

典型喀斯特流域介质结构的降雨—径流机制研究

——以黔中地区为例

杨树平¹, 贺中华^{1,2,3}, 王茂强¹, 潘 杉¹, 陈莉会¹, 谭红梅¹, 顾小林⁴, 许明金⁴

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001; 4. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550000)

摘 要: [目的] 探究喀斯特流域介质结构的降雨—径流机制, 为合理利用黔中地区水资源及防洪防旱等方面提供理论参考。[方法] 选黔中 20 个典型流域为研究样区, 分析流域降雨、径流时空分布特征, 利用支持向量回归 (SVR) 开展多尺度降雨—径流模拟, 采用 Spearman 方法分析流域介质结构的降雨—径流机制。[结果] (1) 黔中 1979—2021 年降雨呈缓慢上升趋势 (5.02 mm/a), 径流呈缓慢下降趋势 ($-0.17 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$), 两者在空间上总体分布不均匀; (2) 通过径向基核函数 (RBF) 训练的 SVR 相对准确, 模拟精度: 秋季 > 冬季 > 春季 > 全年 > 夏季; (3) 单因素单因子影响: 非喀斯特 (0.764) > 低活性强酸土 (0.566) > 峰林地貌型 (0.459) > 草丛 (0.456) > 连续性白云岩喀斯特 (-0.435) > 栽培植被 (-0.426); (4) 单因素耦合影响: 土层覆盖结构 (0.714) > 地貌组合结构 (-0.529) > 岩石组成结构 (-0.446) > 植被分布结构 (0.323), 多因素耦合影响: 234 (-0.702) > 1234 (-0.679) > 23 (0.607) > 34 (-0.604) > 24 (-0.547) > 134 (-0.544) > 13 (0.507)。[结论] SVR 适用于黔中地区降雨—径流过程的模拟, 流域介质结构对降雨—径流影响较大。

关键词: 流域介质结构; 支持向量回归 (SVR); 降雨—径流机制

中图分类号: P429

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0049-12

Study on the Rainfall and Runoff Mechanism of Media Structure in Typical Karst Basin —Taking the Central Guizhou Region as An Example

Yang Shuping¹, He Zhonghua^{1,2,3}, Wang Maoqiang¹, Pan Shan¹,
Chen Lihui¹, Tan Hongmei¹, Gu Xiaolin⁴, Xu Mingjin⁴

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. National Karst Rock Desertification Prevention Engineering Technology Research Center, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3. Key Laboratory of Remote Sensing Application for Mountain Resources and Environment, Guizhou Province, Guiyang 550001, China; 4. Bureau of Hydrology and Water Resources, Guizhou Province, Guiyang 550000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the rainfall-runoff mechanism in the medium structure of karst basin, and to provide theoretical references for the rational utilization of water resources and flood and drought prevention in the Central Guizhou region. [Methods] 20 typical watersheds in the central Guizhou were selected as the study sample areas, the spatial and temporal distribution characteristics of rainfall and runoff in the watersheds were analyzed, multi-scale rainfall-runoff simulation by using Support Vector Regression (SVR) was carried out, and the rainfall-runoff mechanism of the watershed media structure was analyzed by using Spearman's method. [Results] (1) Rainfall in the Central Guizhou from

收稿日期: 2023-06-06

修回日期: 2023-07-14

资助项目: 贵州省水利厅自然科学基金项目 (KT202237); 贵州省自然科学基金项目 (黔科合基础-ZK[2023]重点 028); 国家自然科学基金项目 (u1612441, 41471032)

第一作者: 杨树平 (1999—), 女, 贵州岑巩人, 硕士, 研究方向为喀斯特水文水资源与遥感。E-mail: 2773207721@qq.com

通信作者: 贺中华 (1976—), 男, 贵州兴义人, 博士, 教授, 博导, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: hezhonghua7621@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

1979 to 2021 showed a slowly increasing trend (5.02 mm/a) and runoff showed a slowly decreasing trend (-0.017 billion m^3/a), and both of them unevenly distributed in the space in general. (2) SVR trained by radial basis kernel function (RBF) was relatively accurate, and simulation accuracy decreased in the order: fall > winter > spring > year-round > summer. (3) The single-factor single factor effects decreased in the order: non-karst (0.764) > low activity strong acidic soil (0.566) > peak forest geomorphic type (0.459) > grassland (0.456) > continuity dolomite karst (-0.435) > cultivated vegetation (-0.426). (4) Single-factor coupled effects decreased in the order: soil cover structure (0.714) > geomorphic combination structure (-0.529) > rock composition structure (-0.446) > vegetation distribution structure (0.323), and multi-factor coupling influence decreased in the order: 234 (-0.702) > 1234 (-0.679) > 23 (0.607) > 34 (-0.604) > 24 (-0.547) > 134 (-0.544) > 13 (0.507). [Conclusion] SVR is suitable for the simulation of rainfall-runoff process in the central Guizhou region, and the structure of watershed media has a large influence on rainfall-runoff.

Keywords: watershed media structure; support vector regression (SVR); rainfall-runoff regime

近年来,气候变化与人类活动导致水文循环过程发生急剧变化,对社会水资源安全构成了威胁,也对未来水文循环演变带来了极大的不确定性^[1],而降雨—径流在水文循环中起到不可替代的作用。降雨—径流指降雨水分从大气降落到地表,经过地表流动进入河流、湖泊、湿地或地下水系统的过程,它描述水分的运动和转移路径,包括“降雨—地表—产流—汇流”全过程^[2],形成过程受降雨量、降雨强度、下垫面介质和结构及人类活动等因素的影响^[3]。与非喀斯特地区相比,喀斯特地区在流域介质结构等方面有明显的不同,这对降雨—径流过程产生了极大的影响^[2]。喀斯特流域介质结构是指喀斯特流域的物质组成,是流域形态结构的填充物,与流域形态结构一起综合反映了流域结构,影响喀斯特流域产汇流机制,使得降雨—径流分配不均,从而易导致极端水文事件的发生,比如干旱和洪涝等灾害,对人类生命财产造成了很大的威胁^[4]。因此,分析降雨—径流过程,厘清流域介质结构对降雨—径流的响应特征,为在变化环境下合理利用水资源及防洪防旱等方面提供理论基础。

越来越多的学者开始关注降雨—径流过程模拟预测,其中支持向量机方法在降雨—径流模拟中得到了广泛应用,较好解决了降雨—径流非线性关系的难题^[5],例如 Wu MC 等^[6]以台湾中西部流域为例,在全球变暖背景下利用自组织映射提取的数据改进支持向量回归对径流进行预测,预测效果比较好;Wu J 等^[7]利用支持向量回归模型对小流域山洪进行预测,预测效果很好;姜成玉^[8]利用支持向量回归(SVR)模型与季节 ARIMA 模型进行比较,证实 SVR 模型预测的结果更加准确;张兰影等^[9]研究表明基于支持向量机的石羊河流域径流模拟适用性评价,可用于该流域的中长期预报。与此同时,已有学者就关于喀斯特地区流域介质结构与水文关系进行了分析讨论,如贺中华等^[10]在喀斯特地区从土壤

系统结构的角,分析了土壤单因子、单因子双因子耦合及多因素耦合与径流深的相关性,揭示了流域水文干旱的驱动机制,紧接着^[11]分析了喀斯特地貌空间配置对洪水资源化的影响,最后^[12]又分析了岩性类型及其结构对流域水文干旱的影响;Dai 等^[13]认为喀斯特径流受到地下孔隙裂隙和基岩裸露的影响;Kan 等^[14]研究了在喀斯特地区植被类型影响水资源配置。

以上大部分研究要么是利用支持向量机模拟了降雨—径流过程,要么是基于单个流域介质结构与水文关系进行分析讨论,然而很少有学者关注在喀斯特地区展开基于支持向量机的多尺度降雨—径流模拟,并分析多个流域介质结构耦合与降雨—径流的关系。单个流域介质结构的研究结果并不能全面解释流域介质结构对降雨—径流的影响,自然界各流域介质结构之间是相互影响的,特别是喀斯特岩层透水性强、土层稀薄且坡度起伏大^[15]的区域,因此降雨—径流可能受到流域介质结构的耦合影响。

