

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.018

# FAO Penman – Monteith 及简化方法在西北适用性研究

吴立峰<sup>1</sup> 白桦<sup>1</sup> 张富仓<sup>2</sup> 鲁向晖<sup>1</sup> 王英文<sup>1</sup> 刘惠英<sup>1</sup>

(1. 南昌工程学院鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室, 南昌 330099;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为了实现气象资料缺失下参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ )在西北地区的高精度预测,采用 FAO 56 Penman – Monteith(P – M)公式作为对照,与气象资料缺失下 P – M 公式 8 种情况以及 Priestley – Taylor(P – T)法、Makkink 法、Hargreaves – Samani(H – S)法、Irmak 法对西北 5 省区 30 个辐射站的逐日气象资料进行了统计比较,并对 P – T 法、Makkink 法、H – S 法、Irmak 法重新进行了参数率定。结果表明,气象资料缺失时,总辐射资料缺失精度下降最小,基于日照资料的 Ångström – Prescott(A – P)法是该地区适宜的替代方法,其各站平均  $R^2$  为 0.983、RMSE 小于 0.4 mm/d。当相对湿度、风速或日照时数有一项缺失时,使用 FAO 推荐的 P – M 替代方法可以使多年平均  $ET_0$  的 RMSE 小于 0.47 mm/d,  $R^2$  保持在 0.94 以上。当气象要素缺少风速和相对湿度时,使用率定后 Makkink 法是该地区适宜的替代选择,其 RMSE 为 0.68 mm/d,  $R^2$  为 0.94,当仅有气温资料时,改进后的 H – S 法是该地区适宜的替代选择,其 RMSE 为 0.68 mm/d,  $R^2$  为 0.94。P – T 法在该地区精度低于 Makkink 法,其 RMSE 为 0.71 mm/d,  $R^2$  为 0.88,30 个站参数值率定后  $\alpha$  值介于 1.02 ~ 1.64 之间。

**关键词:** 参考作物蒸发蒸腾量; 西北; 参数率定; 气象数据缺失

**中图分类号:** S161.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0139-13

## Applicability of FAO Penman – Monteith and Alternative Methods for Estimating Reference Evapotranspiration in Northwest China

Wu Lifeng<sup>1</sup> Bai Hua<sup>1</sup> Zhang Fucang<sup>2</sup> Lu Xianghui<sup>1</sup> Wang Jiawen<sup>1</sup> Liu Huiying<sup>1</sup>

(1. State-province United Engineering Laboratory on Water Engineering Safety and Resources Efficient Utilization of Poyang Lake Basin, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to implement the high precision of predicting reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) when the meteorological information was not complete in northwest of China, FAO Penman – Monteith (P – M) formula was selected as control, 15 alternative methods were compared in Northwest China, including P – M formula with one to three factors of global solar radiation, sunshine hours duration, relative humidity, wind speed were missing, Priestley – Taylor (P – T) method, Makkink method, Hargreaves – Samani (H – S) method and Irmak method. At last, parameters of P – T method, H – S method, Makkink method and Irmak method were recalibrated. The results showed that global solar radiation data missing had the minimum impact on estimating  $ET_0$  with average  $R^2$  of 0.983 for all stations and the root mean square error (RMSE) was less than 0.4 mm/d. When one of sunshine hour duration, wind speed or relative humidity data was missing, applying the FAO recommended P – M alternative

收稿日期: 2016-03-30 修回日期: 2016-05-05

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100504)、教育部高等学校创新引智计划(111 计划)项目(B12007)和江西省水利厅科技项目(KT201540)

**作者简介:** 吴立峰(1985—),男,讲师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: china.sw@163.com

**通信作者:** 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

methods could control RMSE within 0.47 mm/d,  $R^2$  stayed above 0.94. When wind speed and relative humidity data were missing, Makkink method was the best method, the RMSE was 0.68 mm/d and  $R^2$  was 0.94. When there was only temperature data, the improved Irmak and improved H-S methods had the same precisions with RMSE of 0.63 mm/d and 0.68 mm/d, the  $R^2$  were 0.94 and 0.95, respectively. In addition, the parameters of P-T, Makkink, H-S and Irmak methods were recalibrated for the Kriging interpolation, to obtain the spatial distribution of parameters. The required values of parameters for these methods can be got through the figures.

**Key words:** reference evapotranspiration; Northwest China; parameters calibration; meteorology data missing

## 引言

由于降水量有限,干旱半干旱地区作物生长常常受到水资源短缺的威胁,准确估算作物需水量是制定灌溉制度和提高用水效率的前提条件<sup>[1]</sup>。由于在世界范围内都具有较好的适用性,联合国粮农组织(FAO)把 FAO Penman-Monteith(P-M)法作为估算  $ET_0$  的标准方法<sup>[2]</sup>。然而,P-M法对气象数据完整性的要求比较高。在气象数据不足条件下,ALLEN等<sup>[2]</sup>仍推荐使用P-M法,并给出了缺少净辐射、风速、相对湿度情况下的替代解决方案,但这些替代方案的精度需要在所在区域进行评估。此外,许多依赖气象因子更少、更加简化的经验法如 Hargreaves-Samani(H-S)法<sup>[3-4]</sup>、Pristley-Taylor(P-T)法<sup>[2,5-7]</sup>、Irmak法<sup>[8-9]</sup>、Makkink法<sup>[10-11]</sup>、人工神经网络法<sup>[12]</sup>也得到了广泛的研究,并且在某些特定地区具有更高的精度<sup>[2,5,10]</sup>。我国西北地区主要为干旱、半干旱内陆地区,生态环境脆弱,近年来的气候变化导致该地区水循环、生态环境等方面发生了显著变化<sup>[13]</sup>,目前还缺少对该地区气象要素不足时替代方法系统性的研究报道。

本文以P-M法、Hargreaves-Samani(H-S)法、Pristley-Taylor(P-T)法、Irmak法、Makkink法以及P-M法在辐射量、相对湿度、日照时数和平均风速缺失情景下的替代方法(共16种方法)对各辐射站  $ET_0$  进行日尺度模拟,并以FAO 56 P-M法作为标准对其他方法进行适用性评价,最后对H-S法、P-T法、Irmak法、Makkink法参数重新进行了率定,从而获得西北5省区不同气象资料缺失情况下适宜的参考作物蒸发蒸腾量简化计算方法,以期对西北地区农业灌溉制度制定和水资源优化配置提供科学指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

选取我国西北地区新疆、青海、甘肃、宁夏和陕

西5省区作为研究区域(31°35'~49°15' N, 73°25'~110°55' E)。研究区面积近310万 km<sup>2</sup>,年降水量100~2000 mm,农业大多需灌溉作为基本保障,地势西高东低,地跨干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区等多种气候区,自然景观包括了平原、森林、草原和荒漠。

### 1.2 数据来源

选取西北5省区30个辐射站的每日气象资料(包括总辐射量、日照时数、20:00—20:00降水量、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度和10 m 高风速),数据来源于中国气象科学数据共享服务网地面观测数据中的日值数据集。各站的基本情况如表1所示。尽管数据集数据已经经过严格的质量控制,为了比较不同  $ET_0$  估算法的精度,对气象资料进行了如下处理:①当每日气象资料有一项及以上数据缺失,则删除该日全部数据。②当地表总辐射( $R_s$ )大于地外总辐射( $R_a$ )或实际日照时数( $n$ )大于该日理论最大日照时数( $N$ )时,则删除该日全部数据。

### 1.3 研究方法

Penman-Monteith(P-M)法表达式为

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

其中

$$e_s = \{0.6108 [\exp(17.27T_{\max}) / (T_{\max} + 273) + \exp(17.27T_{\min}) / (T_{\min} + 273)]\} / 2 \quad (2)$$

$$e_a = \frac{RH}{100} e_s \quad (3)$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (4)$$

式中  $ET_0$ ——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d

$R_n$ ——净辐射,MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$G$ ——土壤热通量密度,MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$T$ ——2 m 高处的平均气温,℃

