

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2021.0001

伍海,夏军,赵玲玲,等.变化环境下12种潜在蒸散发估算方法在不同干湿区的适用性[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):01-11. WU H, XIA J, ZHAO L L, et al. Application of 12 potential evapotranspiration estimation methods under changing environments in different arid and humid regions[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 01-11. (in Chinese)

变化环境下12种潜在蒸散发估算方法 在不同干湿区的适用性

伍海^{1,3}, 夏军^{1,2}, 赵玲玲³, 宋进喜¹, 李天生²

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 广州地理研究所广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070)

摘要: 以国际粮农组织(FAO)彭曼-蒙迪斯方法(简称为P-M方法)为基准,根据湿度将研究区划分为5个干湿区,从相关性、多年均值、年内空间分布以及参数特征等4个方面,深入分析包括温度法、质量传输法、辐射法等3类12种潜在蒸散发估算方法在我国31个省(自治区、直辖市)不同气候区的适用性。结果表明:研究区域内,辐射法与P-M方法月相关性最好,估算多年潜在蒸散发均值明显比温度法和质量传输法更接近,其中P-T法估算效果最好,Hamon法最差;在不同干湿区,温度法和质量传输法在干旱地区与P-M方法的相关性优于在湿润地区;Penman法估算的潜在蒸散发值在干旱地区与P-M方法计算值最为接近;辐射法(除去Jensen法)在不同干湿区内分布均好于温度法和质量传输法,其中Rohwer法在所有干湿区内分布均最好,Abtew法在干旱地区最好,P-T、Mak、Harg和Door方法在湿润地区最好,而Jensen和Kharrufa方法则在所有干湿区内分布最差。综合来看,辐射法在研究区域内表现最优;当研究区为湿润地区时,选择温度法和质量传输法;当研究区为干旱地区时,首选Penman和Abtew方法。

关键词: 潜在蒸散发; 气候变化; 干湿区; 适用性

中图分类号: P468 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



潜在蒸散发是水循环和水系统中重要的气候要素,是一个综合性的气象因子,也是预测气候变化对水资源影响的方法或模型中的关键变量,其模拟准确与否直接影响预测的合理性^[1]。同时潜在蒸散发受多种气候要素的综合控制^[2],近几十年来,全球气候发生显著变化,引起了一些与潜在蒸散发密切相关的气象要素如相对湿度、风速以及净辐射等的改变^[2,7],在这种背景下,开展潜在蒸散发的研究十分必要。

目前国际上共有近50种方法或模型用来估算潜在蒸散发,可以分为以下4类^[8]:温度法;质量传输法;辐射法;综合法。其中国际公认估算潜在蒸散发

最有效的方法为P-M方法,该方法已经被证明在不同条件下均能准确估算潜在蒸散发的值^[9]。但是,该方法需要输入大量气象数据,在实际应用中往往由于资料有限或数据精度不够,计算受到限制,甚至难以进行潜在蒸散发的估算^[10]。因此,有必要对多种潜在蒸散发估算方法在不同条件下的适用性进行研究,为估算潜在蒸散发或进行更深入研究提供选择的依据。

潜在蒸散发适用性分析在20世纪90年代开始有了大规模系统性研究,主要集中在常用的十几种估算潜在蒸散发的方法,如P-T^[11]、BC^[12]、Hargreaves^[13]、Jensen Haise^[14]、Penman^[15]、Kharrufa^[16]、

收稿日期: 2020-03-12 修回日期: 2020-08-04 网络出版时间: 2020-08-10

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200810.1325.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502506); 国家自然科学基金(41771044); 广东省科学院发展专项资金(2019GDASYL-0104003; 2020GDASYL-20200301003)

作者简介: 伍海(1994—),男,安徽霍山人,主要从事水文与水资源研究。E-mail: haiiwu@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 夏军(1954—),男,湖北孝感人,中国科学院院士,博士生导师,长期从事水文学及水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

Thornthwaite^[17] 等,在实际应用中多数选择估算潜在蒸散发的方法少于 10 种^[18-20]。许崇育等^[21-22]对潜在蒸散发估算方法适用性的研究比较全面,其对质量传输法、辐射法以及温度法等 3 类潜在蒸散发估算方法的估算效果分别进行评价,2002 年^[23]又对这 3 类潜在蒸散发估算方法进行交叉比较,发现同一类别不同公式估算量差别较小,不同类别比较结果为辐射法效果最好,质量传输法最差,温度法估算效果居于二者之间,这与大多数研究^[24-25]的结论一致。在潜在蒸散发的研究中,有以流域、地区以及各级行政区划等为研究区的^[26-33],还有以单一干湿区为研究区的^[10,34-41],但是以多个干湿区作为研究区的研究不多^[26]。国内虽然有关潜在蒸散发估算方法的适用性研究有很多,但是选取不同种类潜在蒸散发估算方法进行交叉分析的研究以及以干湿区这种分类为研究区进行研究的较少。然而,我国地域辽阔,东西横跨湿润区和干旱区,有必要按照不同干湿区对估算潜在蒸散发方法进行适用性分析。

因此,本文在已有研究基础上,以 P-M 方法为基准,将研究区划分为 5 个干湿区^[42],从相关性、多

年平均、年内时空分布以及参数特征等 4 个方面深入研究包括温度法、质量传输法以及辐射法等 12 种估算潜在蒸散发方法在不同干湿区的适用性,为实际应用中潜在蒸散发方法的选取提供选择依据。

1 研究区以及数据

1.1 研究区分区

我国从东南沿海向西北内陆,年平均相对湿度差超过 50%,而湿度是影响潜在蒸散发的重要因素,因此,将我国 31 个省(自治区、直辖市)划分为 5 个不同的干湿区,即:极干旱区(EAR)、干旱区(AR)、亚干旱区(SAR)、亚湿润区(SHR)以及湿润区(HR),可以更加清晰地分析湿度因素对潜在蒸散发的影响。

1.2 数据

本文采用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的 228 个气象站 1960—2013 年的常规观测数据,包括逐日最高气温、平均气温、最低气温、日照时数、10 m 处风速、相对湿度以及太阳辐射等。不同干湿区的站点分布见表 1。

表 1 不同干湿区对应的气象站点数

Tab. 1 Different arid and humid regions and corresponding meteorological stations

| 干湿区 | 极干旱区(EAR) | 干旱区(AR) | 亚干旱区(SAR) | 亚湿润区(SHR) | 湿润区(HR) |
|-----|-----------|---------|-----------|-----------|---------|
| 站点数 | 16 | 15 | 31 | 49 | 116 |

