

MTCLIM 模型系列研究报告(4): 辐射估算方法 在我国南方亚热带山地的改进

李海涛¹, 夏军¹, 沈文清², 刘琪憬¹, 于贵瑞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, 在我国南方亚热带山地对 MTCLIM 模型的辐射估算方法进行了改进, 对模型参数作了重新估计。经过改进后, 辐射子模型中的参数 B 的变化不再用月平均温差表示, 而是用月平均水汽压来表示。交互验证估计参数的方法能消除不良数据的影响, 获得较好的模拟效果, 最后估计的参数 $T_{0, \text{natir. dry}}$ 、 α 、 C 、 a 和 b 分别为 0.823、0.000039、1.7、0.0173 和 0.000122。与用原来参数估计的结果相比, 参数估计后预测的日总辐射结果有明显改善, 相关系数 R^2 从原来的 0.55~0.73 提高到 0.65~0.82, 总平均绝对误差从原来的 $3.81 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 降低为 $2.90 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 减少了约 $1 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

关键词: MTCLIM 模型; 辐射估算; 亚热带

中图分类号: P46

文献标识码: A

1 引言

辐射因子直接影响了地表植被与大气界面间的水汽和 CO_2 的传输过程, 许多水文生态模型需要地表太阳辐射作为输入变量^[1]。但是, 由于能够直接观测地表太阳辐射的气象站点太少, 以及已有的辐射观测站点的数据连续性较差, 辐射数据的缺乏成为准确模拟植被与大气间水汽和 CO_2 通量交换及其耦合过程的“瓶颈”。MTCLIM 模型为解决这一问题提供了一条可行的途径。

MTCLIM 模型的辐射估算方法主要是基于北美 30°N 以北地区的气象站点数据发展起来的, 因而需要验证其是否适用于我国南方亚热带山地的气候条件。笔者前文的研究表明, MTCLIM 模型的辐射子模型在我国亚热带山地的模拟效果欠佳, 地面太阳辐射强度观测值较小时, 模型模拟值偏大, 而辐射强度较大时, 模型模拟值偏小, 因此, 模型有关参

数有待订正, 使改进后的模型对研究区域内各站点的地面太阳辐射获得准确无偏的估计^[1]。本文在前文研究基础上, 对此进行了探讨。

2 数据资料

研究所需数据是由国家气象数据中心提供的武汉、南昌、长沙、赣州和韶关五个台站共 14 a、5 个气象变量的逐日观测数据: 总辐射(R_{gh} , $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)、最高温(T_{max} , $^\circ\text{C}$)、最低温(T_{min} , $^\circ\text{C}$)、降水量(P , mm/d)和水汽压(e , kPa), 但并非每一站点每一年的数据均是完整的一个年系列。因而需要先进行数据筛选和处理, 其筛选处理方法为: 任意一个年系列数据只要某一天有任一变量缺测, 或者有一变量观测值极不准确, 就把这一天剔除出数据库, 并应用天文辐射公式模拟各点每天的天文辐射(R_{pot})。经数据筛选过滤后, 各站点各年份的太阳辐射逐日数据都有 300 个以上(见文献[2]、表 1)。

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(The frontier project of knowledge innovation program of IGSNRR, CAS) CX10G- E01- 08- 02, 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, 中国科学院知识创新工程重大项目(The important project of knowledge innovation program of CAS) KZCX1- SW- 01- 01A2, 人事部留学回国人员科技活动择优资助重点类别项目(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。

表 1 几种不同方法估计得到的各站点的日总辐射估算结果
Table 1 Comparison of various methods for predicting daily incoming short wave solar radiation at modeled sites

方法	统计量	长沙					武汉					南昌					赣州					韶关					
		1998	1999	1998	1999	1998	1998	1999	1998	1999	1998	1998	1999	1998	1999	1998	1998	1999	1998	1999	1998	1998	1999	1998	1999	1998	1998
参数未重新估计前 的模拟结果,引自文 献[2]	R ² (%)	0.478	0.652	0.705	0.73	0.643	0.611	0.701	0.718	0.639	0.574	0.717	0.642	0.56	0.546												
	Slope	0.875	0.960	1.157	1.094	0.962	1.054	1.219	1.132	0.934	0.964	1.187	1.904	0.847	0.959												
	Intercept	-0.794	-2.405	-3.839	-3.769	-2.583	-2.518	-4.505	-3.472	-2.164	-0.572	-3.290	-1.854	-1.189	-2.214												
	See	5.707	4.163	4.115	3.81	4.195	4.671	4.399	4.021	4.165	4.677	4.147	4.210	4.212	4.811												
	Bias	-2.482	-2.952	-1.633	-2.488	-3.10	-1.79	-1.554	-1.707	-3.08	-1.23	-0.300	-0.673	-3.30	-2.69												
	MAE	4.487	3.950	3.413	3.499	4.068	3.89	3.778	3.422	3.876	3.665	3.341	3.258	4.297	4.071												
交互验证(8231和 8232)	RMSE	6.252	5.11	4.510	4.579	5.217	4.997	4.809	4.415	5.176	3.777	4.317	4.273	5.348	5.507												
	R ² (%)	50.2	73.2	73.9	74.9	69.9	71.4	75.9	75.9	73.3	73.2	81.6	72.2	69.7	65.4												
	Slope	0.766	0.918	1.034	0.998	0.872	0.971	1.047	1.044	0.889	0.905	1.01	0.978	0.829	0.869												
	Intercept	1.957	0.261	-0.363	-0.276	0.843	0.792	-0.341	-0.225	0.148	0.833	0.070	0.519	0.446	-0.149												
	See	5.792	3.690	3.872	3.670	3.946	4.006	3.957	3.562	3.610	3.765	3.340	3.716	3.594	4.284												
	Bias	-0.801	-0.637	0.049	-0.302	-0.591	-0.465	0.204	0.259	-1.169	-0.359	0.199	0.228	-1.644	-1.861												
仅用南昌站数据估 计得到的参数(816)	MAE	4.171	2.704	2.713	2.650	2.811	2.977	2.965	2.739	2.639	2.779	2.353	2.664	2.970	3.345												
	RMSE	5.847	3.734	3.867	3.687	3.985	4.027	3.957	3.567	3.781	3.771	3.341	3.718	3.947	4.665												
	R ² (%)	49.5	73.7	73.6	75.0	69.7	71.1	76.3	76.2	73.4	73.4	81.7	72.4	70.1	68.1												
	Slope	0.797	0.962	1.009	0.969	0.851	0.947	1.029	1.014	0.860	0.882	0.980	0.943	0.801	0.863												
	Intercept	1.798	0.0001	0.086	0.244	1.289	1.267	0.165	0.372	0.657	1.237	0.606	1.105	0.944	0.216												
	See	5.911	3.740	3.888	3.667	3.993	4.033	3.917	3.527	3.649	3.783	3.331	3.716	3.644	4.139												
仅用赣州站数据估 计得到的参数(836)	Bias	-0.648	-0.425	-0.196	-0.108	-0.350	0.738	0.491	0.521	-0.984	-0.237	0.345	0.376	-1.443	-1.524												
	MAE	4.275	2.711	2.726	2.640	2.808	3.028	2.927	2.702	2.609	2.785	2.361	2.690	2.933	3.106												
	RMSE	5.946	3.755	3.887	3.664	4.003	4.086	3.942	3.561	3.775	3.780	3.344	3.730	3.915	4.406												
	R ² (%)	50.9	73.2	73.6	74.4	69.3	70.9	75.5	75.1	73.4	72.9	81.7	73.2	69.4	68.5												
	Slope	0.739	0.882	1.065	1.035	0.899	0.996	1.081	1.080	0.923	0.929	1.109	1.090	0.853	0.920												
	Intercept	2.389	0.848	-0.340	0.355	0.788	0.784	-0.414	-0.359	-0.007	0.810	0.319	0.648	0.337	-0.399												
仅用赣州站数据估 计得到的参数(836)	See	5.686	3.623	3.913	3.715	3.941	4.029	4.013	3.640	3.553	3.760	3.404	3.676	3.560	4.040												
	Bias	-0.545	-0.405	0.423	0.036	-0.317	0.738	0.504	0.510	-0.898	-0.066	1.60	1.662	-1.425	-1.412												
	MAE	4.079	2.657	2.834	2.730	2.825	3.113	3.081	2.881	2.575	2.789	2.903	3.072	2.881	3.071												
	RMSE	5.712	3.636	3.931	3.710	3.948	4.091	34.039	3.671	3.660	3.750	3.757	4.030	3.830	4.275												

