

考虑植被根系深度动态变化的 VIC 径流模拟模型

张珂^{1,2,3,4,5}, 戴钰^{1,2}, 刘林鑫^{1,2}, 牛杰帆^{1,2}, 毕可心¹, 李志琳^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210024; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室,
江苏 南京 210024; 5. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了提高干旱半干旱地区植被变化影响下的水文模型模拟精度, 结合植物根系的垂直分布与气候、土壤条件, 提出了基于流域气象和土壤性质等下垫面特征的流域根系平均深度估算方法, 以黄土高原地区无定河流域为例, 构建了考虑植被根系深度动态变化的可变下渗容量 (VIC) 径流模拟模型 (VIC-DR 模型)。将该模型径流模拟结果与有汇流演算的 VIC 模型 (VIC-R 模型) 结果进行比较。结果表明: 与 VIC-R 模型相比, VIC-DR 模型模拟精度显著提高, VIC-DR 模型对无定河流域月尺度、日尺度径流量模拟结果的纳什效率系数分别提高了 10.6% 和 8.7%, 相对误差分别下降了 15.4% 和 5.1%, 与实测值相关系数均大于 0.6; VIC-DR 模型的模拟结果符合流域实际情况, 模型适用性良好。

关键词: VIC 模型; 动态植被根系参数; 径流模拟; 无定河流域

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)03-0028-07

VIC model for runoff simulation considering dynamic changes of vegetation root depth//ZHANG Ke^{1,2,3,4,5}, DAI Yu^{1,2}, LIU Linxin^{1,2}, NIU Jiefan^{1,2}, BI Kexin¹, LI Zhilin^{1,2} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210024, China; 5. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the simulation accuracy of the hydrological model under the influence of vegetation change in arid and semi-arid areas, combining with the vertical distribution of plant roots and climate and soil conditions, a method for estimating average root depth in a basin based on underlying surface characteristics such as basin meteorology and soil properties was proposed. With the Wuding River Basin in Loess Plateau region used as an example, a variable infiltration capacity (VIC) model for runoff simulation, considering dynamic changes of vegetation root depth, named VIC-DR model, was constructed. The runoff simulation results of the VIC-DR model were compared with those of the original VIC model with the confluence checking computation, named VIC-R model. The results show that, compared with the VIC-R model, the simulation accuracy of the VIC-DR model was significantly improved. The Nash-sutcliffe efficiency coefficient of the monthly and daily runoff simulation results of the VIC-DR model increased by 10.6% and 8.7%, respectively, the relative error decreased by 15.4% and 5.1%, respectively, and the correlation coefficients between the simulated runoff and measured runoff at monthly scale and daily scale were greater than 0.6. The simulation results of the VIC-DR model accord with the actual situation of the basin, and the model has high applicability.

Key words: VIC model; dynamic vegetation root parameters; runoff simulation; Wuding River Basin

径流模拟与预报是流域水资源管理和防洪调度中至关重要的一环^[1], 高精度、快速准确的模拟结果可以缩短防灾减灾决策时间, 提升防灾救灾效率, 大幅度减少灾害损失和人员伤亡。作为实现径流预报的重要工具^[2-4], 水文模型较为精准地刻画了流域

产汇流过程。植被作为下垫面的重要特征之一^[5], 通过改变叶面气孔变化和根系吸水能力直接影响流域蒸腾和土壤渗透过程, 植被根系则可以增强土壤持水能力, 影响潜水蒸发和植物蒸腾过程, 进而影响流域产流。

可变下渗容量模型 (variable infiltration capacity, VIC) 是加州大学伯克利分校、华盛顿大学和普林斯顿大学在 Wood 等思想影响下, 共同研发的网格化空间大尺度分布式水文模型^[6-7]。目前已有一系列考虑植被影响的径流模拟研究, 如 Zhou 等^[8]开展了基于中分辨率成像光谱仪的动态植被参数研究, 发现相比静态植被参数, 使用考虑动态植被参数的 VIC 模型进行模拟, 可以有效改善峰值流量低估现象, 使得径流模拟和蒸散发模拟结果更准确; 陆桂华等^[9]运用多元逐步回归方法分析了 VIC 模型中各水文参数与气候、土壤、植被等下垫面因子之间的关系, 得到了适用于中国南方地区的 VIC 模型水文参数网格化公式; 王慧等^[10]由叶面积指数与植被覆盖指数的不同组合方案获取模型输入所需的最佳动态植被参数, 模拟出一套适用于全国的土壤含水量产品; Fitter^[11]通过一系列实验和野外观察, 量化了根的季节性生长速率以及土壤质地和降水对根构型的影响; Weaver^[12]分别在砂质和黏质土壤中种植星海木兰植株, 结果发现在黏质土壤中星海木兰的根系增殖量大于砂质土壤, 此外, 还观察到不同季节降水积累对根系生长的影响存在明显差异; Sivandran 等^[13]以干旱半干旱地区为研究区域, 探讨了土壤质地对降雨分配和植被生长的影响, 发现该地区植被生长受土壤水分可用性限制。