表 1 辐射站的坐标、高程和数据基本情况

Tab. 1 Location, altitude and basic data situation of radiation stations

编号	站名	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m	数据起止年份
1	阿勒泰	47.73	88.08	736.9	1960—2014
2	塔城	46.73	83.00	536.6	1993—2014
3	奇台	44.02	89.57	794.2	1987—1990
4	伊宁	43.95	81.33	664.3	1960—2014
5	乌鲁木齐	43.78	87.62	918.7	1959—2014
6	焉耆	42.08	86.57	1 057.2	1993—2014
7	吐鲁番	42.93	89.20	37.2	1960—2014
8	阿克苏	41.17	80.23	1 105.3	1993—2014
9	库车	41.72	83.07	1 082.9	1957—1990
10	喀什	39.47	75.98	1 290.7	1957—2014
11	若羌	39.03	88.17	889.3	1957—2014
12	和田	37.13	79.93	1 374.7	1957—2014
13	哈密	42.82	93.52	737.9	1961—2014
14	敦煌	40.15	94.68	1 139.6	1957—2014
15	酒泉	39.77	98.48	1 478.2	1993—2014
16	武威	37.92	102.67	1 531.9	1961—1966
17	民勤	38.63	103.08	1 368.5	1957—2014
18	兰州	36.05	103.88	1 518.3	1959—2004
19	榆中	35.87	104.15	1 875.4	2005—2014
20	刚察	37.33	100.13	3 302.4	1993—2014
21	格尔木	36.42	94.90	2 809.2	1957—2014
22	西宁	36.72	101.75	2 295.2	1959—2014
23	玉树	33.02	97.02	3 682.2	1960—2014
24	果洛	34.47	100.25	3 720	1993—2014
25	银川	38.48	106.22	1 112.7	1959—2014
26	固原	36.00	106.27	1 752.8	1985—2014
27	延安	36.6	109.5	958.8	1990—2014
28	西峰	35.73	107.63	1 421.9	2005—2014
29	西安	34.30	108.93	398.0	1959—2005
30	安康	32.72	109.03	291.2	1990—2014

$u_2$ ——2 m 高处的风速, m/s

$e_s$ ——饱和水汽压, kPa

$e_a$ ——实际水汽压, kPa

$\Delta$ ——温度水汽压曲线的斜率, kPa/°C

$\gamma$ ——湿度计常数, kPa/°C

$RH$ ——相对湿度

$u_z$ ——z 高处的风速, m/s

$z$ ——风速测量高度, m

$T_{\max}$ ——日最高气温, °C

$T_{\min}$ ——日最低气温, °C

其中,  $R_n$  计算需要地表总辐射 ( $R_s$ ) 实测数据, 当该实测数据缺失而有日照时数观测资料时, ALLEN 等<sup>[14]</sup> 推荐使用 Ångström - Prescott (A - P) 法来计算  $R_s$ , 其计算式为

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

式中  $R_a$ ——地外辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$a$ 、 $b$ ——经验参数, 随大气状况、时间、地理纬度变化

当日照时数也有缺失时, ALLEN 等<sup>[2]</sup> 建议使用温度资料计算  $R_s$ , 其计算式为

$$R_s = k_{RS} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (6)$$

式中  $k_{RS}$ ——辐射修正系数, 内陆地区一般取 0.16

当相对湿度资料缺失时, ALLEN 等<sup>[14]</sup> 建议使用如下计算式近似代替

$$e_a = 0.6108 \exp(17.27 T_{\min}) / (T_{\min} + 273) \quad (7)$$

当风速资料缺失时, ALLEN 等<sup>[14]</sup> 首先建议使用临近气象站的风速资料代替或者使用 2 m/s 风速近似代替, 本研究中, 采用 2 m/s 风速近似代替。P - M 法的其他各个参数计算式参照文献[14]。

当相对湿度和风速资料缺失时, Priestley - Taylor (P - T) 法是国际和国内应用非常广泛的  $ET_0$  估算法。P - T 法是早期 Penman 法的简化版本, 该法将空气动力学项替换为修正系数, 其计算式为

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (8)$$

式中  $\lambda$ ——汽化潜热常数, 取 2.45 MJ/kg

Makkink 法与 P - T 法结构相似, 该方法把  $R_n$  进一步简化为  $R_s$  乘以某一修正系数然后总体减去一个常数项, 其计算式为

$$ET_0 = \frac{0.61}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s - 0.12 \quad (9)$$

Irmak 法采用多元回归建立温度和辐射与  $ET_0$  的关系, 其计算式为

$$ET_0 = -0.611 + 0.149R_s + 0.079T \quad (10)$$

当仅有温度资料时, Hargreaves 法是国际上应用广泛的方法, 本研究使用其中 4 种改进 Hargreaves - Samani (H - S) 法, 其计算式为

$$ET_0 = 0.001224R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.4} (T + 20) \quad (11)$$

$$ET_0 = 0.00102R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} (T + 16.8) \quad (12)$$

$$ET_0 = 0.0005304R_a (T_{\max} - T_{\min} - 0.0123R) ^{0.76} \cdot (T + 17) \quad (13)$$

$$ET_0 = 0.000938R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.4} (T + 17.8) \quad (14)$$

式中  $R$ ——降水量, mm

#### 1.4 统计评价与数据处理

使用参考作物蒸发蒸腾量估算法常用的 3 个评价指标: 均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (MBE)、决定系数 ( $R^2$ ), 其计算式分别为

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - P_i)^2} \quad (15)$$

$$M_{\text{BE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - P_i) \quad (16)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (17)$$

式中  $C_i$ ——对照值  $\bar{C}$ ——对照值平均值  
 $P_i$ ——预测值  $\bar{P}$ ——预测值平均值

以实测  $R_s$  估算的  $ET_0$  作为对照,对 15 种替代方法进行统计分析,其相关的计算式如表 2 所示。

对 P-T 法、H-S 法、Irmak 法、Makkink 法率定后参数进行克里格插值。

除 P-T 法外,H-S 法、Irmak 法、Makkink 法的参数率定使用 Matlab 软件外,其余数据处理和文件读取等过程使用面向对象语言 C# 编程进行。

使用 SPSS 18 软件对率定后 P-T 法、H-S 法、Irmak 法和 Makkink 法估算的  $ET_0$  与 P-M 方法估算  $ET_0$  进行方差分析。

表 2 本文所用的  $ET_0$  估算法及相关计算式

Tab. 2  $ET_0$  estimation methods and related calculation formula

方法	说明	使用相关计算式
P-M	FAO 56 P-M 法	式(1)~(4)
- $R_s$	P-M 法缺少辐射资料	式(1)~(5)
-RH	P-M 法缺少相对湿度资料	式(1)、(4)、(7)
-n	P-M 法缺少日照时数资料	式(1)~(4)、(6)
-u	P-M 法缺少风速资料	式(1)~(3)
-RH、-n	P-M 法缺少相对湿度和日照时数资料	式(1)、(4)、(6)、(7)
-RH、-u	P-M 法缺少相对湿度和风速资料	式(1)、(7)
-n、-u	P-M 法缺少日照时数和风速资料	式(1)~(3)、(6)
-RH、-u、-n	P-M 法缺少日照时数、相对湿度和风速资料	式(1)、(6)、(7)
P-T	P-T 法	式(8)
Makkink	Makkink 法	式(9)
Irmak	Irmak 法	式(10)
H-S	Hargreaves-Samani 法 4 种版本	式(11)~(14)

## 2 结果与分析

### 2.1 FAO Penman-Monteith 标准法及替代方法

FAO 56 P-M 法与不同气象要素缺失时 FAO 56 推荐的替代方法计算  $ET_0$  的决定系数 ( $R^2$ ) 和排序如表 3 所示。从表 3 可以看出,在西北 5 省区的 30 个辐射站中,21 个站在仅地表总辐射 ( $R_s$ ) 缺失时,使用 Ångström-Presscott (A-P) 模型估算  $R_s$  后计算  $ET_0$  的  $R^2$  最高,这些站主要分布于新疆、甘肃西北部、青海和宁夏境内,而 30 站的  $R^2$  介于 0.933~0.994 之间;有 6 个站在仅有相对湿度缺失时,估算实际水汽压后计算  $ET_0$  的  $R^2$  最高,这些站主要位于陕西和青海境内,而 30 站的  $R^2$  介于 0.925~0.990 之间;有 5 个站在风速资料缺失时,估算  $ET_0$  的  $R^2$  最高,而 30 站的  $R^2$  介于 0.865~0.982 之间;而当日照时数资料缺失时,有 12 个站估算  $ET_0$  的  $R^2$  可以排在第 2 位,这些站均位于新疆地区,30 站的  $R^2$  介于 0.854~0.990 之间;当相对湿度和日照时数资料同时缺失或者相对湿度和风速同时缺失时,各站的  $R^2$  排序位于第 4~7 位,30 站的  $R^2$  分别介于 0.846~

0.939 之间和 0.766~0.962 之间;当相对湿度、日照时数和风速同时缺失时,各站  $R^2$  基本排在最后,其值介于 0.776~0.925 之间。