2 研究方法

2.1 潜在蒸散发估算方法

本文共使用了 13 种估算潜在蒸散发的方法,包括综合法(P-M 方法)、4 种温度法、2 种质量传输法以及 6 种辐射法(表 2)。

2.2 相关系数

相关系数是研究变量之间线性相关程度的量,本文是计算研究区(分为 31 个省(自治区、直辖市)和不同干湿区)内所有站点序列 12 种潜在蒸散发方法计算值与 P-M 方法计算值的月相关系数 R 。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{m,i} - \overline{ET}_m) (ET_{PM,i} - \overline{ET}_{PM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{m,i} - \overline{ET}_m)^2 \sum_{i=1}^n (ET_{PM,i} - \overline{ET}_{PM})^2}} \quad (1)$$

式中: R 为月相关系数; $ET_{PM,i}$ 为 P-M 方法在某个站点的潜在蒸散发月计算值,mm; $ET_{m,i}$ 为 m 方法(共 12 种)在某个站点的潜在蒸散发月计算值,mm; \overline{ET}_m 为 m 方法在某个站点的潜在蒸散发 n 个月计算值的平均值; \overline{ET}_{PM} 为 P-M 方法在某个站点的潜在蒸散发 n 个月计算值的平均值,mm; n 为 1960 年 1 月至

2013 年 12 月的总月数, $n=648$ 。

3 结果

本文主要从相关性分析、多年均值、年内空间分布以及参数特征等 4 个方面对 12 种潜在蒸散发方法在我国 31 个省(自治区、直辖市)以及不同干湿区的适用性进行分析。

3.1 不同潜在蒸散发估算方法在我国 31 个省(自治区、直辖市)的适用性

3.1.1 相关性分析

12 种潜在蒸散发方法与 P-M 方法的月相关系数(所有站点平均值)均在 0.89 以上(表 3),说明这些方法在我国 31 个省(自治区、直辖市)尺度上计算潜在蒸散发与 P-M 方法的相关性较好。其中辐射法与 P-M 方法的月相关系数在 0.96 以上,远高于温度法和质量传输法,这与辐射法同样考虑了温度因素有关。相关性最好的为 Door 法,最差的为质量传输法中的 Rohwer 和 Penman 法。调参前后,除了 Linacre 和 Kharrufa 法,其他方法与 P-M 方法的相关性保持不变。

表2 潜在蒸散发估算方法

Tab. 2 Methods of estimating potential evapotranspiration

| 分类 | 估算方法 | 估算公式 | 参数初始值 |
|-------|--------------------------------|--|----------------|
| 温度法 | Blaney-Criddle (BC) (1959) | $E_p = kp(0.46T_a + 8.13)$ | $k = 0.87$ |
| | Linacre (1977) | $E_p = \frac{mT_m + 15(T_a - T_d)}{100 - A(80 - T_a)}$ $T_m = T + 0.006h$ | $m = 500$ |
| | Kharrufa (1985) | $E_p = apT_a^{1.3}$ | $a = 0.34$ |
| | Hamon (1961) | $E_p = bD^2P_t$ $P_t = \frac{4.95e^{(0.062T_a)}}{100}$ | $b = 0.55$ |
| 质量传输法 | Rohwer (1962) | $E_p = c(1 + 0.27U_2)(e_s - e_a)$ | $c = 0.44$ |
| | Penman (1948) | $E_p = d(1 + 0.98/100U_2)(e_s - e_a)$ | $d = 0.35$ |
| 辐射法 | Priestley-Taylor (P-T) (1972) | $E_p = f \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{(R_n - G)}{\lambda}$ | $f = 1.26$ |
| | Makkink (Mak) (1957) | $E_p = g \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$ | $g = 0.61$ |
| | Abtew (1996) | $E_p = K \frac{R_s}{\lambda}$ | $K = 0.53$ |
| | Hargreaves (Harg) (1975) | $E_p = n(T + 17.8) \frac{R_s}{\lambda}$ | $n = 0.0135$ |
| | Doorenbos-Pruitt (Door) (1977) | $E_p = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right) + \beta$ | $\beta = -0.3$ |
| | Jensen-Haise (Jensen) (1963) | $E_p = C_t(T - T_x) \frac{R_s}{\lambda}$ | $C_t = 0.025$ |
| 综合法 | Monteith (P-M) (1965) | $E_p = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34) U_2}$ | |

注:方法后的第一个括号内为方法的简写(若无则表示直接使用); k 为反应物影响系数; p 为白天小时数占全年白天小时数的百分比; T_d 为露点温度,℃; h 为站点高程,m; A 为站点所在的纬度,(°); D 为白天时长,h; P_t 为饱和水汽密度项; R_s 为短波辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$;Doorenbos-Pruitt (1977)公式中 $\alpha = 1.066 - 0.13 \times 10^{-2}RH + 0.045U_d - 0.20 \times 10^{-3}RH \times U_d - 0.135 \times 10^{-4}RH^2 - 0.11 \times 10^{-2}U_d^2$; T_x 为温度常数,本文取-3℃;除去选定的需要调整的参数(未说明的为经验系数),其他符号意义同式(3); E_p 为潜在蒸散发量(在后续公式中如无特殊说明, E_p 单位均为此) mm/d ; G 为土壤热通量密度, $MJ/(m^2 \cdot d)$; R_n 为作物表面的净辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$; γ 为干湿计常数, $kPa/^\circ C$; T_a 为2m高处的日平均气温,℃; e_s 为饱和水汽压, kPa ; e_a 为实际水汽压, kPa ; Δ 是温度-饱和水汽压关系曲线 T 处的斜率, $kPa/^\circ C$; U_2 为2m高处风速, m/s ;其中 G 值较小,在计算过程中忽略不计。

表3 不同方法与P-M方法的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients of different methods and P-M method

| 温度法 | | 质量传输法 | | 辐射法 | |
|-------------|------|-----------|------|-----------|------|
| 估算方法 | R | 估算方法 | R | 估算方法 | R |
| BC | 0.91 | Rohwer | 0.89 | P-T | 0.97 |
| BC-ap | 0.91 | Rohwer-ap | 0.89 | P-T-ap | 0.97 |
| Linacre | 0.95 | Penman | 0.89 | Mak | 0.98 |
| Linacre-ap | 0.89 | Penman-ap | 0.89 | Mak-ap | 0.98 |
| Kharrufa | 0.90 | | | Abtew | 0.96 |
| Kharrufa-ap | 0.92 | | | Abtew-ap | 0.96 |
| | | | | Hamon | 0.91 |
| | | | | Hamon-ap | 0.91 |
| | | | | Harg | 0.98 |
| | | | | Harg-ap | 0.98 |
| | | | | Door | 0.99 |
| | | | | Door-ap | 0.99 |
| | | | | Jensen | 0.96 |
| | | | | Jensen-ap | 0.96 |

