

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.011

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.011

杨德堃, 舒胡佳, 文锐, 等. 降雨驱动下流域地下水文连通性的时空变化规律[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 173-182.

Yang Dekun, Shu Hujia, Wen Rui, et al. Spatiotemporal variation patterns in watershed subsurface hydrological connectivity driven by rainfall[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 173-182.

降雨驱动下流域地下水文连通性的时空变化规律

杨德堃¹, 舒胡佳¹, 文锐², 阳辉², 谭司璐¹, 肖海兵¹, 方怒放³, 史志华¹

(1. 华中农业大学国家环境保护土壤健康与绿色修复重点实验室, 武汉 430070; 2. 衡东县水土保持事务中心, 湖南 衡阳 421400; 3. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为揭示降雨驱动下流域地下水文连通性的时空变化规律及关键影响因子。[方法] 本研究以亚热带低丘山区的龙堰小流域为研究对象, 通过对浅层地下水位进行高频监测, 结合层次聚类、时间序列相似性分析等方法, 量化不同降雨条件下流域地下水文连通强度, 阐明其时空变化规律, 并揭示降雨对地下水文连通强度的影响机制。[结果] 流域地下水文连通强度在不同降雨事件间呈现明显差异, 平均水文连通强度为 0.248~0.663, 相较于降雨初期连通强度平均提升 52.35%; 3 类降雨事件中, 平均与最大水文连通强度均表现为大雨量大雨强 > 中雨量中雨强 > 小雨量小雨强。水文连通强度对降雨的响应因事件类型而异: 小雨量小雨强事件响应迟缓, 连通范围限于河岸区; 中雨量中雨强及大雨量大雨强事件响应迅速, 连通范围可扩展至山坡区, 峰值时连通面积占比最高达 90.60%。平均与最大水文连通强度均与降雨量、降雨历时及 15、30 min 最大雨强呈显著正相关; 最小水文连通强度则受前期降雨条件影响显著。[结论] 研究结果系统揭示降雨对地下水文连通性的影响机制, 对科学认识流域地下水文过程具有重要科学意义。

关键词: 低丘山区; 水文连通性; 降雨; 水文过程; 时空变化

中图分类号: P333; P641

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0173-10

Spatiotemporal Variation Patterns in Watershed Subsurface Hydrological Connectivity Driven by Rainfall

Yang Dekun¹, Shu Hujia¹, Wen Rui², Yang Hui², Tan Silu¹, Xiao Haibing¹, Fang Nufang³, Shi Zhihua¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Health and Green Remediation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Soil and Water Conservation Center of Hengdong County, Hengyang, Hunan 421400, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the spatiotemporal variation patterns of subsurface hydrological connectivity and its key influencing factors in a watershed driven by rainfall. [Methods] The Longyan small watershed in a subtropical low-hilly region was selected as the study area. High-frequency monitoring of shallow groundwater levels was conducted. In combination with hierarchical clustering, time-series similarity analysis, and graph theory methods, the strength of watershed subsurface hydrological connectivity under different rainfall conditions was quantified. The spatiotemporal variation patterns were then characterized, and the influencing mechanisms of rainfall on conductivity strength were explored. [Results] Subsurface hydrological connectivity strength varied significantly across rainfall events, with mean values ranging from 0.248 to 0.663, representing an average increase of 52.35% compared to the initial stage of rainfall. Both the mean and maximum connectivity strengths followed the order: high rainfall amount with high intensity > moderate rainfall amount with moderate

收稿日期: 2026-02-06

修回日期: 2026-03-20

录用日期: 2026-03-27

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-07-17

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD1700300, 2024YFD170030001)

第一作者: 杨德堃 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文与面源污染研究。E-mail: yangdk@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 肖海兵 (1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土流失与面源污染研究。E-mail: xiaohaibing@mail.hzau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

intensity>low rainfall amount with low-intensity. The response of hydrological connectivity strength to rainfall differed by event type. For events of low rainfall amount with low intensity, the response was slow, and the connectivity was confined to riparian zones, whereas for events of moderate/high rainfall amount with moderate/high intensity, the response was rapid, and the connectivity expanded to hillslope areas, with the peak connected area reaching 90.60%. Both the mean and maximum connectivity strengths showed significant positive correlations with rainfall amount, rainfall duration, and the maximum 15 min and 30 min intensities. In contrast, the minimum connectivity strength was significantly influenced by rainfall conditions at the early stages. [Conclusion] This study systematically reveals the influencing mechanisms of rainfall on subsurface hydrological connectivity, offering important insights for understanding watershed subsurface hydrological processes.

Keywords: low-hilly area; hydrological connectivity; rainfall; hydrological processes; spatiotemporal variation

Received: 2026-02-06

Revised: 2026-03-20

Accepted: 2026-03-27

Online(www.cnki.net): 2026-07-17

水文连通性是指流域内各种物质以水为载体,在空间异质景观或斑块间进行迁移、传输或扩散的便利程度。它是维系流域生态系统结构与功能的核心环节,其动态变化直接调控径流、泥沙和污染物在景观单元间的迁移转化过程^[1-2]。根据水流路径的不同,水文连通性可以分为地表和地下水文连通性^[3-4]。近年来,水文连通性研究虽然取得了重要进展,但主要关注地表水文连通性。由于地下水文过程的隐蔽性和复杂性,流域地下水文连通性的时空变化特征仍然缺乏系统认知^[5]。因此,系统阐明降雨驱动下流域地下水文连通性的时空变化规律,对流域水环境保护及其综合治理具有重要意义。

随着研究的深入,地下水文连通性的表征方法已从初期侧重静态空间结构的景观格局指数,逐步发展为结合图论、水动力模型与高频野外监测的动态过程量化方法^[6-10]。其中,图论方法通过构建流域的点线拓扑网络,实现地下水文连通性的定量评价^[11-12]。基于土壤水分和地下水位的高频监测,能够有效识别浅层地下水水流路径,从而表征地下水文连通性^[13]。有研究^[14]表明,降雨是流域地下水文连通性变化的关键驱动因子,通过改变土壤水分与地下水位来激活不同景观单元间的地下水文联系。降雨过程中,地下水文连通区常呈现由河岸向山坡延伸的趋势,此过程对流域的径流响应及伴随的污染物输出具有决定性影响。当前,流域地下水文连通性研究仍存在的局限为:一方面,多数研究依赖模型模拟或低频观测数据,难以精准解析降雨过程地下水文连通性的时空变化规律;另一方面,地下水文连通性对降雨的响应机制尚不明确。相关研究^[15]表明,坡面水文连通性与降雨量、降雨强度之间呈正相关,强降雨条件下土壤更容易蓄满产流或超渗产流,有利于水文连通性的发展,但二者并非简单的线性关