FAO 56 P-M 法与不同气象要素缺失时 FAO 56 推荐的替代方法估算  $ET_0$  的 MBE 和 RMSE 如图 1 和图 2 所示。当  $R_s$  数据缺失时,使用 A-P 法估算  $R_s$  得到的  $ET_0$  与  $R_s$  实测对应的  $ET_0$  的 MBE 在 0.1 mm/d 以内(图 1a),其 RMSE 在 0.4 mm/d 以内(图 2a)。当 RH 数据缺失时,使用计算式(7)近似计算  $e_a$  估算的  $ET_0$  总体呈现高估,其 MBE 介于 -0.09~0.54 mm/d 之间,高估最多的是兰州站,但甘肃省其他站高估较少;分省来看,新疆高估比较普遍,有 77% 的站 MBE 在 0.2 mm/d 以上, RMSE 均达到 0.6 mm/d 左右。当日照时数缺失时,有 26 个站替代方法与原法的 MBE 为负值,但 MBE 低于 -0.2 mm/d 的站仅有 3 个(图 1g); RMSE 介于 0.3~0.6 mm/d 之间(图 2g)。当仅有风速缺失,替代方法与原方法 MBE 有 27 个站为负值,伊宁和哈密 2 站低估最明显,而焉耆 MBE 不足 0.1 mm/d,但 RMSE 达到 1 mm/d,可能是由于该地区年际风速变化较大所致。当日照时数与风速均缺失时,其各站

表 3 FAO 56 P - M 法在参数缺失条件下估算  $ET_0$  的决定系数和排序Tab. 3 Determination coefficient and ranking of FAO P - M method estimated  $ET_0$  under parameters lacking condition

站名	$-R_s$		$-RH$		$-n$		$-u$		$-RH, -n$		$-RH, -u$		$-n, -u$		$-RH, -u, -n$	
	$R^2$	排序	$R^2$	排序	$R^2$	排序	$R^2$	排序	$R^2$	排序	$R^2$	排序	$R^2$	排序	$R^2$	排序
阿勒泰	0.994	1	0.962	3	0.976	2	0.958	4	0.925	6	0.918	7	0.935	5	0.882	8
塔城	0.990	1	0.978	2	0.968	4	0.972	3	0.935	7	0.953	5	0.941	6	0.908	8
奇台	0.994	1	0.980	2	0.968	4	0.980	2	0.937	7	0.956	5	0.955	6	0.925	8
伊宁	0.986	1	0.986	1	0.955	4	0.972	3	0.933	7	0.953	5	0.935	6	0.908	8
乌鲁木齐	0.994	1	0.962	3	0.970	2	0.962	3	0.906	7	0.939	5	0.929	6	0.882	8
焉耆	0.988	1	0.970	2	0.964	4	0.966	3	0.931	6	0.910	7	0.933	5	0.878	8
吐鲁番	0.994	1	0.955	3	0.978	2	0.897	5	0.937	4	0.852	7	0.878	6	0.841	8
阿克苏	0.988	1	0.964	3	0.968	2	0.964	3	0.939	5	0.908	7	0.937	6	0.893	8
库车	0.994	1	0.937	4	0.978	2	0.941	3	0.920	6	0.884	7	0.924	5	0.872	8
喀什	0.990	1	0.955	3	0.970	2	0.945	4	0.914	5	0.885	7	0.906	6	0.841	8
若羌	0.994	1	0.925	3	0.982	2	0.854	5	0.908	4	0.766	8	0.839	6	0.769	7
和田	0.990	1	0.955	3	0.966	2	0.949	4	0.925	5	0.901	7	0.925	5	0.880	8
哈密	0.992	1	0.960	3	0.976	2	0.920	5	0.929	4	0.865	7	0.893	6	0.834	8
敦煌	0.992	1	0.953	3	0.972	2	0.908	5	0.925	4	0.839	7	0.891	6	0.826	8
酒泉	0.992	1	0.968	2	0.964	4	0.968	2	0.931	6	0.929	7	0.939	5	0.897	8
武威	0.974	1	0.960	2	0.920	4	0.947	3	0.885	7	0.893	5	0.893	5	0.848	8
民勤	0.990	1	0.956	3	0.962	2	0.937	4	0.908	6	0.887	7	0.910	5	0.856	8
兰州	0.972	2	0.990	1	0.889	5	0.966	3	0.878	6	0.947	4	0.876	7	0.857	8
榆中	0.984	2	0.978	3	0.933	5	0.990	1	0.910	7	0.962	4	0.929	6	0.902	8
刚察	0.986	2	0.970	3	0.939	5	0.988	1	0.904	7	0.958	4	0.925	6	0.891	8
格尔木	0.994	1	0.962	3	0.966	2	0.951	4	0.918	7	0.925	6	0.929	5	0.887	8
西宁	0.972	2	0.984	1	0.902	5	0.968	3	0.882	7	0.937	4	0.884	6	0.850	8
玉树	0.933	4	0.988	1	0.865	5	0.974	2	0.848	7	0.947	3	0.861	6	0.832	8
果洛	0.966	3	0.982	2	0.897	5	0.990	1	0.874	7	0.956	4	0.895	6	0.857	8
银川	0.984	1	0.960	3	0.947	4	0.962	2	0.901	7	0.912	6	0.916	5	0.861	8
固原	0.984	1	0.956	3	0.927	5	0.980	2	0.865	7	0.933	4	0.904	6	0.843	8
延安	0.976	3	0.982	1	0.918	5	0.982	1	0.895	7	0.956	4	0.916	6	0.884	8
西峰	0.986	1	0.960	3	0.931	5	0.984	2	0.846	7	0.949	4	0.924	6	0.841	8
西安	0.956	3	0.968	1	0.908	5	0.964	2	0.865	7	0.920	4	0.884	6	0.834	8
安康	0.949	3	0.978	2	0.876	6	0.984	1	0.852	7	0.947	4	0.880	5	0.848	8
最小值	0.933		0.925		0.865		0.854		0.846		0.766		0.839		0.769	
最大值	0.994		0.990		0.982		0.990		0.939		0.962		0.955		0.925	
平均值	0.983		0.966		0.945		0.957		0.904		0.916		0.910		0.864	

MBE 和 RMSE 关系与仅风速缺失时相似,但其值比后者略有升高,这是由于日照时数和风速缺失时  $ET_0$  均存在低估造成的,而风速影响更大。当相对湿度与日照时数均缺失时,替代方法的 MBE 在新疆以正值为主,说明相对湿度影响更大;当相对湿度与风速均缺失时,其各站 MBE 和 RMSE 与相对湿度与日照时数均缺失时相似,说明相对湿度的替代方法与风速和日照时数替代方法相比,造成的误差更大。

从以上可以看出,气象要素对于  $ET_0$  的影响存在较强的地域性,对于 P - M 法,西北 5 省区  $R_s$  缺失影响最小,其次为日照时数、风速,最后是相对湿度,陕西和青海部分站在风速缺失时仍具有较高精度,日照时数缺失时,替代方法对新疆地区  $ET_0$  估算影响较小。

## 2.2 基于温度和辐射的简化法

### 2.2.1 Priestley - Taylor 法

Priestley - Taylor (P - T) 法是 Penman 法的简化版本,该法把空气动力学项简化为辐射项的 0.26 倍,系数取 1.26, P - T 法与 FAO P - M 法(对照法)估算  $ET_0$  的  $R^2$ 、MBE 和 RMSE 如表 4 所示。在率定前,2 种方法的  $R^2$  介于 0.757 ~ 0.933 之间,MBE 介于 -0.423 ~ 1.020 mm/d 之间,其中有 19 个站  $ET_0$  与对照法相比存在不同程度高估,有 10 个站存在不同程度低估,高估的站主要集中在新疆境内。RMSE 介于 0.505 ~ 1.665 mm/d 之间,说明该法不适宜不经率定直接使用。在率定后, $\alpha$  值介于 1.02 ~ 1.64 之间,说明在西北地区,空气动力学项最小仅占辐射项的 2%,最大可接近辐射项的 2/3。率定后,MBE 值介于

