

引用格式: 曹永强, 刘明阳, 李元菲, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1780–1790. [Cao Y Q, Liu M Y, Li Y F, et al. Applicability of six potential evapotranspiration estimation methods in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1780–1790.] DOI: 10.18402/resci.2019.10.02

# 不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析

曹永强, 刘明阳, 李元菲, 肖春柳

(辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029)

**摘要:**准确估算潜在蒸散发(PET)是研究区域水文循环和农业灌溉管理必不可少的理论依据。本文利用辽宁省及周边27个气象站点1968—2017年的历史气象数据, 选用6种估算方法(Penman-Monteith(PM)法、Rohwer(Roh)法、Hamon(Ham)法、Hargreaves(Har)法、Makkink(Mak)法和Priestley-Taylor(PT)法)计算PET。并以PM法月值作为标准, 对5种估算方法的经验系数进行修正, 再从年、月两个时间尺度和空间尺度分析修正经验系数前后5种估算方法在辽宁省的适用情况。结果表明: ①修正前, 年尺度上, Mak法、PT法和PM法的结果较为接近, 相对误差均在25%以内。月尺度上, PT法相对误差最小为13.96%, 其次是Mak法。空间尺度上, 5种估算方法在辽东北地区估算精度较低, 整体空间差异明显, 相对来说PT法估算适用性更好。②修正后, 5种估算方法适用性和相关性都有明显的提高, 在年尺度上各估算方法与PM法计算结果年际变化大致相同, 其中Mak法和PT法最为合适, 相对误差均在10%以内, 月尺度和空间尺度上, PT法都优于其他方法。因此, 在计算辽宁省PET时, 本文推荐使用修正经验系数后的PT法, 其次是Mak法。

**关键词:**潜在蒸散发; 估算方法; 适用性; 经验系数; PM法; Mak法; 辽宁省

DOI: 10.18402/resci.2019.10.02

## 1 引言

蒸发表示液态水从地面转化为水蒸气, 最终进入大气的全过程, 主要包括各类水体、土壤和植物等水分的蒸发<sup>[1]</sup>。由于实际蒸散发(AET)观测数据的缺乏, 人们通常利用潜在蒸散发(PET)来核算实际蒸散发。潜在蒸散发是指在水分供给充足前提下, 某一下垫面达到的最大可能蒸散量<sup>[2]</sup>。因此在全球气候变化的大背景下, 能够精准测量和估算潜在蒸散发, 不仅有利于水资源管理和流域水循环规律等方面的研究, 而且对于水库设计、灌溉用水调配和生态环境治理等方面均有十分重要的现实意义<sup>[3]</sup>。

目前, Penman-Monteith(PM)模型是世界粮农组织(FAO)推荐的使用精度较高的PET估算方法<sup>[4,5]</sup>。一般关于PET时空分布的研究均是采用以PM模型计算结果为基础, 再结合气象、地理位置等影响因

素, 来探究PET时空差异的原因。例如韦振峰等<sup>[6]</sup>使用PM公式对1981—2010年陕西潜在蒸散量进行研究, 发现纬度跨度大和地形复杂是陕西潜在蒸散量空间差异的主要原因; 杨志刚等<sup>[7]</sup>利用PM公式分析了雅鲁藏布江流域近50年潜在蒸散发变化, 发现流域平均年、干季和湿季PET呈微弱的增加趋势, 增幅均在3.00 mm/10a以下。然而, 赵玲玲等<sup>[8]</sup>认为在众多潜在蒸散发量估算方法中PM法虽然具有很高的物理意义, 但是需要众多的气象数据, 不可避免地出现数据难以获取、确定参数困难等问题。同样国外学者一直在寻找数据量需求少、方法简单、适用度高且满足精度的PET估算方法来代替传统的PM法, 如基于辐射类的Mak法和PT法等, 基于温度的Linacer法和Kharrufa法等, 但这些PET估算方法往往具有特定的气候条件和地区性限制, 直接从国外引进可能产生较大的误差<sup>[9]</sup>。若推广应用则需

收稿日期: 2019-03-15, 修订日期: 2019-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579126; 51779114); 辽宁省百千万人才工程项目; 大连市科技创新基金项目(2018J13SN116)。

作者简介: 曹永强, 男, 内蒙古乌盟丰镇市人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

2019年10月

对经验系数或计算结果进行重新修正,如赵捷等<sup>[10]</sup>选择6种基于辐射的PET估算方法对黑河流域各站点潜在蒸散量进行估算,发现经过参数修正后,Mak法估算精度最高。

辽宁省是中国农业大省,作物种植面积约为3227.2 km<sup>2</sup>,受极端气候变化影响,经常出现干旱、洪涝等自然灾害,导致农作物受灾减产<sup>[11]</sup>。潜在蒸散发异常容易影响该地区的水热平衡和干湿状况,可能导致区域内水资源短缺和灌溉调配计划紊乱,严重威胁到作物的正常生长发育。针对以上问题,选择合适的PET估算方法对认识辽宁省区域水文循环规律、指导农业生产和保护生态环境就显得格外重要。本文选择辽宁省历史气象资料,以PM法计算出1968年以来辽宁省潜在蒸散发为标准,根据误差评价指标和相关性指标,分析Rohwer(Roh)法、Hamon(Ham)法、Hargreaves(Har)法、Makkink(Mak)法和Priestley-Taylor(PT)法等5种潜在蒸散发估算方法在辽宁省的应用效果;同时对5种潜在蒸散发估算方法的相对误差空间变化特征进行系统分析,进而探讨空间异质性,以期对辽宁省潜在蒸散发量估算、水文循环规律和农作物灌溉管理等方面提供理论依据。

## 2 研究区域概况、数据来源及研究方法

### 2.1 研究区域概况

辽宁省地处中国东北地区最南端,位于118°53'E—125°46'E、38°43'N—43°26'N,属于温带大陆性气候,四季分明,平均气温在2~10℃之间波动,多年平均降水量为500~1000 mm,平均太阳辐射总量在100~200 cal/cm<sup>2</sup>之间,平均日照时数2500 h左右<sup>[12-14]</sup>。由于受到地理位置、地形和气候的影响,辽宁省降水分布不均匀,下垫面差异明显,导致省内旱涝灾害多发,潜在蒸散发作为气候变化和水汽循环中缺一不可的组成环节就显得格外重要。因此本文关于辽宁省潜在蒸散发的研究对实现本地区水资源可持续发展和生态文明建设有着现实的意义。

