



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.001

李天生, 夏军, 匡洋, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在汉江流域中上游地区的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 01-10. LI T S, XIA J, KUANG Y, et al. The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the middle and upper reaches of Hanjiang River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 01-10. (in Chinese)

不同潜在蒸散发估算方法在 汉江流域中上游地区的适用性研究

李天生¹, 夏军¹, 匡洋², 余敦先¹, 余江游¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 长江水利委员会 长江科学院, 武汉 430072)

摘要: 蒸散发是流域能量循环和水文循环的重要变量, 准确估算蒸散发具有重要的现实意义。FAO56 Penman Monteith 方法计算潜在蒸散发量时气象资料往往不易满足, 同时, 在提出形式简单且满足精度要求的其它估算方法时, 缺乏足够全面的适用性分析。针对上述问题, 基于汉江流域中上游地区 12 个气象站点 1961-2013 年的逐日气象资料, 以 FAO56 Penman Monteith 方法估算的潜在蒸散发量作为参考标准, 分别从不同的时间尺度和空间尺度对比分析了 1 种综合类方法、2 种辐射类方法和 3 种温度类方法在汉江流域的适用性。结果表明, 辐射类方法适用性最好, 综合类方法次之, 温度类方法适用性较差。其中 Makkink 方法和 Priestley Taylor 方法在研究区的适用性最好, 计算精度高, McCloud 方法在研究区的适用性最差, 误差较大。

关键词: 潜在蒸散发; 综合法; 辐射法; 温度法; 汉江中上游

中图分类号: P426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0001-10

The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the middle and upper reaches of Hanjiang River Basin

LI Tiansheng¹, XIA Jun¹, KUANG Yang², SHE Dunxian¹, YU Jiangyou¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430072, China)

Abstract: As the potential evapotranspiration (PET) is one of the important factors in the energy cycle and hydrological cycle, the accurate estimation of PET has important practical significance. The FAO56-PM method can give efficient estimation of PET; however, its applicability is constrained as it requires a large amount of data. Different PET estimation methods have been proposed and the applicability of these methods should be tested before they are applied in a typical region. In this study, we attempted to examine the efficiency of 7 PET estimation methods in spatial and temporal dimensions in the upper and middle reaches of Hanjiang River Basin using the daily meteorological data during 1961-2013. The results showed that the radiation based methods were the optimal choice, followed by the combination method, and the temperature based methods were the least suitable choice for the PET estimation in the study area. Among these estimation methods, the Makkink method and the Priestley Taylor method showed the best applicability and highest precision in the study area, while the McCloud method showed the worst applicability and largest error.

Key words: potential evapotranspiration; combination method; radiation based method; temperature based method; the middle and upper reaches of Hanjiang River

收稿日期: 2017-01-01 修回日期: 2017-07-17 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1040.021.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571028)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41571028)

作者简介: 李天生(1994), 男, 甘肃白银人, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: 460146588@qq.com

通讯作者: 夏军(1954), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 长期从事水文学及水资源方面研究。E-mail: xiaj@ig

snr.ac.cn

蒸发是水文循环和地表能量循环的重要环节,是地表植物赖以生存的生理过程,同时蒸发也是地球表面物质能量循环的重要载体。准确测定和估算蒸散发,不仅对于研究全球气候变化和水资源评价等方面具有重要意义,而且对于农作物需水生产管理、旱情监测预报、水资源有效开发利用等方面具有十分重要的应用价值^[1]。由于实际蒸散发(AET 直接观测较为困难,而潜在蒸散发量(PET))更易获得,通常利用潜在蒸散发量(PET)来计算实际蒸散发量(AET),所以对潜在蒸散发的研究具有重要意义。

常用的潜在蒸散发量的估算方法大致可以分为五种类型:综合法、温度法、辐射法、水量平衡法和质量传导法^[2]。其中,基于能量平衡和水汽扩散理论的 FAO56 Penmar Monteith 方法,既考虑了作物的生理特征,又涉及空气动力学参数的变化,具有充分的理论基础和较高的精度,在 1998 年被世界粮农组织(FAO)推荐为计算参考作物蒸散量的标准方法^[3]。徐俊增等^[4]研究表明,FAO56 Penmar Monteith 方法在我国东部湿润地区最适用于作为评价其它 PET 计算方法的标准。但由于该方法需要的气象资料较多,很大程度上限制了其应用,因此国内外都在研究发展简单且精度满足要求的潜在蒸散发量估算方法,如辐射类方法 Makkink 法和 Priestley Taylor 法;温度类方法 McCloud 法、Hargreaves 法、Hamon 法和 Thornthwaite 法;综合类方法 Turc 法、Irmak-Allen 法等。然而,这些潜在蒸散发量计算方法是在特定区域的试验基础上建立的,有其隐含的适用性^[5],不同的估算方法在特定的气候条件下、具有很强的地区差异性,计算结果会有较大的差异^[6-8]。我国潜在蒸散发量的估算方法大多都是从国外引进,研究分析各种估算方法在我国的适用性显得尤为重要,已有学者针对这方面的问题开展了相关的工作,例如:许崇育等^[9]通过比较 8 种潜在蒸散发估算方法,认为 Makkink 方法和 Priestley Taylor 方法有较好的估算效果;杜加强等^[7]在不同时间尺度上探讨了 11 种潜在蒸散发估算方法在黄河流域中上游的适用性;鞠彬等^[10]通过比较 7 种潜在蒸散发估算方法与水面蒸发结果,探讨各种估算方法在新疆额尔齐斯河流域的适用性;左德鹏等^[11]分析比较了基于辐射的 8 种潜在蒸散发估算方法在不同气候区点尺度上的空间适用性,给出了适用于我国不同气候区的最优估算方法;赵玲玲等^[1]在流域尺度上比较分析了 6 种基于能量的潜在蒸散发估算方法在海河流域的适用性。综合来看,从不同时间尺度和空间尺度,综合对 PET 估