系。在不同地形、地质和地类背景下水文连通性对降雨的响应可能存在差异^[16-17]。当前有关流域地下水文连通性对降雨的响应机制仍缺乏系统认知。

南方低丘山区降雨丰沛,土层浅薄,地下水文过程对降雨的响应迅速^[18]。因此,本研究以亚热带低丘山区的典型小流域为研究对象,通过对降雨、径流、浅层地下水位等开展长期高频监测,结合时间序列相似性分析、层次聚类、图论等方法量化流域地下水文连通强度,对比分析不同降雨事件地下水文连通强度的变化特征,并揭示降雨特征因子对水文连通强度的影响机制,研究结果对科学理解流域地下水文过程具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

龙堰小流域位于湖南省衡东县(27°02′00″~27°03′46″N, 112°54′43″~112°55′38″E),流域面积 2.19 km²,属于长江流域洞庭湖水系湘江二级支流。海拔 44.83~108.94 m,平均海拔为 68.90 m。流域内多缓坡,坡度为 0°~45.76°,平均坡度为 9.18°(图 1)。

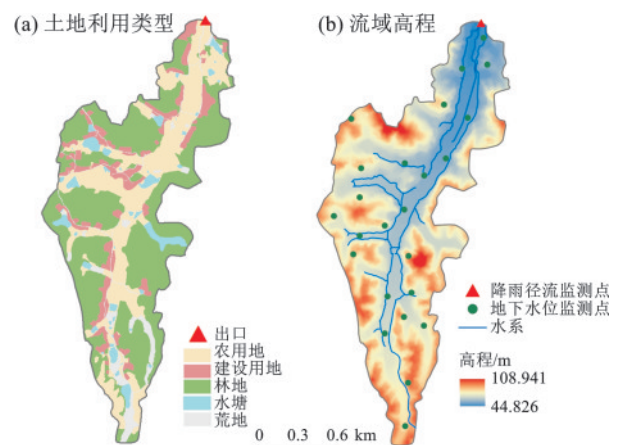


图 1 龙堰小流域土地利用和高程

Fig.1 Land use and elevation of Longyan small watershed

流域属中亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛。多年平均降水量为 1 337.0 mm,其中 60%集中在 4—9 月。土地利用类型包括林地(49.80%)、耕地(25.58%)、建设用地(13.09%)和其他用地(荒地、水塘等,合计 11.53%)。流域植被属于亚热带常绿阔叶林带,主要树种有松树、杉木和油茶等。土壤类型以红壤为主,土壤体积质量为 1.03~1.66 g/cm³,孔隙度为 37.37%~63.15%,土壤饱和导水率为 0.01~1.59 mm/min。

1.2 浅层地下水位、降雨和径流的监测

根据流域内地形湿度指数(TWI)的频率分布,研究布设 24 个浅层地下水位监测点。监测点覆盖 10 个林地、8 个耕地、4 个荒地和 2 个园地。使用 HOBO 水位计以 5 min/次的频率监测浅层地下水位的动态变化,监测时间为 2023 年 6 月至 2024 年 12 月。

同期,在流域出口处设置流量计与 HOBO 气象站,以相同频率(5 min/次)连续监测流量和气象数据。监测时间为 2023 年 3 月至 2024 年 12 月,监测期间年降雨量分别为 1 054.6、1 710.2 mm(图 2)。基于降雨量、降雨强度等特征指标(表 1),采用聚类分析方法将监测到的 19 场降雨事件划分为 3 种类型,分别为小雨量小雨强(8 场)、中雨量中雨强(6 场)和大

雨量大雨强(5 场),降雨事件以 Event+序号表示。为量化前期降雨特征,计算事件发生前 3、5、7 d 的前期降雨指数(API)^[19]。计算公式为:

$$API = \sum_{t=1}^{-T} P_t k^{-t}$$

(1)