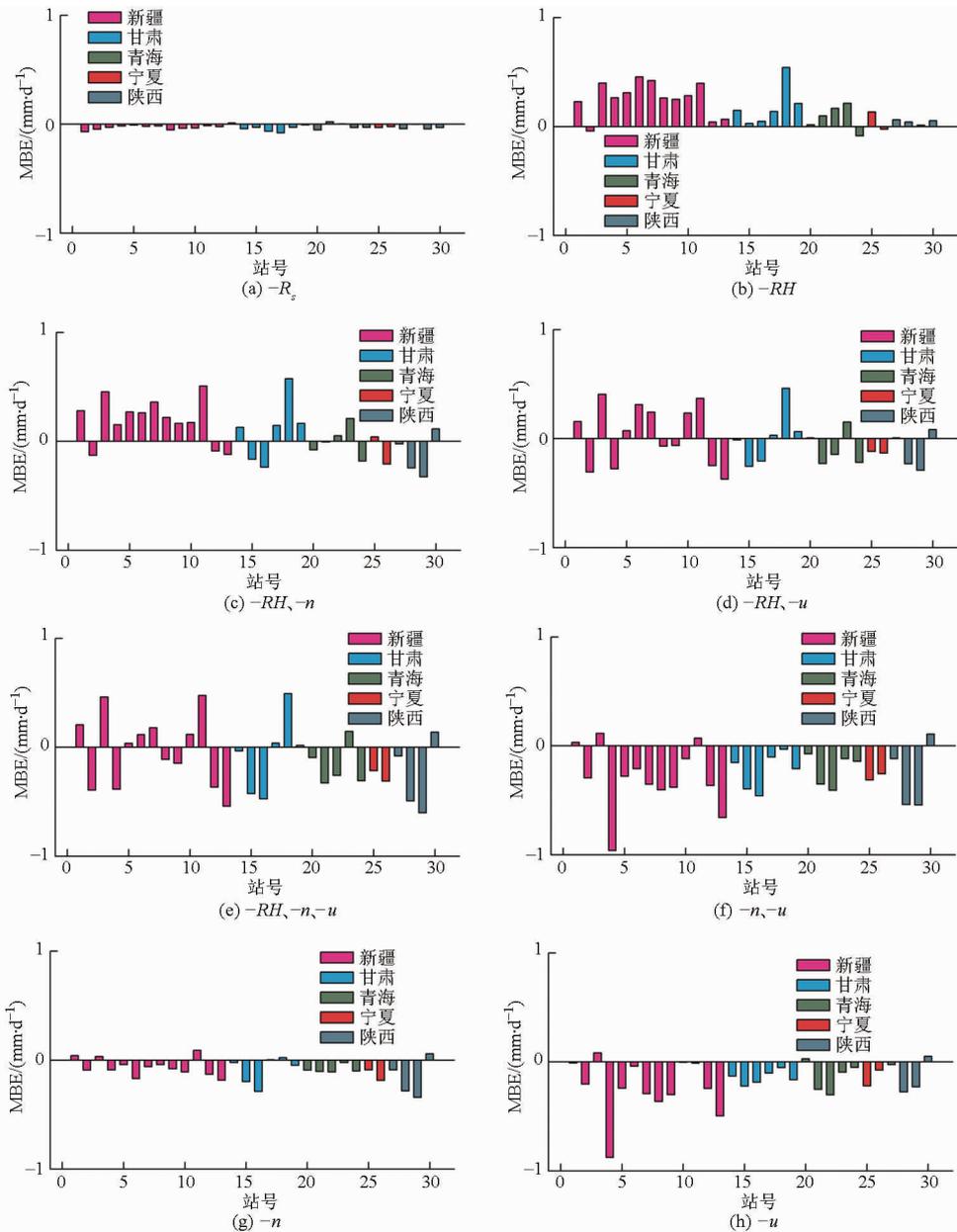


图1 西北5省不同站点数据缺失对 $ET_0$ 影响的MBE

Fig. 1 MBE of effect of data missing on estimated  $ET_0$  in northwest five provinces

-0.004 ~ 0.201 之间,高估和低估现象都有明显改进,而RMSE在大部分站点改进很小,在新疆乌鲁木齐、库车、喀什和青海玉树等站, RMSE下降了0.2 mm/d以上。由于率定只改变了 $\alpha$ 取值,故 $R^2$ 没有任何变化。

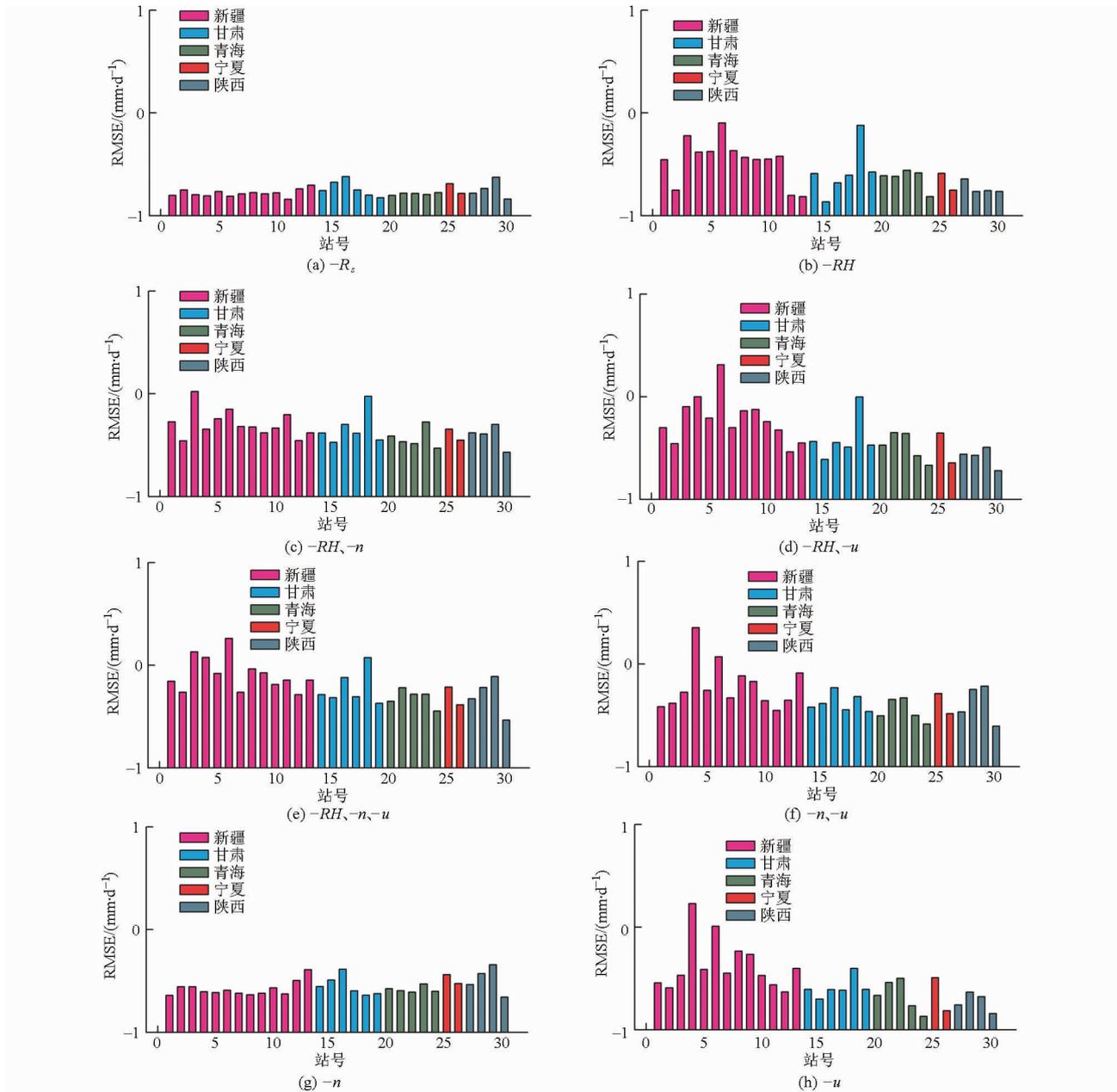
利用ArcGIS软件对30个站点的 $\alpha$ 进行克里格插值(图3),对参数的空间变化进行研究。 $\alpha$ 值在西北5省区呈现明显的条带分布状态,新疆若羌 $\alpha$ 值最大,以该站为中心向东、西2个方向逐渐减小,在海东果洛达到最小,而以果洛为中心,青海北部、甘肃东部和陕西北部 $\alpha$ 值增大到1.1~1.2,而宁夏大部分地区、陕西北部、甘肃武威、民勤等地则介于1.2~1.3之间。

### 2.2.2 Makkink法

Makkink法与FAO P-M法(对照法)估算 $ET_0$

的 $R^2$ 、MBE和RMSE如表5所示。在率定前两者的 $R^2$ 介于0.741~0.931之间,与P-T法差异不大。但MBE均为正值,说明该法在西北地区存在不同程度高估, RMSE在果洛站为0.349 mm/d,该方法可以不经率定在该站使用,但绝大多数站点RMSE偏差比较大,最大RMSE接近2 mm/d。率定后, $a$ 值介于0.58~0.88之间, $b$ 值介于0.05~0.24之间, $R^2$ 介于0.860~0.956之间,平均提高0.058。率定后MBE介于-0.03~0.04 mm/d之间,不存在比较明显的高估和低估, RMSE平均降幅达到0.24 mm/d,在新疆除哈密、塔城外, RMSE均在0.65 mm/d以上,与P-T法相比,精度稍有提高。

Makkink法的参数 $a_m$ 值存在多个局部中心(图4a),在新疆的中北部4站最高,向周围逐渐降

图 2 西北 5 省不同站点数据缺失对  $ET_0$  影响的 RMSEFig. 2 RMSE of effects of data missing on estimated  $ET_0$  in northwest five provinces