黔中地区是贵州省政治、经济、文化、交通中心,是贵州省城市最密集、交通最发达、工业基础最好、人口最集中、耕地资源集中成片的地区,是贵州省经济社会发展核心地区和最为基础、最具发展潜力的地区,区位优势突出,在贵州省占有举足轻重的地位。随着气候变暖及人类频繁活动,导致降雨—径流关系发生变化,加上喀斯特降雨分布不均、地形地貌的复杂,导致气象灾害发生频繁,对该区域造成了极大的经济损失。因此,本研究以黔中地区为研究对象,选择 20 个典型喀斯特流域为研究样区,使用一元线性回归分析及反距离加权法(IDW)分析不同尺度下流域降雨、径流的演变特征,采用支持向量回归(SVR)模型分别从年尺度和季尺度对降雨—径流过程进行模拟,最后利用 Spearman 相关分析方法分析流域介质结构(单因素单因子、单因素耦合及多因素耦合)与年降雨—径流的关系,从而揭示

流域介质结构的降雨—径流机制研究,旨在更好地为流域防洪减灾和水资源综合管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔中地区位于贵州省中西部(25°—27°N,104°—107°E),是贵州省政治、经济、文化、交通中心,区域面积约 5.38 万 km²,占全省总面积的 31%,以贵阳、安顺为中心,区域范围涉及六盘水市、毕节市、贵阳市、安顺市和黔南州 5 个市(州、地),黔中地区行政范围见图 1。黔中地区位于长江流域与珠江流域交界处,水资源十分丰

富,环境优美,气候类型为亚热带季风气候,气候温和,冬暖夏凉,四季分明;流域降雨充沛、时空分布不均,多年年均降雨 600~1 700 mm,气候条件适宜,动植物资源丰富^[16]。该区大部分地区属于喀斯特丘陵地貌,地形呈现西高东低,局部起伏较大,地形比较复杂,岩溶发育强烈,白云岩及灰岩分布较广,地下水系丰富,使得该区域地表保水、蓄水能力差,水资源利用难度大^[17]。复杂的喀斯特地貌、气候变化下的降雨—径流时空分布不均,使得研究区洪涝干旱灾害频繁发生,对人类合理利用水资源造成威胁,因此探究该区流域介质结构对降雨—径流的影响至关重要。

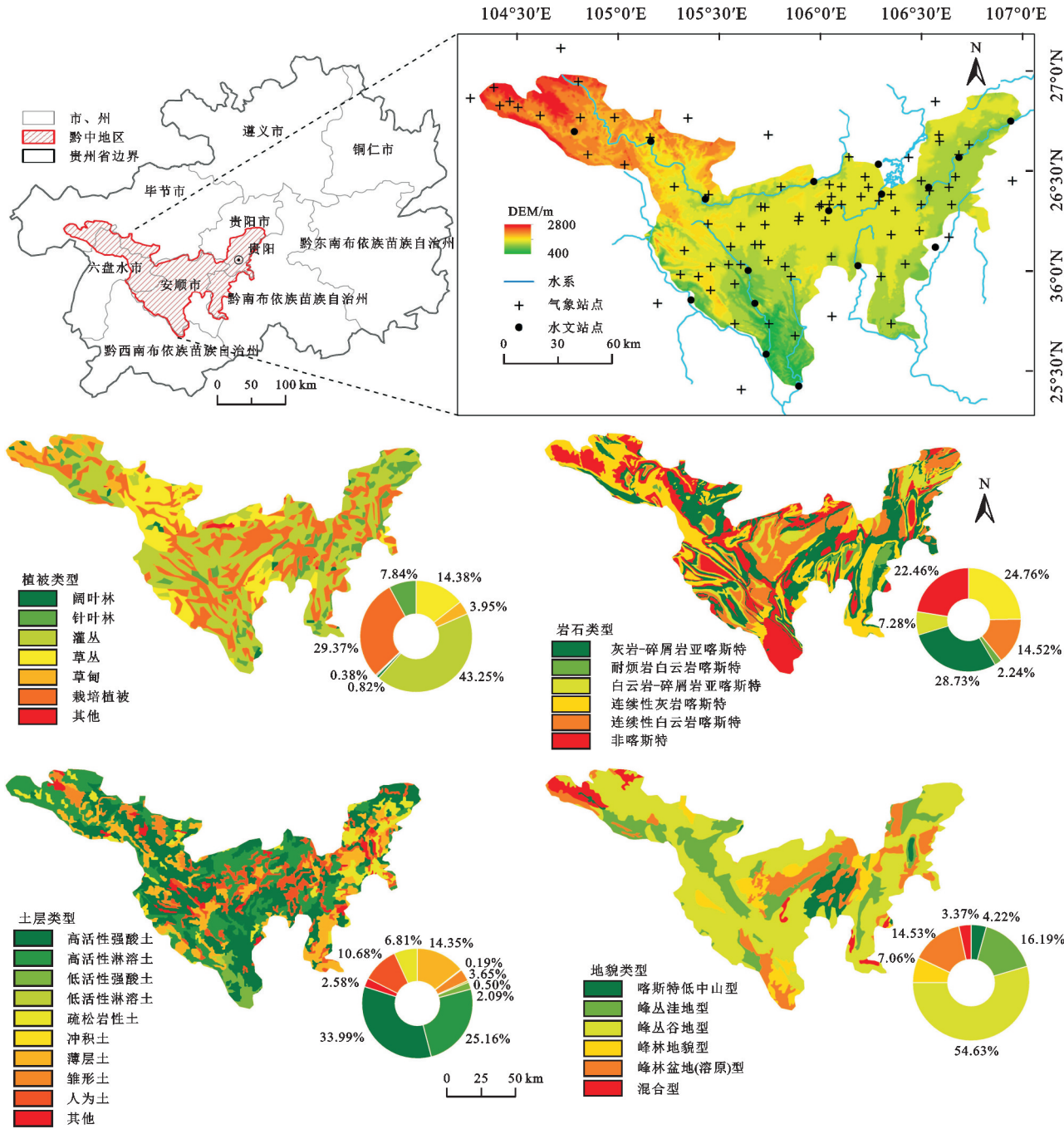


图 1 黔中地区概况

Fig. 1 Overview of the Central Guizhou Region

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 气象及水文数据 本文收集了区域 81 个气象站点和 17 个水文站点的逐月降雨、径流数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的黔中地区站点数据资料,时间跨度为 1978 年 12 月—2022 年 2 月,长达 43 a。本文通过算术平均法计算 5 个时间尺度上的降雨、径流数据,针对个别站点数据缺失情况,通过同站点同时期临近时段数据的均值进行填补解决^[18]。黔中地区气象站点和水文站点分布见图 1。

1.2.2 基础数据 本文收集贵州 2010 年水系,来源于贵州省水文水资源局(<http://gzswj.guizhou.gov.cn/>),流域介质结构(植被类型、岩石类型、土壤类型及地貌类型)数据来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),贵州省数字高程数据(DEM)来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),最后利用 ArcGIS 中裁剪和掩膜提取工具获得区内试验数据。

1.3 研究方法

1.3.1 Spearman 相关分析 为了消除数据量级之间的差异,首先对数据进行规范化处理,本文采用归一化方法,把各因子均一化到 $[0 \sim 1]$ 。Spearman 相关分析是衡量两个变量依赖性的非参数指标,能够分析客观事物之间关系,通过相关系数精确反映两个变量之间线性相关的强弱程度,其相关系数 ρ 取值范围为 $[-1, 1]$,绝对值越大,相关性越强,反之,相关性越弱;如果两个变量的趋势在同一方向上减少(或增加),则 ρ 为正;如果一个变量有增加(减少)的趋势,而另一个变量则有减少(增加)的趋势,则 ρ 为负;本文使用该方法主要用于研究流域介质结构和降雨—径流过程之间的相关性,进而分析介质结构对降雨—径流过程的驱动机制。对于样本容量为 n 的样本, n 个原始数据被转换成等级数据,相关系数 ρ 为^[19]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: ρ 为 Spearman 相关系数; X_i 为第 i 个 X 变量; Y_i 为第 i 个 Y 变量; \bar{X} 和 \bar{Y} 为 X 和 Y 变量均值; n 为样本数。

