

小流域水文循环过程中蒸散发量模拟方法评价

张寒, 王琳, 陈刚

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 蒸散发(ET)在农业灌溉和水资源管理中起着重要作用。 ET 可通过 FAO-Penman-Monteith 方法(ET_{FPM})进行准确估算, ET_{FPM} 方法是 ET 估算的标准参考方法,此方法需要提供更为详实的气象数据。对于 ET 的估算,需要寻找使用较少的输入数据,而不会影响预测准确性的替代方法。研究运用 5 个基于辐射的模型,包括 Makkink(ET_{MAK})、Priestley 和 Taylor(ET_{PT})、Abtew(ET_{ABT})、Jensen-Haise(ET_{JH})、McGuinness 和 Bordne(ET_{MB}), 3 个基于温度的模型,包括 Hargreaves and Samani(ET_{HS})、Hamon(ET_{HAM})和 Linacre(ET_{LIN}),以及 1 个基于空气动力学的模型 Penman(ET_{PEN}),通过使用韩仓河流域周边 6 个气象水文站的长期数据,将选取的模型与 ET_{FPM} 模型在月尺度和生长季节尺度上进行比较评价。结果表明, ET_{JH} 、 ET_{HAM} 分别是 67%, 33% 研究区域每月 ET 的最佳预测方法。在研究区域中,基于辐射的方法优于基于温度的方法。植被生长季节 ET 累积值表明,Jensen-Haise 和 Hamon 方法在暖季和秋冬季生长期表现最佳,而春季生长期最佳预测方法仅包括 Jensen-Haise 方法。最佳替代方法和 ET_{FPM} 方法之间的差异表明,最佳替代方法在某些地区的估算可信度不高,因此在使用之前应考虑 ET 模型可预测性能的时空变化。

关键词: FAO-Penman-Monteith 方法; 温度模型; 辐射模型; 空气动力学模型; 生长季节; 预测性能

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0088-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.013

Evaluation of Evapotranspiration Simulation Methods in Hydrological Cycle in Small Basin

ZHANG Han, WANG Lin, CHEN Gang

(College of Environmental Science and Engineering, Key Laboratory of Marine

Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100)

Abstract: Evapotranspiration (ET) plays an important role in agricultural irrigation and water resources management. ET can be accurately estimated by the FAO-Penman-Monteith method (ET_{FPM}). The ET_{FPM} method is the standard reference method for ET estimation. This method needs to provide more detailed meteorological data. For the estimation of ET , it is necessary to find an alternative method that uses less input data without affecting the accuracy of the prediction. This study used 5 radiation-based models, including Makkink (ET_{MAK}), Priestley and Taylor (ET_{PT}), Abtew (ET_{ABT}), Jensen-Haise (ET_{JH}), McGuinness and Bordne (ET_{MB}), and 3 temperature-based models, including Hargreaves and Samani (ET_{HS}), Hamon (ET_{HAM}) and Linacre (ET_{LIN}), and a model Penman (ET_{PEN}) based on aerodynamics. Using the long-term data from 6 meteorological and hydrological stations in the Hancang River Basin, the selected model were evaluated by comparing them with ET_{FPM} on a monthly and growing season scale. The statistical analysis revealed that ET_{JH} and ET_{HAM} are the best forecasting methods for monthly ET in 67% and 33% of the study area respectively. In the study area, the radiation-based methods were better than temperature-based methods. The cumulative values of ET during the vegetation growth periods showed that the Jensen-Haise method and Hamon method perform best in the warm season and autumn and winter growing seasons, while the best prediction method for the spring growing season only included the Jensen-Haise method. However, divergence between estimations of the best alternative methods and the reference

收稿日期: 2021-03-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0408000, 2018YFC0408004); 济南市社会民生重大专项(201704135); 习近平生态文明制度思想研究重点项目(18BDCJ01)

第一作者: 张寒(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事生态水文过程与植被需水量研究。E-mail: zhanghan199282@126.com

通信作者: 王琳(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事资源利用与生态规划研究。E-mail: lwangouc@126.com

method showed that the best *ET* alternative methods might be unreliable in some regions. Accordingly, the spatiotemporal variability in predictability performance of *ET* models should be taken into account prior to use.

Keywords: FAO-Penman-Monteith method; temperature model; radiation model; aerodynamic model; growing season; predictability performance

蒸散发(*ET*)是水文循环的主要过程之一,是陆地表面及地表水循环的重要组成部分,对水文和水资源管理战略以及作物生产的质量和数量具有重大影响^[1-2]。了解蒸散量对水资源规划和管理、作物需水量的估算、干旱监测和灌溉调度等方面均具有重要意义^[3]。

蒸散量的大小取决于气象因素,例如太阳辐射、温度、风速和空气湿度等^[4-5]。直接测量实际的蒸散量十分困难,因此实际蒸散量通常根据参考作物的蒸散量(ET_0)进行估算。 ET_0 表示在指定位置和时间的大气蒸发需求,是具有固定特征的灌溉良好草地表面的蒸散量^[6]。潜在蒸散发量(ET_p)是指在一定气象条件下水分供应不受限制时,陆面可能达到的最大蒸散量。参考下垫面为植被高度 0.12 m 的草地,具有固定的表面阻力,为 70 s/m,反照率为 0.23^[6]。 ET_0 和 ET_p 是不同的概念,它们在计算蒸散量时所基于的方法不同,许多研究者^[6-7]通常会两者混淆。但 ET_0 和 ET_p 的计算方式基本相似,均表示大气蒸发的需求量,因此两者的计算方式与结果可以定量关联^[7-8]。目前已提出许多利用气象数据来计算蒸散发的模型,这些模型的计算方法可分为 5 类,包括窗格蒸散法、温度法、传质法、辐射法以及组合法^[3,7,9]。这些方法在数据需求、复杂性和可靠性方面有所不同。其中,FAO-Penman-Monteith 方法已被联合国粮食及农业组织和世界气象组织推荐为计算 ET_0 和评估其他方法准确性的标准模型^[3,5-6,10-11]。由于世界上的许多地区无法获得完整的气象变量数据,因此在有限的数据库下,应考虑基于经验方程的方法来计算蒸散量^[5,12]。同时由于气象要素和时间之间的相互作用以及蒸散发模型的可预测性,在实际使用之前必须对研究地点进行评估检验,以确定在研究地区使用替代模型的可行性^[3,13]。

