

基于机器学习的 Budyko 框架流域时变特征参数估计

薛联青^{1,2}, 陈雨欣¹, 刘远洪³, 杨明杰¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243031;
3. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为分析黄河中游 Budyko 框架流域特征参数的时空变化,并捕捉不同因素对流域特征参数的影响,基于黄河中游 8 个子流域的径流、气象和人类活动数据,分区构建多元线性回归 (MLR)、梯度提升 (GB) 和随机森林 (RF) 模型,对傅抱璞方程中的流域特征参数 ω 进行模拟。通过交叉验证选择表现最优的模型,识别对 ω 影响显著的主要控制因素,并进一步将最优模型纳入水热耦合平衡方程,构建时变 Budyko 框架,量化气候变化和下垫面变化对径流的贡献率。结果表明:3 种模型中,RF 模型在模拟 ω 时优于 MLR 和 GB 模型;1980—2019 年各子流域 ω 值均呈增大趋势, ω 主要受不透水面面积、人口和地区生产总值等人类活动因素的控制,在气候因素中潜在蒸散发是重要的控制因素;下垫面变化是黄河中游大多数子流域径流变化的主要驱动因素,然而气候变化对沁河子流域的影响略强于下垫面变化。

关键词:Budyko 框架;流域特征参数;多元线性回归模型;梯度提升模型;随机森林模型;黄河中游
中图分类号:P429 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)04 - 0010 - 09

Estimation of watershed time-varying feature parameter in Budyko Framework based on machine learning//XUE Lianqing^{1,2}, CHEN Yuxin¹, LIU Yuanhong³, YANG Mingjie¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China; 3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To analyze the spatiotemporal changes of watershed characteristic parameter in the Budyko Framework in the middle reaches of the Yellow River and capture the impact of different factors on the watershed characteristic parameter, multiple linear regression (MLR), gradient boosting (GB), and random forest (RF) models were constructed based on runoff, meteorological, and human activity data from eight sub-basins in the middle reaches of the Yellow River. The watershed characteristic parameter ω in the Fu Baopu equation was simulated. By cross validation, select the model with the best performance, identify the main control factors that significantly affect ω , and further incorporate the optimal model into the water heat coupling equilibrium equation to construct a time-varying Budyko framework, quantifying the contribution of climate change and underlying surface changes to runoff. The results showed that among the three models, the RF model outperformed the MLR and GB models in simulating ω . From 1980 to 2019, the ω values of each sub-basin showed an increasing trend, mainly controlled by human activities such as impermeable area, population, and regional GDP. Potential evapotranspiration is an important controlling factor in climate factors. The change of underlying surface is the main driving factor for runoff changes in most sub-basins of the middle reaches of the Yellow River, but the impact of climate change on the Qinhe River sub-basin is slightly stronger than the change of underlying surface.

Key words: Budyko Framework; watershed characteristic parameter; multiple linear regression model; gradient boosting model; random forest model; middle reaches of the Yellow River

流域的降水量主要转化为蒸散发和径流,对水资源可利用性具有重要影响。降水量在蒸散发和径流之间的转化是一个复杂的陆气互馈过程,涉及气

候、植被、土壤和水文循环之间的复杂相互作用,使得准确估算降水量在蒸散发和径流之间的分配成为难题。Budyko 框架形式简单且具有物理意义,可以

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3206800);新疆生产建设兵团科技合作项目(2022BC001);国家自然科学基金项目(51779074)

作者简介:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lxue@hhu.edu.cn

通信作者:刘远洪(1991—),男,讲师,博士,主要从事生态水文与环境水文研究。E-mail:lyh910926@163.com

有效描述多年时间尺度上环境变化对降水量分配过程的影响^[1-2]。在 Budyko 框架的发展过程中,傅抱璞方程是应用最广泛的形式之一^[3-4],其中流域特征参数 ω 反映了不同环境因素的综合影响,确定 ω 是应用傅抱璞方程量化降水量分配的前提^[5-6]。对于有观测资料的流域, ω 可以通过结合水量平衡方程和 Budyko 方程来确定,但在缺乏连续径流观测资料的流域, ω 则难以估算。Xu 等^[7-8] 基于流域的植被、坡度和地理位置信息,开发了经验模型将参数与各种流域属性联系起来以估算 ω ,并模拟了其空间分布。然而,这些研究多关注 ω 的空间变异性与地形和土壤等地理因素的关系,而地理因素在时间上的变化较小,无法准确反映 ω 的变化。周月娇等^[9-10] 引入时序 t 作为 ω 的解释变量,Wang 等^[2,11] 则选取随时间变化显著的气候、植被和社会经济等多要素作为 ω 的解释变量,构建了考虑多要素时变特征的 Budyko 框架,相比常参数方程,获得了更强的径流模拟能力。Li 等^[12] 基于时变 Budyko 框架对黄河中游 14 个子流域进行了研究,采用统一的模型来描述气候因素和水保措施对 ω 的影响,但未考虑各子流域的差异性。综上所述, ω 与其影响因素的关系随时间和空间变化,而现有研究多集中于 ω 在单一空间或时间维度的变化,忽略了 ω 在时间和空间上的综合动态变化。

黄河中游流经不同气候区,流域气候和地貌差异显著,在气候变化和人类活动的共同影响下 ω 的变化情况更加复杂。本文以黄河中游的 8 个子流域为研究区,综合考虑 ω 的时空特征,分区构建多元线性回归 (multiple linear regression, MLR)、梯度提升 (gradient boosting, GB) 和随机森林 (random forest, RF) 模型,以模拟 ω 与水文气象、植被、土地利用、社会经济活动的耦合关系,并进一步将模型与 Budyko 方程耦合,以更准确地揭示径流变化的驱动力。本文在区域和时间两个尺度上分析 ω 的变化特征,以期在无资料地区流域特征参数的估计提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河中游指托克托县河口镇至孟津桃花峪之间的区域,地理范围为 32°N~42°N、104°E~113°E,流域面积约 36.2 万 km²,干流河段总长度约 1 234 km,自东向西流经内蒙古、山西、陕西、河南 4 省区。黄河中游位于半湿润半干旱区,受大陆性季风气候控制,年均降水量为 320~836 mm,从北向南逐渐增加,年均潜在蒸散发量为 810~1 260 mm^[13]。黄河中游