算方法在典型站点和全流域的适用性分析方面,目前还比较欠缺。

针对以上问题,本文依据汉江流域中上游地区 12 个气象站点 1961-2013 年的气象观测资料,应用 FAO56 Penmar Monteith 方法(P-M)、Irmak-Allen 方法(I-A)、Priestley-Taylor 方法(P-T)、Makkink 方法(Mak)、McCloud 方法(M-C)、Hargreaves 方法(Har)和 Hamon 方法(Ham)共 7 种不同的蒸散发估算方法计算了研究区域的潜在蒸散发量,并以 P-M 方法的估算量为基准,从潜在蒸散发年内月变化、年内四季变化、年际变化以及多年均值空间分布四个方面分析了其它 6 种估算方法在汉江流域中上游地区的适用性,以期为研究区域潜在蒸散发估算方法的选取提供一定的科学依据和参考。

1 研究区概况及数据资料

汉江是长江最长的支流,发源于秦岭南麓,干流流经陕西、湖北两省,在武汉市汉口龙王庙汇入长江。丹江口水库以上区域为汉江流域中上游地区,流域控制面积为 25 691 km²^[12]。该区域气候属北亚热带边缘湿润季风气候,同时兼有暖温带和中温带山地气候的特征,雨量较充沛,气候温和,四季分明,多年平均气温约为 14.6 ℃,多年平均降水量在 700~1 800 mm 之间。近 50 年来,汉江上游夏季气温有明显的下降趋势,中游气温除夏季外都有明显的上升趋势,中上游冬季气温都有明显的上升趋势^[13]。由于气候变化的影响,近几十年来汉江流域接连发生干旱,加之南水北调中线工程的运行,对该流域的水资源规划配置、流域生态环境以及下游地区流量补给提出了重大挑战。

本文选取汉江流域中上游地区栾川、略阳、汉中之、佛坪、商州、镇安、西峡、石泉、万源、安康、房县和老河口总共 12 个气象站点的气象数据进行分析研究,站点的分布如图 1 所示。所使用的气象资料为中国气象局数据共享服务网^[14]下载的 1961-2013 年共 53 年的逐日实测气象数据资料,包括日平均气温(℃)、日最低气温(℃)、日最高气温(℃)、平均气压(Pa)、日照时数(h)、平均风速(m/s)以及平均相对湿度(%)。

2 研究方法

2.1 潜在蒸散发量估算方法

本文选取了较为通用且具有代表性的 7 种潜在蒸散发量计算方法,其中包括两种综合类估算方法(P-M、I-A)、两种基于辐射的估算方法(Mak、P-T)

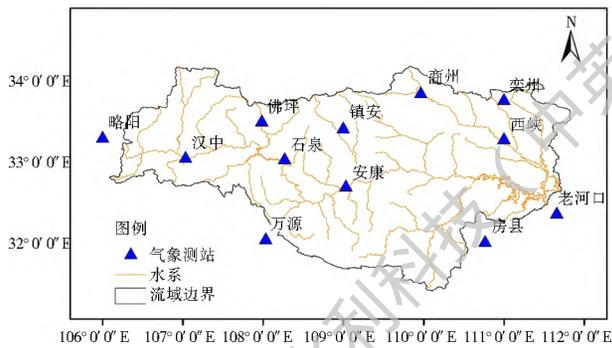


图1 汉江中上游气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the middle and upper reaches of Hanjiang River Basin

以及三种基于温度的估算方法(Ham、M-C、Har)进行比较分析。上述方法的计算过程介绍如下。

(1) FAO56 Penmar Monteith 方法(P-M)。该方法是联合国粮农组织(FAO)推荐的潜在蒸散发标准估算方法^[15-16],该公式以能量平衡和空气动力学原理为基础,具有较完备的理论依据,在众多估算潜在蒸散发公式中具有较高的精度和适用性,也是目前应用最为广泛的方法之一,其公式为:

$$E_p = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34) U_2} \quad (1)$$

式中: E_p 为潜在蒸散发量(mm/d); G 为土壤热通量密度[MJ/(m²·d)]; R_n 为作物表面的净辐射[MJ/(m²·d)]; γ 为干湿比常数(kPa/°C); T 为2 m高处的日平均气温(°C); e_s 是饱和水气压(kPa); e_a 为实际水气压(kPa); Δ 是温度饱和水气压关系曲线 T 处的斜率(kPa/°C); U_2 为2 m高处风速(m/s); 其中 G 值较小,在计算过程中忽略不计。

(2) Irmak-Allen 方法(I-A)。该方法根据美国湿润地区的数据,在 P-M 方法的基础上推导得出,其计算公式^[17-18]如下:

$$E_p = 0.489 + 0.28R_n + 0.023T \quad (2)$$

(3) Priestley-Taylor 方法(P-T)。该方法是在无平流假设下提出的,适用于较湿润的地区,近年来得到了广泛的应用,其计算公式^[19-20]如下:

$$E_p = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (3)$$

式中: α 是经验系数,假设无平流的条件下 Priestley 和 Taylor 推荐取 1.26; λ 是汽化潜热,取值 2 45 MJ/kg。

(4) Makkink 方法(Mak)。Mak 是一种基于辐射的估算方法,该方法是在荷兰提出的,其最大的特点是用入射短波太阳辐射代替了净辐射平衡^[21-22]。计算公式如下:

$$E_p = 0.61 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (4)$$

$$R_s = (a + b \frac{n}{N}) R_a \quad (5)$$

$$R_a = 37.6 d_r (W_s \sin \varphi \sin \delta + W_s \cos \varphi \cos \delta) \quad (6)$$

