

岷江源区Hargreaves法适用性与未来参考作物蒸散量预测

严 坤^{1,2} 王玉宽¹ 徐 佩¹ 傅 斌¹ 李 春³

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要: 利用岷江源区 1961—2010 年逐日气象数据,采用 FAO 56 Penman – Monteith 和 Hargreaves 公式计算参考作物蒸散量,并以 FAO 56 Penman – Monteith 为标准对 Hargreaves 公式适用性进行评价,通过对 Hargreaves 公式转换系数 C_0 进行修正,建立基于月尺度的参考作物蒸散发公式,结合 RegCM4.0 区域模型生成的温度数据,对未来 (2011—2099 年)研究区参考作物蒸散发量变化进行预测。研究结果表明:通过通径分析发现,在岷江源区气温是影响参考作物蒸散量最重要的气象因子,采用基于温度法的参考作物蒸散发公式具有理论依据;采用未修正的 Hargreaves 公式明显高估了该区域参考作物蒸散量,特别是在雨季 4—10 月;修正后的 Hargreaves 公式绝对偏差与相对偏差显著减小,与 FAO 56 Penman – Monteith 月值之间均方根误差 RMSE 为 3.76 mm、效率指数 EF 为 0.39、可决系数 CD 为 0.84、吻合系数 d 为 0.8,能够满足研究区参考作物蒸散发估算精度;在未来气候变化情景下岷江源区参考作物蒸散量总体呈增加趋势,气候倾向率为 5.6 mm/(10 a)。

关键词: 参考作物蒸散量; 岷江源区; FAO 56 Penman – Monteith; Hargreaves; 适用性评价; 气候变化

中图分类号: S161.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0273-09

Adaptation of Hargreaves Methods and Prediction of Reference Crop Evapotranspiration in Minjiang River Headwater Region

YAN Kun^{1,2} WANG Yukuan¹ XU Pei¹ FU Bin¹ LI Chun³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

Abstract: Evapotranspiration as a key link in the water migration of soil plant atmosphere continuum, it is of great significance for hydrological cycle process responses to global climate change. Accurate estimation of reference crop evapotranspiration (ET_0) is necessary in water resource management and utilization in further. In numerous methods proposed for estimating ET_0 , among which Hargreaves equation only requires temperature data, but there is a large deviation between Hargreaves and Penman – Monteith equation in different regions, recommend by the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations as the standard equation for estimating ET_0 . It is an urgent need to revise Hargreaves coefficient so as to build the appropriate equation applying less climatic factor in the area. Meanwhile, it is possible to estimate potential evaporation in future climate change by using the revised Hargreaves equation which only needs future temperature data from RegCM4.0, which is the most reliable predictive data in further. The temperature based Hargreaves equation is confirmed to have a theoretical basis because temperature is the most important meteorological factor affecting ET_0 through path analysis in the Minjiang river headwater region. The non-calibrated Hargreaves equation overestimated reference crop evapotranspiration, especially from April to October, and the maximum absolute deviation and relative deviation were 31.60 mm and 29.7%, respectively. So it was necessary to adjust Hargreaves coefficient (AHC). AHC at the monthly scale, obtained by regression-based local calibration, minimized absolute

收稿日期: 2017-09-11 修回日期: 2018-01-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(41371539)、中国科学院成都山地所“一三五”方向性项目(SDS-135-1703)和中国清洁发展机制基金赠款项目(2013030)
作者简介: 严坤(1983—),男,博士生,主要从事水文学及水资源研究,E-mail: yankun@imde.ac.cn
通信作者: 王玉宽(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究,E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn

deviation and relative deviation between the calibrated Hargreaves and the FAO Penman – Monteith equation, and the root mean square error (RMSE), modeling efficiency (EF), index of agreement (d) and coefficient of determination (CD), which were 3.76 mm, 0.39, 0.8 and 0.84, were significantly lower than those of non-calibrated Hargreaves (14.66 mm, 5.74, 0.51 and 7.81). The Hargreaves coefficient can meet the estimation requirements of ET_0 in the study area, and it is available to predict ET_0 in future. Under a future climate scenario, ET_0 in the study area showed a increasing tendency, with a tendency rate of 5.6 mm/(10 a), the increase, however, would be slowed down.

Key words: reference crop evapotranspiration; Minjiang River headwater region; FAO 56 Penman – Monteith; Hargreaves; adaptation evaluation; climatic change