现有植被变化研究多从地表植被覆盖类型变化角度出发分析地表植被变化对径流的影响, 而忽略了植被根系的作用。现有 VIC 模型中, 其植被参数输入仅考虑土地覆盖类型占比的变化, 默认每种类型植被根区中各层根所占的比例为固定值, 不存在年际变化和空间变化。而实际上, 植被根系受土壤质地、水分、结构乃至流域气候等多种因素影响, 存在时空异质性, 进而影响水文模型模拟精度。在退耕还林、还草、治沟造地等生态工程大背景下, 开展动态植被参数研究具有现实意义, 考虑动态根系的径流模拟能更好地反映流域实际产汇流过程, 提高模型的模拟精度。为此, 本文以黄土高原地区的无定河流域为实例, 构建考虑植被根系深度动态变化的 VIC 径流模拟模型 (VIC-DR 模型), 基于植被根系与气象、土壤属性的关系, 开展植被根系对 VIC 模型径流模拟的影响研究, 以期改进径流模拟提供一种途径。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

无定河位于黄河中游河口镇至龙门区间内, 是黄河的一级支流, 河流全长 491 km。无定河发源于陕西省榆林市定边县白于山北麓, 上由西北向东南

方向, 沿途纳榆溪河、芦河、大理河、淮宁河等支流^[14], 后经白家川水文站往南流经约 30 km, 于清涧县注入黄河, 流域面积约为 3.03 万 km²。本文以白家川水文站 (37°14'N, 110°25'E) 为流域控制出口 (图 1), 选取无定河流域白家川水文站以上区域为研究对象。无定河流域位于黄土高原北部, 地带性强, 地形起伏较大。流域内地貌类型主要以风沙滩区为主, 占比 50% 以上; 黄土丘陵沟壑区次之。流域地处东部季风区与西北干旱半干旱区的过渡地带, 属温带大陆性气候, 气温、降水变化大, 年平均气温为 7.8~9.6℃, 多年平均降水量约为 397 mm。降水季节性、空间差异显著, 呈现出东南部降水多, 西北部降水少, 7—10 月降水量远高于其他月份, 且多为短历时强降水。流域内土质疏松, 土地利用类型多为草地、耕地和未利用地, 植被类型以低矮草类和灌木为主。

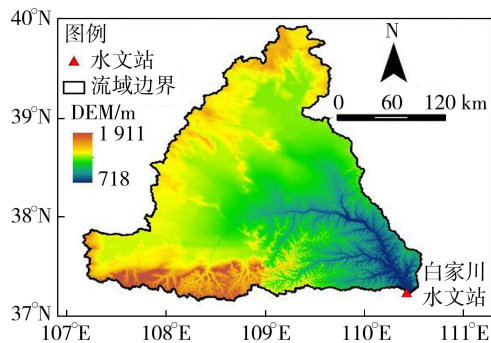


图 1 无定河流域概况

Fig.1 Overview of the Wuding River Basin

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 气象数据

降水、最高气温、最低气温和风速等气象数据资料均来自中国气象数据网 (<https://www.data.cma.cn/>) 的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0), 时间范围为 1980—2016 年, 时间尺度为日尺度。从中选取了无定河流域周边气象站点的数据资料, 采用反距离权重法插值 10 km 网格数据, 并对少量缺失数据进行线性插补。

潜在蒸散发数据选用王亚琴等^[15]制作的《黄河流域上中游地区月尺度 8 km 网格气象数据集 (1980—2015 年)》, 通过双线性插值法获取研究区月尺度 10 km 潜在蒸散发网格数据, 进而求得日平均潜在蒸散发。

1.2.2 下垫面数据

采用的下垫面数据包含高程数据、土壤数据和植被数据。其中, DEM 数字高程数据来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 90 m, 利用 ArcGIS 将数据重采样至 10 km 模型分辨

率,最终得到覆盖无定河流域的网格数为 812 个。DEM 数字高程数据用于获取流域特征,提取流域汇流信息,制备汇流输入文件。

植被数据使用马里兰大学发布的全球 1 km 分辨率土地覆盖类型数据集 (UMD 1km)^[16],依据 UMD 1 km 土地覆盖分类标准将土地覆盖类型分为 14 类,对网格内的植被类型分类统计,计算各类型植被在网格中的面积占比。植被根系在土壤中的深度、叶面积指数、反照率、结构阻抗等植被参数则参考美国陆面数据同化系统 (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/nldas/vegetation-parameters>) 进行标定。

土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 世界土壤数据库 (harmonized world soil database,HWSD) 的土壤数据集 (v1.2),该数据集包含了不同类型的土壤质地、土壤理化性质 (如土壤中砂粒、粉粒、黏粒相对密度、土壤容积等)。从 HWSD 提取无定河流域土壤特征信息后,将其空间分辨率升尺度到 10 km。另一部分土壤数据,包括有效田间持水量、饱和导水率、凋萎含水量等均基于 HWSD 提供的土壤质地数据和美国农业部土壤类型分类标准^[17]确定,参数如表 1 所示。

