

典型森林生态系统总辐射和光合有效辐射长期观测中的仪器性能衰变和数据校正^{*}

朱治林¹ 孙晓敏^{1**} 于贵瑞¹ 温学发¹ 张一平² 韩士杰³ 闫俊华⁴ 王辉民¹

(¹中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐仑 666303; ³中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164; ⁴中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘 要 利用中国通量网(ChinaFLUX) 4 个森林台站(长白山、千烟洲、鼎湖山和西双版纳) 2003—2008 年总辐射和光合有效辐射(PAR) 观测资料, 研究了 CNR1 总辐射表和 Li-190SB 光量子仪在长期观测中可能出现的不确定性和仪器性能变化等问题。结果表明: 98% 以上的 CNR1 总辐射观测精度满足技术标准, 但在西双版纳站, CNR1 观测的总辐射(Q_{CNR1}) 比高精度短波辐射仪 CM11 观测的总辐射(Q_{CM11}) 平均低 7%; 虽然温度对 CNR1 观测的总辐射有一定影响, 但其影响大都在仪器允许的精度范围内, 在西双版纳站, CNR1 除了受温度影响外, 还受到热带雨林特有的季节性雾的影响; 通过分析光合有效辐射数据(特别是其与总辐射比值) 的长期变化发现, 光量子仪 Li-190SB 的性能衰减较明显, 平均年衰减率达 4% 左右。为了校正 PAR 仪器性能衰减产生的系统误差, 本文尝试给出了 PAR 的后期补偿校正方法, 该方法可基本消除由于野外长期使用所造成的 Li-190SB 性能衰减。

关键词 总辐射 光合有效辐射 观测误差 辐射仪器性能 中国通量网

文章编号 1001-9332(2011) 11-2954-09 中图分类号 P414 文献标识码 A

Radiometers performance attenuation and data correction in long-term observation of total radiation and photosynthetically active radiation in typical forest ecosystems in China. ZHU Zhi-lin¹, SUN Xiao-min¹, YU Gui-rui¹, WEN Xue-fa¹, ZHANG Yi-ping², HAN Shi-jie³, YAN Jun-hua⁴, WANG Hui-min¹ (¹Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China; ³State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; ⁴South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2011 22(11): 2954–2962.

Abstract: Based on the total radiation and photosynthetically active radiation (PAR) observations with net radiometer (CNR1) and quantum sensor (Li-190SB) in 4 ChinaFLUX forest sites (Changbaishan, Qianyanzhou, Dinghushan, and Xishuangbanna) in 2003–2008, this paper analyzed the uncertainties and the radiometers performance changes in long-term and continuous field observation. The results showed that the 98% accuracy of the total radiation measured with CNR1 (Q_{CNR1}) could satisfy the technical criterion for the sites except Xishuangbanna where the Q_{CNR1} was average-ly about 7% lower than Q_{CM11} , the radiation measured with high accuracy pyranometer CM11. For most sites, though the temperature had definite effects on the performance of CNR1, the effects were still within the allowable range of the accuracy of the instrument. Besides temperature, the seasonal fog often occurred in tropical rain forests in Xishuangbanna also had effects on the performance of CNR1. Based on the long-term variations of PAR, especially its ratio to total radiation in the 4 sites, it was found that quantum sensor (Li-190SB) had obvious performance attenuation, with the mean annual attenuation rate being about 4%. To correct the observation error caused by

^{*} 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501-01) 和国家自然科学基金项目(31070400) 资助。

^{**} 通讯作者。E-mail: sunxm@igsrr.ac.cn

2011-04-02 收稿 2011-08-15 接受。

Li-190SB, an attempt was made to give a post-correction of the PAR observations, which could basically eliminate the quantum sensor's performance attenuation due to long-term field measurement.

Key words: total radiation; photosynthetically active radiation; observation error; radiometer performance; ChinaFLUX.

太阳辐射是地球能量的主要来源,是地球大气圈、水圈和陆圈中各种物理过程(物质和能量交换以及天气变化等)和各种生命活动的基本动力。精确测量太阳辐射对开展气候变化和生态系统能量和物质转换机理等方面的研究具有非常重要的意义^[1]。在分析广泛应用于测量地-气能量和物质交换的涡度相关技术的不确定性时,用能量平衡闭合程度(即涡度相关直接观测的潜热和显热湍流通量之和与净辐射通量、土壤热通量、冠层热储量三者之和的不相等程度)来评价涡度相关数据可靠性已被广泛接受^[2-4]。Foken^[4]总结了不同下垫面的能量闭合状况,发现典型的能量闭合误差达到 10%~30%,其中一个潜在的误差来源是净辐射的测量误差,净辐射测量的不确定性有时可达 5%~20%。总辐射是影响净辐射大小的最主要因子,因此,精确测量太阳总辐射和客观评价其精度对研究涡度相关的能量闭合问题非常重要。

光合有效辐射(PAR)作为一种气候资源,在作物光合潜力、潜在产量的评价研究中被列为重要的科学依据^[5-7],也是生态系统碳通量研究中一个非常重要的参数。大量研究表明,白天的生态系统 CO₂ 通量与光合有效辐射的关系最密切。当白天的 CO₂ 通量数据缺失并需要插补时,广泛应用的 Michaelis-Menten 方程的主要变量就是光合有效辐射^[8-9]。精确测量大气光合有效辐射在生态学研究非常重要。

为了研究我国自然生态系统对 CO₂ 吸收/排放的作用和功能,2002 年起中国通量网(ChinaFLUX)在我国选择 8 个典型生态系统观测点(4 个森林生态系统、3 个草原生态系统和 1 个农田生态系统)开展了 CO₂/H₂O 通量和其他项目(如微气象和辐射等)的长期连续观测,取得了一系列重要成果和进展^[10-13]。数据质量是科学研究的基础,对于以长期连续观测数据为主要依据的长期生态系统科学研究而言,数据的质量评估和控制非常重要^[14-15]。为此,本文对中国通量网 4 个森林台站[长白山(CBS)、千烟洲(QYZ)、鼎湖山(DHS)和西双版纳(XSBN)]2003—2008 年太阳短波辐射仪器和光合有效辐射的观测数据情况进行总体分析,并研究了仪器性能的稳定性以及环境条件对辐射观测的影响,目的是