### 2.2 数据来源及处理

选取1968—2017年辽宁省及周边27个气象站点(省内23个气象站点)的逐日气温、日照时数、平均风速、相对湿度及平均水汽压等气象资料。以上气象资料均来源于国家气象数据平台(<http://data.cma.cn/>),气象站点分布如图1所示。

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 潜在蒸散发量估算方法介绍

本文采用国际上较为公认的6种潜在蒸散发估算方法,分别为PM法、Roh法、Ham法、Har法、Mak法和PT法,每种方法都有特殊的形式和意义。PM法兼顾作物生理特征与空气动力学系数变化,适用于不同区域,但因其参数复杂、计算繁琐、基础数据要求较多具有一定局限性<sup>[15]</sup>。Roh法是一种估算自由水面蒸散发的方法,主要以空气动力学为原理,考虑风速和水汽压的影响,主要适用于干旱半干旱地区<sup>[16]</sup>。Ham法认为气温是蒸蒸发的主要驱动因子<sup>[17]</sup>。Har法是一种应用气温和太阳辐射资料的能量平衡的潜在蒸散发估算方法,主要适用于干旱半干旱草地<sup>[18]</sup>。Mak法将入射短波太阳辐射代替了净辐射同时忽略空气动力项,计算简单且应用较广,主要适用于湿润草地<sup>[19]</sup>。PT法同样忽略空气动力项,主要适用于湿润地区<sup>[20]</sup>。表1列出了各潜在蒸散发估算方法的计算公式,并对公式中各参数的物理意义进行了说明。

#### 2.3.2 精度评价标准

由于AET实际测量需要布设昂贵的大型称重式蒸渗仪,FAO专家建议将PM法计算结果看作参考潜在蒸散发,要求其他PET估算方法在新地区使用前应与其进行有效验证<sup>[21]</sup>,并且中国许多学者像夏军、赵玲玲、赵福年、廖晓芳等人<sup>[22-24]</sup>均证明PM法



图1 辽宁省气象站点分布图

Figure 1 Spatial distribution of weather stations in Liaoning Province

表1 潜在蒸散发计算方法公式表

Table 1 Formula for the calculation of potential evapotranspiration (*PET*)

| 方法名称 | 计算公式   | 说明   |
|------|--|--|
| PM法  | $PET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$                          | $\Delta$ 为饱和水汽压与空气温度关系曲线的斜率, kPa/°C; $R_n$ 为到达地面的净辐射量, MJ/m <sup>2</sup> d; $G$ 为土壤热通量密度, MJ/m <sup>2</sup> d; $\gamma$ 为湿度计常数, kPa/°C; $U_2$ 为地面上2 m高处风速, m/s; $e_s$ 为空气饱和水汽压, kPa; $e_a$ 为空气实际水汽压, kPa。各因子计算公式不再详述, 具体参考文献[12]中的计算步骤 |
| Roh法 | $PET_{Roh} = \alpha(1 + 0.27U_2)(e_s - e_a)$   | $\alpha$ 为经验系数, 取0.44 <sup>[16]</sup> ; $U_2$ 、 $e_s$ 、 $e_a$ 含义同PM法   |
| Ham法 | $PET_{Ham} = \alpha \cdot N \cdot Pt$<br>$Pt = 216.7 \times 0.6108 \times \frac{e^{\left(\frac{17.27 \times T}{T+273.3}\right)}}{T+273.3}$ | $\alpha$ 为经验系数, 取0.84 <sup>[17]</sup> ; $N$ 为日照时数, h; $T$ 为日平均气温, °C; $Pt$ 对应的饱和蒸汽密度, g/m <sup>3</sup>   |
| Har法 | $PET_{Har} = \alpha(T + 1.78) \frac{R_s}{\lambda}$   | $\alpha$ 为经验系数, 取0.0135 <sup>[18]</sup> ; $\lambda$ 为水汽化潜热, MJ/Kg; $T$ 为日平均气温, °C; $R_s$ 为太阳辐射, MJ/(m <sup>2</sup> ·d)   |
| Mak法 | $PET_{Mak} = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$   | $\alpha$ 为经验系数, 取0.7 <sup>[19]</sup> ; $\Delta$ 、 $\gamma$ 含义同PM法; $R_s$ 、 $\lambda$ 同Har法   |
| PT法  | $PET_{PT} = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda}$   | $\alpha$ 为经验系数, 取1.26 <sup>[20]</sup> ; $\Delta$ 、 $\gamma$ 、 $R_n$ 含义同PM法   |

计算的潜在蒸散发与蒸发皿蒸发量相关性较高。因此本文采用平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)以及确定性系数( $R^2$ )用于评价5种潜在蒸散发估算方法与PM法之间的精度, MAE、MRE越接近0,  $R^2$ 越接近1, 精度越高。具体公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |AE_i - E_i| \quad (1)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|AE_i - E_i|}{E_i} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (AE_i - \overline{AE_i})(E_i - \bar{E}) \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^n (AE_i - \overline{AE_i})^2 (E_i - \bar{E})^2 \right)} \quad (3)$$

式中:  $n$ 为样本总数;  $AE$ 、 $E$ 分别为其他方法计算的潜在蒸散发和PM法计算的潜在蒸散发;  $\overline{AE_i}$ 、 $\bar{E}$ 分别为其他方法计算的潜在蒸散发和PM法计算的潜在蒸散发的平均值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 辽宁省多年平均PET空间分布

利用ArcGIS对PM法计算出的辽宁省多年平均PET进行空间插值(图2)。从图中可以发现, 辽宁省近50年平均PET为462.11~1109.58 mm, 呈现出由西向东方向逐渐减少的趋势。从局部来看, 位于西部的朝阳站、叶伯寿站以及彰武站一带的PET值较高, 均值在1005.51 mm左右, 这主要是由于辽西北地区紧邻内蒙古草原沙化带, 常年日照强烈、风沙大、降雨稀少<sup>[25]</sup>。低值区出现在辽东的宽甸站、