1.3.2 主成分分析(PCA) 欲分析流域介质结构单因素耦合及多因素(即两因素、三因素及四因素)耦合对降雨—径流的驱动机制,需要对单因素单因子进行耦合处理,最终耦合得到单、多因素,这样的耦合过程本文采用主成分分析(PCA);它利用“降维”思想将多

个变量转换成少数综合变量,这可以消除多变量之间的信息冗余,并且可以尽可能完整保留原始变量的信息,同时彼此不相关,以达到简化数据的目的^[20]。

1.3.3 支持向量回归(SVR)模型

(1) 模型基本原理。支持向量回归(SVR)是一种用于回归的支持向量机(SVM)模型,其基本思想是通过结构风险最小化原理进行训练,使用非线性映射函数将 SVR 的输入映射到高维特征空间中^[6],使得在高维数据特征空间中自变量与因变量具有很好的线性回归特征,在该特征空间进行拟合后再返回到原始空间。因此本文使用该方法对流域降雨—径流过程进行模拟研究,基本原理如下^[21]:

对于给定的样本数据集 $\{(x_i, y_i) | i=1, 2, 3, \dots, k\}$,其中 x_i 和 y_i 分别是输入向量和相应的输出目标值,回归函数 $f(x)$ 可以近似表示,以描述输入和输出之间的非线性关系。SVR 模型的决策函数可以写成:

$$f(x) = [\omega, \varphi(x)] + b, \omega \in R^n, b \in R^n \quad (2)$$

式中: x 是模型输入变量向量; ω 和 b 是函数的参数向量; $\varphi(x)$ 是一个非线性映射函数。因此,SVR 算法的目标变成找到最优 ω 、 b 和 $\varphi(x)$ 的一些内部参数。SVR 算法的最优解可以通过求解以下优化问题来获得:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + c \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s.t.} \begin{cases} y_i - [\omega, \varphi(x)] \leq b + \xi_i + \epsilon \\ [\omega, \varphi(x)] - y_i \leq -b + \xi_i^* + \epsilon \\ \xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0, i=1, 2, 3, \dots, l \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ξ_i, ξ_i^* 是测量 ϵ 管上下训练误差的松弛变量; c 是惩罚系数,它决定了训练误差发生时惩罚损失的程度; ϵ 为不敏感损失函数, b 为超平面偏移量。最终非线性 SVR 的决策函数可以表示为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) k(x_i, x) + b \quad (4)$$

式中: α_i^* 和 α_i 是为了考虑拟合误差而引入的非负松弛变量,表示在误差 ϵ 约束下训练误差的上限和下限。 $k(x_i, x)$ 为核函数,常见的核函数有:Linear 核(线性核)、Poly 核(多项式核)、RBF 核(径向基核)和 Sigmoid 核。已有研究表明,径向基核函数训练出的模型比其他核函数训练出的模型具有更优的适应性^[8],本文选用径向基核函数(RBF),公式如下:

$$k(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x - x_i\|^2), \gamma > 0 \quad (5)$$

式中: γ 为核参数。

(2) 模型验证理论。在本研究中,为了全面评估模型的预测效果,使用了两个主要标准来衡量模型的

预测性能,分别是纳什效率系数(NSE)和平均绝对误差(MAE)。纳什效率系数(NSE)常用于衡量模型模拟量与观测量的拟合度,是专门用于评估水文模型预测能力的系数, $NSE=1$,说明模型模拟值与观测值正好吻合; $NSE=0$,说明模型模拟值与观测值平均值吻合; $NSE<0$,说明剩余方差大于数据方差,一般而言, NSE 在 $(0,1)$ 范围内的模型是可行的,模拟结果总体可信,否则通常认为该应用模型不可行。平均绝对误差(MAE)反映绝对误差的平均值,能反映预测值误差的实际情况,取值越小,模型准确度越高^[5]。

2 结果与分析

2.1 黔中地区流域降雨、径流时空演变特征

本文采用一元线性回归对降雨、径流年变化和季节变化进行趋势分析(图 2),利用反距离加权法(IDW)分析其时空分布特征(图 3)。

从年尺度看(图 2A),1979—2021 年黔中地区年均降雨量为 1 107.81 mm、整体呈缓慢上升趋势(5.02 mm/a),年均径流量为 28.02 亿 m^3 ,呈缓慢下降趋势($-0.17\text{ 亿 m}^3/\text{a}$)。其中,1979—2011 年降雨与径流总体呈下降趋势、2011—2021 年呈上升趋势;尤其,2020 年降雨量最大(1 555.40 mm),1989 年最小(754.13 mm),1983 年径流量最大(39.95 亿 m^3),2011 年最小(14.48 亿 m^3),说明年尺度上降雨是径流的主要补给来源^[22]。从季尺度(图 2B,C),年均降雨量从大到小为:夏季(576.39 mm) $>$ 春季(252.51 mm) $>$ 秋季(220.62 mm) $>$ 冬季(57.98 mm),年均径流量:夏季(13.54 亿 m^3) $>$ 秋季(6.41 亿 m^3) $>$ 春季(5.44 亿 m^3) $>$ 冬季(2.57 亿 m^3),说明季尺度上径流深受降雨影响,也受流域径流调节的作用^[23]。

1979—2021 年黔中地区降雨量总体西高东低,径流量呈现西南向东北递减,最大(最小)降雨量分布在中西部(西部),最大径流量呈现于南部及西南部(图 3A,F),说明年尺度降雨与径流空间分布比较一致。从图 3C,D,H,I 可知,夏秋两季降雨、径流总体东部高于西部,说明在夏秋径流受降雨的影响较大,表明喀斯特地区在夏秋径流受降雨影响较大,流域径流调节相对较弱。春冬两季降雨自西向东逐渐增加、径流逐渐减少(图 3B,E,G,J),表明喀斯特地区在春冬径流受降雨影响较小,径流补给主要来源于流域储水量。这可能归因于喀斯特流域可溶性岩石在可溶性水差异侵蚀或溶蚀作用下形成大小不同的溶隙或裂隙,为大气降水在流域地表或地下滞流提供了空间

或场所增强流域径流调节能力^[11]。黔中西部山脉较高、东部丘陵较低,地形呈西高东低分布(图 1),说明降雨与地形分布有关,尤其是春冬两季降雨自西向东降雨逐渐增多,与地形分布较为一致^[24]。