0 引言

蒸散发作为 SPAC (Soil-plant-atmosphere continuum) 水分运移的关键环节^[1],在水文循环中对全球气候变化的响应具有重要的意义,已被广泛应用于水资源管理、农业灌溉设计和生态环境保护等研究中,为评价和管理气候变化下水资源和生态系统起着重要的作用^[2]。在全球气候变化背景下,江源高寒地区水文气象要素和水文环境受到重大影响^[3],关于江河源区温度和降水变化以及未来气候预测已有大量研究,但对未来水量平衡和水文循环研究因缺乏对陆面蒸发研究显得相对薄弱。因此,有必要寻找一种适合未来气候变化下陆面蒸发的估算方法,才能定量刻画气候变化对径流的影响,为江河源区水资源估算与评价提供理论依据。关于蒸散发,一般通过参考作物蒸散量(Reference crop evapotranspiration, ET_0)乘以经验作物系数(K_c)进行估算^[4],而目前参考作物蒸散发的估算,已有多种方法,其中以联合国粮农组织(FAO)推荐的 FAO 56 Penman – Monteith 公式(PM)应用最为广泛,且已作为估算参考作物蒸散量的唯一标准方法^[5-6],但该公式需要输入大量气象数据,如最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、风速、辐射等,在缺乏气象资料地区很难获取完整的数据,很大程度上限制了该公式的应用。因此,在缺资料条件下出现了众多参考作物蒸散发简化公式,如辐射类方法的 Jensen and Haise、Makkink、Priestley – Taylor、Irmak 公式,温度类方法的 McCloud、Hargreaves – Samani、Hamon、Thorntwaite、Blaney and Criddle 公式,辐射类方法需要参数较多,且辐射类数据较难获取,应用不及温度类方法广泛。温度类方法一般仅需输入气温数据^[7],且气温数据获取相对容易^[8],即便没有观测数据也可通过遥感与气象卫星获取地表、作物表面温度信息^[9],应用较为普遍,这其中因 Hargreaves 公式精度较高应用最为广泛^[10-13],JENSEN 等^[14]在 11 个地区将 20 种参考作物蒸散发公式估算结果与蒸渗仪实测值进行对比发现,Hargreaves 公式误差

最小,FAO 56 已将 Hargreaves 公式作为气象数据缺失条件下计算参考作物蒸散发推荐方法^[15],但 Hargreaves 公式未充分考虑空气动力学或辐射项,在不同气候区计算结果与 PM 计算结果存在较大偏差^[16-18],在风速较大($u_2 > 3$ m/s)的区域往往低估参考作物蒸散量,而在高湿区域存在高估现象^[19],此外海拔、地形等也是影响 Hargreaves 公式估算精度的重要因素^[20],因此在使用 Hargreaves 公式前必须进行修正。研究表明 Hargreaves 公式转换系数 C_0 随海拔、地形、地势等存在地域性差异,取值有所不同^[21],直接影响 Hargreaves 计算结果精度。BAUTISTA 等^[22]、左德鹏等^[23]、李岳坦等^[24]在 Mexico Yucatan 地区、渭河流域、青海湖流域等区域对 C_0 进行了修正,修正后的 Hargreaves 公式计算值与 PM 公式计算值拟合方程决定系数 R^2 分别达到了 0.90、0.94、0.99,能够满足在缺乏大量实测气象参数条件下计算参考作物蒸散发的需求。

岷江源区处于四川盆地丘陵山地向川西北高原过渡地带,属于青藏高原东缘边缘地带,是长江上游重要的水源涵养区。该区域对全球气候变化响应敏感^[25],除气温、降水等要素的变化对水文循环产生重要影响外,蒸散发是引起该区域植被退化和水资源减少的重要气候因子之一^[26],同时也是水文模型重要的输入参数^[27]。国内外已有关于未来气候情景下参考作物蒸散发预测,主要利用历史的 ET_0 通过降尺度方法直接预测未来 ET_0 ^[28],但该方法具有较大的不确定性;也有一些研究者尝试利用降尺度方法生产的气象因子,通过参考作物蒸散发模型进行估算,由于对未来蒸散发的准确预测需要较为可靠的气象数据,但现有降尺度模型模拟的大多气象参数往往具有较低的模拟精度,仅气温的模拟可靠性较高^[29],因此利用未来气温数据预测参考作物蒸散发准确度相对较高,如左德鹏等^[23]利用统计降尺度模型得到的 A1、B2 两种情景下最高最低气温,使用修正的参考作物蒸散发模型预测渭河未来 ET_0 。唐晓培等^[30]利用率定的参考作物蒸散发模型,结合气温数据预测了黄淮海地区参考作物蒸散量时空分

布,但上述研究使用的参考作物蒸散发模型 Hargreaves 转换系数 C_0 未体现其年内季节性变化,而事实上 C_0 并非定值^[31]。因此,本文利用岷江源区历史气象数据建立基于温度法的月尺度参考作物蒸散量估算公式,对未来参考作物蒸散量变化趋势做出准确预测,将有助于认识未来气候变化条件下岷江源区水文循环,对该区域水资源保护与生态环境建设具有重要意义。

1 数据来源

岷江源区位于东经 103°33′30″~103°43′11″,北纬 32°51′19″~33°02′39″(图 1),地处青藏高原向四川盆地的过渡地带。据中国气候区划新方案^[32]和 SHUTTLEWORTH 干湿分区^[33],该区属亚寒带湿润区,干湿季分明,夏季多雨,冬季寒冷,年均温 5.8℃,年均降水量 720 mm,年均实际蒸发量 450 mm。本文利用岷江源区仅有的一个连续气象观测的气象站松潘国家气象站(103°34′ E, 32°39′ N, 海拔 2 850.7 m)1961—2010 年逐日气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数等,数据来源于中国气象数据共享网。



