

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.026

# 云南省不同生态水文分区参考作物蒸散量算法适用性评价

符娜<sup>1</sup> 宋孝玉<sup>1</sup> 夏露<sup>1</sup> 李蓝君<sup>1</sup> 孟春芳<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048;

2. 新乡水文水资源勘测局, 新乡 453000)

**摘要:** 将云南省分为3个区域(I, 滇西—滇西南山原与高山多水区; II, 滇西北—滇东北山原河谷中水区; III, 滇中北高原中水—少水区), 基于36个气象站点1958—2013年逐日气象资料, 以Penman—Monteith法为标准, 利用线性回归法、均方根误差、平均偏差和Nash—Sutcliffe系数对Hargreaves—Samani法、Irmak—Allen法、Priestley—Taylor法、Makkink法、1948—Penman法、Penman—Van Bavel法、Turc法、FAO 24 Radiation法和Jensen—Haise法9种算法的计算精度进行对比。结果表明: 1948—Penman法在云南省的适用性最强、计算精度最高, FAO 24 Radiation法与Jensen—Haise法误差较大, 其中I区适用性最好的是Hargreaves—Samani法, II、III区1—6月份为1948—Penman法, 7—12月份为Priestley—Taylor法; 在相对误差空间分布中, I区Hargreaves—Samani法、Irmak—Allen法、Priestley—Taylor法、1948—Penman法的相对误差均在20%以下; II、III区中, Priestley—Taylor法、1948—Penman法的相对误差较小, 为0~20%, 同时在III区中, Irmak—Allen法的相对误差也相对较小; 因此, 计算云南省的参考作物蒸散量时, 整个区域推荐1948—Penman法, 滇西—滇西南山原与高山多水区推荐Hargreaves—Samani法, 滇西北—滇东北山原河谷中水区和滇中北高原中水—少水区推荐Priestley—Taylor法。

**关键词:** 参考作物蒸散量; 云南省; 生态水文分区; 气象因子; 计算方法; 适用性评价

**中图分类号:** S161.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0208-10

## Adaptation Evaluation for Reference Evapotranspiration Calculation Methods in Different Eco-hydrological Regionalization of Yunnan Province

FU Na<sup>1</sup> SONG Xiaoyu<sup>1</sup> XIA Lu<sup>1</sup> LI Lanjun<sup>1</sup> MENG Chunfang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Xinxiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** Adaptation evaluation for reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) methods can obtain simplified calculation methods of  $ET_0$  under the conditions of lacking meteorological data and increase the accuracy with the lack of meteorological data in the large area. To obtain the best calculation methods and assess its adaptability, Yunnan Province was divided into three regions, including the mountain plateau and high mountain water abundance region in western and southwestern of Yunnan (I), the mountain plateau and river valley water middle region in northwestern and northeastern of Yunnan (II) and the plateau water middle and shortage region in central and northern of Yunnan (III), and the daily  $ET_0$  was calculated in 36 stations from 1958 to 2013. Ten kinds of methods, such as FAO 56 Penman—Monteith, Hargreaves—Samani, Irmak—Allen, Priestley—Taylor, Makkink, 1948 Penman, Penman—Van Bavel, Turc, FAO 24 Radiation and Jensen—Haise, were used to calculate the daily  $ET_0$  of each station of Yunnan Province. Penman—Monteith method was used as the standard method to calculate the daily  $ET_0$  because of its accuracy, and the precision of other methods was evaluated by the linear regression coefficient, the daily relative root mean square error, the mean bias error and the coefficient of Nash—Sutcliffe. The results showed that 1948—Penman method had the strongest applicability and the highest calculation

收稿日期: 2016-09-13 修回日期: 2016-10-20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51239009、41171034)、陕西省水利科技计划项目(2016slkj-11)和陕西省教育厅省级重点实验室科研计划项目(14JS059)

**作者简介:** 符娜(1990—), 女, 博士生, 主要从事水文学及水资源研究, E-mail: fnsnow@163.com

**通信作者:** 宋孝玉(1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究, E-mail: songxy@xaut.edu.cn

accuracy, and Radiation FAO 24 method and Jensen - Haise method had large error. Among all the methods, Hargreaves - Samani method was the best one in region I, and 1948 - Penman method was the most appropriate from January to June while Priestley - Taylor method was the most suitable from July to December of each year for regions II and III. In the spatial distribution of relative error, the relative error of Hargreaves - Samani method, Irmak - Allen method and Priestley - Taylor method was below 20%, so the three methods were appropriate for region I, and the relative error of Priestley - Taylor method and 1948 - Penman method was in the range of 0 ~ 20%, as the minimum in regions II and III, and the relative error of Irmak - Allen method was small in region II. When reference crop evapotranspiration was calculated in Yunnan Province, as a consequence, 1948 - Penman method was recommended in the whole region, Hargreaves - Saman method was recommended in mountain plateau and high mountain water abundance region in western and southwestern of Yunnan, Priestley - Taylor method was recommended in mountain plateau and river valley water middle region in northwestern and northeastern of Yunnan.

**Key words:** reference evapotranspiration; Yunnan Province; eco-hydrological regionalization; meteorological factors; calculation methods; adaptation evaluation

## 引言

参考作物蒸散量 (Reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ ) 作为计算作物需水量及确保农田水分科学管理的关键性参数<sup>[1-2]</sup>, 是一项重要的农业与水文变量, 对灌溉制度制定、流域规划及灌溉排水工程设计具有指导意义<sup>[3]</sup>, 同时也是区域水资源开发、利用与管理与农作物种植结构调整、区划与布局的重要依据<sup>[4]</sup>。目前  $ET_0$  的确定方式主要分为实际测定或数学模拟两种, 但在实际中通过仪器测定蒸散量具有一定的局限性, 限制于一定区域且工作量大, 造成结论难以推广, 数学模拟法是基于各种气象因子建立数学模型估算, 工作量相对较小, 但由于不同的假定情况及输入要求等导致各种估算方法的精度存在差异<sup>[5]</sup>, 进而对估算结果有较大影响, 因此, 研究不同区域参考作物蒸散量算法的适用性非常必要。