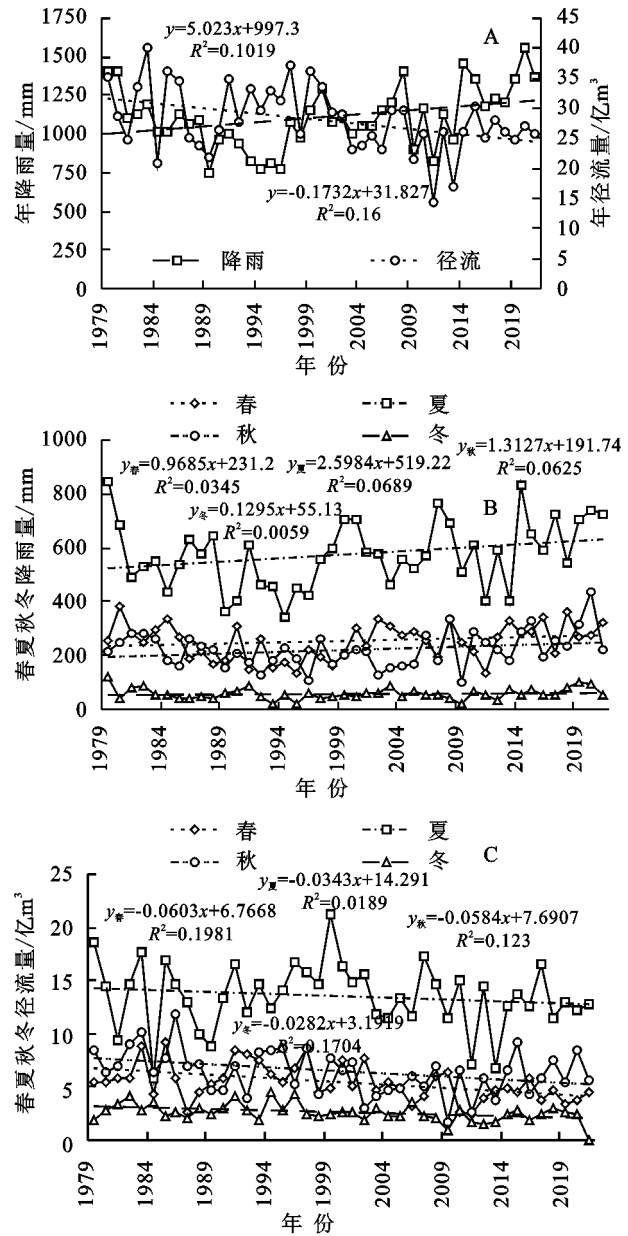


图 2 黔中地区 1979—2021 年降雨、径流趋势
Fig. 2 Line chart of rainfall and runoff trends in the central Guizhou region from 1979 to 2021

2.2 黔中地区降雨—径流序列的模拟分析

2.2.1 基于支持向量回归(SVR)的降雨—径流过程模拟 本文以降雨为输入、径流作为输出,采用 SVR 对降雨—径流过程进行模拟(图 4)。模型采用的核函数为径向基核函数,设置核函数最高项次数为 3 次,通过 MATLAB 软件不断的训练测试,分别得到流域不同时间尺度下基于遗传算法(GA)的 SVM 模型参数结果(表 1)。

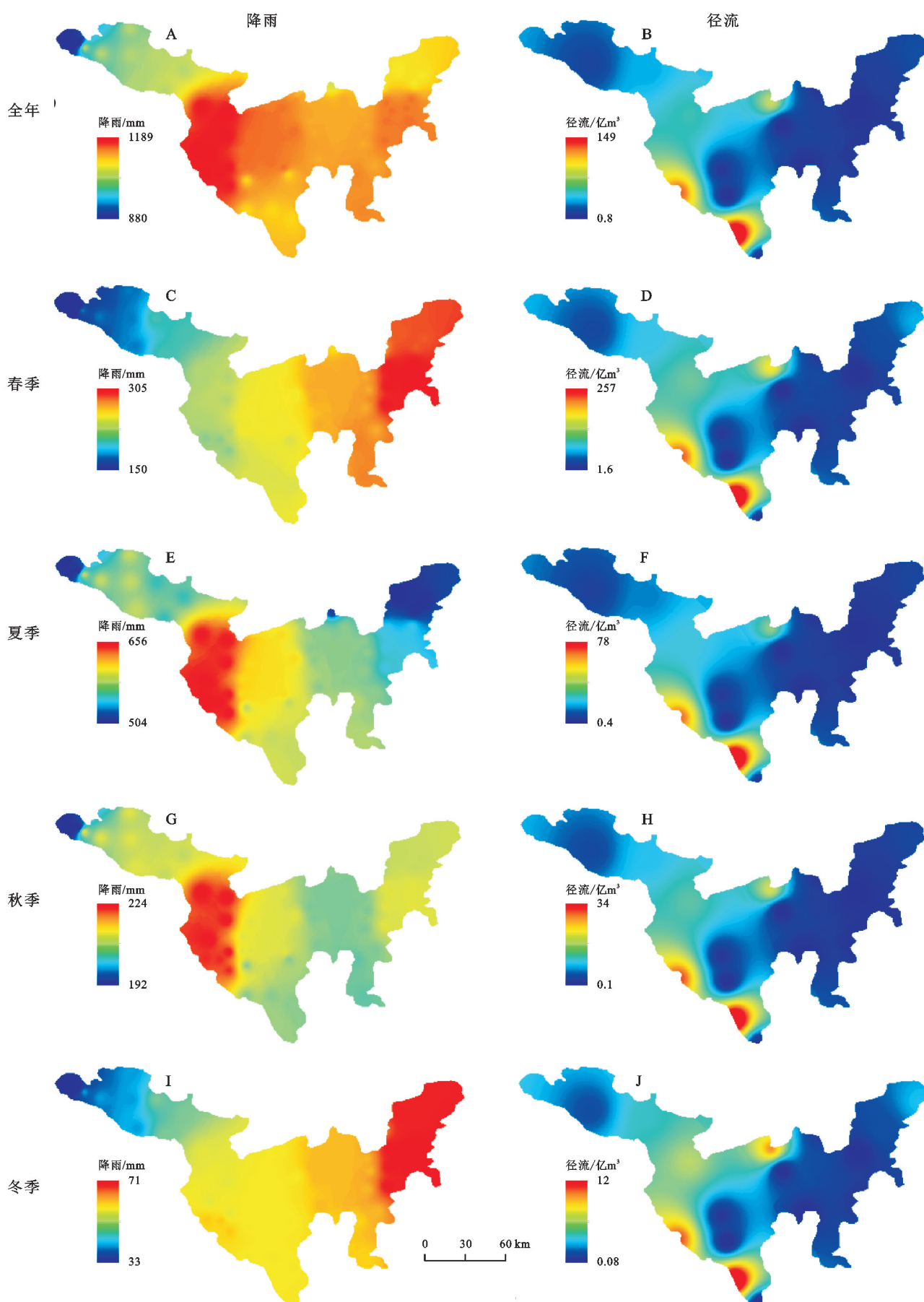


图 3 1979—2021 年黔中地区降雨—径流空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of rainfall-runoff in central Guizhou from 1979 to 2021

表 1 不同时间尺度基于遗传算法(GA)的 SVM 模型参数结果

Table 1 Parameter results of SVM models based on genetic algorithm (GA) at different time scales

模型参数	全年	春季	夏季	秋季	冬季
惩罚系数	5	4	3	60	3
交叉验证	3	否	否	否	3

由图 4A 可知,1979—2021 年降雨—径流模拟可以划分为 3 个时期,即 1979—2000 年为模拟前期,模拟径流量与实测偏差最大,2000—2010 年为模拟中期,模拟径流量与实测偏差最小,2010—2021 年为模拟后期,偏差介于两者之间。前期径流主要受自然因素影响,即喀斯特流域径流调节作用,导致降雨—径流过程延长,降雨不足时径流源于前期蓄水和临近流域补给。中期径流主要受人类调节作用,水资源开发利用项目(大型水库建设)及土地利用变化(城市扩展、农田扩张)对水体储蓄产生影响,进而影响实际径流分配和量化。后期水治理和土地利用技术趋于成熟,人类活动对水资源的调节作用减弱。由图 4B—E 可知,春夏较秋冬两季模拟径流量与实测偏差相对较大,表明降雨—径流模拟值与实测值偏差受不同径流因素影响。

2.2.2 模拟效果及评价 本文采用纳什效率系数(NSE)及平均绝对误差(MAE)对模型精度进行测试验证。一般而言,NSE 取值越小,模型准确度越高,当介于(0,1)表明模型是可行的,且结果总体可信,否则认为该应用模型不可行。平均绝对误差(MAE)是绝对误差的平均值,能反映预测值误差的实际情况,取值越小,模型准确度越高^[5]。