蒸散量是陆地水文过程的最大组成部分,准确估算蒸散发量对于计算流域植物需水量和种植灌溉规划至关重要^[6]。流域范围内植物的生长主要受气象要素和径流的影响^[14]。不同植物都有特定的生长季节与环境条件。目前相关研究集中在对流域蒸散量的估算,但是关于蒸散量在植物生长季节的表现评价等方面的研究鲜有报道。本研究运用 9 种 *ET* 模型分别对流域每月的蒸散发量进行评估,并与 FAO-Penman-Monteith 方法进行比较,最后分析了小流域气象站点蒸散量的变化趋势和植被生长季节蒸散量

的累积值,以确定植被生态水文循环过程中计算蒸散发量的最佳替代方法。

1 研究区概况

选取研究区为济南市小清河支流之一的韩仓河小流域。该流域位于济南市历城区东南方(36°22′—36°56′N,116°58′—117°23′E),属于自然形成的南部山区雨源型排洪河流,干流总长约为 27.8 km,流域总面积约为 100 km²,为小流域范畴。该流域属于温带季风气候,四季分明;流域多年平均气温为 13.3 ℃,平均降水量为 783.27 mm,6—9 月的平均降水量占全年平均降水量的 60.26%,其中 7—8 月降水最多,流域内坡陡流急,高程差最大为 339 m,降水集中,极易形成涝灾。

2 数据来源与处理

研究使用的 DEM 数据来源于中国地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。利用 ArcGIS 平台的 Arc Hydro Tools 模块,基于分辨率为 30 m 的 DEM 数据,依次通过水流流向分析、汇流分析、河网生成、流域边界划分等过程,对流域水文特征进行提取。

本研究所使用的资料包括中国气象科学数据中心和济南市气象局提供的气压、气温、相对湿度、风速、太阳辐射等气象要素资料;山东省济南市水文总站提供的 1986—2016 年流域降水数据,研究地区包括韩仓河流域及其周边的 6 个站点,分别为燕子山站、东梧站、韩仓站、王家庄站、群井站、大陈家庄站,站点位置与绝对高程信息见表 1。

表 1 气象站位置及观测点高程

站名	东经	北纬	绝对高程/m
燕子山	117°03′	36°39′	101
东梧	117°01′	36°36′	201
韩仓	117°11′	36°43′	53
王家庄	117°19′	36°31′	251
群井	117°18′	36°41′	96
大陈家庄	117°15′	36°50′	23

3 研究方法

3.1 *ET* 模型

本研究选择 9 个基于辐射、温度以及空气动力学的 *ET* 模型,包括 Xiang 等^[7]论述的 ET_0 和 ET_p 模型。模型的选择根据气象要素的输入数据而定,所输入的气象数据在中国气象科学数据中心以及研究区气象站点获得。

3.1.1 基于辐射能的蒸散发模型

(1) Makkink 方法。Makkink 方法经常用于估计草坪和地被植物的 ET_p ^[15]。该方法是 Penman 公式的简化和修正^[16], 计算方式为:

$$ET_{MAK} = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (1)$$

式中: ET_{MAK} 为潜在蒸散发量 (mm); Δ 为饱和水蒸气压力曲线的斜率 (kPa/°C); γ 为湿度计常数 (kPa/°C); R_s 为太阳总辐射 (MJ/(m² · d)); λ 为水汽化潜热 (MJ/kg)。

(2) Priestley 和 Taylor 方法。Priestley 等^[17] 提出了一种经验方法, 它是 Penman 方程^[16] 的简化版本, 用于估算湿润区地表的 ET_p 。

$$ET_{PT} = \alpha * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{(R_n + G)}{\lambda} \quad (2)$$

式中: ET_{PT} 为潜在蒸散发量 (mm); α 为校准值常数, 取 1.26; R_n 为净辐射量 (MJ/(m² · d)); G 为土壤热通量 (MJ/(m² · d))。

(3) Abtew 方法。Abtew 于 1996 年提出通过太阳辐射估算 ET 的经验方程^[18], 计算方式为:

$$ET_{ABT} = k * \frac{R_s}{\lambda} \quad (3)$$

式中: ET_{ABT} 为参考蒸散发量 (mm); k 为无量纲系数, 取 0.53。

(4) Jensen-Haise 方法。Jensen 和 Haise 基于美国西部干旱地区 35 年中所获得的 3000 个 ET 数据建立了基于辐射的 ET_p 模型^[19] 为:

$$ET_{JH} = \frac{0.025(T+3)R_s}{\lambda} \quad (4)$$

式中: ET_{JH} 为潜在蒸散发量 (mm); T 为每月平均气温 (°C)。

(5) McGuinness-Bordne 方法。McGuinness 和 Bordne 开发了基于辐射和平均温度的 ET_p 模型^[20]:

$$ET_{MB} = \frac{(T+5)R_s}{68 \lambda} \quad (5)$$

式中: ET_{MB} 为潜在蒸散发量 (mm)。

3.1.2 基于温度的蒸散发模型

(1) Hargreaves-Samani 方法。Hargreaves 和 Samani 提出一种基于每月最低和最高气温计算 ET 的方法^[21], 计算方式为:

$$ET_{HS} = 0.0023 (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17.8) \frac{R_a}{\lambda} \quad (6)$$