表 1 土壤参数
Table 1 Soil parameters

土壤类型	单位:cm ³ /cm ³		
	田间持水量	凋萎含水量	有效孔隙率
砂土	0.08	0.03	0.43
粉砂土	0.28	0.08	0.52
砂质壤土	0.21	0.09	0.40
粉砂壤土	0.32	0.12	0.46
壤土	0.29	0.14	0.43
砂质黏壤土	0.27	0.17	0.39
粉砂黏壤土	0.36	0.21	0.48
黏壤土	0.34	0.21	0.46
壤质黏土	0.15	0.06	0.42
砂质黏土	0.31	0.23	0.41
粉砂黏土	0.37	0.25	0.49
黏土	0.36	0.27	0.47

1.2.3 实测流量数据

从水文年鉴、黄河流域水文资料获取白家川水文站实测逐月平均流量和逐日平均流量数据,对模型参数进行率定,并验证模拟结果,数据时间段为 1980—1989 年。

2 研究方法

2.1 有汇流演算的 VIC 模型

VIC 模型考虑了土壤-植被-大气之间的物理过程,实现了对三者水热状态变化和水热传输的综合描述,可同时进行水文循环过程中水量平衡和能量

平衡模拟,也可独立模拟水量平衡。模型在模拟蒸散发过程中全面考虑了植被覆盖层产生的冠层截流、植被蒸腾和裸地蒸发等因素。植被的蒸散发量由该植被的潜在蒸散发、空气动力学阻抗、地表蒸发阻抗和叶面气孔阻抗等计算得到^[18];裸地蒸发则主要基于地形、入渗和土壤特征的影响变化直接计算。在产流计算方面,采用 ARNO 模型描述下层土壤基流的非线性特征^[19-20]以及地表径流和基流两种径流成分的参数化过程;以气象数据为驱动,综合考虑了土壤、地形高程、植被覆盖的空间异质性,将下渗、蒸散发和产流过程网格化;基于 Richards 方程和 Darcy 定律描述土壤水运输及能量变化过程,每个网格都遵循水量平衡和能量平衡。在汇流计算方面,基于 VIC 产流模块输出的地表径流、基流、降水等网格化数据,结合 Lohmann 等^[21-22]开发的独立汇流 Routing 模型模拟流域汇流过程。VIC 模型和 Routing 模型构成了有汇流演算的 VIC 模型 (VIC-R 模型)。

2.2 VIC-DR 模型

植被根系可以通过增强土壤持水能力、截留等影响潜水蒸发、植被蒸腾过程^[23-24],进而影响流域产汇流。现有 VIC 模型植被参数中的根系相关数据主要基于流域土地覆盖类型和来自陆面数据同化系统数据的固定值,忽略了植被根系的空间异质性。为了弥补这一不足,提高 VIC 模型径流模拟精度,本文在现有 VIC 模型计算植被蒸腾过程中引入动态植被根系平均深度参数,构建 VIC-DR 模型,基于植被根系在各层土壤区域内呈线性分布这一假设^[25],根据植被参数中的根系平均深度和不同类型植被在各层土壤中的根系分配比例,模拟计算各土壤层中根系的分布情况,更准确地反映不同植被覆盖情况下流域实际蒸散发情况,进而提高模型模拟精度。

本文采用 Preti 等^[26-28]提出的 RPDM (root profile distribution model),利用水文、土壤学和地上植被信息评估根系剖面。该模型将植物根系的垂直分布与当地气候和土壤条件相联系,已成功应用于意大利中部^[26]、西北部^[27]乃至全球的植被根系研究^[28]中,并被证明是有效评估根系面积和平均深度的方法。

植被根系平均深度指一定范围内所有植物根部离地表面的平均距离,具体计算公式为

$$b = \frac{a}{n(s_{fc} - s_w)(1 - \lambda a/T_p)} \tag{1}$$

式中: b 为植被根系平均深度; a 为生长期平均降雨事件强度^[29],即生长期平均降雨强度与生长期

降雨场次的比值,通过日降水量时间序列计算生长期内的所有降雨事件的强度,计算结果为 1.35 ~ 2.40 mm/场; n 、 s_{fc} 、 s_w 分别为土壤有效孔隙度、田间持水量、凋萎含水量,主要参考美国农业部土壤类型分类标准和 HWSO 提供的土壤质地数据确定^[30]; λ 为降雨发生的频率,即生长期内降雨场次与生长期总天数的比值,本文取值为 0.145 场/d; T_p 为生长期的日平均潜在蒸散发,本文网格取值介于 2.21 ~ 3.35 mm/d。本文设定植被生长期为每年的 3—10 月^[31],不包括植被休眠期(7 月和 8 月)。

