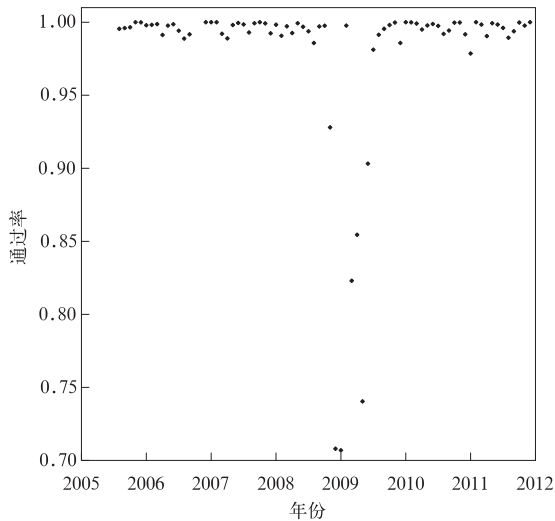


图 2 临安站三层质量控制数据通过率的逐月变化图

Fig. 2 Monthly rate of radiation data meeting the 3-step quality test at Lin'an

表 5 2005—2011 年龙凤山站各辐射量通过前两层质量检验的统计结果
Table 5 Distribution of the radiation data meeting the first two steps of the quality test at Longfengshan from 2005 to 2011

辐射量	样本量	缺测率 / %	第 1 层通过率 / %	第 2 层通过率 / %
总辐射	1661769	1.37	99.99	99.93
散射辐射	1661769	13.39	99.97	99.54
直接辐射	1661769	21.50	99.89	99.68
大气向下长波辐射	3068228	0.36	99.85	99.78

图 3 分别给出了龙凤山站散射比与 E_g/E_{gC} 随太阳天顶角分布情况,从图 3 可以得到与临安站相似的结论,但当太阳天顶角大于 55° 时,未通过检验的点明显增多;通过第 3 层散射比检验的数据百分比为 99.48%,通过 E_g/E_{gC} 检验的数据百分比为 95.88%,即 2005 年 7 月—2011 年 12 月辐射观测系统的整体运行质量状况较好,但较临安站差。

图 4 给出了龙凤山站三层质量控制检验数据通过率的逐月变化情况,从图 4 可知,该曲线的变化幅度较临安站偏大,即散射与直接辐射观测系统运行的质量状况较不稳定;龙凤山站观测资料除缺测月份前的较短时段以及 2007 年 12 月—2008 年 1 月、2010 年 12 月—2011 年 3 月数据可靠性偏低外,其他时段的数据可靠性较高,一般可达 93% 以上。