希望其他科研人员在利用这些辐射数据时,对数据的质量状况和不确定性有一个总体认识,以便得出更准确的科学结论。

1 仪器、数据和分析方法

中国通量网(ChinaFLUX)森林生态系统观测所采用的仪器包括:1) 涡度相关系统:由超声温度风速仪(CSAT3, Campbell Sci. Ltd, 美国)和 Li-7500 CO₂/H₂O 红外分析仪(Li-Cor Biosciences, 美国)组成;2) 辐射观测系统:仪器包括 Kipp & Zonen 公司(荷兰)生产的 CNR1 四分量净辐射观测仪、CM11 总辐射观测仪和美国 Li-Cor 公司生产的 PAR 光子测量仪(Li-190SB)等,其中, CNR1 是长期辐射观测的基本仪器,其 4 个辐射传感器可分别测量上下方向的短波和长波辐射。CNR1 辐射表属于中等精度的仪器,CM11 为高精度仪器,是国际标准组织(ISO)辐射测量的二级标准仪器(两种仪器的主要技术指标见表 1)。此外,中国通量网(ChinaFLUX)森林生态系统还进行了微气象观测,包括温湿度(HMP45C, Vaisala, 芬兰)、风速(A100R, Vector Ins., 英国)、土壤热通量(HFP01, HUKSEFLUX, 荷兰)和土壤温度(105T, Campbell Sci. Ltd, 美国)^[10]等。

表 1 CM11 总辐射观测仪和 CNR1 净辐射观测仪的主要技术指标(摘自 Kipp & Zonne 公司仪器手册)

Table 1 Main specifications of pyranometer CM11 and pyranometer in net radiometer CNR1 (taken from the pyranometer manuals of Kipp & Zonne^[17])

技术指标 Specification	总辐射仪 Pyranometer	
	CM11	CNR1 (CM3)
光谱范围 Spectral range (nm)	310~2800	305~2800
灵敏度 Sensitivity ($\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^{-2}$)	7~14	10~35
响应时间 Response time (s)	<5	<18
零漂移 Zero offsets ($W \cdot m^{-2}$)	<2	± 4
方向误差 Directional error ($W \cdot m^{-2}$)	<10	± 25
温度对灵敏度的影响 Temperature dependence of sensitivity (%)	<1	± 6
非线性度 Non-linearity (%)	<0.6	± 2.5
总体 ISO 分类 Overall ISO classification	二级标准 Secondary standard (高质量 High quality)	二类 Second class (中等质量 Medium quality)

本研究所用数据全部来自中国通量网 4 个森林生态系统台站(长白山、千烟洲、鼎湖山和西双版纳) 2003—2008 年连续的 30 min 平均值(由于仪器和其他故障,数据有少量缺失). 辐射数据包括用 CNR1 测量的总辐射、用 CM11 测量的总辐射和用光量子观测仪(Li-190SB) 测量的光量子通量等. 为了研究环境条件对辐射测量的影响,本文所用气象数据均为铁塔顶层的观测值. 为了减少夜间和早晚的数据可能对结果产生影响,本文只选取 9:00—15:00 的数据进行统计. 同时为了剔除部分异常值对结果的影响,在进行统计时设置了数据的上下限. 基于所有的 30 min 平均值,根据不同精度需求,分别按日和月统计了各自的平均值和方差.

为了比较和检验 CNR1 所测总辐射(Q_{CNR1}) 的精度及其不确定性,本研究以高精度的总辐射仪 CM11 所测数据(Q_{CM11}) 作为参照,分析了 Q_{CNR1} 与 Q_{CM11} 比值的稳定性及其对环境条件的响应. 为便于分析和描述,本文定义 K_1 为用两种仪器观测的太阳短波总辐射之比,即:

$$K_1 = Q_{\text{CNR1}} / Q_{\text{CM11}} \quad (1)$$

对于光合有效辐射的描述,目前有 2 种最常用的方法,即能量学系统和量子学系统. 前者是取某一特定波长范围即光合有效波段内的辐照度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 来表示,后者是用该波段范围内的光量子通量密度($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 来表示,两种能量单位可以互相换算. 用光量子仪(Li-190SB) 可观测波长 400~700 nm 的光量子数量,根据普朗克定律,光子的能量与其频率呈正比,所以,光合有效辐射的辐照度与光量子通量密度并不是一种简单的线性关系. 为了将光量子数量变成能量单位,必须知道光谱集度^[15]. 然而对于太阳光,两者之间可以近似为线性关系. 光合有效辐射平均波长(550 nm) 的光量子与能量的相互关系为: $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 4.57 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[15-16]. 根据上述关系将观测的光量子密度(PAR) 换算成能量单位.

定义 K_2 为用 PAR 测量的光合有效辐射能($E_{\text{PAR}}, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 与用 CM11 观测辐射能(Q_{CM11}) 之比,即:

$$K_2 = E_{\text{PAR}} / Q_{\text{CM11}} = 0.22 \text{ PAR} / Q_{\text{CM11}} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 用 CNR1 和 CM11 分别观测的总辐射

为了明确 CNR1 的总辐射仪在长期观测中可能产生的变化,本文以连续使用 6 a 后的辐射数据为例,分析了用 CNR1 和 CM11 观测的总辐射之间的关系. 2008 年用两个辐射仪器分别观测的长白山、千烟洲和鼎湖山白天总辐射半小时平均值非常一致,几乎所有的数据都在 1:1 线附近,两种方法所观测总辐射的线性回归直线的斜率都非常接近 1,且截距接近零(图 1). 鼎湖山(DHS)、千烟洲(QYZ) 和长白山(CBS) 的数据一致性较好,西双版纳(XSBN) 数据的一致性稍差.