注:估算方法中“-ap”为经过调参的方法。

3.1.2 潜在蒸散发多年均值

由 P-M 方法计算所得的所有站点多年潜在蒸散发平均值的平均值为 884.4 mm。

调整参数前各种方法所计算的潜在蒸散发值在 P-M 方法所计算的潜在蒸散发值两侧波动(288.7~1355.1 mm), 调整参数后各种方法与 P-M 方法所得潜在蒸散发值接近(表 4)。其中调参前, 由 P-T 法计算的值与 P-M 方法计算的值最接近(相差 43.4 mm), Hamon 方法计算的值与 P-M 方法计算

的值相差最远(595.7 mm)。温度法和质量传输法调参前后潜在蒸散发的改变量以及改变百分比明显高于辐射法。温度法中的 Hamon 法改变量甚至接近 600 mm, 改变的百分比也高达 200% 以上, 其他的温度法和质量传输法除了 Rohwer 外其他方法改变量均高于 200 mm 且改变百分比均接近 ±100%; 而辐射法除 Abtew 法改变量接近 300 mm 外, 其余均在 200 mm 以下, 改变百分比也均在 ±50% 以内(图 1)。

表 4 不同方法计算潜在蒸散发调参前后的年均值

Tab. 4 Annual values before and after adjusting parameters when using different methods to calculate potential evapotranspiration

| 温度法 | | 质量传输法 | | 辐射法 | |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 估算方法 | 潜在蒸散发值/mm | 估算方法 | 潜在蒸散发值/mm | 估算方法 | 潜在蒸散发值/mm |
| BC | 631.1 | Rohwer | 934.3 | P-T | 841.0 |
| BC-ap | 883.9 | Rohwer-ap | 885.5 | P-T-ap | 885.4 |
| Linacre | 1355.1 | Penman | 491.0 | Mak | 683.9 |
| Linacre-ap | 885.1 | Penman-ap | 886.1 | Mak-ap | 885.4 |
| Kharrufa | 631.7 | | | Abtew | 1187.0 |
| Kharrufa-ap | 884.6 | | | Abtew-ap | 885.1 |
| Hamon | 288.7 | | | Harg | 997.0 |
| Hamon-ap | 884.2 | | | Harg-ap | 885.5 |
| | | | | Door | 989.9 |
| | | | | Door-ap | 885.4 |
| | | | | Jensen | 1018.2 |
| | | | | Jensen-ap | 885.9 |

注: 估算方法中“-ap”为经过调参的方法。

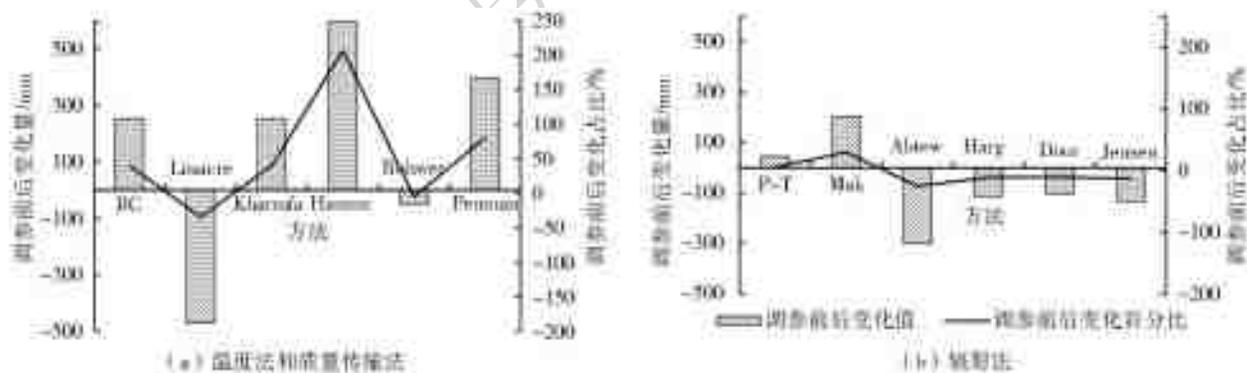


图 1 不同方法计算的潜在蒸散发值调参前后的变化量及变化的百分比

Fig. 1 Variation value and variation percentage before and after adjusting parameters using different methods

3.1.3 潜在蒸散发年内分布

P-M 方法计算的潜在蒸散发值年内分配是夏季>春季>秋季>冬季, 且冬季并未出现负值(图 2), 比较合理。温度法中 BC 和 Linacre 法均是春季偏少, 秋季偏多, 夏季和冬季比较合理; Kharrufa 和 Hamon 法则是春季和冬季偏少, 夏季偏多, 分布不合理; 质量传输法中的 Rohwer 和 Penman 法季节分布比较合理, 与 P-M 方法分布基本一致。辐射

法中的 P-T、Mak、Harg 和 Door 方法与 P-M 方法所得潜在蒸散发年内分布一致性较好, 分布合理; Abtew 法冬季偏多, 夏季偏少, 而 Jensen 法夏季偏多, 冬季偏少, 在进行参数调整后甚至冬季出现了负值。所有的方法除 Jensen 法在调整后冬季出现负值外, 其他方法在调参后年内分布基本不变, 说明调参对潜在蒸散发值年内分布影响不大(图 2)。

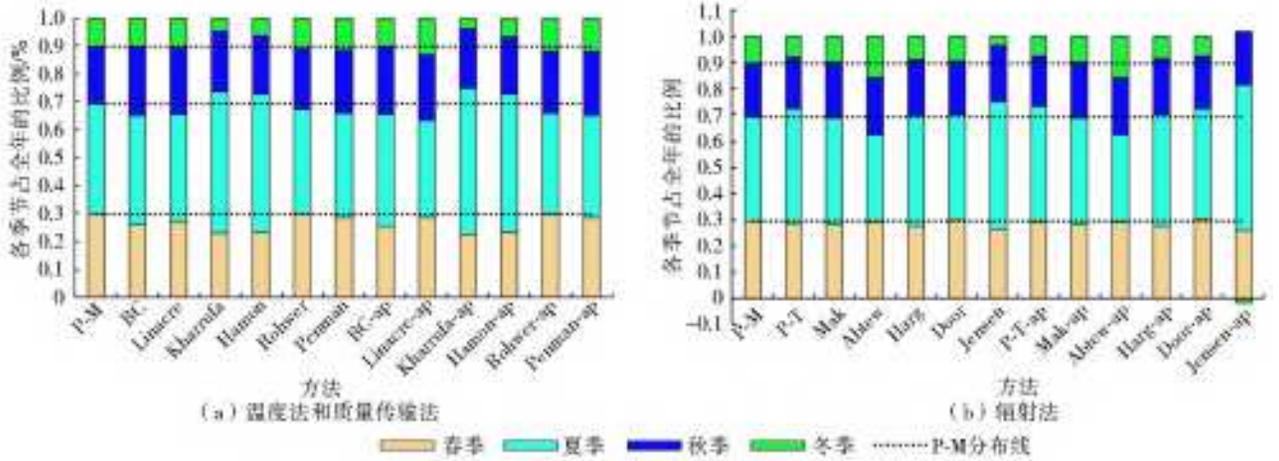


图2 不同方法计算潜在蒸散发结果的年内分配

Fig.2 Annual distribution of potential evapotranspiration using different methods

