

# 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析

秦年秀, 陈 喜, 薛显武, 凌敏华, 张志才

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 利用贵州省 18 个气象站 1961~2001 年逐日气象资料, 采用 Penman-Monteith 方程计算潜在蒸散发量, 对以辐射和气温为基础的简化公式参数进行率定, 对比分析不同计算公式推求的潜在蒸散发量之间的差异以及用于气候变化情景下预测适用程度。结果表明, 各种潜在蒸散发公式经参数率定后计算的多年平均蒸散发量相近, 但变化趋势存在较大差异。与考虑综合气象因子对潜在蒸散发影响的 Penman-Monteith 公式计算结果相比, 以辐射为基础的蒸散发公式在该地区的适用性较好, 以气温为基础的蒸散发公式用于气候变化情景下潜在蒸散发量预测, 结果偏大。

**关键词:** 潜在蒸散发量 (ET); Penman-Monteith 公式; 温度估计法; 辐射能量法; 适用性; 贵州省

**中图分类号:** P332.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2010)03-0357-07

蒸散发量是能量平衡和水分平衡的主要组成部分, 准确地估算蒸散发量对全球气候变化背景下水文响应及水资源演变评估等具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。目前估算潜在蒸散发量的方法很多<sup>[5]</sup>, 可分为 5 种类型<sup>[6]</sup>: 彭曼蒙蒂斯组合法 (Penman-Monteith combination)、温度估计法 (temperature-based, 如 Thornthwaite 和 Blaney-Criddle 公式)、辐射能量法 (radiation-based, 如 Makkind 和 Priestley-Taylor 公式)、质量传导法 (mass-transfer)、水平衡法 (water budget method)。在估算潜在蒸散发的公式中, Penman-Monteith 公式反映气候要素的综合影响, 计算结果较为准确, 适用于不同气候类型区潜在蒸散发量计算及气候变化情景下水文水资源响应研究<sup>[7-9]</sup>, 但因所需气象资料多, 实际应用时受到限制。各种简化公式广泛应用于气候变化情景下水文响应及水资源演变趋势评估, 其中, Thornthwaite 公式因仅需气温资料, 计算简便, 应用最广泛<sup>[10-11]</sup>。针对这些简化公式应用的适应性, 国内外开展了大量的对比分析研究<sup>[7-8, 11-14]</sup>。总体来看, 各种潜在蒸散发公式在不同地区适用性存在差异, 用于不同地区参数需要重新率定, 且这些分析主要是根据历史观测资料进行适用性评估, 简化公式用于未来气候变化情景下蒸散发量预测的适用性分析还鲜见报道。本文应用贵州省实测气象资料, 比较了以气温为基础的 Thornthwaite 和 Blaney-Criddle 公式、以辐射为基础的 Makkind 和 Priestley-Taylor 公式计算潜在蒸散发量在该地区的适用性, 并分析气候变化情景下潜在蒸散发量预测的可靠性。

## 1 潜在蒸散发计算公式

### 1.1 气象数据及特征分析

采用中国气象局国家气象信息中心发布的均匀分布于贵州省的 18 个基本气象站点资料, 包括日照时数、最高和最低气温、平均气温、水汽压、气压、风速、相对湿度和 20 cm 蒸发皿蒸发量等逐日数据。根据资料连续性和一致性, 选用时段为 1961-01-01/2001-12-31。区域内年、月面平均值为各站点气象因子的算术平均值。统计贵州省主要气象因子年内变化 (表 1), 月均太阳净辐射和平均气温年内变化相似, 最高值出现在 7~8 月, 最低值出现在 1 月, 相对湿度和风速季节性变化大, 最大风速和最低相对湿度都出现在 3 月。本文趋势分析利用 Mann-Kendall (简称 M-K 法) 非参数检验方法进行检验<sup>[15]</sup>。

**收稿日期:** 2009-06-30

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2006CB403200); 教育部科学技术研究重大资助项目 (308012); 国家自然科学基金重点资助项目 (40930635)

**作者简介:** 秦年秀 (1976-), 女, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事气候变化与水循环研究。

E-mail: gxqnx@sohu.com



都非常敏感,其次是气温,风速变化对该地区潜在蒸散发量影响相对较弱。但近 40 年来该地区太阳净辐射显著减少而相对湿度没有表现出任何明显的趋势变化<sup>[21]</sup>,因此,太阳净辐射是影响该地区潜在蒸散发量最主要的因子。

