

MTCLIM 模型系列研究报告(3): 辐射估算方法 在我国亚热带山地的有效性验证

李海涛¹, 夏军¹, 沈文清², 刘允芬¹, 刘琪憬¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101; 2. 北京林业大学资源与环境学院, 北京, 100083)

摘 要: 以已有的数据、理论和模型为基础, 在南方亚热带山地对 MTCLIM 模型的辐射估算方法进行了验证。通过研究得到以下结论: 辐射子模型在该区域内模拟效果不佳。用空间外延温度估算的日总辐射的 MAE 普遍高于 $4.6 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 与实测值相关性极低。但用各自的最高温和最低温及降雨量来估计日总辐射的总 MAE 为 $3.86 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 相关系数 R^2 在 $0.51 \sim 0.71$ 间; 水汽压的估算误差对辐射子模型几乎没有影响, 在有水汽压驱动下所有站点的日总辐射与实测值之间的 MAE 为 $3.811 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 相关系数 R^2 在 $0.55 \sim 0.73$ 间, 与不输入水汽压时的估计结果非常接近, 但模型对弱辐射估计过于偏高, 对强辐射估计过于偏低。

关键词: MTCLIM 模型; 辐射估算; 亚热带

中图分类号: P64

文献标识码: A

1 引言

太阳辐射是一切生命活动的能量来源, 直接影响了地球上绝大多数生态和水文界面过程。然而, 与温度、降水等气象要素相比, 太阳辐射却是一个不能经常被测量的气候变量, 仅有为数很少的地区能进行较为准确的太阳辐射观测。美国观测辐射的台站与观测温度和降水量的台站之比为 1: 100, 全球的比值低于 1: 500^[1]; 加拿大的 Ontario 地区 35 个台站中仅有 8 个台站能观测太阳辐射, 而且观测期只有 5 a^[2]; 中国的辐射观测台站甲种站仅有 98 个, 观测时期也较短。辐射数据的缺乏已成为限制许多生态水文模型建立的重要因素之一。

辐射估算是 MTCLIM 模型的重要部分。MTCLIM 模型能通过简便、易得的温度、降水等气候数据求得逐日太阳辐射, 为在辐射资料贫乏地区推算太阳辐射提供了一个有力工具^[3~ 5]。但是, 一些

研究表明, MTCLIM 模型中辐射子模型的一系列参数有一定的时空变异性^[6]。此外, 过去关于 MTCLIM 模型的许多研究主要集中在北美纬度高于 30° 的地区^[3, 6, 7]。因而, 有必要对该模型的辐射估算方法在我国南方亚热带地区的有效性进行验证, 以期在此基础上, 对模型参数做进一步的修正, 从而找出辐射变量在我国亚热带区域最合适的模拟方法。篇幅所限, 本篇先讨论 MTCLIM 模型温度估算方法的有效性。对于该模型中辐射子模型参数的重新估计, 我们将在后文专述。

2 MTCLIM 辐射估算的理论基础

Running 等(1987)确立了 MTCLIM 模型中预测入射太阳辐射的方法, 其中透射率的预测是一个关键因素^[8]。Thorton 和 Running(1999)在 Bristow 和 Campbell(1984)计算透射率的基础上不仅考虑了云量和气压对透射率的影响, 而且还考虑了水汽压

收稿日期(Received date): 2002- 10- 20; 改回日期(Accepted): 2003- 05- 10。

基金项目(Foundation item): 中国科学院地理资源所知识创新工程领域前沿项目 CX10G- E01- 08- 02(The frontier project of knowledge innovation program of IGSNRR, CAS), 中国科学院地理资源所知识创新工程主干科学计划(The backbone project of knowledge innovation program of IGSNRR, CAS) CX10G- E01- 03- 05, 人事部留学回国人员科技活动择优资助项目重点类别(The Special Supporting program for Excellent Scholars with Studying- abroad experiences, Funded by the China Ministry of Personnel) 2002- 03。

作者简介(Biography): 李海涛(1968-), 男, 副研究员, 理学博士, 主要从事生态系统生态学与生物气候学研究, 已发表论文 30 余篇。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