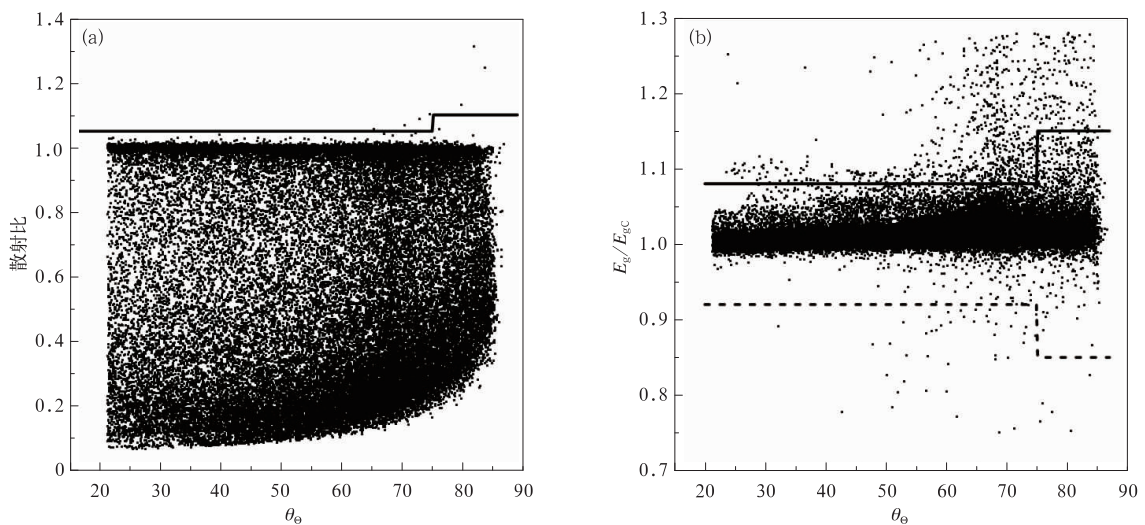


图 3 龙凤山站第 3 层质量检验结果分布(实线为检验上限,虚线为检验下限)
(a) 散射比检验, (b) E_g/E_{gC} 检验

Fig. 3 Distributions of the radiation data meeting the third step of the quality test at Longfengshan (solid and dotted lines denote testing maximum and minimum limits, respectively)

(a) diffuse ratio examination, (b) E_g/E_{gC} examination

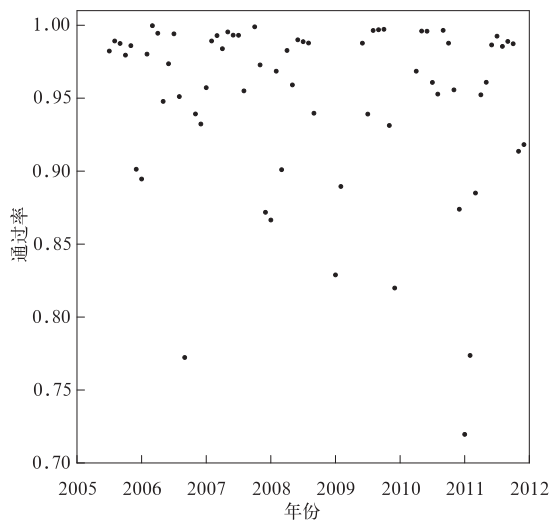


图4 龙凤山站三层质量控制数据
通过率的逐月变化图

Fig. 4 Monthly rate of radiation data meeting
the 3-step quality test at Longfengshan

3.2 与总辐射误差限制检验结果的比较

国内研究常采用总辐射误差限制检验,即将观测总辐射与计算总辐射差值绝对值不超过 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 作为质量评估的一个标准,例如权维俊等^[21]在评价上甸子区域大气本底站 2005 年太阳辐射观测数据的质量状况时就将该检验设为评价方案的第 3 层。该检验方法是基于不同辐射观测值之间的经验关系来对数据质量进行评估,同本文相关要素比较限制检验的理论基础十分相似。为了比较这两种检验方法,本文用总辐射误差限制检验代替相关要素比较限制中的 E_g/E_{gC} 检验,得到临安与龙凤山站 2005—2011 年太阳辐射数据的质量评估结果。可以发现,在相同的检验条件下与相关要素比较限制相比,临安与龙凤山站的最终通过率分别由 97.9% 与 95.9% (见 4.1 节) 提高至 98.8% 与 97.5%,即这两种方案的质量评估结果相差很小。但是,相关要

素比较限制检验的上、下限是太阳天顶角的函数,可以根据天顶角的变化而作出相应的调整,因此其评估结果较总辐射误差限制算法更为合理。以往研究对总辐射误差限制检验的使用条件并无要求,但从统计结果来看,有无检验条件对辐射数据的最终质量评估结果影响较小,均低于 0.5%。由此推测,虽然相关要素比较限制检验因考虑到当总辐射值小于 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,其质量评估结果已不准确而未对相应的太阳辐射数据进行第 3 层质量评价,但这对其最终的质量评估结果影响非常小。

