

MTCLIM 模型系列研究报告(2): 湿度估算方法在中国亚热带山地的有效性验证

李海涛¹, 沈文清², 夏军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: 本文在前期研究基础上, 在南方亚热带山地对 MTCLIM 模型的温度估算方法进行了验证和订正。研究结果表明: 经过露点订正后该研究区域内逐日水汽压的估算结果普遍改善, 但在不同站点不同年份间的表现不同。对各站点共 5 097 个观测数据计算后发现, 用最低温估计的水汽压和用露点方程订正后的露点估计的水汽压与实测值之间的 MAE 分别为 0.221 kPa 和 0.207 kPa, 两种方法的模拟结果均与实测值非常接近, 但后者偏差更小。与最低温度法估计的结果相比, 露点订正方法能较好地模拟干旱天气条件下水汽压的变化状况。

关键词: MTCLIM 模型; 湿度估算; 亚热带

中图分类号: P46

文献标识码: A

湿度是一个影响地表生态过程和水文界面过程的重要气候因子, 是流域分布式水文模型建立的关键变量之一。在许多区域, 人们能够直接观测到每日温度、降水、蒸发值, 其历史记录时间也很长。但是与这些指标相比, 由于仪器设备的费用、传感器的维修和校正等原因, 湿度是一个相对而言不能被经常测量的气象指标。MTCLIM 模型可以通过简便易得的温度和降水蒸发资料求得一个地区的逐日湿度和太阳辐射值。湿度估算是 MTCLIM 模型的重要组成部分, 它不仅对研究植被的蒸腾和光合作用至关重要, 也与 MTCLIM 模型中的逐日太阳辐射估算有关^[1]。本文在笔者前文研究^[1, 2]的基础上, 对 MTCLIM 模型的湿度估算方法在我国南方亚热带山地的有效性进行了验证。

1 MTCLIM 湿度子模型建立的理论基础

湿度的表示方法很多, 有水汽压、水汽压差、露

点、水汽密度、相对湿度等, 其中两个常用的指标为水汽压和露点。温度和气压一定时, 水汽压只随大气中水分含量的变化而变化。而露点在一天内是相对稳定的^[3~7]。MTCLIM 模型将水汽压和露点 (T_{dew}) 作为表示湿度的指标。

MTCLIM 模型是用 Murray 公式^[8]来估计空气中的水汽压, 公式中的参数是由纯水平面上的蒸发决定的, 分别为 17.38 和 239.0。因而, 估算水汽压的公式为

$$Es = 610.7 \exp[17.38 T_{\text{dew}} / (T_{\text{dew}} + 239.0)] \quad (1)$$

式中 T_{dew} 为露点温度。

前期 MTCLIM 模型对于湿度计算有三个假设: ①露点在一天内是稳定不变^[3~7]; ④在一天内的相对较大区域内, 露点在空间上是相对稳定的; ④夜间最低温近似于露点温度^[7]。

露点是指大气达到饱和时的温度, 夜间由于近地表面大气的辐射冷却, 气温与露点的差异不断减小, 降至露点时, 空气达到饱和。这时, 如果气温继续降低, 大气冷却, 水分丢失, 释放能量, 气温变化很

收稿日期(Received date): 2002- 12- 12; 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、人事部留学回国人员科技活动择优资助重点类别项目、中国科学院知识创新工程项目资助[Supported by the Frontier Project of Knowledge Innovation Program of IGSNRR, CAS(CX10G-E01-08-02), The Special Supporting Program for Excellent Scholars with Studying-abroad experiences, the China Ministry of Personnel(2002- 03), The knowledge Innovation Program of CAS(KZCX2- 407)]

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。[LI Hai-tao(1968-), male, Associate Professor, E-mail: haitao@public.hta.net.cn]