低;此外,甘肃中南部和青海西北部也存在局部峰值,其值介于 0.7 ~ 0.8 之间,向周围逐渐减小,最低值出现在陕西东南部、甘肃酒泉和青海果洛站。参数  $b_M$  值在陕西地区最高,其值在 0.20 ~ 0.24 之间,在新疆北部(除阿勒泰外),格尔木和武威等地存在局部最低值(图 4b)。

### 2.2.3 Hargreaves - Samani 法

Hargreaves - Samani(H - S)法率定后参数值以及估算  $ET_0$  与 FAO P - M 法(对照法)估算  $ET_0$  的  $R^2$ 、MBE 和 RMSE 如表 6 所示。由于 H - S 法的  $R^2$ 、MBE 和 RMSE 在率定后与 4 种 H - S 法相比均有明显改善,故将 4 种方法结果取平均值,4 种方法  $R^2$  介于 0.783 ~ 0.923 之间,与 P - M 法在日照时数、风

速和相对湿度缺失时相差不大。各站 MBE 波动比较剧烈,平均值介于 -0.839 ~ 0.604 之间, RMSE 介于 0.603 ~ 1.375 之间,表明以上 4 种方法均不适合在新疆地区直接应用。率定后,  $R^2$  介于 0.904 ~ 0.962 之间, MBE 介于 -0.03 ~ 0.04 之间, RMSE 介于 0.402 ~ 1.117 之间, 5 省区中在陕西精度较高, 在新疆精度最低,但也已经明显好于日照时数、风速和相对湿度缺失时的 P - M 法。

H - S 法率定后参数  $a_H$  值在新疆中西部最高, 向北、南和东 3 个方向逐渐降低, 在向东方向上, 每隔 600 km 参数  $a_H$  值下降约为  $3 \times 10^{-4}$  (图 5a)。  $b_H$  值与  $a_H$  值呈现相反分布趋势, 在新疆中西部最小, 向北、南和东 3 个方向上逐渐升高, 其在向东方向

表4 Priestley-Taylor 法参数率定前后参数值和统计结果

Tab.4 Parameters and statistical results before and after calibration of Priestley-Taylor method

站名	率定前( $\alpha = 1.26$ )			率定后		
	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$\alpha$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )
阿勒泰	0.869	0.280	0.861	1.35	0.111	0.840
塔城	0.891	0.282	0.799	1.33	0.143	0.783
奇台	0.916	0.265	0.724	1.37	0.052	0.665
伊宁	0.925	0.003	0.573	1.23	0.066	0.566
乌鲁木齐	0.876	0.562	1.142	1.55	0.007	0.902
焉耆	0.904	0.166	0.651	1.30	0.084	0.642
吐鲁番	0.856	0.540	1.113	1.48	0.081	0.958
阿克苏	0.893	0.206	0.702	1.33	0.058	0.686
库车	0.857	0.806	1.243	1.58	0.138	0.957
喀什	0.859	0.400	0.947	1.41	0.070	0.855
若羌	0.757	1.020	1.665	1.64	0.189	1.341
和田	0.869	0.596	0.955	1.46	0.151	0.796
哈密	0.852	0.470	1.018	1.39	0.188	0.958
敦煌	0.835	0.447	0.998	1.37	0.201	0.960
酒泉	0.901	0.344	0.714	1.35	0.155	0.679
武威	0.863	0.067	0.763	1.23	0.135	0.757
民勤	0.854	0.565	0.984	1.44	0.184	0.869
兰州	0.908	-0.192	0.505	1.17	-0.004	0.452
榆中	0.906	-0.084	0.505	1.21	0.020	0.484
刚察	0.916	-0.197	0.651	1.09	0.157	0.493
格尔木	0.933	0.458	0.752	1.39	0.159	0.657
西宁	0.918	-0.209	0.578	1.13	0.067	0.467
玉树	0.865	-0.387	0.700	1.05	0.084	0.434
果洛	0.872	-0.423	0.686	1.02	0.095	0.352
银川	0.899	0.101	0.750	1.24	0.145	0.747
固原	0.867	-0.027	0.644	1.20	0.096	0.625
延安	0.899	0.079	0.559	1.26	0.079	0.559
西峰	0.933	0.050	0.646	1.25	0.070	0.645
西安	0.848	-0.121	0.715	1.20	0.004	0.694
安康	0.902	-0.241	0.581	1.14	0.008	0.499
最小值	0.757	-0.423	0.505	1.02	-0.004	0.352
平均值	0.881	0.194	0.804	1.31	0.100	0.711
最大值	0.933	1.020	1.665	1.64	0.201	1.341

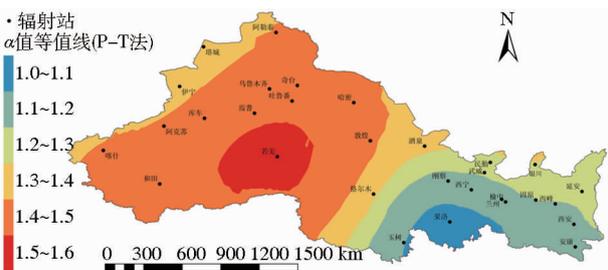


图3 Priestley-Taylor 法率定后参数  $\alpha$  分布  
Fig.3 Spatial distribution of calibrated  $\alpha$  of Priestley-Taylor method

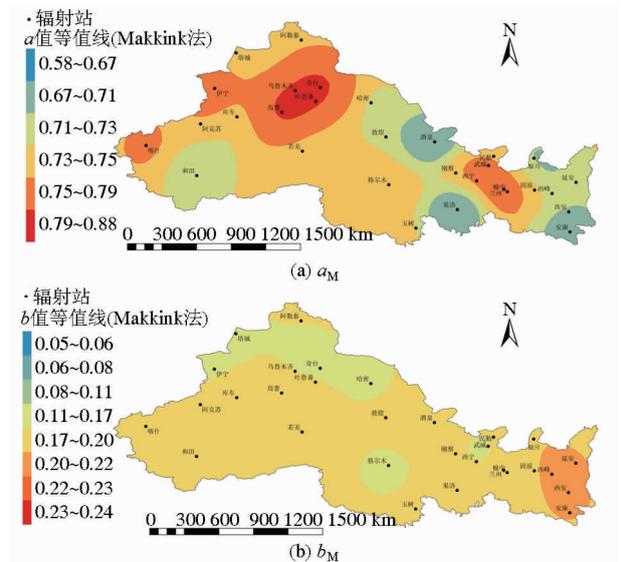


图4 Makkink 法率定后参数分布

Fig.4 Spatial distribution of calibrated parameters of Makkink method

上,每隔 800 km,大约升高 0.1,最终在陕西东北达到最大(图 5b)。  $c_H$  值在陕西地区最高(除西安外),向西方向逐渐下降,在新疆北部最低。

### 2.2.4 Irmak 法

Irmak 法率定后参数值以及估算  $ET_0$  与 FAO P-M 法(对照法)估算  $ET_0$  的  $R^2$ 、MBE 和 RMSE 如表 7 所示。Irmak 法  $R^2$  介于 0.734 ~ 0.914 之间,MBE 平均高估 0.371 mm/d,最高高估 0.9 mm/d 以上, RMSE 平均也达到 0.767 mm/d,总体精度低于在率定前与相对湿度、风速缺失时的 P-M 法。率定后,MBE 降低至零附近,无整体高估或低估,  $R^2$  最低在 0.89 以上,高于率定前平均值, RMSE 在青海、宁夏和陕西地区较低,最大在 0.6 mm/d 左右,该法在若羌和吐鲁番等地误差较大。从参数看,参数  $a_1$  变化比较剧烈,其值介于 -0.458 ~ 0.367 之间,  $b_1$  和  $c_1$  变化较小。Irmak 法率定后参数  $a_1$  值存在 2 个峰值地区和 2 个低谷地区(图 6a),其中,一个峰值在新疆最北部的阿勒泰站,另一个峰值以格尔木为中心,半径约为 600 km,而最低谷出现在最西部的喀什站和陕西、甘肃东部和宁夏大部分地区。率定后参数  $b_1$  值分布与参数  $a_1$  值相反,其低谷在  $a_1$  参数的峰值地区,而峰值在参数  $a_1$  的低谷地区(图 6b)。参数  $c_1$  以若羌为中心,向西、北和东 3 个方向逐渐降低,在陕西和甘南地区达到最小(图 6c)。

### 2.3 综合比较

不同  $ET_0$  估算法各站 RMSE 和  $R^2$  如表 8 所示。(从 RMSE 的  $F$  检验差异可见,  $ET_0$  估算法可以被划分为 4 个等级,当缺少辐射数据时, Ångström-Presscott (A-P) 法是该地区适宜的替代方法;当风

表 5 Makkink 法参数率定前后参数值和统计结果

Tab. 5 Parameters and statistical results before and after calibration of Makkink method