是我国重要的农业产区,流域水资源供需矛盾突出^[14],尤其位于黄河中游的黄土高原是黄河的主要泥沙来源,其大量的入河泥沙量进一步加剧了水资源的紧张^[15]。流域内水资源短缺与泥沙富余问题相互影响,给当地水资源管理、粮食安全和生态安全带来巨大挑战。考虑到流域下垫面特征的空间差异,将黄河中游划分为 8 个子流域:伊洛河、北洛河、渭河上游、渭河中下游、河龙区间、汾河、沁河和泾河。黄河中游概况及子流域信息见图 1 和表 1。

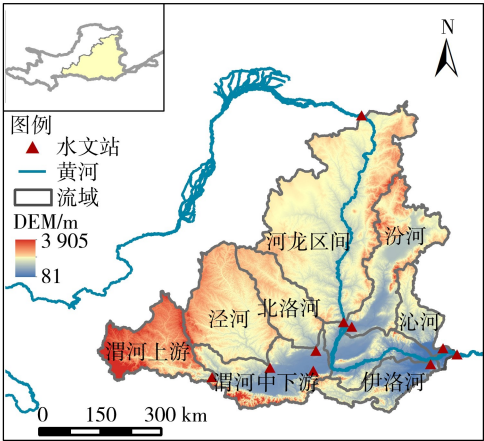


图 1 黄河中游概况

Fig. 1 Overview of middle reaches of the Yellow River

表 1 子流域信息

Table 1 Information of sub-basins

序号	子流域	控制站	北纬	东经	集水面积/km ²
1	伊洛河	黑石关	34°43′	112°56′	18 563
2	北洛河	壮头	35°02′	109°50′	25 723
3	渭河上游	林家村	34°23′	107°03′	30 122
4	渭河中下游	华县	34°35′	109°46′	33 270
5	河龙区间	龙门	35°40′	110°35′	129 654
6	汾河	河津	35°34′	110°48′	38 728
7	沁河	武陟	35°06′	113°23′	12 880
8	泾河	张家山	34°38′	108°36′	43 106

1.2 数据来源

径流数据采用 1980—2019 年黄河中游水文站的实测年径流量,来源于黄河水利委员会发布的水文年鉴。气象数据采用 1980—2019 年逐日 CN05.1 格点数据集,该数据集为吴佳等^[16] 利用距平逼近法对 2 400 多个中国地面气象台站的观测数据插值后得到的分辨率为 0.25°×0.25°的观测数据。1980—2019 年潜在蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心发布的中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集^[17-20]。归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据采用时间分辨率为 15 d、空间分辨率为 8 km 的 GIMMS NDVI3g 数据集。1985 年及 1990—2019 年的土地利用数据来源于中国 1990—2021 年连续 32 年土地利用 CLCD 数据

集,分辨率为 $30\text{ m}^{[21]}$ 。由于早期土地利用数据年际变化较小,1980—1984 年缺失的数据采用 1985 年数据代替。人口和 GDP 数据来源于各省区的统计年鉴、中国人口统计年鉴及中国统计年鉴。1980—2013 年各省区的用水数据来源于 Zhou 等^[22]的研究,2014—2019 年各省区的用水数据来源于《水资源公报》。各子流域气象数据及 NDVI 数据采用算术平均法求得,各子流域社会经济数据通过面积加权平均法从行政尺度转换到流域尺度。

2 研究方法

2.1 Budyko 框架

Budyko 假设降水量在实际蒸散发量和径流量之间的分配由大气对陆面的水分供给和能量需求之间的平衡决定^[1]。根据流域水文气候物理机制,傅抱璞方程引入流域特征参数 $\omega^{[3]}$,得到的 Budyko 假设的解析表达式:

$$E/P = 1 + E_0/P - [1 + (E_0/P)^\omega]^{1/\omega} \quad (1)$$

式中: P 为降水量; E 为蒸发量; E_0 为潜在蒸发量。 ω 反映流域的自然地理特征,与流域的土地利用、植被和土壤有关。

需要注意的是,Budyko 框架应用的基本假设是多年水量平衡,大约 70% 的流域在 10 年内达到稳定状态^[23]。为了尽量减少流域蓄水量对水量平衡的影响,将滑动窗口设置为 11a,各年的滑动平均数据代表以其为中心的 11 a 平均值。结合水量平衡方程,得到径流量的表达式见式(2)。采用敏感系数表征不同因素对径流的定量影响,流域径流量对于气候因素和流域特征参数的敏感系数表达式见式(3)~(5)。

$$R = P - PE_0/(P^\omega + E_0^\omega)^{1/\omega} \quad (2)$$

$$\frac{\partial R}{\partial P} = \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{(1/\omega-1)} \quad (3)$$

$$\frac{\partial R}{\partial E_0} = \left[1 + \left(\frac{P}{E_0} \right)^\omega \right]^{(1/\omega-1)} - 1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \omega} = (P^\omega + E_0^\omega)^{1/\omega} \left[\left(-\frac{1}{\omega^2} \right) \ln(P^\omega + E_0^\omega) + \frac{1}{\omega} \frac{1}{P^\omega + E_0^\omega} (P^\omega \ln P + E_0^\omega \ln E_0) \right] \quad (5)$$

2.2 模型构建

根据 Li 等^[12,24]的研究, ω 的潜在控制因素包括气候因素、人类活动因素和地理因素。其中,气候因素包括降水量、气温和潜在蒸发量;人为因素包括不同土地利用类型的面积占比、灌溉用水量和工业用水量;地理因素包括子流域大小、高程和坡度。地理因素在研究期没有发生较大改变,因此不将其纳入