由图 2 可以看出,2003—2008 年 4 个台站的 K_1 ($Q_{\text{CNR1}} / Q_{\text{CM11}}$) 值均存在明显的月变化特征,表现为夏季低、冬季高,说明 CNR1 的长期稳定性较好,但不同台站的月变化表现形式不完全相同. 千烟洲、长白山和鼎湖山的 K_1 平均值均在 (1.00 ± 0.05) 以内,其中,鼎湖山的 K_1 值最接近 1,平均方差最小(1.3%),千烟洲和长白山站用 CNR1 观测的结果比 CM11 观测的结果略高 2%,季节变化稍大(平均方差分别为 6.6% 和 2.6%),西双版纳站两种辐射仪器观测结果之间的差别较大, Q_{CNR1} 比 Q_{CM11} 平均值约低 7%,且两者之间的一致性不好,平均标准差达 11%(表 2).

2.2 CNR1 观测结果的误差分析

在分别分析不同环境要素对仪器性能变化的影响后发现,温度对 K_1 的影响最明显. 4 个森林站 K_1 值与气温(T) 均呈负相关关系,当气温在 20 °C 左右时 K_1 值最接近 1(图 3). 在长白山站, CNR1 的性能随气温的变化最明显,相关系数最大, Q_{CNR1} 与 Q_{CM11}

表 2 4 个森林台站 Q_{CNR1} 、 Q_{CM11} 、 K_1 的平均值±标准差以及 K_1 与温度的关系

Table 2 Mean and standard deviation of Q_{CNR1} , Q_{CM11} and K_1 as well as the relationship between K_1 and temperature in 4 forest sites

台站 Site	Q_{CM11} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	Q_{CNR1} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	K_1	$K_1(y)$ 与温度(x) 的关系 Relationship between $K_1(y)$ and temperature (x)	R^2
长白山 CBS	468±203	476±199	1.02±0.03	$y = -0.1498x + 1.0359$	0.52
千烟洲 QYZ	421±258	425±254	1.03±0.05	$y = -0.2898x + 1.0879$	0.34
鼎湖山 DHS	427±239	422±234	1.00±0.03	$y = -0.0012x + 1.0193$	0.11
西双版纳 XSBN	471±157	430±139	0.93±0.12	$y = -0.0028x^2 + 0.1017x + 0.1049$	0.47

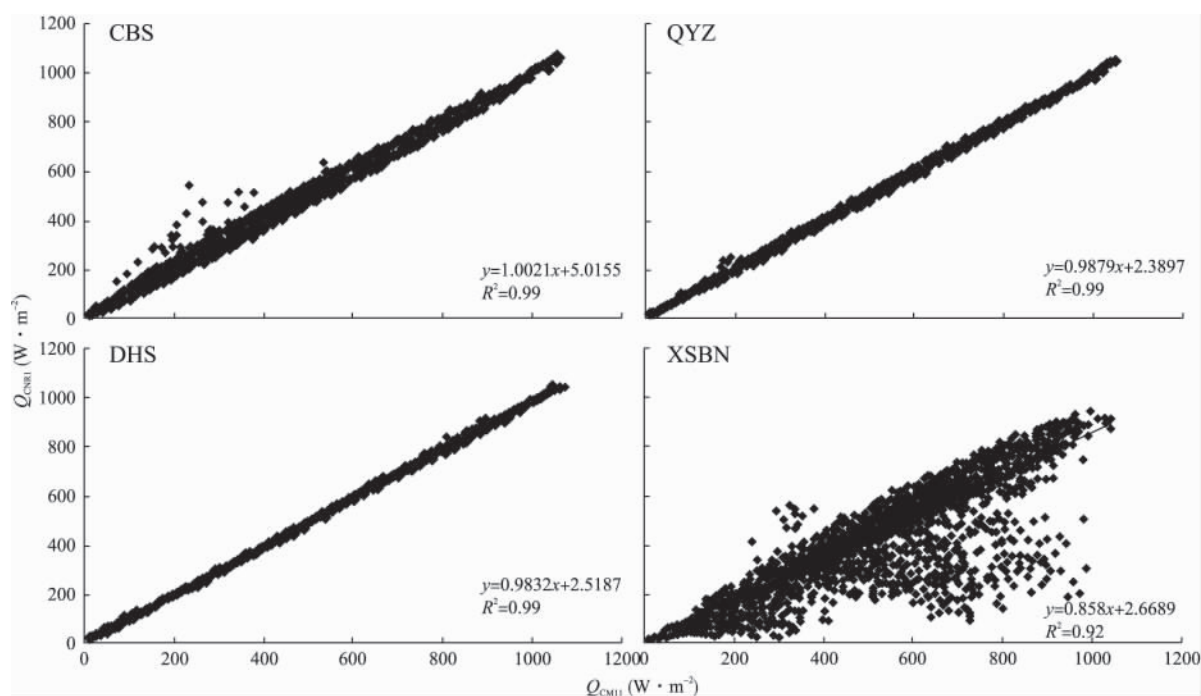


图1 4个森林台站仪器 CNR1 和 CM11 分别观测的白天总辐射 (Q_{CNR1} 和 Q_{CM11}) 半小时平均值

Fig.1 30 min-averaged daytime global radiations (Q_{CNR1} and Q_{CM11}) measured with CNR1 and CM11 respectively at 4 forest sites (2008).

CBS: 长白山 Changbaishan; QYZ: 千烟洲 Qianyanzhou; DHS: 鼎湖山 Dinghushan; XSBN: 西双版纳 Xishuangbanna. 下同 The same below.