式中: R_s 表示入射短波太阳辐射[MJ/(m²·d)]; R_a 表示大气边缘太阳辐射[MJ/(m²·d)]; W_s 为日照时数角(rad); φ 为地理纬度(rad); δ 为日倾角(rad)。

(5) McCloud 方法(M-C)。该方法形式简单,只有温度 T 一个输入变量,在气象资料相对匮乏的区域应用较广,但模拟精度相对较差,计算公式^[23-24]如下:

$$E_p = K \cdot W^{1.87} \quad (7)$$

式中: K 、 W 均为经验系数,根据文献[25],分别取经验值 0.254 和 1.07。

(6) Hargreaves 方法(Har)。该方法是 Hargreaves 和 Samina 自 20 世纪 50-60 年代以来逐步提出并不断改进的一个气候学公式,由于对气象资料要求较低,在基于温度的估算方法中具有一定优势,近年来得到了广泛的应用,计算公式^[26-27]如下:

$$E_p = 0.0023 \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} (T + 17.8) \frac{R_a}{\gamma} \quad (8)$$

式中: T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示日最高气温和日最低气温(°C)。

(7) Hamon 方法(Ham)。该方法将气温作为潜在蒸散发主要驱动力,模型原理是在林地背景下提出的,为估算林地的潜在蒸散发量提供了很好的途径,计算公式^[28-29]如下:

$$E_p = k \cdot N \cdot P_t \quad (9)$$

$$P_t = 216.7 \times \frac{0.6108 e^{\left(\frac{17.77T}{T+273.3}\right)}}{T+273.3} \quad (10)$$

式中: P_t 表示饱和水汽密度(g/m³); k 为经验系数,选用文献[27]推荐值 0.84。

2.2 评价指标

为了客观的评价分析结果,采用平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和相关系数(R) 3 种评价指标来评价其他 6 种估算方法和 P-M 法的相关性和结果误差, R 越接近 1, MAE 和 MRE 越接近于 0,表明计算结果和标准结果差异越小。各评价指标计算公式如下:

$$\delta_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A E_i - E_i| \quad (11)$$

$$\delta_{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A E_i - E_i|}{E_i} \times 100\% \quad (12)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (AE_i - \overline{AE})(E_i - E)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (AE_i - \overline{AE})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - E)^2}} \quad (13)$$

式中: δ_{MAE} 、 δ_{MRE} 分别为平均绝对误差和平均相对误差; n 为计算变量个数; AE_i 为检验潜在蒸散发量; E_i 为参照潜在蒸散发量即 P-M 计算结果; \overline{AE} 为检验潜在蒸散发量的平均值; E 为参照潜在蒸散发量 (P-M 计算结果) 平均值。

为全面地分析各种估算方法在研究区域的适用性, 分别从点尺度和流域尺度两个方面来分析。点尺度分析中, 选取典型气象站点, 分别针对潜在蒸散发量月均值、季节均值、年值三个不同的时间尺度进行分析。流域尺度分析中, 首先利用 ArcGIS 将各种估算方法得到的潜在蒸散发量的多年平均值插值到全流域, 再分析各类计算方法相较于 P-M 插值结果的差异以及研究区域潜在蒸散发量的空间分布。

3 结果与讨论

3.1 点尺度估算方法对比

在汉江流域中上游地区的 12 个气象站点中, 选取 4 个全面典型地反映汉江流域中上游不同地区潜在蒸散发量变化过程的代表站点 (略阳、安康、商州和西峡) 为分析对象, 分别从月均值变化过程、季节均值变化过程和年际过程四个方面, 以 P-M 法计算结果为参考标准, 对其它 6 种估算方法的适用性进行了分析比较。

3.1.1 月变化过程

6 种估算方法与 P-M 法在四个代表站点估算的多年月平均潜在蒸散发量 (PET) 的误差分析结果如表 1 所示, 其过程变化对比图如图 2 所示。

表 1 6 种估算方法与 P-M 法估算月均值 PET 的结果分析

Tab. 1 The comparison of monthly mean PET estimated by the P-M method and the other six methods

站点	计算方法	MAE/mm	MRE (%)	R	站点	计算方法	MAE/mm	MRE (%)	R
略阳	PT	9.69	13.44	0.99	商州	PT	10.18	15.82	0.99
	Mak	13.95	18.71	0.99		Mak	15.47	18.60	0.99
	MC	23.80	37.51	0.89		MC	30.42	44.45	0.90
	Ham	15.72	27.43	0.93		Ham	26.62	34.21	0.90
	Har	14.43	15.38	0.99		Har	10.54	12.45	0.99
	IA	14.58	24.58	0.99		IA	9.25	13.17	0.99
安康	PT	14.39	18.21	0.99	西峡	PT	9.20	13.67	0.99
	Mak	12.01	13.54	0.99		Mak	17.10	19.64	0.99
	MC	31.42	39.16	0.93		MC	34.71	44.62	0.91
	Ham	24.57	29.60	0.98		Ham	28.11	32.12	0.94
	Har	9.96	10.72	0.99		Har	9.57	9.39	0.99
	IA	17.82	33.61	0.99		IA	10.87	15.85	0.99