小,仍近似于露点。有研究表明,一天中露点是相对稳定的,而且在实际观测中也发现,夜间最低温度常近似于露点温度,气温的观测很常见,精度相对来说比露点的观测要高得多,因而, T_{\min} 常被视为 T_{dew} 的间接量度指标,即 $T_{\text{dew}} = T_{\min}$ 。但是 T_{dew} 和 T_{\min} 的关系是变化不断的,取决于具体研究区域的气候特点,在不同的气候条件下,露点温度与最低温度的关系不同。Friend(1996)发现,在欧洲和北美 T_n 能很有效地估算全球尺度的湿度,但在非洲有效性大大降低。在干旱区, T_{dew} 与 T_{\min} 差异大, T_{dew} 比 T_{\min} 小十几摄氏度,半干旱区稍有改善,但也相差 5 摄氏度左右,而湿润气候条件下, T_{dew} 可能 $> T_{\min}$, 有时还要 $< T_{\min}$, 但两者差异很小。两者温度的差异会导致饱和水汽压的差异,而且随着 T_{\min} 的增大, T_{dew} 与 T_{\min} 的差异较大,相应的水汽压也相差很大,降低了估算精度。这限制了最低温度的应用范围,但其他的气候信息如温度、降水可以弥补这个不足。Friend(1996)的研究表明,最低温与降水相结合考虑明显改善了全球尺度湿度的估算^[9]。因此, Kimball(1997)引入了露点订正方法对 MT-CLIM 模型进行了改进^[9]。

3 验证方法

用于验证湿度模型的有效性的数据为南昌、赣州、武汉、长沙 1998 和 1999 年的逐日数据^[2]。

本文中比较验证主要基于二类假设: 首先假设 $T_{\text{dew}} = T_{\min}$, 用最低温代入方程(1)中求出逐日水汽压; 其次假设 $T_{\text{dew}} \gg T_{\min}$, 先估算出各个站点的平均日净辐射, 再应用降水及其地理位置要素估算出逐日可能蒸散, 逐日可能蒸散与年降水量的比值是衡量一地相对干旱度的指数, 可以作为各研究点最低温与露点间关系的订正系数^[9]。这样, 即可以应用 Kimball 估算 T_{dew} 的经验公式估算各点的露点, 最后把估算得到的露点代入方程(1)估算出当日实际水汽压。进而比较基于这两类假设的两种估算水汽压的方法在本研究站点的优劣性。

RMSE 是模型有效性验证的一个很好的指标, 能确切反映模型模拟值与观测值的差异程度^[2, 10], 而且能够将模拟中出现的奇异值放大^[10]。本文主要讨论五个研究点共 14 a 的逐日水汽压实测值与模型预测值的 RMSE, 并用两者的回归方程来评估本研究区域基于最低温的湿度模型的有效性。

3.1 净辐射

所有波长的净辐射包括太阳辐射净辐射和热净辐射两部分。太阳辐射的电磁波谱在 0.3~3.0 μm 之间, 而热辐射波谱在 3.5~50 μm 之间。在林冠下, 热辐射是净辐射中的一个重要组成成分, 而太阳辐射在空地中是最主要的辐射量。热净辐射可用已知的地表温度估算, 但在大气天气站中一般不观察表面温度。因而, 我们忽略净热辐射量, 只考虑太阳辐射的影响。所以, 净辐射近似于净太阳辐射, 表示为

$$R_{n.s} = R_s(1.0 - \rho) \quad (2)$$

式中 $R_{n.s}$, R_s , ρ 分别为平均每日总净辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、太阳辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 和太阳反射率。文中假设 ρ 是常量, 为 0.2, 如果没有太阳辐射的观测值, 就用 Thorton 等(2000)的方法估算太阳辐射^[11]。

3.2 可能蒸散

可能蒸散是指在一地盛行的气候条件下水分充足时的最大可能蒸散量, 表明了该状况下空气的蒸发需求。Priestley-Taylor 公式相对较简单, 是 Penman-Monteith 方法的简化形式, 只用无量纲系数 α 来代表水在土壤-植物-大气系统中运动所遇到的气孔、土壤和大气动力学上的阻力, 能较准确地估计各地的蒸发潜力, 但没有考虑平流对辐射的影响^[12, 13]。而其它模型虽然能更准确、更全面地估计蒸散, 但大部分需要很多种类的数据, 不仅有气象数据, 还有一些植被指数等, 因而广泛分布的气象台站数据无法支持这类模型^[9]。逐日输入条件的限制要求大大简化模型, 反过来也需要输入数据的简化, 不能很准确地估计可能蒸散。因此, 平均每天蒸散量用 Priestley-Taylor 公式^[13]计算

$$E_p = \{ \alpha [\Delta / (\Delta + \gamma)] (R_{n.s} - G) \} / \lambda \quad (3)$$

式中 E_p —可能蒸散 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Δ —饱和水汽压随温度的变化率 ($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$)