2.3 模拟评价指标

SCE-UA(shuffled complex evolution-UA) 自动优化算法可以用于寻找最优解,而人工试错法可以帮助确定合适的参数初值,从而加快算法的收敛速度。为保证模型率定的准确性和模拟效率,本文将 SCE-UA 自动优化算法与人工试错法相结合,率定 VIC 模型参数。先使用人工试错法调整参数的初值,将其作为 SCE-UA 算法的初始解,然后使用 SCE-UA 算法进行优化,使模型输出与实际观测数据之间的误差最小。在 SCE-UA 算法迭代过程中,根据需要适当调整人工试错法所确定的参数初值,以确保算法的收敛效果。

采用纳什效率系数(NSE)、相对误差(RE)、相关系数(r)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)等指标评估径流模拟结果^[32]。其中,NSE 反映模型模拟的整体效果;RE 反映误差的相对大小,适用于非平稳序列的模拟比较; r 是回归模式中反映两个变量相关程度的统计指标,可综合评价模拟结果^[33];RMSE 和 MAE 均侧重于评价序列总体的误差情况,两者一般对评价序列中极大或极小误差反应敏感。

3 结果与分析

3.1 根系平均深度

依据 1980—1989 年无定河流域土壤性质和气象数据,利用 RPDM 反演出流域根系平均深度,结果如图 2 所示,流域根系平均深度为 0.50 ~ 2.23 m,整体根系平均深度约为 1.36 m。受年均降水量少、气温偏低等气候因素影响,无定河流域内多为耐受性较强的灌木和低矮草类。Kleidon^[34] 基于植被以最佳方式适应其环境的假设,应用地表-植被耦合模拟模型,估算得到全球尺度的根系平均深度值,其中,灌木根系平均深度为 0.95 ~ 1.86 m,草地根系平均深度为 0.51 ~ 1 m。据相关研究^[35-36],无定河流域黄土地区草地根系平均深度一般在 0 ~ 1 m、灌木

根系平均深度一般在 1 ~ 2 m,与本文计算结果相近,说明根系计算公式在无定河流域计算结果合理。

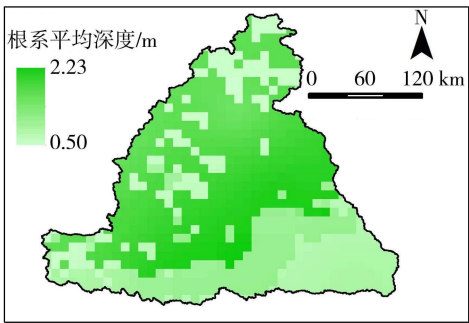


图 2 无定河流域根系平均深度
Fig. 2 Average root depth distribution in the Wuding River Basin

为避免异常值的影响,将反演得到的根系平均深度与同时段流域土壤类型相关联,通过绘制箱形图给出数据离散分布情况,验证反演结果的准确性。如图 3 所示,砂土中植被根系平均深度为 1.50 ~ 2.23 m,远高于其他土壤类型;而黏壤土中植被根系平均深度最小,为 0.59 ~ 0.64 m。李荣磊等^[37] 通过对比试验发现,相较于壤土,砂土中的大孔隙数量多且孔隙连通性密度高,更有利于植被根系生长。从整体看,本文反演的根系平均深度表现为砂土最大,壤土次之,黏土最小,符合前人研究得到的不同土壤类型根系平均深度变化规律。此外,土壤紧实度越低越有利于根系生长,如贾立华等^[38] 研究了不同质地土壤(砂土、壤土、黏土)对花生根系生长、分布的影响,发现砂土有助于根系向深层土壤生长,黏土中根系多为上层分布,壤土对花生根系生长、分布的影响介于黏土和砂土之间。结合图 3 可知,剔除样本数据点偏少的黏壤土,反演得到的根系平均深度由大到小依次为砂土、砂质壤土、壤质砂土、砂质黏壤土、壤土、黏土,符合土壤紧实度对于植物生长的抑制作用,进一步验证了反演结果的合理性。