式中: P_t 为第 t 天的降雨量,mm; k 为衰减系数,用于衡量前期降雨对土壤水分状况的递减影响,取值 0.98; T 为该指数计算的总天数,d。

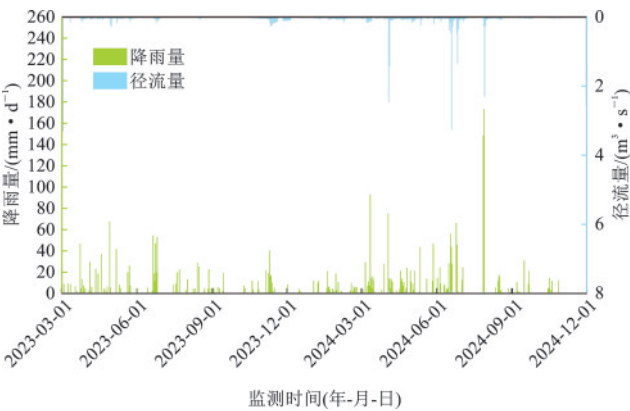


图 2 监测期间降雨量和径流量变化
Fig.2 Rainfall amount and runoff during monitoring period

表 1 监测期间降雨事件特征参数

Table 1 Characteristic parameters of rainfall events during monitoring period									
监测时间 (年-月-日)	降雨 事件	降雨历 时/h	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	15 min 最大雨 强/(mm·h ⁻¹)	30 min 最大雨 强/(mm·h ⁻¹)	前 3 d 降雨 指数/mm	前 5 d 降雨 指数/mm	前 7 d 降雨 指数/mm
2023-06-13	Event1	7.42	5.20	0.70	3.20	2.40	0	0	0
2023-06-21	Event2	13.84	9.80	0.71	8.80	5.20	70.40	70.60	70.60
2023-06-22	Event3	0.33	5.20	15.76	20.80	10.40	80.20	80.20	80.40
2023-07-15	Event4	1.08	8.00	7.41	12.00	10.80	0	0	0
2023-07-18	Event5	0.92	9.00	9.78	28.80	16.40	0.20	8.20	8.20
2024-04-18	Event6	6.42	11.40	1.78	10.40	8.00	25.20	25.20	28.00
2024-04-19	Event7	12.50	14.00	1.12	22.40	18.00	36.60	36.60	39.20
2024-04-20	Event8	2.17	7.00	3.23	10.40	7.60	25.40	50.60	50.60
2023-05-21	Event9	5.34	27.20	5.09	20.80	16.00	19.80	20.00	20.00
2024-04-16	Event10	3.92	21.00	5.36	35.20	24.80	4.00	6.60	6.60
2024-04-24	Event11	16.17	28.80	1.78	14.40	8.40	1.60	19.00	44.40
2024-04-29	Event12	13.92	32.40	2.33	40.00	30.80	0	25.20	31.00
2024-06-15	Event13	2.08	28.20	13.56	41.60	38.80	10.40	15.20	29.60
2024-06-19	Event14	10.08	27.60	2.74	26.40	19.20	100.00	133.20	141.20
2023-06-20	Event15	16.33	68.00	4.16	61.60	40.00	2.40	2.60	3.00
2023-06-24	Event16	27.75	71.80	2.59	24.80	17.60	63.80	134.20	134.40
2024-05-11	Event17	2.58	43.60	16.90	80.00	64.40	1.60	1.60	12.00
2024-06-17	Event18	16.67	87.80	5.27	68.00	48.80	40.40	50.80	55.20
2024-07-27	Event19	31.33	321.00	10.25	63.20	51.20	0	0	0

1.3 全流域浅层地下水位模拟

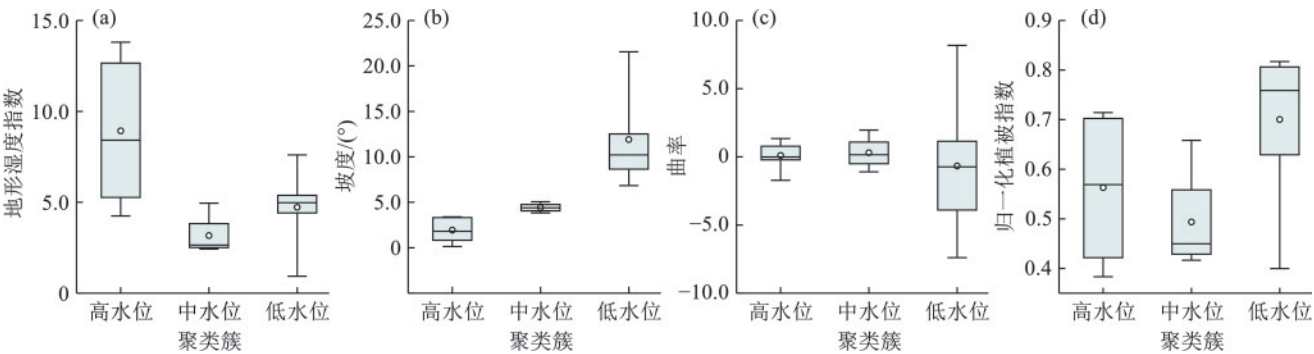
有限的浅层地下水位监测点难以定量表征流域地下水文连通性,因此结合动态时间规整、聚类和混淆矩阵等方法实现地下水位由“点”向“面”的外推。本研究对监测期内获取的地下水位及出口径流原始时间序列进行 15 min 间隔的重采样,以减少数据噪声。将监测点地下水位除以土层深度来识别监测点的相对地下水位,相对地下水位为 0~1(0 表示底部水位,1 表示土壤表层水位)。随后,利用时间序列相似性分析计算监测点相对地下水位与出口径流的时间序列相似性,其中利用动态时间规整(DTW)方法对时间序列进行微量的拉伸或压缩(最大调整时间为 30 min)^[20],以避免仪器检测的系统误差对相似性分析的影响。然后根据监测期间每个月的时间序列相似性对地下水监测点进行层次聚类分析,最终将 24 个地下水位监测点分为 3 个聚类簇(高水位、中水位、低水位),完成基于时间序列的分类。高水位聚类簇的平均相对地下水位为 0.629,最大和最小相对地下水位分别为 0.854、0.357;中水位聚类簇的平均

相对地下水位为 0.494,最大和最小相对地下水位分别为 0.725、0.263;低水位聚类簇的平均相对地下水位为 0.078,最大和最小相对地下水位分别为 0.297、0(表 2)。

表 2 不同聚类簇相对地下水位

Table 2 Relative groundwater level of different clusters				
水位	坡度/(°)	平均相对地下水位	最大相对地下水位	最小相对地下水位
高水位	<3.6	0.629	0.854	0.357
中水位	3.6~5.9	0.494	0.725	0.263
低水位	≥5.9	0.078	0.297	0

通过对比不同聚类簇间地形湿度指数、坡度、曲率和归一化植被指数的差异发现,不同聚类簇间的坡度差异明显(高水位聚类簇的坡度 $Slope < 3.6$ 、中水位聚类簇的坡度 $3.6 \leq Slope < 5.9$ 、低水位聚类簇的坡度 $Slope \geq 5.9$),且相互无重叠,能够有效地区分 3 个聚类簇(图 3)。因此,本研究基于聚类簇的坡度范围,将流域 85 852 个栅格点分为 3 类,完成基于地形特征的分类(图 4)。



注:图中箱体表示 75% 和 25% 的四分位数;上下须线表示最大值和最小值;箱体中实线表示中位数;箱体中数据点表示平均值。下同。

图 3 不同聚类簇 TWI、坡度、曲率和植被指数

Fig.3 Topographic wetness index (TWI), slope, curvature, and vegetation indices of different clusters