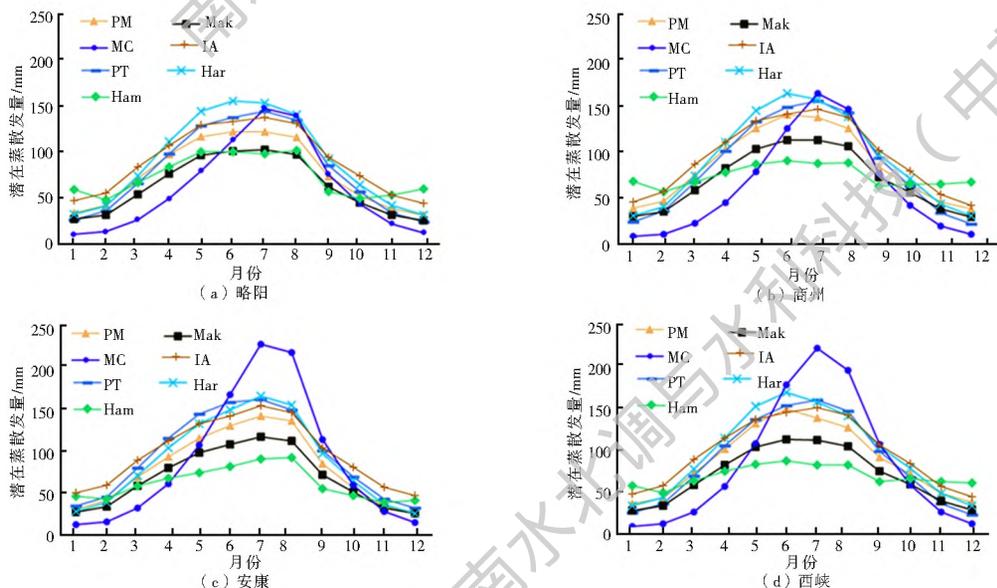


图 2 P-M 法与 6 种估算方法估算 PET 的多年月平均变化比较

Fig. 2 The comparison of multi year average PET by month estimated by the P-M method and the other six methods

由表 1 可知, 温度法中 M-C 方法和 Ham 方法与 P-M 计算结果的相关系数(R) 在 4 个站点都低于 0.99, 相关性明显低于其它计算方法, 与此同时, M-C 方法和 Ham 方法的平均相对误差(MRE) 和平均绝对误差(MAE) 都高于其它方法计算结果。就 FA 方法而言, 虽然在 4 个典型站点的相关系数都为 0.99, 但在略阳、商州和西峡 3 个典型站点的平均相对误差(MRE) 都大于 24%。由图 2 可得, M-C 方法计算结果在 1 月- 5 月和 10 月- 12 月低于 P-T 方法计算结果, 而在 6 月- 9 月计算结果高于 P-T 方法计算结果。同样, Ham 法也在 1 月和 12 月计算结果高于 P-M 法计算结果, 其它月份低于 P-M 法计算结果。结合图 2 可以看出, 综合类方法中的 FA 法与 P-M 法的变化过程吻合度很高, 相关系数(R) 均为 0.99, 但平均相对误差(MRE) 较大; 辐射

法 Mak 和 P-T 变化趋势和 P-M 法保持一致, 平均相对误差都在 10%~ 20% 之间, 整体估算结果要优于温度法 Ham 和 M-C 方法。综合来看, 6 种估算方法中, 综合法 FA 和 P-M 的吻合度很高, 辐射法整体优于温度法, 温度法 Har 由于考虑了除温度以外的大气边缘太阳辐射, 其计算结果明显较好。

3.1.2 季节变化过程

汉江中上游流域属于亚热带季风气候, 根据我国气象部门对季节的划分, 以公历 3 月- 5 月为春季, 6 月- 8 月为夏季, 9 月- 11 月为秋季, 12 月至来年 2 月为冬季。6 种潜在蒸散发量估算方法的季节值计算结果和 P-M 季节值计算结果的误差和相关性分析见表 2, P-M 法与其他 6 种估算方法估算潜在蒸散发量(PET) 的多年季节平均的比较分析见图 3。

表 2 6 种估算方法与 P-M 法估算季节 PET 值的结果分析

Tab. 2 Analysis of the results of seasonal PET estimated by the P-M method and the other six methods

季节	站点	指标	PT	Mak	MC	Ham	Har	IA
春季	略阳	MAE/mm	11.53	58.27	129.54	35.73	45.01	34.93
		MRE(%)	4.10	20.41	45.23	13.02	15.93	12.62
		R	0.87	0.92	0.66	0.89	0.69	0.87
	商州	MAE/mm	12.33	59.50	156.68	71.53	26.99	29.09
		MRE(%)	4.03	19.54	51.67	23.90	9.18	10.15
		R	0.85	0.90	0.80	0.86	0.87	0.82
	安康	MAE/mm	29.59	41.29	77.98	77.14	61.29	56.40
		MRE(%)	10.86	14.87	27.96	28.25	22.47	20.78
		R	0.92	0.95	0.77	0.92	0.83	0.91
	西峡	MAE/mm	16.53	59.29	111.06	81.21	38.39	37.78
		MRE(%)	5.60	19.29	36.67	26.90	13.19	13.26
		R	0.90	0.94	0.87	0.89	0.96	0.86
夏季	略阳	MAE/mm	56.83	59.54	41.58	60.34	90.16	42.29
		MRE(%)	15.90	121.40	11.80	17.30	25.15	12.07
		R	0.93	0.95	0.63	0.93	0.61	0.92
	商州	MAE/mm	43.39	71.95	32.59	137.10	54.09	26.52
		MRE(%)	11.07	17.77	8.27	34.38	13.99	6.88
		R	0.91	0.94	0.81	0.92	0.79	0.90
	安康	MAE/mm	61.06	70.05	204.38	143.57	60.77	35.10
		MRE(%)	15.27	17.11	50.30	35.61	15.43	9.01
		R	0.94	0.96	0.84	0.95	0.91	0.93
	西峡	MAE/mm	43.30	83.13	174.87	158.99	50.66	23.28
		MRE(%)	10.76	20.29	42.83	39.14	12.67	5.93
		R	0.93	0.96	0.81	0.94	0.93	0.91
秋季	略阳	MAE/mm	12.46	25.71	22.64	25.99	34.96	58.13
		MRE(%)	7.73	15.74	16.66	16.02	21.36	35.89
		R	0.90	0.92	0.45	0.89	0.78	0.89