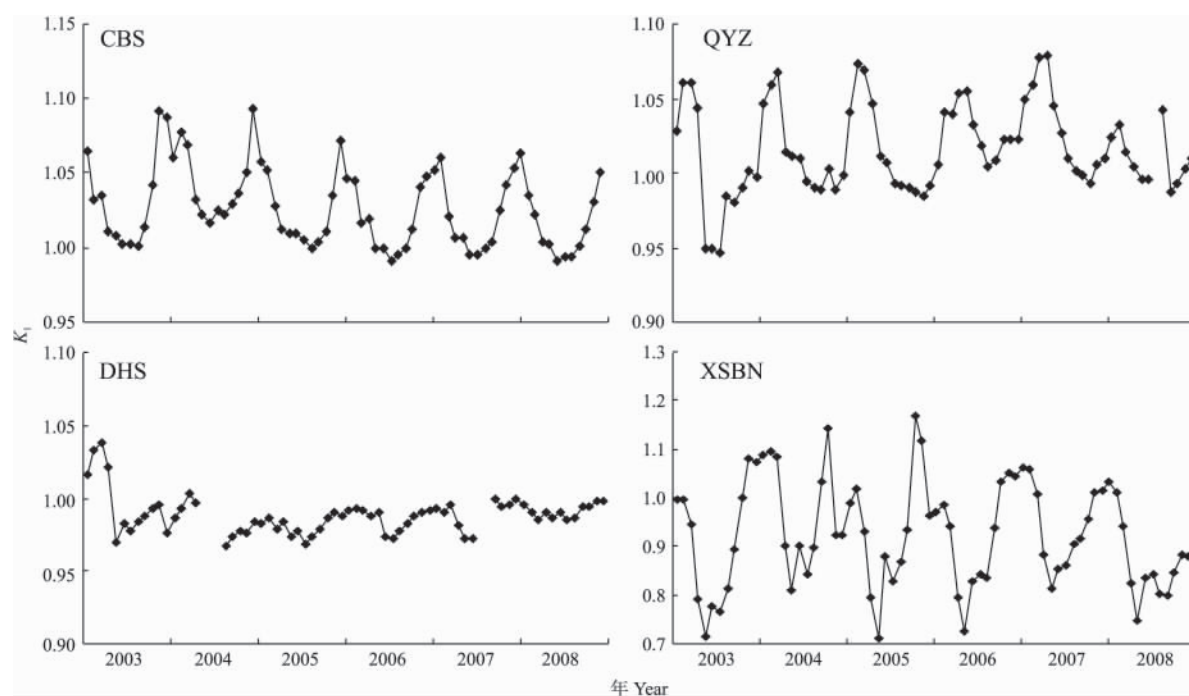


图2 4个森林台站 K_1 月平均值的变化

Fig.2 Variations of monthly-averaged K_1 in 4 forest sites (2003–2008).

的相对误差与气温的线性关系最明显,气温每降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ K_1 值或 CNR1 的灵敏度约升高 1.5%。在千烟洲站 K_1 与气温的关系比较离散,说明可能还有其他环境要素影响 CNR1 的灵敏度;该站点 CNR1 的温

度敏感性比长白山站高,气温每降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, CNR1 的灵敏度约升高 3%。在鼎湖山站 K_1 值受气温的影响不明显,相关系数仅 0.11, K_1 值在大部分时间都接近且略小于 1。在西双版纳站, Q_{CNR1} 与 Q_{CM11} 的相

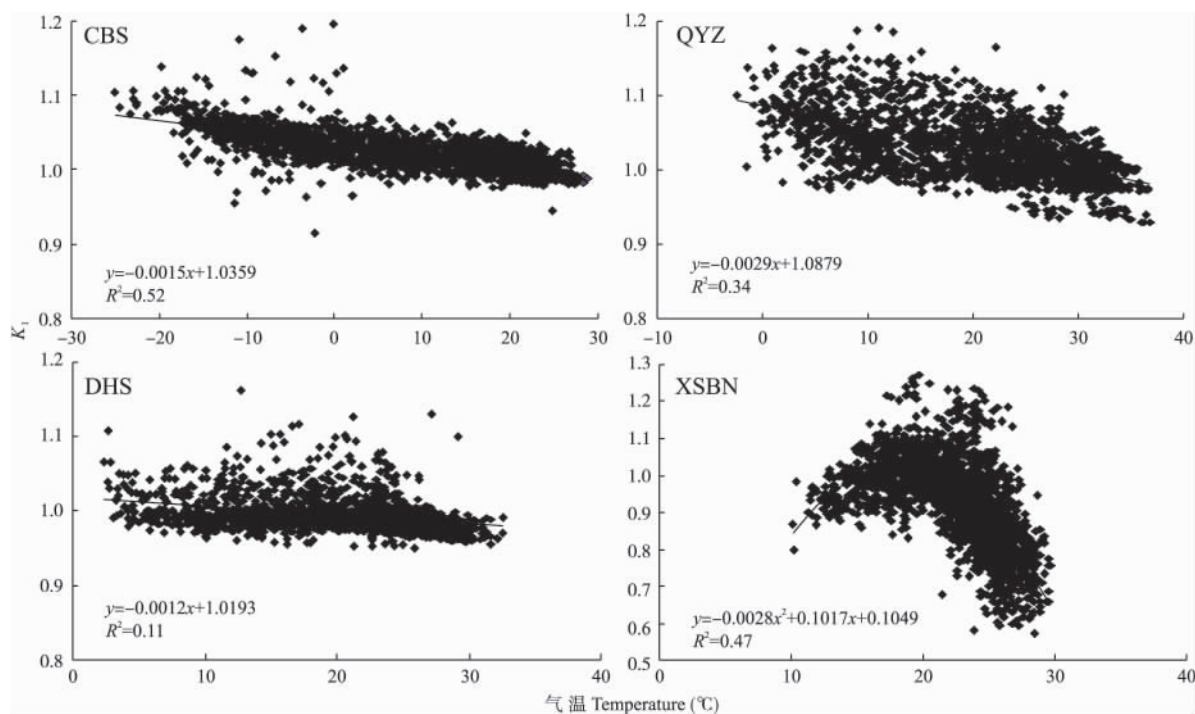


图3 4个森林台站 K_1 值与气温的关系

Fig. 3 Relationship between the K_1 and temperature in 4 forest sites (2003–2008).