桓仁站以及清原站一带, 均值在493.02 mm左右, 这主要是由于这一带受植被覆盖面积大和黄渤海间接影响, 湿度较大, 降水较多, 因此PET较低。

#### 3.2 未修正经验系数时估算结果分析

##### 3.2.1 辽宁省潜在蒸散发年值估算

由于辽宁省冬季气温较低, 使得某些估算结果出现负值, 因此本文参考前人研究, 在计算结果累加时将其剔除<sup>[10]</sup>。根据6种不同的方法, 估算辽宁省近50年间PET随时间变化的曲线(图3), 从图中可以看出, PM法计算结果总体呈现下降的趋势, PET值在595.07~804.3 mm之间波动, 其中最小值出现在2015年, 最大值则出现在1986年, 这与吴霞

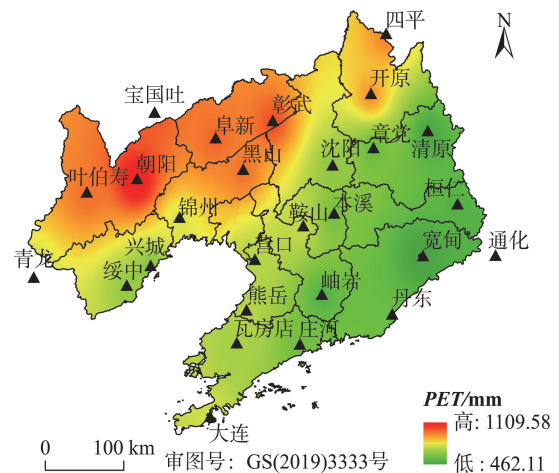


图2 辽宁省近50年平均PET空间分布图

Figure 2 Average potential evapotranspiration (PET) spatial distribution map of Liaoning Province in the past 50 years

2019年10月

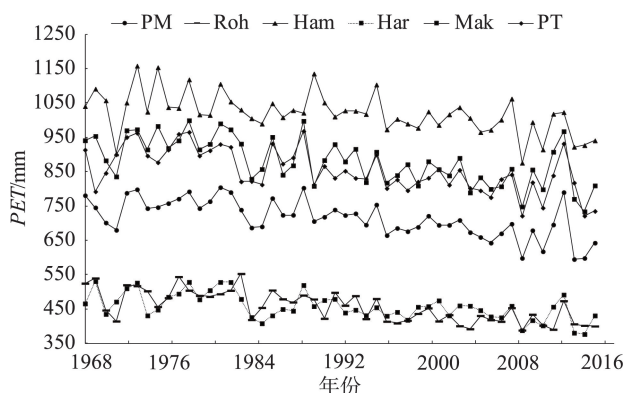


图3 未修正经验系数时6种估算方法年PET

Figure 3 Results of six methods of estimation for annual *PET* when the empirical coefficient is not corrected

等人<sup>[26]</sup>的研究成果基本一致。Mak法和PT法的估算结果与PM法的结果相差较小,且年际变化趋势大致相同,基本上同时达到波峰和波谷,表明这两种方法可以较好地反映出辽宁省PET的年际变化,而其他方法差异较明显,这与这些公式使用的经验系数选用固定值,没有考虑时间、下垫面等因素的变化有一定关系<sup>[27]</sup>。

根据精度评价方法,将5种估算方法计算出的PET值进行精度量(表2)。从表中可以发现,PM法计算出的近50年辽宁省PET多年平均值为714.07 mm,其余5种计算结果在465.55~1019.59 mm之间,计算结果参差不齐。从精度评价指标来看,PT法和Mak法误差较小,为20.59%、23.27%,Ham法误差最大为42.77%。从 $R^2$ 指标来看,Mak法是5种估算方法中 $R^2$ 最高的,为0.87,其次为PT法。因此结合上文,在未修正经验系数时,Mak法、PT法与PM法计算结果较为相近,估算辽宁省PET年值的效果较

表2 未修正经验系数时6种估算方法年PET效果

Table 2 Results of six estimation methods for annual potential evapotranspiration (*PET*) effect when the empirical coefficients are not corrected

| 方法名称 | PET年<br>平均值/mm | 平均绝对<br>误差/mm | 平均相对<br>误差/% | 确定性系数 |
|------|----------------|---------------|--------------|-------|
| PM法  | 714.07         | *             | *            | *     |
| Roh法 | 456.55         | 257.25        | 30.53        | 0.65  |
| Ham法 | 1019.59        | 305.52        | 42.77        | 0.59  |
| Har法 | 456.68         | 257.39        | 36.02        | 0.73  |
| Mak法 | 880.26         | 166.19        | 23.27        | 0.87  |
| PT法  | 852.86         | 138.79        | 20.59        | 0.78  |

好、精度较高。造成三者计算结果相近可能是由于辽宁省近50年PET对太阳辐射的变化较为敏感<sup>[28]</sup>,这与Mak法和PT法的计算原理大致相同,故计算结果相近。

### 3.2.2 辽宁省潜在蒸散发月值估算

为了更好地精准分析辽宁省5种估算方法的应用效果和变化规律,本文对辽宁省PET月值进行研究(图4、表3)。从图4中可以发现,6种估算方法所得到的PET月值曲线变化趋势基本一致,均呈现出“两边低,中间高”的特征。Mak法、PT法与PM法的曲线最为接近,但夏季月值略高。Ham法曲线峰值出现时间(7月)比其他估算方法(6月)滞后一个月,这可能与将温度作为唯一考虑的气象因子有关。从表3来看,除Ham法以外,其余估算方法的确定性系数均大于0.9。在5种估算方法中Mak法和PT法的相对误差均在20%以内,说明其误差较小。