考虑。在此基础上,筛选出 4 个气候因素:降水量、蒸发量、气温、干旱指数;7 个人类活动因素:NDVI、不透水面面积、耕地面积、人口、地区生产总值、灌溉用水量和工业用水量。在每个子流域分别采取 MLR、GB 和 RF 3 种模型模拟流域特征参数 ω 。首先,最小化基于水量平衡计算的蒸散发量与基于 Budyko 方程模拟的蒸散发量之间的差值来校准得到 ω 值;其次,将 ω 作为预测目标,将 11 个控制因素作为模型输入,构建 ω 与控制因素之间的关系,并筛选出模拟效果最好的模型。所有模型均采用五折交叉验证方法进行验证,重复 10 次。为给模型性能对比提供一致的依据,3 种模型均采用相同的训练数据和测试数据。采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)作为评价指标,对 3 种模型在交叉验证数据集上的性能进行评价。

MLR 模型可以直观地给出自变量与因变量之间的最优线性回归方程,优势在于简单易懂、计算速度快,但在面对复杂的非线性关系时存在局限性。将 11 个控制因素标准化处理后的值作为初始自变量输入 MLR 模型,通过逐步回归和交叉验证,选择对目标变量具有显著影响的因素,并处理多重共线性问题。GB 模型能够迭代生成多个弱学习器,每个步骤都在上一步骤的基础上改进,不断选择一个负梯度方向上的基函数添加到模型中以减少模型的损失^[25-26]。GB 模型能够很好地处理复杂的非线性关系,且具有较高的预测精度,但对数据中的噪音和异常值较为敏感,容易被过拟合。本文中,GB 模型直接使用 11 个控制因素数据进行训练,并通过每个因素对模型预测结果的贡献来评估因素重要性。GB 模型有 4 个重要参数:树的数量、每棵树的分裂数、收缩率和子样本比例,本文将树的数量设为 1000,每棵树的分裂数设为 3,收缩率设为 0.01,子样本比例设为 0.8。RF 模型通过多个决策树输出的平均值得出最终预测值。每棵决策树都是独立的,并在随机选择的子样本上进行训练,从而有效减少过拟合的风险^[27-28]。RF 模型适合处理高维数据,且具有较强的稳健性,但模型复杂度高,结果解释性较弱。RF 模型直接使用 11 个控制因素进行训练,并使用均方误差的平均下降值来计算因素重要性进而评估识别重要的控制因素。本文中,RF 模型的决策树数量设为 500,每棵树节点上随机变量的数量设为 3。

2.3 归因分析

采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[29]对径流数据进行趋势分析,将研究期划分为基准期和变化期。相对于基准期,变化期径流量的变化由 3 部分组成,

分别为由降水量、潜在蒸发量和 ω 变化引起的径流量变化,3 种因素对径流量变化的贡献率计算公式为

$$C_x = \frac{\Delta R_x}{\Delta R} \times 100\% \quad (6)$$

其中

$$\Delta R_x = \frac{\partial R}{\partial x} \Delta x$$

式中: C_x 为因素 x 的贡献率; ΔR 为两个时期的径流变化量; Δx 为两个时期因素的平均值变化; ΔR_x 为因素 x 引起的径流变化量。

3 结果与分析

3.1 水文气象要素趋势与突变分析

本文研究时段为 1980—2019 年, Mann-Kendall 趋势检验结果表明黄河中游径流序列在 1990 年发生显著突变, 突变点将径流序列分为基准期(1980—1990 年)和变化期(1991—2019 年)。与基准期相比,变化期多年平均径流减少了 23.46 mm, 减少 46.84%。针对各子流域而言,径流量、降水量、潜在蒸发量的年均值具有不同的空间分布格局,其年均值在大部分地区表现出显著的趋势(图 2),图中斜线表示变化趋势显著(显著性水平为 0.05)。研究区南部的伊洛河、渭河中下游流域的年径流平均值较大,均在 100 mm 以上。从时间尺度上来看,所有子流域年径流量均呈下降趋势,下降速率为 0.07~1.21 mm/a。东部子流域的径流减小速率小

于西部子流域,且西部子流域的径流均呈现出显著的减小趋势。降水量年均值总体上表现为由北向南增加,伊洛河流域降水量最大,高达 670 mm。从时间尺度上来看,所有子流域降水量以 0.42~1.42 mm/a 的速率增加,河龙区间和沁河流域表现为显著的增加趋势。渭河中下游流域年降水量和年降水量增加速率均较大,河龙区间年降水量最少,但变化速率却最大。潜在蒸发量年均值由西向东增加,伊洛河年潜在蒸发量最大,高达 1122 mm。从时间尺度上来看,所有子流域年潜在蒸发量均有显著的增加趋势,增加速率为 0.61~1.60 mm/a。总体而言,南部子流域潜在蒸发量增加速率大于北部子流域,其中北洛河和渭河中下游流域具有较大的增加速率。

3.2 流域特征参数模拟性能分析

在各子流域分别构建 MLR、GB 和 RF 模型对 ω 进行模拟,结果如图 3 所示,图中阴影区间表示多次模拟结果的正负标准差。图 4 为各子流域 3 种模型模拟 ω 的评价指标箱型图。可见在各子流域 3 种模型的模拟性能存在差异。具体来说,在伊洛河、渭河上游、渭河中下游、河龙区间、汾河、泾河上构建的 RF 模型的 R^2 高于 MLR 和 GB 模型,并且 RF 模型在伊洛河、渭河上游、河龙区间、汾河上的 MAE 和 RMSE 也明显低于 MLR 和 GB 模型,但 RF 模型在渭河中下游和泾河上的 MAE 和 RMSE 略高于 MLR 模型。在北洛河和沁河流域,MLR 模型相比于 RF 和 GB 模型具有较高的 R^2 值和较低的 MAE 和