式中: ET_{HS} 为潜在蒸散发量 (mm/M); R_a 为地表净辐射 (MJ/(m² · d)); T_{max} 为最高气温 (°C); T_{min} 为最低气温 (°C); T 为平均气温 (°C)。

(2) Hamon 方法。Hamon 开发了使用日照时长、平均气温和饱和水蒸气密度估算每月 ET_p 的模

型^[22], 计算方式为:

$$ET_{HAM} = k * 0.165 * 216.7 * N * \left(\frac{e_s}{T + 273.3} \right) \quad (7)$$

式中: ET_{HAM} 为潜在蒸散发量 (mm); k 为无量纲系数, 取 1.2; N 为日照时长, 从日出到日落的时间长度; e_s 为饱和水气压 (kPa); T 为平均气温 (°C)。

(3) Linacre 方法。Linacre 提出一种基于地理特征和露点温度计算每月的 ET_p 的方法^[23]:

$$ET_{LIN} = \frac{\frac{500 * (T + 0.006 * A)}{100 - \varphi} + 15 * (T - T_d)}{80 - T} \quad (8)$$

式中: ET_{LIN} 为潜在蒸散发量 (mm); φ 为站点的纬度 (°); A 为站点的海拔高度 (m); T 为平均气温 (°C); T_d 为露点温度 (°C)。

3.1.3 基于空气动力学的蒸散发模型 基于空气动力学指标的 ET_p 估算方法以 Penman^[24] 的方法最为经典。

(1) Penman 方法

$$ET_{PEN} = 0.35 \left(1 + \frac{0.98}{100\mu} \right) (e_s - e_a) \quad (9)$$

式中: ET_{PEN} 为潜在蒸散发量 (inch/d); μ 为 2 m 高处风速 (m/s)。

3.2 FAO-Penman-Monteith 方法

FAO-Penman-Monteith 模型是用于计算潜在蒸散发的标准模型^[6], 为了研究上述模型的预测性能, 将这些模型与计算 ET 的标准模型 FAO-Penman-Monteith 模型进行比较分析。FAO-Penman-Monteith 方法公式为:

$$PET_{FPM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (10)$$

式中: PET_{FPM} 为参考蒸散量 (mm); R_n 为地面净辐射 (MJ/(m² · d)); G 为土壤热通量 (MJ/(m² · d)); γ 为湿度计常数 (kPa/°C); U_2 为 2 m 高处的风速 (m/s); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); T_{mean} 为 2 m 高度的平均气温 (°C); Δ 为饱和水汽压温度曲线上的斜率 (kPa/°C)。

在植被不同生长季节评估蒸散发方法对植被灌溉管理及需水量需求研究具有重要意义。根据温度要求, 植被主要分为冷季(秋冬季作物和春季作物)和暖季(夏季作物)。因此将植物的生长季节划分为凉爽的春季(3—5月)、暖季(6—9月)和秋冬季(10月至翌年2月), 以此来估算各研究区的累计蒸散量。

3.3 模型评价方法

模型的评价采用相关系数 (CC)、相对偏差

(RBIAS)、均方根误差 (RMSE) 和 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 (NSE) 4 项统计指标 (表 2)。通常情况下, CC 和 NSE 的值越接近 1, 并且 RBIAS 和 RMSE 的值越接近 0, 则表示蒸散发模型的性能越好。此外, 使用卡方检验来确定在 95% 的置信度下 FAO-Penman-Monteith 模型的蒸散发量与其他模型之间

表 2 统计指标可靠性评价方法 (与 FAO-Penman-Monteith 方法相比)

统计指标	计算方法	完善价值
相关系数 (CC)	$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (ET_{AMn} - \overline{ET_{AM}})(ET_{FPMn} - \overline{ET_{FPM}})}{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (ET_{AMn} - \overline{ET_{AM}})^2}{N}} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (ET_{FPMn} - \overline{ET_{FPM}})^2}{N}}}$	1
相对偏差 (RBIAS)	$RBIAS = \frac{\sum_{n=1}^N (ET_{AMn} - ET_{FPMn})}{\sum_{n=1}^N ET_{FPMn}}$	0
均方根误差 (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (ET_{AMn} - ET_{FPMn})^2}{N}}$	0
Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (ET_{FPMn} - ET_{AMn})^2}{\sum_{n=1}^N (ET_{FPMn} - \overline{ET_{FPM}})^2}$	1

4 结果与分析

4.1 FAO-Penman-Monteith 方法计算的蒸散量

由 FAO-Penman-Monteith 法估算的蒸散量见表 3。韩仓河流域的月平均蒸散量为 69.68~87.42。月均蒸散量与年度蒸散量的最大值和最小值分别为王家庄站和大陈家庄站。

表 3 利用 FAO-Penman-Monteith 方法估算韩仓河流域站点每月和每年平均 PET 值 单位: mm

站点名称	月均 ET 量	年度 ET 量	最大 ET 量	最小 ET 量
燕子山	83.20	998.39	171.82	15.65
东梧	75.43	906.03	144.13	23.48
韩仓	84.86	1018.62	168.92	21.32
王家庄	87.42	1049.07	165.53	21.45
群井	87.17	1046.06	170.12	22.05
大陈家庄	69.68	836.88	127.86	21.58