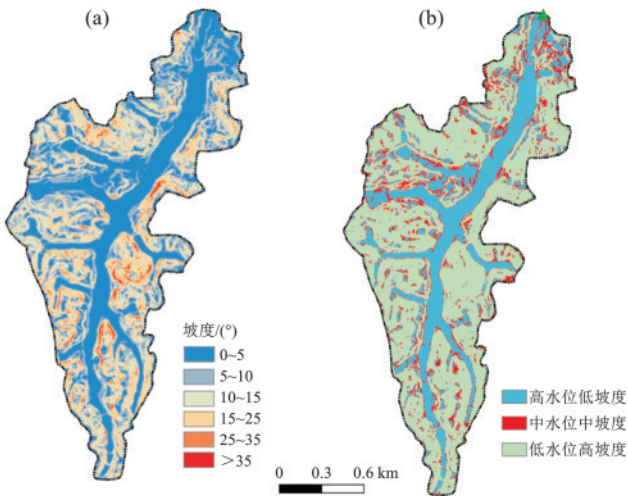


图 4 流域坡度分布和栅格点划分

Fig.4 Slope distribution and grid cell classification of watershed

最后,使用混淆矩阵评估分类结果的准确率、精确度和灵敏度,结果表明,地下水位监测点基于时间序列聚类和基于地形特征聚类的准确率为 0.71,总体评估结果良好。3 个聚类簇的精确度和灵敏度分别为 0.25~1.00 和 0.33~1.00。由于缺乏整个流域的土层深度数据,本研究根据 24 个监测点的土层深度和坡度数据进行线性拟合,以获取流域每个栅格点的土层深度。随后,计算各聚类簇的平均相对地下水位,并将平均相对地下水位分配给该聚类簇的每个栅格点。根据每个栅格点的土壤深度和相对地下水位,可以求得每个栅格点的绝对地下水位。

$$D=181.02-3.53S \ (R^2=0.48,p<0.001) \quad (2)$$

式中:D 为监测点土层深度,cm;S 为监测点坡度,(°)。

1.4 地下水文连通性的定量表征

在获取流域浅层地下水位数据的基础上,进一步采集监测点剖面的环刀样品用于测试其饱和导水率发现,土壤饱和导水率在 30 cm 土层处急剧下降。因此,将该土层作为地下水位的响应阈值,认为当某区域地下水位达到阈值时,该区域能够产生横向浅层地下流,处于水文活跃状态;当地下水位小于阈值时,则无浅层地下流产生,此区域处于水文不活跃状态。当某区域能直接连接到溪流或者能通过连续的活跃区域连接到溪流时,则该区域与溪流建立水文连通。基于以上假设,本研究应用图论方法构建流域的点线拓扑网络,所构建的网络由 85 852 个节点构成;随后使用 D8 流向算法预测浅层地下水流在节点间的流向,以此判别活跃区可否通过连续的活跃节点与溪流建立连通。活跃区与连通区的构建是由 ArcGIS 及基于 ArcGIS 的二次开发(ArcPy)实现。地下水文连通强度以流域连通区域面积占流域总面积的比例表征^[21]。

$$CS = A_c/A_t \tag{3}$$

式中: A_c 为流域连通区域面积,km²; A_t 为流域总面

积,km²;CS 为水文连通强度,在 0~1 内变化,其值越大,表明水文连通强度越高。

1.5 统计分析

使用 R 语言的 dplyr、vegan、glmm.hp 和 linkET 等程序包进行 Mantel 检验及层次分割,确定水文连通强度与降雨特征参数之间的相关关系及各降雨特征参数对水文连通强度变化的解释率,并使用 Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨事件流域地下水文连通性的变化特征

不同降雨事件间的地下水文连通强度差异显著,变异系数为 0.006~0.393(表 3)。其中,事件平均水文连通强度(CS_{mean})为 0.248~0.663,最大水文连通强度(CS_{max})为 0.259~0.906,最小水文连通强度(CS_{min})为 0.160~0.266。所有降雨事件的平均水文连通强度为 0.363,相较于降雨初期,降雨事件流域水文连通强度平均增幅达 52.35%,表明降雨显著促进流域的水文连通性。在所有事件中,E18 和 E19 的平均水文连通强度最高(分别为 0.663 和 0.546),表明在强降雨条件下更多区域与溪流之间能够建立地下水文连通。

表 3 降雨事件地下水文连通强度
Table 3 Subsurface hydrological connectivity strength under rainfall events

降雨等级	降雨事件	降雨时间 (年-月-日)	平均水文连通 强度(CS_{mean})	最大水文连通 强度(CS_{max})	最小水文连通 强度(CS_{min})	变异 系数
小雨量 小雨强	Event1	2023-06-13	0.254	0.264	0.228	0.037
	Event2	2023-06-21	0.253	0.259	0.160	0.073
	Event3	2023-06-22	0.248	0.259	0.171	0.044
	Event4	2023-07-15	0.258	0.264	0.249	0.049
	Event5	2023-07-18	0.254	0.260	0.234	0.036
	Event6	2024-04-18	0.259	0.259	0.253	0.007
	Event7	2024-04-19	0.308	0.478	0.229	0.207
	Event8	2024-04-20	0.260	0.272	0.259	0.006
中雨量 中雨强	Event9	2023-05-21	0.467	0.810	0.235	0.365
	Event10	2024-04-16	0.260	0.264	0.259	0.006
	Event11	2024-04-24	0.346	0.440	0.256	0.169
	Event12	2024-04-29	0.331	0.486	0.229	0.188
	Event13	2024-06-15	0.485	0.787	0.235	0.317
	Event14	2024-06-19	0.482	0.676	0.266	0.210
大雨量 大雨强	Event15	2023-06-20	0.332	0.635	0.229	0.377
	Event16	2023-06-24	0.474	0.785	0.256	0.320
	Event17	2024-05-11	0.419	0.599	0.258	0.261
	Event18	2024-06-17	0.663	0.860	0.259	0.153
	Event19	2024-07-27	0.546	0.906	0.253	0.393

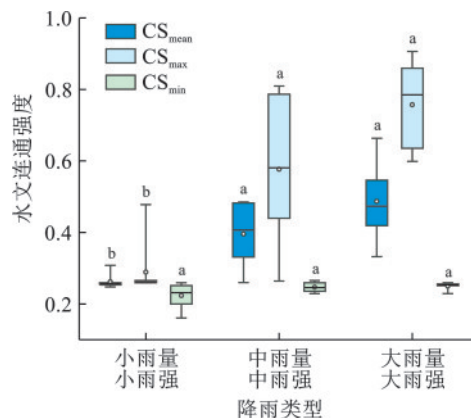
注:CS_{mean}、CS_{max}、CS_{min} 分别为基于降雨事件全过程(从降雨开始至出口水位恢复至降雨前水平)水文连通强度的平均值、最大值、最小值。
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