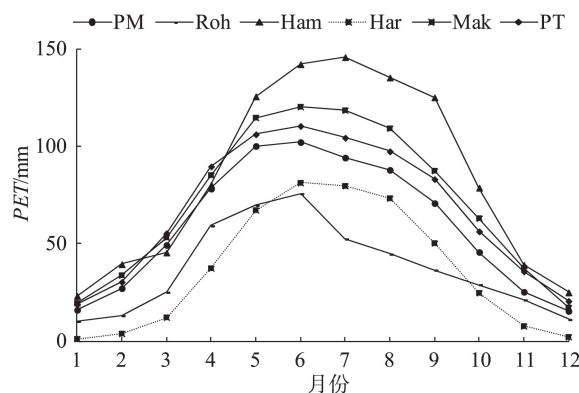


图4 未修正经验系数时6种估算方法月PET

Figure 4 Results of six methods of estimation for monthly potential evapotranspiration (*PET*) when the empirical coefficient is not corrected

表3 未修正经验系数时6种估算方法月PET估算效果

Table 3 Results of six estimation methods for monthly potential evapotranspiration (*PET*) effect when the empirical coefficients are not corrected

| 方法名称 | PET月<br>平均值/mm | 平均绝对<br>误差/mm | 平均相对<br>误差/% | 确定性系数 |
|------|----------------|---------------|--------------|-------|
| PM法  | 59.53          | *             | *            | *     |
| Roh法 | 38.02          | 19.05         | 38.83        | 0.90  |
| Ham法 | 85.72          | 18.45         | 37.28        | 0.88  |
| Har法 | 37.54          | 24.04         | 63.27        | 0.91  |
| Mak法 | 74.43          | 9.79          | 18.95        | 0.97  |
| PT法  | 69.10          | 6.19          | 13.96        | 0.99  |

因此,在未修正经验系数时估算辽宁省  $PET$  月值,  $PT$  法与  $PM$  法最为接近,其次是  $Mak$  法。

### 3.2.3 辽宁省潜在蒸散发估算方法空间分布

为了全面分析5种潜在蒸散发估算方法在辽宁省地区的适用性,仅仅从年尺度、月尺度研究还不

够充分,为此本文进一步对各估算方法在空间尺度的适用性进行分析。以  $PM$  法计算的  $PET$  值空间分布为标准,对其余估算方法较  $PM$  法的相对误差 ( $MRE$ ) 进行空间特征插值,进而分析出5种估算方法在空间尺度上的使用效果(图5)。

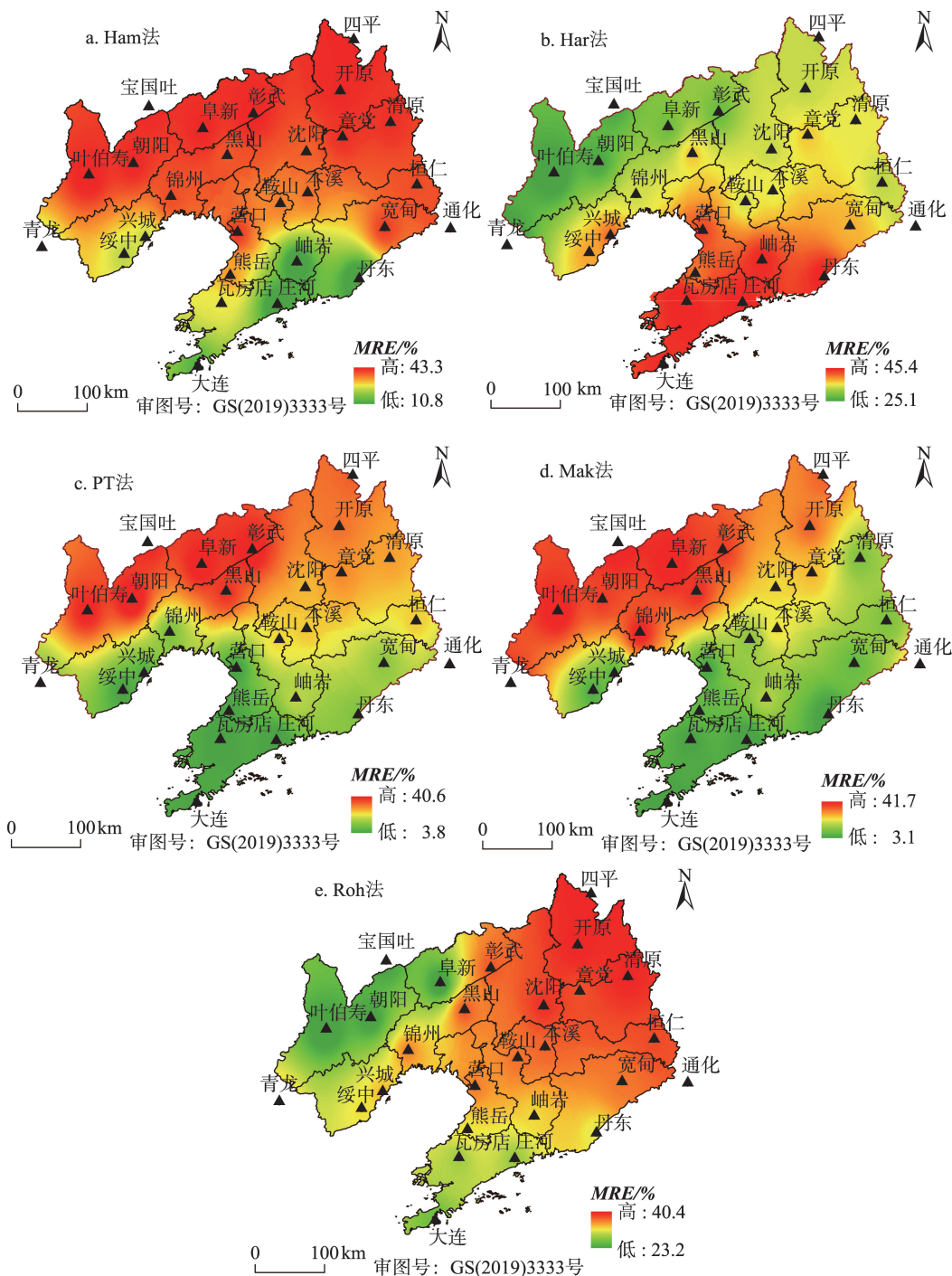


图5 未修正经验系数时5种估算方法的  $MRE$  空间特征

Figure 5 Mean relative error ( $MRE$ ) spatial characteristics of five estimation methods when the empirical coefficients are not corrected