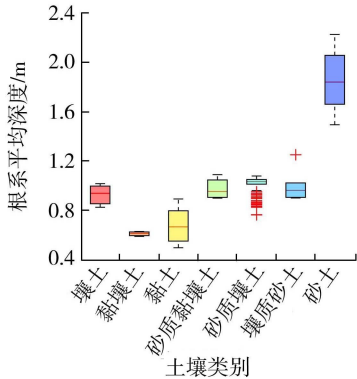


图 3 不同土壤类型根系平均深度
Fig. 3 Average root depth in different soil types

3.2 参数率定

VIC 模型的土壤参数可以分为两部分,一部分与流域土壤性质关系紧密,可以基于刘谦等^[39-40] 研究结果确定;另一部分土壤参数(表 2)则与流域产汇流关系密切,考虑到流域产流的不确定性与复杂程度,这些参数无法直接确定,需要进行模型率定。可变下渗曲线指数 B 越大,下渗水量越小,模拟的洪峰值越大。非线性基流发生时,其流速与最大流速之比 D_s 、基流最大流速 v_{smax} 以及第三层土壤厚度 d_3 对流域产汇流影响相似^[41],这 3 个参数值越大,冬季枯水期的流量越大。土壤含水量与饱和含水量的比例 W_s 越大,土壤含水量越高,降雨更有可能渗入土壤,而不是立即形成地表径流,这种增加的入渗会导致更多的水分被存储在土壤中,进而延迟地表径流的形成和洪峰的出现时间。第二层土壤厚度 d_2 对产流量的影响较为显著, d_2 值越大,蒸散发越大,产流量越小。本文将 SCE-UA 算法与人工试错法结合,基于无定河流域白家川水文站实测数据进行径流模拟(图 4),选用 1980—1981 年为模型预热期,1982—1987 年为模型率定期,1988—1989 年为模型验证期,得到部分土壤参数最优值,如表 2 所示。

3.3 模拟结果比较

从表 3 可以看出,VIC-R 和 VIC-DR 模型的月平均径流模拟精度均优于日平均径流模拟。月尺度模拟方面,VIC-DR 模型相较于 VIC-R 模型,NSE 在率定期和验证期分别提高了 9.7% 和 11.4%;日尺度模拟方面,NSE 在率定期和验证期则分别提高了 13.3% 和 7.7%;RE、MAE 和 RMSE 变化虽不显著,

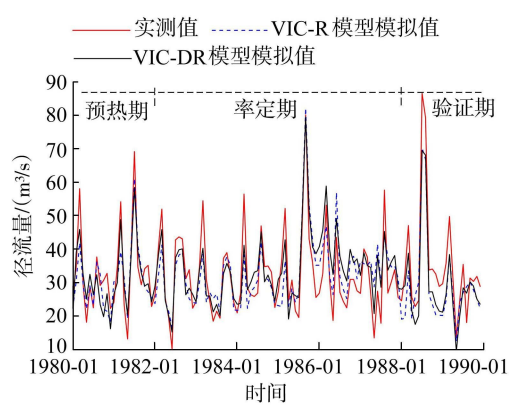


图 4 无定河流域月平均径流量模拟结果
Fig. 4 Average monthly runoff simulation results in the Wuding River Basin

但考虑动态植被根系参数后,均存在减小趋势。图 5 为不同时间尺度下两模型对无定河流域 1980—1989 年径流模拟结果。从图 5 可以看出,两模型对无定河流域整体模拟效果较好,日、月平均径流变化趋势与实测流量变化过程基本一致。相较于 VIC-R 模型,VIC-DR 模型改善了峰值低估现象。从相关系数对日、月尺度两模型径流模拟的检验结果来看,VIC-R、VIC-DR 模型在日、月尺度下的相关系数均高于 0.6,模拟结果符合流域实际情况,模型适用性良好。对比图 5 (a) 和 (b) 模拟结果,VIC-DR 模型模拟的月平均径流量与水文站实测径流量的相关系数提高至 0.86;NSE 提高了 10.6%,RE 下降了 15.4%。对比图 5 (c) 和 (d) 模拟结果,VIC-DR 模型模拟的日平均径流量与水文站实测径流量的相关系数提高到 0.71;NSE 提高了 8.7%,RE 下降了 5.1%。综上所述,VIC-DR 模型相对于 VIC-R 模型适用性更强,且精度有所提高。

表 2 部分土壤参数最优值及其取值范围

Table 2 Optimum values of some soil parameters and their value ranges						
土壤参数	B	D_s	$v_{smax}/(mm/d)$	W_s	d_2/m	d_3/m
取值范围	0.001 ~ 1	0.010 ~ 1	0.1 ~ 30	0.20 ~ 1	0.10 ~ 5	2.00 ~ 30
月尺度最优值	0.096	0.116	5.5	0.60	0.81	1.07
日尺度最优值	0.083	0.102	7.0	0.53	2.60	2.34

表 3 不同阶段径流模拟结果评价

Table 3 Evaluation of runoff simulation results at different stages											
时段	模型	NSE		RE/%		MAE/(m³/s)		RMSE/(m³/s)		r	
		月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度	月尺度	日尺度
预热期	VIC-R	0.68	0.53	6.76	16.26	6.46	13.26	7.26	14.62	0.75	0.71
	VIC-DR	0.71	0.60	5.10	14.86	5.02	10.69	6.69	13.23	0.77	0.73
率定期	VIC-R	0.62	0.45	7.53	17.87	5.89	12.58	7.27	20.58	0.79	0.63
	VIC-DR	0.68	0.51	5.65	16.31	5.44	12.14	6.64	19.51	0.84	0.68
验证期	VIC-R	0.70	0.52	8.18	16.57	7.93	15.19	8.98	22.60	0.93	0.74
	VIC-DR	0.78	0.56	6.68	15.76	6.82	14.92	7.63	22.23	0.96	0.75
1980—1989 年	VIC-R	0.66	0.48	7.12	17.22	6.41	13.24	7.61	19.80	0.82	0.68
	VIC-DR	0.73	0.52	6.04	16.35	5.63	12.41	6.75	18.79	0.86	0.71