注: 表中 See, Bias, RMSE 和 MAE 的单位为 MJ·m⁻²·d⁻¹.

3 辐射子模型的参数估计方法

3.1 参数化方法

Bristow 和 Campbell (1984) 研究结果表明, 大气上界水平面上的日总辐射, 到达地面之前是呈线性衰减变化的, 这个线性系数为日总透射率 (T_t), 因而, 地面上的日总辐射量为

$$R_{gh} = T_t \cdot R_{pot} \quad (1)$$

式中 R_{pot} 为瞬时天文辐射, T_t 随气温日较差而变化 ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$)

$$T_t = T_{t, \max} (1 - \exp(-B \cdot \Delta T^C)) \quad (2)$$

$T_{t, \max}$ 是指碧空天气下的最大透射率, B 和 C 为经验系数。

这里, 假设 R_{pot} 的原有估计方法较好, 不讨论 R_{pot} 的计算方法, 重点讨论 $T_{t, \max}$ 、 B 和 C 的参数估计过程。 $T_{t, \max}$ 是随 ΔT 的增大, T_t 能达到的最大值, 是晴天中一天的总透射率。Bristow 和 Campbell 假设这个值是几乎不变的^[3], 但 Thornton 发现, $T_{t, \max}$ 随地点变化, 在 $T_{t, \max}$ 的时空变化的物理意义上重新确定了 $T_{t, \max}$ 的参数化过程^[4, 5]。此外, Bristow 和 Campbell (1984) 研究表明, B 的最适值随季节变化, 可用月平均温差确定, C 几乎是稳定不变的^[3]; 而 Thornton 并不是用 ΔT 直接讨论 $T_{t, \max}$ 的变化, 他把 T_t 与 $T_{t, \max}$ 的比值表示为 ΔT 的函数, 进而在这个基础上估计 B 和 C , 发现 C 虽比较稳定, 但与 Bristow 和 Campbell 估计的 2.4 相比, 差距较大, 为 1.5 左右^[5]。因此, 在 Bristow 和 Campbell 及 Thornton 等研究的基础上, 本研究遵循他们参数估计的原理和方法, 首先考虑日透射的时空差异性, 重新对 $T_{t, \max}$ 进行估计, 估计本研究区域内的 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ (海平面上天顶角为 0 时干空气状况下的透射率) 和 α (水汽压对晴天透射率的影响系数); 接着讨论 B 和 C 的参数化过程; 最后描述各参数预测精度的评价方法和确定最终参数的方法。

3.1.1 $T_{t, \max}$ 的参数化过程

1. 海拔的影响

Bristow 和 Campbell 发现, 随着海拔的变化, 从大气到地球表面的光路中的大气质量不断变化, 因而 $T_{t, \max}$ 也是不断变化的。忽略气体流动产生的地表面气压的变化, 就某一地方而言, 透射率随海拔的变化是稳定的^[3], 可表示为

$$T_{Z} = T_{0}^{P/P_0} \quad (3)$$

T_Z 是 Z 海拔高度处的瞬间透射率, T_0 为海平面上的瞬时透射率, P_Z/P_0 为两点气压比。

2. 太阳高度角的影响

一天中太阳高度角是不断变化的, 大气到地球表面的光学厚度也发生变化。太阳天顶角随纬度、具体年限和时角变化, 因而, 在一定地点一定时间中的瞬时透射率可用下式表示

$$T_0 = T_{nadir}^m \quad (4)$$

T_0 为天顶角为 θ 时的瞬间透射率, T_{nadir} 为天顶角为 0 (太阳正在头顶上) 时的瞬时透射率, m_0 为大气光学质量, $m_0 = 1 / (\cos(\theta))$ ^[6]