γ —湿度表常数 ($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$)

G —土壤热通量, 一般为净辐射的 10% ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

λ —水蒸发潜热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

α —Priestley-Taylor 参数, 设为 1.26^[12]

日蒸散与多年平均降水量的比值(EF)计算公式如下

$$EF = [(E_p / \rho_w) t_{\text{day}}] / I_{\text{p.ann}} \quad (4)$$

式中 ρ_w —水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

t_{day} 一日长, 从日出到日落的时间, 可从站点纬度上估算出来; $l_{\text{p. ann}}$ 为多年平均降水量。

3.3 露点订正模型

由于早期 MTCLIM 模型露点近似等于日最低温的假设并非适用于所有气候条件, 两者较小的差异可能引起较大的水汽压差异, 这种差异随温度的升高而增大。为了更好地模拟各地露点与最低温的关系, Kimball 等(1997)建立了基于最低温(T_{min})和蒸发与降水的比值(EF)的多元线性回归方程来预测露点(T_{dew})^[9], 方程如下:

$$T_{\text{dew}} = T_{\text{min}}[-0.127 + 1.121(1.003 - 1.444EF + 12.312EF^2 - 32.766EF^3) + 0.0006(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})] \quad (5)$$

式中 $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ 为逐日温较差。

4 分析与讨论

湿度估算结果也是用模型预测值与实测值的线性回归分析来评估, 其回归结果和各统计变量分析见表 1。

表 1 各站点水汽压估算结果比较
Table 1 Predicted vs. observed water vapour pressure comparisons for modeled sites using regression analysis

站点	年份	e_{Td} vs e_o						e_{Tm} vs e_o					
		R^2 (%)	斜率	RES (kPa)	RES (kPa)	SEE (kPa)	RMSE (kPa)	R^2 (%)	斜率	RES (kPa)	RES (kPa)	SEE (kPa)	RMSE (kPa)
武汉	1998	94.7	0.917	-47.8	71.5	0.249	0.281	94.3	0.892	-69.2	83.3	0.266	0.326
	1999	95.9	0.94	-35.6	60.2	0.197	0.220	95.8	0.912	-57.6	70.0	0.208	0.261
	总体	95.2	0.927			0.201		94.9	0.902			0.206	
长沙	1998	94.2	0.957	-17.0	54.0	0.231	0.236	94.0	0.944	-25.7	55.4	0.239	0.249
	1999	97.2	1.007	0.4	40.3	0.149	0.148	96.9	0.991	-9.2	41.2	0.157	0.158
	总体	95.4	0.98			0.192		95	0.966			0.197	
南昌	1982	95.5	0.943	-7.97	51.93	0.191	0.192	95.4	0.998	-45.1	63.88	0.199	0.234
	1983	95.2	0.958	-38.6	62.03	0.208	0.234	94.0	0.943	-53.7	72.81	0.230	0.273
	1998	94.4	0.947	-38.8	65.8	0.230	0.253	93.6	0.935	-48.3	73.2	0.248	0.281
	1999	95.8	0.979	-19.0	55.6	0.192	0.198	95.3	0.969	-27.5	59.6	0.202	0.215
	总体	95.2	0.964			0.208		94.6	0.942			0.219	
赣州	1982	94.2	0.951	-35.9	61.34	0.206	0.229	94.2	0.934	-49.0	71.0	0.225	0.262
	1983	94.1	0.923	-58.6	75.38	0.245	0.293	93.2	0.907	-70.9	87.7	0.278	0.339
	1998	93.4	0.922	-56.5	74.0	0.251	0.295	91.8	0.885	-90.5	101.4	0.292	0.383
	1999	95.8	0.949	-46.2	60.4	0.175	0.216	94.8	0.926	-65.6	75.5	0.195	0.265
	总体	94	0.927			0.203		93	0.902			0.223	
韶关	1982	94.5	0.945	-43.7	64.19	0.208	0.240	93.7	0.924	-61.5	76.93	0.231	0.286
	1983	94.3	0.929	-61.3	76.66	0.221	0.278	93.8	0.917	-67.1	84.03	0.254	0.314
	总体	93.5	0.929			0.2		94.4	0.91			0.215	
全部总体		95.1	0.944			0.207		94.4	0.923			0.221	