站名	率定前( $a_M = 0.61, b_M = -0.12$ )			率定后				
	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$a_M$	$b_M$	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )
阿勒泰	0.899	0.467	0.923	0.74	0.16	0.948	-0.014	0.716
塔城	0.925	0.323	0.708	0.72	0.07	0.962	-0.023	0.559
奇台	0.899	0.815	1.357	0.88	0.05	0.948	-0.017	0.812
伊宁	0.830	0.691	1.356	0.81	0.07	0.911	-0.031	1.029
乌鲁木齐	0.859	0.698	1.212	0.81	0.07	0.927	-0.023	0.846
焉耆	0.741	1.192	1.894	0.87	0.24	0.861	0.022	1.330
吐鲁番	0.848	0.829	1.225	0.79	0.23	0.921	-0.003	0.800
阿克苏	0.863	0.579	1.116	0.75	0.15	0.929	-0.025	0.866
库车	0.824	0.603	1.128	0.72	0.24	0.908	0.024	0.909
喀什	0.846	0.799	1.213	0.78	0.24	0.920	0.034	0.826
若羌	0.878	0.592	0.941	0.72	0.24	0.937	-0.004	0.682
和田	0.904	0.179	0.521	0.66	0.14	0.951	-0.019	0.480
哈密	0.901	0.264	0.646	0.71	0.06	0.949	-0.013	0.548
敦煌	0.878	0.452	0.838	0.71	0.22	0.937	-0.027	0.666
酒泉	0.878	0.086	0.445	0.60	0.24	0.937	0.003	0.434
武威	0.859	0.483	0.880	0.76	0.15	0.927	-0.012	0.669
民勤	0.931	0.449	0.834	0.74	0.13	0.965	-0.031	0.595
兰州	0.846	0.926	1.459	0.85	0.11	0.920	-0.003	0.945
榆中	0.908	0.574	0.884	0.74	0.22	0.953	-0.018	0.595
刚察	0.924	0.556	0.975	0.79	0.10	0.961	-0.022	0.637
格尔木	0.897	0.495	0.900	0.77	0.06	0.947	-0.009	0.648
西宁	0.869	0.549	1.003	0.77	0.11	0.932	-0.018	0.742
玉树	0.918	0.471	0.727	0.73	0.20	0.958	-0.006	0.493
果洛	0.918	0.012	0.349	0.58	0.24	0.958	-0.001	0.342
银川	0.819	0.372	0.909	0.67	0.24	0.905	0.012	0.826
固原	0.927	0.371	0.633	0.72	0.14	0.963	-0.019	0.453
延安	0.893	0.367	0.678	0.68	0.24	0.945	0.009	0.552
西峰	0.918	0.524	0.76	0.74	0.24	0.958	-0.004	0.481
西安	0.891	0.477	0.746	0.73	0.24	0.944	0.007	0.529
安康	0.916	0.120	0.409	0.60	0.24	0.957	0.036	0.389
最小值	0.741	0.012	0.349	0.58	0.05	0.861	-0.031	0.342
平均值	0.880	0.511	0.922	0.74	0.17	0.938	-0.007	0.680
最大值	0.931	1.192	1.894	0.88	0.24	0.965	0.036	1.330

表 6 Hargreaves - Samani 法参数率定前后参数值和统计结果

Tab. 6 Parameters and statistical results before and after calibration of Hargreaves - Samani method

站名	率定前			率定后					
	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$a_H$	$b_H$	$c_H$
阿勒泰	0.883 ± 0.006	0.164 ± 0.307	0.855 ± 0.139	0.942	0.001	0.753	0.001 28	0.36	21.07
塔城	0.911 ± 0.003	-0.483 ± 0.415	0.937 ± 0.234	0.956	-0.021	0.602	0.000 70	0.55	18.17
奇台	0.881 ± 0.006	0.363 ± 0.305	1.039 ± 0.222	0.941	0.034	0.867	0.001 42	0.42	14.94
伊宁	0.852 ± 0.016	-0.564 ± 0.487	1.282 ± 0.273	0.933	-0.030	0.898	0.002 15	0.16	15.03
乌鲁木齐	0.852 ± 0.020	-0.081 ± 0.402	0.973 ± 0.100	0.934	-0.007	0.804	0.002 29	0.20	13.25
焉耆	0.783 ± 0.024	0.009 ± 0.548	1.375 ± 0.186	0.904	-0.018	1.117	0.002 76	0.09	21.19
吐鲁番	0.883 ± 0.013	0.042 ± 0.407	0.835 ± 0.119	0.945	0.005	0.674	0.001 37	0.32	21.54
阿克苏	0.845 ± 0.019	-0.203 ± 0.474	1.124 ± 0.186	0.933	-0.029	0.844	0.002 23	0.12	22.77
库车	0.841 ± 0.020	-0.204 ± 0.500	1.103 ± 0.220	0.930	-0.011	0.795	0.001 94	0.16	24.37
喀什	0.860 ± 0.007	0.081 ± 0.417	0.932 ± 0.128	0.929	0.004	0.780	0.000 93	0.43	25.33
若羌	0.894 ± 0.014	0.604 ± 0.353	0.925 ± 0.292	0.951	-0.002	0.603	0.001 40	0.33	25.61

续表 6

站名	率定前			率定后					
	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$a_H$	$b_H$	$c_H$
和田	0.848 ± 0.003	-0.300 ± 0.351	0.816 ± 0.124	0.925	-0.004	0.588	0.000 59	0.57	23.12
哈密	0.857 ± 0.003	-0.620 ± 0.373	1.017 ± 0.238	0.929	-0.002	0.643	0.000 61	0.61	15.67
敦煌	0.860 ± 0.003	-0.119 ± 0.367	0.848 ± 0.038	0.931	-0.006	0.698	0.000 70	0.54	23.59
酒泉	0.823 ± 0.002	-0.160 ± 0.338	0.702 ± 0.074	0.916	-0.007	0.498	0.000 58	0.52	28.67
武威	0.825 ± 0.007	-0.683 ± 0.366	1.124 ± 0.240	0.915	0.029	0.720	0.000 60	0.63	13.62
民勤	0.907 ± 0.001	-0.057 ± 0.361	0.814 ± 0.079	0.954	-0.005	0.675	0.000 61	0.60	22.94
兰州	0.923 ± 0.002	-0.120 ± 0.375	0.800 ± 0.095	0.962	-0.008	0.626	0.000 73	0.55	20.32
榆中	0.887 ± 0.015	-0.397 ± 0.422	0.951 ± 0.213	0.949	-0.020	0.642	0.001 54	0.26	18.81
刚察	0.901 ± 0.013	-0.376 ± 0.411	0.895 ± 0.169	0.955	-0.014	0.611	0.001 66	0.27	15.36
格尔木	0.877 ± 0.015	0.368 ± 0.368	1.000 ± 0.242	0.946	0.003	0.781	0.002 61	0.15	16.57
西宁	0.896 ± 0.003	-0.022 ± 0.392	0.793 ± 0.093	0.950	-0.009	0.616	0.000 73	0.50	26.82
玉树	0.846 ± 0.002	-0.247 ± 0.420	0.966 ± 0.124	0.923	-0.009	0.744	0.000 63	0.55	24.56
果洛	0.889 ± 0.016	-0.318 ± 0.356	0.789 ± 0.115	0.954	0.006	0.503	0.000 41	0.71	23.41
银川	0.833 ± 0.012	-0.092 ± 0.318	0.792 ± 0.027	0.921	0.009	0.657	0.000 53	0.64	24.02
固原	0.869 ± 0.018	-0.603 ± 0.390	1.027 ± 0.265	0.945	0.001	0.549	0.000 36	0.71	25.00
延安	0.828 ± 0.021	0.044 ± 0.300	0.777 ± 0.096	0.926	0.017	0.652	0.000 42	0.75	26.73
西峰	0.849 ± 0.006	0.069 ± 0.292	0.603 ± 0.063	0.932	-0.003	0.433	0.000 62	0.52	28.42
西安	0.840 ± 0.008	-0.839 ± 0.365	1.166 ± 0.302	0.926	0.039	0.607	0.000 63	0.64	10.40
安康	0.869 ± 0.022	0.398 ± 0.254	0.658 ± 0.182	0.953	0.009	0.402	0.000 40	0.75	28.33
最小值	0.783 ± 0.001	-0.839 ± 0.254	0.603 ± 0.027	0.904	-0.030	0.402	0.000 01	0.09	10.40
平均值	0.864 ± 0.011	-0.145 ± 0.381	0.931 ± 0.163	0.937	-0.002	0.679	0.001 10	0.45	21.32
最大值	0.923 ± 0.024	0.604 ± 0.548	1.375 ± 0.302	0.962	0.039	1.117	0.003 00	0.75	28.67

注:参数  $a_H$ 、 $b_H$  和  $c_H$  在 Hargreaves - Samani 法的表示形式为:  $ET_0 = a_H R_a (T_{\max} - T_{\min})^{b_H} (T + c_H)$ 。