对误差与气温的关系不是线性,而呈抛物线型,并且相关关系也比较离散.在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,西双版纳站的 K_1 达到最大值,高于或低于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,用 CNR1 观测的总辐射均偏低.所以,在使用西双版纳站的 CNR1 辐射数据时须特别注意. Q_{CNR1} 与 Q_{CM11} 间存在较大的不确定性. Q_{CNR1} 与 Q_{CM11} 间存在较大误差的原因可能既在于仪器本身,也有天气状况等方面的原因:西双版纳站两种仪器的性能和放置高度不一样,CM11(有除湿功能)安装高度为 69.8 m ,而 CNR1(没有除湿功能)安装高度为 41.6 m ;另外,该地区属热带雨林气候,雾日较多,年均雾日达 186.4 d ^[18].由于仪器的除湿功能对西双版纳站辐射观测的作用非常重要,因此没有除湿功能的 CNR1 受水汽的影响大于有除湿功能的 CM11,造成 CNR1 的观测结果偏低.由于本文没有关于雾的可以量化的分析数据,故未涉及对雾的讨论,所以在分析时假设这种影响主要由温度所致.

根据以上分析,结合仪器的精度和随机误差认为,鼎湖山、千烟洲和长白山3个台站用 CNR1 观测的总辐射数据可以不进行气温对仪器性能影响的校正,但要得到更高精度的净辐射数据,则有必要对用 CNR1 观测的数据进行校正;而西双版纳站用 CNR1 观测的总辐射数据不理想,必须进行校正.在消除气温对 CNR1 性能的影响后,2006 年长白山站 Q_{CNR1} 与 Q_{CM11} 的差值 ($Q_{\text{CNR1}} - Q_{\text{CM11}}$) 明显变小,其差值在 0 附

近波动,可认为是随机误差所致(图4).在西双版纳

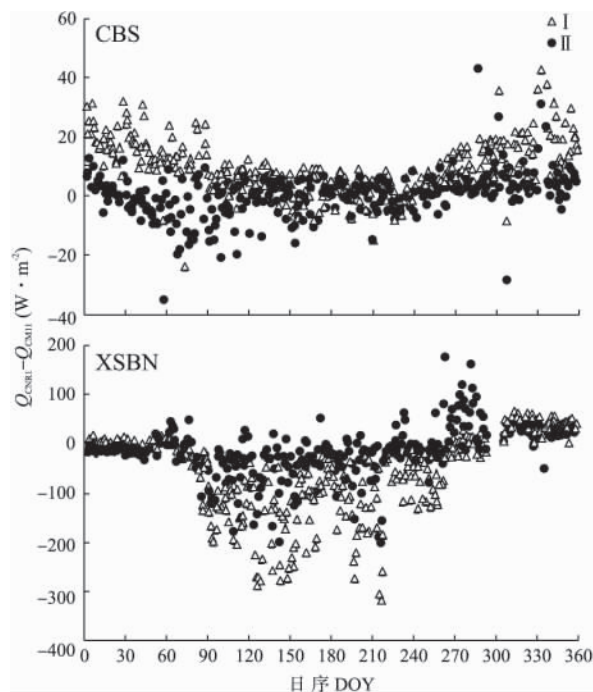


图4 长白山站和西双版纳站温度影响校正前后的 $Q_{\text{CNR1}} - Q_{\text{CM11}}$ 日均值

Fig. 4 Daily-average of $Q_{\text{CNR1}} - Q_{\text{CM11}}$ before and after correction for air temperature influence at Changbaishan site and Xishuangbanna site (2006).

I: 校正前值 Uncorrected value; II: 校正后值 Corrected value. 下同 The same below.

站 4—7 月辐射校正效果的表现非常明显,校正前 $Q_{\text{CNR1}} - Q_{\text{CM11}}$ 值达 $150 \sim 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,校正后约 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 如果直接使用西双版纳站的 CNR1 辐射观测结果,可能产生较大误差.

2.3 光合有效辐射与总辐射的关系

光合有效辐射 (PAR) 在植物进行光合作用过程中起着重要作用,是影响光合过程的关键因子. 如果长时间不进行仪器标定,仪器随使用时间的衰减问题可能被忽略,从而使观测数据偏低. Ross 和 Su-lev^[15] 分析比较了目前市场上主要的 PAR 仪器的精度和可能产生误差的原因. 但他们只对不同仪器进行了短时间的对比,而没有考虑仪器在野外长期使用可能形成的仪器性能衰减问题. 因此,非常有必要研究 PAR 仪器在长期观测过程中可能出现的衰减问题.

与总辐射的变化情况一样,PAR 也存在明显的季节变化特征(图 5). 2003—2008 年 4 个站点各季节的 PAR 均存在缓慢下降趋势,为了分析这种趋势是光合有效辐射的正常年际波动还是由于仪器原因所造成的低估,有必要分析 PAR 与总辐射比值 (K_2) 的长期变化.

从气候学角度来看,世界各地的 K_2 值相对稳定,因而一些科学家经常将其取为常数. 但有研究表明 K_2 值存在明显的日变化和季节变化,其季节性变

化的主要原因在于水汽压和天空中云量的影响^[19-20]. 从图 6 可以看出 4 个台站 K_2 值的年内变化均表现为冬季低、夏季高,从长期的变化趋势来看,其值存在明显的下降趋势. 如果所有辐射仪器性能没有衰减, K_2 值的变化应以年为基本周期,围绕一个平均值在不同月份有一定的波动,月均值在不同年之间不应该有明显的趋势变化. 根据上述对两个独立的总辐射值的分析,总辐射的观测应该相对准确,可以认为 CM11 是精确的,这说明观测 PAR 的仪器 (Li-490SB) 的性能随着时间有明显的衰减现象. 在实际应用中,由于缺乏对太阳辐射仪器真正意义上的仪器标定工作,对光合有效辐射的标定更是缺乏可以实践操作的直接标定方法. 为了弥补 PAR 仪器在长期观测中存在的性能明显衰减可能对观测结果产生的系统误差,有必要采用合理、有效的替代方法对其进行校正,尽可能消除由于仪器在长期的观测过程中导致的系统误差.