结果表明,纳什效率系数(NSE)都介于(0,1)(表 2),说明 SVM 模型对不同尺度径流模拟结果是可行的,模拟结果有效,尤其秋(0.435)、冬(0.429)两季的模拟精度相对较好。从平均绝对误差(MAE)的角度来看,春季(0.347)、夏季(0.313)和秋季(0.313)的精确度较好。但总体上各尺度的纳什效率系数(NSE)和平均绝对误差(MAE)都比较大,模型模拟精度较低,主要原因为:(1) 本文模型输入变量只考虑降雨量,结果显示输出模拟径流量与降雨量变化情况一致(图 5),说明降雨是模拟径流唯一的影响因素,但实测径流还受气候变化、人类活动及下垫面等因素影响^[25],仅靠降雨量模拟出的径流量较为理想化。(2) 模型参数选取困难,需要参考文献选取算法来优化,但靠人为训练测验次数有限,导致模型精度不是特别理想。

表 2 不同时间尺度基于遗传算法(GA)的 SVM 模型评估结果

Table 2 Evaluation results of SVM models based on genetic algorithm (GA) at different time scales

参数	全年	春季	夏季	秋季	冬季
NSE	0.67	0.541	0.875	0.435	0.429
MAE	0.476	0.347	0.313	0.310	0.456

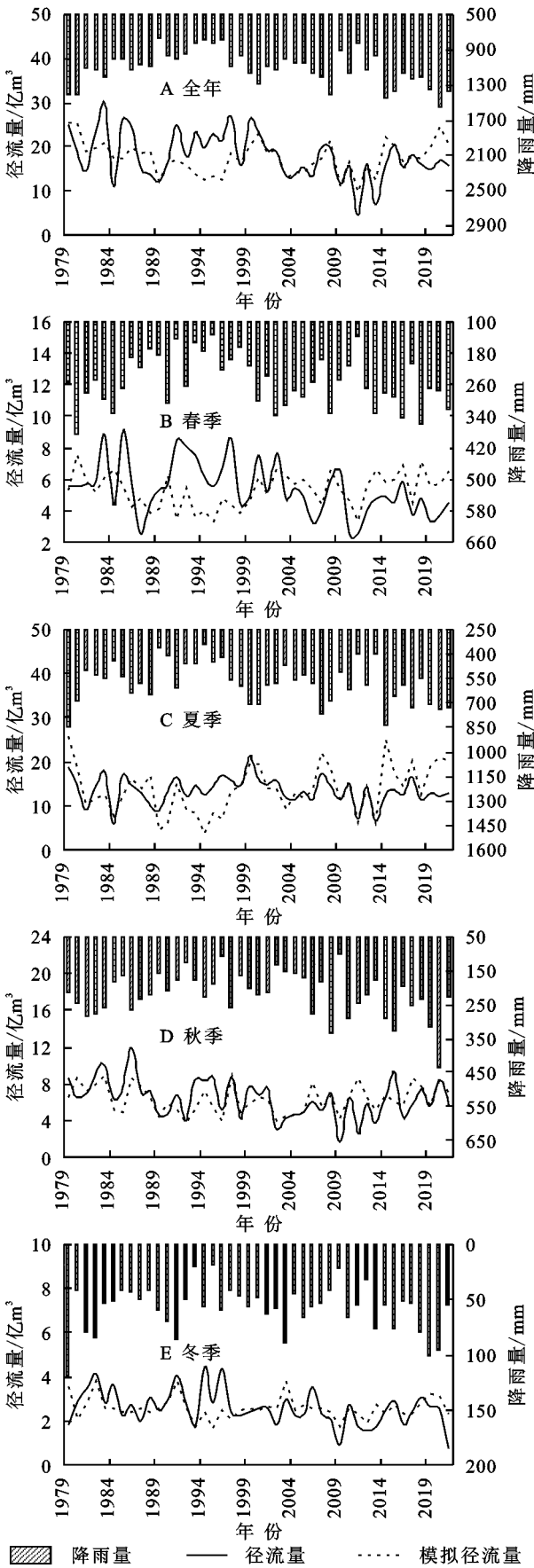


图 4 1979—2021 年基于 SVR 的黔中降雨—径流过程模拟

Fig. 4 Simulation of Rainfall—Runoff Process in Central Guizhou Based on SVR from 1979 to 2021

2.3 黔中地区介质结构对降雨—径流的影响

2.3.1 单因素单因子对降雨—径流的影响 流域介质结构不同,降雨在流域下垫面结构滞流时间不同,从而影响流域蓄水储水能力,最终影响流域径流变

化^[10]。由于研究区径流主要源于降雨,因此本文用径流量表示降雨—径流过程,分析流域介质与降雨—径流之间的关系(图5)及探讨流域介质对降雨—径流的影响。

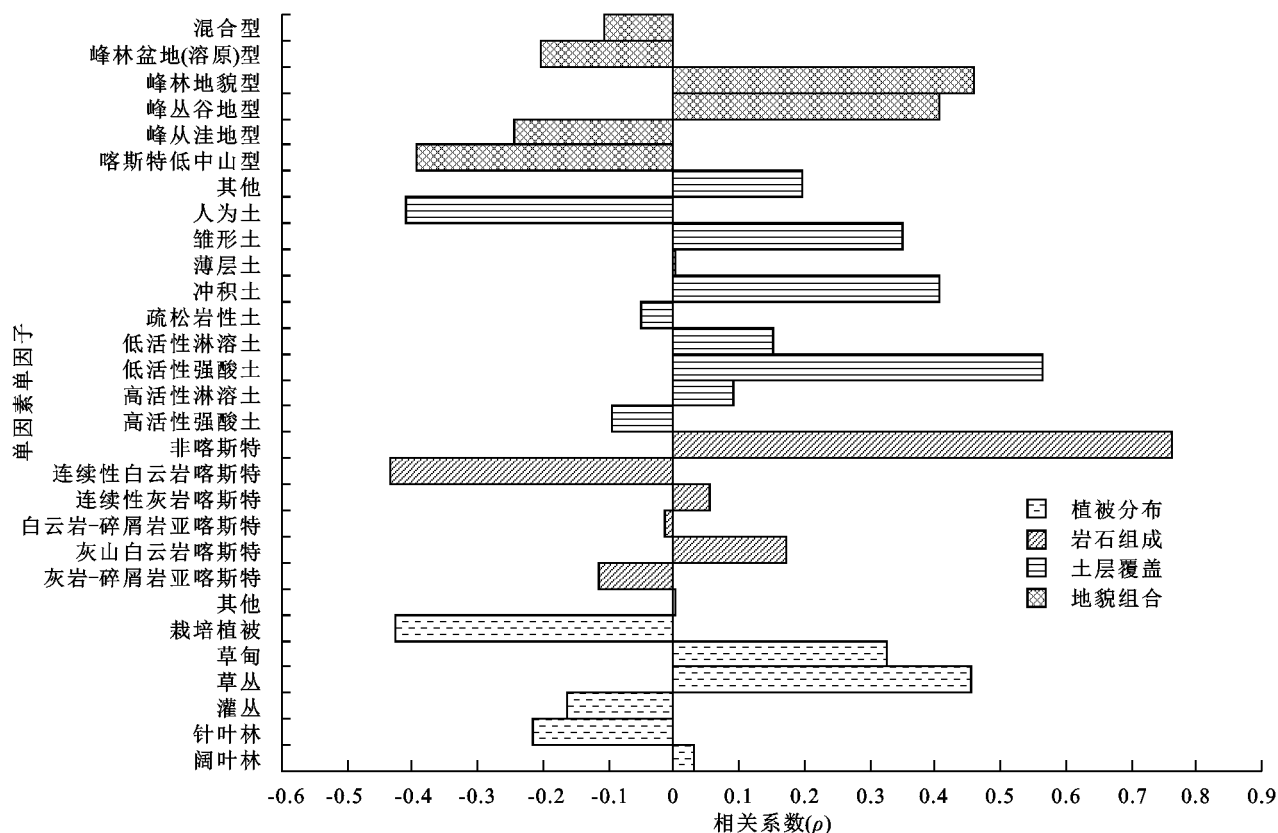


图5 流域介质结构单因素单因子与降雨—径流相关系数

Fig. 5 Single factor and rainfall-runoff correlation coefficient graph of watershed medium structure