表 7 Irmak 法参数率定前后参数值和统计结果

Tab. 7 Parameters and statistical results before and after calibration of Irmak method

站名	率定前( $a_1 = -0.611, b_1 = 0.149, c_1 = 0.079$ )			率定后					
	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$a_1$	$b_1$	$c_1$
阿勒泰	0.835	0.523	0.939	0.941	<0.001	0.758	0.296	0.121	0.090
塔城	0.882	0.396	0.754	0.960	<0.001	0.633	-0.134	0.138	0.090
奇台	0.857	0.568	0.905	0.954	<0.001	0.687	0.163	0.129	0.093
伊宁	0.895	0.173	0.603	0.960	<0.001	0.574	-0.312	0.139	0.082
乌鲁木齐	0.850	0.787	1.180	0.944	<0.001	0.845	0.131	0.141	0.099
焉耆	0.893	0.314	0.704	0.951	<0.001	0.626	-0.130	0.137	0.081
吐鲁番	0.830	0.282	1.027	0.921	<0.001	0.971	-0.405	0.138	0.096
阿克苏	0.878	0.308	0.729	0.949	<0.001	0.649	-0.276	0.135	0.095
库车	0.828	0.707	1.179	0.941	<0.001	0.815	-0.113	0.126	0.128
喀什	0.859	0.469	0.947	0.939	<0.001	0.779	-0.388	0.144	0.106
若羌	0.734	0.922	1.599	0.893	<0.001	1.178	0.305	0.105	0.140
和田	0.841	0.542	0.907	0.948	<0.001	0.652	-0.126	0.121	0.118
哈密	0.846	0.420	0.955	0.933	<0.001	0.840	-0.179	0.138	0.096
敦煌	0.803	0.441	0.982	0.923	<0.001	0.835	0.197	0.109	0.113
酒泉	0.885	0.451	0.729	0.958	<0.001	0.566	-0.071	0.138	0.090
武威	0.785	0.212	0.767	0.934	<0.001	0.692	-0.096	0.119	0.104
民勤	0.808	0.657	1.043	0.932	<0.001	0.765	0.061	0.133	0.107
兰州	0.906	0.047	0.462	0.966	<0.001	0.451	-0.394	0.137	0.079
榆中	0.904	0.265	0.507	0.966	<0.001	0.432	-0.322	0.147	0.080
刚察	0.874	0.293	0.495	0.964	<0.001	0.354	0.188	0.120	0.080
格尔木	0.852	0.651	0.908	0.957	<0.001	0.564	0.367	0.120	0.118
西宁	0.899	0.147	0.454	0.963	<0.001	0.416	-0.229	0.134	0.080

续表 7

站名	率定前( $a_1 = -0.611, b_1 = 0.149, c_1 = 0.079$ )			率定后					
	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$R^2$	MBE	RMSE/ ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$a_1$	$b_1$	$c_1$
玉树	0.882	0.233	0.422	0.968	<0.001	0.312	0.057	0.121	0.083
果洛	0.884	0.211	0.404	0.973	<0.001	0.277	0.154	0.117	0.079
银川	0.857	0.264	0.683	0.945	<0.001	0.627	-0.303	0.143	0.085
固原	0.869	0.282	0.593	0.952	<0.001	0.517	-0.205	0.139	0.082
延安	0.906	0.224	0.523	0.962	<0.001	0.461	-0.324	0.154	0.067
西峰	0.901	0.261	0.563	0.958	<0.001	0.495	-0.375	0.156	0.072
西安	0.872	0.111	0.590	0.946	<0.001	0.579	-0.458	0.146	0.079
安康	0.914	-0.030	0.466	0.960	<0.001	0.448	-0.396	0.146	0.066
最小值	0.734	-0.030	0.404	0.893	<0.001	0.277	-0.458	0.105	0.066
平均值	0.861	0.371	0.767	0.949	<0.001	0.627	-0.111	0.133	0.093
最大值	0.914	0.922	1.599	0.973	<0.001	1.178	0.367	0.156	0.140

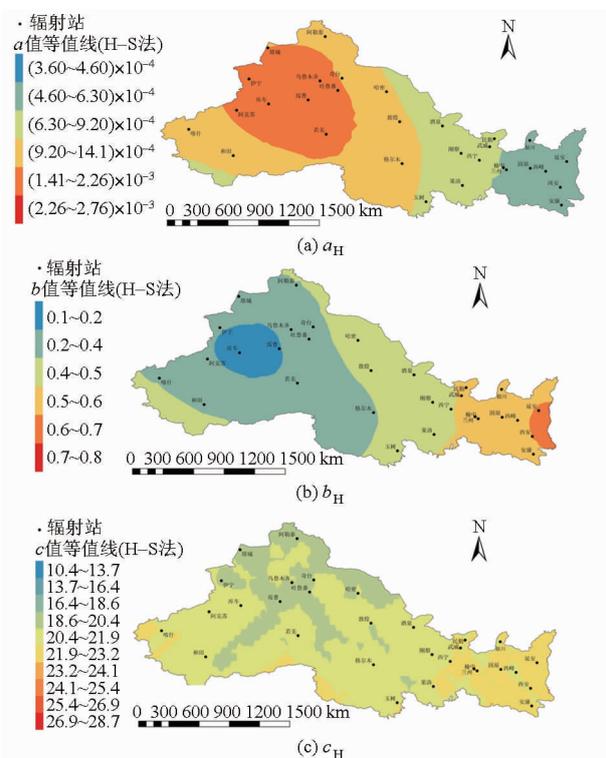


图 5 Hargreaves - Samani 法率定后参数分布

Fig. 5 Spatial distribution of calibrated parameters of Hargreaves - Samani method

速、日照时数和相对湿度缺少一项时,各种替代方法在西北 5 省区无显著差异。当风速、日照时数和相对湿度 3 项气象要素缺少 2 项时, Makkink、H - S 和 Irmak 法与对照法的  $R^2$  要显著高于 P - M 替代方法, 但 RMSE 无显著差异。当气象要素缺少 3 项时, P - M 的替代方法精度较差, 不适合在西北 5 省区使用, 此时使用率定后的 Irmak 和 H - S 法是适宜的替代选择。

### 3 讨论

实际蒸散量 ( $ET$ ) 的观测通常需要比较昂贵的仪器设备, 维护成本也很高。因此, 国内外通常采用

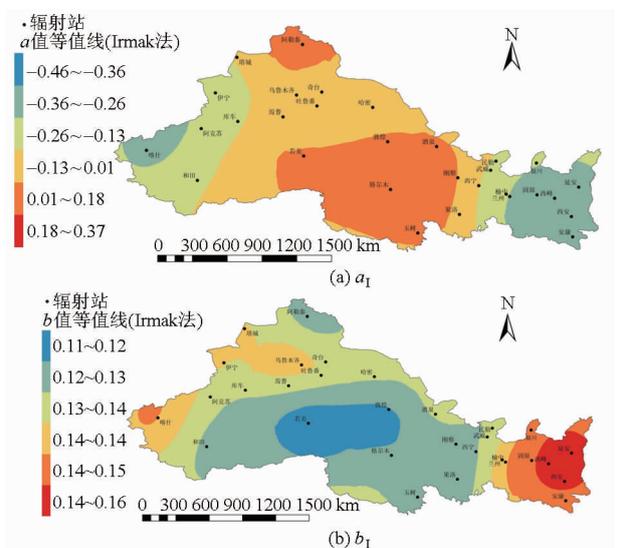


图 6 Irmak 法率定后参数分布

Fig. 6 Spatial distribution of calibrated parameters of Irmak method

表 8 不同  $ET_0$  估算法各站平均 RMSE 和  $R^2$

Tab. 8 Average RMSE and  $R^2$  of different  $ET_0$  estimation methods in 30 stations

方法	RMSE/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$R^2$
- $R_s$	0.23 <sup>a</sup>	0.98 <sup>a</sup>
-RH	0.44 <sup>b</sup>	0.97 <sup>b</sup>
-RH、-n	0.65 <sup>c</sup>	0.90 <sup>c</sup>
-RH、-u	0.63 <sup>c</sup>	0.92 <sup>c</sup>
-RH、-u、-n	0.80 <sup>d</sup>	0.86 <sup>e</sup>
-n、-u	0.68 <sup>c</sup>	0.91 <sup>c</sup>
-n	0.44 <sup>b</sup>	0.94 <sup>cd</sup>
-u	0.47 <sup>b</sup>	0.96 <sup>bc</sup>
P - T	0.71 <sup>c</sup>	0.88 <sup>f</sup>
Makkink	0.68 <sup>c</sup>	0.94 <sup>d</sup>
H - S	0.68 <sup>c</sup>	0.94 <sup>d</sup>
Irmak	0.63 <sup>c</sup>	0.95 <sup>cd</sup>