图 1 岷江源区地理位置

Fig. 1 Location of Minjiang River headwater region

2 研究方法

2.1 参考作物蒸散量计算方法

(1)FAO 56 Penman – Monteith 公式

FAO 56 Penman – Monteith 公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础建立^[19],其表达式为

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

(1)

式中 R_n ——净辐射, MJ/($m^2 \cdot d$)
 G ——土壤热通量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 γ ——干湿计常数, kPa/K
 T ——2 m 高度处的平均气温,℃
 Δ ——饱和水汽压-温度曲线斜率, kPa/K
 u_2 ——2 m 高度处风速, m/s
 e_s ——饱和水汽压, kPa
 e_a ——实际水汽压, kPa

上述各变量的计算方法详见文献[19]。

(2) Hargreaves 公式

Hargreaves 公式是在美国西北部较干旱的气候条件下建立的^[34],其表达式为

$$ET_0 = C_0 (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) R_a$$

(2)

式中 T_{max} ——最高气温,℃
 T_{min} ——最低气温,℃
 T_{mean} ——平均气温,℃
 R_a ——大气顶太阳辐射, mm/d
 C_0 ——Hargreaves 公式转换系数,初始值取 0.002 3

2.2 未来气温预测

RegCM4.0 是国际理论物理中心(The Abdus Salam international centre for theoretical physics)于 2010 年推出的新版本^[35],在中国气候变化研究中有广泛应用^[36]。本研究选择区域气候模式 RegCM4.0,单向嵌套 BCC_CSM1.1 全球气候系统模式,在中等排放情景 RCP4.5 下,以 50 km × 50 km 的尺度,模拟生成 2011—2099 年逐月平均、最高、最低气温,并采用薄盘样条插值方法,在考虑地形影响下,对 RegCM4.0 模型预估的气候数据进行插值。

2.3 评价方法

以 PM 计算的 ET_0 为标准,使用均方根误差(RMSE)^[37]、Nash 效率指数(EF)^[38]、吻合系数(d)^[39]、可决系数(CD)^[40]评价修正前后 Hargreaves 与 PM 公式相比的适用性及精度。

$$R_{MSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2}{N} \right]^{0.5}$$

(3)

$$E_F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}$$

(4)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \overline{M}| + |M_i - \overline{M}|)^2}$$

(5)

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \overline{M})^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \overline{M})^2}$$

(6)

式中 N ——样本数
 i ——序列中的第 i 个值
 M ——观测值(PM 公式计算出的参考作物蒸散量)
 E ——模拟值(Hargreaves 公式计算的参考作物蒸散量)

当 RMSE、CD 值趋于 0,EF、 d 值接近于 1,说明模拟值与观测值一致性较好,模拟值计算精度高,公式适用性强。

3 结果与分析

3.1 影响参考作物蒸散量的气象因素解析

PM 公式综合考虑了辐射和空气动力学参数对作物蒸散发影响,具有较强的理论基础和估算精度,公式中主要气象因子包括气温、空气湿度、风速、日照时数等,但各个气象因子对参考作物蒸散发贡献

在各个区域存在差异。由于各个气象因子之间存在着很强的相关性,单个气象因子对参考作物蒸散发影响程度难以通过简单相关分析获得,而通径分析作为多个自变量与因变量之间线性关系的一种重要的统计方法,能够找出自变量对因变量的直接作用与间接作用,并能准确刻画其影响程度^[41-42],因此本文利用通径分析法分析影响参考作物蒸散发决定因子。

由表 1 可以看出,温湿度、风速、日照时数对参考作物蒸散发均有影响,但温度(最高、最低气温)对参考作物蒸散发影响强于其他因子。最高气温对参考作物蒸散发直接作用与间接作用系数为 0.362 和 0.472,最低气温对参考作物蒸散发直接作用与间接作用系数为 0.500 和 0.204,其他气象因子对参考作物蒸散发总作用系数均小于温度因子,且其他气象因子主要通过温度对参考作物蒸散发产生影响,日照时数、风速通过最低气温对参考作物蒸散发产生负影响,作用系数为 -0.129 和 -0.039;相对湿度通过最低气温对参考作物蒸散发起正向作用。可以看出,在研究区温度是影响参考作物蒸散发最主要的气象因子,且能够综合其他气象因子信息对参考作物蒸散量产生作用,也为温度法在岷江源区使用提供了理论依据^[43]。

表 1 主要气象因子与参考作物蒸散量通径分析

气象因子	与 ET ₀ 的简单相关系数	通径系数 (直接作用)	间接作用系数					总作用系数
			T_{max}	T_{min}	n	u	R_H	
T_{max}	0.843	0.362		0.380	0.104	0.010	-0.021	0.834
T_{min}	0.635	0.500	0.275		-0.105	-0.020 9	0.054	0.704
n	0.430	0.405	0.093	-0.129		0.020 5	0.040	0.426
u	0.356	0.271	0.013	-0.039	0.030		0.007	0.282
R_H	0.126	-0.079	-0.021	0.343	-0.209	-0.022		0.012