4.2 不同方法的蒸散量估算评价

通过比较 9 种蒸散发方法与 ET_{FPM} 方法的月蒸散量, 运用相关系数、相对偏差、均方根误差和 Nash-Sutcliffe 模型效率系数等统计指标来评估不同蒸散发模型的可适用性 (图 1)。在流域范围内, 运用 ET_{FPM} 计算的月蒸散量与其他方法计算之间的相关系数均高于 0.85 (图 1)。在蒸散发计算方法中, ET_{JH} 、 ET_{HS} 和 ET_{HAM} 与 ET_{FPM} 的相关性最高 (图 1)。不同蒸散发方法与 ET_{FPM} 方法间最大和最小相关系数分别在大陈家庄站和王家庄站 (图 1)。不同方法之间的 RMSE 取值范围为 0.59~4.64 (图 1)。在研究区域内, RMSE 的最低和最高平均值分别来自 ET_{MAK} (1.087) 和 ET_{LIN} (3.989)。 ET_{MAK} 法在所有研究站点的 RMSE 值最低, 此时模型的估算效果最

是否存在显著差异。

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(ET_{FPM} - ET_{AM})^2}{ET_{AM}} \quad (11)$$

式中: X^2 为皮尔森卡方值; n 为数据个数; ET_{FPM} 为 FAO-Penman-Monteith 法计算的参考蒸散量; ET_{AM} 为替代模型计算的蒸散量。

佳 (图 1)。

N—S 效率系数显示, ET_{MAK} 法在各站点均表现最佳, 其 NSE 值介于 0.845~0.947 (图 1)。在研究区域内, ET_{MAK} 和 ET_{PEN} 模拟结果良好, NSE 平均值分别为 0.877 和 0.736。由于 ET_{JH} 对燕子山站 (NSE = -0.359); ET_{HAM} 对韩仓站 (NSE = -0.358); ET_{LIN} 对王家庄 (NSE = -0.533)、群井 (NSE = -0.586)、大陈家庄 (NSE = -0.787) 站的模拟数值相对偏低, 因此这些方法不适用于该站点的模拟。除此之外, 其他模型对于不同站点的预测结果良好 (图 1)。其中 ET_{MAK} 对于燕子山站 (NSE = 0.947) 和东梧站 (NSE = 0.851) 的模拟结果最佳。

相对偏差用于衡量多种蒸散发模型相对于 FAO-Penman Monteith 模型平均值的偏离程度。总体而言, 在不同站点所有方法的偏差取值在 -54.49%~76.66%。相对偏差结果显示, 除 ET_{PT} 、 ET_{ABT} 、 ET_{JH} 外, 其他模拟结果均低估了研究区域的月蒸散发量 (ET_{MAK} 、 ET_{MB} 、 ET_{HS} 、 ET_{HAM} 、 ET_{PEN}), 运用 ET_{HAM} 方法模拟不同区域的平均蒸散发量偏差最大 (RBIAS = -52.29%)。

使用卡方检验来验证 9 种不同蒸散发方法与 FAO-Penman Monteith 方法之间的拟合程度 (表 4)。检验结果表明, 在 99% 的置信水平上, ET_{MAK} 、 ET_{PT} 、 ET_{ABT} 、 ET_{HS} 、 ET_{PEN} 均与 FAO-Penman Monteith 方法呈极显著相关。在 95% 的置信水平上, 除了东梧和大陈家庄, 其他地区 FAO-Penman Monteith 方法与 ET_{JH} 方法之间没有显著差异; 在燕子山和王家庄地区, FAO-Penman Monteith 方法与 ET_{HAM} 方法之间呈显著相关, 而其他地区没有显著差异。