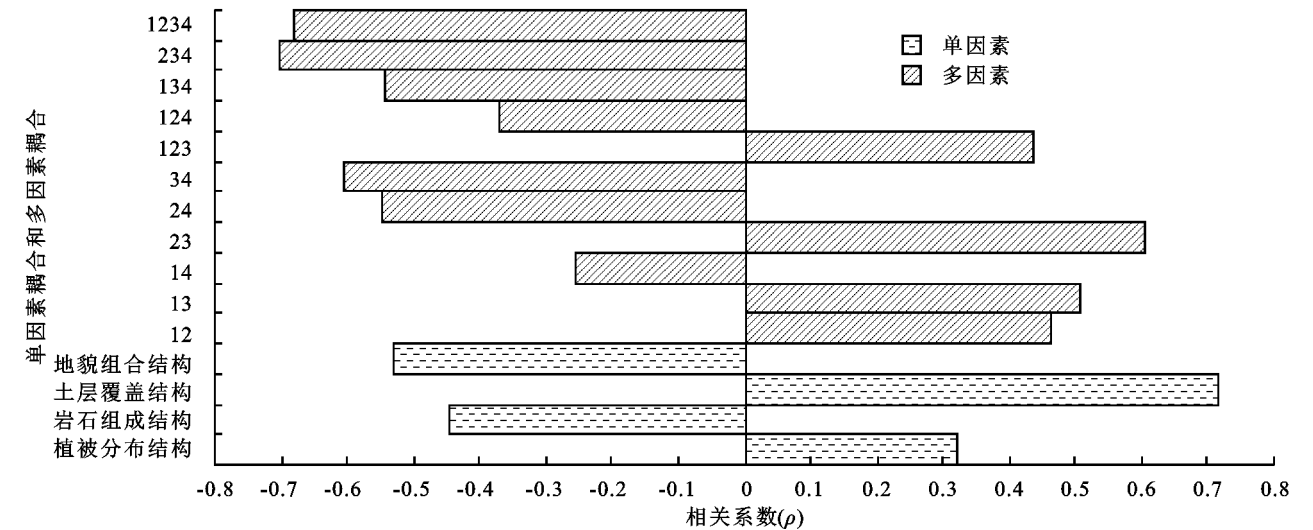
从总体上看,流域介质结构各因子与径流量相关性从大到小为:非喀斯特($\rho=0.764$)>低活性强酸土($\rho=0.566$)>峰林地貌型($\rho=0.459$)>草丛($\rho=0.456$)>连续性白云岩喀斯特($\rho=-0.435$)>栽培植被($\rho=-0.426$),其中仅连续性白云岩喀斯特和栽培植被与径流量存在负向相关性,说明连续性白云岩喀斯特和栽培植被对降雨—径流大小呈现比较强的抑制作用,其中非喀斯特、低活性强酸土、峰林地貌型及草丛对降雨—径流呈现较强的促进作用;同时径流量与各因子中,仅与非喀斯特和低活性强酸土存在非常显著的相关关系($\rho=0.00$),而与峰林地貌型、草丛、连续性白云岩喀斯特及栽培植被存在比较显著的相关关系($0.00<\rho<0.05$),与其余因子相关性很小。

从各因素来看,植被分布结构中草丛及栽培植被与降雨—径流的相关性比较大,说明草丛及栽培植被对降雨—径流影响比较大,其中栽培植被对降雨—径流大小起到抑制作用,其中栽培植被又称人工植被,是指人工培植形成的植被,这里说明人类活动对降雨—径流造成了负向的影响,阔叶林、针叶林、灌丛、

草甸及其他植被对径流量的影响很小($\rho>0.05$)。降雨—径流与岩石组成结构中非喀斯特的相关性极为显著($\rho=0.00$),与连续性白云岩喀斯特相关性较为显著,说明非喀斯特对降雨—径流的影响最大,其次是连续性白云岩喀斯特,其他4类岩石对径流量影响很小($\rho>0.05$);其中降雨—径流与非喀斯特呈正相关关系,与连续性白云岩喀斯特呈负相关关系。土层覆盖结构中低活性强酸土与降雨—径流的相关性极为显著($\rho=0.00$),总体上低活性强酸土对降雨—径流的影响最大,其次是人为土和冲积土,其他土壤类型影响很小;其中降雨—径流与低活性强酸土呈正相关,与人为土呈负相关。地貌组合结构中的喀斯特低中山型及峰林地貌型与降雨—径流的相关性比较显著,其中降雨—径流与喀斯特低中山型呈现负相关关系,与峰林地貌型和呈现正相关关系。综上所述,不管是何种流域介质结构,与人类有关的单因子和降雨—径流基本呈现负相关关系,因此人类活动与径流及洪涝的发生有着极大的关系,从而验证本研究 43 年降雨呈现上升趋势,而径流呈现下降趋势的结果。

2.3.2 单因素耦合及多因素耦合对降雨—径流的影响 因素(或因子)间的耦合,不是因素(或因子)间在一维空间上简单的耦合、性质的继承和量级的叠加,而是因素(或因子)间在多维空间或高维空间上的耦合、性质的继承和量级的叠加^[10]。通过主成分分析

得到流域介质(单因素及多因素),从而探讨在不同时间尺度下流域介质(单因素及多因素)对降雨—径流的影响,多因素的耦合是流域介质结构对降雨—径流的综合影响,本文包括双因素、三因素及四因素的耦合(图 6)。



注:1=植被分布结构,2=岩石组成结构,3=土层覆盖结构,4=地貌组合结构;12=1×2,表示植被分布结构与岩石组成结构的耦合(即耦合生成新的流域介质结构),其余类推。

图 6 流域介质结构单因素耦合及多因素耦合与降雨—径流相关系数

Fig. 6 Single factor coupling and multi factor coupling of watershed medium structure and their correlation coefficients with rainfall-runoff

从单因素耦合看,4类流域介质结构与降雨—径流相关性大小:土层覆盖结构($\rho=0.714$)>地貌组合结构($\rho=-0.529$)>岩石组成结构($\rho=-0.446$)>植被分布结构($\rho=0.323$),其中土层覆盖结构及植被分布结构与降雨—径流呈正相关关系,岩石组成结构及地貌组合结构与降雨—径流呈负相关关系,说明土层覆盖结构及地貌组合结构对降雨—径流的影响最大,其次是岩石组合结构和植被分布结构。对于喀斯特地区来说,植被类型对降雨—径流的影响相较于其他结构不大。

从多因素耦合看,12(植被与岩性),13(植被与土壤),23(岩性与土壤)及123(植被、岩性和土壤)耦合与降雨—径流呈正相关关系,14(植被与地貌),24(岩性与地貌),34(土壤与地貌),124(植被、岩性和地貌),134(植被、土壤和地貌),234(岩性、土壤和地貌)及1234(植被、岩性、土壤和地貌)耦合与降雨—径流呈负相关关系;13,23,24,34,134,234及1234对降雨—径流的影响最大,其次是12,123,14,124对降雨—径流基本没影响。从双因素耦合看,对径流量影响最显著的是13,23,24及34,其次是12,最后14;从三因素耦合看,134及234对降雨—径流的影响最明显,其次是123,最后是124;从四因素耦合看,1234与径流的相关性极为显著($p=0.00$)。综上所述,多因素的耦合对径流量的影响比较强烈,且相较于单因