## 2 潜在蒸散发公式参数率定及计算结果比较

### 2.1 Penman-Monteith 公式计算结果分析

用 P-M 公式计算的贵州省 1961~2001 年多年平均蒸散发量为 844.26 mm,根据该地区 20 cm 蒸发皿蒸发量以及不同口径蒸发皿转化为大水体的系数(20 cm 蒸发皿约为 0.7<sup>[22]</sup>),估算大水体蒸发量为 843.92 mm,两者误差仅为 -0.04%,相关系数达 0.92(图 2)。

### 2.2 参数率定及潜在蒸散发量比较

以 P-M 公式计算的潜在蒸散发量作为参照值,率定其它公式参数,并比较计算误差。Tho 和 B-C 公式参数采用逐月率定,P-T 和 Mak 公式逐站率定。B-C 公式中反应物影响的经验系数  $K$  平均值为 0.52,各站变化范围为 0.36~0.65;P-T 公式中  $\alpha$  平均值为 1.08,变化范围为 0.98~1.18;Mak 公式中  $\beta$  平均值为 0.69,变化范围为 0.62~0.74,  $\gamma$  平均值为 0.12,变化范围为 0.10~0.13。

各公式经参数率定后计算的年、月潜在蒸散发量分析表明(表 3 和图 3),多年平均值相近,相对误差在 0.04% 以下,但年代际差异较大。以辐射为基础的 P-T 和 Mak 公式以及 P-M 公式计算结果呈显著减少趋势,20 世纪 90 年代减少最为显著。由于太阳辐射是影响该地区潜在蒸散发量最敏感的因子,从 60 年代至 90 年代该地区太阳辐射一直呈显著减少趋势,90 年代减少最为明显。而以气温为基础的公式计算结果呈增加趋势,但增加不显著,这与气温从 60 年代至 90 年代呈明显增加趋势<sup>[21]</sup>、但气温变化对潜在蒸散发影响相对较弱一致。相关性分析进一步表明,以辐射为基础的 P-T 和 Mak 公式与 P-M 公式计算结果相关系数达 0.96 以上,以气温为基础的公式与 P-M 公式计算结果相关系数仅在 0.60 左右。可见,以辐射为基础的简化公式用于贵州省潜在蒸散发量计算具有较好的适用性。

表 3 各简化公式与 Penman-Monteith 公式计算的潜在蒸散发量结果比较

Table 3 Comparison of potential evapotranspiration estimated by Penman-Monteith and four empirical formulas

年代	潜在蒸散发量/mm				
	P-M	Tho	B-C	Mak	P-T
1960s	861.30	842.99	843.05	867.83	860.39
1970s	848.21	840.45	842.62	851.68	849.50
1980s	843.06	846.84	844.53	839.88	841.47
1990s	826.26	846.74	846.25	820.30	828.79
1961~2001年	844.26	844.32	844.16	844.32	844.64
相关系数	1	0.62	0.56	0.97	0.96
相对误差/%	0	0.007	0.011	0.008	0.045

注: 相对误差 =  $100(ET_{cal} - ET_{ref}) / ET_{ref}$

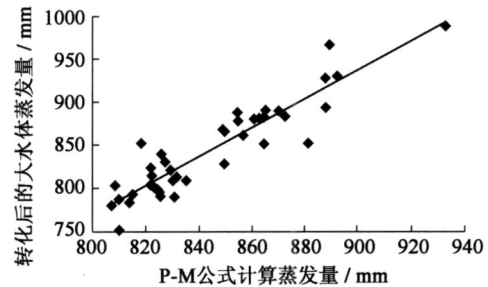


图 2  $ET_{ref}$  与大水体蒸发量的相关分析

Fig. 2 Correlation of estimated reference evapotranspiration ( $ET_{ref}$ ) by Penman-Monteith and large waterbodies

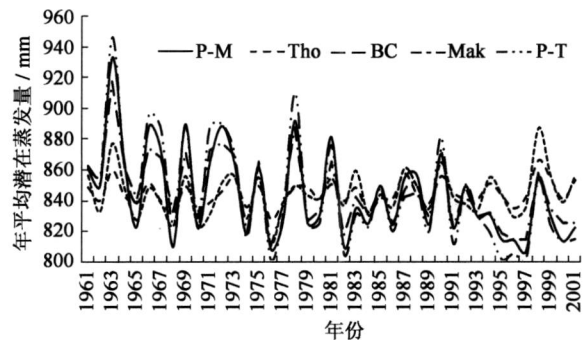


图 3 各种潜在蒸散发公式计算的年均值比较

Fig. 3 Annual mean potential evapotranspiration calculated by Penman-Monteith and four empirical formulas