注: n 、 u 、 R_H 分别代表日照时数、风速和相对湿度。

3.2 修正前 Hargreaves 与 FAO 56 Penman - Monteith 比较

图 2 可以看出,Hargreaves 与 PM 计算的参考作物蒸散发年内各月变化趋势一致,月最高值均出现在 7 月,最低值出现在 12 月。Hargreaves 计算结果大于 PM 计算结果,全年平均高估 18.69%,各月平均绝对偏差为 0.95 ~ 31.6 mm,相对偏差为 2.09% ~ 29.7%,特别是在 4—10 月明显高估,可以看出在高原湿润区降雨较多的月份 Hargreaves 公式估算结果偏大。IRMAK 等^[44]在佛罗里达州湿润区应用 Hargreaves 公式计算参考作物蒸散结果也显著高于 PM 计算结果,但在干旱区 Hargreaves 计算结果比

PM 计算结果偏低^[45],可以看出干湿条件对 Hargreaves 公式精度有较大影响。

表 2 是 2 种公式计算的月参考作物蒸散发量配对样本 t 检验结果。可以看出,仅 2 月 Hargreaves 公式与 PM 公式差异不显著(自由度为 49, $p = 0.13 > 0.05$),其余月份两者间差异极显著(自由度为 49, $p < 0.01$),说明未进行修正的 Hargreaves 公式直接应用在研究区将引起较大误差,而造成两者差异显著原因在于 Hargreaves 公式转换系数 C_0 并非定制,存在季节性差异。VANDERLINDEN 等^[46]也指出 Hargreaves 公式转换系数 C_0 进行逐月修正能显著提高精度。因此本文按月对 Hargreaves 公式 C_0 进行

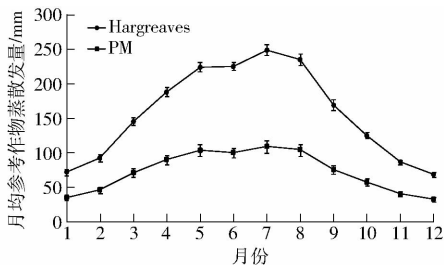


图2 修正前 Hargreaves 与 PM 计算的多年月均参考作物蒸散量对比 (1961—2010 年)

Fig.2 Comparison of monthly averaged ET_0 values by non-calibrated Hargreaves and PM during period of 1961—2010

表 2 修正前 Hargreaves 与 PM 计算的参考作物蒸散量比较 (1961—2010 年)

Tab.2 Comparison between monthly averaged ET_0 value calculated by using PM and non-calibrated Hargreaves during period of 1961—2010

月份	PM 均值/mm	Hargreaves 均值/mm	相对偏差/%	绝对偏差/mm	t	p
1	34.84	36.48	4.70	-1.64	-3.61 **	0
2	45.48	46.43	2.09	-0.95	-1.55	0.13
3	70.68	74.88	5.95	-4.20	-6.5 **	0
4	89.10	99.32	11.47	-10.22	-13.06 **	0
5	103.30	121.30	17.42	-18.00	-26.98 **	0
6	99.43	126.02	26.74	-26.59	-49.52 **	0
7	108.69	140.29	29.07	-31.60	-50.01 **	0
8	103.80	131.54	26.73	-27.74	-45.28 **	0
9	75.13	94.10	25.25	-18.97	-30.26 **	0
10	56.98	68.08	19.48	-11.10	-21.89 **	0
11	40.01	45.96	14.88	-5.95	-12.36 **	0
12	32.21	35.99	11.73	-3.78	-7.72 **	0

注：**表示 0.01 水平(双侧)上显著相关,下同。

表 4 修正前后 Hargreaves 与 PM 偏差及显著性检验 (1991—2010 年)

Tab.4 Statistical performance of PM and calibrated and non-calibrated equations during period of 1991—2010											
月份	PM 均值/mm	修正前 Hargreaves 公式				p	修正后 Hargreaves 公式				
		均值/mm	绝对偏差/mm	相对偏差/%	t		均值/mm	绝对偏差/mm	相对偏差/%	t	p
1	35.25	37.57	2.32	6.59	-2.90 **	0.01	34.68	-0.57	-1.62	0.73	0.47
2	46.27	47.56	1.28	2.77	-1.46	0.16	45.32	-0.95	-2.06	1.14	0.27
3	70.93	75.78	4.85	6.84	-6.00 **	0	70.10	-0.83	-1.17	1.08	0.29
4	89.35	99.69	10.35	11.58	-10.98 **	0	88.63	-0.72	-0.8	0.82	0.42
5	103.35	121.99	18.64	18.04	-21.71 **	0	103.94	0.59	0.57	-0.7	0.49
6	99.84	126.94	27.10	27.14	-37.92 **	0	100.79	0.95	0.95	-1.25	0.23
7	110.21	141.92	31.70	28.76	-33.40 **	0	110.55	0.34	0.31	-0.31	0.76
8	102.70	130.50	27.81	27.07	-30.40 **	0	103.36	0.66	0.64	-0.65	0.52
9	78.97	98.04	19.07	24.15	-19.78 **	0	78.33	-0.63	-0.8	0.75	0.46
10	56.54	67.36	10.83	19.15	-11.39 **	0	55.98	-0.56	-0.99	0.63	0.54
11	40.30	47.25	6.96	17.26	-8.21 **	0	39.98	-0.32	-0.8	0.41	0.69
12	32.74	36.93	4.18	12.78	-6.05 **	0	32.02	-0.73	-2.22	1.03	0.31
均值	72.20	85.96	13.76	16.85			71.97	-0.23	-0.67		