3. 水汽压的影响

很多研究表明, 大气中的水汽压对透射率影响很大, 地面附近的水汽压与大气中的水汽压成正比^[5]。据杨景梅和邱金桓 (1996) 的研究, 大气可降水量和有效水汽含量同地面水汽压之间有良好的数值对应的线性关系, 仅用地面水汽压计算出的整层大气可降水量和有效水汽含量, 同实际情况符合得很好, 平均相对误差普遍小于 15%^[7]。因而, 可用地面附近的水汽对透射率的影响表示为大气中的水汽对透射率的影响, 水汽含量的多少与透射率有很强的对应关系, 在任意晴天中, 如果水汽压较低, 透射率较高, 两者关系可近似表示为

$$T_{wet} = T_{dry} + \alpha \cdot e \quad (5)$$

T_{wet} 为水汽影响下的瞬间透射率, T_{dry} 为干空气下的瞬间透射率, α 为水汽影响系数, e 为近地表面的水汽压。

Thornton 等对这三个影响因素进行了研究^[4] 后发现, 海拔是最重要的影响因素, 但单独考虑任一因素的影响或任两个因素的影响估计的 $T_{t, \max}$ 的精度远低于三个因素的综合影响效果。在讨论三因素的综合影响时, Thornton 首先假设一天中的水汽压是稳定不变的, 用离散变量的数值方法对 1d 中的各时段的瞬间透射率给以加权平均得到每日总的透射率, 使用三因素综合效应方程来估计 $T_{t, \max}$ 的变化

$$T_{t, \max} = \left[\frac{\sum_{s=sr}^{ss} R_{pot \cdot s} \cdot T_{0 \cdot nadir \cdot dry}^{(P_Z/P_0) \cdot m_0}}{\sum_{s=sr}^{ss} R_{pot \cdot s}} \right] + \alpha \cdot e \quad (6)$$

$T_{pot \cdot s}$ 为瞬时天文辐射, sr 为日出的时角, ss 为日落的时角

方程 (6) 表示晴天时的透射率, 进行参数估计必须从观测数据库中筛选出晴天的数据。就每个站点而言, Thornton 从多年观测值中挑出每一个晴天的

最大观测值代替该天的晴天透射率, 并得到相应的水汽压。而且为了消除观测误差的影响, 对于任一观测结果不好的时日, 都从前共 7 d 的时间段取 3 个最大值的平均代替这天的透射率, 该天的水汽压也是相应 3 d 水汽压的平均。但如前所述, 晴天的透射率是海拔、天顶角和水汽压共同作用的结果, 水汽是影响透射率的很重要的因子, Thornton 等 (1999) 在确定晴天的透射率时只考虑最大的 $T_{f \cdot \max}$, 而不考虑水汽压对它的影响, 这似乎在参数化的过程中首先就没考虑水汽压的影响。此外, 本研究仅有五个站点共 14 a 的数据, 远达不到 Thornton 所用方法对数据量的要求。因此我们不分站点不分时间地筛选出各点为晴天的数据。

这里, 我们用两种方法估计参数。第一, $T_{0 \cdot \text{nadir} \cdot \text{dry}}$ 表示海平面、天顶角为 0 时干空气的透射率, 时间、地点一旦确定, 方程的加权部分就是稳定不变的。两年的同一个晴天的透射率之差就仅仅是两天水汽压差影响的结果。因而, 我们挑选出每个站点两年同为晴天的数据, 先计算水汽压对 $T_{0 \cdot \text{nadir} \cdot \text{dry}}$ 影响系数 α , 再在 α 的基础上估计 $T_{0 \cdot \text{nadir} \cdot \text{dry}}$ 。但是, 这种方法是建立在人为划定晴天的气象记录的基础上, 而实际上气象记录中的任一晴天都或多或少有云量的影响, 这样晴天透射率差就不仅仅是水汽压差影响的结果, 估计的参数很有可能有很差的模拟效果。因此, 我们用另一种方法再估计这两个参数: 两个参数的估计同时进行, 用最小二乘估计法确定参数使 $T_{f \cdot \max}$ 的观测值与计算值的平均绝对误差 (MAE) 最小。

为了确定方程的有效性, 我们用成对样本的 t 检验来比较这两种方法的误差差异显著性水平。成对样本 t 检验 ($n = 346$) 检验这两种方法估计的每天的透射率的平均绝对误差 (MAE) 的差异。参数估计中用 MAE 最小来确定参数估计的方法, 如果 MAE 差异很小, 就挑选更简便的方法。

3.1.2 B 和 C 的参数化

B 和 C 的参数化有两个依据: 其一就是 $T_{f \cdot \max}$ 的时空差异性。为了更客观、更有效地估计 B、C, 这里不直接用 ΔT 表示 $T_{f \cdot \max}$, 而用 T_t 与 $T_{f \cdot \max}$ 的比值 ($T_{f \cdot \max} = T_t / T_{f \cdot \max}$) 表示透射率随 ΔT 的变化规律。其二是必须确定 $T_{f \cdot \max}$ 的最小值。Thornton 比较观测结果发现, $T_{f \cdot \max}$ 近似于 0.1^[4], 而我们比较本研究区域的观测值发现, 最小约为 0。考虑的此值变化, 估计 B 和 C 的方程为

$$T_{f \cdot \max} = 1.0 - \exp(-B \Delta T^C) \quad (7)$$

以往的研究表明, 降水对透射率与 ΔT 的关系有很大的影响, 并用一个订正系数分别对 ΔT 和 $T_{f \cdot \max}$ 进行订正, 经过多次实验后确定为 0.75。这里采用 Thornton 的方法订正 $T_{f \cdot \max}$ 。这样就用方程 (8) 计算 R_{gh} , 它是基于 $T_{f \cdot \max}$ 的参数估计的基础上建立起来的。而且一些研究表明, 需要考虑温度对太阳辐射的滞后性, 方程 (7) 中的 ΔT 应该为当日最高温与当日最低温和次日最低温的平均值之差。但 Thornton 等 (1999) 发现, 考虑温度的滞后性并没有改善辐射估计结果^[5], 本研究在参数估计的过程中也尝试考虑温度的滞后性, 但结果与 Thornton 相同。因而, 在整个参数估计过程中本研究不再考虑温度滞后的影响, 仅用当日最高温与最低温之差表示 ΔT