和大气压对透射率的效应^[6]。因而, 辐射的计算不单由温度日较差驱动, 以避免云量估计误差过大而导致辐射的预测误差过大, 而且还需要空气中饱和水汽压的驱动和估计晴天下不受大气分子和大气光学质量两个因素影响的透射率。这个模型中存在着两个假设条件: 一是假设温度日较差是直接由辐射的波文比引起的; 二是假设晴天状态下的辐射透射率受大气压、天顶角和水汽压的影响。其中, 第一个假设条件有局地的不适应性^[9], 由此表明, 估计太阳辐射的模型的模拟效果关键决定于所研究地区的空气分子水平运动的方式。局地大气分子的加热既取决于辐射对地面的加热效应, 还取决于局地气流的变化, 别处暖空气与该地冷空气融合、交换也会使得该地大气分子加热, 温差发生变化。当气流发生很大的水平运动时, 大气分子的温度差异和能量交换特性不同比例地控制着气温的变化, 因而可能屏蔽太阳辐射对空气分子的更为直接的影响效应, 削弱了模型的预测效果。因此, 在没有强大气流运动、空气分子相对稳定的情况下, 模型的表现应更佳。

3 方法

用两个站点一天中 24 h 的太阳辐射的观测值与模型模拟结果直接进行比较, 来验证模型的有效性。MTCLIM 模型中辐射的估算是用 Thorton 和 Running 的方法预测的, 需要观测最高气温和最低气温, 有时需要观测湿度。首先计算晴天下的透射率, 并假设晴天下在海平面上、天底角、干空气状态下的透射率 ($T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$) 为 0.870。一天中的总透射率包括到达水平面的直射辐射和漫射辐射, 这里把大气的削减系数统一考虑。大气复合透射率表示为温度日较差的指数函数形式。然后再调整坡向、坡度、东西地平线的遮蔽效应计算坡面上和水平面上的天文辐射, 再用漫射率和直射率与总透射率呈线性关系分别计算漫射辐射和直射辐射, 这样就可预测出被大气削减后达到地面上的辐射总量。

晴天下透射率没有云量的影响, 但有气压、天顶角和水汽压的影响, 虽然这里所说的水汽压为整个大气层的大气可降水量, 但有研究表明, 大气可降水量与同期地面平均水汽压有很强的线性关系。因此, 晴天下的透射率为

$$T_{t \cdot \max} = \left[\frac{\sum_{s=sr}^{ss} R_{pot \cdot s} \cdot T_{0 \cdot nadir \cdot dry}^{(P/P_0) \cdot m_0}}{\sum_{s=ss}^{ss} R_{pot \cdot s}} \right] + \alpha \quad (1)$$

$R_{pot \cdot s}$ 为时角为 s 的瞬间天文辐射, sr 和 st 分别为日出和日落的时间, $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 为晴天下海平面上、天底角、干空气状态下的透射率, P_z/P_0 为研究点与海平面标准大气压的比值, 与研究点的海拔高度有关, m_0 为大气光学质量, e 为水汽压, α 为水汽压对透射率的影响系数。当没有逐日水汽压实测值输入时, e 用 Murray 方程直接求出来^[5]。

用日温较差与透射率的关系来说明云量对透射率的影响, 其关系式为

$$T_{f \cdot \max} = 1.0 - 0.9 \exp(-B \Delta T^C) \quad (2)$$

$$B = b_0 + b_1 \cdot \exp(-b_2 \cdot \overline{\Delta T}) \quad (3)$$

$T_{f \cdot \max}$ 为云量对晴天透射率的影响, ΔT 为日温较差, 最高温与最低温之差, $\overline{\Delta T}$ 为月平均温较差, 其余为参数。

因而, 研究点的漫射辐射为: $R_1 = R_{pot \cdot f} \cdot T_{t \cdot \max} \cdot T_{f \cdot \max} \cdot T_{df}$

直射辐射为: $R^2 = R_{pot \cdot sl} \cdot T_{t \cdot \max} \cdot T_{f \cdot \max} \cdot (1 - T_{df})$