表 2 6 种估算方法与 P-M 法估算季节 PET 值的结果分析

Tab. 2 Analysis of the results of seasonal PET estimated by the P-M method and the other six methods

(续表)

季节	站点	指标	PT	Mak	MC	Ham	Har	IA
秋季	商州	MAE/mm	9.93	25.60	53.97	15.49	20.12	41.39
		MRE(%)	5.04	13.17	27.56	8.21	10.85	22.50
		R	0.84	0.91	0.54	0.88	0.83	0.83
	安康	MAE/mm	22.47	20.22	25.85	34.72	37.75	66.69
		MRE(%)	13.17	11.60	15.14	20.81	21.96	39.00
		R	0.94	0.93	0.74	0.86	0.87	0.93
西峡	MAE/mm	11.76	37.53	22.96	21.10	19.51	34.54	
	MRE(%)	5.27	17.63	10.49	10.50	9.56	17.20	
	R	0.84	0.90	0.45	0.91	0.94	0.83	
冬季	略阳	MAE/mm	21.52	23.91	68.01	60.29	5.75	39.77
		MRE(%)	19.51	22.09	62.63	54.64	5.27	37.54
		R	0.70	0.81	0.52	0.78	0.73	0.69
	商州	MAE/mm	41.46	28.65	93.73	68.72	21.53	21.88
		MRE(%)	32.79	22.88	75.41	55.31	17.02	18.77
		R	0.60	0.83	0.58	0.75	0.79	0.49
安康	MAE/mm	7.96	13.28	55.83	33.90	13.44	57.50	
	MRE(%)	7.74	13.33	55.99	33.55	13.97	58.98	
	R	0.59	0.68	0.36	0.65	0.56	0.61	
西峡	MAE/mm	31.63	25.24	80.79	49.66	8.97	33.71	
	MRE(%)	25.39	20.74	67.34	41.31	7.13	30.12	
	R	0.65	0.88	0.64	0.84	0.87	0.55	

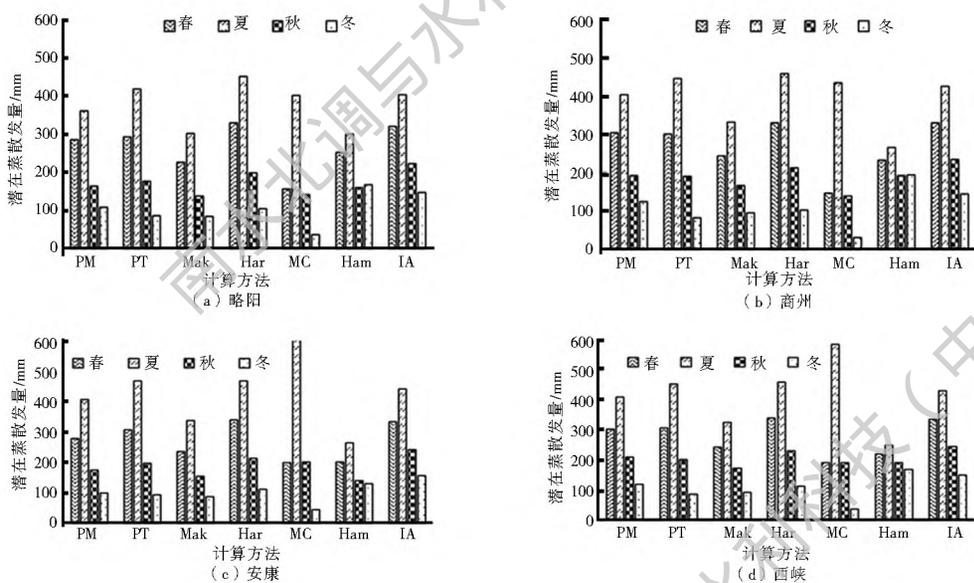


图 3 P-M 法与 6 种估算方法估算 PET 的多年季节平均比较

Fig. 3 The comparison of multi-year average PET by season estimated by the P-M method and the other six methods

由表 2 的误差分析结果, 温度法中的 M-C 方法平均相对误差(MRE)在 4 个站点的春季和冬季相对较高, 在夏秋两季误差相对较小, 该方法估算结果与 P-M 估算结果的相关系数(R)整体相对其他方法较低, 结合图 3 和 M-C 方法的计算公式, 该方法只有平均温度(T)一个变量, 过度依赖温度导

致其在夏季的蒸发量很大, 在冬季的蒸发量很小, 在温度随季节变化明显的汉江中下游地区适用性较差。整体来看, 研究区域的潜在蒸散发量变化有很强的季节性, 季节潜在蒸散发量从大到小依次为夏、春、秋、冬, 夏春两季的蒸发量可以占到全年蒸发量的 2/3 左右。辐射法 PT 和 P-M 计算结

果趋势变化吻合度很高,但在冬季平均相对误差较大;整体来看,辐射法的计算结果整体要优于综合法和温度法。

3.1.3 年际过程

6种潜在蒸散发量估算方法的年值计算结果和P-M年值计算结果的误差分析结果见表3,P-M法与其他6种估算方法估算潜在蒸散发量(PET)的年际变化过程比较如图4所示。由表3和图4可以看出,综合法FA计算结果明显的高估了潜在蒸散发量值,相关系数(R)都在0.8以上,和P-M的计算结