按照研究区域具体特征, 世界各国学者提出了诸多计算  $ET_0$  的方法, 主要分为辐射法、温度法、综合法和经验法等 4 种类型, 具体有 50 多种计算方法<sup>[6]</sup>。1998 年, 国际粮农组织 (FAO) 提出了修正的 Penman - Monteith 公式<sup>[7]</sup>, FAO 56 Penman - Monteith (P - M) 法综合考虑了影响蒸散的各种因素, 在气候条件差异较大地区 (干旱、湿润或风速变化大等) 的应用中取得了较好结果<sup>[8]</sup>, 国内一些研究成果也证实 P - M 法具有严谨的理论依据和较高的计算精度<sup>[9-12]</sup>, 作为不同区域  $ET_0$  计算的标准方法被广泛认可。但该方法计算过程较复杂, 并且对气象资料的要求高, 在气象资料不完整的区域难以应用, 因此很多简化的  $ET_0$  估算方法应运而生, 例如辐射法中的 Priestley - Taylor 法<sup>[13]</sup>、温度法中的 Hargreaves - Samani 法<sup>[14]</sup>、综合

法中的 Penman - Van Bavel 法<sup>[15]</sup> 和经验法中的 Irmak - Allen 法<sup>[16]</sup> 等。但这些计算方法易受研究区自然环境、地形地貌、气候特征等因素以及模型数学机理的影响, 其不同区域的计算精度存在显著差异, 因而, 各  $ET_0$  简化算法在应用时需根据不同区域情况进行适用性评价。

云南省河流众多, 水资源丰富, 但受降水量时空分布不均的影响, 季节性干旱缺水问题突出, 水资源供需问题日益显著。省内地形地貌复杂多变、气候条件特殊且差异较大, 受气候因子等的影响,  $ET_0$  在不同区域变化显著, 但目前针对云南省不同分区  $ET_0$  简化算法的研究鲜见报道, 进而造成了水资源配置上的盲目性。本文根据云南省不同生态水文分区, 采用应用较广泛的 FAO 56 Penman - Monteith 法、Hargreaves - Samani 法、Irmak - Allen 法、Priestley - Taylor 法、Makkink 法、1948 - Penman 法、Penman - Van Bavel 法、Turc 法、FAO 24 Radiation 法和 Jensen - Haise 法等 10 种方法分别计算各生态水文分区参考作物蒸散量, 并以 FAO 56 Penman - Monteith 法作为标准方法, 对其他 9 种算法进行评价, 寻求适合云南省不同生态水文分区的  $ET_0$  简化算法, 为云南省农业水资源优化管理和高效利用提供科学依据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

云南省位处我国西南边陲, 面积 38.32 万  $\text{km}^2$ , 占全国面积的 4.1%。作为高原山地省区, 云南省山地面积占全省总面积的 94%, 河谷盆地面积仅占 6%, 地势西北高、东南低, 属于低纬度高原季风气候, 日温差大, 年温差小, 干湿季分明, 气温随地势高低呈垂直变化趋势明显。大部分地区年降水量在

1 000 mm 以上,但时空分布极不均匀,年内 84.2% 的降水集中在 5—10 月份的雨季,11 月份一翌年 4 月份为旱季。结合资料系列的完整性,本研究选取云南省 36 个代表性站点,根据郭建威<sup>[17]</sup>的研究成果,按照自然地理、气候、水系等特征,将云南省分为滇西—滇西南山原与高山多水区(I)、滇西北—滇东北山原河谷中水区(II)和滇中北高原中水—少水区(III)3 个生态水文分区,分区及站点分布情况见图 1。在众多的分区影响因素中,将径流深、河道平均比降、降水量和人均 GDP 4 个指标作为生态水文分区的决定因素,具体分区特征见表 1。

## 1.2 数据来源

采用的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,在保证站点数量的前提下,剔除气象资料缺测较多的站点,对部分站点的缺测数据进行线性内插法补充,整理后得到云南省 36 个气象站点 1958—2013 年逐日地面气象观测资料,包括日平均风速、日照时数、日降水量、日最高气温、日最低气温、日平

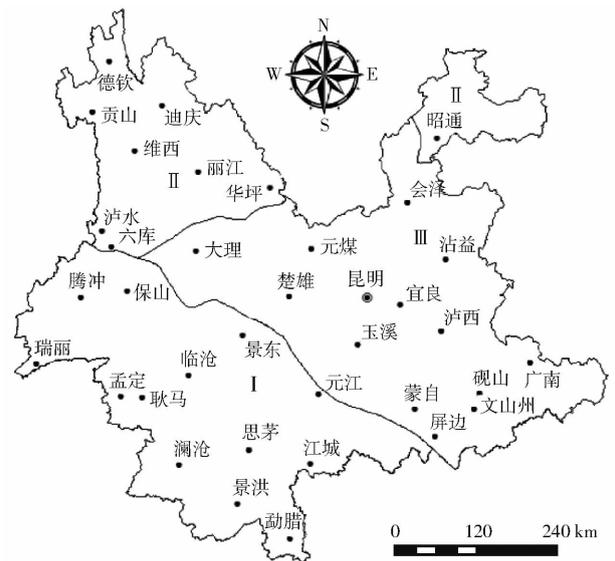


图 1 云南省不同生态水文分区及站点分布图

Fig. 1 Area division and stations distribution in Yunnan Province

均气温、日平均相对湿度、日平均水汽压等数据。

表 1 云南省不同生态水文分区特征统计

Tab. 1 Characteristics statistic of different eco-hydrological regionalization in Yunnan Province

分区	径流深/mm	平均比降/‰	降水量/mm	人均 GDP/(元·人 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )
滇西—滇西南山原与高山多水区	779.8	5.87	1 560.0	8 084
滇西北—滇东北山原河谷中水区	547.3	14.06	1 049.9	9 223
滇中北高原中水—少水区	401.1	12.85	1 049.5	11 735

## 2 研究方法

### 2.1 参考作物蒸散量计算方法

#### (1) Penman - Monteith 法

Penman - Monteith 法以能量平衡和水汽扩散论为基础,同时考虑作物的生理特征和空气动力学参数的变化,具有较充分的理论依据和较高的计算精度<sup>[18]</sup>,公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中  $\Delta$ ——饱和水汽压与温度关系曲线在  $T$  处的切线斜率, kPa/°C

$R_n$ ——冠层表面净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$G$ ——土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$\gamma$ ——干湿比常数, kPa/°C

$T$ ——平均温度, °C

$u_2$ ——2 m 高处的平均风速, m/s

$e_a$ ——实际水汽压, kPa

$e_d$ ——饱和水汽压, kPa

#### (2) Hargreaves - Samani 法

Hargreaves - Samani 法主要考虑平均温度和昼夜温差的影响<sup>[14]</sup>,同时利用大气顶层辐射进行计算,计算误差有随海拔逐渐升高的趋势,在云南省的低海拔地区适用性范围较广,公式为

$$ET_{0-HS} = C_0 (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) R_a \quad (2)$$