注: e_o 为实测水汽压, e_{Td} 为模型估算水汽压, e_{Tm} 为用最低温代替露点计算的水汽压

各台站总共 5 097 个水汽压实测数据的回归分析表明, 应用露点订正模型估计的水汽压能解释该研究区域 95.1% 的水汽压变异, 实测水汽压一般也可表现出应用露点订正模型估计的水汽压的 94.4%。但用最低温估计的水汽压只能解释 94.4% 的变异, 实测水汽压可表现这个水汽压估计的 92.3%, 稍低于 Kimball 等(1999)在湿润亚热带气候区估计结果(93%)^[9]。而且, 用最低温估算水

汽压偏高了 7.7%, 而用露点订正模型预测值有 5.6% 偏高估计, 比前者改进了 2.1%, 这个研究结果与 Kimball 等(1999)在湿润亚热带区域研究结果(2%)^[9]非常相近。此外, 两者回归标准差也不同, 最低温估计的标准差为 0.221 kPa, 稍大于模型预测回归标准差(0.207 kPa)。这表明, 从整个研究区域数据回归分析来说, 露点订正模型的应用能稍稍改善该研究区域水汽压的估算结果。

同样,露点订正模型也适用于各单独台站的数据分析。各台站各年水汽压实测与预测回归相关系数(R^2)差异不大(图1a和c),但用露点模型预测的水汽压与实测值的 R^2 大于最低温估计的湿度与实测值的 R^2 ,更能说明各点水汽压的变异程度,而且前者的标准差都小于后者,其它的相关统计变量表现出一致的结果,尤以均方根差 $RMSE$ 表现突出(图1b和d)。与用最低温估计水汽压相比,进行露点订正后模型对水汽压的预测在大部分站点年份都有所改善:武汉1998年和1999年分别改进了2.5%和2.7%,两年总体估算改进了2.5%;长沙1998年为1.3%,但1999年前者过高估计了0.9%,后者则估计偏低了0.7%, SEE 、 RES 和 $RMSE$ 也都弱低于前者,两者很接近,而两年总体

估算结果为;南昌1983、1998和1999分别为1.5%、1.2%和1%,四年总体改进2%,标准差也降低了0.011kPa;赣州1982、1983、1998和1999年分别为1.7%、1.6%、3.7%和2.3%,四年总体结果为2.5%;韶关1982和1983年分别为2.1%和1.2%,两年总体为1.9%。但南昌1982年的逐日水汽压估算中,用露点模型估算的结果偏高程度比用最低温估算结果要大5.5%,其中前者只有94.3%的结果能在水汽压的实测值中得到反映,后者则有99.8%。不过,其它统计变量要优于后者。其中, RES 分别为-7.97 kPa和-45.1 kPa,为51.93 kPa和63.88 kPa, SEE 为0.191 kPa和0.199 kPa, $RMSE$ 为0.192 kPa和0.234 kPa,相比较而言,以 $RMSE$ 的差异最大。此外,从表中还可以发现,露点