3.3 热偏移订正对质量评估结果的影响

尽管 CM21 总日射表的热偏移较小,但其对辐射数据的最终质量评估结果影响仍需进一步分析。为此,表 6 给出了不同情况下的辐射表热偏移订正对辐射数据质量评估结果的影响,其中影响程度是采用进行与未进行热偏移订正处理的辐射数据通过检验数据量之差占未进行热偏移订正处理通过检验的数据量之比来表示。从表 6 可知,同时对总辐射和散射辐射进行热偏移订正处理,可以显著提高最终的通过率;仅对其中一种辐射量进行热偏移订正处理,对最终通过率的改进并不显著,有的甚至会使用通过质量评价的数据量减少。热偏移订正处理会显著影响总辐射大于 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的数据量,因此尽管太阳天顶角大于 75° 的辐射数据量较少,但热偏移订正处理对这个天顶角范围内的数据质量评估结果影响更大。对于能够通过第 3 层检验的数据量而言,3 种热偏移订正处理方式均可使其数量增加,但仅对其中一种辐射量进行热偏移订正处理时增幅不明显。仅对总辐射进行热偏移订正处理,会使因 E_g/E_{gC} 值增大而超过其检验上限的数据量增多,即对 E_g/E_{gC} 检验结果产生负影响效应;仅对散射辐射进行热偏移订正处理,会使因 E_d/E_g 值增大而未通过其检验的数据量增多,即对散射比检验产生负影响效应。

表 6 热偏移订正对数据质量评价结果的影响比例

Table 6 The rate of data meeting requirements of quality evaluation with or without thermal offset correction

站点	检验方案	总辐射(√)		总辐射(×)		散射辐射(√)	
		$\theta_0 < 75^\circ$	$\theta_0 > 75^\circ$	$\theta_0 < 75^\circ$	$\theta_0 > 75^\circ$	$\theta_0 < 75^\circ$	$\theta_0 > 75^\circ$
临安	散射比检验	0.84%	4.96%	0.89%	4.93%	-2.14%	-0.41%
	E_g/E_{gC} 检验	0.77%	4.30%	-0.23%	-0.13%	0.36%	4.04%
	第 3 层检验	1.03%	4.92%	0.14%	0.89%	-1.73%	0.22%
龙凤山	散射比检验	0.40%	3.78%	0.42%	3.79%	-1.40%	-0.05%
	E_g/E_{gC} 检验	0.19%	3.02%	-0.76%	-1.62%	0.44%	3.79%
	第 3 层检验	0.30%	3.50%	-0.64%	-1.09%	-1.01%	1.31%

注:“√”表示进行热偏移订正处理,“×”表示未进行热偏移订正处理。

4 临安与龙凤山站辐射数据的变化特征

4.1 晴空地面太阳辐射随太阳天顶角的分布特征

图 5 分别给出了两个站晴空条件下总辐射、直接辐射与散射辐射随太阳天顶角 θ_0 的分布情况。从图 5 可知,晴空条件下 3 类地面太阳辐射均随 θ_0 的减少而平缓升高。对于任一太阳天顶角,临安站总辐射与直接辐射均低于龙凤山站,而散射辐射高于龙凤山站。如在观测样本数相对较多的情况下 ($\theta_0 \approx 60^\circ$),临安与龙凤山站总辐射相差约 $-74.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,直接辐射相差约 $-122.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,散射辐射则相差约 $69.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。去除了云的影响效应,地面接收到的散射辐射以气溶胶粒子的散射为主,即临安地区上空的气溶胶粒子对太阳辐射的散射程度较龙凤山地区高,由此可推测临安地区的大气浑浊度较高;直接辐射主要受水汽和气溶胶粒子的吸收

与散射作用而被削减,由此推测临安较龙凤山地区大气透明系数低。

本文统计了 2005—2011 年晴空条件下直接辐射占总辐射的百分比平均值,临安站为 55.45%,龙凤山站为 70.82%,即在这两个区域直接辐射所占比例较大,因此尽管散射辐射在临安地区比较大,但对于总辐射仍是龙凤山地区较大。晴空条件下的直射比可以反映大气气溶胶对太阳短波辐射的散射程度。在低太阳天顶角情况下,直接辐射在总辐射中占主导地位,但随太阳天顶角的升高,直接辐射所占总辐射比例不断减小,当降至 50% 时,散射辐射开始在总辐射中起主导作用,本文将此时对应的太阳天顶角定义为临界角。对于临安站,临界角约为 70° ;而对于龙凤山站,临界角约为 80° 。这也能说明临安地区的大气浑浊度较龙凤山地区大,空气质量状况较龙凤山地区差。