式中  $ET_{0-HS}$ ——Hargreaves - Samani 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

$C_0$ ——转换系数,取 0.000 936

$T_{max}$ 、 $T_{min}$ 、 $T_{mean}$ ——日最高、最低和平均温度, °C

$R_a$ ——大气顶层辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

#### (3) Irmak - Allen 法

Irmak - Allen 法是由 IRMARK 等根据美国湿润地区资料得到的模拟模型,在湿润地区适用性较好<sup>[16]</sup>,公式为

$$ET_{0-IA} = 0.489 + 0.289R_n + 0.0023T_{mean} \quad (3)$$

式中  $ET_{0-IA}$ ——Irmak - Allen 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

#### (4) Priestley - Taylor 法

Priestley - Taylor 法基于辐射量进行计算<sup>[13]</sup>,所采用的形式对空气动力学项进行了修正,将空气动

力学项折算为辐射量的 0.26 倍,其精度较之前有所提高,且计算变得相对简便,公式为

$$ET_{0-PT} = \frac{1.26}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (4)$$

式中  $ET_{0-PT}$ ——Priestley - Taylor 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

$\lambda$ ——水的汽化潜热,取 2.45 MJ/kg

### (5) Makkink 法

Makkink 法是在太阳辐射量基础上提出,该方法在寒冷地区的适用性得到广泛验证<sup>[19]</sup>,公式为

$$ET_{0-MK} = \frac{0.61}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s - 0.12 \quad (5)$$

式中  $ET_{0-MK}$ ——Makkink 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

$R_s$ ——太阳辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

### (6) 1948 - Penman 法

1948 - Penman 法采用与 FAO 56 Penman - Monteith 法不同的空气动力学项,适用于温度较高且空气湿度较小地区<sup>[20]</sup>,公式为

$$ET_{0-48PM} = \frac{\Delta(R_n - G) + 6.43\gamma(1 + 0.537u_2)(e_s - e_a)}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (6)$$

式中  $ET_{0-48PM}$ ——1948 - Penman 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

### (7) Penman - Van Bavel 法

Penman - Van Bavel 法在海拔高度相对较低与日温差相差较小的条件下适用性较好<sup>[15]</sup>,公式为

$$ET_{0-PVB} = \left( e_{ps} \frac{R_n}{\lambda} - \frac{e_s - e_a}{r_s} \right) / (e_{ps} + 1) \quad (7)$$

其中  $e_{ps} = 0.003090375T_{mean}^2 - 0.00264516T_{mean} + 0.9246$

$r_s = 80.8 / (u_2 + 0.1)$

式中  $ET_{0-PVB}$ ——Penman - Van Bavel 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

### (8) Turc 法

Turc 法是基于欧洲西部区域提出的<sup>[21]</sup>,被广泛推荐作为湿润地区的估算方法<sup>[22]</sup>,公式为

$$ET_{0-Tu} = 0.013(23.88R_s + 50) \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \quad (8)$$

式中  $ET_{0-Tu}$ ——Turc 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

### (9) FAO 24 Radiation 法

FAO 24 Radiation 法源于 Makkink 公式,主要根据太阳辐射资料来估算参考作物蒸散量<sup>[23]</sup>,计算误差在低海拔高度地区较小,随海拔高度升高,其准确度需要进一步研究,公式为

$$ET_{0-FAO24} = a + b \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \quad (9)$$

其中  $b = 1.066 - 0.0013R_H + 0.045u_d -$

$$0.0002R_H u_d - 0.0000315R_H^2 - 0.0011u_d^2$$

式中  $ET_{0-FAO24}$ ——FAO 24 Radiation 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

$u_d$ ——白昼平均风速, m/s

$R_H$ ——平均相对湿度, %

$a$ ——参数,取 -0.3

### (10) Jensen - Haise 法

Jensen - Haise 法是通过土壤取样,评估了很多蒸散发观测值之后,得到的经验公式<sup>[22]</sup>,因云南红壤分布较为广泛,故选取此方法作为计算方法之一,公式为

$$ET_{0-JH} = 0.87(0.025T_{mean} - 0.075) \times 0.408 \left( 0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) R_a \quad (10)$$

式中  $ET_{0-JH}$ ——Jensen - Haise 法计算得到的  $ET_0$ , mm/d

$N$ ——日照的最大可能时数, h

$n$ ——实际日照时数, h

采用以上 10 种方法对  $ET_0$  进行模拟计算,以 FAO 推荐的 Penman - Monteith 法作为  $ET_0$  计算的标准方法,对其他 9 种简易计算方法进行评估。

## 2.2 评价方法

以 FAO 56 Penman - Monteith 法计算的  $ET_0$  作为标准,采用线性回归法、均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (MBE) 和 Nash - Sutcliffe 系数 ( $C_D$ ) 来评价其他 9 种算法与标准算法计算结果相比的适用性及精度<sup>[24-26]</sup>,具体公式分别为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (ET'_{0i} - ET_{0-PMi})^2}{m}} \quad (11)$$

$$M_{BE} = \frac{\sum_{i=1}^m (ET'_{0i} - ET_{0-PMi})}{m} \quad (12)$$

$$C_D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (ET'_{0i} - ET_{0-PMi})^2}{\sum_{i=1}^m (ET_{0-PMi} - \overline{ET_{0-PMi}})^2} \quad (13)$$

式中  $ET'_{0i}$ ——待检验方法计算的  $ET_0$  值, mm/d

$ET_{0-PMi}$ ——标准 Penman - Monteith 法计算的  $ET_0$  值, mm/d

$\overline{ET_{0-PMi}}$ ——标准 Penman - Monteith 法计算的  $ET_0$  均值, mm/d

$m$ ——序列长度

其中, RMSE 与 MBE 的值越小、 $C_D$  的值越大, 该算法偏离标准算法的程度越小, 与 FAO 56 Penman - Monteith 法的一致性越好、计算精度越高, 对研究区的适用性越强。