$R_{pot \cdot f}$ 和 $R_{pot \cdot sl}$ 分别为水平面和斜坡上的天文辐射, T_{df} 为漫射率。

本研究用三种方法来验证该模型处理辐射的有效性: 其一是根据该模型运行原理, 用一个基准点的逐日最高温和最低温经海拔和纬度订正后, 与降水量来外推其它各点的逐日入射短波太阳辐射; 其二是用各点本身的最高温和最低温及降水量来推算逐日辐射值; 其三是用各点本身的最高温、最低温、水汽压和降水量来推算辐射资料。这三种方法所用参数都来自于 Thornton 等 (1999) 对不同气候区 40 个台站的估计结果^[7]。

4 分析与讨论

表 1 中表明了以南昌作为基准点, 用基准点的逐日最高温、最低温、降水量和研究位点多年平均降水量资料来估算研究点的逐日入射短波太阳辐射的结果。预测值和实测值之间的相关系数 R^2 为比较一致的小数值, 在 0.295~0.430 间。此外, 其它的统计变量结果也表现不好, MAE 大多在 $5 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 左右, 回归标准差 SEE 在 $5.332 \sim 6.436 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 间, 均方根差 $RMSE$ 都 $> 6 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。Running 等 (1989) 的研究结果为 R^2 在 0.50~0.78 间, SEE 在 $4.4 \sim 4.8 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 间; 而 Glassy 等 (1994) 对 MTCLIM 模型验证的结果表明, R^2 在 0.80 左右, $RMSE$ 在 1.0~4.5 间。因而, 不难看出,

表 1 用南昌站作为基准点外推其它点辐射估算结果比较

Table 1 The comparison of incoming shortwave radiation at other sites extrapolated from Nanchang station

统计量	赣州		长沙		武汉	
	1998 年	1999 年	1998 年	1999 年	1998 年	1999 年
R^2	0.387	0.295	0.337	0.430	0.359	0.339
See ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	6.1043	5.9161	6.436	5.332	6.062	5.9723
$RMSE$ ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	6.118	6.118	6.886	6.212	6.136	6.270
MAE ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	4.948	4.784	5.499	4.883	4.673	4.766
$Bias$ ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	-0.332	-0.619	-2.204	-3.085	-1.660	-0.609

出,本研究区域用南昌站温度外延至长沙等站来计算长沙等站的辐射结果远差于 Running 等(1989)和 Glassy 等(1994)对 MTCLIM 模型验证的结果^[10, 11]。

但用各点本身的逐日温度和降水量资料估算其入射短波太阳辐射的结果要明显好于用基准点外推的结果。与表 1 相比,表 2 中除了长沙站 1998 年有稍微的改进以外,其它各点各年的各项统计变量值改善了很多。其中,相关系数 R^2 增加了近一倍,在 0.623~0.730 间;MAE 降低了 1~1.7 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$;RMSE 也减少了,差异最大的赣州 1999 年,可达 1.80 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,最小为长沙 1999 年,为 1.02 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$;回归标准差大多在 4.2 左右,比用基准点外推的标准差降低了 1.5 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。而

且,比较两表可以发现,两者误差差异主要来源于基准点与各研究位点的温度差异,基准点的温度经一系列的海拔、纬度订正后还是不能很好地反映各研究点的温度状况,这与笔者前文的温度的外推结果^[4]一致。由此表明,在消除了温度引起的辐射误差之后,模型预测值与实测值之间的一系列统计变量结果与 Glassy 等(1994)在俄勒冈地区对 MTCLIM 模型验证的结果比较相近^[11]。这说明,MTCLIM 模型用来估算入射辐射的子模型在亚热带地区具有一定的有效性。从表中还可以发现,长沙站 1998 年可能是观测数据的误差较大,很难说明模型验证的有效性,因而,在以后的分析中,为了避免不良观测数据对模型预测结果的影响,笔者不再考虑长沙站 1998 年的分析结果。

表 2 各站点逐日入射短波辐射估计结果比较

Table 2 Predicted vs. observed incoming shortwave radiation comparisons for modeled sites using regression analysis