3.1.4 参数特征

本研究在研究区的每个站点将P-M方法计算的潜在蒸散发年值作为参照值,对其他12种潜在蒸散发估算方法的原始参数进行修正。具体以其他12种潜在蒸散发估算方法计算的年值作为自变量,以P-M方法计算的蒸散发年值为因变量,建立线性回归方程,找出原始参数的修正倍数,对相应方法的公式进行回归调整。

由表5可知,只有Hamon法调整参数范围变化较大超过了200%,其他方法均在100%以内,说明Hamon法适用性不强,其中Rohwer和P-T法在10%以内,Harg和Jensen法在20%以内,Mak和Abtew法在30%以内,这6种方法调整范围都比较小,在参数区域化中更容易确定参数。

表5 不同方法参数调整值

Tab.5 Adjustment values of parameters using different methods
单位: %

| 分类 | 估算方法 | 参数调整值 | 分类 | 估算方法 | 参数调整值 |
|-------|----------|--------|-----|--------|--------|
| 温度法 | BC | 41.92 | 辐射法 | P-T | 6.87 |
| | Linacre | -64.37 | | Mak | 24.03 |
| | Kharrufa | 63.78 | | Abtew | -25.71 |
| | Hamon | 223.91 | | Harg | -10.02 |
| 质量传输法 | Rohwer | 1.22 | | Door | 98.86 |
| | Penman | 90.06 | | Jensen | 15.53 |

注:表中数据为所有站点的平均值。

3.2 不同潜在蒸散发估算方法在干湿区的适用性

3.2.1 相关系数

Linacre和Kharrufa法与P-M方法月相关性在干旱地区高于在湿润地区,在干湿分界地区最小;其他温度法和质量传输法则呈现随着湿度增加与P-M方法月相关性越来越低的趋势(图3)。因此,

从相关性上来说温度法和质量传输法在干旱地区的适用性要好于在湿润地区的适用性。辐射法中的6种方法在各个干湿区变化不大,没有明显的规律,其与P-M方法的月相关系数均在0.94以上,因此这6种方法在不同的干湿区适用性均较好。

3.2.2 潜在蒸散发多年均值

P-M方法在不同干湿区随着湿度的增加,其潜在蒸散发计算值不断减少,这与P-M方法中PET与RH呈负相关一致(表6)。而湿润区(HR)值相对亚湿润区(SHR)增加主要是湿润区大部分区域温度比亚湿润区高,因此会出现潜在蒸散发值少量地增加。

BC、Linacre、Kharrufa、Hamon、Rohwer、P-T、Mak和Door方法均随着湿度增加,蒸散发年均值变化量逐渐减少,说明越湿润地区这几种方法需要调整的潜在蒸散发值幅度越低,同样也说明这几种方法在湿润地区适用性更好;而Penman法则与之相反,其更适合在干旱地区应用。辐射法中的Abtew法随着湿度增加,其蒸散发年均值变化量先增加后减少,说明更适用于比较干旱和比较湿润的地区;而Harg法与之相反,先减少后增加,说明其更适用于干湿分界的地区见图4。

3.2.3 潜在蒸散发年内分布

P-M方法计算的潜在蒸散发量年内分布随着湿润度增加,夏季占比有所下降而冬季则明显上升,尤其在湿润区(HR),冬季潜在蒸散发量占比接近13%。由图5~9的(a)可以看出,在不同干湿气候区中,质量传输法调参前后均明显优于温度法,与P-M方法计算所得值年内分布较为相似,尤其是在极端干旱区(EAR)和干旱区(AR)。

在湿润区域,温度法年内分布与在干旱区域相比有所提升,比较明显的是 Kharrufa 法,而质量传输法的年内分布与在干旱区域相比则有所下降,但仍然要好于温度法,说明质量传输法在干旱区适用性好于在湿润区域,且无论在何种干湿气候区均好于温度法。在这 6 种方法中,Rohwer 法在各个干湿气候区年内分布适用性均为最好,而 Kharrufa

法无疑是适用性最差的方法,尤其是在干旱区域(EAR、AR、SAR),在冬季潜在蒸散发几乎为零,甚至在多个站点(海拉尔、嫩江、克山、巴音布鲁克、伍道梁、玛多、黑河站点)出现零值,但是在湿润区域该方法表现较好,尤其是在湿润区(HR),夏季和冬季分布较为合理,适用性明显好于干旱区域。

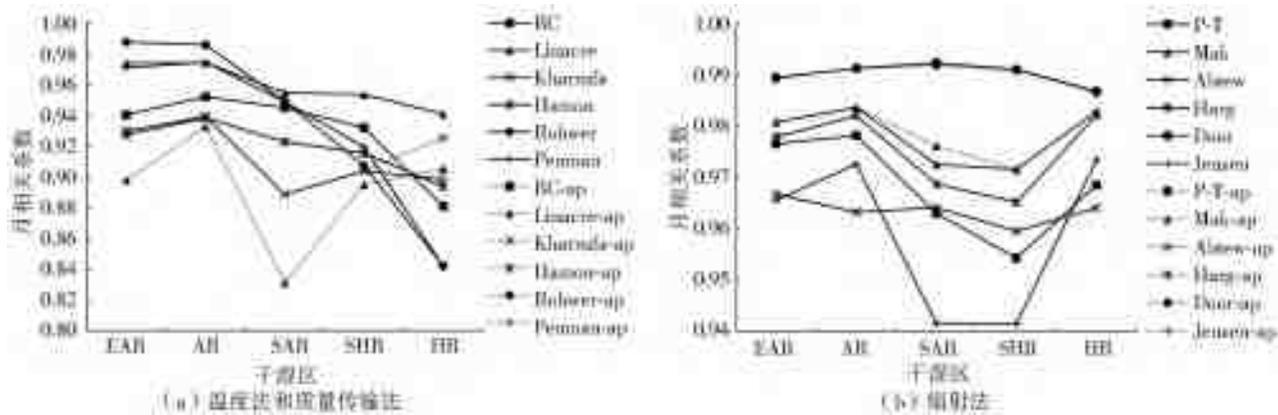


图 3 不同干湿区不同方法与 P-M 方法的月相关系数(相关系数为该干湿区内所有站点平均值)