果变化过程吻合度较高。辐射法中P-T存在高估现象,而Mak法存在着低估现象,两种方法的相关系数(R)都在0.83以上,平均相对误差(MRE)低于20%,计算结果较好。温度法中,M-C方法计算结果较差,在略阳、西峡和商州三个站点低估潜在蒸散发量值,在安康站存在高估现象,四个站点的相关系数(R)都较低;Ham法和Har法计算结果相对较好。综合来看,综合法FA虽然和P-M法的变化过程吻合度较高,但相对误差较大,辐射法计算结果整体较好,温度法计算结果较差。

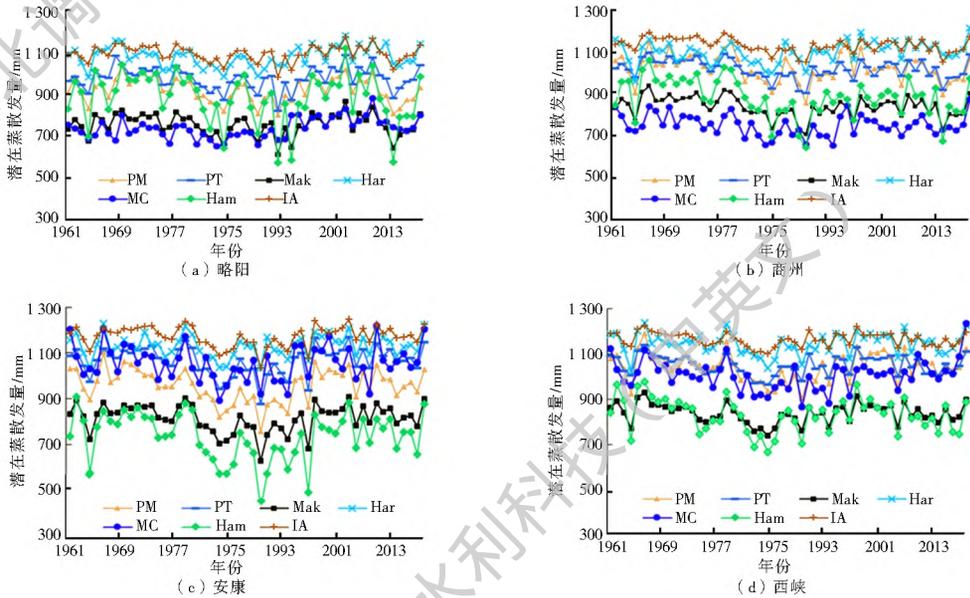


图4 P-M法与6种估算方法估算PET的年际变化比较

Fig. 4 Comparison of annual PET estimated by the P-M method and the other six methods

表3 6种估算方法与P-M法估算年际PET的结果分析

Tab. 3 Analysis of the results of annual PET estimated by the P-M method and the other six methods

站点	计算方法	MAE/mm	MRE (%)	R	站点	计算方法	MAE/mm	MRE (%)	R
略阳	PT	54.99	6.07	0.88	商州	PT	30.20	2.93	0.83
	Mak	167.43	18.20	0.92		Mak	185.70	18.14	0.87
	MC	184.20	19.89	0.60		MC	272.61	26.61	0.78
	Ham	57.69	6.55	0.88		Ham	139.73	13.79	0.82
	Har	159.53	17.56	0.76		Har	79.62	8.02	0.71
	IA	174.94	19.26	0.89		IA	112.16	11.27	0.81
安康	PT	106.54	11.27	0.92	西峡	PT	26.70	2.63	0.85
	Mak	144.12	15.00	0.93		Mak	205.19	19.62	0.89
	MC	97.32	10.29	0.78		MC	50.20	4.75	0.73
	Ham	223.51	23.62	0.89		Ham	210.89	20.29	0.80
	Har	172.73	18.36	0.81		Har	101.98	9.93	0.92
	IA	213.85	22.65	0.92		IA	121.83	11.95	0.81

综合分析多年月均值潜在蒸散发量、多年季节潜在蒸散发量和年际潜在蒸散发量的误差分析和变化过程,在汉江中上游地区潜在蒸散发量变化有很强的季节性,综合法FA与P-M法的变化趋势吻合

度较高,但平均相对误差较大,辐射法明显优于温度法,辐射法与P-M方法的计算结果相关系数高且相对误差小,能够较好的反映潜在蒸散发量的变化趋势,6种计算方法中,P-T方法适用性最好,M-C方

法适用性最差。

3.2 流域尺度 PET 时空变化分析

为了全面的分析 6 种潜在蒸散发量估算方法在汉江中上游地区的适用性, 仅仅从点尺度是不够的, 还需要进行各种估算方法在流域空间变化的适用性

比较。采用各种估算方法的多年均值进行空间比较分析, 以 P-M 方法的空间分布为标准, 研究其他估算方法的空间适用性。图 5 给出了 P-M 方法以及其它 6 种估算方法的多年平均潜在蒸散发量空间分布。