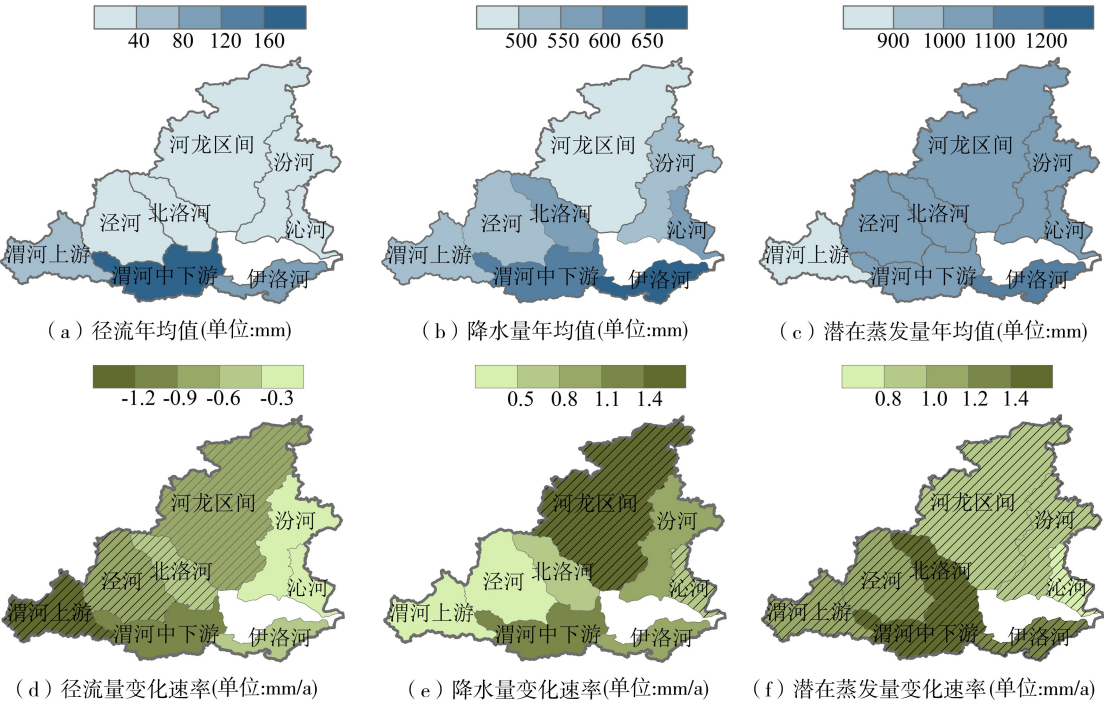


图 2 黄河中游水文气象要素变化特征

Fig. 2 Change characteristics of hydrological and meteorological elements in middle reaches of the Yellow River

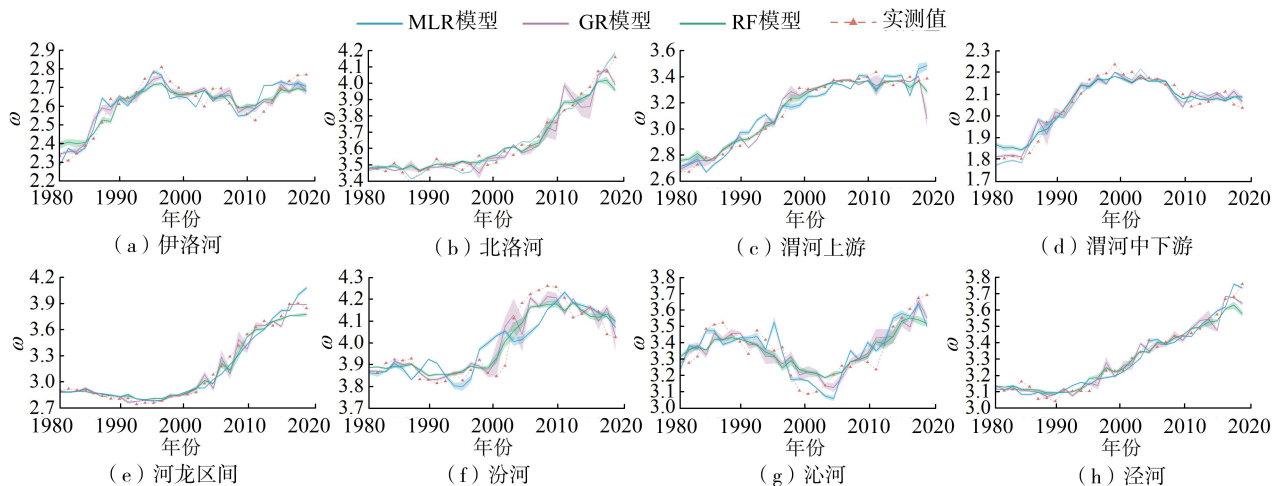


图3 各子流域3种模型对 ω 的模拟值与实际值对比

Fig. 3 Comparison of simulated values and actual values of ω using three models in each sub-basin

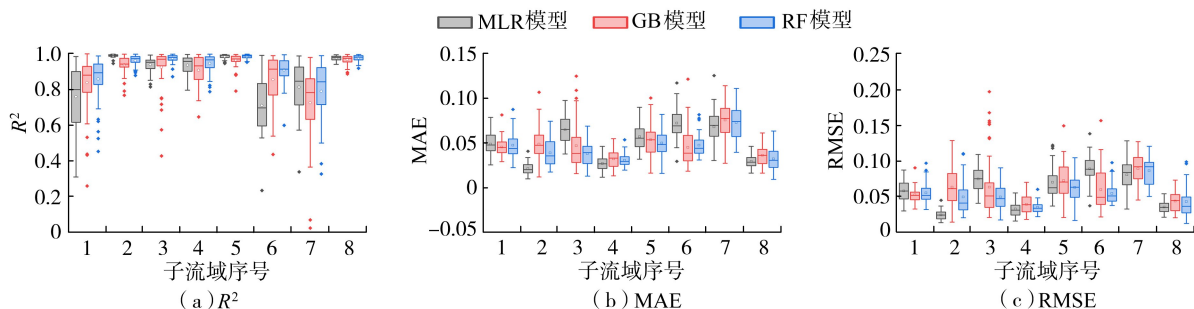


图4 各子流域3种模型模拟 ω 的评价指标箱型图

Fig. 4 Box plot of evaluation indicators for simulating ω using three models in each sub-basin

RMSE。由图4可见,与RF模型相比,MLR和GB模型的误差分布显示出更大的分散性。对于大多数子流域,RF模型捕捉到了 ω 大部分的变化范围,而MLR和GB模型难以捕捉到 ω 的变化范围。在10次重复中取评价指标的平均值,比较3种模型在所有子流域上预测性能的中位数,对整个流域的模型性能进行综合评估。RF模型的 R^2 中位数(0.95)高于MLR模型(0.93)和GB模型(0.91);RF模型的MAE中位数(0.03)低于MLR模型(0.04)和GB模型(0.04);RF模型的RMSE中位数(0.04)也低于MLR模型(0.05)和GB模型(0.06)。因此,RF模型性能优于MLR和GB模型。且MLR和GB模型的模拟性能在不同子流域上差异较大,不如RF模型性能稳定。总体而言,RF模型对 ω 具有最好的模拟性能。