修正,建立适合于研究区的逐月 Hargreaves 公式。

3.3 Hargreaves 公式转换系数 C_0 修正

利用 1961—1990 年 30 a 气象数据,通过系数校正法对 Hargreaves 公式转换系数 C_0 进行修正,并利用 1991—2010 年共 20 a 气象资料对修正后的 Hargreaves 公式进行检验。表 3 为修正后的 Hargreaves 公式月转换系数 C'_0 ,其值介于 0.001 8 ~ 0.002 3 之间,均值为 0.001 96,不仅低于半湿润内陆区和沿海区转换系数^[47],也低于低海拔湿润区转换系数^[48],说明在江河源区海拔对参考作物蒸散量具有一定的影响。

表 3 两种方法回归斜率及月转换系数 (1961—1990 年)

Tab.3 Regression slope and monthly Hargreaves coefficient during period of 1961—1990

月份	回归方程斜率	相关系数	C_0 (修正前)	C'_0 (修正后)
1	0.923	0.22	0.002 3	0.002 1
2	0.953	0.55	0.002 3	0.002 3
3	0.925	0.67	0.002 3	0.002 1
4	0.889	0.79	0.002 3	0.002 0
5	0.852	0.82	0.002 3	0.002 0
6	0.794	0.86	0.002 3	0.001 8
7	0.779	0.86	0.002 3	0.001 8
8	0.792	0.86	0.002 3	0.001 8
9	0.799	0.87	0.002 3	0.001 8
10	0.831	0.76	0.002 3	0.001 9
11	0.846	0.31	0.002 3	0.001 9
12	0.867	0.30	0.002 3	0.002 0

3.4 修正后的 Hargreaves 公式适用性评价

表 4 为修正后 Hargreaves 公式与 PM 公式计算的月 ET_0 对比。可以看出,研究区绝对偏差由修正前的 1.28 ~ 31.70 mm 降低为修正后的绝对偏差绝

对值小于 1 mm, 相对偏差由 2.77% ~ 28.76% 降低到 -0.22% ~ 0.31%, 特别是在 4—10 月, 修正后 Hargreaves 公式计算结果与 PM 计算结果绝对偏差与相对偏差均较小。通过配对样本 *t* 检验发现, 修正前 Hargreaves 公式计算结果与 PM 计算结果除 2 月差异不显著, 其他月份存在显著性差异 ($p < 0.01$), 但修正后计算结果与 PM 计算结果差异不显著 ($p > 0.05$)。

图 3 是修正前后 Hargreaves 公式计算值与 PM

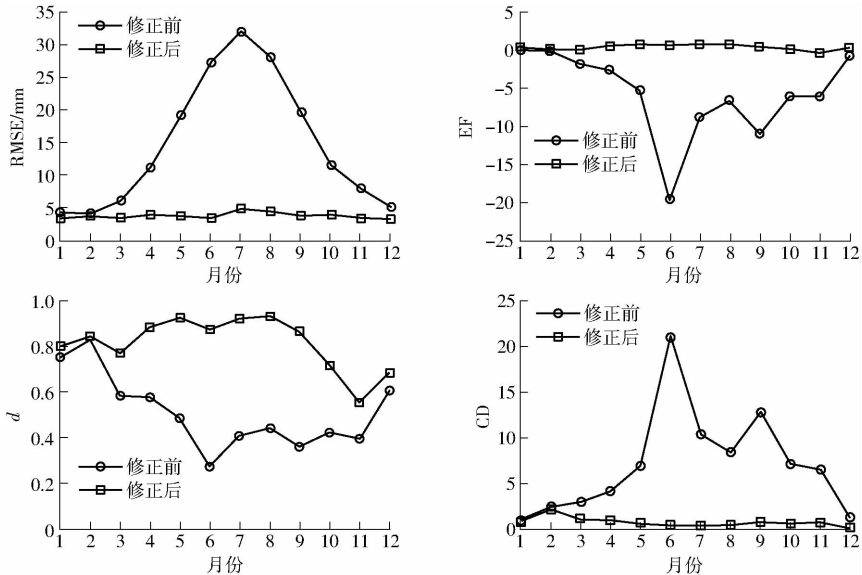


图 3 修正前后 Hargreaves 与 PM 计算值间的 RMSE、EF、*d*、CD

Fig.3 RMSE, EF, *d* and CD between PM and calibrated and non-calibrated equations during period of 1991—2010

3.5 未来气候变化下参考作物蒸散发

对未来情景下参考作物蒸散量估算需要输入变量较少且估算精度较高的方法, 气温是目前对未来气候变化较为可靠的气象预测因子, 而利用基于月尺度的 Hargreaves 公式, 仅需要预测的气温数据就能准确模拟未来参考作物蒸散发量, 并能为未来水文循环研究提供基础数据。