注: 同列数值后不同字母表示  $F$  检验差异显著 ( $p < 0.05$ )。RMSE 和  $R^2$  为率定后各站平均值。

$ET_0$  乘以作物系数的方法来估算实际蒸散量。本研究中, 所用的对照数据为 FAO P - M 公式计算结果,

该方法也可能与实际蒸散量存在一定的误差,如何更准确地比较简化方法的适用性和精度还有待进一步研究。

当  $R_s$  数据缺失时,使用日照时数资料的 A-P 模型模拟  $R_s$  是最常用的做法,而当日照时数资料也缺失时,ALLEN 等<sup>[14]</sup> 建议使用基于温度资料的 Hargreaves 法来模拟  $R_s$ ,该法在河南新乡<sup>[9]</sup>、保加利亚<sup>[15]</sup> 和突尼斯<sup>[16]</sup> 均具有很高的精度(RMSE 小于 0.4 mm/d),然而 SENTELHAS 等<sup>[2]</sup> 应用该法估算加拿大安大略省南部  $ET_0$  时,其精度较差(RMSE 为 0.8 mm/d),低于 P-T 法和改进 H-S 法。本研究各种方法中,A-P 模型模拟  $R_s$  估算  $ET_0$  的精度最高,RMSE 为 0.23 mm/d,其次是使用基于温度资料的 Hargreaves 法估算  $ET_0$ ,其 RMSE 为 0.44 mm/d。此外,本文使用 ALLEN 等<sup>[14]</sup> 推荐的替代方法后,相对湿度替代方法对  $ET_0$  整体造成了高估,而日照时数和风速的替代方法对  $ET_0$  整体造成了低估,如何对以上 3 个气象要素在西北能精确的估算还有待进一步的研究。

当风速和相对湿度数据缺失时,使用 P-T 法是常用的选择,该方法的经验系数 1.26 是根据原始 Penman 法率定得来的,由于 Penman 法并未考虑冠层阻力,采用该经验系数往往会高估  $ET_0$ <sup>[2]</sup>,因此在湿润地区经验系数通常低于 1.26,而在干旱地区在 1.3 以上<sup>[17-18]</sup>。本研究结果表明,经验系数  $\alpha$  介于 1.02 ~ 1.64 之间,在陕西、青海等地区低于 1.26,而在新疆地区,该值在 1.3 以上,但气候干旱的武威地区该值也低于 1.26,可能是由于数据年限较短造成的。

当风速和相对湿度数据缺失时,Makkink 法也是常用的替代方法,王淑萍等<sup>[19]</sup> 比较了 Hargreaves 法、P-T 法和 Makkink 法在黄河源区的适用性,研究显示,改进后的 Makkink 法在黄河源区具有较高

的精度。胡兴波等<sup>[20]</sup> 研究发现,Makkink 法低估了青海地区各站的  $ET_0$ ,但旬  $ET_0$  与 P-M 法最接近。本研究结果表明,改进后的 Makkink 法与 P-T 法和 P-M 替代方法的 RMSE 无显著差异,但  $R^2$  显著高于 P-T 法和 P-M 替代方法。

当仅有气温数据时,H-S 法是最简便的方法<sup>[21-23]</sup>,本研究中,改进后的 H-S 法 RMSE 与仅有气温数据的 P-M 替代方法无显著差异,但  $R^2$  显著高于后者。此外,当仅有总辐射和温度数据时,改进 Irmak 法具有较高的精度,其 RMSE 为 0.63 mm/d,P-M 替代方法  $R^2$  为 0.95,但通常总辐射是最难获得也是长序列缺失最多的数据,本研究并未探讨使用替代方法获得总辐射数据后的 Irmak 法的模拟精度,在总辐射资料存在一定程度或者全部缺失后,该方法是否依然可靠,还有待进一步研究。

## 4 结论

(1) 气象要素对于  $ET_0$  的影响存在较强的地域性,西北 5 省区  $R_s$  缺失影响最小,其次为日照时数、风速,最后是相对湿度,陕西和青海部分站在风速缺失仍具有较高精度,日照时数缺失时,替代方法对新疆地区  $ET_0$  估算影响较小。当缺少辐射数据时,基于日照资料的 Ångström - Prescott(A-P) 法是该地区适宜的替代方法。

(2) 当相对湿度、风速和日照时数有一项缺失时,使用 FAO 推荐的 P-M 替代方法可以使 RMSE 控制在 0.47 mm/d 以内, $R^2$  保持在 0.94 以上。当气象要素缺少风速和相对湿度时,使用率定后 Makkink 法是适宜的替代选择,其 RMSE 为 0.68 mm/d, $R^2$  为 0.94,当仅有气温资料时,改进后的 H-S 法是适宜的替代选择,其 RMSE 为 0.68 mm/d, $R^2$  为 0.94,MBE 接近于零,其中在陕西估算精度最高,新疆最低。

## 参 考 文 献

- 1 ESTEVEZ J, GAVILAN P, BERENGENA J. Sensitivity analysis of a Penman - Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(23):3342 - 3353.
- 2 SENTELHAS P C, GILLESPIE T J, SANTOS E A. Evaluation of FAO Penman - Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 635 - 644.
- 3 HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2):96 - 99.
- 4 HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation Drainage Engineering, 2003, 129(1):53 - 63.
- 5 LIU X, LIN E. Performance of the Priestley - Taylor equation in the semiarid climate of North China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(1):1 - 17.
- 6 王新华, 郭美华, 徐中民. 分别利用 Hargreaves 和 PM 公式计算西北干旱区  $ET_0$  的比较[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10):21 - 25.

- WANG Xinhua, GUO Meihua, XU Zhongmin. Comparison of estimating  $ET_0$  in arid-area of Northwest China by Hargreaves equation and Penman - Monteith equation[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10):21 - 25. (in Chinese)
- 7 杨枚,孙西欢. 参考作物腾发量计算法在玛纳斯河流域的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 125 - 129.  
YANG Mei, SUN Xihuan. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods on Manasi Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 125 - 129. (in Chinese)
- 8 IRMAK S, IRMAK A, ALLEN R G, et al. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5):336 - 347.
- 9 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]. 农业机械学报, 2015, 46(2):104 - 109.  
ZHANG Qian, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation methods using temperature data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):104 - 109. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 FUKUMOTO M. Comparison of several methods for estimating daily potential evaporation and actual evaporation on a bare field [J]. Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 1997, 10(5):438 - 449.
- 12 陈晟,李森,陈雷,等. 基于气温和 DC - BP - NN 的河西走廊月度  $ET_0$  估算模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12):140 - 147.  
CHEN Sheng, LI Miao, CHEN Lei, et al. Monthly reference crop evapotranspiration estimation model based on air temperature and DC - BP - NN in Hexi Corridor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):140 - 147. (in Chinese)
- 13 刘宪锋,潘耀忠,张锦水,等. 1960—2011年西北五省潜在蒸散的时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9):2564 - 2570.  
LIU Xianfeng, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui, et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in five provinces of Northwest China in 1960—2011[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9):2564 - 2570. (in Chinese)
- 14 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998, 300: 6541.
- 15 ZORNITSA P, MILENA K, PEREIRA L S. Validation of the FAO methodology for computing  $ET_0$  with limited data. Application to south Bulgaria [J]. Irrigation and Drainage, 2006, 55(2):201 - 215.
- 16 JABLON M, SAHLI A. Evaluation of FAO - 56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: application to Tunisia[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6):707 - 715.
- 17 MCANENEY K J, ITIER B. Operational limits to the Priestley - Taylor formula[J]. Irrigation Science, 1996, 17(1):37 - 43.
- 18 SZILAGYI J. Temperature corrections in the Priestley - Taylor equation of evaporation [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(Part A):455 - 464.
- 19 王素萍,宋连春,韩永翔. 高寒区潜在蒸散量的计算法探讨[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1):126 - 129.  
WANG Suping, SONG Lianchun, HAN Yongxiang. Estimation of the potential evapotranspiration in paramos [J]. Arid Zone Research, 2009, 26(1):126 - 129. (in Chinese)
- 20 胡兴波,芦新建,董梅,等. 简化参照作物蒸散量( $ET_0$ )计算公式在青海省高寒区的适用性分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(11):201 - 208.  
HU Xingbo, LU Xinjian, DONG Mei, et al. Applicability of simplified reference crop evapotranspiration equations in high altitude and cold area of Qinghai Province[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(11):201 - 208. (in Chinese)
- 21 SEPASKHAH A R, RAZZAGHI F. 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.
- 22 RAVAZZANI G, CORBARI C, MORELLA S, et al. Modified Hargreaves-Samani-equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine River Basins[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2014, 138(7):592 - 599.
- 23 LUO Y, CHANG X, PENG S, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves-Samani model and temperature forecasts[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136(2):42 - 51.