### 3 结果与分析

#### 3.1 云南省不同生态水文分区 $ET_0$ 算法日均值评价

##### 3.1.1 不同 $ET_0$ 算法的适用性评价

云南省不同生态水文分区不同  $ET_0$  简化算法与 P-M 法日值之间的回归系数及决定系数见表 2。结果显示,云南省不同生态水文分区 1948-Penman 法、FAO 24 Radiation 法与 FAO 56 Penman-Monteith 法拟合的回归方程斜率均大于 1,表明有不同程度偏大,且不同生态水文分区 1948-Penman 法的决定系数  $R^2$  均为 0.99,与 FAO 56 Penman-Monteith 法的相关性最显著,其他 7 种方法 Hargreaves-Samani 法、Irmak-Allen 法、Priestley-Taylor 法、Makkink 法、Penman-Van Bavel 法、Turc 法、Jensen-Haise 法相比 FAO 56 Penman-Monteith 法的结果则偏小。其中,在 I 区 Priestley-Taylor 法、1948-Penman 法与 FAO 56 Penman-Monteith

法拟合的回归方程斜率更接近 1,分别为 0.88、1.17,除 Irmak-Allen 法与 Jensen-Haise 法外其他 7 种  $ET_0$  简化算法拟合方程的决定系数  $R^2$  均在 0.85 以上,达到极显著水平 ( $p < 0.01$ );在 II 区、III 区的拟合方程斜率最接近 1 的均为 1948-Penman 法,斜率分别为 1.15 和 1.10,决定系数  $R^2$  达到极显著水平的均为 1948-Penman 法和 FAO 24 Radiation 法,II 区为 0.99 和 0.86,III 区为 0.99 和 0.94。不同算法在云南省拟合方程的决定系数  $R^2$  达到极显著水平的有 Priestley-Taylor 法、Makkink 法、1948-Penman 法、Penman-Van Bavel 法和 FAO 24 Radiation 法,决定系数  $R^2$  分别为 0.85、0.85、0.94、0.99、0.85,其中, Priestley-Taylor 法、1948-Penman 法在 I 区的适用性较强,1948-Penman 法在 II 区与 III 区的适用性较强,且 1948-Penman 法在整个云南省的适用性均为最强。

表 2 云南省不同生态水文分区不同  $ET_0$  简化算法与 P-M 法日值之间的回归系数及决定系数

Tab.2 Regression coefficients and determination coefficients between different daily  $ET_0$  simplification methods and P-M method in different eco-hydrological regionalization of Yunnan Province

计算方法	滇西—滇西南山原 与高山多水区			滇西北—滇东北山原 河谷中水区			滇中北高原 中水—少水区			云南省		
	$R^2$	斜率	截距	$R^2$	斜率	截距	$R^2$	斜率	截距	$R^2$	斜率	截距
	Hargreaves-Samani	0.88**	0.60	0.99	0.54	0.39	0.92	0.76	0.37	1.16	0.81	0.46
Irmak-Allen	0.75	0.66	1.19	0.72	0.63	1.16	0.72	0.49	1.48	0.70	0.57	1.33
Priestley-Taylor	0.89**	0.88	0.63	0.81	0.75	0.62	0.81	0.67	0.91	0.85**	0.76	0.75
Makkink	0.89**	0.56	0.28	0.82	0.48	0.26	0.82	0.43	0.44	0.85**	0.48	0.35
1948-Penman	0.99**	1.17	-0.04	0.99**	1.15	0.06	0.99**	1.10	0.15	0.99**	1.14	0.06
Penman-Van Bavel	0.89**	0.68	0.46	0.82	0.55	0.45	0.83	0.51	0.64	0.85**	0.57	0.55
Turc	0.86**	0.58	0.67	0.24	0.46	0.34	0.77	0.48	0.61	0.60	0.52	0.52
FAO 24 Radiation	0.97**	2.41	-0.57	0.86**	2.42	-0.81	0.94**	2.02	0.26	0.94**	2.25	-0.32

注:\*\*表示拟合效果达到  $p < 0.01$  的极显著水平。

##### 3.1.2 不同 $ET_0$ 算法的精度对比

表 3 为云南省不同生态水文分区 9 种  $ET_0$  简化算法与 Penman-Monteith 法的均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (MSE) 和 Nash-Sutcliffe 系数 ( $C_D$ ) 对比结果。根据 RMSE 的结果,其值越小,表明 2 种方法之间的关系越密切,差异越小;MBE 越接近 0,差异越小; $C_D$  越大,则说明该算法与 P-M 法的一致性较好。研究表明:I 区各项指标中, Irmak-Allen 法、Priestley-Taylor 法、1948-Penman 法表现良好,其 RMSE 值在 0.20~0.57 mm/d 之间, MBE 值为 0.26~0.44 mm/d,  $C_D$  值为 0.52~0.76, 其中 1948-Penman 法的精度最高,其  $C_D$  值达到 0.76,其次是 Priestley-Taylor 法和 Irmak-Allen 法,其他方法的  $C_D$  系数均较小,其中 FAO 24 Radiation 法计算精度最低,其 RMSE、MBE、 $C_D$  值分

别为 103.15 mm/d、3.24 mm/d 和 -14.29。II 区 Priestley-Taylor 法精度最高,其 RMSE 为 0.28 mm/d, MBE 则达到了 0.01 mm/d,而  $C_D$  值达到了 0.71,计算精度明显高于其他方法,1948-Penman 法和 Irmak-Allen 法精度次之,FAO 24 Radiation 法与 Jensen-Haise 法精度较低, RMSE 值均在 9.59 mm/d 以上,  $C_D$  值小于 -3.07。III 区 1948-Penman 法的计算精度最高, RMSE 值为 0.18 mm/d, MBE 值为 0.45 mm/d,而  $C_D$  值则达到了 0.83,其他方法中, RMSE 均大于 0.72 mm/d,最大值为 114.07 mm/d, MBE 值在 -1.57~3.19 mm/d 之间,  $C_D$  最小值为 -7.54,其精度较 1948-Penman 法低。通过对整个云南省的模拟精度分析可以得出,1948-Penman 法的精度最高,其 RMSE、MBE、 $C_D$  值分别为 0.19 mm/d、0.44 mm/d、0.78,FAO 24 Radiation 法精度最低,其

表3 云南省不同生态水文分区不同  $ET_0$  简化算法精度对比

Tab.3 Comparison of  $ET_0$  calculation accuracy among simplification methods in different eco-hydrological regionalization of Yunnan Province