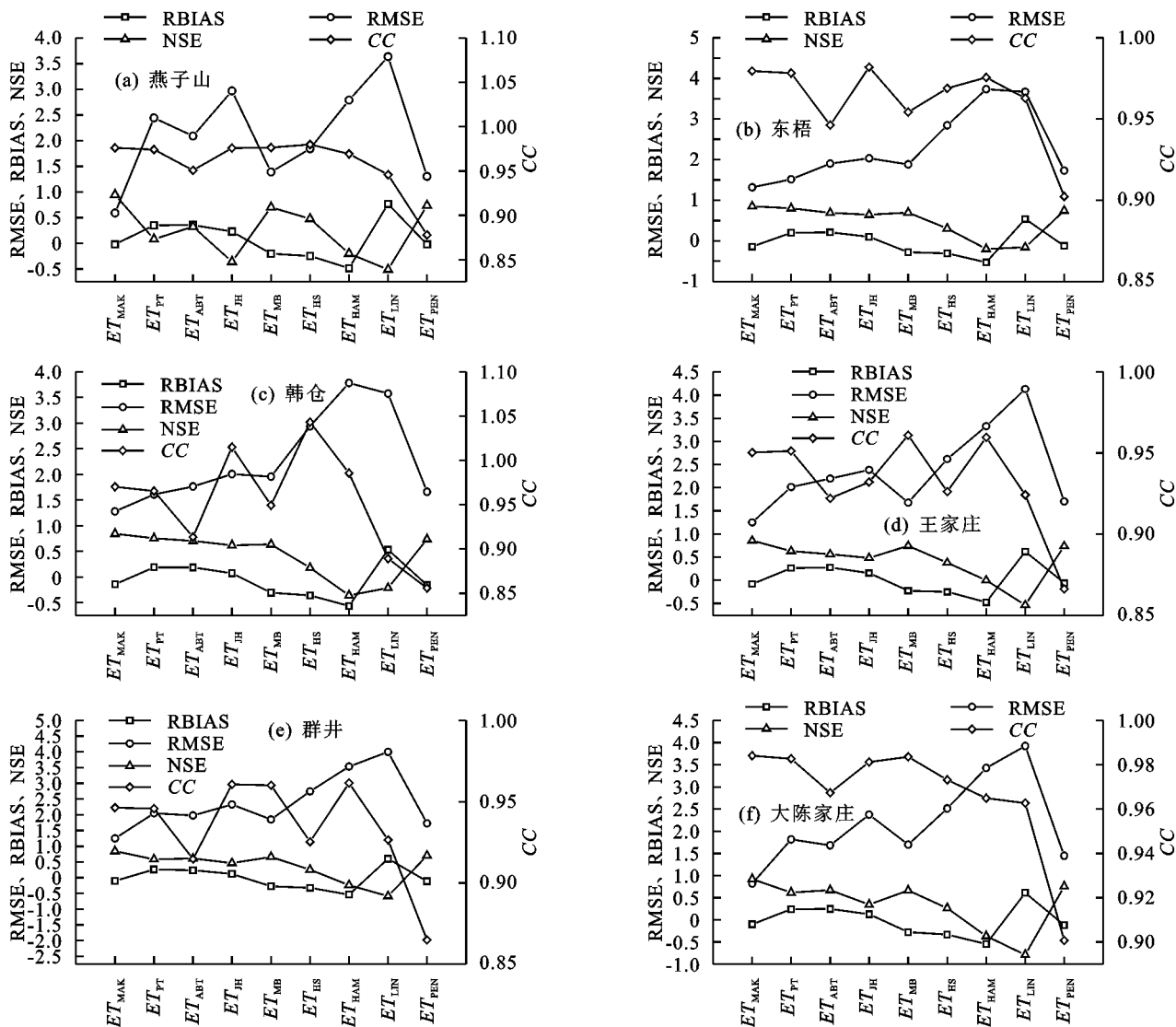


图 1 研究区域 9 种蒸散发模型的相关系数 (CC)、相对偏差 (RBIAS)、均方根误差 (RMSE) 和 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NSE)

表 4 9 种蒸散发模型与 FAO-Penman Monteith 模型相比较的卡方检验 P 值

站点名称	ET_{MAK}	ET_{PT}	ET_{ABT}	ET_{JH}	ET_{MB}	ET_{HS}	ET_{HAM}	ET_{LIN}	ET_{PEN}
燕子山	49.32**	38.39**	37.44**	0.71 ^{ns}	13.56*	36.12**	7.68*	1.82 ^{ns}	45.11**
东梧	34.53**	34.34**	29.78**	12.59*	14.90**	17.92**	3.42 ^{ns}	22.82**	30.27**
韩仓	36.02**	35.47**	32.41**	0.63 ^{ns}	17.64**	14.68**	1.14 ^{ns}	24.30**	31.65**
王家庄	33.15**	30.65**	27.45**	0.67 ^{ns}	15.46**	17.37**	6.93*	18.45**	28.58**
群井	35.20**	32.02**	30.43**	0.15 ^{ns}	5.67*	15.00**	2.09 ^{ns}	19.96**	29.43**
大陈家庄	41.53**	38.09**	35.23**	11.07*	9.01**	22.06**	1.48 ^{ns}	23.19**	36.67**

注: ns 表示不显著; **, * 分别表示 P 在 0.01 和 0.05 水平时显著相关。

通过卡方检验分析,对不同地区参考蒸散发模拟与 9 种不同蒸散发模拟之间进行对比分析,最终得出蒸散发模拟方法的准确性排序(表 5)。不同地区参考蒸散量与最佳优选蒸散发估算的蒸散量的时间变化见图 2。结果表明,在不同地区的 9 种不同的蒸散发计算方法中,蒸散发量估算的最佳替代方法是在占据 67% 的 Jensen-Haise 法,包括燕子山、韩仓、王家庄、群井。而东梧和大陈家庄的最佳替代方法是 Hamon 法,所占比例为 33%,位居第 2。

4.3 不同植被生长季节 ET 计算方法的评价

4.3.1 暖季植被 结果表明,在暖季,燕子山、韩仓、王家庄和群井站运用 Jensen-Haise 方法估算的蒸散量比其他方法更加准确,蒸散量的变化幅度为 $-32.92\% \sim 28.21\%$ (表 6)。在燕子山、韩仓、王家庄和群井站中, ET_{JH} 估算方法的 RMSE 和 NSE 值分别在 $0.69 \sim 1.27$ 和 $0.88 \sim 0.96$ (表 6)。此外,对于东梧和大陈家庄站, ET_{HAM} 是暖季期间最准确的预测模型,其低估范围为 $-34.71\% \sim 38.61\%$,估算方法的 RMSE 和 NSE 值

分别在 1.03~1.05 和 0.62~0.72(表 6)。

表 5 不同研究地蒸散发模拟备选方法排序

站点名称	排序		
	1	2	3
燕子山	ET_{JH}	ET_{LIN}	ET_{HAM}
东梧	ET_{HAM}	ET_{JH}	ET_{MB}
韩仓	ET_{JH}	ET_{HAM}	ET_{MB}
王家庄	ET_{JH}	ET_{HAM}	ET_{MB}
群井	ET_{JH}	ET_{HAM}	ET_{MB}
大陈家庄	ET_{HAM}	ET_{JH}	ET_{MB}