由图3与图4可见,在伊洛河和沁河子流域,模型对 ω 的模拟性能不如其他子流域。这可能是因为在筛选控制因素的过程中,考虑到植被覆盖与土地利用因素显著相关^[2],为减少因素过多可能带来的多重共线性影响及模型过拟合问题,将灌木、林地和草地面积对 ω 的影响以表征植被覆盖的NDVI来代替,仅将耕地面积和不透水面积纳入考虑。考虑

耕地面积的影响是因为耕地作物生长需要灌溉,而灌溉增加了降水量转化为蒸散发量的比例,减少了降水量转化为径流量的比例;考虑不透水面积的影响是因为不透水层的存在导致了较低的渗透率,渗透率的降低会增加降水量转化为径流量的比例,减少降水量转化为蒸散发量的比例。然而,本文忽略了土地利用类型对 ω 的影响。土地利用是水文过程的关键影响因素,产流过程的填洼、下渗和土壤蓄水能力以及汇流过程中地表糙率、河流水文路径等均会随着土地利用类型的变化而改变。而且土地利用类型对水文过程的影响因区域特征和降雨条件的差异表现出复杂性和非均一性。侯慧敏等^[30-31]的研究表明,随着耕地面积的增加,径流量有一定程度的增加,但林地、草地等其他土地利用类型的面积也会产生较大影响。因此,未来有必要将不同土地利用类型纳入考虑。此外,本文未考虑淤地坝、梯田等水保措施对于 ω 的影响。

为了进一步分析RF模型对 ω 的模拟效果,利用RF模型模拟得到的 ω 对各子流域的蒸发量进行模拟,将模拟结果与基于水量平衡得到的蒸发量进行对比,结果见图5。结果表明,蒸发量模拟结果的 R^2 为0.83~0.99, RMSE为0.68~6.58 mm。与 ω

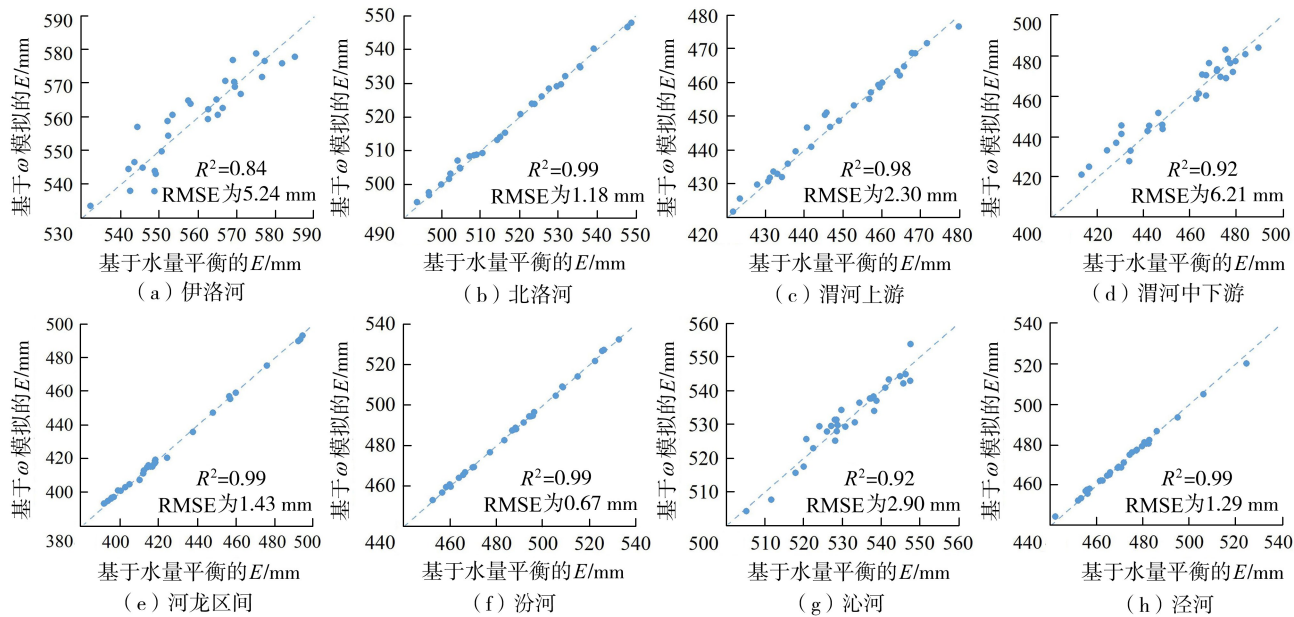


图5 各子流域基于 ω 模拟的蒸发量与基于水量平衡的蒸发量对比

Fig. 5 Comparison of evaporation based on ω simulation and evaporation based on water balance in each sub-basin

的模拟效果相似,在伊洛河和沁河流域上蒸发量的模拟性能不如其他子流域。由图5可见,基于 ω 模拟的蒸发量与基于水量平衡得到的蒸发量之间的差异较小, ω 所表征的流域特征比较符合实际,RF模型的模拟性能较好。

3.3 流域特征参数的时空特征及其控制因素

图6为1980—2019年黄河中游 ω 值的空间分布特征。由图6可见, ω 的平均值为2.07~4.09, ω 的最高值出现在研究区东部的汾河子流域和中部的北洛河子流域。相比之下,基于11 a滑动平均的 ω 值变化趋势和变异系数则表现出较大的空间异质性。各子流域 ω 值均表现为增加趋势,且除沁河外各子流域 ω 值均呈显著增加趋势,其中位于研究区北部的河龙区间子流域和西部的渭河上游、泾河及北洛河子流域 ω 值增加速率较大,每10 a上升0.21~0.38。此外,河龙区间和渭河上游子流域的 ω 值的变异系数较高,表明这些子流域的流域特征