Fig. 3 Month correlation coefficients of different methods which calculate potential evapotranspiration and P-M method in different arid and humid regions (correlation coefficients are the average value of all stations in every single arid and humid region)

表 6 P-M 方法计算潜在蒸散发值在不同干湿区的分布

Tab. 6 Distribution of potential evapotranspiration calculated by the formula P-M in different arid and humid regions

| 干湿区 | EAR | AR | SAR | SHR | HR |
|--------|-----------|-----------|---------|---------|---------|
| P-M 方法 | 1 133. 21 | 1 046. 32 | 857. 78 | 845. 39 | 852. 75 |

注:计算值为在各个干湿区的所有站点潜在蒸散发多年均值的平均值。

由图 5~ 9 的 (b) 可以看出,在不同的干湿区辐射法在年内分布的表现可以分为 3 种:(1) 随着湿润度增加,年内分布表现越来越好,有 Abtew 法,由开始冬季所占比重很大以及夏季所占比重很小向比较合理的年内分布靠近,在湿润区(HR)与 P-M 方法年内分布基本一致。(2) 随着湿润度增加,年内分布表现越来越差,有 P-T、Mak、Harg 和

Door 方法,这 4 种方法在极干旱区(EAR)与 P-M 方法的年内分布基本一致,后随着湿度增加出现夏季所占比重越来越大,冬季越来越小的现象。

(3) 在不同干湿区年内分布均表现很差,有 Jensen 法,其在夏季占比很大,尤其是在亚湿润区(SHR),调参后 Jensen 法甚至达到了 85% 以上,接近 P-M 方法春、夏、秋三季之和,而冬季在所有区域均出现了负值。在调整参数后,只有 Door 和 Jensen 方法年内分布表现更差,其他方法在调参前后基本保持一致。

结合图 5~ 9 可知,调参前后,各种方法年内分布几乎不变。在不同干湿区中与 P-M 方法的年内分布一致性最高的方法见表 7。

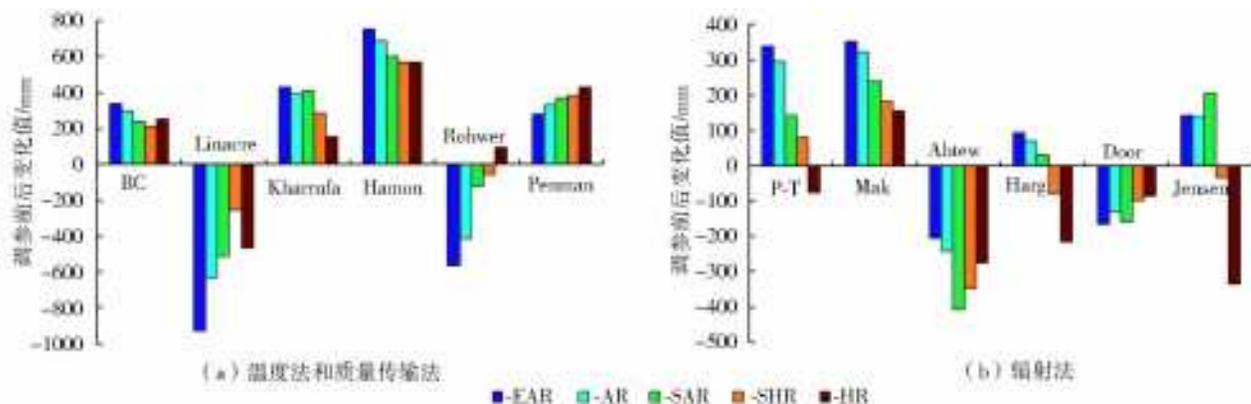


图 4 不同干湿区不同方法调参前后潜在蒸散发多年均值变化量

Fig. 4 Annual average variation values of potential evapotranspiration in different arid and humid region using a different method

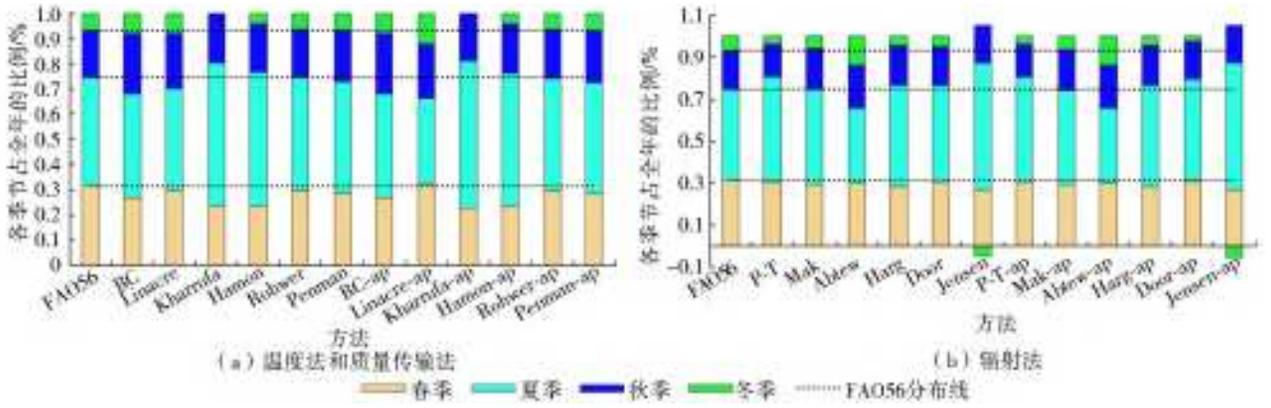


图5 极干旱区不同方法计算的潜在蒸散发年内分配

Fig. 5 Annual distribution of potential evapotranspiration calculated by different methods in extreme arid region

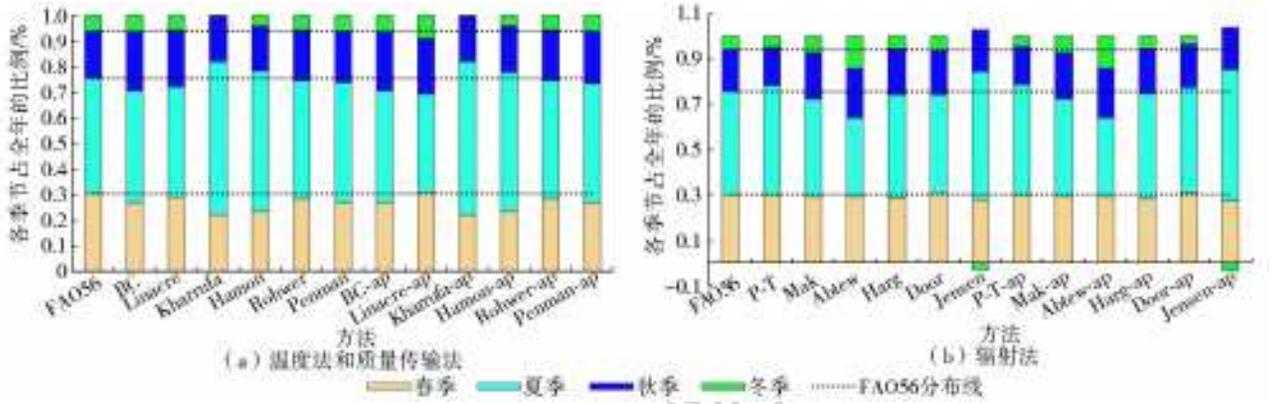


图6 干旱区不同方法计算的潜在蒸散发年内分配

Fig. 6 Annual distribution of potential evapotranspiration calculated by different methods in arid region