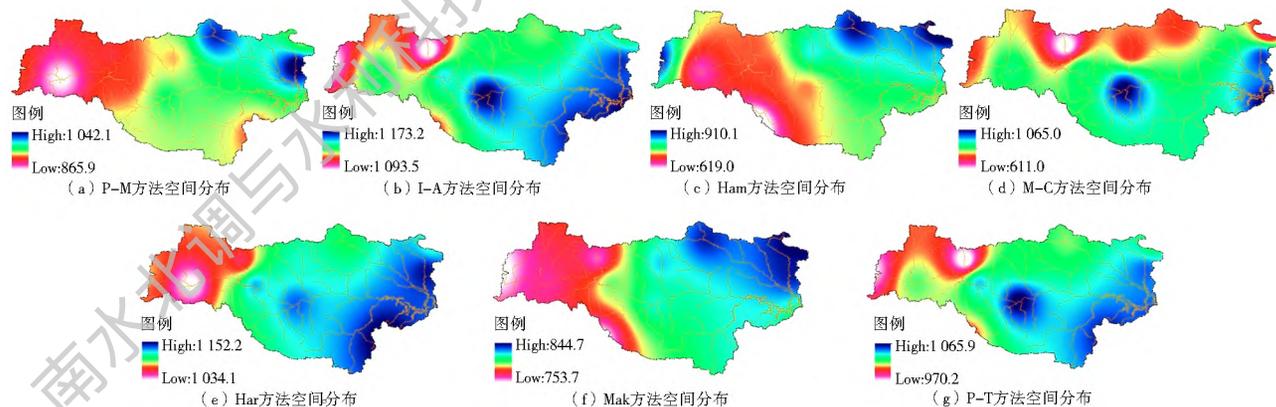


图 5 7 种方法估算多年平均潜在蒸散发量的空间分布(单位: mm)

Fig. 5 Spatial distribution of multi year average potential evapotranspiration estimated by the seven methods

由 P-M 方法多年平均潜在蒸散发量空间分布来看, 汉江中上游流域在 1961-2013 年这 53 年期间, 呈现出东部地区潜在蒸散发量大于西部地区潜在蒸散发量, 流域东北部地区潜在蒸散发量最大, 潜在蒸散发量年均值在 865.9~1042.1 mm 区间内变化。

综合法 FA 多年平均潜在蒸散发量的空间分布相较于 P-M 方法空间分布, 在流域南部地区存在高估年平均潜在蒸散发量现象, 而在流域北部地区存在低估现象。FA 方法的多年平均潜在蒸散发量在流域的变化区间为 1093.5~1173.2 mm, 整个流域多年平均潜在蒸散发量明显高于 P-M 方法。所以, 在汉江中上游地区, 综合法 FA 估算的多年均值潜在蒸散发量偏大, 且空间分布与 P-M 法计算结果吻合程度较差, 即该方法在研究区域的适用性较差。

辐射类方法中, P-T 方法和 Mak 方法多年平均潜在蒸散发量空间分布都是东部地区蒸发量大于西部地区, 这与 P-M 方法的空间分布是一致的。Mak 方法的空间分布整体来看和 P-M 方法的空间分布有较好的一致性, 蒸发量的最大值出现在流域的东北部, 最小值出现在西南部。但 P-T 方法的空间分布在南部地区存在高估现象, 北部地区存在低估现象, 流域潜在蒸散发量最大的地区出现在中部, 由此, 辐射类方法中 Mak 方法在汉江中上游地区比 P-T 方法有更好的适用性。

温度法中, Har 方法的多年均值潜在蒸散发量空间分布存在比较明显的东部潜在蒸散发量大于西部潜在蒸散发量的现象, 但在东部地区, Har 方法的计算结果相较于 P-M 方法计算结果整体偏大, 所

以, Har 方法在研究区域的适用性一般。Ham 方法和 M-C 方法的空间分布都没有较为明显的东部蒸发量大于西部蒸发量的现象, 与 P-M 方法的空间分布结果相差较大, 表明这两种方法在汉江中上游流域的适用性较差。

4 结论

以汉江中上游为研究区域, 采用该区域 12 个气象站点 1961-2013 年的数据资料, 以 FAO 推荐的 P-M 法计算结果作为参考。在点尺度上, 选取略阳、商州、安康和西峡四个代表站点, 分别从多年月均值变化、多年季节均值变化和年际变化三个方面, 分析比较了目前应用较为广泛的其它 6 种潜在蒸散发量估算方法(其中包括综合类方法 FA、辐射类方法 Mak 和 P-T、温度类方法 Har、Ham 和 M-C)的区域适用性; 在区域尺度上, 分析比较了其它 6 种潜在蒸散发量估算方法在多年均值空间分布上的区域适用性。主要结论如下。

(1) 汉江中上游潜在蒸散发量具有较强的季节变化特征, 潜在蒸散发量在夏季最高, 冬季最低, 春季要高于秋季, 春季和夏季占全年蒸发量的 2/3 以上。从月序列来看, 流域年内潜在蒸散发量呈现从 1 月到 7 月份左右逐渐增加, 随后开始下降。年际潜在蒸散发量虽有波动, 但无显著的下降或上升趋势。多年潜在蒸散发平均值在研究区内的东部地区高于西部地区, 空间差异明显。

(2) 6 种估算方法计算结果与 P-M 方法计算结果的比较表明, 在三类潜在蒸散发量估算方法中, 区

域适用性最好的为辐射类方法,其次为综合类方法,温度类方法相对较差。辐射法中 Mak 法的空间分布与 P-M 法空间分布有很高的一致性,Har 方法在点尺度上与 P-M 方法具有很好的一致性;温度法中的 M-C 方法空间分布和 P-M 方法的空间分布相差较大,适用性最差;综合类方法 FA 的适用性没有辐射类方法好,但要优于温度类方法。综合衡量 6 种潜在蒸散发估算方法, Mak 方法和 Har 方法最优, M-C 方法最差,所以在汉江中上游估算潜在蒸散发量空间分布时优先考虑辐射类方法。

(3) 不同的估算方法得到的潜在蒸散发量结果差异较大,因此有必要在选用估算方法之前验证估算方法的区域适用性,确保计算结果能够较精确地反应区域的蒸散发情况。尤其在面积较大的区域,下垫面状况复杂多变,气象要素也会有较大的变化,在选择潜在蒸散发量估算方法时,应该根据下垫面条件等综合选取较为合适的估算方法。

参考文献(References):