出现较大波动,环境因素对这些子流域水分平衡的影响比其他子流域大。

基于构建的RF模型,分析各子流域11个控制因素的重要性,各子流域重要性排名前四的控制因素如表2所示。由表2可见,各子流域 ω 的控制因素存在差异。不透水面面积被选为最重要因素的频率最高,其次是人口。以不透水面面积为最重要因素的子流域大多位于研究区北部(包括河龙区间、汾河、沁河及泾河子流域),以人口为最重要因素的子流域位于研究区南部(包括伊洛河、渭河上游及渭河中下游子流域)。通过比较可以发现,各子流域中最重要因素的重要性有一定的差距,最大值为18.20%,最小值为12.95%。这表明各子流域受最重要因素的影响程度有所不同。所有子流域的前三个重要因素一致,分别是不透水面面积、人口和地区生产总值,均与人类活动相关,表明整个黄河中游的径流均受到人类活动的强烈影响。前三个重要因

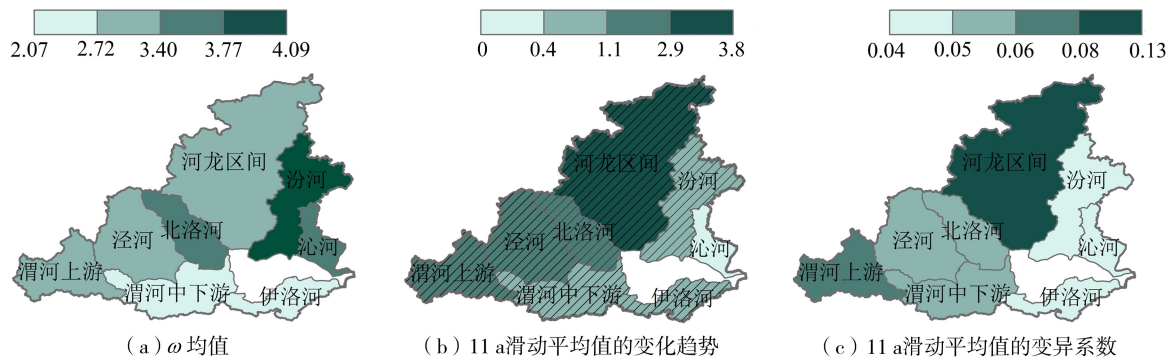


图6 1980—2019年黄河中游 ω 的空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of ω values in middle reaches of the Yellow River from 1980 to 2019

表 2 各子流域重要性排名前四的控制因素

Table 2 Top four control factors for importance ranking of each sub-basin

子流域	第一	第二	第三	第四
伊洛河	人口	不透水面面积	地区生产总值	工业用水量
北洛河	地区生产总值	不透水面面积	人口	耕地面积
渭河上游	人口	地区生产总值	不透水面面积	潜在蒸发量
渭河中下游	人口	不透水面面积	地区生产总值	潜在蒸发量
河龙区间	不透水面面积	地区生产总值	人口	耕地面积
汾河	不透水面面积	人口	地区生产总值	耕地面积
沁河	不透水面面积	人口	地区生产总值	潜在蒸发量
泾河	不透水面面积	人口	地区生产总值	耕地面积

素的重要性大小较接近,说明不同子流域受这些因素的影响相对均衡。北洛河、河龙区间、汾河及泾河子流域的第四重要因素为耕地面积,渭河上游、渭河中下游及沁河子流域的的第四重要因素为潜在蒸发量,而在伊洛河子流域的第四重要因素为工业用水量。这表明在气候因素中,潜在蒸发量是 ω 的重要控制因素。

基于构建的 RF 模型,分析黄河中游 11 个控制因素的重要性,结果显示排名前四的重要因素为不透水面面积(重要性为 15.76%)、人口(15.39%)、地区生产总值(15.30%)、耕地面积(11.49%),和 ω 与各控制因素的相关性分析结果一致。气候变化通过改变降水、蒸发、下渗等水文过程对区域水循环产生重要影响;人口和地区生产总值的增长往往伴随着更多的城市建设、道路铺设和其他人类活动,这些人类活动带来了土地利用的变化,减少了自然植被的覆盖率,使下垫面特征趋向于硬化、不透水,从而改变了流域的水文和生态功能^[32]。

3.4 径流变化归因分析

计算各子流域基准期和变化期径流对不同影响因素的敏感系数,结果如表 3 所示。径流量对降水量、潜在蒸发量和 ω 的敏感系数范围分别为 0.09~0.59、-0.03~-0.16 和-11.6~-238.14。对比基准期和变化期径流对不同影响因素的敏感系数可知,基准期的敏感性系数绝对值均大于变化期,各子流域径流对 ω 的敏感性系数最大,说明径流变化对下垫面变化最为敏感。此外,径流对降水量、潜在蒸发量和 ω 的敏感性系数具有显著的区域差异,从整体上看,研究区南部子流域的敏感性系数绝对值要高于北部子流域,即南部子流域径流更易受到外界环境的影响,其中汾河子流域敏感性系数绝对值最低,渭河中下游子流域敏感性系数绝对值最高。

图 7 为不同影响因素引起的径流变化及其贡献率。由图 7 可见, ω 表征的下垫面变化导致所有子流域径流量减少,气候因素导致河龙区间子流域径流量增加,气候因素导致其余子流域径流量减少。

表 3 各子流域基准期和变化期径流对不同影响因素的敏感系数

Table 3 Sensitivity coefficients of runoff during baseline and variation periods of each sub-basin to different influencing factors

子流域	时期	$\partial R/\partial P$	$\partial R/\partial E_0$	$\partial R/\partial \omega$
伊洛河	基准期	0.47	-0.16	-131.22
	变化期	0.35	-0.12	-84.64
北洛河	基准期	0.21	-0.08	-30.83
	变化期	0.17	-0.06	-22.42
渭河上游	基准期	0.36	-0.13	-62.79
	变化期	0.22	-0.09	-29.94
渭河中下游	基准期	0.59	-0.15	-238.14
	变化期	0.45	-0.13	-142.14
河龙区间	基准期	0.19	-0.05	-34.39
	变化期	0.12	-0.04	-18.35
汾河	基准期	0.12	-0.05	-15.93
	变化期	0.09	-0.03	-11.60
沁河	基准期	0.21	-0.08	-33.59
	变化期	0.18	-0.07	-27.30
泾河	基准期	0.24	-0.08	-39.01
	变化期	0.17	-0.06	-24.92