$$R_{gh} = R_{pot} \cdot T_{f \cdot \max} \cdot T_{f \cdot \max} \quad (8)$$

许多研究表明, B 有明显的季节变化, 其最适值随月平均 ΔT 呈指数衰减。在 B 的参数化过程中我们试用了几种方法, 结果发现, B 虽不断变化, 但最佳取值与月平均 ΔT 几乎没有任何相关关系, 而与月平均水汽压关系密切, 呈明显的线性正相关。因而, 我们不采用 Thornton 等 (1999) 的方法用月平均 ΔT 表示 B, 而用月平均水汽压表示 B 的季节变化。这里先计算每一天和前 29 d 的水汽压的平均值表示该天的月平均水汽压, 再按月把各点各年的观测数据分组, 并对每一组数据根据方程 (7) 用数值最优化方法确定 B 各阶段的最适取值, 使得方程 (8) 中 R_{gh} 的预测值与实测值的 MAE 最小。最后用线性回归方程对 B 各阶段的最适取值和相应时段的总月平均水汽压平均值加以拟合

$$B = a + b \cdot e \quad (9)$$

最后把所估计的参数代入方程, 计算出参数估计数据组中各点各年的 MAE 之和。B 的最优化过程、B 和 e 的线性拟合及 MAE 的总合计算都是在 C 的一段取值范围中进行的, 最终确定的参数 C、a、b 必须使各点各年的 R_{gh} 的计算值与实测值的 MAE 总和最小。根据 Thornton 等 (1999, 2000) 的研究结果, 本研究参数估计过程中 C 的取值范围在 1.3~2.1 间。

3.2 交互验证方法

用交互验证方法来分析模型预测的误差可保证模型参数客观性确定, 本研究用交互验证的方法评价模型中 $T_{f \cdot \max}$ 和 R_{gh} 预测的误差。前两节中我

们描述了模型建立的客观过程,模型中各参数的估计可用交互验证的方法来分析。交互验证分析具体步骤为:1. 先从数据库中抽取一个点的数据;2. 用数据库中剩余的其它各点各年数据确定各参数的取值;3. 用这次估计得到的参数值计算抽取的那点的 $T_{t \cdot \max}$ 和 Rgh ;4. 比较该点的模型预测值和观测值的 MAE 和偏差;5. 将该点放回数据库后重新抽取另外一个点,从第一步开始重新估算一遍,直到数据库中各点都抽取过一遍为止。

步骤2中需要确定参数的方法是使得用于参数估计数据库的辐射预测值与实测值的 MAE 最小。但参数的最后确定是根据方程(6)得到的参数值使得所有数据库中 $T_{t \cdot \max}$ 的预测值与观测值之间的 MAE 总和最小,最后估计出的 C 及方程(9)中的系数 a 和 b 必须使得 Rgh 的预测值与观测值的 MAE 最小。

此外,为了确定参数的具体适用性,本研究在参数估计原则的基础上用单独的南昌和赣州站点数据分别估计了两套参数,并把各套参数应用于估计其

它各站点各年份的逐日太阳辐射值。这样就可比较参数的适用性随距离的变化。

4 结果与讨论

4.1 参数化方法的结果

4.1.1 参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 和 α

本研究用两种方法确定了这两个参数,结果见表2。从表中可以发现,方法1的估计误差远远大于方法2的估计误差,其中方法1估计 $T_{t \cdot \max}$ 的 bias 在 $-0.0307 \sim 0.0357$ 间, MAE 都在 0.057 以上, $RMSE$ 在 $0.067 \sim 0.07$ 间;而方法2估计 $T_{t \cdot \max}$ 的 bias 在 $-0.002 \sim 0.0043$ 间, MAE 在 $0.027 \sim 0.028$ 间, $RMSE$ 在 0.034 左右,各统计变量大都比方法1小一倍之多。而且,方法2估计的参数被应用到新站点时, $T_{t \cdot \max}$ 的估计结果要好于方法2估计的参数。因而方法2能更好地估计各参数值。此外,对两种方法各需站点的估计结果 $T_{t \cdot \max}$ 的绝对平均差做成对样本 t 检验 ($n = 246$), 结果发现,方法1与

表2 几种估计晴天透射率方法的预测结果比较
Table 2 Comparison of various methods for predicting clear-sky transmittance

方法	所需站点	$T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$	α	Bias	MAE	RMSE	排序
1(先估计水汽压对透射率的影响系数 α , 再求参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$)	南昌、赣州、长沙	0.884	-7×10^5	-0.0357	0.0591	0.0694	8
	赣州、长沙、武汉	0.878	-7×10^5	-0.0311	0.0576	0.0678	6
	长沙、武汉、南昌	0.878	-7×10^5	-0.0311	0.0576	0.0678	6
	南昌、赣州、武汉	0.881	-7×10^5	-0.0307	0.0570	0.0669	5
	南昌、赣州、长沙	0.825	-3.9×10^5	-0.0043	0.02769	0.0342	4
2(同时估计参数 α 和 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$)	赣州、长沙、武汉	0.830	-4.4×10^5	0.0022	0.02759	0.0341	3
	长沙、武汉、南昌	0.820	-3.9×10^5	0.0024	0.02754	0.0340	2
	南昌、赣州、武汉	0.823	-3.9×10^5	-0.0016	0.02748	0.0339	1

方法2之间差异极其显著,而方法内各所需站点的估计差异不显著,而且方法2中的4个估计结果虽差异不大,但以南昌、赣州和武汉三站点估计的 MAE 最小。因而,根据前文所述的参数估计原则,和 α 的最终参数值分别为 0.823 和 -0.000039 。与 Thornton 等 (1999) 的研究结果 (0.87 和 -0.000061) 相比,稍小,而 α 稍大,但都在一个数量级上。其原因可能是是本研究所用站点的纬度大都在 $30^\circ N$ 以下,而 Thornton 等所用站点都在 $30^\circ N \sim 48^\circ N$ 之间,地理位置差异很大。另一个可能原因是数据观测结果和选用晴天数据的误差引起的。不过,

本研究所估计 $T_{t \cdot \max}$ 的各统计量与 Thornton 等的估计结果很相近, MAE 差异 < 0.004 。所以,可以认为方程6能较普遍地说明各点 $T_{t \cdot \max}$ 的变化特点。