在中等排放强度下, 3 个不同时段 (2011—2040 年、2041—2070 年、2071—2099 年) 研究区月平均最高气温、最低气温和月平均气温大致呈现上升趋势, 但平均日温差在干湿季表现不同的特点, 在雨季 (4—10 月) 随时间有所增加, 在旱季 (11 月—翌年 3 月) 有所缓和 (图 4)。

将参考作物蒸散量长期变化采用一次线性回归方程进行表示, 由图 5 可看出, 研究区未来气候倾向率为 5.6 mm/(10 a), 说明未来年参考作物蒸散总体呈现增加的趋势, 这与三江源地区 1962—2004 年近 43 a 蒸发量 5.47 mm/(10 a) 的倾向率基本相似^[49]。对比未来 3 个时段参考作物蒸散量发现, 2011—2040 年间年平均参考作物蒸散量为 839.97 mm, 2041—2070 年间年平均参考作物蒸散量为

公式计算值间的 RMSE、EF、*d* 和 CD 值月变化对比, 修正后 Hargreaves 公式与 PM 公式间 RMSE、EF、*d* 和 CD 的均值分别为 3.76 mm、0.39、0.8 和 0.84, 优于修正前的 14.66 mm、-5.74、0.51 和 7.81。可以看出, 修正后的 RMSE、CD 值趋近于 0, *d* 值趋近于 1, 且显著提高 4—10 月模拟精度, 修正后的 Hargreaves 公式与 PM 公式吻合性较好, 在缺少数据情况下可以替代 Penman—Monteith 在研究区应用。

861.84 mm, 2071—2099 年间年平均参考作物蒸散量为 873.83 mm, 虽然参考作物蒸发量增加, 但增长率却有所降低 (图 6)。

4 结论

(1) 通径分析表明, 在岷江源区亚寒带湿润区气温是影响参考作物蒸散发的主要因子, 它能综合其他气象因子的信息对参考作物蒸散发产生影响, 这在该区域使用基于温度法的 Hargreaves 公式提供了理论基础。

(2) 在岷江源区亚寒带湿润气候条件下, 与 PM 标准值相比, 未修正的 Hargreaves 公式计算值高估了 18.69%, 且两者月参考作物蒸散量存在显著差异, 绝对偏差为 0.95 ~ 31.6 mm, 相对偏差为 2.09% ~ 29.7%, 尤其在降雨集中季, 差异更为显著。

(3) 通过逐月对 Hargreaves 公式转换系数 *C*₀ 进行修正, 能够显著提高 Hargreaves 公式估算精度, 尤其是在 4—10 月雨季。率定期利用修正后的 Hargreaves 公式计算的参考作物月蒸散量绝对偏差由 31.70 mm 降到 0.34 mm, 相对偏差由 28.76% 降到 0.31%, 修正后的 Hargreaves 公式能够较好应用