计算方法	滇西—滇西南山原 与高山多水区			滇西北—滇东北 山原河谷中水区			滇中北高原 中水—少水区			云南省		
	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	MBE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$C_D$	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	MBE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$C_D$	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	MBE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$C_D$	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	MBE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$C_D$
	Hargreaves-Samani	0.85	-0.09	0.50	1.19	-0.53	0.16	2.26	-0.62	0.21	1.43	-0.42
Irmak-Allen	0.57	0.26	0.52	0.52	0.22	0.26	1.18	0.03	0.57	0.75	0.17	0.45
Priestley-Taylor	0.41	0.29	0.62	0.28	0.01	0.71	0.72	-0.02	0.70	0.47	0.09	0.68
Makkink	3.01	-0.96	-0.38	2.51	-1.02	-0.45	5.94	-1.19	-0.31	3.82	-1.06	-0.38
1948-Penman	0.20	0.44	0.76	0.18	0.42	0.74	0.18	0.45	0.83	0.19	0.44	0.78
Penman-Van Bavel	0.92	-0.35	0.51	0.99	-0.65	0.24	2.31	-0.75	0.31	1.41	-0.58	0.35
Turc	1.17	-0.44	0.34	4.69	-0.95	-1.84	2.89	-0.86	0.12	2.91	-0.75	-0.46
FAO 24 Radiation	103.15	3.24	-14.29	74.45	2.84	-10.57	114.07	3.19	-7.54	97.22	3.09	-10.80
Jensen-Haise	3.88	-1.37	-1.04	9.59	-1.60	-3.07	9.31	-1.57	-1.12	7.59	-1.51	-1.74

RMSE、MBE、 $C_D$  值分别为 97.22 mm/d、3.09 mm/d、-10.80。因此,1948-Penman 法在云南省的计算精度最高,可作为云南省  $ET_0$  简化计算推荐方法。

### 3.2 云南省不同生态水文分区 $ET_0$ 算法月均值评价

云南省不同生态水文分区 9 种  $ET_0$  简化算法与 Penman-Monteith 法逐月  $ET_0$  均值对比结果见图 2。结果表明:不同  $ET_0$  简化算法计算得到的  $ET_0$  月均值在年内变化趋势基本一致,总体呈现先增加后减小的二次抛物线形式。在不同生态水文分区,大多

数算法的计算结果为 7 月份的  $ET_0$  最小,4 月份最大,其中结果有较大差异的算法是 Jensen-Haise 方法,在 3 个区域中的表现为 1 月份和 12 月份最小,5 月份最大。以 Penman-Monteith 法作为参考标准,可以看出,3 个区域中 1948-Penman 法、FAO 24 Radiation 法计算结果均在 Penman-Monteith 法之上,结果偏大,Hargreaves-Samani 法、Makkink 法、Penman-Van Bavel 法、Turc 法、Jensen-Haise 法的计算结果均在 Penman-Monteith 法之下,结果偏小,

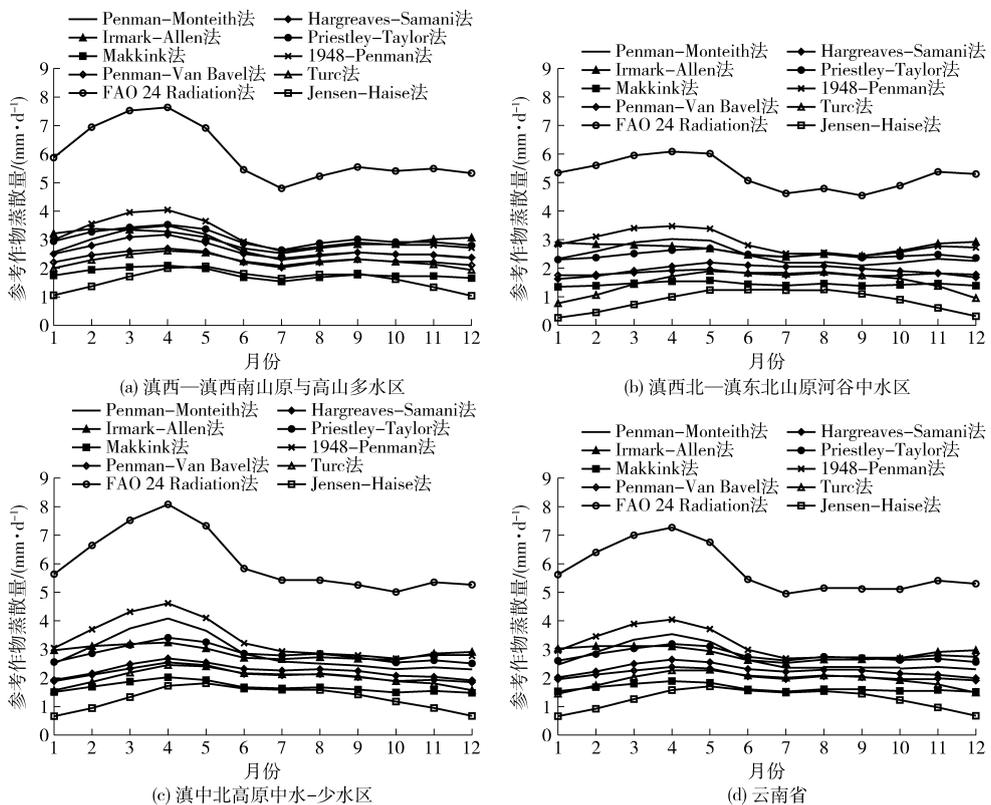


图2 云南省不同生态水文分区 9 种  $ET_0$  简化算法与 Penman-Monteith 法逐月  $ET_0$  计算结果对比  
Fig.2 Comparison of monthly  $ET_0$  calculated by Penman-Monteith and other nine models of different eco-hydrological regionalization in Yunnan Province

而 Priestley - Taylor 法、Irmak - Allen 法在 I 区偏大,在 II、III 区的 1—6 月份结果偏小,7—12 月份结果偏大。从月均值变化来看, I 区 Hargreaves - Samani 法在所有月份中计算最为准确, II、III 区 1—6 月份中 1948 - Penman 法的计算结果较为接近 Penman - Monteith 法,7—12 月份中 Priestley - Taylor 法的估算结果较为准确。

### 3.3 云南省不同生态水文分区 $ET_0$ 算法空间适用性评价

云南省不同生态水文分区 9 种  $ET_0$  简化算法结果与 Penman - Monteith 法的相对误差空间分布如图 3 所示。研究表明:在 I 区中,Hargreaves - Samani 法、Irmak - Allen 法、Priestley - Taylor 法、1948 - Penman 法 4 种方法的相对误差 (RE) 介于 0 ~ 20% 之间,适用性较好, Penman - Van Bavel 法、Turc 法在 I 区中表现为部分地区 RE 小于 20%,而在剩余部分其 RE 则扩大至 20% ~ 40%, Makkink 法在 I 区中其 RE