但各站点的估计结果不尽相同,有的估计偏高,有的估计偏低。最后确定的参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 和 α 分别为 0.823 和 -0.000039 估计结果中,总的 bias、 MAE 和 $RMSE$ 分别为 -0.0016 、0.02748 和 0.0339。其中,武汉、长沙、南昌、赣州的偏差分别为 -0.0147 、 -0.0065 、0.0055 和 0.0060, MAE 分别为 0.0253、0.0315、0.0281 和 0.0260, $RMSE$ 分别

为 0.0314、0.0371、0.0349 和 0.0328。图 1 表明了各站点晴天透射率实测值与预测值。由此可见, 武汉和长沙的估计偏高, 赣州和南昌估计偏低, 这可能与当地的大气气溶胶含量有关。

大气气溶胶通常是指悬浮大于中直径 $< 10\mu\text{m}$ 的微粒。其质量仅占整个大气质量的十亿分之一, 但其对大气辐射传输和水循环均有重要的影响^[8]。一方面, 气溶胶粒子通过吸收和散射太阳辐射, 改变地—气系统的能量收支, 直接影响气候变化; 另一方面, 气溶胶粒子还可作为云的凝结核改变云的光学特性和生命期, 间接影响气候。此外, 它还参与臭氧的非均相反应, 影响臭氧平衡, 间接影响地—气系统的能量收支。现今已有不少观测事实和数值模拟研究揭示了气溶胶对气候辐射强迫的重要性^[9]。据罗云峰等(2001)研究表明, 总体而言, 大部分月份长江中游武汉附近为大气气溶胶光学厚度(AOD)另两个相对大值中心之一; 武汉台站大气气溶胶的平均光学厚度多年平均为 0.6, 变化率为 0.0087, 赣

州、南昌的多年平均 AOD 同为 0.40, 变化率分别为 0.00002 和 -0.0021 ; 而且南昌、赣州、长沙等站 AOD 的季节变化峰值在春季, 谷值在夏季^[10]。武汉的大气气溶胶浓度比南昌和赣州要高, 减小了晴天下的透射率, 因而武汉的估计过于偏高, 南昌和赣州的估计稍微偏低。而且从图 1 中还可看出, 南昌、赣州和长沙台站的 $T_{t\cdot\text{max}}$ 实测值和观测值之间的差异有明显的季节趋势, 春季一般估计偏低, 夏季一般估计稍微偏高, 这与其 AOD 的季节变化比较一致。但由于具体地方 AOD 浓度不同, 其估计或偏高或偏低的程度也不同。此外, 由于本研究假设各台站位于平坦开阔之地, 任何时候都没有地形阻碍水平面上的太阳辐射, 这和仪器测量误差可能都可解释 $T_{t\cdot\text{max}}$ 实测值和公式(6)预测值之间的部分偏差。

从以上分析可以发现, 如果模型能考虑到大气气溶胶和当地地形上的变化等因素的影响, 模型的预测结果将有很大的改善。但由于气溶胶时、空分布的不确定性及其物理、化学特性的多变性, 加上

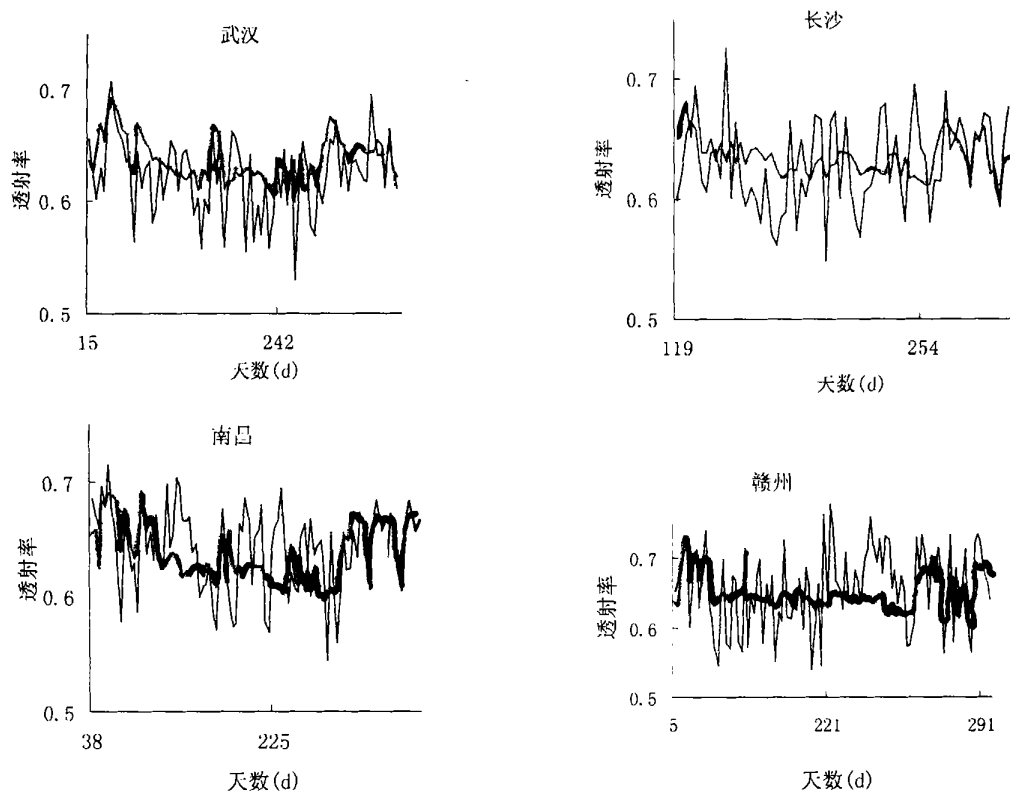


图 1 四个台站 $T_{t\cdot\text{max}}$ 预测值(粗线)和实测值(细线)的比较图

Fig. 1 Comparison of the predicted clear-sky transmittance(bold line) and the observed clear-sky transmittance(fine line) for four stations

观测资料的严重缺乏,使得大气气溶胶成为当今环境与气候变化研究中一个既重要又难以估计的不确定因子参考文献^[9]。因而,本研究无法进一步深入研究 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 的变化。