### 3 未来气候变化对潜在蒸散发影响分析

#### 3.1 未来 100 年主要气象因子变化

贵州省大部分地区位于  $24^{\circ}73'N \sim 27^{\circ}50'N$  和  $101^{\circ}15'E \sim 108^{\circ}45'E$  之间。根据政府间气候变化组织 (IPCC) 第 4 次评估 (2007) 发布的 CGCM (T43 加拿大气候模式) 模式预测的未来气候情景 (SRA1B-(T47))<sup>[23]</sup>。贵州省未来 100 年气温、风速、相对湿度和净辐射变化趋势见图 4。气温无论年代还是年均变化均呈明显上升趋势, 上升速率为  $0.22^{\circ}C/(10a)$ , 在 21 世纪 30 年代初至 40 年代呈现减少, 在 2045 年左右表现出明显增加过程, 2046~2100 年平均气温为  $16.35^{\circ}C$ , 比 2001~2045 年增加  $1.23^{\circ}C$ 。净辐射呈下降趋势, 下降速率为每  $10a 7.76 MJ/m^2$ 。相对湿度和风速变化趋势不明显。未来 100 年气温、风速、相对湿度和净辐射 M-K 检验值分别为 7.88、-0.79、0.91 和 -1.36。因此, M-K 检验进一步表明气温升高和净辐射减少是影响未来潜在蒸散发量变化的主要原因。

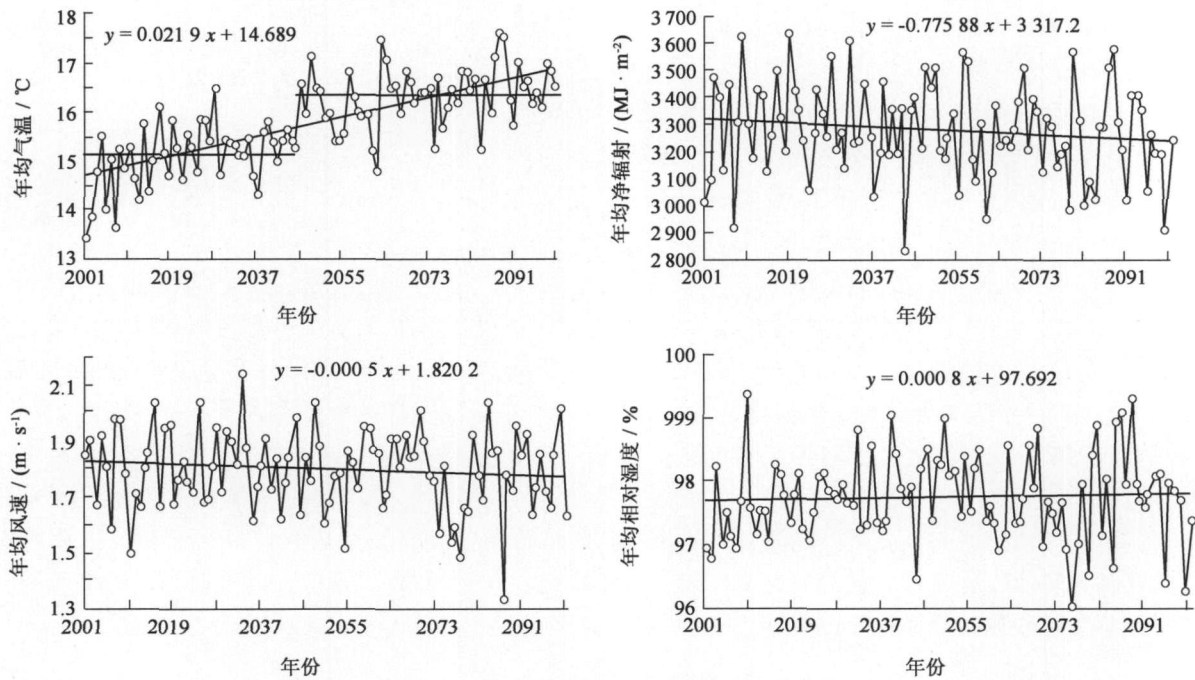


图 4 未来 100 年主要气象因子变化趋势

Fig. 4 Trends in annual values for the major meteorological variables in Guizhou province in future 100 years

#### 3.2 潜在蒸散发量计算结果分析

目前预测气候变化对水文水资源影响通常采用假设降水、气温等变化的情景分析法, 以及采用全球气候模式 (GCM) 预测结果。在 GCM 预测的气候变化因子中, 通常认为气温升高预测结果较为可靠。