为 20% ~ 40%, Jensen - Haise 法大部分地区 RE 为 40% ~ 60%,仅在靠近边境地区的瑞丽、孟定、耿马、景洪、勐腊站点 RE 降至 20% 以下,而 FAO 24 Radiation 法在 I 区的计算结果明显偏大,其 RE 除元江站点值在 100% 以下,其余地区的 RE 均超过 100%。在 II 区的 RE 空间分布中,仅有 Priestley - Taylor 法的 RE 小于 20%,其适用性明显高于其他方法,1948 - Penman 法和 Irmak - Allen 法除德钦、迪庆 2 个站点的 RE 超过 20% 外,其余地区 RE 也在 20% 以下,Hargreaves - Samani 法、Penman - Van Bavel 法在 II 区中西北部地区部分站点的 RE 在 20% 以下,其余大部分 II 区的 RE 在 20% ~ 40% 范围内,Makkink 法的 RE 空间分布与 Turc 法相比看出,这 2 种方法在 II 区的空间分布中表现为适用性的相互补充,其 RE 范围总体为 20% ~ 60%, Jensen - Haise 法在 II 区中大部分区域的 RE 在 60% ~ 80% 之间,在德钦、迪庆站点达到了 80% 以上,这表明该

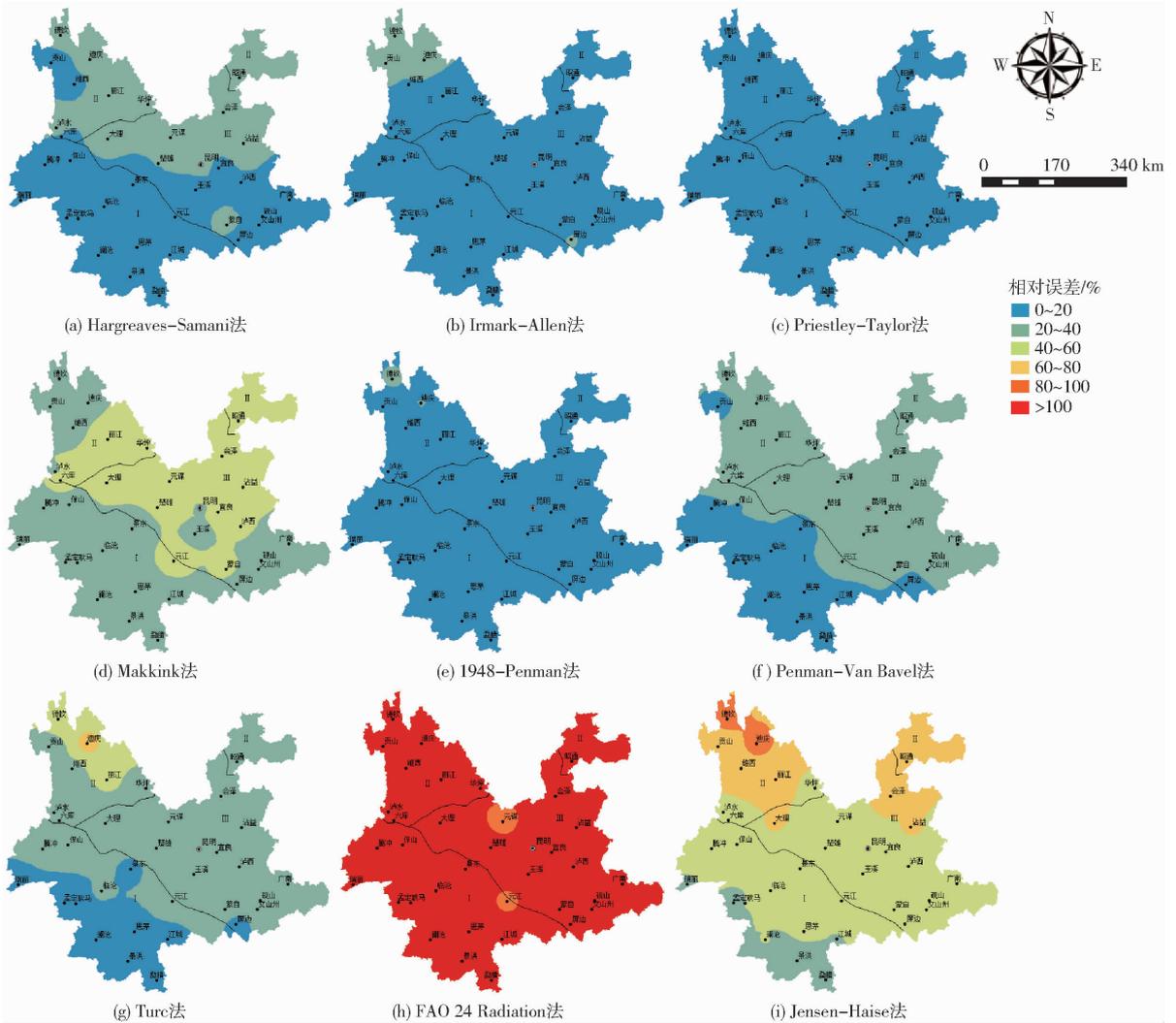


图 3 云南省不同生态水文分区 9 种  $ET_0$  简化算法结果与 Penman - Monteith 法的相对误差空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of relative error of nine simplification methods of different eco-hydrological regionalization in Yunnan Province compared with Penman - Monteith method

方法在Ⅱ区适用性较差,FAO 24 Radiation法在Ⅱ区RE除元谋站点外,其他站点的RE在100%以上。在Ⅲ区中,Irmak - Allen法、Priestley - Taylor法、1948 - Penman法的RE均在20%以下,表明这3种方法在Ⅲ区适用性高于其他方法,而Hargreaves - Samani法在Ⅲ区的RE出现了南北差异,从图中可以看出在Ⅲ区的南部地区其RE小于20%,而北部地区RE在20% ~ 40%之间,Penman - Van Bavel法、Turc法的RE均在20% ~ 40%之间,适用性较差,Makkink法、FAO 24 Radiation法、Jensen - Haise法的RE均大于40%,FAO 24 Radiation法在部分地区达到100%以上,表明这3种方法在Ⅲ区适用性较差。Priestley - Taylor法、1948 - Penman法在整个云南省的RE基本在20%以下,这2种方法在整个云南省适用性较好。Hargreaves - Samani法主要考虑平均温度和昼夜温差的影响,同时利用大气顶层辐射量进行计算,其中Ⅰ区地势起伏变化不大,日温度变化幅度较小,计算结果较为准确,Ⅱ、Ⅲ区随着海拔高度升高,日温度变化较大,导致RE在Ⅰ区的适用性高于其他2个区,Makkink法、Turc法、Jensen - Haise法在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的RE随着纬度的增加,精度逐渐降低,表明这3种方法在低纬度地区适用性高于高纬度地区。Irmak - Allen法仅在云南省西北部高寒地区适用性表现变差,其余地区表现较好。而FAO 24 Radiation法在整个云南省的适用性偏差较大,不能真实反映地区的参考作物蒸散量。