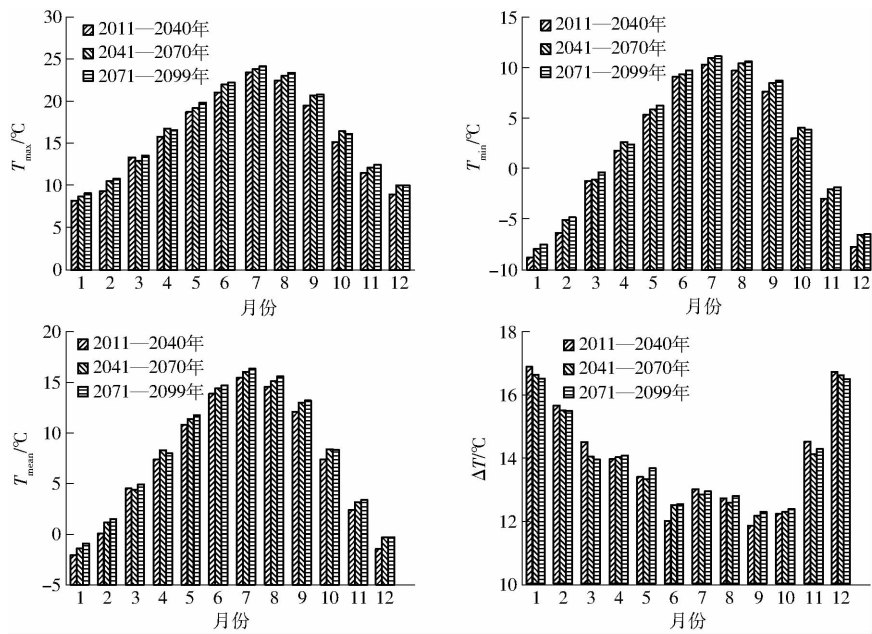


图 4 未来最高、最低、平均气温及日温差月变化

Fig. 4 Monthly changes of $T_{\max}$, $T_{\min}$, T_{mean} and ΔT in future

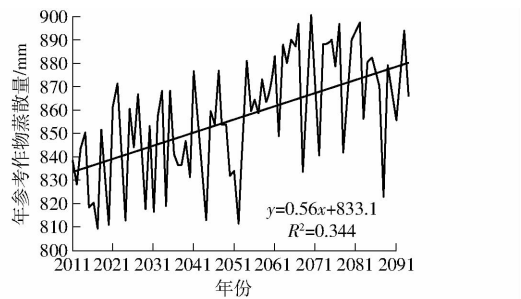


图 5 未来参考作物蒸散量年变化情景

Fig. 5 Yearly ET_0 calculated by calibrated Hargreaves in future

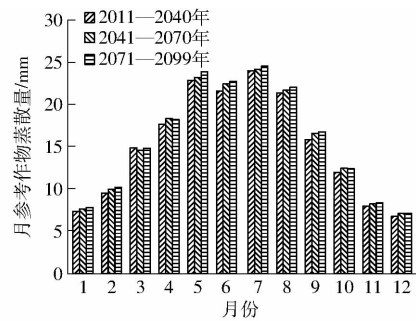


图 6 未来不同时期研究区参考作物蒸散量月变化

Fig. 6 Monthly ET_0 calculated by calibrated Hargreaves in future

到亚寒带湿润气候区。

(4)利用在中等排放强度预测的未来气温数据,结合修正的基于月尺度的 Hargreaves 公式,模拟未来研究区潜在蒸散量,为认识未来气候变化下江

河源区水文循环提供了思路,但陆面实际蒸发过程变化预测难度较大,结合未来该区域陆面植被及其作物系数变化才有可能更加准确地估算陆面蒸发过程。

参 考 文 献

1 于文颖,周广胜,迟道才,等. 盘锦湿地芦苇 (*Phragmites communis*) 群落蒸发散主导影响因子[J]. 生态学报,2008, 28(9): 4594-4601.
YU Wenying, ZHOU Guangsheng, CHI Daocai, et al. Evapotranspiration of *Phragmites communis* community in Panjin wetland and its controlling factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4594-4601. (in Chinese)
2 吴锦奎,丁永建,魏智,等. 干旱区天然低湿牧草地参考作物蒸散量研究——以黑河中游为例[J]. 干旱区研究,2005, 22(4): 514-519.
WU Jinkui, DING Yongjian, WEI Zhi, et al. Study on the reference evapotranspiration of natural steppes in arid areas—a case study in the middle reaches of the Heihe River, Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4): 514-519. (in Chinese)
3 梁川,赵莉花,张博雄. 长江江源高寒地区气候变化对水文环境影响研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 81-86.
LIANG Chuan, ZHAO Lihua, ZHANG Boxiong. Effects of climate change on hydrological environment in the extremely frigid zone of the source region of Yangtze Rive[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2013(1): 81-86. (in Chinese)
4 ALLEN R G. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(4): 650-662.
5 ALLEN R G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(2): 97-106.
6 ALLEN R G, SMITH M, PEREIRA L S, et al. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements[J].

- ISHS Acta Horticulturae,1997,449:17 – 33.
- 7 PANDEY V, PANDEY P K, MAHANTA A P. Calibration and performance verification of Hargreaves Samani equation in a humid region [J]. Irrigation and Drainage,2015,63(5): 659 – 667.
- 8 MENDICINO G, SENATORE A. Regionalization of the Hargreaves coefficient for the assessment of distributed reference evapotranspiration in Southern Italy[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE,2013,139(5): 349 – 362.
- 9 NARASIMHAN B. Determination of regional scale evapotranspiration of Texas from NOAA – AVHRR satellite[R]. College Station, TX:Texas Water Resource Institute Report, 2002.
- 10 符娜, 宋孝玉, 夏露, 等. 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[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):208 – 217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170526&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.026.
- FU Na, SONG Xiaoyu, XIA Lu, et al. Adaptation evaluation for reference evapotranspiration calculation methods in different eco-hydrologic regionalization of Yunnan province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):208 – 217. (in Chinese)
- 11 吴立峰, 白桦, 张富仓, 等. FAO Penman – Monteith 及简化方法在西北适用性研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12): 139 – 151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161218&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.018.
- WU Lifeng, BAI Hua, ZHANG Fucang, et al. Applicability of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration in Northwest China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):139 – 151. (in Chinese)
- 12 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?file_no=20150216&flag=1. 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)
- 13 JENSEN D T, HARGREAVES G H, TEMESGEN B, et al. Computation of ET_0 under non ideal conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(5): 394 – 400.
- 14 JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements[M]. New York: ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 70, 1990.
- 15 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements irrigation and drainage paper[M]. Rome: FAO, 1998: 290 – 300.
- 16 王斌, 付强, 张金萍, 等. Hargreaves 公式的改进及其在高寒地区的应用[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 82 – 85.
- WANG Bin, FU Qiang, ZHANG Jinping, et al. Modified Hargreaves equations and their application in high-cold area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 82 – 85. (in Chinese)
- 17 ITENFISU D, ELLIOTT R L, ALLEN R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(6): 440 – 448.
- 18 DROOGERS P, ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33 – 45.
- 19 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements[R]. Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome:FAO, 1998.
- 20 贾悦, 崔宁博, 魏新平, 等. 考虑辐射改进 Hargreaves 模型计算川中丘陵区参考作物蒸散量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 152 – 160.
- JIA Yue, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Modifying Hargreaves model considering radiation to calculate reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 152 – 160. (in Chinese)
- 21 HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53 – 63.
- 22 BAUTISTA F, BAUTISTA D, DELGADOCARRANZA C. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications[J]. Atmósfera, 2009, 22(4): 331 – 348.
- 23 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 455 – 461.
- ZUO Depeng, XU Zongxue, LI Jingyu, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River basin under future climate change [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 455 – 461. (in Chinese)
- 24 李岳坦, 李小雁, 崔步礼. 利用修正的 Hargreaves 公式计算青海湖流域参考作物潜在腾发量[J]. 地球环境学报, 2015, 6(2): 106 – 112.
- LI Yuetan, LI Xiaoyan, CUI Buli. Method for calculating reference crop evapotranspiration by revised Hargreaves equation over Qinghai Lake basin [J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(2): 106 – 112. (in Chinese)
- 25 赵雪雁, 雒丽, 王亚茹, 等. 1963—2012 年青藏高原东缘极端气温变化特征及趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2113 – 2122.
- ZHAO Xueyan, LUO Li, WANG Yaru, et al. Extreme temperature events in eastern edge of the Qinghai – Tibet Plateau from 1963 to 2012[J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2113 – 2122. (in Chinese)