4.3.2 冷季植被

(1)春季。结果表明,与其他方法相比,在寒冷季节

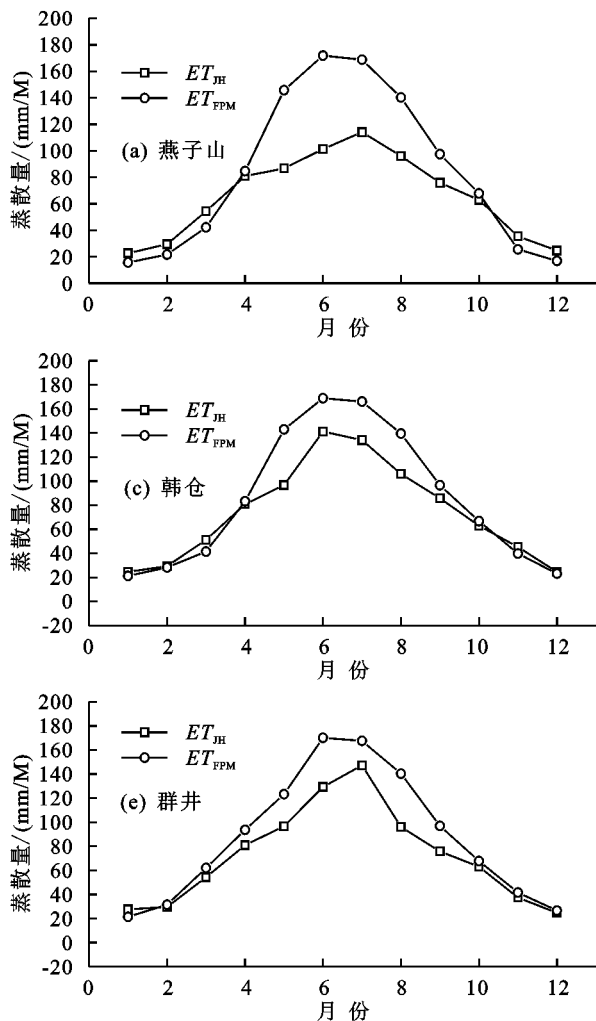


图 2 韩仓河流域 FAO-Penman-Monteith 方法和最佳替代方法的月平均蒸散量

5 讨论

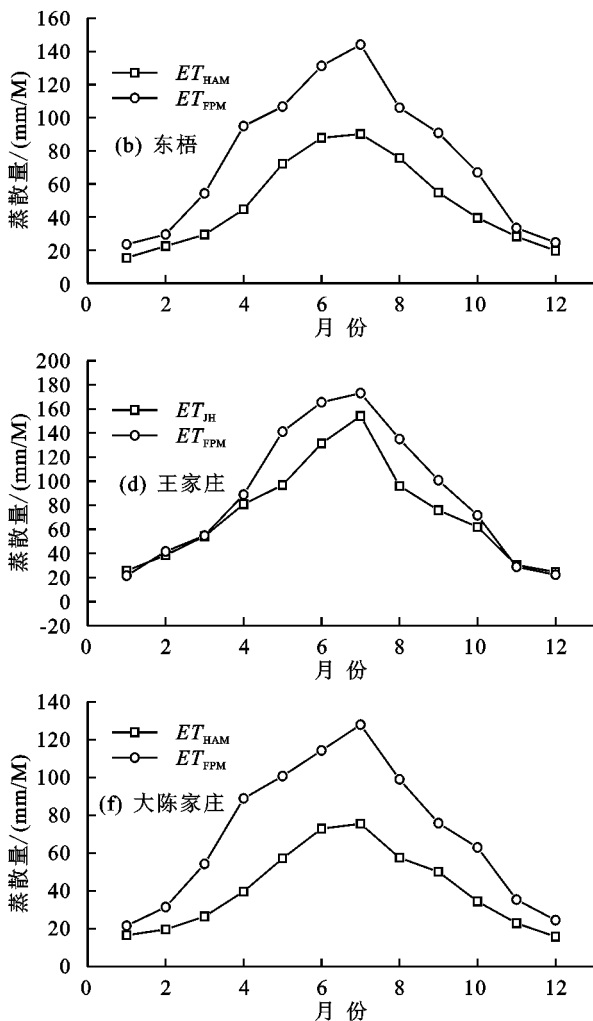
5.1 不同 ET 模型适用性比较分析

不同 ET 模型的预测具有不同的复杂性和准确性。受气象数据的限制,ET 模型的实用性和模拟的准确性是模型选取的主要决定因素^[25]。本文所提到的 ET 模型中,基于辐射和温度的方法均表现出更好的性能,其中,基于辐射的方法表现更佳,这与全球诸多地区的研究^[26-29]结果相一致。

本文选取的统计指标展示不同 ET 模型中的各

早期的所有站点运用 ET_{JH} 方法估算蒸散量的准确性更高,变化范围介于 -18.62%~25.64%, ET_{JH} 方法的 RMSE 和 NSE 值分别在 0.76~1.16 和 0.86~0.94(表 6)。

(2)秋冬季。结果表明, ET_{JH} 是在燕子山、韩仓、王家庄和群井站寒冷季节估算蒸散量的最佳替代方法,其估算值变化幅度介于 -37.79%~5.48%(表 6)。对于这些区域, ET_{JH} 方法的 RMSE 和 NSE 值分别在 0.34~0.76 和 0.95~0.99 的范围内(表 6)。 ET_{HAM} 是东梧站和大陈家庄站中最为准确的预测模型,蒸散量分别低估 -29.73%和 -37.79%,RMSE 和 NSE 平均值分别为 1.46 和 0.72(表 6)。



种估算性能。RBIAS 显示, ET_{LIN} 方法明显高估了不同地区的蒸散量,而其他方法的估算变化趋势相对缓和。在所有 ET 模型中,基于辐射的模型 ET_{JH} 在 67% 的研究区域中表现最佳。 ET_{HAM} 是研究的基于温度模型中最好的模型,在 33% 的研究区域中表现最佳;在排名第 2 的模拟方法中, ET_{HAM} 方法在 50% 的研究区域中表现最好;在排名第 3 的模拟方法中, ET_{MB} 方法适合 83.3% 的区域。此外, ET_{LIN} 、 ET_{HAM} 和 ET_{HS} 的模型效率系数分别在 100%、83%、