## 4 讨论

国内外有关大区域 $ET_0$ 算法适用性评价的研究较少。KISI<sup>[27]</sup>研究Turkey的Isparta等5个站点的 $ET_0$ ,得出Vail - T - Rs法和Hargreaves - Samani法在研究区内的计算精度较高。樊军等<sup>[8]</sup>对陕西省3个站点进行研究,得出Penman系列方法之间关系密切,Kimberly PM - 72法最佳的结论。为避免评价的局限性,本文选取整个云南省36个站点作为研究对象,具有各分区跨幅大、站点分布广的特点。结果显示,1948 - Penman法、FAO 24 Radiation法与FAO 56 Penman - Monteith法相比有不同程度偏大,Hargreaves - Samani法、Irmak - Allen法、Priestley - Taylor法、Makkink法、Penman - Van Bavel法、Turc法、Jensen - Haise法的结果偏小。其中1948 - Penman法在不同生态水文分区的决定系数 $R^2$ 均为0.99,与FAO 56 Penman - Monteith法的相关性最显著,1948 - Penman法在整个云南省的适用性最强、计算精度最高,可作为云南省 $ET_0$ 简化计算推荐方法,这与贾悦等<sup>[3]</sup>研究长江流域得出长江上游内综

合法的计算精度较高于温度法的结论一致。而FAO 24 Radiation法计算精度最低,其RMSE、MBE、 $C_D$ 值分别为103.15 mm/d、3.24 mm/d和-14.29,造成其精度较低的主要原因在于FAO 24 Radiation公式中的常数项 $a$ 为经验值,但许多学者通过分析各自的资料得到了不同的 $a$ 值,并发现其具有日变化和季节变化,因此若将 $a$ 值当做常数计算,则会造成一定的偏差,从而在对云南省运用该公式时,需根据当地资料进行经验系数的修正。

各生态水文分区的最佳 $ET_0$ 简化算法不同。在滇西-滇西南山原与高山多水区中,9中方法中Hargreaves - Samani法、Irmak - Allen法、Priestley - Taylor法、1948 - Penman法的计算精度较高,其RE都小于20%;在滇西北-滇东北山原河谷中水区的方法适用性研究中,得出Priestley - Taylor法和1948 - Penman法适用性最高;而在滇中北高原中水-少水区内,Irmak - Allen法、Priestley - Taylor法、1948 - Penman法较其余方法的RE低,适用性较强。这与李晨等<sup>[6]</sup>利用46个站点对四川省不同区域参考作物蒸散量计算方法适用性的研究得出川西南地区表现最好的方法为Priestley - Taylor法的结论一致。

因不同类型 $ET_0$ 简化算法的空间适应性不同,因此分析各方法在不同地域上适用性。Hargreaves - Samani法主要考虑平均温度和昼夜温差的影响,同时利用大气顶层辐射进行计算,其中Ⅰ区地势起伏变化不大,日温度变化幅度较小,计算结果较为准确,Ⅱ、Ⅲ区随着海拔高度升高,日温度变化较大,导致RE在Ⅰ区的适用性高于其他2个区,Makkink法、Turc法、Jensen - Haise法在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区的RE随着纬度的增加,精度逐渐降低,表明这3种方法在低纬度地区适用性高于高纬度地区,与杜加强等<sup>[28]</sup>得出的基于温度的算法在低海拔高度站点、生长季与P - M结果的一致性要高于高海拔高度站点、非生长季的结论一致。Irmak - Allen法仅在云南省西北部高寒地区适用性表现变差,其余地区表现较好。而FAO 24 Radiation法在整个云南省的适用性偏差较大,不能真实反映地区的参考作物蒸散量。由于辐射法中的Priestley - Taylor法主要考虑太阳辐射量,云南省作为我国低纬度高海拔地区,其辐射量较大,同时气候垂直分布明显,温度日较差大,所以Priestley - Taylor法在整个云南地区计算精度较高,符合WEIB等<sup>[29]</sup>得出的Priestley - Taylor方法较适宜于在全球尺度应用的结论。同时,本研究中未对云南省部分气候独特地区进行方法的适用性研究,例如元谋干热河谷地区、海拔高度落差较大的山谷地区等地区,需要在后期工作中继续研究。

## 5 结论

(1) 1948 - Penman 法在整个云南省的适用性最强、计算精度最高,可作为云南省  $ET_0$  简化计算推荐方法。此外,在滇西—滇西南山原与高山多水区 Priestley - Taylor 法的适用性较强,其计算精度较高,FAO 24 Radiation 法计算精度最低;滇西北—滇东北山原河谷中水区 Priestley - Taylor 法和 Irmak - Allen 法的计算精度较高,FAO 24 Radiation 法与 Jensen - Haise 法精度较低。

(2) 云南省不同生态水文分区中,滇西—滇西南山原与高山多水区中 Hargreaves - Samani 法更接近于 Penman - Monteith 法的计算结果,曲线的拟合程度较高,因此在云南省滇西—滇西南山原与高山多水区缺少辐射和风速资料的站点,可以考虑利用 Hargreaves - Samani 法代替 Penman - Monteith 法;在滇西北—滇东北山原河谷中水区、滇中北高原中水—少水区的 1—6 月份中 1948 - Penman 法的精度较其

他方法较高,此方法可以适用于滇西北—滇东北山原河谷中水区、滇中北高原中水—少水区中湿润下垫面站点的计算;在滇西北—滇东北山原河谷中水区、滇中北高原中水—少水区的 7—12 月份中 Priestley - Taylor 法的估算结果较为准确,因此在滇西北—滇东北山原河谷中水区、滇中北高原中水—少水区中缺少空气动力学资料时, Priestley - Taylor 法可以用来计算参考作物蒸散量。