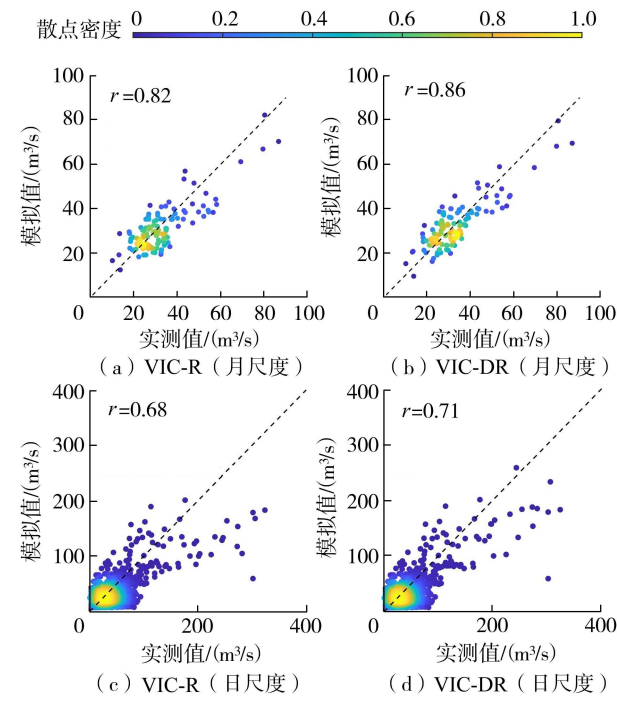


图5 无定河流域 1980—1989 年不同尺度平均径流模拟结果

Fig.5 Simulation results of average runoff on different scales in the Wuding River Basin from 1980 to 1989

4 结 语

本文利用水文、土壤学和地上植被信息评估根系剖面,将植物根系垂直分布与当地气候和土壤条件联系起来,基于无定河流域气象、下垫面等数据反演出无定河流域根系平均深度数据。在 VIC 模型中引入动态植被根系平均深度参数,构建了考虑植被根系深度动态变化的 VIC-DR 模型,并与 VIC-R 模型径流模拟结果进行比较。结果表明,VIC-DR 模型对无定河流域月尺度、日尺度径流量模拟结果的纳什效率系数分别提高了 10.6% 和 8.7%,相对误差分别下降了 15.4% 和 5.1%。VIC-DR 模型改善了峰值低估现象,模型模拟精度显著提高,在径流模拟方面更具优势。

参考文献:

[1] DEY P, MISHRA A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 278-290.

[2] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds [J]. Journal of Hohai

University (Natural Sciences), 2022, 50 (3): 55-64. (in Chinese))

[3] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (1): 13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1): 13-18. (in Chinese))

[4] 霍文博,高源,李致家,等. 改进的 KNN 实时校正方法在山区中小流域的应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (4): 27-32. (HUO Wenbo, GAO Yuan, LI Zhijia, et al. Application of improved KNN real-time correction method in small and medium-sized basins in mountainous areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (4): 27-32. (in Chinese))

[5] LIU Linxin, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Recent seasonal variations in ecosystem water use efficiency in China's key tropical-subtropical transitional zones in response to climate change [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2022, 36 (11): e2022GB007635.

[6] LIANG Xu, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99 (D7): 14415-14428.

[7] FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model [J]. Journal of Hydrology, 1969, 9 (3): 237-258.

[8] ZHOU Suoquan, LIANG Xu, CHEN Jing, et al. An assessment of the VIC-3L hydrological model for the Yangtze River Basin based on remote sensing: a case study of the Baohe River Basin [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30 (5): 840-853.

[9] 陆桂华,张健,吴志勇,等. 中国南方地区 VIC 模型参数网格化公式及效果验证 [J]. 水电能源科学, 2013, 31 (5): 13-17. (LU Guihua, ZHANG Jian, WU Zhiyong, et al. Parameter gridding formulas of VIC model in southern region of China and effect verification [J]. Water Resources and Power, 2013, 31 (5): 13-17. (in Chinese))

[10] 王慧,孙亚勇,黄诗峰,等. LAI 和 FVC 植被参数对 VIC 模型土壤含水量模拟的影响研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16 (2): 141-148. (WANG Hui, SUN Yayong, HUANG Shifeng, et al. Study on the effects of vegetation parameters LAI and FVC on soil water content simulation using VIC model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16 (2): 141-148. (in Chinese))

[11] FITTER A H. Spatial and temporal patterns of root activity in a species-rich alluvial grassland [J]. Oecologia, 1986, 69 (4): 594-599.