对于不同类型的降雨事件来说,小雨量小雨强、中雨量中雨强和大雨量大雨强事件之间的地下水文连通强度存在显著差异(图5)。其中大雨量大雨强事件的平均水文连通强度和最大水文连通强度最高,为0.487和0.757,其次为中雨量中雨强事件,其平均水文连通强度和最大水文连通强度分别为0.395和0.577;而小雨量小雨强事件中的平均水文连通强度和最大水文连通强度最小,分别为0.262和0.289。3种类型事件的最低水文连通强度相差不大,分别为0.223、0.247、0.251,表明降雨前期流域大部分区域未能与溪流建立地下水文连通,且连通区域没有明显差异。

2.2 降雨过程流域地下水文连通性的时空变化规律

流域地下水文连通强度的时序响应因降雨类型的不同而呈显著差异(图6)。本研究表明,小雨量小雨强事件(如E8)的水文连通强度对降雨的响应较为迟缓,其水文连通强度随降雨量增加而增加并达到峰值,在降雨停止后,连通强度迅速回落至事件初期水平,而流量则呈缓慢降低趋势。与之相比,中雨量

中雨强(如E14)与大雨量大雨强事件(如E19)的地下水文连通强度对降雨的响应较为迅速。这些地下水文连通强度的时序变化与流量变化一致,且维持较长时间的高连通强度。随着降雨量的减少,水文连通强度和流量逐渐降低。



注:图中不同小写字母表示不同降雨类型间差异显著($p < 0.05$)。

图5 不同类型降雨事件地下水文连通强度

Fig.5 Subsurface hydrological connectivity strength under different types of rainfall events

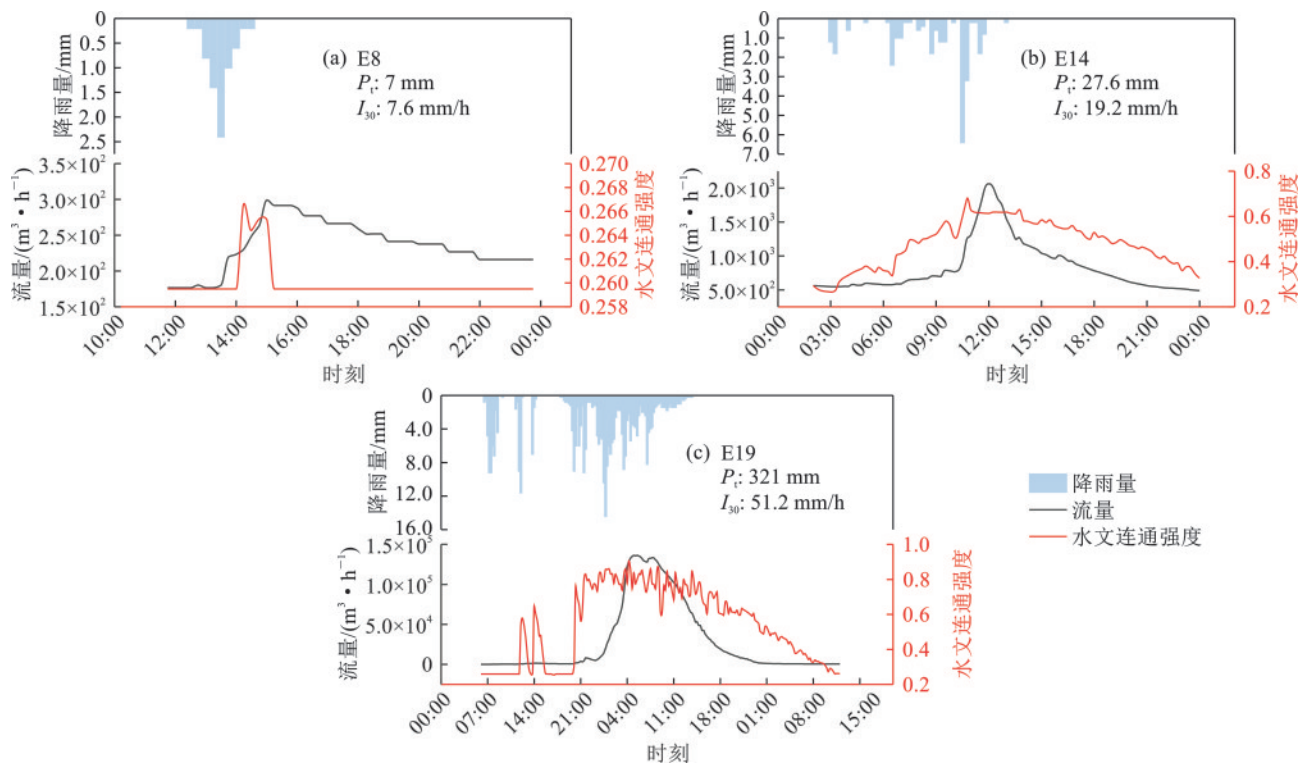


图6 典型降雨事件水文连通强度的时序变化

Fig.6 Time-series dynamics of hydrological connectivity strength during typical rainfall events

从空间分布来看,降雨初期流域的水文连通主要集中在河岸区,仅有约25.0%的区域处于水文连通状态。随着降雨的持续,水文连通区域从河岸区逐渐向山坡区扩张,连通范围随着降雨逐渐达到峰值(图7)。研究表明,不同类型降雨事件的流域水文连通空间分布差异显著。降雨量和降雨强度均较小的事件(如E8),仅河岸区与溪流建立地下水文连通,

降雨达到峰值时水文连通强度(0.272)相较于事件初期仅增加4.8%;而中雨量中雨强事件(如E14)则随着降雨达到峰值,水文连通强度达到0.676,相较于事件初期增加142.3%,此时与溪流连通的区域扩张至山坡区周围;大雨量大雨强事件(如E19),水文连通强度峰值高达0.858,此时流域仅剩14.2%的区域未与溪流建立地下水文连通。