站点		用各点的温度自推							用各点的温度和水汽压自推						
		R^2	a	b	SEE	$RMSE$	MAE	$Bias$	R^2	a	b	SEE	$RMSE$	MAE	$Bias$
长沙	1998	0.456	-0.601	0.869	5.826	6.396	5.005	-2.404	0.478	-0.794	0.875	5.707	6.252	4.874	-2.482
	1999	0.648	-2.322	0.956	4.195	5.030	3.967	-2.952	0.652	-2.405	0.960	4.163	5.11	3.950	-2.952
武汉	1998	0.666	-3.569	1.160	4.374	4.658	3.536	-1.395	0.705	-3.839	1.157	4.115	4.510	3.413	-1.663
	1999	0.708	-3.658	1.102	4.01	4.604	3.565	-2.278	0.73	-3.769	1.094	3.81	4.579	3.499	-2.488
南昌	1982	0.625	-2.465	0.965	4.298	5.20	4.042	-2.93	0.643	-2.583	0.962	4.195	5.217	4.068	-3.10
	1983	0.578	-2.105	1.038	4.861	5.114	3.986	-1.61	0.611	-2.518	1.054	4.671	4.997	3.89	-1.79
	1998	0.672	-4.272	1.129	4.609	4.923	3.861	-1.271	0.701	-4.505	1.219	4.399	4.809	3.778	-1.554
	1999	0.680	-3.319	1.228	4.115	4.461	3.425	-1.611	0.718	-3.472	1.132	4.021	4.415	3.422	-1.707
赣州	1982	0.609	-2.098	0.945	4.279	5.133	3.821	-2.84	0.639	-2.164	0.934	4.165	5.176	3.876	-3.08
	1983	0.546	-0.450	0.964	4.820	4.824	3.751	-0.94	0.574	-0.572	0.964	4.677	3.777	3.665	-1.23
	1998	0.676	-3.006	1.198	4.443	4.565	3.526	-0.31	0.717	-3.290	1.187	4.147	4.317	3.314	-0.300
	1999	0.623	-1.656	1.100	4.328	4.356	3.316	-0.57	0.642	-1.854	1.094	4.210	4.273	3.258	-0.673
韶关	1982	0.537	-1.069	0.854	4.308	5.277	4.22	-3.06	0.56	-1.189	0.847	4.212	5.348	4.297	-3.30
	1983	0.512	-1.869	0.960	4.99	5.537	4.130	-2.42	0.546	-2.214	0.959	4.811	5.507	4.071	-2.69

注: MAE , $Bias$, SEE 和 $RMSE$ 的单位为 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$
©1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Thornton 等(1999)研究发现,逐日水汽压的估计误差对入射短波辐射估计影响很小,本研究也得到类似的结果。表2列出了仅由自身逐日温度和降水量驱动辐射子模型和由自身逐日温度、降水和水汽压同时驱动辐射子模型的预测结果。表中各项统计变量差异甚微,相关系数 R^2 差异 < 0.04 , SEE 差异最大的是赣州站 1998 年,为 $0.296 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,最小为南昌站 1999 年,为 $0.094 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; $RMSE$ 差异最大的是赣州站 1983 年,为 $1.047 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,最小为南昌站 1982 年,为 $-0.017 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; 赣州 1998 年的 MAE 差异最大,为 $0.0212 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,南昌站 1999 年最小,为 $0.003 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; $Bias$ 在长沙站 1999 年没有差异,在南昌 1998 年差异最大,为 $0.283 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。此外,本研究就这两种不同驱动变量用相同参数、相同子模型得到的预测值与实测值之间的逐日标准差进行了成对样本的 t 检验,结果发现两者差异极不显著。这说明用这两种方法估计太阳辐射没有根本的差异,逐日水汽压的估计误差并不会扩大入射短波辐射的估计