- [12] WEAVER J E. Root development of field crops[M]. New York:McGraw-Hill,1926.
- [13] SIVANDRAN G,BRAS R L. Dynamic root distributions in ecohydrological modeling:a case study at Walnut Gulch Experimental Watershed[J]. Water Resources Research, 2013,49(6):3292-3305.
- [14] 王增发. 中小流域水资源可持续开发利用规划的理论
与模型研究:无定河流域水资源可持续开发利用规划
实例[D]. 西安:西安理工大学,2001.
- [15] 王亚琴,孙林,李洪宇,等. 黄河流域上中游地区月度 8-
km 网格气象数据集(1980—2015)[J]. 全球变化数据
学报(中英文),2022,6(1):25-36. (WANG Yaqin,SUN
Lin,LI Hongyu,et al. Monthly/8-km grid meteorological
dataset at the middle and upper reaches of the Yellow
River Basin of China(1980-2015)[J]. Journal of Global
Change Data & Discovery, 2022, 6 (1): 25-36. (in
Chinese))
- [16] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology [M]. New
York:McGraw-Hill,1993.
- [17] 袁飞. 考虑植被影响的水文过程模拟研究[D]. 南京:
河海大学,2006.
- [18] 李致家,张珂,王栋,等. 现代水文模拟与预报技术
[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2021.
- [19] TODINI E. The ARNO rainfall-runoff model[J]. Journal of
Hydrology,1996,175(1/2/3/4):339-382.
- [20] FRANCHINI M, PACCIANI M. Comparative analysis of
several conceptual rainfall-runoff models [J]. Journal of
Hydrology,1991,122(12131):161-219.
- [21] LOHMANN D, NOLTE-HOLUBE R, RASCHKE E. A
large-scale horizontal routing model to be coupled to land
surface parametrization schemes [J]. Tellus A,1996,48
(5):708-721.
- [22] LOHMANN D,RASCHKE E,NIJSEN B,et al. Regional
scale hydrology: I. formulation of the VIC-2L model
coupled to a routing model [J]. Hydrological Sciences
Journal,1998,43(1):131-141.
- [23] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率
对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护,2023,39
(4):32-41. (XUE Lianqing,XIAO Ying,LIU Yuanhong,
et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation
water use efficiency to drought in the Yellow River Basin
[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):32-41. (in
Chinese))
- [24] 左德鹏,韩煜娜,徐宗学,等. 气候变化对雅鲁藏布江流
域植被动态的影响机制[J]. 水资源保护,2022,38
(6):1-8. (ZUO Depeng,HAN Yu' na,XU Zongxue,et
al. Impact mechanism of climate change on vegetation
dynamics in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Water
Resources Protection,2022,38(6):1-8. (in Chinese))
- [25] 陈亮. 基于区域气候模式和 VIC 模型的黑河流域陆气
相互作用研究[D]. 兰州:兰州大学,2011.
- [26] PRETI F, DANI A, LAIO F. Root profile assessment by
means of hydrological, pedological and above-ground
vegetation information for bio-engineering purposes [J].
Ecological Engineering,2010,36(3):305-316.
- [27] GONZALEZ-OLLAURI A, HUDEK C, MICKOVSKI S B,
et al. Describing the vertical root distribution of alpine
plants with simple climate, soil, and plant attributes [J].
CATENA,2021,203:105305.
- [28] YANG Yuting, DONOHUE R J, MCVICAR T R. Global
estimation of effective plant rooting depth:implications for
hydrological modeling [J]. Water Resources Research,
2016,52(10):8260-8276.
- [29] WEEDON G P, BALSAMO G, BELLOUIN N, et al. The
WFDEI meteorological forcing data set; WATCH forcing
data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data
[J]. Water Resources Research, 2014, 50 (9): 7505-
7514.
- [30] SAXTON K E, RAWLSW J. Soil water characteristic
estimates by texture and organic matter for hydrologic
solutions [J]. Soil Science Society of America Journal,
2006,70(5):1569-1578.
- [31] 朱光磊. 嫩江流域植被动态变化及其对气象干旱的响
应研究[D]. 延吉:延边大学,2021.
- [32] 何涯舟,张珂,晁丽君,等. 基于多源遥感土壤湿度与模
型数据同化的流域径流模拟[J]. 水资源保护,2023,39
(2):145-151. (HE Yazhou,ZHANG Ke,CHAO Lijun,et
al. Watershed runoff simulation based on multi-source
remotely sensed soil moisture and data assimilation [J].
Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 145-151. (in
Chinese))
- [33] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干
旱半湿润区的应用对比 [J]. 水资源保护, 2021, 37
(1):28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al.
Comparison of artificial intelligence flood forecasting
models in China's semi-arid and semi-humid regions [J].
Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 28-35. (in
Chinese))
- [34] KLEIDON A. Global datasets of rooting zone depth
inferred from inverse methods [J]. Journal of Climate,
2004,17(13):2714-2722.
- [35] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等. 基于遥感的黄土高原林草
植被变化对河川径流的影响分析 [J]. 地理学报, 2014,
69(11):1595-1603. (LIU Xiaoyan, LIU Changming,
YANG Shengtian, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor
vegetation coverage on the runoff based on the remote
sensing data in Loess Plateau [J]. Acta Geographica
Sinica,2014,69(11):1595-1603. (in Chinese))
- [36] 王双明,黄庆享,范立民,等. 生态脆弱区煤炭开发与生
态水位保护 [M]. 北京:科学出版社,2010.