4.1.2 参数 B 和 C

图 2 表明了日总太阳辐射预测统计变量 MAE 在 C 的取值范围 1.3–2.1 之间的变化规律。从图中可以看出,各点日总辐射预测值的 MAE 随 C 的变化呈抛物线变化, C 为 1.7 时总的 MAE 最小,为

$2.897 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 对应南昌、赣州、长沙和武汉各站的 MAE 分别为 $3.021 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $2.505 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $3.465 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.703 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。 B 值随水汽压呈线性相关变化,而且随 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 、 α 和 C 变化,在不同的 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 、 α 和 C 取值下, B 值随水汽压的线性相关关系有所不同。图 3 是在 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 为 0.823, α 为 0.000039 和 C 为 1.7 时估计出来的 B 和水汽压的相关关系图,对应的参数 a 和 b 分别为 0.0173 和 0.0000122。

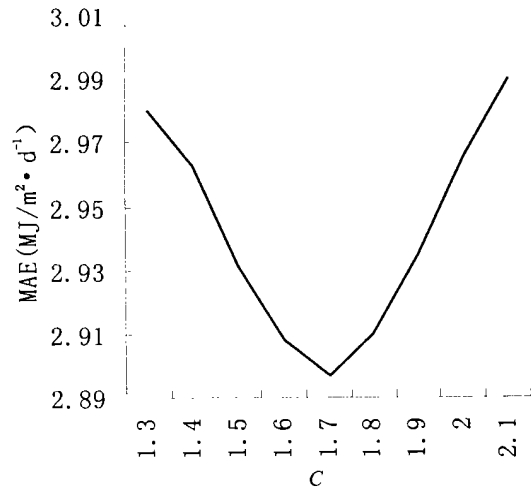


图 2 日总太阳辐射预测值的 MAE 随不同 C 取值的变化

Fig. 2 MAE for predictions of radiation over a range of values for C

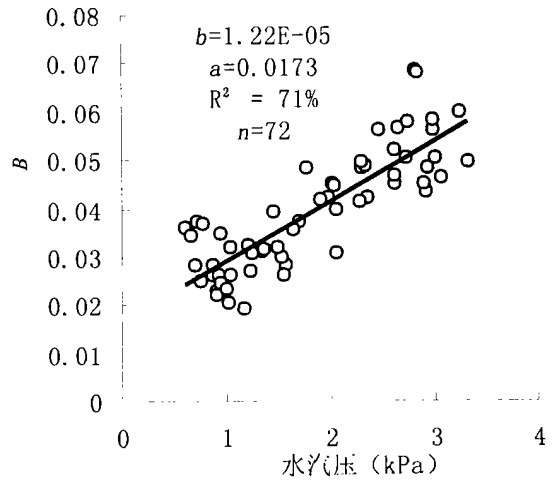


图 3 参数 B 随水汽压变化趋势

Fig. 3 The change of B with various water vapour pressure

4.2 交互验证分析结果与比较

表 1 表明了交互验证分析中各参数估计的结果,其中 8231 为用南昌、赣州、长沙、武汉 4 个站点 1998 年和 1999 年的整年数据估计参数的结果。从表中可以发现,除长沙站 1998 年估计的误差过大外,其它各点估计误差都较小。其中用于参数估计的站点的逐日太阳辐射的 MAE 在 $2.353 \sim 2.977 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 间,用于验证模型的南昌、赣州和韶关站点 1982 和 1983 年的 MAE 在 $2.639 \sim 3.345 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,稍大于用于参数估计的逐日太阳辐射的 MAE 。长沙 1998 年逐日太阳辐射预测值的 MAE 为 $4.171 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,远大于其它站点的估计误差,而且长沙站 1998 年辐射预测值与实测值之间的相关系数 R^2 仅为 0.5 也远小于其它站点的 R^2 ($0.65 \sim 0.82$)。因而,在前文对辐射子模型有效性验证分析和本文模型参数估计分析的基础上,可以认为无

论参数取何值,该模型都不能很好地描述长沙站点 1998 年的日总太阳辐射的变化,但可描述其它各点各年的日总辐射的变化。所以,为了保证参数的一般适用性,笔者从数据库中剔除了长沙站 1998 年的日总辐射数据,用交互验证方法重新进行参数估计,并比较了参数估计后的日总辐射预测结果。

表 1 中的 8232 是剔除了长沙站 1998 年数据后重新估计参数的预测结果,从表中可以看出,重新估计后的参数与剔除不良数据前估计的结果一致,这说明,交互验证估计参数的方法不仅能消除不良数据对参数的影响,还能客观地、现实地反映参数估计的结果。因而本研究中用交互验证方法估计的参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 、 α 、 C 、 a 和 b 分别为 0.823、0.000039、1.7、0.0713 和 0.0000122。

此外,用南昌 1998 年和 1999 年估计的参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 、 α 、 C 、 a 和 b 分别为 0.816、0.000033、

1.9、0.0127 和 0.000007, $T_{t \cdot \max}$ 的估计均方根差为 0.0342, 表 1 中的 816 为该套参数用于估计其它各点各年的日总辐射的结果。用赣州 1998 年和 1999 年估计的参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 、 α 、 C 、 a 和 b 分别为 0.836、0.000043、1.5、0.0785 和 0.0000193, $T_{t \cdot \max}$ 的估计均方根差为 0.0320, 表 2 中 836 就是用该套参数估计日总辐射的结果。与前文未做改进的模型模拟结果^[1]相比, 表 1 中用各套参数估计日总辐射的各个统计变量都有明显的改善。其中, 日总辐射预测值与实测值的相关系数 R^2 从原来的 54.6%~73.0% 提高到目前的 65.4%~81.7%, 大部分提高了 10% 以上; MAE 从 3.258~4.297 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 降低到 2.353~3.345 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 大部分可减少 1 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; RMSE 从 3.777~5.507 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 降低到 3.341~4.665 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。图 4 表明了参