2019年10月

从图2和图5可以看出,未修正经验系数时5种估算方法在整个辽宁省适用情况和 $MRE$ 的空间变化差异性较明显,对于开原、章党、沈阳和清原等辽中部偏北地区误差较大。5种方法中,PT法在整个区域适用性最好,平均 $MRE$ 为20.59%,辽宁省南部尤其是沿海地区误差最小,辽西北地区误差较大。而Ham法平均 $MRE$ 最大,空间上呈现出由北向南 $MRE$ 越来越小的趋势,低值区出现在丹东、庄河辽东沿海一带和岫岩。结合各估算方法 $MRE$ 空间变化特征和已有的辽宁省各气象因子敏感性变化规律分析<sup>[28]</sup>,辽宁省各估算方法 $MRE$ 与各自气象因子敏感性空间变化大致一致,说明各估算方法的适用范围差异与其主要气象因子空间分布和敏感性变化有关。未修正经验系数时,5种估算方法在辽东北地区估算精度较低,PT法估算精度优于其他估算方法。

### 3.3 辽宁省潜在蒸散发估算方法参数修正

辽宁省潜在蒸散发估算方法较PM法在计算结果、变化趋势和适用地区都存在较大差异性,因此需要对5种估算方法的经验系数进行修正,以期提高潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性和可靠性。对比上文统计结果发现,5种估算方法计算的月 $PET$ 值与PM法计算的回归效果更为显著,因此本文选择以5种估算方法计算的月 $PET$ 值为自变量,PM法计算的月 $PET$ 值为因变量,建立27个站点的线性回归方程,斜率即为经验系数的修正倍数,然后对经验系数进行回归修正,进而提出符合各站点特征的估算公式,最终达到提高精度的效果,具体修正结果见表4。

### 3.4 修正经验系数后估算结果分析

#### 3.4.1 辽宁省潜在蒸散发年值估算

修正经验系数后,利用6种方法对辽宁省近50

表4 辽宁省潜在蒸散发估算方法经验系数修正结果

Table 4 Correction of empirical coefficients of estimation methods for potential evapotranspiration ( $PET$ ) in Liaoning Province

| 方法名称 | 原始经验系数 | 修正后平均经验系数 |
|------|--------|-----------|
| Roh法 | 0.44   | 1.27      |
| Ham法 | 0.84   | 0.56      |
| Har法 | 0.0135 | 0.0142    |
| Mak法 | 0.70   | 0.71      |
| PT法  | 1.26   | 1.19      |

年间 $PET$ 进行重新估算,制作年际变化曲线和精度量化表(图6和表5)。从图6中可以发现,经过修正后5种估算方法计算结果与PM法结果的年际变化趋势大致相同,基本上同时出现波峰和波谷。Roh法和Har法计算结果仍然低估 $PET$ 值,而其他3种方法则高估 $PET$ 值。从表5中可以发现,修正经验系数后,5种估算方法计算结果不同程度地接近PM法,精度明显提高,Mak法和PT法相对误差较修正前减小至10%以内,Ham法也缩小至17.46%。从 $R^2$ 指标来看,5种估算方法相关性均较修正前均有明显提高,全部在0.7以上,其中Har法、Mak法和PT法则在0.8以上,说明整体相关性较好。综上,在修正经验系数后,Mak法和PT法用于估算辽宁省年 $PET$ 效果最好、精度最高。修正前后Mak法和PT法均对辽宁省年 $PET$ 估算效果较好,再一次证明辽宁省 $PET$ 对太阳辐射的变化较为敏感。

#### 3.4.2 辽宁省潜在蒸散发月值估算

为检查经验系数的修正效果,对辽宁省 $PET$ 月

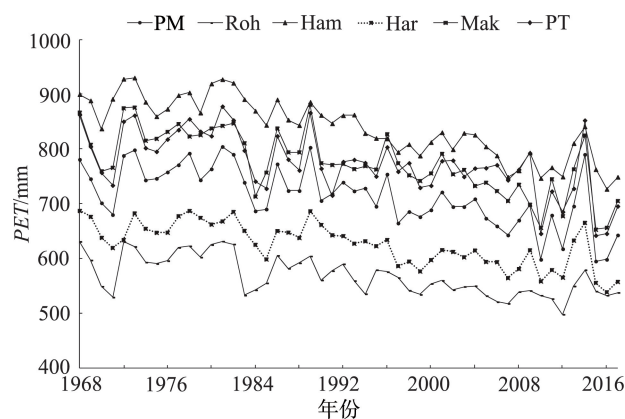


图6 修正经验系数后6种估算方法年 $PET$ 变化(1968-2017)

Figure 6 Results of six methods of estimation after the correction of the empirical coefficients, 1968-2017

表5 修正经验系数后6种估算方法年 $PET$ 效果

Table 5 Results of six estimation methods of annual potential evapotranspiration ( $PET$ ) effect after the correction of the empirical coefficients

| 方法名称 | $PET$ 年<br>平均值/mm | 平均绝对<br>误差/mm | 平均相对<br>误差/% | 确定性系数 |
|------|-------------------|---------------|--------------|-------|
| PM法  | 714.07            | *             | *            | *     |
| Roh法 | 567.95            | 146.12        | 21.00        | 0.74  |
| Ham法 | 837.72            | 123.65        | 17.46        | 0.70  |
| Har法 | 626.01            | 88.06         | 12.33        | 0.82  |
| Mak法 | 776.26            | 62.19         | 9.72         | 0.88  |

值进行重新估算,绘制出 $PET$ 月变化趋势和精度量化表(图7和表6)。从图7中看出,修正经验系数后,6种方法所得到的 $PET$ 月份变化趋势基本一致,均呈现出“低-高-低”的特点。除Roh法以外,其余4种估算方法得到的夏季 $PET$ 值均略高于PM法。从表6中可以发现,修正经验系数后,5种方法估算的月 $PET$ 值精度和相关性较修正前都有不同程度的提高。除Roh法和Har法外,其余3种方法估算 $PET$ 月值略高于PM法。Har法估算的 $PET$ 月平均值虽然与PM法较接近,但平均绝对误差和平均相对误差却是5种估算方法中最高的,这主要是由于Har法估算的各月 $PET$ 值与PM法相差较大造成的。修正后,PT法的相对误差在5种估算方法中最小,为8.01%。因此,修正经验系数后,若考虑对辽宁省潜在蒸散发 $PET$ 月值估算,5种估算方法中推荐使用PT法。