(下转第 51 页)

Chinese))

[21] 王光谦,王思远,陈志祥. 黄河流域的土地利用和土地覆盖变化[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(9):1218-1222. (WANG Guangqian, WANG Siyuan, CHEN Zhixiang. Land-use land-cover changes in the Yellow River Basin [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Sciences), 2004, 44 (9): 1218-1222. (in Chinese))

[22] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in source region of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 1-7. (in Chinese))

[23] LOU Dan, WANG Guojie, SHAN Chan, et al. Changes of soil moisture from multiple sources during 1988-2010 in the Yellow River Basin, China [J]. Advances in Meteorology, 2018, 2018:1950529.

[24] 王力,卫三平,张青峰,等. 榆神府矿区土壤-植被-大气系统中水分的稳定性同位素特征[J]. 煤炭学报,2010,35(8):1347-1353. (WANG Li, WEI Sanping, ZHANG Qingfeng, et al. Isotopic characteristics of water within the soil-vegetation-atmosphere system in the Yushenfu mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35 (8): 1347-1353. (in Chinese))

[25] ZHENG Chaolei, JIA Li, ZHAO Tianjie. A 21-year dataset (2000-2020) of gap-free global daily surface soil moisture at 1-km grid resolution[J]. Scientific Data, 2023, 10(1):139.

[26] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.

[27] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13 (3): 245-259.

[28] LIU F T, TING K M, ZHOU Zhihua. Isolation forest [C] // Proceedings of 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. Pisa: IEEE, 2008: 413-422.

[29] BHASKARAN K, DOS-SANTOS-SILVA I, LEON D A, et al. Association of BMI with overall and cause-specific mortality: a population-based cohort study of 3.6 million adults in the UK [J]. The Lancet Diabetes & Endocrinology, 2018, 6 (12): 944-953.

[30] LI Delong, CAO Wenfang, DOU Yuehan, et al. Non-linear effects of natural and anthropogenic drivers on ecosystem services: integrating thresholds into conservation planning [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 116047.

[31] FENG Xiaoming, FU Bojie, PIAO Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6 (11): 1019-1022.

[32] LI Congcong, ZHANG Yongqiang, SHEN Yanjun, et al. LUCC-driven changes in gross primary production and actual evapotranspiration in northern China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125 (6): e2019JD031705.

[33] MUELLER K E, TILMAN D, FORNARA D A, et al. Root depth distribution and the diversity-productivity relationship in a long-term grassland experiment [J]. Ecology, 2013, 94 (4): 787-793.

[34] MENG Tingting, SUN Pei. Variations of deep soil moisture under different vegetation restoration types in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. Scientific Reports, 2023, 13 (1): 4957.

[35] GRUBB P J. Trade-offs in interspecific comparisons in plant ecology and how plants overcome proposed constraints [J]. Plant Ecology & Diversity, 2016, 9 (1): 3-33.

[36] MUNSON S M, BRADFORD J B, HULTINE K R. An integrative ecological drought framework to span plant stress to ecosystem transformation [J]. Ecosystems, 2021, 24 (4): 739-754.

(收稿日期: 2023 - 09 - 20 编辑: 施业)

+++++

(上接第 34 页)

[37] 李荣磊, 陈留美, 邵明安, 等. 黄土高原不同土质和植被类型下 Cl^- 运移特征及影响因素 [J]. 土壤学报, 2021, 58 (5): 1190-1201. (LI Ronglei, CHEN Liumei, SHAO Ming'an, et al. Cl^- transport and its influencing factors in soil as affected by soil texture and vegetation cover in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (5): 1190-1201. (in Chinese))

[38] 贾立华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响 [J]. 植物生态学报, 2013, 37 (7): 684-690. (JIA Lihua, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al. Effects of different soil textures on the growth and distribution of root system and yield in peanut [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37 (7): 684-690. (in Chinese))

[39] 刘谦. VIC 大尺度陆面水文模型在中国区域的应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004.

[40] 李秀清. 基于 VIC 模型的丹江流域水文模拟及水资源管理对策 [D]. 西安: 西北大学, 2021.

[41] 陈思. VIC 大尺度陆面水文模型在永定河流域的应用研究 [D]. 中国地质大学(北京), 2018.

(收稿日期: 2023 - 11 - 22 编辑: 施业)