数估计后模型拟合效果最好的赣州站 1998 年和模型拟合最差的韶关站 1983 年的日总辐射实测与预测相关关系图。与原来未做改进的模型模拟结果相比^[2], 数据更为集中在趋势线上, 而且除了极少数点之外, 中等强度和弱强度辐射的拟合效果更好, 只是强辐射偏低估计改善程度较低, 这可能与 $T_{t \cdot \max}$ 的估计误差有关。这说明, 在本研究区域重新估计的参数值不仅能大大地降低模型的估计误差, 而且其模拟的日总辐射比前文^[2]应用 Thornton 等估计的参数模拟结果能更好地解释日总辐射实测值的变异性, 约增强 10%。所以, 在任一地点应用 MTCLIM 模型前必须先对模型的有效性进行验证, 并对参数进行重新估计, 这样才能更好地模拟当地日总辐射的变化状况。

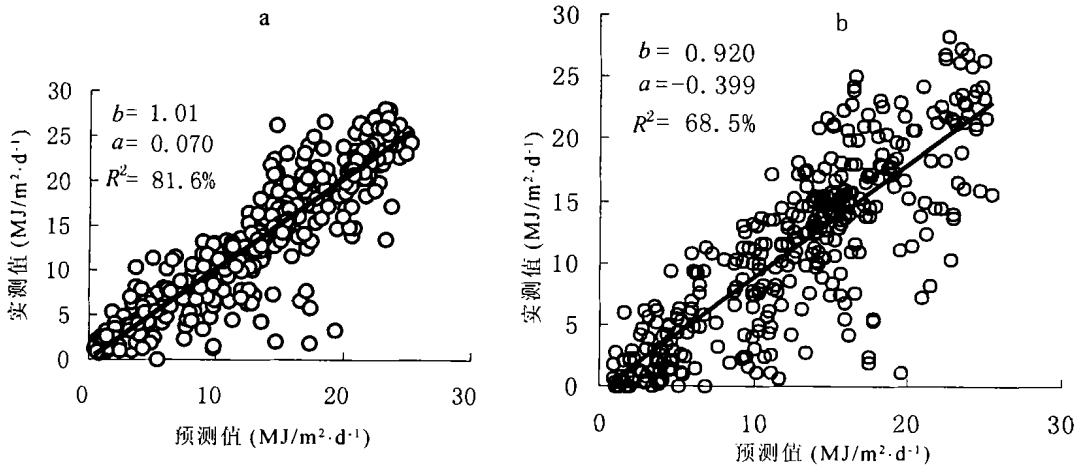


图 4 赣州 1998 年(a)和韶关 1983 年(b)日总辐射实测值与预测值的相关关系图

Fig. 4 Regression of incoming shortwave radiation predicted vs. actual radiation observed at Ganzhou station in 1998 (a) and at Shaoguan station in 1983 (b)

图 5 描述了用交互验证方法、南昌站点单独估计和赣州站点单独估计得到的三套参数估计本研究区域各点日总辐射的平均绝对误差。从图中可以看出, 对于参与交互验证估计的南昌、赣州、长沙和武汉四个站点来说, 其日总辐射大都以交互验证方法估计的结果最好, 尤以赣州站表现突出, 南昌站虽在 1998 年和 1999 年用该点估计的参数计算结果好于其它参数, 但该站 1982 年和 1983 年的估算结果并不与 1998、1999 年的估算表现一致。这是因为任一地点天气状况都有很大的年际变化, 具体某一年限的天气状况并不能说明该站点一般天气特性, 而用

多点多年的天气特点分析得到的结果则能较好捕捉台站更多的天气信息, 因而其估计的参数有更强的应用性。当然, 如果某一站点单独估计的参数恰好能很好地说明某一点某一年的日总辐射变化规律, 那么该参数估计的结果就比用交互验证方法估计的结果要好, 否则结果就相反。这也是南昌站用该点估计的参数计算结果在四年中不一致的原因。而对于没有参与交互验证参数估计的韶关站, 用交互验证方法估计的参数估计结果没有其它两套参数好, 而且参数的应用结果与距离有一定的相关性, 距离越近, 参数的适用性越好。从图 4 中的 a 和 b 可以

看出, 用赣州单独估计的参数用于估计韶关的日总辐射结果最好, MAE 分别为 2.881 和 3.071; 南昌单独估计的参数得到的结果次之, MAE 分别为 2.933 和 3.106, 但交互验证估计的参数用于估计韶关的日总辐射的 MAE 分别为 2.970 和 3.345, 而且相关系数也相差 1%~3%。这说明, 由于韶关站没有用于交互验证分析, 因而交互验证方法估计的参数不能较好地涵盖该点地天气信息, 而赣州站与

韶关距离较近, 气候特点相似, 因而用赣州站估计的参数可以很好地表明韶关的日总辐射变化。所以, 参数的适用性有一定的规律, 当应用点位于用于交互验证参数估计站点范围内, 则需用交互验证方法估计的参数来估计该点的日总辐射, 当位于它们之外, 则科用距离相隔最近, 气候特点最为相似的站点估计的参数来估计该点的日总辐射。