### 3.4.3 辽宁省潜在蒸散发方法空间分布

对修正后各站点 $PET$ 估算方法的相对误差( $MRE$ )进行空间特征插值,从而得出5种估算方法修正经验系数后在空间尺度上的应用效果(图8),对比图5和图8可以看出,经过修正经验系数后,5种估算方法在整个辽宁省区域的 $PET$ 估算精度均有提高,但仍然存在对辽东北地区估算精度不高的问题,这可能是由于辽东北地区纬度较高,多为山林地,气候影响因素多样,下垫面复杂,导致本修正方法修正效果不明显。其中PT法在整个区域适用性最好,平均 $MRE$ 为7.98%,而Har法精度较修正前提高最多。Roh法修正效果虽然有明显的提高,但

是其适用性仍然是5种估算方法中最低的,这可能与只考虑了空气动力项有关。对比修正前后,各估算方法 $MRE$ 高值区均有所变化,这说明修正经验系数在辽宁省不同地区的修正效果并不一致,具有一定地域特点。因此综上,修正经验系数后,5种估算方法适用性均有不同程度的提高,其中PT法估算误差小于其他估算方法。

## 4 讨论

不同潜在蒸散发的估算方法所得到的结果差异不尽相同,这不仅受各站点地理位置、气候条件和下垫面情况影响,还与方法、参数的选择有关。Mak法和PT法无论修正前后相对于另外几种方法均有更好的适用效果,主要原因是PM法是由能量平衡学和空气动力学组成的计算公式,包括辐射能量项和空气动力项,辽宁省位于东北三省最南端,紧邻黄渤海,饱和水汽压差相对较小,空气动力项对潜在蒸散发贡献率较小,则辐射能量项为主导部分。而Mak法和PT法恰恰是以辐射项为主的估算方法,故适用效果较好。

这些年辽宁省暖湿现象严重,导致潜在蒸散发变化巨大,因此能够准确快速估算潜在蒸散发至关重要。但现阶段水文模型的水文循环模拟中常出现其他简化的估算公式模拟结果与PM法模拟结果相当甚至效果更好的现象,陈桂华等<sup>[29]</sup>学者认为PM法需要数据众多,且其中许多参数获取难度较大,对于许多传统概念型水文模型来讲,PM法对于数据输入过于敏感,可能出现不兼容的现象。因此,在一定条件下,修正简化后的潜在蒸散发估算公式不仅可以发挥其所需数据量少、计算方式简单等特

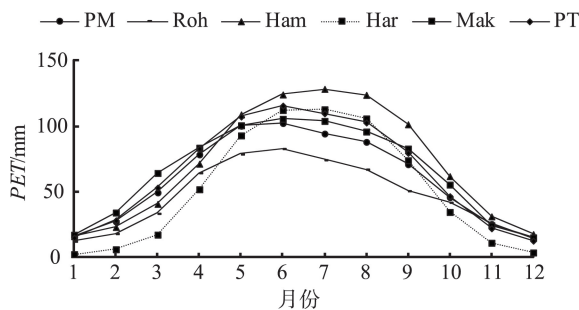


图7 修正经验系数后6种方法月 $PET$ 值

Figure 7 Results of monthly potential evapotranspiration ( $PET$ ) value of the six estimation methods after the correction of the empirical coefficients

表6 修正经验系数后6种估算方法月 $PET$ 值效果

Table 6 Results of six estimation methods monthly potential evapotranspiration ( $PET$ ) value effect after the correction of the empirical coefficients

| 方法名称 | $PET$ 月<br>平均值/mm | 平均绝对<br>误差/mm | 平均相对<br>误差/% | 确定性系数 |
|------|-------------------|---------------|--------------|-------|
| PM法  | 59.53             | *             | *            | *     |
| Roh法 | 47.05             | 12.84         | 24.68        | 0.90  |
| Ham法 | 70.72             | 9.69          | 14.52        | 0.88  |
| Har法 | 52.83             | 18.09         | 53.11        | 0.91  |
| Mak法 | 65.24             | 5.70          | 12.94        | 0.97  |
| PT法  | 64.63             | 4.77          | 8.01         | 0.99  |