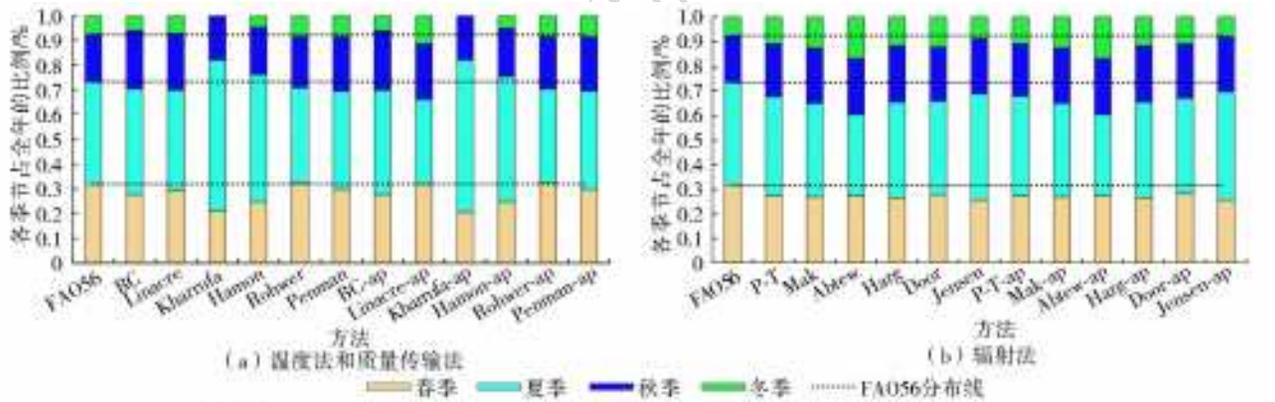


图7 亚干旱区不同方法计算的潜在蒸散发年内分配

Fig. 7 Annual distribution of potential evapotranspiration calculated by different methods in subarid region

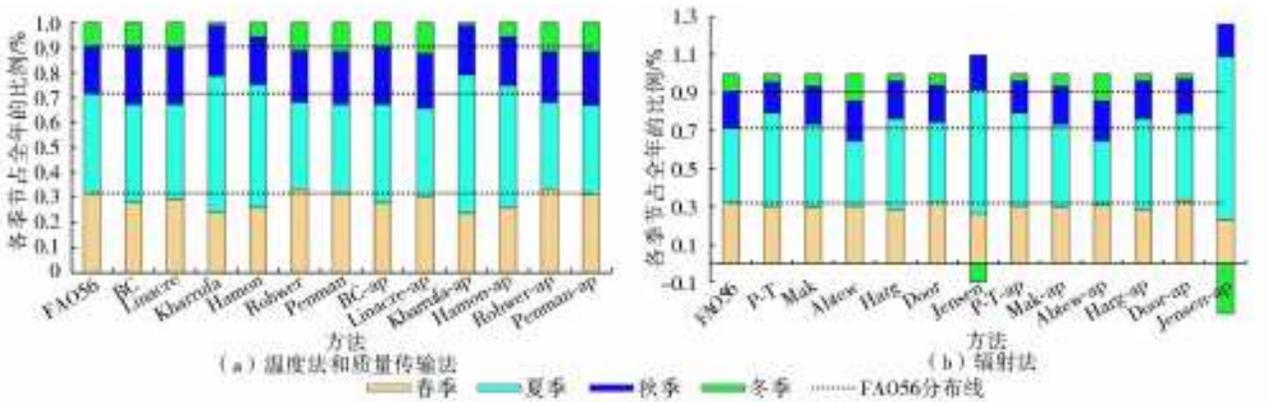


图8 亚湿润区不同方法计算的潜在蒸散发年内分配

Fig. 8 Annual distribution of potential evapotranspiration calculated by different methods in subhumid region

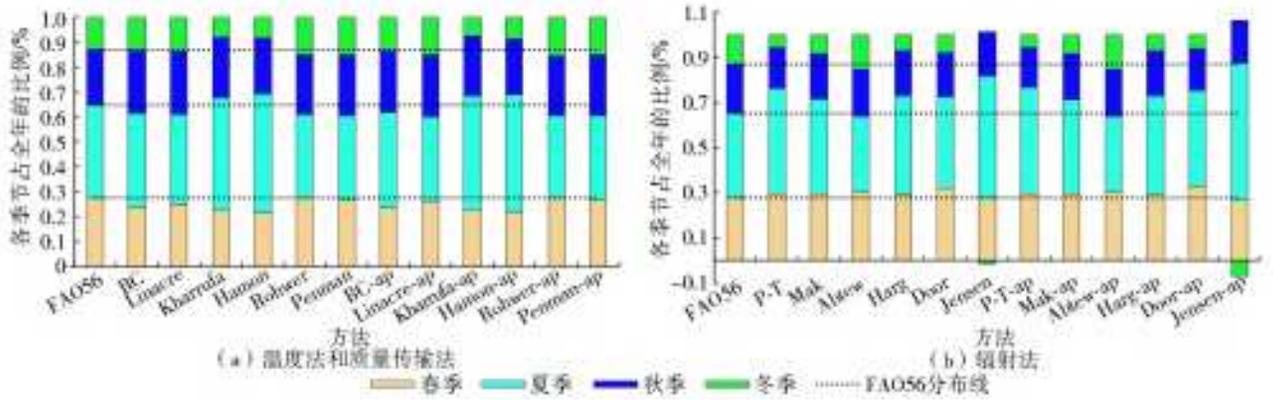


图 9 湿润区不同方法计算的潜在蒸散发年内分配

Fig. 9 Annual distribution of potential evapotranspiration calculated by different methods in humid region