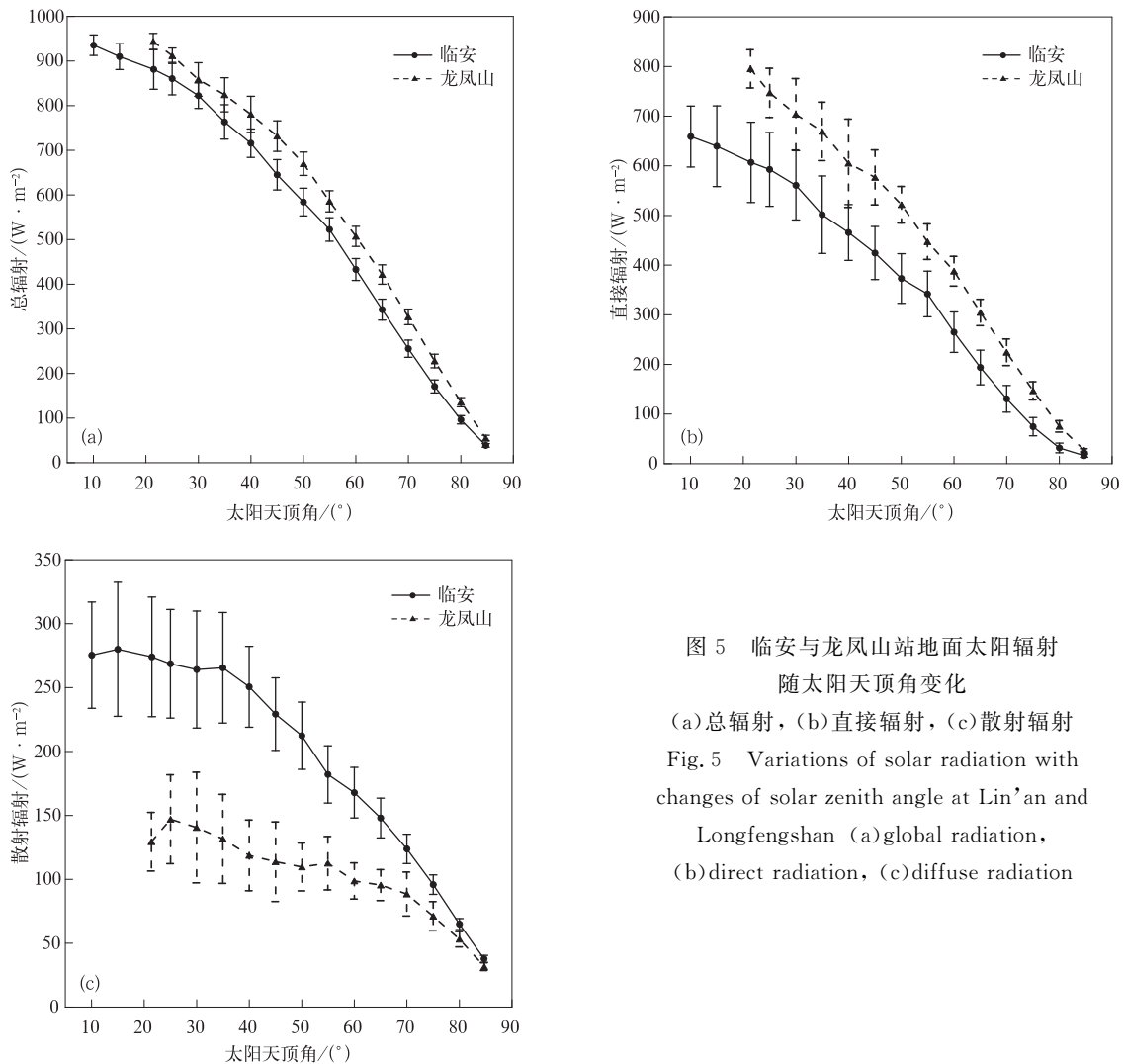


图 5 临安与龙凤山站地面太阳辐射随太阳天顶角变化
(a)总辐射, (b)直接辐射, (c)散射辐射
Fig. 5 Variations of solar radiation with changes of solar zenith angle at Lin'an and Longfengshan (a)global radiation, (b)direct radiation, (c)diffuse radiation