2.4 PAR 仪器性能衰减及其后期校正

仪器性能的衰减是影响 PAR 结果的重要因子. 为了定量描述 PAR 仪器的衰减情况,本文对 4 个台站的 K_2 值随着累计月份 (从 2003 年 1 月开始) 的变化趋势进行回归分析,并根据回归方程,计算了仪器性能的月 and 年衰减率 (表 3),结果表明 4 个台站 PAR 仪器的年衰减率平均为 4.1%,最大为 4.7%

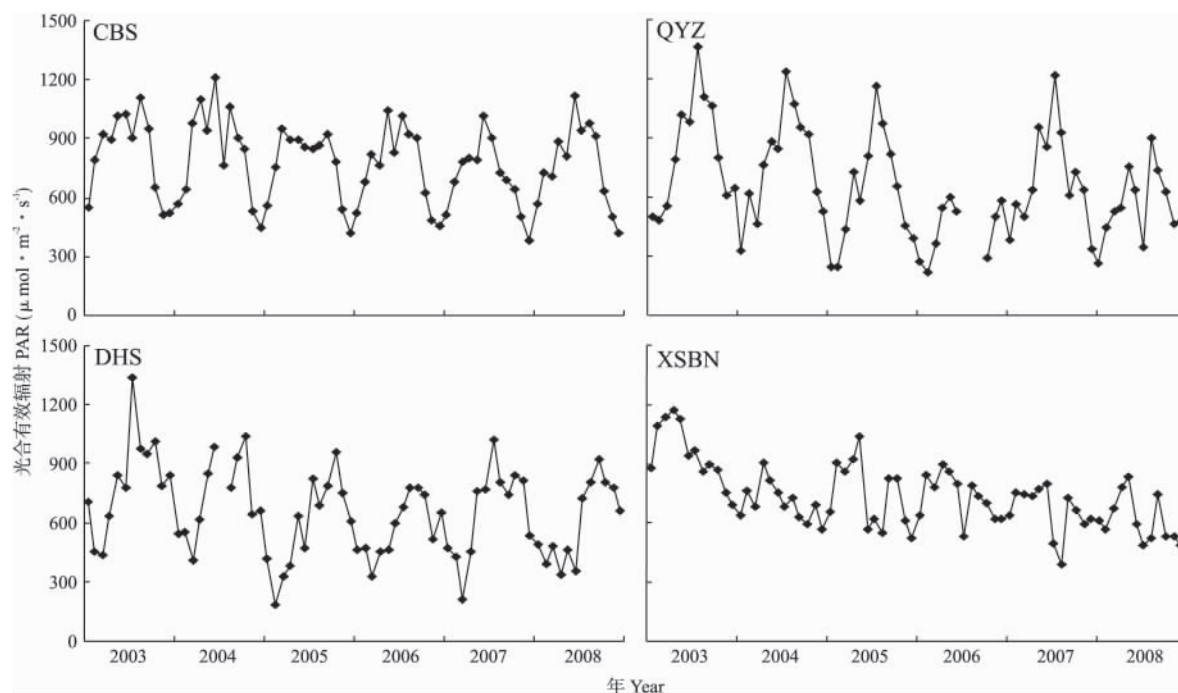


图 5 4 个森林台站用 Li-490SB 光量子仪测量的光合有效辐射 (PAR) 月均值变化

Fig. 5 Variations of monthly-averaged photosynthetically active radiation (PAR) measured with Li-490SB quantum sensors in 4 forest sites (2003–2008).

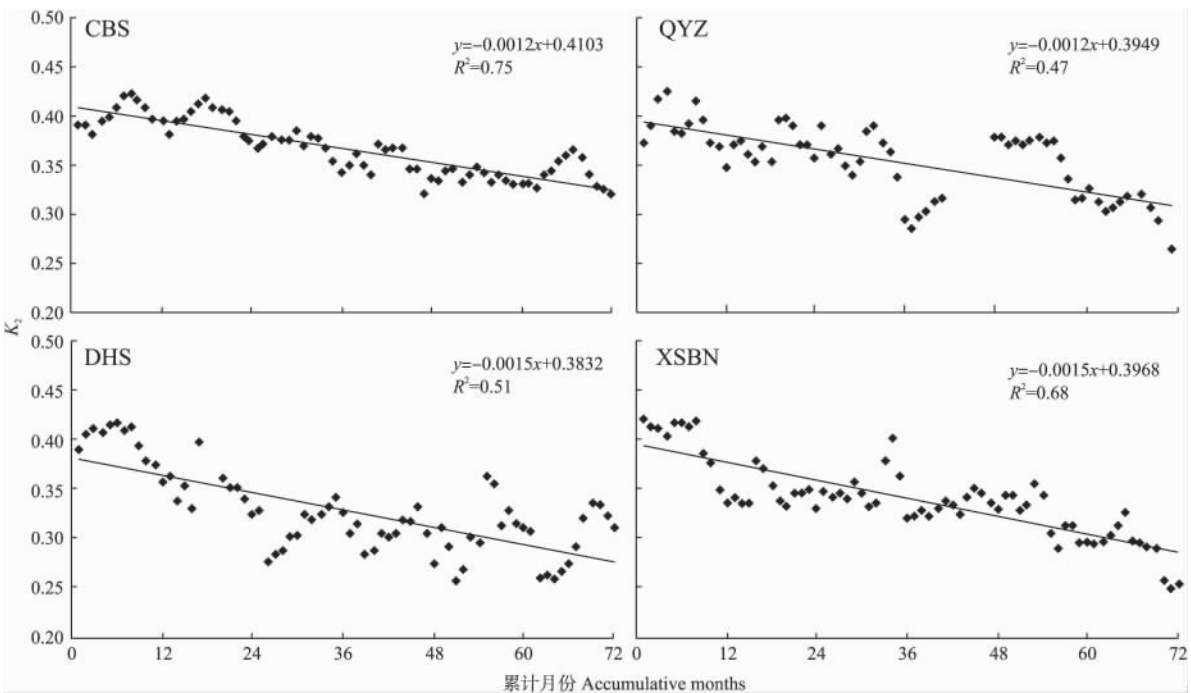


图6 4个森林台站 K_2 月均值的变化
Fig.6 Variations of monthly-averaged K_2 value at 4 forest sites (2003–2008).