2019年10月

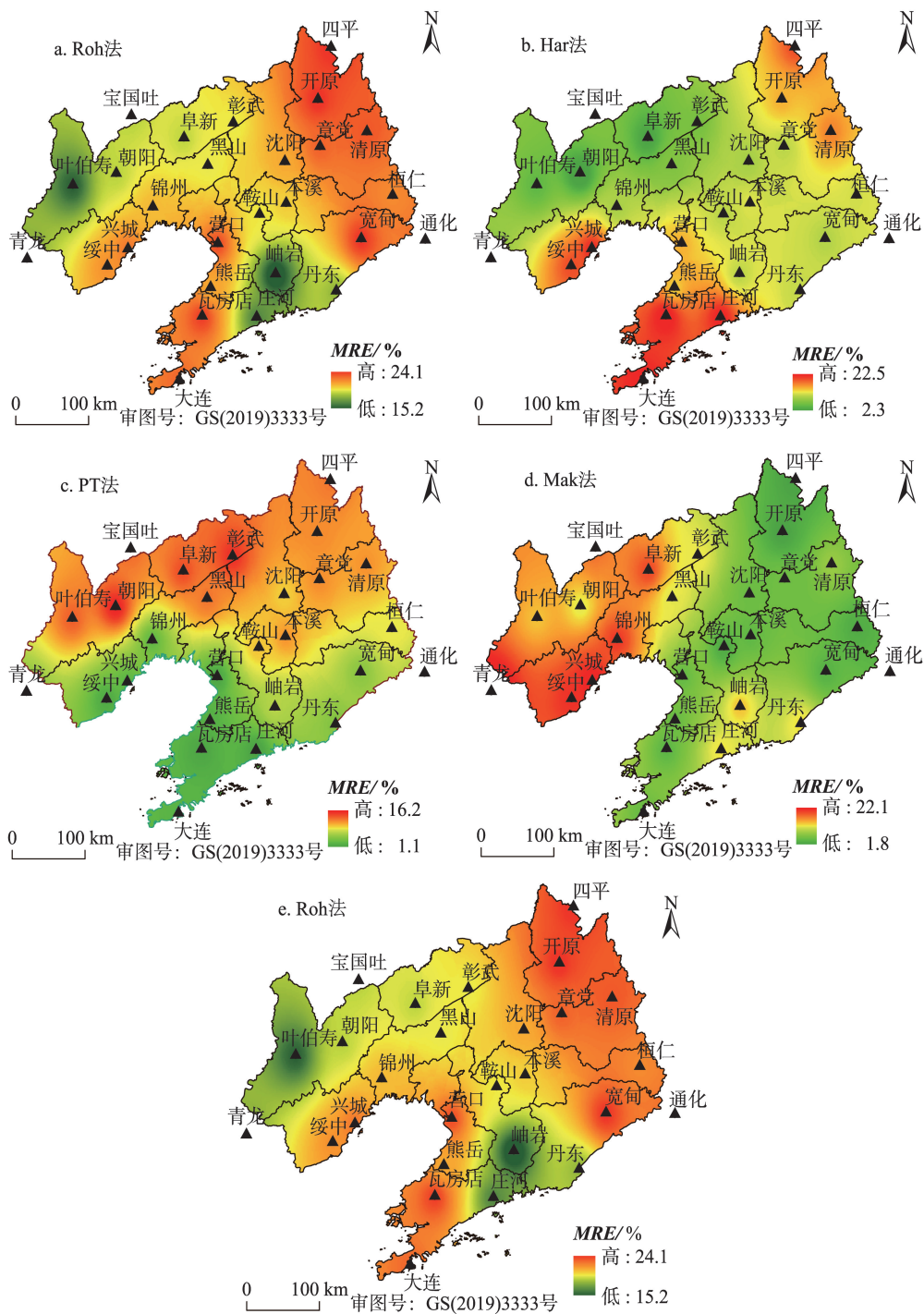


图8 修正经验系数后5种估算方法的MRE空间特征

Figure 8 Mean relative error (MRE) spatial characteristics of five estimation methods after the correction of the empirical coefficients

点,同时还可以达到一定的精度要求,这为今后辽宁省区域水资源模拟与配置、农业规划管理提论了必不可少的理论支撑。

## 5 结论

本文以PM法计算的1968年以来辽宁省PET

值为标准,根据误差评价指标和相关性指标,对Roh法、Ham法、Har法、Mak法和PT法等5种潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性进行对比分析,可得出以下几点结论:

(1)采用初始经验系数时,Mak法和PT法适用

于估算辽宁省 *PET* 年值。对于 *PET* 月值的估算, PT 法和 Mak 法与 PM 法估算结果的误差较小且相关性较高。空间上, 5 种估算方法在辽宁省的适用性存在明显的空间差异性, 其中 PT 法估算精度优于其他估算方法, Ham 法误差较大。

(2) 修正经验系数后, 5 种估算方法各项数据均接近 PM 法的计算结果且年际变化趋势大致相同, 其中 Mak 法和 PT 法适用性最好、精度最高。对于 *PET* 月值的估算, PT 法是 5 种估算方法中最精确的方法, 相对误差为 8.01%。修正经验系数后, 5 种估算方法在空间尺度上适用性均有不同程度的提高, 其中 PT 法估算误差小于其他估算方法, 但仍然存在对开原、章党等辽东北地区精度不高的问题。

总的来说, PT 法在辽宁省潜在蒸散发估算的应用中适用效果最好, 其次是 Mak 法。本文仅以 PM 法月值为标准, 对 5 种估算方法经验系数进行修正, 但无论哪种估算方法在修正后仍会在某些区域出现误差较大的问题, 因此选用合适的修正方法是下一阶段的主要研究重点。

## 参考文献(References):

- [1] 钟巧, 焦黎, 李稚, 等. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 103–112. [Zhong Q, Jiao L, Li Z, et al. Spatiotemporal evolution and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Bosten Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 103–112.]
- [2] Li G, Zhang F, Jing Y, et al. Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013[J]. Science of The Total Environment, 2017, 596–597: 256–265.
- [3] 王飞宇, 占车生, 胡实, 等. 典型山地蒸散发时空变化模拟研究[J]. 资源科学, 2017, 39(2): 276–287. [Wang F Y, Zhan C S, Hu S, et al. Simulation of spatio-temporal changes in evapotranspiration in typical mountains[J]. Resources Science, 2017, 39(2): 276–287]
- [4] Han J Y, Zhao Y, Wang J H, et al. Effects of different land use types on potential evapotranspiration in Beijing–Tianjin–Hebei Region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6): 922–934.]
- [5] 韩松俊, 张宝忠. 基于 Penman 方法和互补原理的蒸散发研究历程与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(09): 1158–1168. [Han S J, Zhang B Z. Research and prospect of evapotranspiration based on Penman method and complementary principle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(09): 1158–1168.]
- [6] 韦振锋, 陈思源, 黄毅. 1981–2010 年陕西潜在蒸散量时空特征及其对气候因子的响应[J]. 地理科学, 2015, 35(8): 1033–1041. [Wei Z F, Chen S Y, Huang Y. Spatial and temporal characteristics of potential evaporation and climatic factors on the impact in Shaanxi Province in 1981–2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 1033–1041.]
- [7] 杨志刚, 唐小萍, 路红亚, 等. 近 50 年雅鲁藏布江流域潜在蒸散量的变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1263–1268. [Yang Z G, Tang X P, Lu H Y, et al. The changes of potential evapotranspiration over Yarlung Zangbo River Basin during 1961–2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1263–1268.]
- [8] 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, 68(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, 68(1): 127–136.]
- [9] 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.]
- [10] 赵捷, 徐宗学, 左德鹏, 等. 基于辐射的潜在蒸散发量估算方法在黑河流域的适用性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 107–114. [Zhao J, Xu Z X, Zuo D P, et al. Radiation-based methods to estimate potential evapotranspiration in the Heihe River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(10): 107–114.]
- [11] 张宪冬. 辽宁省农业气象灾害类型及防御措施[J]. 农民致富之友, 2015, (24): 289. [Zhang X D. Types and defensive measures of agricultural meteorological disasters in Liaoning Province[J]. Friends of Farmers' Wealth, 2015, (24): 289.]
- [12] 周晓宇, 赵春雨, 张新宜, 等. 1961–2009 年辽宁省气温、降水变化特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 87–93. [Zhou X Y, Zhao C Y, Zhang X Y, et al. Climate change characteristics and abrupt change analysis for Liaoning Province, 1961–2009[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(10): 87–93.]
- [13] 杨东, 刘洪敏, 郭盼盼, 等. 1956–2008 年辽宁省日照时数变化特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 885–891. [Yang D, Liu H M, Guo P P, et al. Characteristic on sunshine duration in Liaoning Province during the period from 1956 to 2008[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(6): 885–891.]
- [14] 刘新安, 范辽生, 王艳华, 等. 辽宁省太阳辐射的计算方法及其分布特征[J]. 资源科学, 2002, 24(1): 82–87. [Liu X A, Fan L S, Wang Y H, et al. The calculation methods and distributive charac-