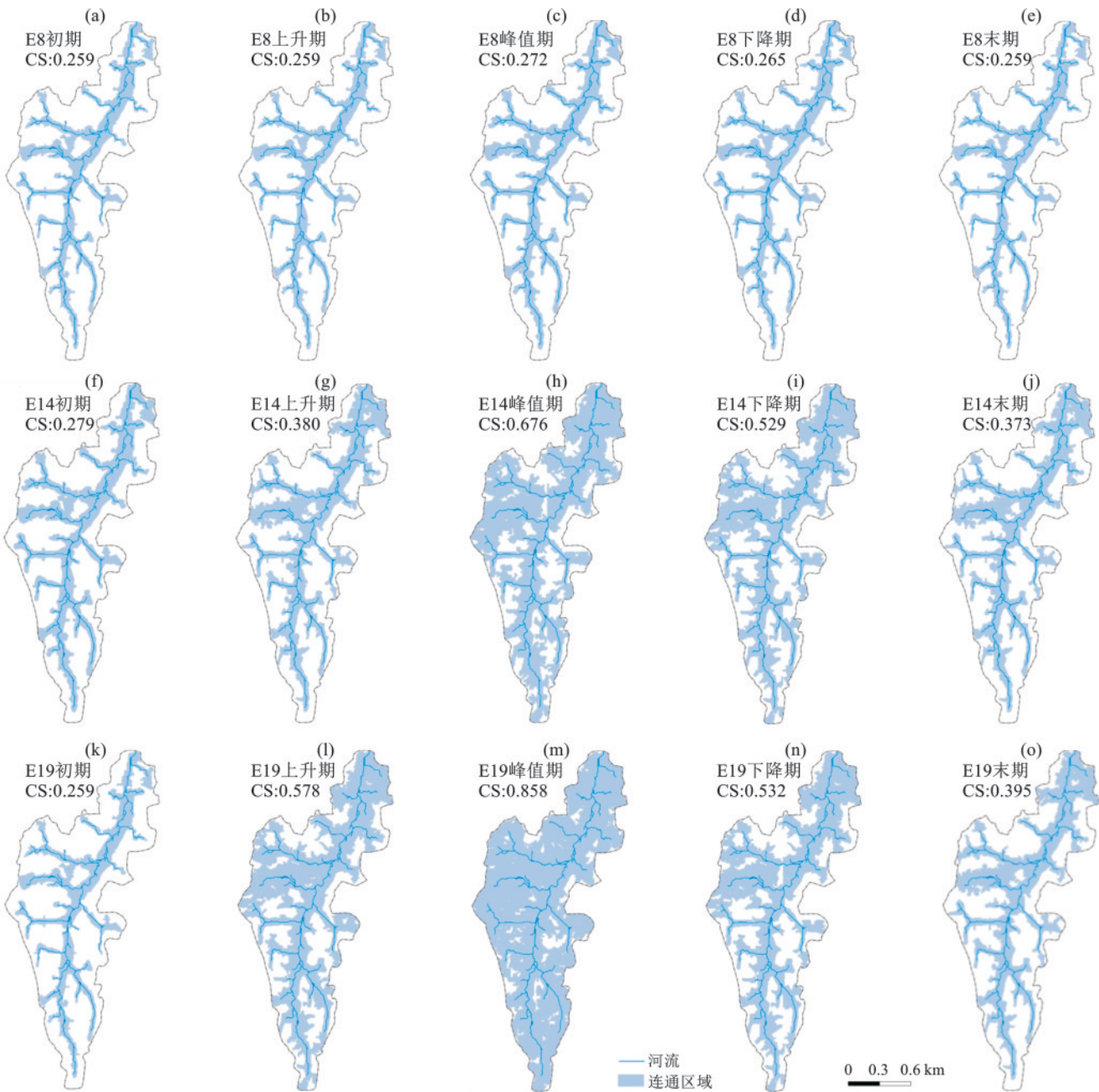


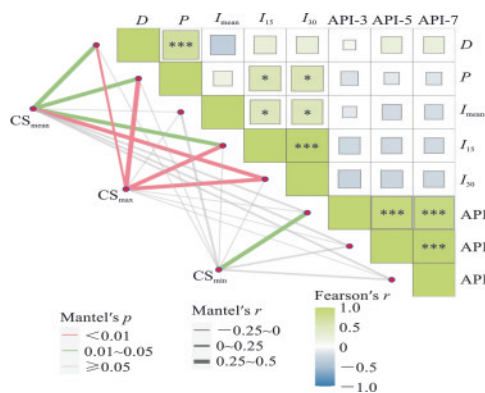
图 7 典型事件地下水文连通性的时空变化

Fig.7 Spatiotemporal variations of subsurface hydrological connectivity during typical rainfall events

2.3 流域地下水文连通性的关键影响因子

流域地下水文连通强度的动态变化与降雨特征密切相关,本研究通过 Mantel 检验进一步探究水文连通强度与降雨特征参数之间的相关关系(图 8)。结果表明,平均水文连通强度(CS_{mean})与降雨历时(D)、降雨量(P_t)、15 min 最大雨强(I_{15})均呈显著正相关($p<0.05$),与 30 min 最大雨强(I_{30})呈极显著正相关($p<0.01$)。最大水文连通强度(CS_{max})与降雨历时、降雨量、15min 和 30 min 最大雨强均呈极显著正相关($p<0.01$)。最小水文连通强度(CS_{min})仅与前 3 d 降雨指数 API-3 呈显著正相关($p<0.05$)。

通过层次分割得到各降雨特征参数对平均、最大和最小水文连通强度变化的解释率(图 9),30 min 最大雨强(I_{30})对平均水文连通强度(CS_{mean})变化的解释率最高(19.9%),其次为 15 min 最大雨强(I_{15})和降雨量(P_t),解释率分别为 15.6% 和 12.6%;类似地,30 min 最大雨强(I_{30})对最大水文连通强度(CS_{max})变化的解释率最高(20.0%),其次为 15 min 最大雨强(I_{15})和降雨量(P_t),解释率分别为 15.5% 和 12.9%;前 3 d 降雨指数 API-3 对最小水文连通强度(CS_{min})变化的解释率最高(23.9%),其次为平均雨强(I_{mean})和降雨历时(D),解释率分别为 9.8% 和 8.5%。



注: D 为降雨历时; P 为总降雨量; I_{30} 和 I_{15} 分别为 30 min 和 15 min 最大雨强; API 为前期降雨指数, API-3、API-5、API-7 分别为前 3、5、7 d 的降雨指数; * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$; *** 表示 $p < 0.001$ 。

图 8 水文连通强度与降雨特征之间的相关性

Fig.8 Correlation between hydrological connectivity strength and rainfall characteristics

3 讨论

降雨是流域地下水文连通性动态变化的关键驱动因子之一^[22-23]。本研究表明,监测期内各场次降雨事件的平均水文连通强度变化较大(0.248~0.663),反映不同降雨条件下流域水文连通范围差异显著。在整个监测期内河岸区能够长期与溪流保持连通,远端山坡区虽然在降雨驱动下可通过河岸区与溪流形成临时连通,但其连通状态持续时间普遍较短;在 19 场事件中,有 11 场观测到山坡区建立水文连通,但仅 2 场事件能维持较高的平均水文连通强度(>0.500),其余事件无法长时间维持较高的连通强度。