4.2 临安与龙凤山站辐射数据的多年变化特征

为了给出总辐射与大气向下长波辐射在临安和龙凤山站的总体状况,表7给出了两站观测时段DLR日平均值、总辐射日曝辐量以及晴空条件下总辐射日曝辐量的年平均状况。2006—2011年临安站DLR呈下降趋势,达到了0.01的显著性水平;龙凤山站DLR则呈波动中上升,但未达到0.1的显著性水平;观测时段,临安地区的DLR多年平均值($363.7 \pm 59.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)明显高于龙凤山地区($274.9 \pm 77.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。2006—2011年晴空条件下,临安站的总辐射减小,但未达到0.1的显著性水

平;龙凤山站的总辐射增加,达到了0.1的显著性水平;晴空条件下观测时段内两站的总辐射日曝辐量年平均均值均高于所有天气条件下的总辐射年平均均值,并且龙凤山站多年平均值($15.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)低于临安站($16.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$),这是由纬度差异引起的。2006—2011年所有天气条件下,临安与龙凤山站的总辐射均略有下降,但均未达到0.1的显著性水平;观测时段临安与龙凤山站的总辐射多年平均值分别为12.4, 13.5 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,同期两站的平均云量分别为6.73, 5.06,云对太阳辐射的削弱作用在临安地区可能更为显著。

表7 临安与龙凤山站总辐射与大气向下长波辐射的年平均统计

Table 7 The annual mean with standard deviations of E_g and DLR at Lin'an and Longfengshan

年份	临安站						龙凤山站					
	DLR/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)		E_g /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)		晴空 E_g /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)		DLR/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)		E_g /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)		晴空 E_g /($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	
	年平均	标准偏差	年平均	标准偏差	年平均	标准偏差	年平均	标准偏差	年平均	标准偏差	年平均	标准偏差
2005*	368.4	62.97	11.6	6.32	14.2	2.57	281.4	78.22	11.5	6.17	14.9	5.19
2006	370.0	55.13	12.5	7.29	17.2	5.12	267.5	79.45	13.7	7.32	14.5	8.09
2007	369.9	55.85	12.8	7.21	16.5	4.97	263.0	66.99	14.1	7.67	14.4	6.11
2008	365.1	59.75	12.4	7.34	16.6	5.23	279.9	76.72	13.9	7.19	14.9	7.42
2009	361.0	58.77	11.6	7.08	17.0	5.23	277.5	82.49	12.6	6.82	14.2	4.47
2010	358.4	59.76	12.3	7.36	17.0	5.37	281.4	78.81	13.4	7.41	16.5	4.66
2011	355.9	63.19	12.5	7.01	16.0	5.10	277.0	78.43	13.9	7.12	17.2	7.17

注: * 临安站观测从2005年8月5日开始;龙凤山站观测从2005年7月24日开始。

5 结论与讨论

1) 临安与龙凤山区域大气本底站各辐射数据通过物理可能限制检验与极端罕见限制检验的数据百分比分别超过99.7%与99.5%,但满足第3层质量控制的通过率分别为97.89%与95.88%。2AP跟踪太阳出现偏差(特别在高太阳天顶角下)是导致通过率下降的主要原因。

2) 相关要素比较限制检验与广泛使用的总辐射误差限制检验具有相似的理论基础,两种方法对辐射数据质量评估的结果相差很小。对CM21型总日射表观测的总辐射和散射辐射进行热偏移订正处理,可以提高通过三层质量控制的数据百分比,在太阳天顶角大于 75° 的情况下,通过率可提高3%以上。