误差。

此外,笔者也研究了模型预测值与实测值之间的相关关系图。为了能更好地了解 MTCLIM 中估算辐射的子模型在该研究区域内的估计误差趋势,在前文分析的基础上,根据用温度驱动模型得到的 $RMSE$ 的大小选取了两个系列的年变化数据进行分析(图1)。一个是韶关站 1983 年, $RMSE$ 最大达 $5.337 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,另一个是赣州站 1999 年,其 $RMSE$ 最小,为 $4.356 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。从图1中可以看出,无论是韶关站 1983 年还是赣州站 1999 年,模型模拟结果表现出一致的估计趋势。与逐日太阳辐射实测值相比,模型对晴天时的强辐射量估计过于偏低,对中等强度辐射量拟合程度较好,而对弱辐射强度的估计过于偏高,这与 Thornton 等(1999)的估计结果出入较大^[7]。由此说明,该模型虽然能在一定程度上表现出该研究区域辐射与其它因素的关系,但参数值并不是很适合,模型也必须做适当的修改,这部分内容将在后文中加以讨论。

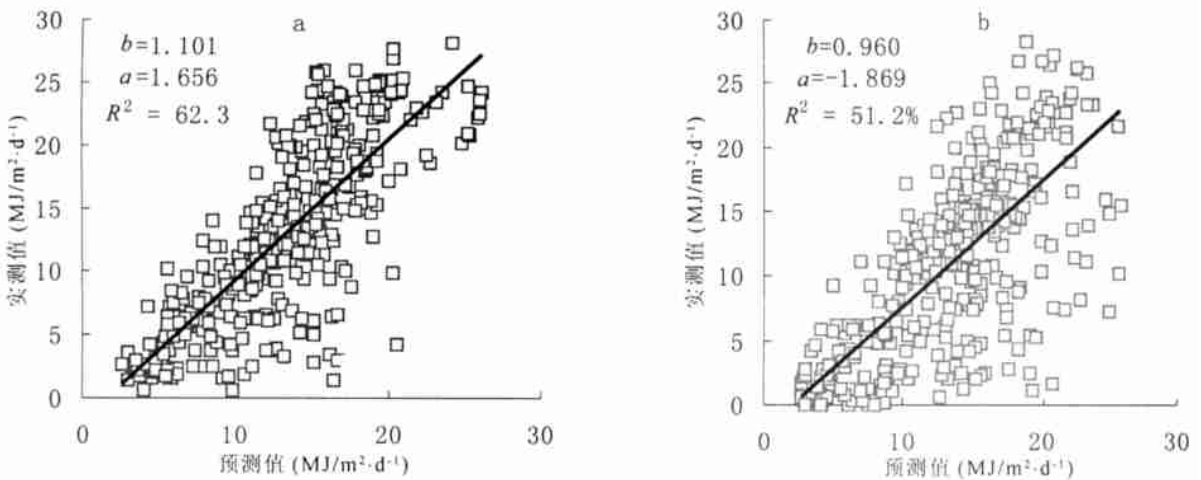


图1 赣州站 1999 年(a)和韶关站 1983(b)逐日入射短波太阳辐射实测值与模型预测值的相关关系比较图

Fig. 1 Regression of incoming short wave radiation predicted vs. actual radiation observed at Ganzhou station in 1999(a) and Shaoguan station in 1983 (b)

5 结语

MTCLIM 模型模拟各气象要素的原理在中亚热带地区具有较好的有效性,不过模型参数有待加强,辐射子模型细节上有待改进。辐射子模型在该区域内模拟效果不佳,尤其是温度外推不准确时误

差更大, MAE 普遍高于 $4.6 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,相关性极低,这种外延下的辐射估计毫不可取。但用各自的最高温和最低温及降雨量来估计日总辐射效果大大增强,总的 MAE 为 $3.867 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,相关系数 R^2 在 $0.51 \sim 0.71$ 间。而且水汽压的估算误差对辐射子模型几乎没有影响,在有水汽压驱动下所有站点的日总辐射与实测值之间的 MAE 为 3.811 MJ/

$\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 相关系数在 0.55~0.73 间, 与不输入水汽压时的估计结果非常接近。但与 MTCLIM 模型在其它地方的研究结果相比(Thornton 等, 1999)^[7], 该模型在本研究区域内的模拟结果误差偏大, 弱强度辐射模拟过于偏高, 而高强度辐射模拟过于偏低, 需要对模型参数和模型模拟过程做些改进。

参考文献(References):