2019年10月

- ter of solar radiation in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2002, 24(1): 82-87.]
- [15] 陶新娥, 陈华, 许崇育. 潜在蒸散发公式2种修正方法及其在闽江流域的应用研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(3): 12-19. [Tao X E, Chen H, Xu C Y. Potential evapotranspiration equations: Two modification methods and their application in Minjiang River Basin[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2014, 9(3): 12-19.]
- [16] 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.]
- [17] 秦年秀, 陈喜, 薛显武, 等. 潜在蒸散发量计算公式在贵州省适用性分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 357-363. [Qin N X, Chen X, Xue X W, et al. An applicability study of potential evapotranspiration models in Guizhou Province[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 357-363.]
- [18] Hargreaves G H. Moisture availability and crop production[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1975, 18(5): 980-984.
- [19] Makkink G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters [J]. International Journal of Water Engineering, 1957, 11(3): 277-288.
- [20] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81-92.
- [21] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12-18. [Liu X Y, Li Y Z, Wang Q S. Evaluation on several temperature: Based methods for estimating reference crop evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 12-18.]
- [22] 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 Basin[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 1-6.]
- [23] 赵福年, 赵铭, 王莺, 等. 石羊河流域1960-2009年参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 560-568. [Zhao F N, Zhao M, Wang Y, et al. Variation characteristics of reference evapotranspiration and pan evaporation during 1960-2009 in Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4): 560-568.]
- [24] 廖晓芳, 钱胜, 彭彦铭, 等. 蒸发皿蒸发和潜在蒸散发对气候变化的响应[J]. 人民黄河, 2010, 32(11): 42-44. [Liao X F, Qian S, Peng Y M, et al. Response of evaporation of evaporator and potential evapotranspiration to the climate variation[J]. Yellow River, 2010, 32(11): 42-44.]
- [25] 曹永强, 李维佳. 辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7276-7287. [Cao Y Q, Li W J. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in Liaoning Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7276-7287.]
- [26] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 等. 1961-2015年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 964-977. [Wu X, Wang P J, Huo Z G, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in China from 1961 to 2015[J]. Resources Science, 2017, 39(5): 964-977.]
- [27] 王声锋, 段爱旺, 张展羽. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 P-M 公式的对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 29-33. [Wang S F, Duan A W, Zhang Z Y. Comparison and analysis of Hargreaves equation and Penman-Monteith equation during the different hydrological years in the semi-arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 29-33.]
- [28] 曹永强, 高璐, 袁立婷, 等. 辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析[J]. 地理科学, 2017, 37(9): 1422-1429. [Cao Y Q, Gao L, Yuan L T, et al. Analysis of potential evaporation and its sensitivity in Liaoning Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1422-1429.]
- [29] 陆桂华, 吴志勇, 何海. 水文循环过程及定量预报[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [Lu G H, Wu Z Y, He H. Hydrological Cycle Process and Quantitative Forecast[M]. Beijing: Science Press, 2010.]

## Applicability of six potential evapotranspiration estimation methods in Liaoning Province

CAO Yongqiang, LIU Mingyang, LI Yuanfei, XIAO Chunliu

(School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Accurate estimation of potential evapotranspiration (*PET*) is a basis for studying regional hydrological cycles and agricultural irrigation management. In this study, six estimation methods Penman- Monteith (PM) method, Rohwer (Roh) method, Hamon (Ham) method, Hargreaves (Har) method, Makkink (Mak) method, and Priestley-Taylor (PT) method were tested based on historical meteorological data of 27 meteorological stations in Liaoning Province and surrounding areas from 1968 to 2017. Potential evapotranspiration was calculated by the Makkink (Mak) method and the Priestley-Taylor (PT) method. The PM method was used as the standard to correct the empirical coefficients of the five estimation methods. Then, the application of the five estimation methods for annual and monthly *PET* in Liaoning Province before and after the correction of the empirical coefficients was analyzed. The results show that: (1) Before the correction, the results of the Mak, PT, and PM methods are relatively close, and the relative errors are all within 25%. On the monthly scale, the relative error of the PT method is the lowest (13.96%), followed by the Mak method. Spatially, the five estimation methods have lower estimation accuracy in the northeastern part of the province, and the overall spatial difference is obvious. Comparatively, the PT method is more applicable. (2) After the amendment, the applicability and correlation of the five estimation methods are clearly improved. On the annual scale, the estimation results are almost the same as the inter-annual changes of the PM method. The Mak and PT methods are most suitable, and their relative errors are all within 10%. On the monthly scale and with regard to the spatial pattern, the PT method is superior to other methods. Therefore, when calculating *PET* in Liaoning Province, we recommend using the PT method after the correction of the empirical coefficients, followed by the Mak method.

**Key words:** potential evapotranspiration; estimation method; applicability; empirical coefficient; PM method; Mak method; Liaoning Province