降雨过程中流域地下水文连通强度呈明显的时空变化特征^[24]。本研究发现,水文连通强度变化与降雨过程高度同步,主要由于流域土层较薄,降雨下渗快,水文连通强度对降雨响应迅速。尽管流量过程同样受降雨调控,但在多数事件中水文连通强度峰值早于流量峰值,与 Zuecco 等^[25]的研究结论不同,这种差异可能与流域尺度有关。在本研究区,降雨径流从整个流域输送到流域出口的时间较长,而降雨通过入渗等作用使地下水位快速响应,从而更早驱动地下水文连通性增强。类似地, Rinderer 等^[26]对 133 场降雨事件的分析也表明,约半数事件中地下水位峰值先于流量峰值。随着降雨的持续,水文连通强度逐渐增强,同时连通范围也从河岸区向山坡区扩展^[27]。例如,在本研究 E14 和 E19 中,降雨初期主要连通区局限于河岸区(分别占流域面积的 27.9% 和 25.9%),至降雨峰值期则分别扩展至 67.6% 和 85.8%。连通区域的空间延伸与流域土壤和地质条件密切相关。本研究区土壤以红壤为主,土壤饱和和导水率在 30 cm 土层处显著下降,形成的相对不透水层,驱动横向浅层地下流的产生,从而促进水文连通性的快速建立。从地质条件来看,流域下伏基岩风化壳厚度存在明显的空间差异。河岸区风化层较厚,具有较强的水分调蓄能力,能够在降雨过程中持续释放补给浅层地下水,维持连通状态的持续性;而山坡区风化层较薄,表现为快速饱和与快速退水,连通状态较为短暂^[23,28]。

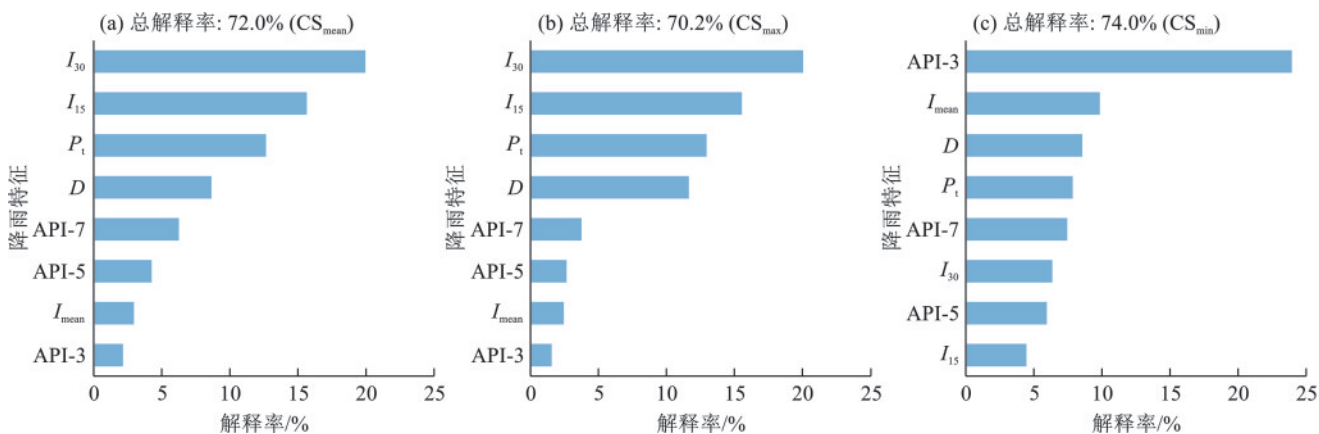


图 9 降雨特征对地下水文连通强度变化的解释率

Fig.9 Variation in subsurface hydrological connectivity strength explained by rainfall characteristics

降雨是流域地下水文连通强度变化的主要影响因素,其中平均及最大水文连通强度(CS_{mean} 、 CS_{max})受降雨量、降雨历时及 15、30 min 最大降雨强度的影响显著。降雨量和降雨强度越大,水文连通强度越高,大雨量大雨强事件的 CS_{mean} 和 CS_{max} 分别是小雨量小雨强事件的 1.86、2.62 倍,说明只有当降雨量超

过一定阈值后,水文连通强度才显著提升^[29]。前期降雨条件也影响水文连通强度^[19],湿润的前期条件有利于土壤蓄水与水位抬升,从而促进水文连通形成。本研究进一步表明,最小水文连通强度(CS_{min})受前 3 d 降雨指数(API-3)的影响。然而,前期降雨对 CS_{mean} 和 CS_{max} 的作用并不显著,可能是因为高强

度的降雨削弱前期降雨的作用^[30],与Castillo等^[31]和许珂^[32]的研究结果一致,前期土壤水分条件是调控弱降雨事件水文连通强度的关键变量。

4 结论

1)3类降雨事件间流域地下水文连通强度差异显著:平均与最大连通强度均表现为大雨量大雨强>中雨量中雨强>小雨量小雨强,而最小连通强度在3类事件间无显著差异(0.223、0.247、0.251),表明降雨前流域内大部分区域普遍未形成有效的水文连通。

2)地下水文连通性对降雨的动态响应因事件类型而异。小雨量小雨强事件响应缓慢,连通范围主要局限于河岸区(24.8%~30.8%);中雨量中雨强与大雨量大雨强事件响应迅速,连通范围可迅速从河岸区扩展至远端山坡区,峰值时流域连通面积占比最高可达90.6%。

3)降雨特征是调控水文连通强度的关键因子之一。平均与最大水文连通强度主要受降雨量、降雨历时及峰值雨强(I_{15} , I_{30})的正向驱动;最小水文连通强度则主要取决于前期降雨条件(前3d降雨指数API-3)。

参考文献:

- [1] 詹寿东,李朝阳,欧丁丁,等.粤港澳大湾区湿地景观格局演变驱动下的水文连通性变化[J].湿地科学与管理,2025,21(6):42-47.
Zhan Shoudong, Li Chaoyang, Ou Dingding, et al. The changes in hydrological connectivity driven by wetland landscape pattern evolution in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. Wetland Science and Management, 2025, 21(6): 42-47.
- [2] Wang Jian, Li Xiao, Li Yan, et al. Transport pathways of nitrate in stormwater runoff inferred from high-frequency sampling and stable water isotopes[J]. Environmental Science and Technology, 2024: e4c02495.
- [3] 李镇,王婧雯,李瑶,等.黄河三角洲横向水文连通动态过程及其土壤影响因子[J].湿地科学,2025,23(5): 888-896.
Li Zhen, Wang Jingwen, Li Yao, et al. Dynamic processes of lateral hydrological connectivity in the Yellow River delta and its soil influence factors[J]. Wetland Science, 2025, 23(5): 888-896.
- [4] 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.
Wang Fa, Fu Zhiyong, Chen Hongsong, et al. Characteristics of preferential flow in soil of abandoned farmland

and cultivated land of karst depression[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 111-116.