为此, 本文先考虑未来气温升高情景下潜在蒸散发量的变化 (表 4)。在中国很多地区, 存在“蒸发悖论”现象, 即气温升高, 蒸发皿蒸发存在下降趋势<sup>[24]</sup>。未来气温升高情景下 5 种公式预测的潜在蒸散发量均呈增加趋势, 但增加速率不同。气温升高  $1 \sim 3^{\circ}C$ , P-M 公式计算结果增加最小, 仅为  $0.46\% \sim 2.6\%$ , 其次是 P-T、Mak 和 B-C 公式, Tho 公式计算结果增加最大, 达  $2.92\% \sim 21.16\%$ 。

未来气温升高情况下, 以辐射为基础的 P-T、Mak 公式预测结果与 P-M 公式结果较为接近; 以气温为基础的 B-C 和 Tho 公式预测结果明显偏大, Tho 公式结果偏大尤为显著。

基于 CGCM3 气候模式预测的未来气温、降水、风速、辐射、湿度等气象因子变化 (图 4), 采用 5 种公

式计算的未来 100 年贵州省潜在蒸散发量均呈增加趋势 (图 5),但以气温为基础的公式预测潜在蒸散发量增加趋势更为显著, MK 统计值分别为 8.46 和 7.99 (表 4)。受 2030 年左右气温显著下降影响 (图 5), 5 种公式预测结果在该时段显著减少。5 种公式预测的未来 100 年潜在蒸散发量多年平均值与 1961 ~ 2001 年同模式结果相比 (表 4), 以气温为基础的 Tho 和 B-C 公式计算的潜在蒸散发量分别增加 6.18% 和 2.18%, 以辐射为基础的 P-T 和 Mak 公式以及 P-M 公式计算的潜在蒸散发量分别减少 3.62%、3.33% 和 2.22%。

相关分析表明, 以辐射为基础的潜在蒸散发公式与 P-M 公式结果相关系数达 0.99 以上, 表明在缺乏相对湿度、风速等气象因子观测资料下, 以辐射为基础的潜在蒸散发量计算公式用于该地区潜在蒸散发量预测具有较好的适用性。

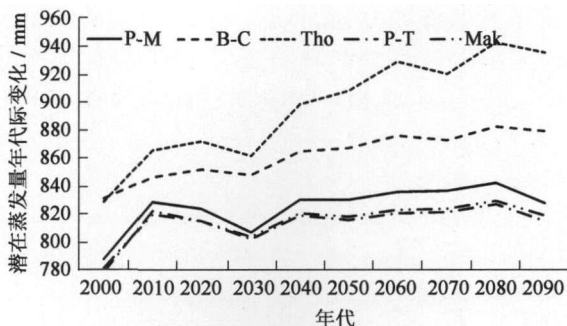


图 5 未来 100 年 (21 世纪) 5 种潜在蒸散发公式模拟结果比较

Fig. 5 Mean annual potential evapotranspiration computed

表 4 气候变化情景下各种公式预测的潜在蒸蒸发量变化

Table 4 Changes of potential evapotranspiration under future climate scenarios estimated by five formulas

潜在蒸散发公式	仅考虑气温升高情形下潜在蒸蒸发量的变化						CGCM3-SRAIB (T47) 模式下未来 100 年蒸散发量与 1961 ~ 2001 年同模式比较 (%)	M-K 值	相关系数
	0.5	1	1.5	2	2.5	3			
P-M	0.46 848.13	0.91 851.92	1.35 855.63	1.78 859.25	2.19 862.79	2.6 866.24	- 2.22	2.04	1
Tho	2.92 868.96	6.04 895.31	9.39 923.59	13 954.08	16.91 987.08	21.16 1022.95	6.18	8.46	0.67
B-C	1.44 856.3	2.88 868.44	4.31 880.58	5.75 892.72	7.19 904.86	8.63 917	2.18	7.99	0.68
Mak	0.91 851.97	1.8 859.52	2.68 866.97	3.55 874.32	4.41 881.57	5.26 888.72	- 3.33	1.78	0.99
P-T	0.68 850.36	1.38 855.95	2.02 861.41	2.66 866.74	3.27 871.94	3.87 877.01	- 3.62	1.38	0.99

注: 相对变化 =  $(ET_{\text{未来}} - ET_{1961-2001}) \times 100 / ET_{1961-2001}$ , 各公式结果与彭曼比较 (%) =  $(ET - ET_{\text{ref}}) \times 100 / ET_{\text{ref}}$ , 各模式中上一行为相对变化, 下一行为  $ET_{\text{未来}}$  值, M-K 计算方法详见文献 [9], 相关系数为各潜在蒸散发量公式计算的潜在蒸散发量分别与 P-M 公式计算相应值相关分析得出。