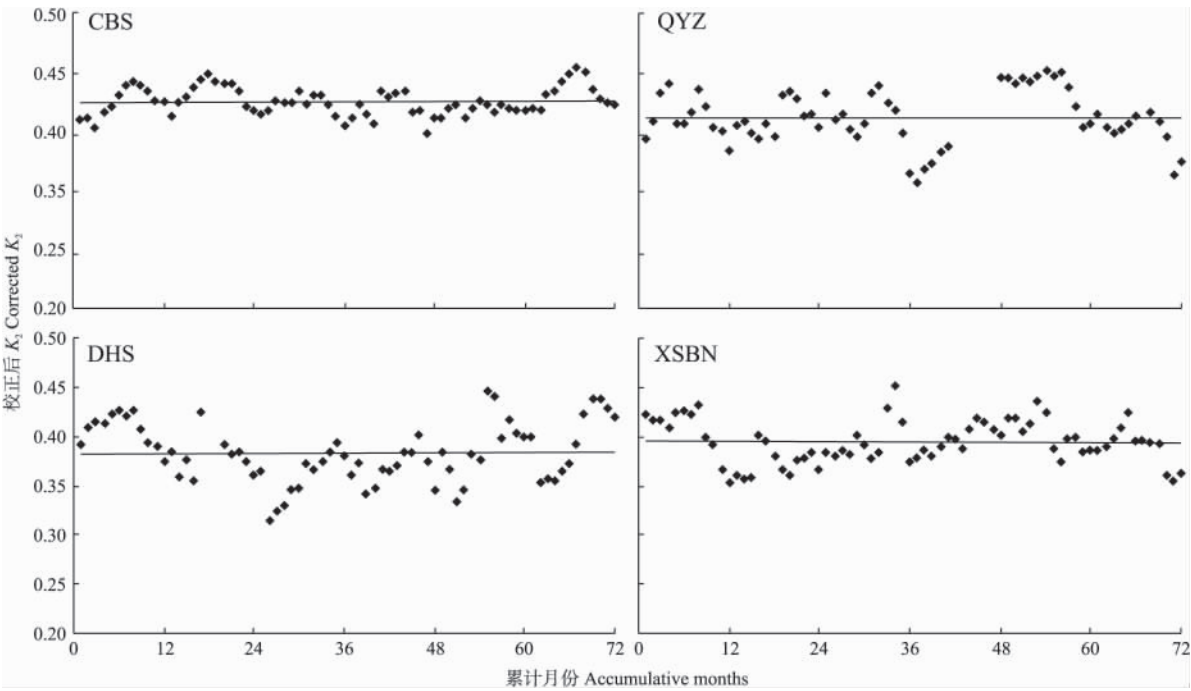


图7 校正后 4 个森林台站 K_2 月均值的变化
Fig.7 Variations of corrected monthly-averaged K_2 at 4 forest sites (2003–2008).

(鼎湖山站).

为了对 PAR 数据的校正过程进行简化 , 首先假设观测 PAR 仪器的性能随时间是线性变化 , 并且以月为基本时间单位 (认为仪器的性能一个月一样) , 那么 , PAR 就可以用以下公式进行校正:

$$PAR_{cor} = PAR / [1 - (n - 1) a] \tag{3}$$

式中: PAR 和 PAR_{cor} 分别为校正前、后的光合有效辐射; n 为从 2003 年 1 月开始的累计月数; a 为仪器性能的月衰减系数 (表 3) .

从图7可以看出 , 校正后的 K_2 随时间衰减而产

表 3 4 个森林台站的 PAR 衰减率

Table 3 Attenuation rate of PAR in 4 forest sites

台站 Site	月衰减率 Monthly attenuation rate (%)	年衰减率 Annual attenuation rate (%)
长白山 CBS	0.3	3.5
千烟洲 QYZ	0.3	3.6
鼎湖山 DHS	0.4	4.7
西双版纳 XSBN	0.4	4.6

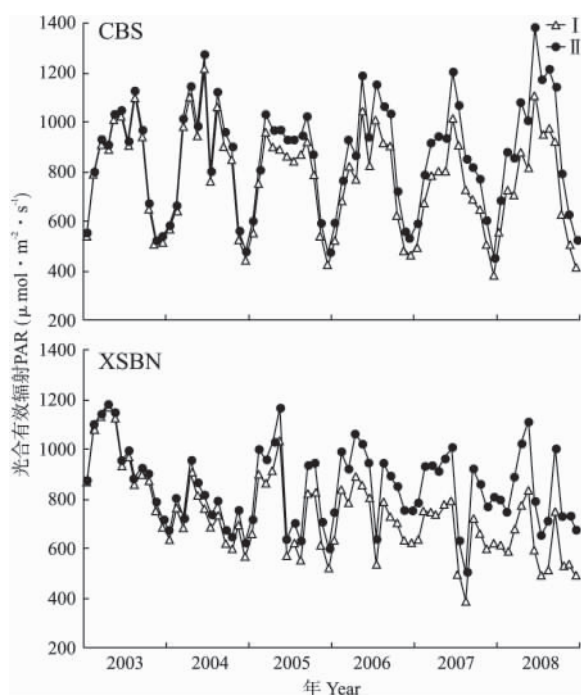


图 8 校正前后长白山站和西双版纳站 PAR 月均值的比较
Fig. 8 Comparison of the monthly-averaged PAR before and after correction in Changbaishan site and Xishuangbanna site (2003–2008).

生的系统误差基本消除,但其值随季节的变化仍然存在.为了直观地表现出 PAR 的校正效果,对长白山站和西双版纳站 PAR 月均值的变化情况进行分析.结果表明,校正后的 PAR 数据大于校正前,并且随着仪器使用的累计时间越长,校正后 PAR 与校正前 PAR 的差值越大(图 8).虽然使用本文所用方法进行校正可能存在其他问题,但校正后数据没有出现明显的下降趋势,补偿效果非常明显.