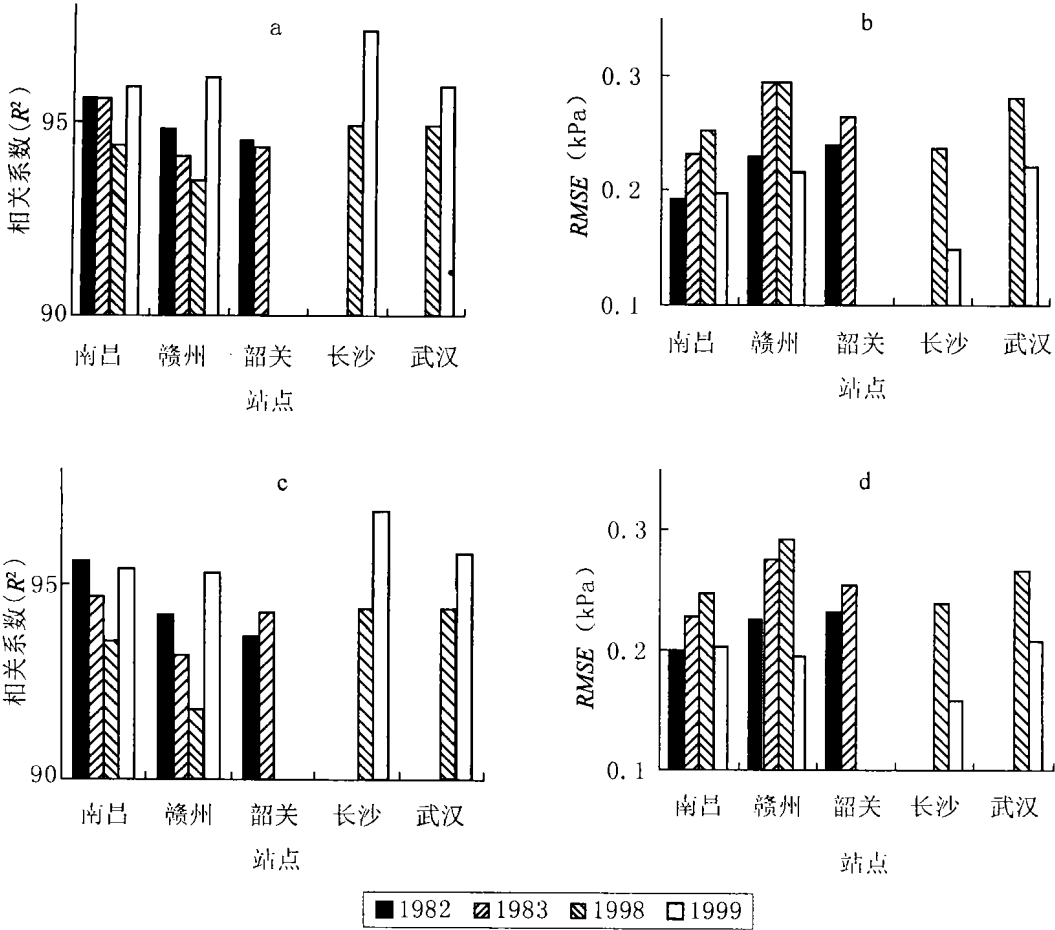


图1 各台站各年份逐日水汽压的统计结果图: a, b 分别为用露点模型估计的逐日水汽压与实测值的相关关系和 $RMSE$ 比较图; c, d 分别为用最低温估计的逐日水汽压与实测值的相关关系和 $RMSE$ 比较图
Fig. 1 The Statistic result of the predicted water vapour pressure in modeled sites: a and b are respectively the relation coefficient and $RMSE$ between the water vapour pressure observed and predicted by dew correction model, c and d are those by minimum temperature