## 4 结 论

以 FAO 推荐的 P-M 公式作为参照标准, 比较了以气温和辐射为基础的 4 种潜在蒸散发公式对潜在蒸散发量模拟及预测的可靠性, 其结论如下:

(1) 以 P-M 公式计算结果为标准, 各简化公式经参数率定后计算的多年平均潜在蒸散发量较为接近, 但变化趋势差异较大。以辐射为基础的 Mak 和 P-T 公式比以气温为基础的 Tho 和 B-C 公式计算的潜在蒸散发量变化趋势可靠。

(2) 未来气候变化情景下, 各种蒸散发公式预测的潜在蒸散发量均呈增加趋势。以辐射为基础的蒸散发公式比以气温为基础的蒸散发公式预测的潜在蒸散发量的变化要小, 其中 Tho 公式预测的潜在蒸散发量显

著偏大。

(3) 利用气象因子进行潜在蒸散发量估算时, 综合考虑各种气象因子的 P-M 公式较好地反映气候变化对潜在蒸散发量的影响; 在缺少相对湿度和风速等气象因子观测资料时, 以辐射为基础的蒸散发公式比以气温为基础的蒸散发公式用于未来气候变化预测更为可靠。

致谢: 感谢 CSIRO Land and Water, Australia 傅国斌和 Stephen P. Charles 对英文摘要的修改。

#### 参考文献:

- [1] BRUTSANRTW, PARLANGEM B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396: 30-31.
- [2] RODERICKML, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298: 1410-1411.
- [3] OHMURA A, W LDM. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. Science, 2002, 298: 1345-1346.
- [4] CHATTIOPADHYAYN, HULMEM. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87: 55-72.
- [5] 杨永红, 张展羽. 改进 Hargreaves 方法计算拉萨参考作物蒸发蒸腾量 [J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 614-618. (YANG Yong-hong, ZHANG Zhan-yu. Method for calculating Lhasa reference crop evapotranspiration by modifying Hargreaves [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 614-618. (in Chinese))
- [6] 叶信富, 趁进发, 李振浩. 势能蒸散发经验公式之最佳化比较 [J]. 农业工程学报, 2005, 51(1): 27-37. (YE Xin-fu, CHEN Jin-fa, LI Zheng-gao. Optimum comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2005, 51(1): 27-37. (In Chinese))
- [7] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响 [J]. 水利学报, 2004, 35(2): 77-87. (LU Xiao-ying, LN Er-da. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 77-87. (in Chinese))
- [8] 杨贵羽, 王知生, 王浩, 等. 海河流域  $ET_0$  演变规律及灵敏度分析 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 409-415. (YANG Gui-yu, WANG Zhi-sheng, WANG Hao, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity an analysis in Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 409-415. (in Chinese))
- [9] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化 [J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 159-167. (JIA Wen-xiong, HE Yuan-qing, WANG Xu-feng, et al. Temporal and spatial change of the potential evaporation over Qilian mountains and Hexi corridor from 1960 to 2006 [J]. Advance in Water Science, 2009, 20(2): 159-167. (in Chinese))
- [10] 高彦春, 于静洁, 刘昌明. 气候变化对华北地区水资源供需影响的模拟预测 [J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 616-624. (GAO Yan-chun, YU Jing-jie, LU Chang-ming. A simulated prediction of impacts of climate change on water supply and demand in the North-China-region [J]. Process in Geography, 2002, 21(6): 616-624. (in Chinese))
- [11] XU Chong-yu, SNGH V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions [J]. Journal of Hydrology, 2005, 308: 105-121.
- [12] COHEN S, STANHLL G. Evaporative climate changes at Bet-Dagun. Israel, 1964-1998 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 83-91.
- [13] BEYAZGUL M, KAYAMA Y, Engelsman F. Estimation methods for crop water requirements in the Gediz Basin of western Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229: 19-26.
- [14] 曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 1960-2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 311-318. (ZENG Yan, QIU Xin-fa, LU Chang-ming, et al. Changes of pan evaporation in China in 1960-2000 [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 311-318. (in Chinese))
- [15] THOMAS A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20: 381-396.
- [16] THORNTHWALTE CW. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical review, 1948, 38: 55-94.
- [17] BLANEY H F, CRIDDLEW D. Determining water requirements in irrigated areas from climatologically irrigation data [R]. Washington DC: US Department of Agriculture, Soil conservation Service, 1950: 48.