素耦合对径流量的影响更加明显,因为实际情况径流量是多因素综合影响下的结果,几乎不存在流域介质中只受到单因素影响径流。

3 讨论

3.1 降雨—径流机制讨论

降雨是径流形成的基础,降雨水通过表面径流或入渗到土壤中,最终形成地下径流或地表径流^[26]。当降雨水量超过地表的渗透能力时,水会形成地表径流,地表径流的形成取决于地表土壤的渗透性、坡度和植被覆盖情况等因素,不透水地表、坡度陡峭和少植被覆盖的区域会导致更多的地表径流;部分降雨水会通过渗透进入土壤,逐渐向下渗透形成地下径流,地下径流的生成取决于土壤的渗透性、土壤含水量和土壤层的通透性^[27]。降雨—径流过程除了受到降雨特征的影响,也受到地表覆盖和土地利用、岩性、地貌、植被类型、土壤类型及地下溶蚀作用等自然和人为因素的影响,这些因素从而扰乱了降雨—径流之间的关系,在一定程度上可反映出人类活动和流域介质结构等因素对降雨—径流关系的影响,该结果与郭爱军等学者^[28]分析结果总体保持一致,本文43年来降雨量呈缓慢上升趋势,而径流量呈缓慢下降趋势(图2A)验证了这一观点。不同时代和季节对径流的

主要影响因素可能不同^[23]。在本研究中,黔中地区前期径流主要受到流域下垫面结构的影响,中期受到人类活动影响较大,后期技术发展成熟,人类活动对径流的影响减弱;多年来夏秋两季降雨量可能成为径流的主导影响因素,而在秋冬两季,径流补给主要来源于流域储水量,主要受到喀斯特流域介质结构的影响,与徐森等^[29]研究结果保持一致。

3.2 流域介质结构对降雨—径流的影响

流域介质结构影响流域储水蓄水能力,黔中地区流域结构复杂,具有独特的地上、地下地质结构,同时土壤透水性强、蓄水能力弱等^[11],从而导致降雨—径流过程受到流域介质结构的影响比较大。流域介质结构单因素单因子对降雨—径流过程的总体影响比较显著,植被分布结构中草丛为比较明显的正向影响,栽培植被为比较明显的负向影响,由于草丛容易生长在肥沃富含腐殖质的黏质土壤中,土壤颗粒较细,渗透能力弱,而栽培植被受到人类活动的影响,更容易发生石漠化^[30],因此草丛对降雨—径流为正向驱动,栽培植被对降雨—径流为负向驱动。岩石组成结构中有明显的喀斯特和非喀斯特之分,非喀斯特为最明显的正向影响,连续性白云岩喀斯特为负向影响,其他因子基本没影响;因为相较于非喀斯特,喀斯特岩石裂隙大、容易被水溶蚀,保水性差、透水性强^[31],所以非喀斯特对降雨—径流为正向驱动,连续性白云岩喀斯特为负向驱动。土层覆盖结构中低活性强酸土为显著的正向影响,认为土为比较显著的负向影响,酸性土壤通常松软肥沃,益于植被繁荣生长,保水能力较强,人为土通常受到人类活动的影响。地貌组合结构中仅峰林地貌型和峰丛谷地型为正向驱动,其他地貌结构为负向驱动。

流域介质结构单因素耦合及多因素耦合对降雨—径流过程的总体影响大。土层覆盖结构对降雨—径流的正向驱动强于植被分布结构,地貌组合结构对降雨—径流的负向驱动强于岩石组成结构;两因素耦合与植被分布结构有关的大部分是正向驱动,与地貌组合结构有关的为负向驱动,说明植被分布结构和地貌组合结构在耦合中起到主导作用;三、四因素耦合仅 123(植被、岩石、土层)为正向驱动,其他为负向驱动且驱动作用明显,原因在于多因素耦合对降雨—径流的驱动接近于实际,也说明多因素耦合对喀斯特降雨—径流总体是不利影响。

3.3 人类活动对降雨—径流的影响

喀斯特地区通常具有脆弱的环境,对人类活动的变化较为敏感。人类在喀斯特地区使土地利用发生变化,如森林砍伐、农业开垦、城市扩张等,会改变地

表的自然覆盖,这些变化会影响水的循环和地下水的补给,例如,森林砍伐会减少植被的拦截作用,增加了降雨直接到达地表的量,导致径流的增加^[32]。同时土地改造和水利工程包括建设沟渠、水库、排水系统等,这些工程将改变地表和地下水的流动路径和速度,导致径流量和径流速度的变化,水库的建设会调节水的储存和释放,影响径流的产生和分配。喀斯特地区容易发生土壤侵蚀,特别是在农业活动频繁的区域,土壤侵蚀会导致土壤表层的脱落和流失,降低土壤的渗透能力,增加地表径流的生成。人类进行的水资源开发和管理,如大规模水库建设、地下水开采等,会改变水的储存和分配,对径流—径流过程产生影响,调控水库的放水方式和水资源的分配会直接影响喀斯特地区的径流量和径流时间分布。

3.4 不足与展望

本文利用支持向量回归(SVR)对多尺度降雨—径流过程进行模拟,模拟效果较好,尤其在秋冬季。同时采用 Spearman 相关分析方法分析流域介质结构(单因素单因子、单因素耦合及多因素耦合)与年降雨—径流的关系,揭示流域介质结构的降雨—径流机制。但 SVR 模型总体上模拟精度并不高,这可能归因于研究区域的特殊性,黔中气象站分布不均,加上山区降雨受到地形地貌因素影响较大,气象站获取的气象数据可能与实际数据存在一定差异;同时受到流域下垫面结构、多年来人类活动及气候变暖等因素的影响,导致降雨—径流过程模拟不存一一对应的响应关系;此外,利用 SVR 模型进行降雨—径流模拟时选择参数、核函数及优化算法不同,结果也有所差异。因此在后续的降雨—径流过程模拟研究中,多种核函数及优化算法对比研究及其组合研究是一个值得深入的探讨方向^[33]。

4 结论

(1) 1979—2021 年黔中地区年均降雨量为 1 107.81 mm、整体呈缓慢上升趋势(5.02 mm/a),东部高、西部低,与地形地貌分布有关,尤其是春季和冬季降雨分布,自西向东降雨逐渐增多,与地形呈现西高东低大致保持一致。年均径流量为 28.02 亿 m^3 ,呈缓慢下降趋势(-0.17 亿 m^3/a),受到流域结构的影响,最大径流量位于南部及西南部。

(2) 由 SVM 对不同尺度降雨—径流模拟是可行的,模拟精度相对较好。从径流模拟与实测偏差大小可以判断,前期径流主要受自然因素影响,即喀斯特流域径流调节作用;中期径流主要受人类调节作用;后期水治理和土地利用技术趋于成熟,人类活动对水资源的调节作用减弱。

(3) 从单因素因子看,流域介质结构各因子与径流量相关性大小:非喀斯特(0.764)>低活性强酸土(0.566)>峰林地貌型(0.459)>草丛(0.456)>连续性白云岩喀斯特(-0.435)>栽培植被(-0.426)。

(4) 从单因素耦合及多因素耦合看,流域介质结构对降雨—径流影响总体较大,单因素耦合影响从大到小排序为:土层覆盖结构(0.714)>地貌组合结构(-0.529)>岩石组成结构(-0.446)>植被分布结构(0.323);多因素耦合影响从大到小排序为:234(-0.702)>1 234(-0.679)>23(0.607)>34(-0.604)>24(-0.547)>134(-0.544)>13(0.507)。

参考文献(References):