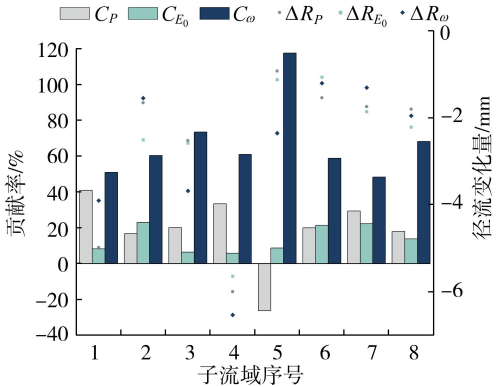


图 7 不同影响因素引起的径流变化及其贡献率

Fig.7 Changes in runoff caused by different influencing factors and their contribution rates

具体来说,下垫面变化导致径流量变化 9.77%~53.10%,气候因素导致径流量变化 7.92%~19.44%,对于河龙区间子流域,气候因素导致径流量增加的值小于下垫面变化导致的径流量减少的值,即下垫面变化对径流量变化的贡献率超过

100%。综合降水量、潜在蒸发量和下垫面变化的影响,发现在变化的环境条件下,渭河中下游子流域径流量变化最显著,汾河子流域的径流量变化最不显著。

在多数子流域,下垫面变化是引起流域径流变化的主导因素,然而在沁河子流域,气候变化的影响略强于下垫面变化,这与 Yang 等^[33]对黄河中游的径流变化归因研究结果一致。东南部的气候贡献率高于西北部,Du 等^[34]也将径流变化主要归因于半干旱地区的气候变化。此外,所选研究时段的差异和所选径流突变点的不同也会导致径流变化归因结果不一样^[35]。不同子流域的气候变化贡献率差异较大,气候变化贡献率最低的是河龙区间子流域,仅占 17%左右;气候变化贡献率最高的是沁河和伊洛河子流域,贡献率均为 50%左右。位于黄河中游东部的汾河、沁河和伊洛河子流域气候变化的贡献率大于西部的河龙区间、渭河上游、渭河中下游和泾河子流域。这可能是因为气候条件的差异造成的,东部子流域气候相较更加湿润,而气候湿润的地区气候变化的影响往往更大^[36]。1990 年以前,黄河中游东南部地区拥有较高的森林和草地覆盖率,使得该区域下垫面特征相对稳定。因此,与其他植被覆盖率较低、下垫面变化更显著的地区相比,该区域植被变化对径流的影响相对较小。

4 结 论

- a. 以黄河中游 8 个子流域为研究区,针对 ω 的时间变异性 and 空间异质性,在分区的前提下构建 MLR、GB 和 RF 模型模拟 ω 。模拟结果表明,RF 模型性能优于 MLR 和 GB 模型,将 RF 模型纳入水热耦合平衡方程构建了时变 Budyko 框架。
- b. 1980—2019 年黄河中游各子流域 ω 值均表现为增加趋势。除沁河外各子流域 ω 值均呈显著增加趋势,其中河龙区间和渭河上游、泾河及北洛河流域 ω 值增加速率最高,且环境对河龙区间和渭河上游流域水分平衡的影响比其余流域更大。黄河中游的 ω 主要受不透水面面积、人口、地区生产总值和耕地面积等人类活动因素的控制。在气候因素中,潜在蒸发量是流域 ω 的重要控制因素。 ω 对其控制因素的响应呈现空间异质性。
- c. 径流对于下垫面变化最为敏感,且南部子流域各要素的敏感性系数绝对值要高于北部子流域。对于绝大多数子流域,下垫面变化是引起流域径流变化的主导因素,然而气候变化对沁河子流域的影响略强于下垫面变化。

参考文献:

[1] BUDYKO M I. Climate and life[M]. New York:Academic Press,1974.

[2] WANG Feiyu, XIA Jun, ZOU Lei, et al. Estimation of time-varying parameter in Budyko framework using long short-term memory network over the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127571.

[3] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31. (FU Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese))

[4] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.

[5] YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): W03410.

[6] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.

[7] XU Xianli, LIU Wen, SCANLON B R, et al. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(23): 6123-6129.

[8] BAI Peng, LIU Xiaomang, ZHANG Dan, et al. Estimation of the Budyko model parameter for small basins in China [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(1): 125-138.

[9] 周月娇,董增川,陈光跃,等. 基于变参数 Budyko 方程的东南沿海小流域径流变化分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7): 12-15. (ZHOU Yuejiao, DONG Zengchuan, CHEN Guangyue, et al. Analysis of runoff changes in small coastal watershed in southeast China based on Budyko equation with variable parameters [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7): 12-15. (in Chinese))

[10] 苗正伟,路梅,丁志宏. 基于时变 Budyko 模型的滹沱河上游径流变化归因分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(7): 29-35. (MIAO Zhengwei, LU Mei, DING Zhihong. Cause analysis of runoff change in the upper reaches of Hutuo River based on time-varying Budyko-type equation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(7): 29-35. (in Chinese))

[11] 李敏欣,邹磊,夏军,等. Budyko 框架下白河流域径流演变及其归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(4): 774-782. (LI Minxin, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Analysis of runoff change and its attribution in the Baihe River Basin under the Budyko framework [J]. Resources