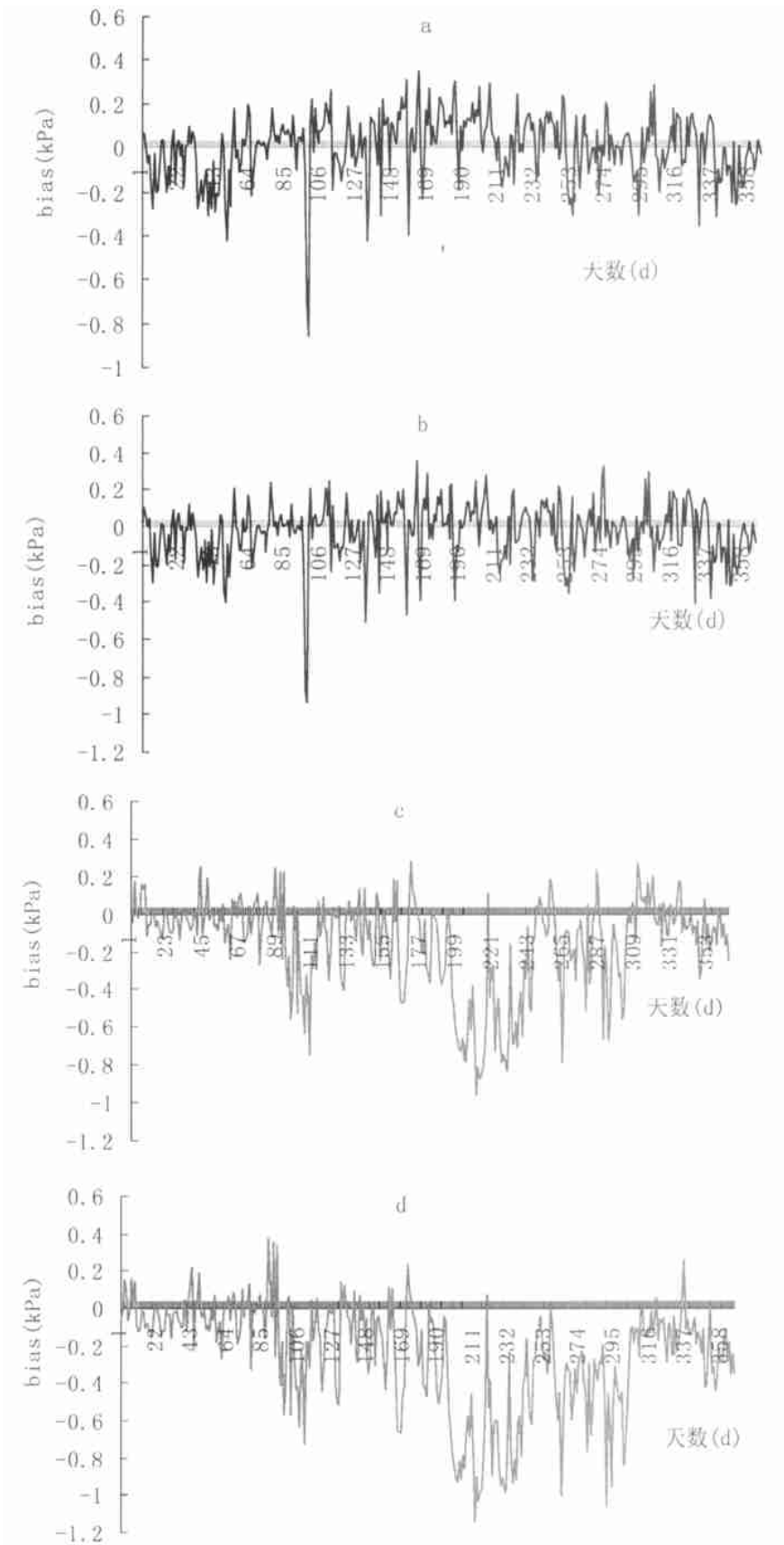


图 2 用露点模型和最低温估计长沙站 1999 年(a, b)和赣州 1998 年(c, d)逐日水汽压年变化趋势

Fig. 2 The seasonal changes of water vapour pressure: a and b show those in 1999 at Changsha station

by dew correction model and by minimum temperature respectively, c and d show those in 1998 at Ganzhou station

模型估计各站点各年的 RES 的绝对值与差异较大,本身的数值较小,而用最低温估计水汽压的 RES 的绝对值和差异较小,本身的数值较大,这说明前者在估计中对实测值有个不断偏高和偏低的剧烈变化过程,而后者只是较平缓的估计偏高过程,估计偏低的程度则很小。

虽然露点模型能普遍改善逐日水汽压的估算结果,但在不同站点不同年份间的表现不同。而且为了能更清楚地了解模型在一年中的表现过程,本研究中筛选了两年的逐日水汽压数据来分析其偏差的季节变化规律。一个是用露点模型估计结果与用最低温估计结果差异最小的长沙站 1999 年的逐日水汽压数据,两者估计的 $RMSE$ 差异最小,为 0.01 kPa,平均绝对误差 MAE 分别为 0.111 kPa 和 0.113 kPa;另一个为两者估计结果差异最大的赣州站 1998 年的逐日水汽压数据,其中两者 $RMSE$ 相差 0.088 kPa, MAE 分别为 0.203 kPa 和 0.278 kPa。

图 2 表明了两种水汽压估计方法的估计偏差年变化规律。从 a 和 b 中可以看出,两者的变化趋势和变化幅度相差不大,而且其估计的偏差几乎没有任何季节变化规律可言,只在 6、7 月份水汽压实测值高于预测值,这表明,最低温低于露点,但两者差异很小,这与 Kaufman(1984)在科罗拉多州对露点和最低温关系的研究结果一致。而且,该变化曲线只有一个较奇异的值,就该奇异值来说,露点模型估计并没有明显的改善结果,估计偏差只有稍稍地降低。而 c 和 d 表明,两者的变化趋势也类似,但对于估算的结果有较明显地改善,而且有明显地变化规律。在春、冬两季,最低温与露点非常接近,但还是稍高于露点,这时用露点模型可更好地估计水汽压,而夏、秋两季,逐日水汽压的实测值远低于预测值,这表明,该时期内露点低于最低温,属干旱季节,用露点模型能很好地改善逐日水汽压估算结果。虽然这与当地的多年平均气候变化不一致,而且与 1998 年的夏季大洪灾也不一致,但就当地此时的气候而言是相当一致的,因为 1998 年夏季赣州地区却发生了极其严重的旱灾。这表明,尽管用露点模型不能对湿润亚热带地区的逐日水汽压估计结果有较大幅度的改善,但可避免干旱发生时用最低温估计水汽压时发生的极大偏差。