- [1] 赵玲玲,夏军,许崇育,等.水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J].地理学报,2013(1):127-136.(ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. Acta Geographica Sinica, 2013(1): 127-136. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb201301014.
- [2] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature based methods for calculating evaporation[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(2): 305-319. DOI: 10.1002/hyp.119.
- [3] XU C Y, SINGH 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(1-2): 105-121. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.024.
- [4] 徐俊增,彭世彰,丁加丽,等.基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸发腾量计算方法评价[J].水利学报,2010,41(12):1497-1505.(XU J Z, PENG S Z, DING J L, et al. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration based on lysimeter grass experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1497-1505. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.12.016.
- [5] XU C Y, GONG L B, JIANG T, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2): 81-93. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.11.029.
- [6] 马亮,魏光辉.新疆塔里木盆地西缘参考作物蒸散发模型的适用性评价[J].干旱区资源与环境,2015(8):132-137.(MA L, WEI G H. Applicability evaluation non the ET_0 model in western margin of Tarim Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015(8): 132-137. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.270.
- [7] 杜加强,熊珊珊,刘成程,等.黄河上游地区几种参考作物蒸散发量计算方法的适用性比较[J].干旱区地理,2013(5):831-840.(DU J Q, XIONG S S, LIU C C, et al. Comparison of models for estimating reference crop evapotranspiration in the headwater catchment of the Yellow River basin, China[J]. Arid Land Geography, 2013(5): 831-840. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.05.018.
- [8] 邹磊,夏军,马细霞,等.潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J].水文,2014(3):17-23.(ZOU L, XIA J, MA X X, et al. Applicability of potential evapotranspiration methods in Henan province[J]. Journal of China Hydrology, 2014(3): 17-23. (in Chinese))
- [9] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of radiation based methods for calculating evaporation[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(2): 339-349. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2<339::AID-HYP928>3.0.CO;2-O.
- [10] 鞠彬,胡丹.参考作物蒸发蒸腾量计算方法在额尔齐斯河流域的适用性研究[J].水资源与水工程学报,2014(5):106-111.(JU B, HU D. Research on adaptability of estimated method of different reference crop evapotranspiration in Irtysh river basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014(5): 106-111. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.05.024.
- [11] 左德鹏,徐宗学,程磊,等.基于辐射的潜在蒸散发量估算方法适用性分析[J].干旱地理,2011(4):565-574.(ZUO D P, XU Z X, CHENG L, et al. Assessment on radiation based methods to estimate potential evapotranspiration[J]. Arid Land Geography, 2011(4): 565-574. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2011.04.005.
- [12] 马征杰.对汉江中上游水环境污染的调查及思考[J].汉中师范学院学报(自然科学),2001(3):86-90.(MA Z J. Survey on the water pollution and harnessing of the middle and upper reaches of Hanjiang River[J]. Journal of Hanzhong Teachers College (Natural science), 2001(3): 86-90. (in Chinese))
- [13] 陈华,郭生练,郭海晋,等.汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析[J].长江流域资源与环境,2006,15(3):340-345.(CHEN H, GUO S L, GUO H J, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 340-345. (in Chinese))
- [14] 中国气象局数据共享服务网[DB/OL][2016-11-20].http://data.cma.cn.(China Meteorological Bureau data sharing service network[DB/OL][2016-11-20].http://data.cma.cn. (in Chinese))
- [15] VALIANTZAS J D. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331: 690-720. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.012.
- [16] VALIPOUR M, SEFIDKOUHI M A G, RAEINI M. Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 50-60. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.08.025.

- [17] XU C Y, SINGH 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(1/2): 105-121. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.024.
- [18] 秦孟晟, 郝璐, 施婷婷, 等. 秦淮河流域五种参考作物蒸散量估算方法的比较及改进[J]. *中国农业气象*, 2016(4): 390-399. (QIN M S, HAO L, SHI T T, et al. Comparison and modification of five crop reference evapotranspiration models for Qirhuai River Basin[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016(4): 390-399. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2016.04.002.
- [19] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92. DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.
- [20] DOUGLASE M, JACODS J M, et al. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(3/4): 366-376. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.04.029.
- [21] MATTAR M A, ALAZBA A A, ALBLEWI B, et al. Evaluating and calibrating reference evapotranspiration models using water balance under hyper arid environment[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30: 3745-3767. DOI: 10.1007/s11269-016-1382-y.
- [22] MINACAPILLI M, CAMMALLERI C, CIRAOLO G, et al. Using scintillometry to assess reference evapotranspiration methods and their impact on the water balance of olive groves[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 170: 49-60. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.12.004.
- [23] ALMOROX J, QUEJ V H, MARTÍ P. Global performance ranking of temperature based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 514-522. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.06.057.
- [24] GAO X L, PENG S Z, et al. Proper methods and its calibration for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data in Southwestern China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(3): 415-426. DOI: 10.1080/03650340.2014.933810.
- [25] ALEXANDRIS S, STRICEVIC R, PETCOVIC S. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman Monteith formula[J]. *European Water*, 2008, 21: 17-28.
- [26] XU C Y, SINGH V P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland[J]. *Water Resources Management*, 2002, 16(3): 197-219. DOI: 10.1023/A:1020282515975.
- [27] LI S, KANG S, et al. Evaluation of six potential evapotranspiration models for estimating crop potential and actual evapotranspiration in arid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 450-461. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.022.
- [28] LU J B, SUN G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 51(6): 621-633. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x.
- [29] 张晓琳, 熊立华, 林琳, 等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. *干旱区地理*, 2012(2): 229-237. (ZHANG X L, XIONG L H, LIN L, et al. Application of five potential evapotranspiration equations in Hanjiang Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2012(2): 229-237. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2012.02.006.