- and Environment in the Yangtze Basin,2023,32(4):774-782. (in Chinese))
- [12] LI Huijuan, SHI Changxing, SUN Pengcheng, et al. Attribution of runoff changes in the main tributaries of the middle Yellow River, China, based on the Budyko model with a time-varying parameter[J]. CATENA, 2021, 206: 105557.
- [13] ZHAO Guangju, TIAN Peng, MU Xingmin, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014,519:387-398.
- [14] 陆中桂,康哲,李巍,等. 水量水质-生态需水综合视角下黄河流域水稀缺评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 73-81. (LU Zhonggui, KANG Zhe, LI Wei, et al. Water scarcity assessment in the Yellow River Basin from comprehensive perspective of water quantity-water quality-ecology water demand[J]. Water Resources Protection, 2024,40(4): 73-81. (in Chinese))
- [15] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 25-33. (in Chinese))
- [16] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111. (in Chinese))
- [17] DING Yongxia, PENG Shouzhang. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145(1): 79-94.
- [18] DING Yongxia, PENG Shouzhang. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100 [J]. Sustainability, 2020, 12(2): 477.
- [19] PENG Shouzhang, DING Yongxia, LIU Wenzhao, et al. 1km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [20] PENG Shouzhang, DING Yongxia, WEN Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.
- [21] YANG Jie, HUANG Xin. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [22] ZHOU Feng, BO Yan, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(14): 7702-7711.
- [23] HAN Juntao, YANG Yuting, RODERICK M L, et al. Assessing the steady-state assumption in water balance calculation across global catchments[J]. Water Resources Research, 2020, 56(7): e2020WR027392.
- [24] NING Tingting, ZHOU Sha, CHANG Feiyang, et al. Interaction of vegetation, climate and topography on evapotranspiration modelling at different time scales within the Budyko framework [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 59-68.
- [25] FRIEDMAN J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine[J]. Annals of Statistics, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [26] NATEKIN A, KNOLL A. Gradient boosting machines: a tutorial[J]. Frontiers in Neuroinformatics, 2013, 7: 21.
- [27] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [28] LIAW A, WIENER M. Classification and regression by randomForest[J]. R News, 2002, 2-3: 18-22.
- [29] 张姝琪,张洪波,辛琛,等. 水文序列趋势及形态变化的表征方法[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 58-67. (ZHANG Shuqi, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [30] 侯慧敏,马海华,王辉,等. 土地利用变化对石羊河流域径流影响分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(6): 33-36. (HOU Huimin, MA Haihua, WANG Hui, et al. Impact of land use and land cover change on runoff in Shiyanghe River Basin [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(6): 33-36. (in Chinese))
- [31] 李发文,陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 9-17. (in Chinese))
- [32] 王国庆,张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))

(下转第 41 页)

(5):719-731. (in Chinese))

[16] 程涛,黄本胜,邱静,等. 基于洪涝削减效果的海绵措施优化布局研究[J]. 水力发电学报,2021,40(7):32-46. (CHENG Tao, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Optimization of overall layout of sponge city facilities for flooding alleviation effect [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):32-46. (in Chinese))

[17] MACRO K, MATOTT L S, RABIDEAU A, et al. OSTRICH-SWMM:a new multi-objective optimization tool for green infrastructure planning with SWMM [J]. Environmental Modelling & Software,2019,113:42-47.

[18] 徐宗学,李鹏,程涛. 基于海绵城市理念的 LID 措施优化布局:以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):552-562. (XU Zongxue, LI Peng,CHENG Tao. LID optimization layout facilities in sponge city:a case study of Huangtaiqiao catchment in Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20 (3): 552-562. (in Chinese))

[19] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):1-9. (in Chinese))

[20] YERESEME A K, SURENDRA H J, KUNTOJI G. Sustainable integrated urban flood management strategies for planning of smart cities: a review [J]. Sustainable Water Resources Management,2022,8(3):85.

[21] SINGH A, DAWSON D, TRIGG M, et al. A review of modelling methodologies for flood source area (FSA) identification[J]. Natural Hazards, 2021, 107 (2): 1047-1068.

[22] ZHOU Qianqian, FENG Junman, FENG Wan’ en. How does flow connection path and vertical spatial layout of LIDs affect urban runoff?: a new LID construction method based on refined landuse and hydrologic characterization [J]. Journal of Hydrology,2023,623:129809.

[23] 马超,赵凯,齐文超,等. 基于示踪方法的沿海城市内涝

防灾方案研究[J]. 水资源保护,2022,38(1):91-99. (MA Chao,ZHAO Kai,QI Wenchao,et al. Formulation of flood mitigation scheme in coastal cities based on source tracking method[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):91-99. (in Chinese))

[24] VERCROYSSSE K, DAWSON D A, GLENIS V, et al. Developing spatial prioritization criteria for integrated urban flood management based on a source-to-impact flood analysis[J]. Journal of Hydrology,2019,578:124038.

[25] QI Wenchao, MA Chao, XU Hongshi, et al. Low impact development measures spatial arrangement for urban flood mitigation: an exploratory optimal framework based on source tracking[J]. Water Resources Management,2021,35(11):3755-3770.

[26] 李国一,邵薇薇,刘家宏,等. 基于 TELEMAC-2D 模型的济南市洪涝模拟及淹没分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):46-52. (LI Guoyi,SHAO Weiwei,LIU Jiahong,et al. Flood simulation and inundation analysis in Jinan City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection,2024,40(5):46-52. (in Chinese))

[27] QI Wenchao, MA Chao, XU Hongshi, et al. A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies[J]. Natural Hazards,2021,108(1):31-62.

[28] 董新宇,张静慧,袁鹏,等. 基于多目标优化的低影响开发设施布局方法[J]. 环境科学学报,2021,41(7):2933-2941. (DONG Xinyu, ZHANG Jinghui, YUAN Peng, et al. Low impact development practices layout method based on multi-objective optimization [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (7): 2933-2941. (in Chinese))

[29] 李鹏,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1083-1092. (LI Peng,XU Zongxue,ZHAO Gang,et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1083-1092. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-19 编辑:王芳)

(上接第 18 页)

[33] YANG Mingjie, XUE Liangqing, LIU Yuanhong, et al. Runoff response to multiple land-use changes and climate perturbations[J]. Hydrological Processes,2024,38(1):e15072.

[34] DU Bailin, WU Lei, RUAN Bingnan, et al. CMADS and CFSR data-driven SWAT modeling for impacts of climate and land-use change on runoff[J]. Water,2023,15(18):3240.

[35] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1): 1-8. (in Chinese))

[36] JI Guangxing, SONG Huiyun, WEI Hejie, et al. Attribution analysis of climate and anthropic factors on runoff and vegetation changes in the source area of the Yangtze River from 1982 to 2016[J]. Land,2021,10(6):612.

(收稿日期:2024-09-06 编辑:王芳)