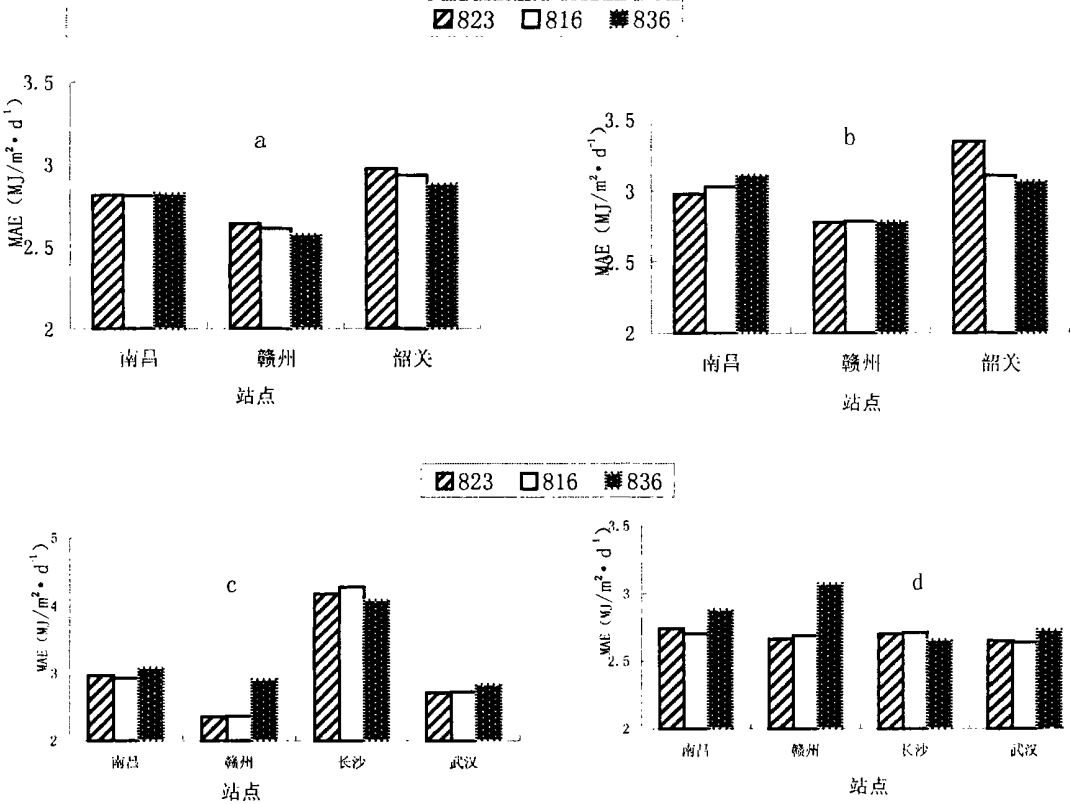


图 5 交互验证方法(823)、南昌站点单独估计(816)、赣州站点单独估计(836)的三套参数预测的各站点 1982(a)、1983(b)、1998(c)和 1999 年(d) 日总太阳辐射的 MAE 比较图
Fig. 5 Comparison of MAE for prediction of daily radiation in 1982(a), 1983(b), 1998(c) and 1999(d) at modeled sites respectively by cross-validation, only in nanchang station and only in ganzhou station

5 结语

经过改进后, 辐射子模型中的参数 B 的变化不再用月平均温差表示, 而是用月平均水汽压来表示, $B = a + b \cdot e$ 。而且, 交互验证估计参数的方法能剔除观测不佳数据(长沙站 1998 年)的影响, 最后估计的参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ 、 α 、 C 、 a 和 b 分别为 0.823、0.000039、1.7、0.0173 和 0.0000122, 与 Thornton

等(1999)对参数 $T_{0 \cdot nadir \cdot dry}$ (0.870)、 α (0.000065)和 C (1.5)的估计结果有异。进一步还讨论了参数应用随站点距离间的关系, 发现在用于交互验证参数估计的站点范围内即南昌、赣州、武汉和长沙站点用该方法估计的参数估计日总辐射效果最好, 韶关位于这些站点之外, 与参数应用有较弱距离影响效应, 用南昌估计的参数来估计韶关站的日总辐射效果比用赣州站估计的参数稍差。与原来参数估计的结果^[2]相比, 本研究参数重新估计后预测的日总辐

射结果有明显改善, 不仅各站点各年份的相关系数 R^2 从原来的 0.55~0.73 提高到 0.65~0.82, 而且所有站点估计的总平均绝对误差从原来的 $3.81 \text{ MJ/m} \cdot \text{d}^{-1}$ 降低为 $2.90 \text{ MJ/m} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右, 各点普遍减少了 $\text{MJ/m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中赣州 1998 年的模拟结果最好, R^2 可达 0.82, MAE 最小仅为 $2.35 \text{ MJ/m} \cdot \text{d}^{-1}$; 韶关站 1983 模拟结果最差, R^2 最小为 0.65, 最大为 0.69, 相应的 MAE 分别为 $3.345 \text{ MJ/m} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.07 \text{ MJ/m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。参数估计后的误差主要发生在晴天状态下强辐射估计过于偏低, 主要来源于晴天天气的人为划分和气溶胶的影响, 还有观测误差。

参考文献(References):

- [1] Li, H. T., Xia, J., Shen, W. Q., Xia, J. et al.. Validating the Solar Radiation Estimation of Mountain Microclimate Simulation Model in China's Subtropical Mountainous Region[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3): [李海涛, 夏军, 沈文清, 等. 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[J]. 山地学报, 2003, 21(3):].
- [2] 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[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(3): 385~394. [李海涛, 沈文清, 夏军, MTCLIM 模型系列研究报告(1): 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): 385~394.]
- [3] Bristow, K. L.; Campbell, G. S. On the Relationship Between In-

coming Solar Radiation and Daily Maximum and Minimum Temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1984. 31: 159~166.

- [4] Thomson, 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.
- [5] 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.
- [6] Gates, David M. 1980. *Biophysical Ecology*[M]. New York: Springer-Verlag.
- [7] Yang, J. M., Qiu, J. H.. The Empirical Expressions of the Relation Between Precipitable Water and Ground Water Vapor Pressure for Some Areas in China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1996, 20(5): 620~626. [杨景梅, 邱金桓. 一个大气可降水量和地表水汽压之间的经验关系[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 620~626.]
- [8] Charlson, R. J., Langner, J., Rodhe, H., et al.. Perturbation of The Northern Hemisphere radiative balance by back-scattering from anthropogenic aerosol[J]. *Tellus*, 1991, 43AB: 152~163.
- [9] Kiehl, J. T., Briegleb, B. P. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases In climate forcing[J]. *Science*, 1993, 260: 311~314.
- [10] Luo, Y. F., Li, W. L., Zhou, X. J.. Analysis of the 1980's Atmospheric Aerosol Optical Depth Over China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(1): 77~86. [罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 我国 80 年代大气气溶胶光学厚度分析[J]. 气象学报, 59(1): 77~86.]

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

LI Hai-tao¹, XIA Jun¹, SHEN Wen-qing², LIU Qí-jing¹, YU Guí-rui¹

(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: The estimation of solar radiation of MTCLIM model in the subtropical mountainous region of southern China in improved. The key parameters were calculated to reduce the estimation error. It was found that the parameter B was associated with e , the monthly mean vapor pressure, via the equation $B = a + be$, which produced results better than the original model. The other key parameters developed from cross-validation also worked reasonably well compared with the original ones. In general, the improved model could give a better estimation for solar radiation of the studied sites.

Key words: MTCLIM model, Solar Radiation, Subtropical Region