50%的研究区域内小于 0.3。结果还表明,在 83%的研究区域中, ET_{HAM} 模型将平均月 ET 低估 15%以上,而在 ET_{LIN} 模型中,所有区域的月 ET 均低估 15%以上。此外,卡方检验表明,在 83%的地区,

ET_{FPM} 模型和 ET_{LIN} 模型的每月 ET 预测之间存在显著差异,说明 ET_{LIN} 模型对于本研究地区及相同气候区域的月 ET 估算并不适用,这与世界上其他地区的研究结果相似^[25,30-31]。

表 6 研究区域主要生长季节 FAO-Penman-Monteith 和最优方法累积蒸散量值

研究区域	生长季节	蒸散总量/mm		高估或低估/%	均方根误差(RMSE)	N-S效率系数(NSE)
		ET_{FPM}	最优方法			
燕子山	暖季(夏季植物)	578.32	387.93(ET_{JH})	-32.92	1.27	0.88
	冷季 春季作物	272.62	221.87(ET_{JH})	-18.62	1.16	0.86
	秋冬作物	175.15	147.44(ET_{JH})	-15.82	0.76	0.95
东梧	暖季(夏季植物)	472.25	308.32(ET_{HAM})	-34.71	1.05	0.72
	冷季 春季作物	255.93	281.80(ET_{JH})	10.11	0.86	0.93
	秋冬作物	177.89	125.00(ET_{HAM})	-29.73	1.36	0.79
韩仓	暖季(夏季植物)	467.23	571.10(ET_{JH})	22.23	0.69	0.96
	冷季 春季作物	228.81	267.80(ET_{JH})	17.04	0.91	0.91
	秋冬作物	186.93	179.72(ET_{JH})	-3.86	0.34	0.99
王家庄	暖季(夏季植物)	457.23	564.40(ET_{JH})	23.44	0.75	0.96
	冷季 春季作物	231.77	284.80(ET_{JH})	22.88	0.87	0.92
	秋冬作物	181.37	189.87(ET_{JH})	4.69	0.58	0.97
群井	暖季(夏季植物)	448.34	574.81(ET_{JH})	28.21	0.84	0.95
	冷季 春季作物	221.91	278.80(ET_{JH})	25.64	0.76	0.94
	秋冬作物	182.45	192.45(ET_{JH})	5.48	0.48	0.99
大陈家庄	暖季(夏季植物)	416.97	255.99(ET_{HAM})	-38.61	1.03	0.62
	冷季 春季作物	243.61	266.25(ET_{JH})	9.29	0.86	0.92
	秋冬作物	176.02	109.50(ET_{HAM})	-37.79	1.56	0.65

5.2 植被生长季节 ET 模型的选择

植被需水量由生长季节的蒸发需水量决定,主要通过计算各主要种植制度生长期月 ET 的累积值来评估各 ET 模型的可预测性和适用性^[25]。结果表明,在 33%的研究区域中,估算蒸散量的最佳方法因生长季节的不同而不同。在生长旺盛的暖季(夏季,6—9月), ET_{JH} 、 ET_{HAM} 分别在研究区域的 67%和 33%中表现最好;较为凉爽的春季(3—5月)累积 ET 估算值表明, ET_{JH} 是蒸散量模拟的最佳替代方法;对于较为寒冷的秋冬季(10月至翌年2月), ET_{JH} 、 ET_{HAM} 为区域的最佳估算方法,所占比例分别为 67%和 33%。通常情况下,对于本研究地区,基于辐射的模型可在 1 年中均可获得最佳模拟结果。Zheng 等^[31]表明,辐射是影响中国大多数研究地区 ET 的主要气候因素;Valle 等^[29]分别运用质量传递方法、辐射法、温度法以及组合法,对巴西稀树草原的蒸散量进行评价,得出辐射法比其他方法估算更准确。

蒸散量的最佳替代方法和参考方法在生长期 ET 估算值之间的差异表明,在大多数地区,替代方法的高估或低估率低于 30%(50%),个别地区替代方法的高估或低估率低于 25%(33%)。Zahra

等^[25]研究指出,最佳替代方法与参考方法之间的差异 < 25%(92%)。在本研究中,暖季的燕子山、东梧和大陈家庄站,以及秋冬季大陈家庄站的最佳替代方法和参考方法之间的差异 > 30%,说明最佳替代方法在这些地区并不可靠,因此不建议在农业管理中使用。

6 结论

(1)通过韩仓河流域及周边 6 个气象站近 30 年的月气象数据,对 9 种不同的 ET 模型进行了评估。结果表明, ET 模型性能在不同区域之间是可变的。在研究区域范围内,Jensen-Haise 方法是多数研究区 ET 估算的一种简单可靠的替代方法。同时,基于辐射的方法比基于温度的方法性能更佳。在基于温度的方法中,Hamon 方法是最为可靠的替代方法,Lin-acre 方法对本研究区域的月 ET 估算并不适用。

(2)通过计算植被生长期间的月 ET 累积值,以评估不同 ET 模型的可预测性性能和适用性。在暖季和秋冬季,Jensen-Haise 方法和 Hamon 方法与其他替代方法相比效果最好;在春季,Jensen-Haise 方法适合所有研究区域。在实际应用上,建议在与韩仓河流域气候类型相似的区域中使用 Jensen-Haise 和

Hamon 方法作为模拟的替代方法。此外,针对不同的研究区域,还应考虑植被生长季节 *ET* 估算的时空变化,以确定植被精确的需水量。

参考文献:

- [1] Valipour M, Gholami S M A, Raeini-Sarjaz M. Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 180(A): 50-60.
- [2] Yang Y, Chen R S, Song Y X, et al. Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors and their elevational gradients in the Qilian Mountains, northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 147-159.
- [3] Lang D X, Zheng J K, Shi J Q, et al. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman-Monteith method in southwestern China[J/OL]. *Water*, 2017, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100734>.
- [4] King D A, Bachelet D M, Symstad A J, et al. Estimation of potential evapotranspiration from extraterrestrial radiation, air temperature and humidity to assess future climate change effects on the vegetation of the Northern Great Plains[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 297: 86-97.
- [5] Silva H J F, Santos M S, Cabral Junior J B, et al. Modeling of reference evapotranspiration by multiple linear regression[J]. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 2016, 6: 44-58.
- [6] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations(FAO), 1998.
- [7] Xiang K Y, Li Y, Horton R, et al. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration: A review[J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>.
- [8] Peng L L, Li Y, Feng H. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-19.
- [9] Gharbia S S, Smullen T, Gill L, et al. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 571-592.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Smith M, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131: 2-13.
- [11] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 1-22.
- [12] Tegos A, Malamos N, Efstratiadis A, et al. Parametric modelling of potential evapotranspiration: A global survey[J]. *Water*, 2017, 9(10): 795-816.
- [13] Todorovic M, Karic B, Pereira L S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481(8): 166-176.
- [14] 花圣卓,蔡昕,余新晓.平坦下垫面植被蒸散特征及对气象因素的响应研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 344-350, 354.
- [15] Makkink G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters[J]. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 1957, 11: 277-288.
- [16] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*[J]. Series A. Mathematical and Physical, 1948, 193: 120-145.
- [17] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92.
- [18] Abtew W. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1996, 32(3): 465-473.
- [19] Jensen M E, Haise H R. Estimating evapotranspiration from solar radiation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1963, 89: 15-41.
- [20] McGuinness J L, Bordne E F. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values[J/OL]. *Technical Bulletins*, 1972, 76. DOI: 10.22004/ag.econ.171893.
- [21] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985, 1(2): 96-99.
- [22] Hamon W R. Estimating potential evapotranspiration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1961, 871: 107-120.
- [23] Linacre E T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone[J]. *Agricultural Meteorology*, 1977, 18(6): 409-424.
- [24] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the royal society of London*[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193(1032): 120-145.

- 973-982.
- [12] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.
- [13] Mona M B, Nicholas J, Mats L, et al. Effects of compaction on soil hydraulic properties, penetration resistance and water flow patterns at the soil profile scale [J]. *Soil Use and Management*, 2019, 35(3):367-377.
- [14] 高朝侠.黄土区土壤大孔隙流试验研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [15] Liu D D, She D L. The effect of fracture properties on preferential flow in carbonate-derived laterite from karst mountainous agroforestry lands[J/OL]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 203. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104670>.
- [16] 张俐,余冬立,傅瑜,等.入渗水水质对土壤导水特性影响的试验研究[J].水土保持学报,2017,31(4):64-68.
- [17] 李柯,谭柱森.基于 CV 值的城市应急管理差异性分析[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2018,40(2):129-135.
- [18] 冯娜,刘冬冬,赵荣存,等.岩溶山地植被恢复中碳酸盐岩红土入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2019,33(6):162-169,175.
- [19] 崔强,段辉顺,毛矛,等.不同气候环境下黄土胶结性状的试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):52-59.
- [20] 長塚結花,五味高志,平岡真合乃,等.林道路面の浸透能と水流出特性[J].日本森林学会誌,2014,96(6):315-322.
- [21] Kim S, Perkins J D, Stock J R. Vegetation influences on infiltration in Hawaiian soils [J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(5):329-4551.
- [22] 王晓燕,高焕文,李玉霞,等.拖拉机轮胎压实对土壤水分入参与地表径流的影响[J].干旱地区农业研究,2000,18(4):57-60.
- [23] Mossadeghi-Björklund M, Arvidsson J, Keller T, et al. Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156:91-98.
- [24] 闫加亮,赵文智.长期机械耕作压实对绿洲农田土壤优先流的影响[J].生态学杂志,2019,38(5):1376-1383
- [25] 李鑫,卢玉东,范文,等.黄土斜坡优先流促滑机理研究现状及展望[J].水土保持通报,2019,39(1):294-301,324.
- (上接第95页)
- [25] Zahra S A, Saberali S F. Evaluating of eight evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran [J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106243>.
- [26] Xu C Y, Singh V P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland [J]. *Water Resources Management*, 2002, 16(3):197-219.
- [27] Fotios X P D, Matzarakis A. Evaluation of 13 empirical reference potential evapotranspiration equations on the island of cretein southern Greece [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137(4):211-222.
- [28] Muhammad A R, Chen Z H, Yuan X H, et al. Reference evapotranspiration modeling using new heuristic methods [J/OL]. *Entropy*, 2020, 22(5):547. <https://doi.org/10.3390/e22050547>.
- [29] Valle J L C G, Ventura T M, Gomes R S R, et al. Comparative assessment of modelled and empirical reference evapotranspiration methods for a brazilian savanna [J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106040>.
- [30] Efthimiou, Alexandris, Karavitis, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation between various methods and the FAO56 Penman-Monteith procedure [J]. *European Journal of Water Quality*, 2013, 42:19-34.
- [31] Zheng H, Yu G R, Wang Q F, et al. Assessing the ability of potential evapotranspiration models in capturing dynamics of evaporative demand across various biomes and climatic regimes with China FLUX measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551:70-80.