3) 晴空且相同太阳天顶角情况下,临安站的总辐射与直接辐射均低于龙凤山站,但散射辐射则相反。临安地区较龙凤山地区大气透明系数低,大气浑浊度高。临安站的DLR显著高于龙凤山站;2006—2011年,临安地区的大气向下长波辐射呈下

降趋势,达到了0.01的显著性水平;龙凤山地区晴空条件下的总辐射呈增长趋势,达到了0.1的显著性水平。

受相关要素比较限制算法的检验条件所限,本文采用的质量控制方案无法对总辐射小于 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 所对应的太阳辐射数据进行第3层质量评价。总辐射误差限制算法虽无此条件,但当观测与计算总辐射值小于 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,两者之差的绝对值也必然会小于 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,即与本文采用的第3层质量控制方案相似,亦无法对其相应的辐射量数据进行准确的质量评价。因此,如何对总辐射值较低情况下的太阳辐射数据进行准确的质量评估仍需深入研究,其中在太阳天顶角较大的情况下,还与辐射表的余弦效应有关。总辐射和大气向下长波辐射不受2AP的影响,其第2层质量评估结果已具有很高的准确性。但散射辐射和直接辐射则不同,其观测结果与2AP跟踪太阳的准确性密切相关,同时因第3层检验算法涉及总辐射,故其结果不能完全反映两者数据的质量状况。因此,如何根据站点多年观测的太阳辐射数据,建立判断2AP跟踪太阳是否准确的方法^[24],从而实现对散射辐射和直接辐射数据的

质量评估需要进一步研究。而本文根据晴空条件下临安与龙凤山站太阳辐射随太阳天顶角的分布特征,得出了临安地区大气透明系数相对低的事实,则需要进一步结合水汽、气溶胶等相关资料开展深入研究。

参 考 文 献

- [1] 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47:1006-1016.
- [3] Moradi I. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy*, 2009, 34:1-6.
- [4] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年来太阳辐射状况研究. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 24-31.
- [5] Li X W, Zhou X J, Li W L, et al. The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its Probable Mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9(1): 57-68.
- [6] 吴其重, 王自发, 崔英杰, 等. 我国近 20 年太阳辐射时空分布状况模式评估. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 343-351.
- [7] 张云林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖无锡地区太阳总辐射的气候计算及特征分析. *应用气象学报*, 2003, 14(3): 339-347.
- [8] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961—2000. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L06803, doi:10.1029/2004GL022322.
- [9] 郑有飞, 关福来, 蔡子颖, 等. 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化规律. *应用气象学报*, 2011, 22(3): 312-320.
- [10] 杨羨敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960—2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 243-248.
- [11] 权继梅, 丁蕾, 郑向东, 等. 总辐射表两种现场校准方法的比较. *气象*, 2010, 36(9): 116-119.
- [12] 中国气象局监测网络司, 译. 地面辐射基准站网操作手册. 北京: 气象出版社, 2004.
- [13] Long C N, Shi Y. An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2008, 2:23-37.
- [14] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, 2005, 308(5723): 847-850.
- [15] 中国气象局监测网络司, 译. 全球大气本底观测指南. 北京: 气象出版社, 2003.
- [16] Kipp & Zonen Instruction Manual. CM21 Precision Pyranometer. 2004: 6-8.
- [17] 杨云, 丁蕾, 王冬. 总辐射表夜间零点偏移试验与分析. *气象*, 2010, 36(11): 100-103.
- [18] 程兴宏, 杨云, 宋建洋, 等. 总日射表热偏移物理机制及订正方法研究进展. *气象科技*, 2013, 41(1): 1-7.
- [19] 程兴宏, 张小玲, 郑向东, 等. PSP 总日射表热偏移特征及其测量总辐射误差分析. *太阳能学报*, 2009, 30(1): 19-26.
- [20] Bush B C, Valero F P, Sabrina S A, et al. Characterization of thermal effects in pyranometers: A data correction algorithm for improved measurement of surface insolation. *J Atmos and Ocean Tech*, 2000, 17:165-175.
- [21] 权维俊, 陈洪斌, 高燕虎, 等. 上甸子大气本底站太阳辐射观测数据的质量评价. *高原气象*, 2009, 28(1): 136-142.
- [22] Haefelin M P, Domingues B C, Rutledge K, et al. Improved Measurements of the Diffuse and Global Solar Irradiances at the Surface of the Earth. Eleventh ARM Science Team Meeting Proceedings, 2001: 19-23.
- [23] Ohmura A, Dutton E G, Forgan B, et al. Baseline surface radiation network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research. *Bull Am Meteor Soc*, 1998, 79(10): 2115-2136.
- [24] Long C N, Gaustad K L. The Shortwave (SW) Clear-Sky Detection and Fitting Algorithm; Algorithm Operational Details and Explanations. Atmospheric Radiation Measurement Program Technical Report, 2004.