表 7 不同干湿区年内分配最佳的方法

Tab. 7 The best methods of annual distribution in different arid and humid regions

| 干湿区 | 蒸散发估算方法 |
|------|----------------------------|
| 极干旱区 | Rohwer, Penman, Mak |
| 干旱区 | Rohwer, Penman, Harg, Door |
| 亚干旱区 | Rohwer, Penman |
| 亚湿润区 | Mak |
| 湿润区 | Abtew |

表 9 不同干湿区基于辐射方法的参数调整值

Tab. 9 Adjustment values of parameters using different methods based on radiation in different arid and humid regions 单位: %

| 干湿区 | P-T | Mak | Abtew | Harg | Door | Jensen |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 极干旱区 | 43.30 | 42.81 | -15.42 | 9.68 | 151.74 | 21.04 |
| 干旱区 | 39.78 | 42.14 | -18.75 | 7.40 | 119.42 | 16.46 |
| 亚干旱区 | 20.42 | 28.75 | -31.89 | 4.12 | 144.90 | 142.72 |
| 亚湿润区 | 10.39 | 26.00 | -29.37 | -7.81 | 92.79 | 28.01 |
| 湿润区 | -7.52 | 17.00 | -24.84 | -19.70 | 79.17 | -24.62 |

注:表中数据为各个研究区所有站点的平均值。

3.2.4 参数特征

由表 8、9 得知, BC 法在不同的干湿区参数需要调整的范围大小标准差仅为 3.36%, 因此 BC 法的参数调整范围不随湿度变化而变化。Linacre、Kharrufa、P-T、Rohwer、Door 和 Mak 方法参数随着湿度增加, 参数需要调整的范围逐渐减小, 这 6 种方法在越湿润地区适用性越好; 而 Penman 法则与之相反, 随着湿度增加, 需要调整的范围逐渐增大, 因此在干旱区域适用性更好。Abtew 法从干旱和湿润地区向干湿分界地区参数需要调整的范围逐渐增大, 呈现山峰的形态; Harg 法从干旱和湿润的地区向干湿分界地区参数需要调整的范围逐渐变小, 呈现山谷的形态。以上这些规律与图 4 中潜在蒸散发变化量分布规律几乎一致。

表 8 不同干湿区基于温度和空气动力学方法的参数调整值

Tab. 8 Adjustment values of parameters using different methods based on temperature and mass transfer in different arid and humid regions 单位: %

| 干湿区 | BC | Linacre | Kharrufa | Hamon | Rohwer | Penman |
|------|-------|---------|----------|--------|--------|--------|
| 极干旱区 | 44.05 | -106.57 | 76.17 | 211.89 | -32.09 | 34.26 |
| 干旱区 | 39.63 | -88.12 | 61.75 | 194.16 | -27.26 | 47.80 |
| 亚干旱区 | 40.96 | -74.77 | 135.49 | 251.13 | -9.50 | 85.18 |
| 亚湿润区 | 35.51 | -59.56 | 81.38 | 219.66 | -3.04 | 90.29 |
| 湿润区 | 44.89 | -54.73 | 35.74 | 223.93 | 14.16 | 104.43 |

4 结论

本文根据气象要素之一的相对湿度将研究区划分为 5 个干湿区, 以 P-M 方法为基准, 选取其中的 4 种温度法、2 种质量传输法和 6 种辐射法进行了适用性分析, 得出如下结论。

(1) 研究区域内, 辐射法与 P-M 方法月相关性最好, 温度法次之, 质量传输法最差。辐射法估算多年潜在蒸散发均值明显好于温度法和质量传输法, 其中 P-T 法估算效果最好, Hamon 法最差; 参数调整后, 所有方法均能达到与 P-M 方法几乎相同的值。其中: Hamon 法调参范围较大, 适用性较差; Rohwer 和 P-T 方法调参范围较小, 适用性较好。

(2) 针对不同干湿区, 温度法和质量传输法在干旱地区与 P-M 方法的相关性要优于在湿润地区, 辐射法在干旱地区和湿润地区与 P-M 方法的相关性基本一致。Penman 法估算的潜在蒸散发值在干旱地区与 P-M 方法计算值最为接近。辐射法(除去 Jensen 法)在不同干湿区年内分布均好于温度法和质量传输法, 其中 Rohwer 法与 P-M 方法在不同干湿区的年内分布几乎一致, Abtew 法在干旱地区以及 P-T、Mak、Harg 和 Door 方法在湿润地区与 P-M 方法年内分布一致, 而 Jensen 和 Kharrufa 方法在

不同干湿区年内分布均不合理。此外,在不同干湿区,不同方法参数调整的趋势均与对应方法的干湿区空间分布趋势相同,其中BC方法参数调整值在不同的干湿区几乎一致,适用性较好。

(3)综合来看,在我国31个省(自治区、直辖市)辐射法(除去Jensen法)最优;研究区为湿润地区,选择温度法和质量传输法,如BC、Linacre、Rohwer方法;研究区为干旱地区,Penman、Abtew方法首选,P-T、Mak、Door、Harg等辐射法(除Jensen法)方法次之。

参考文献(References):

- [1] DOUGLAS E M, JACOBS J M, SUMNER D 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.
- [2] VALIPOUR M. Importance of solar radiation, temperature, relative humidity, and wind speed for calculation of reference evapotranspiration[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(2): 239-255. DOI: 10.1080/03650340.2014.925107.
- [3] ESPADAFOR M, LORITE I J, GAVILÁN P, et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in southern Spain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1045-1061. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.01.015.
- [4] 张蕾,吕厚荃,王良宇,等.中国土壤湿度的时空变化特征[J].*地理学报*, 2016, 71(9): 1494-1508. (ZHANG L, LYU H Q, WANG L Y, et al. Spatial-temporal characteristics of soil moisture in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1494-1508. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201609003.
- [5] JIANG Y, LUO Y, ZHAO Z C, et al. Changes in wind speed over China during 1956-2004[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3-4): 421. DOI: 10.1007/s00704-009-0152-7.
- [6] ZHENG C W, PAN J, LI C Y. Global oceanic wind speed trend[J]. *Ocean & coastal management*, 2016, 129: 15-24. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2016.05.001.
- [7] JIMÉNEZ MUÑOZ J C, SOBRINO J A, MATTAR C. Recent trends in solar exergy and net radiation at global scale[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 228: 59-65. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.12.027.
- [8] SINGH V P, XU C Y. Evaluation and generalization of 13 mass transfer equations for determining free water evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(3): 311-323. DOI: 10.1002/(sici)1099-1085(199703)11:3<311::aid-hyp446>3.0.co;2-y.
- [9] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements* [R]//Irrigation and Drain, Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 1998.
- [10] ERRAKI S, CHEHBOUNI A, KHABBA S, et al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi arid regions: can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(12): 1587-1596. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2010.07.002.
- [11] 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:otash>2.3.co;2.
- [12] BLANEY H F, CRIDDLE W D. *Determining Water Requirements in Irrigated Areas From Climatological and Irrigation Data* [R]. Technical Paper No. 96, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D. C., 1950.
- [13] HARGREAVES G H. Moisture availability and crop production[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1975, 18(5): 980-984. DOI: 10.13031/2013.36722.
- [14] JENSEN M E, HAISE H R. Estimating evapotranspiration from solar radiation[J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1963, 89: 15-41.
- [15] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193: 120-145. DOI: 10.1098/rspa.1948.0037.
- [16] KHARRUFA N S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions[J]. *Beitrag zur Hydrologie*, 1985, 5(1): 39-47.
- [17] THORNTON HWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94. DOI: 10.1097/00010694-194807000-00007.
- [18] FOROUD N, CHANG C, ENTZ T. Potential evapotranspiration in the southern Alberta chinook region [J]. *Canadian Water Resources Journal*, 1989, 14(3): 30-42. DOI: 10.4296/cwrj1403030.
- [19] SHI T T, GUAN D X, WANG A Z, et al. Comparison of three models to estimate evapotranspiration for a temperate mixed forest[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(17): 3431-3443. DOI: 10.1002/hyp.