3 结 论

辐射仪器是获得生态系统辐射观测数据的唯一手段.由于该类仪器长期在野外使用,环境条件(如空气温湿度、空气中的杂质和化学成分等)对仪器运行状况必然会造成一定影响.为了分析仪器的运

行状况,本研究以高精度的总辐射仪 CM11 为相对标准,利用中国通量网(ChinaFLUX)4 个森林台站(长白山、千烟洲、鼎湖山和西双版纳)2003—2008 年的总辐射和光合有效辐射观测资料,重点研究了净辐射仪器 CNR1 和 Li-190SB 光合有效辐射仪器在长期观测中可能出现的不确定性和仪器性能变化等问题.结果表明:1) 对于 CNR1 观测的总辐射,98% 以上的观测精度满足仪器的技术标准.但在西双版纳站,两种总辐射仪器观测的结果差别较大,CNR1 观测的总辐射比 CM11 的平均值低约 7%,平均标准差达 12.1%.2) CNR1 的辐射仪器属于中等质量标准的仪器,虽然温度对 CNR1 观测的总辐射性能有一定影响,但其影响大都在仪器允许的精度范围内.在低温时,CNR1 观测的总辐射普遍高于 CM11 的观测结果.而在西双版纳站,两者之间的关系受温度变化的影响较大并且关系较复杂.本文认为在实际应用中千烟洲、长白山和鼎湖山 3 个站点的净辐射数据不需要进行特别校正,而对于西双版纳站的 CNR1 辐射数据而言,部分数据明显偏低,数据可信度较差,所以在使用这些数据时,必须考虑仪器状况和天气条件.3) 通过分析光合有效辐射数据(特别是与总辐射的比值)的长期变化,发现光量子仪器(Li-190SB)的性能衰减较明显,长白山站、千烟洲站、鼎湖山站和西双版纳站 PAR 仪器的年衰减率平均分别为 3.5%、3.6%、4.7% 和 4.6%,平均为 4.1%.1 年内仪器精度产生 4% 的变化是仪器允许的误差范围,但多年的积累误差会使观测结果产生很大误差,必须对 PAR 进行合理的补偿和校正.4) 为了校正 PAR 仪器性能衰减产生的系统误差,本研究假定仪器性能随时间的衰减为线性变化,在此基础上,本文尝试给出了一个 PAR 的后期补偿校正方法,该方法基本消除了由于野外长期使用造成的仪器性能衰减.随着时间的推移,仪器性能的真正变化可能是非线性的,对此需根据今后的观测资料进一步分析.

参考文献

- [1] Wang B-Z (王炳忠). Measurement and Standard of Solar Radiation Energy. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)
- [2] Li ZQ, Yu GR, Wen XF, et al. Energy balance closure at ChinaFLUX sites. *Science in China Series D*, 2005, **48**: 51–62
- [3] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**: 223–243

- [4] Foken T. The energy balance closure problem: An overview. *Ecological Applications*, 2008, **18**: 1351–1367
- [5] Bai J-H (白建辉). Calculating photosynthetically active radiation in north China. *Climatic and Environment Research (气候与环境研究)*, 2009, **25**(2): 1–8 (in Chinese)
- [6] Zhou Y-H (周允华), Xiang Y-Q (项月琴), Shan F-Z (单福芝). Climatological calculation for photosynthetically active radiation density. *Acta Meteorologica Sinica (气象学报)*, 1996, **54**(4): 447–455 (in Chinese)
- [7] Zhang XZ, Zhang YG, Zhou TH. Measuring and modeling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April–October. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **102**: 207–212
- [8] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **107**: 43–69
- [9] Zhang LM, Yu GR, Sun XM, et al. Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield (α) and maximum photosynthesis rate ($P_{\max}$) of different forest ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**: 176–187
- [10] Yu GR, Wen XF, Sun XM, et al. Overview of China FLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**: 125–137
- [11] Yu GR, Zhang LM, Sun XM, et al. Advances in carbon flux observation and research in Asia. *Science in China Series D*, 2005, **48**: 1–16
- [12] Sun XM, Zhu ZL, Wen XF, et al. The impact of averaging period on eddy fluxes observed at China-FLUX sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**: 188–193
- [13] Zhu ZL, Sun XM, Zhou YL, et al. Correcting method of eddy covariance fluxes observed at non-flat surfaces and its application in ChinaFLUX. *Science in China Series D*, 2005, **48**: 42–50
- [14] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **78**: 83–105
- [15] Ross J, Sulev M. Sources of errors in measurements of PAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **100**: 103–125
- [16] Hu B (胡波), Wang Y-S (王跃思), Liu G-R (刘广仁). A study of ultraviolet and photosynthetically active radiation pyranometer calibration method. *Climatic and Environmental Research (气候与环境研究)*, 2010, **15**(2): 201–216 (in Chinese)
- [17] Kipp & Zonen Co. Manual of Net Radiometer CNR1 and Manual of Pyranometer CM11 [EB/OL]. (2002-01–01) [2010-12-12]. <http://www.kippzonen.com/DownloadCenter.aspx>
- [18] Zhang YP, Sha LQ, Yu GR, et al. Annual variation of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China. *Science in China Series D*, 2006, **49**: 150–162
- [19] Bai J-H (白建辉). Measurement and calculation of photosynthetically active radiation at Luancheng region. *Chinese Journal of Agrometeorology (中国农业气象)*, 2010, **31**(2): 211–218 (in Chinese)
- [20] Ma J-Y (马金玉), Liu J-M (刘晶淼), Li S-K (李世奎), et al. Study on the features of photosynthetic active radiation (PAR) with experimentations and measurements. *Journal of Natural Resources (自然资源学报)*, 2007, **22**(5): 673–682 (in Chinese)

作者简介 朱治林 男, 1963 年生, 副研究员. 主要从事生态系统能量和物质交换的观测和数据分析以及遥感尺度转化等研究. 发表论文 20 余篇. E-mail: zhuzl@igsnnr.ac.cn

责任编辑 杨 弘