(3) Hargreaves - Samani 法等 9 种  $ET_0$  简化算法的空间差异性明显。Hargreaves - Samani 法、Irmak - Allen 法、Priestley - Taylor 法、1948 - Penman 法在在滇西—滇西南山原与高山多水区中精度较高,其 RE 小于 20%;在滇西北—滇东北山原河谷中水区中,相对误差最小的是 Priestley - Taylor 法、1948 - Penman 法;在滇中北高原中水—少水区内, Irmak - Allen 法、Priestley - Taylor 法、1948 - Penman 法适用性较其他方法高。

## 参 考 文 献

- 赵璐,梁川,崔宁博,等.不同  $ET_0$  计算方法在川中丘陵地区的比较及改进[J].农业工程学报,2012,28(24):92-98.  
ZHAO Lu, LIANG Chuan, CUI Ningbo, et al. Comparison and improvement of different calculation methods for  $ET_0$  in hilly area of central Sichuan Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 92-98. (in Chinese)
- 张倩,段爱旺,高阳,等.基于温度资料估算参考作物腾发量的方法比较[J/OL].农业机械学报,2015,46(2):104-109.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150216&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150216&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.016.
- ZHANG Qian, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation methods using temperature data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 104-109. (in Chinese)
- 贾悦,崔宁博,魏新平,等.基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J].农业工程学报,2016,32(6):130-138.  
JIA Yue, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Applicability evaluation of different algorithms for reference crop evapotranspiration in Yangtze River Basin based on inverse distance weighted method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 130-138. (in Chinese)
- 杨永红,张展羽,阮新建.西藏参考作物蒸发蒸腾量的时空变异规律[J].水科学进展,2009,20(6):775-781.  
YANG Yonghong, ZHANG Zhanyu, RUAN Xinjian. Temporal and spatial variation law of reference crop evapotranspiration in Tibet[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 775-781. (in Chinese)
- 李志.参考作物蒸散简易估算方法在黄土高原的适用性[J].农业工程学报,2012,28(6):106-111.  
LI Zhi. Applicability of simple estimating method for reference crop evapotranspiration in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 106-111. (in Chinese)
- 李晨,崔宁博,冯禹,等.四川省不同区域参考作物蒸散量计算方法的适用性评价[J].农业工程学报,2016,32(4):127-134.  
LI Chen, CUI Ningbo, FENG Yu, et al. Adaptation evaluation for reference evapotranspiration methods in different regions of Sichuan[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 127-134. (in Chinese)
- ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- 樊军,邵明安,王全九.黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J].农业工程学报,2008,24(3):98-102.  
FAN Jun, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Comparisons of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 98-102. (in Chinese)
- 曹雯,申双和,段春锋.西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J].地理学报,2011,66(3):407-415.  
CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng. Quantification of the causes for reference crop evapotranspiration changes in growing season in Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 407-415. (in Chinese)
- 姬兴杰,朱业玉,顾万龙.河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J].中国农业气象,2013,34(1):14-22.  
JI Xingjie, ZHU Yeyu, GU Wanlong. Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan province during 1971 to 2010[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(1): 14-22. (in Chinese)

- 11 冯禹,崔宁博,魏新平,等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报,2014,30(14):78-86.  
FENG Yu, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14):78-86. (in Chinese)
- 12 王卫光,邢万秋,彭世彰,等. 海河流域 50 年来参考腾发量的时空变化规律及其影响原因[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012,20(2):237-252.  
WANG Weiguang, XING Wanqiu, PENG Shizhang, et al. Spatial and temporal patterns of reference evapotranspiration changes and their causes in the Haihe River Basin during the past 50 years, China [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2):237-252. (in Chinese)
- 13 PRIESTLEY C H, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evapotranspiration using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2):81-92.
- 14 HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1):53-63.
- 15 VAN BAVEL C H M. Potential evapotranspiration: the combination concept and its experimental verification[J]. Water Resources Research, 1966, 2(3):23-34.
- 16 IRMAK S, IRMAK A, ALLEN R S, et al. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climate[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5):336-347.
- 17 郭建威. 云南省山区性中小河流生态环境流量研究[D]. 武汉:长江科学院,2011.  
GUO Jianwei. Study of eco-environmental flow from medium and small mountain rivers in Yunnan Province [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2011. (in Chinese)
- 18 符娜,李闯,刘艳伟,等. 基于灌溉需求指数的滇中地区烤烟需水量时空变化分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):155-161. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160421&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160421&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.021.  
FU Na, LI Chuang, LIU Yanwei, et al. Temporal and spatial variation analysis of water requirement of tobacco in middle of Yunnan Province based on irrigation requirement index [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):155-161. (in Chinese)
- 19 MAKKINK G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters[J]. Jinst Water Engineers, 1957, 11(3):277-288.
- 20 PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1948, 193:120-146.
- 21 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.
- 22 TRAJKOVIC S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions[J]. Waters Resource Management, 2009, 23(14):3057-3067.
- 23 HAUSER V L, GIMON D M, HORIN J D. Draft protocol for controlling contaminated groundwater by phytostabilization [R]. Prepared for Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Division, 1999, 11.
- 24 胡增运,倪勇勇,邵华,等. CFSR、ERA-Interim 和 MERRA 降水资料在中亚地区的适用性[J]. 干旱区地理,2013,36(4):700-708.  
HU Zengyun, NI Yongyong, SHAO Hua, et al. Applicability study of CFSR, ERA-Interim and MERRA precipitation estimates in Central Asia [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4):700-708. (in Chinese)
- 25 虞连玉,蔡焕杰,姚付启,等. 植被指数反演冬小麦植被覆盖度的适用性研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):231-239. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150133&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150133&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.033.  
YU Lianyu, CAI Huanjie, YAO Fuqi, et al. Applicability of vegetation indices to estimate fractional vegetation coverage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):231-239. (in Chinese)
- 26 卫新东,刘守阳,陈滇豫,等. Shuttleworth-Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):142-151. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150320&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150320&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.020.  
WEI Xindong, LIU Shouyang, CHEN Dianyu, et al. Applicability of Shuttleworth-Wallace model for evapotranspiration estimation of jujube forests in Loess hilly-gully region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):142-151. (in Chinese)
- 27 KISI O. Comparison of different empirical methods forestimating daily reference evapotranspiration in mediterranean climate[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140(1):336-347.
- 28 杜加强,熊珊珊,刘成程,等. 黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J]. 干旱区地理,2013,36(5):831-840.  
DU Jiaqiang, XIONG Shanshan, LIU Chengcheng, 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, 36(5):831-840. (in Chinese)
- 29 WEIB M, MENZEL L. A global comparison of four potential evapotranspiration equations and their relevance to stream flow modeling in semi-arid environments[J]. Advances in Geosciences, 2008, 18:15-23.