5 结语

在研究区域内,两种方法对逐日水汽压的模拟

结果与实测值非常接近,用最低温估计的水汽压和用露点订正模型订正后的露点估计的水汽压与实测值之间的 MAE 分别为 0.221 kPa 和 0.207 kPa。露点模型能很好地说明干旱条件发生时水汽压的变化状况,赣州 1998 年发生干旱时,夏季最低温比露点要高得多,用露点模型估计的水汽压大大降低模型估计误差,两者的 MAE 分别为 0.203 kPa 和 0.278 kPa。

参考文献(References):

- [1] Li, H. T., Shen, W. Q., Sang, W. G. et al. Research Situation and Application of MTCLIM Model, *Journal of Mountain Science*, 2001, **19**(6): 533~ 540 (in Chinese). [李海涛, 沈文清, 桑卫国, 等. MTCLIM 模型的研究现状及其潜在应用[J]. 山地学报, 2001, **19**(6): 533~ 540]
- [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, *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(4) (in Chinese). [李海涛, 沈文清, 夏军. MTCLIM 模型系列研究报告(1): 的温度估算方法在中国亚热带山地的有效性验证[J]. 山地学报, 2003, **21**(4).]
- [3] McCutchan, M. H. 1977. Climatic features as a fire determinant. Gen. Tech. Rep. W-3, USDA Forest Service. 11.
- [4] Finklin, A. I. 1983. Climate of Priest River Experimental Forest, northern Idaho, Gen. Tech. Rep. INT-159. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 53.
- [5] Kaufmann, M. R. Effects of Weather and physiographic conditions on temperature and humidity in subalpine watersheds of the Fraser Experimental Forest. Res. Pap. RM-251. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 1984. 9.
- [6] Running, S. W.; Nemani, R.; Hungerford, R. D. Extrapolation of meteorological data in mountain terrain, and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. *Canadian Journal of Forest Research*. 1987, **17**: 472~ 483.
- [7] Glassy, J. M.; Running, S. W. Validating diurnal climatology logic of the MT-CLIM model across a climatic gradient in Oregon. *Ecol. Appl.* 1994, **4**(2): 248~ 679.
- [8] Murray, F. W. On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*. 1967, **6**: 203~ 204.
- [9] Kimball, J. S., Running, S. W., Nemani, R. R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. *Agri. For. Meteorol.* 1997, **85**: 87~ 98.
- [10] Reicosky, D. C., Winkelman, L. J., et al. Accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1989, **46**: 193~ 209.
- [11] Thornton, P. E., Hubert, Hasenauer, Michal, A. White. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex

- terrain in Austria. *Agri. For. Meteorol.* 2000, **104**: 255~ 271.
- [12] Monteith, J. L., Unsworth, M. H. Principles of environmental physics. EDWARD Arnold, London, England. 1990.
- [13] Priestley, C. H. B.; Taylor, R. J.. 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Wea. Rev.*, 100: 81~ 92.

The Validation of Humidity Estimate of Mountain Microclimate Simulation Model in China's Subtropical Mountainous Region

LI Haitao¹, SHEN Wen-qing², and XIA Jun¹

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

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

Abstract: Minimum daily air temperature is often used as a surrogate for mean daily dew point to estimate near-surface humidity. This method is questionable under arid conditions where nightly minimum temperatures may remain well above the dew point. An dew-point correction model was developed to improve the accuracy of humidity estimated using daily air temperature, annual precipitation and estimated daily potential evapotranspiration. Daily meteorological data from five sites in the subtropical region of southern China were evaluated for validation of the two humidity estimates of MTCLIM. The results showed that the dew-correction model generally reduced the humidity estimation errors on an annual basis within the investigated sites. The total 5 097 measured values were grouped for model validation. MAE(mean absolute error) for the two methods are 0.221 kPa and 0.207 kPa respectively. Especially, the dew-point correction model was quite effective in reducing large estimation errors during arid year.

Key words: MTCLIM model; humidity estimate; subtropical region