- 26 王素萍. 近 40 a 江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 960–965.
WANG Suping. Trend of potential evapotranspiration and its main impact factors in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 960–965. (in Chinese)
- 27 ZHOU M C, ISHIDAIRA H, TAKEUCHI K. Estimation of potential evapotranspiration over the Yellow River basin: reference crop evaporation or Shuttleworth-Wallace? [J]. Hydrological Processes, 2010, 21(14): 1860–1874.
- 28 HARMSSEN E W, MILLER N L, SCHLEGEL N J, et al. Downscaled climate change impacts on reference evapotranspiration and rainfall deficits in Puerto Rico[C]//ASCE World Environmental and Water Resource Congress, 2007.
- 29 冯锦明, 符淙斌. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 805–814.
FENG Jinming, FU Congbin. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(5): 805–814. (in Chinese)
- 30 唐晓培, 宋妮, 陈智芳, 等. 未来主要气候情景下黄淮海地区参考作物蒸散量时空分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 168–176.
TANG Xiaopei, SONG Ni, CHEN Zhifang, et al. Spatial and temporal distribution of ET_0 under main climate scenarios in future across Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 168–176. (in Chinese)
- 31 MARTÍ P, ZARZO M, VANDERLINDEN K, et al. Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1713–1724.
- 32 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3–12.
ZHENG Jingyun, YIN Yunhe, LI Bingyuan. A new scheme for climate regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 3–12. (in Chinese)
- 33 SHUTTLEWORTH W J. Evaporation[M]//MAIDMENT D R. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill, 1994: 4.1–4.53.
- 34 HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96–99.
- 35 GIORGI F, COPPOLA E, SOLMON F, et al. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains [J]. Climate Research, 2012, 52: 7–29.
- 36 GAO X, SHI Y, ZHANG D, et al. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: results from two high-resolution RCM simulations[J]. Climate Research, 2012, 52: 213–226.
- 37 FOX D. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1981, 62: 599–609.
- 38 GREENWOOD D, NEETESON J, DRAYCOTT A. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model[J]. Plant and Soil, 1985, 85(2): 185–203.
- 39 WILLMOTT C J, WICKS D E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California[J]. Physical Geography, 2013, 1(1): 59–73.
- 40 LOAGUE K, GREEN R E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1991, 7(1–2): 51–73.
- 41 袁志发, 周静萍. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- 42 WOLFLE L M. The introduction of path analysis to the social sciences and some emergent themes: an annotated bibliography [J]. Structural Equation Modeling: a Multidisciplinary Journal, 2003, 10(1): 1–34.
- 43 范文波, 吴普特, 韩志全, 等. 玛纳斯河流域 ET_0 影响因子分析及对 Hargreaves 法的修正[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 19–24.
FAN Wenbo, WU Pute, HAN Zhiquan, et al. Influencing factors analysis of reference crop evapotranspiration and modification of Hargreaves method in Manas river basin[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 19–24. (in Chinese)
- 44 IRMAK S, ALLEN R, WHITTY E. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5): 360–370.
- 45 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)
- 46 VANDERLINDEN K, GIRÁLDEZ J V, MEIRVENNE M V. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in southern Spain [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(3): 184–191.
- 47 BAUTISTA F, BAUTISTA D, DELGADOCARRANZA C. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications[J]. Atmósfera, 2009, 22(4): 331–348.
- 48 GHAMARNIA H, REZVANI V, KHODAEI E, et al. Time and place calibration of the Hargreaves equation for estimating monthly reference evapotranspiration under different climatic conditions [J]. Journal of Agricultural Science, 2011, 3(4): 111–122.
- 49 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79–85.
LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79–85. (in Chinese)