- [1] 刘艳丽,张建云,王国庆,等.环境变化对流域水文水资源的影响评估及不确定性研究进展[J].气候变化研究进展,2015,11(2):102-110.
Liu Y L, Zhang J Y, Wang G Q, et al. Progress in impact assessment and uncertainty research of environmental change on basin hydrology and water resources [J]. Climate Change Research, 2015,11(2):102-110.
- [2] 刘骏,何颖.山地城市海绵型绿地立体构建途径[J].山地学报,2018,36(1):125-131.
Liu J, He Y. On the multidimensional construction of sponge green spaces in mountain city [J]. Mountain Research, 2018,36(1):125-131.
- [3] 李渊.喀斯特高原峡谷典型小流域石漠化水文过程与碳氮流失机制[D].贵阳:贵州师范大学,2021.
Li Y. The desertification hydro-process and carbon and nitrogen loss in a typical catchment of the Karst Plateau-Gorge[D]. Guiyang:Guizhou Normal University, 2021.
- [4] 吴琳娜,梁虹,杨书娟,等.喀斯特流域结构与枯水径流研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2004,22(3):5-9,38.
Wu L N, Liang H, Yang S J, et al. A primary study on the structural character and low flow effect of the karst drainage basin[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences,2004,22(3):5-9,38.
- [5] Zhou C, Yin K L, Cao Y, et al. Application of time series analysis and PSO-SVM model in predicting the Bazimen landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Engineering Geology, 2016,204:108-120.
- [6] Wu M C, Lin G F, Lin H Y. Improving the forecasts of extreme streamflow by support vector regression with the data extracted by self-organizing map[J]. Hydrological Processes, 2014,28:386-397.
- [7] Wu J, Liu H, Wei G Z, et al. Flash flood forecasting using support vector regression model in a small mountainous catchment[J]. Water, 2019,11(7):1-16.
- [8] 姜成玉.基于支持向量机的时间序列预测[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2010.
- Jiang C Y. Research on forecast of time series based on SVM[D]. Dalian City, Liaoning Province: Liaoning Normal University, 2010.
- [9] 张兰影,庞博,徐宗学,等.基于支持向量机的石羊河流域径流模拟适用性评价[J].干旱区资源与环境,2013,27(7):113-118.
Zhang Lanying, Pang Bo, Xu Zongxue, et al. Assessment on the applicability of support vector machine-based models for runoff simulation in Shiyang river basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(7):113-118.
- [10] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.基于土壤系统结构的喀斯特流域水文干旱分析:以贵州省为例[J].自然资源学报,2013,28(10):1731-1742.
He Z H, Chen X X, Liang H, et al. The hydrological drought analysis of the karst basin based on the soil systematic structure: Taking guizhou province as a case[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(10):1731-1742.
- [11] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.典型喀斯特地貌空间配置的洪水资源化机理:以贵州省为例[J].热带地理,2014,34(2):225-233.
He Z H, Chen X X, Liang H, et al. Flood water resources utilization mechanism based on spatial configuration of typical karst landform: A case study of guizhou province[J]. Tropical Geography, 2014,34(2):225-233.
- [12] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.典型喀斯特岩性组合结构的流域水文干旱机制研究:以贵州省为例[J].地质科学,2015,50(1):340-353.
He Z H, Chen X X, Liang H, et al. Study on hydrological drought mechanism in watersheds with typical karstic lithologic assemblages: a case study of Guizhou province [J]. Chinese Journal of Geology,2015,50(1):340-353.
- [13] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. Catena, 2017,152:218-226.
- [14] Kan X Q, Cheng J H, Hou F, et al. Response of preferential soil flow to different infiltration rates and vegetation types in the karst region of southwest china[J]. Water, 2020,12(6):1778.
- [15] 张强,王蓉,岳平,等.复杂条件陆—气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J].气象学报,2017,75(1):39-56.
Zhang Q, Wang R, Yue P, et al. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complicated conditions [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75 (1):39-56.
- [16] 张浪,贺中华,夏传花,等.基于时变 Copula 模型的多尺度气象干旱、水文干旱特征及其概率分析:以黔中水利工程区为例[J].水土保持研究,2021,28(6):115-130.
Zhang L, He Z H, Xia C H, et al. Characteristics of meteorological drought and hydrological drought on multi-scale and their probability analysis based on the time-varying

- copula model: Taking water conservancy project area in central guizhou as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 115-130.
- [17] 杨铭珂, 贺中华, 张浪, 等. 不同时间尺度下气象干旱向水文干旱传播过程[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 350-360.
- Yang M K, He Z H, Zhang L, et al. Propagation process of meteorological drought to hydrological drought in different time scales[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 350-360.
- [18] Gu Z J, Duan X W, Shi Y D, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 54-64.
- [19] Liu D L, Teng J, Ji F, et al. Characterizing spatiotemporal rainfall changes in 1960—2019 for continental Australia[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41: 2420-2444.
- [20] Bartoletti N, Casagli F, Marsili-Libelli S, et al. Data-driven rainfall/runoff modelling based on a neuro-fuzzy inference system[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 106: 35-47.
- [21] Wu J, Liu H, Wei G, et al. Flash flood forecasting using support vector regression model in a small mountainous catchment[J]. *Water*, 2019, 11(7): 1-16.
- [22] 魏全, 赵超志, 毛金沙, 等. 秦岭水源地流域不同径流组分特征与补给关系研究[J]. *环境工程*, 2023, 41(S1): 142-146.
- Wei Q, Zhao C Z, Mao J S, et al. Research on the characteristics of different runoff components and recharge relationship in the Qinling water source basin[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S1): 142-146.
- [23] 叶晶萍, 刘政, 欧阳磊, 等. 不同时间尺度小流域径流变化及其归因分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4478-4487.
- Ye J P, Liu Z, OuYang L, et al. Runoff changes and their attributions in a small watershed during different time scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4478-4487.
- [24] 肖蓓, 崔步礼, 姜宝福, 等. 山东省不同地形区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(3): 267-280.
- Xiao B, Cui B L, Jiang B F, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in different topographic regions of Shandong Province[J]. *Journal of Earth Environment*, 2019, 10(3): 267-280.
- [25] 杨林, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J]. *生态学报*, 2021, 41(21): 8421-8429.
- Yang L, Zhao G J, Mu X M, et al. Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko Hypothesis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(21): 8421-8429.
- [26] 李焱秋, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 28-33.
- Li Y Q, Dai Q H, Gan Y X, et al. Response of runoff to rainfall intensity and slope on bare slope land in karst[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 28-33.
- [27] 邵治钦. 贵州三岔河上游流域径流对气候变化和土地利用变化的协同响应研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- Tai Z Q. Synergistic response of runoff to climate change and land use change in the upper Sancha River Basin of Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022.
- [28] 郭爱军, 畅建霞, 黄强. 泾河流域降雨、径流变化特征及人类活动影响分析[R]. 广州: 中国水利水电出版社, 2013: 358-363.
- Guo A J, Chang J X, Huang Q. Characterization of rainfall and runoff changes and analysis of the impacts of human activities in the Jinghe River Basin [R]. Guangzhou, Guangdong: China Water Resources and Hydropower Press, 2013: 358-363.
- [29] 徐森, 李思亮, 狄崇利. 典型喀斯特流域降水与径流特征分析及径流年际变化的影响因素贡献分解[J]. *第四纪研究*, 2017, 16(6): 1238-1250.
- Xu S, Li S L, Di C L. Characterization of precipitation and runoff in a typical karst basin and decomposition of the contribution of factors influencing the interannual variability of runoff[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 16(6): 1238-1250.
- [30] 陈舒婷. 典型喀斯特地区石漠化时空演变格局及其驱动机制分析[D]. 山东淄博: 山东理工大学, 2022.
- Chen S T. Spatial and temporal evolution pattern and driving mechanism of rocky desertification in typical karst areas[D]. Zibo, Shandong: Shandong University of Technology, 2022.
- [31] Wang Z M, Yang G L, Yang R D, et al. Evaluating the factors influencing limestone-dissolution characteristics in the Karst Regions of Guizhou, China [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2017, 45(1): 220-229.
- [32] 付宁波. 模拟降雨强度下植物覆盖对地表径流和土壤侵蚀的影响[J]. *山西水利*, 2021, 37(10): 20-22, 33.
- Fu N B. Effects of plant cover on surface runoff and soil erosion under simulated rainfall intensity [J]. *Shanxi Water Resources*, 2021, 37(10): 20-22.
- [33] 王瑞芳, 姜玥玮, 易琦. 基于 SVM 模型的宝象河流域降雨—径流预测研究[J]. *云南地理环境研究*, 2020, 32(5): 1-8.
- Wang R F, Jiang Y W, Yi Q. Research on prediction of Rainfall-Runoff in Baoxiang River Basin based on SVM Model [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2020, 32(5): 1-8.