- 6922.
- [20] VALIPOUR M. Use of average data of 181 synoptic stations for estimation of reference crop evapotranspiration by temperature based methods[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(12): 4237-4255. DOI: 10.1007/s11269-014-0741-9.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] TABARI H, GRISMER M E, TRAJKOVIC S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(2): 107-117. DOI: 10.1007/s00271-011-0295-z.
- [25] 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.
- [26] YE J S, GUO A H, SUN G J. Statistical analysis of reference evapotranspiration on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2009, 135(2): 134-140. DOI: 10.1061/(asce)0733-9437(2009)135:2(134).
- [27] KISI O. Evapotranspiration modelling from climatic data using a neural computing technique [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(14): 1925-1934. DOI: 10.1002/hyp.6403.
- [28] 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, 34(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, 34(3): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2014.03.004.
- [29] 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): 1-10. (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): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2017.06.001.
- [30] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 基于温度和空气动力学的海河流域潜在蒸散发量估算方法的适用性 [J]. *水电能源科学*, 2015, 33(6): 1-5. (ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. Applicability of temperature and mass transfer based potential evapotranspiration estimation methods in Haihe River basin [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(6): 1-5. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2015-06-001.
- [31] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 等. 六种基于能量的潜在蒸散发估算方法在海河流域的适用性 [J]. *水电能源科学*, 2015, 33(1): 1-6. (ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. Applicability of six potential evapotranspiration estimation methods in Haihe River basin [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 1-6. (in Chinese))
- [32] 童雅琴, 王佩, 李小雁, 等. 黑河流域高寒草甸生态系统水分收支及蒸散发拆分研究 [J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7400-7411. (TONG Y Q, WANG P, LI X Y, et al. Water budget and evapotranspiration partition in an alpine meadow ecosystem in the upstream of the Heihe River basin, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7400-7411. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201709251729.
- [33] VALIPOUR M. Evaluation of radiation methods to study potential evapotranspiration of 31 provinces [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2015, 127(3): 289-303. DOI: 10.1007/s00703-014-0351-3.
- [34] LU J B, SUN G, MCNULTY S 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, 41(3): 621-633. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x.
- [35] SEPASKHAH A R, RAZZAGHIF. Evaluation of the adjusted Thornthwaite and Hargreaves Samani methods for estimation of daily evapotranspiration in a semi arid region of Iran [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2009, 55(1): 51-66. DOI: 10.1080/03650340802383148.
- [36] HEYDARI M M, TAJAMOLI A, GHOREISHI S H, et al. Evaluation and calibration of Blaney Criddle equation for estimating reference evapotranspiration in semi arid and arid regions [J]. *Environmental Earth*

- Sciences, 2015, 74 (5): 4053-4063. DOI: 10. 1007/s12665-014-3809-1.
- [37] AZHAR A H, PERERA B J C. Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods under southeast Australian conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010, 137(5): 268-279. DOI: 10. 1061/(asce)ir. 1943-4774. 0000297.
- [38] LIU X Y, LIN E. Performance of the Priestley Taylor equation in the semi arid climate of north China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(1): 1-17. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2004. 07. 007.
- [39] XU J Z, PENG S Z, DING J L, et al. Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid east China [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59(6): 845-858. DOI: 10. 1080/ 03650340. 2012. 683425.
- [40] LI S E, KANG S Z, ZHANG L, 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.
- [41] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008. (DENG X Y, LIU Y, LIU Z H, et al. Temporal spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994-3008. (in Chinese) DOI: 10. 5846/stxb201601270190.
- [42] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981—2010年中国气候区划. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099. (ZHENG J Y, BIAN J J, GE Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30): 3088-3099. (in Chinese) DOI: CNKI: SUN: KXTB. 0. 2013-30-011.

Application of 12 potential evapotranspiration estimation methods under changing environments in different arid and humid regions

WU Hai^{1,2}, XIA Jun^{1,2}, ZHAO Lingling³, SONG Jinxi¹, LI Tiansheng²

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University,

Wuhan 430072, China; 3. Guangzhou Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application,

Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Taking the International Food and Agriculture Organization (FAO) Penman-Monteith method (P-M method) as a benchmark, the study area is divided into 5 arid and humid regions based on humidity. From the four aspects of correlation, multi-year average, spatial distribution within the year, and parameter characteristics, and 12 potential evapotranspiration methods, including temperature method, mass transfer method, and radiation method, it is deeply divided into three types. The applicability of the estimation method was carried out in different climate zones in 31 provinces (autonomous regions and municipalities) in China. The results show that: within the research area, the monthly correlation, and multi-year average potential evapotranspiration value between radiation-based methods and the P-M method is significantly better than temperature-based methods and mass transfer-based methods, among them, the P-T method has the best estimation effect while the Hamon method has the worst; for different arid and humid regions, the correlation between temperature-based methods and P-M method, mass transfer-based methods, and P-M method is better in arid regions than in humid regions; the potential evapotranspiration estimated by the Penman method is closest to that calculated by the P-M method in arid regions; radiation-based methods (excluding the Jensen method) are better than temperature-based methods and mass transfer-based methods in different arid and humid regions, Rohwer method has the best annual distribution in all arid and humid regions. The Abtew method is the best in arid regions. PT, Mak, Harg, and Door methods are best in humid regions, while the Jensen and K Harrufa methods are the worst in all arid and humid regions. Taken together, the radiation method performs best in the research area, when the study area is humid, temperature-based methods and mass transfer-based methods are selected, if the study area is arid, Penman and Abtew methods may be preferred.

Key words: potential evapotranspiration; climate change; arid and humid regions; applicability