- [1] NCDC(National Climatic Data Center). 1995. Cooperative Summary of the Day Dataset TD 3200. U.S. Department of Commerce National Oceanographic and Atmospheric Administration. National Climatic Data Center. Asheville NC.
- [2] Hunt, L. A., L. Kuchar, C. J. Swanton. 1998. Estimation of Solar Radiation For Use in Crop Modeling[J]. *Agri. For. Meteorol.* 91: 293- 300p.
- [3] Li, H. T., Shen, W. Q., Sang, W. G. and Li, J. Y., Research Situation and Application of MTCLIM Mode[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, **19**(6): 533~ 540. [李海涛, 沈文清, 桑卫国, 李家永. MTCLIM 模型的研究现状及其潜在应用[J]. 山地学报, 2001, **19**(6): 533~ 540.]
- [4] Li, H. T., Shen, W. Q. and Xia, J., The Validation of Air Temperature Estimates of Mountain Microclimate Simulation Model in China's Subtropical Mountainous Region MTCLIM [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(3): 395~ 401. [李海涛, 沈文清, 夏军. MTCLIM 模型系列研究报告(1): 模型的温度估算方法在我国亚热带山地的有效性验证[J]. 山地学报, 2003, **21**(3): 395~ 401.]
- [5] Li, H. T., Shen, W. Q. and Xia, J., The Validation of Humidity Estimate of Mountain Microclimate Simulation Model in China's Subtropical Mountainous region[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(3): 385~ 494. [李海涛, 沈文清, 夏军. MTCLIM 模型系列研究报告(2): 湿度估算方法在我国亚热带山地的有效性验证[J]. 山地学报, 2003, **21**(3): 385~ 494.]
- [6] Thornton, P. E.; Hubert, H.; Michal, A. W. Simultaneous Estimation of Daily Solar Radiation and Humidity From Observed Temperature and Precipitation: an Application Over Complex Terrain in Austria[J]. *Agri. For. Meteorol.* 2000. 104: 255~ 271.
- [7] Thornton, P. E.; Running, S. W.. An Improved Algorithm For Estimating Incident Daily Solar Radiation From Measurements of Temperature, Humidity, and Precipitation[J]. *Agri. For. Meteorol.* 1999. 93: 211~ 228.
- [8] Running, S. W.; Nemani, R.; Hungerford, R. D. Extrapolation of Meteorological Data in Mountain Terrain, and Its Use For Simulating Forest Evapotranspiration and Photosynthesis[J]. *Canadian Journal of Forest Research*. 1987. 17: 472~ 483.
- [9] Bristow, K. L.; Campbell, G. S. On the Relationship Between Incoming Solar Radiation and Daily Maximum and Minimum Temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1984. 31: 159~ 166.
- [10] Running, S. W.; Nemani, R. R.; Peterson, L. E. Band; D. F. Potts; L. L. Pierce; Spanner, M. A. Mapping Regional Forest Evapotranspiration and Photosynthesis and Coupling Satellite Data With Ecosystem Simulation[J]. *Ecology*, 1989. **70**: 1090~ 1101.
- [11] Glassy, J. M.; Running, S. W. Validating Diurnal Climatology logic of the MT- CLIM Model Across a Climatic Gradient in Oregon[J]. *Ecol. Appl.* 1994. 4(2): 248~ 679.

Validating the Solar Radiation Estimation of Mountain Microclimate Simulation Model in Subtropical Mountainous Region of China

LI Hai-tao¹, XIA Jun¹, SHEN Wen-qing², LIU Yun-fen¹, LIU Qi-jing¹

(1. Institute of Geography Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101;

2. Department of Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing, 100083)

Abstract: Estimation of daily solar radiation of MT CLIM model was validated in the subtropical mountainous region of China. Data were taken from the daily measurements of five sites in Wuhan, Nanchang, Ganzhou, Changsha and Shaoguan, with relatively long-term daily weather data including solar radiation. The results show that MTCLIM's submodel for solar radiation was less effective in the studied region than in the region over 30N° of United States, where the model and its key parameters were developed. The model presented underpredictions for high daily solar radiation and overpredictions for low daily solar radiation under clear-sky conditions. Further study is required to characterize the concerned parameters of the model and improve it for subtropical climates in the investigated area.

Keywords: MTCLIM Model, solar radiation, subtropical region