Quality Evaluations and Comparisons of Radiation Data at Lin'an and Longfengshan Stations

Song Jianyang¹⁾ Zheng Xiangdong¹⁾ Cheng Xinghong²⁾ Ma Qianli³⁾
Yu Xiangming³⁾ Dai Xin⁴⁾ Yu Dajiang⁴⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (CMA Public Meteorological Service Center, Beijing 100081)

³⁾ (Lin'an Regional Air Background Station, Lin'an 311300)

⁴⁾ (Longfengshan Regional Air Background Station, Wuchang 150200)

Abstract

Solar radiation is widely used in the studies of climate change, evaluation of model simulations and assessment of solar radiation energy resources. Therefore, accurate observations of solar radiation data are absolutely needed. An international BSRN method of solar data quality assessment and quality control (QA-QC) is applied to investigate data quality of solar radiation and downward long-wave radiation (DLR) measured from 2005 to 2011 at Lin'an and Longfengshan, two regional background stations in the mainland of China. The method includes 3 steps of testing. They are the sequential limits of physically possible, extremely rare and relevant factor comparison. The results show that percentages of radiation data meeting requirements of the first two test steps of the quality test at both sites are more than 99.5%, but in the third step, the percentage dropped to 97.9% at Lin'an and 95.9% at Longfengshan. The error of the 2AP (2 axis position) in tracking sun-disk is the main cause for those direct and diffuse radiation data failing to meet the conditions of quality test, and the scenario is more frequent at the high SZA (solar zenith angle). Compared to the rate evaluated by the prevalent limit of global radiation error, the BSRN third step makes the rate of validated solar radiation data be reduced by 0.9% and 1.6% at Lin'an and Longfengshan, respectively. The thermal offset of CM21 pyrometer is from $-5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ to $-2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. With the compensation of thermal offset, the rate of radiation data meeting requirements of the BSRN quality test is obviously improved.

It is well known that the most important factor affecting the surface solar radiation includes cloud, water vapor and aerosol. Therefore, variations of solar radiation with changes of SZA are analyzed with removal of cloud effect. It is identified that the global and direct radiation irradiances at Lin'an are obviously lower than those at Longfengshan with the same SZA, while the diffuse radiation is opposite. The cause for these phenomena is due to the lower atmospheric transparency and higher atmospheric turbidity at Lin'an.

The annual averages of solar radiation and DLR at the sites are calculated. The annual averaged daily integrated global solar radiation and global solar radiation under clear condition at Lin'an are 12.4 ± 7.2 , $16.5 \pm 5.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, while the coincident average radiations at Longfengshan are 13.5 ± 7.2 , $15.5 \pm 6.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. Annual average DLR at Lin'an is $363.7 \pm 59.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, obviously higher than that at Longfengshan ($274.9 \pm 77.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). There is an obvious decreasing trend of DLR at Lin'an, and global solar radiation takes on an increasing trend at Longfengshan under clear sky.

Key words: solar radiation; atmospheric downward long-wave radiation; quality test and evaluation