- [5] Beiter D, Weiler M, Blume T. Characterising hillslope-stream connectivity with a joint event analysis of stream and groundwater levels[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(12): 5713-5744.
- [6] McDonough O T, Lang M W, Hosen J D, et al. Surface hydrologic connectivity between Delmarva bay wetlands and nearby streams along a gradient of agricultural alteration[J]. Wetlands, 2015, 35(1): 41-53.
- [7] Xu Qian, Jiao Juying, Yan Zeng, et al. Response of road erosion to hydrological connectivity under a heavy rain-storm in an agricultural watershed on the Loess Plateau [J]. Catena, 2024, 240: e107991.
- [8] 高玉琴,肖璇,丁鸣鸣,等.基于改进图论法的平原河网水系连通性评价[J].水资源保护,2018,34(1):18-23.
Gao Yuqin, Xiao Xuan, Ding Mingming, et al. Evaluation of plain river network hydrologic connectivity based on improved graph theory [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 18-23.
- [9] Nguyen C, Daly E, Pauwels V R N. A dynamic connectivity metric for complex river wetlands [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e127163.
- [10] Deng Chun, Jiang Xiaohui, Tan Zhuting, et al. Spatio-temporal variation of hydrological connectivity and its threshold effects on flood dynamics: An examination in the arid and semi-arid regions, China [J]. Science of the Total Environment, 2024, 935: e173406.
- [11] Sun Cheng, Chen Lei, Zhu Hui, et al. New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an agriculture-intensive catchment [J]. Water Research, 2021, 196: e117015.
- [12] Fang Siqian, Chen Min, Li Jia, et al. Evaluation and optimization of urban hydrological connectivity based on graph theory: A case study in Chengdu, China [J]. Ecological Informatics, 2024, 82: e102749.
- [13] Xiao H B, Zhou C, Hu X D, et al. Subsurface hydrological connectivity controls nitrate export flux in a hilly catchment [J]. Water Research, 2024, 253: e121308.
- [14] Gomi T, Sidle R C, Ueno M, et al. Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central Japan [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361(3/4): 275-290.
- [15] Masselink R J H, Heckmann T, Temme A J A M, et al. A network theory approach for a better understanding of overland flow connectivity [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(1): 207-220.
- [16] Zhang Jun, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al.

- Towards hydrological connectivity in the karst hillslope critical zone: Insight from using water isotope signals[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: e128926.
- [17] Wang Sheng, Yan Yan, Zhao Yinjun, et al. Co-evolution among soil thickness, epikarst weathering degree, and runoff characteristics on a subtropical karst hillslope [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628: e130499.
- [18] 廖强, 员明, 胡惠方. 南方低山丘陵区水系连通及水美乡村建设经验与思考[J]. *水利规划与设计*, 2023(2): 1-4.
Liao Qiang, Yun Ming, Hu Huifang. Experience and thinking in water system connection and water-beauty village development in low mountain and hilly area of south China [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2023 (2): 1-4.
- [19] Moreno-de-las-Heras M, Merino-Martín L, Saco P M, et al. Structural and functional control of surface-patch to hillslope runoff and sediment connectivity in Mediterranean dry reclaimed slope systems [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(5): 2855-2872.
- [20] Rinderer M, van Meerveld H J, McGlynn B L. From points to patterns: Using groundwater time series clustering to investigate subsurface hydrological connectivity and runoff source area dynamics [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(7): 5784-5806.
- [21] 周晨. 亚热带丘陵小流域地下水文连通性变化及其对硝酸盐输出的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
Zhou Chen. Changes in subsurface hydrological connectivity and its effects on nitrate output in subtropical hilly small catchments [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [22] 舒胡佳, 扈晓碟, 肖海兵, 等. 降雨驱动下流域硝酸盐输出的变化特征[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(3): 53-60.
Shu Hujia, Hu Xiaodie, Xiao Haibing, et al. Variation characteristics of watershed nitrate export driven by rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39 (3): 53-60.
- [23] Han Xiaole, Liu Jintao, Srivastava P, et al. Effects of critical zone structure on patterns of flow connectivity induced by rainstorms in a steep forested catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: e125032.
- [24] Covino T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks [J]. *Geomorphology*, 2017, 277: 133-144.
- [25] Zuecco G, Rinderer M, Penna D, et al. Quantification of subsurface hydrologic connectivity in four headwater catchments using graph theory [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 1265-1280.
- [26] Rinderer M, van Meerveld I, Stähli M, et al. Is groundwater response timing in a pre-Alpine catchment controlled more by topography or by rainfall? [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(7): 1036-1051.
- [27] Calsamiglia A, Gago J, Garcia-Comendador J, et al. Evaluating functional connectivity in a small agricultural catchment under contrasting flood events by using UAV [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45 (4): 800-815.
- [28] Xiao H B, Xu K, Zhan Y M, et al. Physical structure and rainfall controls on subsurface hydrological connectivity in hillslope-riparian-stream continuums [J]. *Catena*, 2022, 214: e106286.
- [29] Yang Jun, Chu Xuefeng. Quantification of the spatio-temporal variations in hydrologic connectivity of small-scale topographic surfaces under various rainfall conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 65-77.
- [30] Penna D, Tromp-van Meerveld H J, Gobbi A, et al. The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an Alpine headwater catchment [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(3): 689-702.
- [31] Castillo V M, Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1/2/3/4): 114-130.
- [32] 许珂. 山坡-河岸-溪流水文连通性的变化规律及其影响机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
Xu Ke. Variation properties and influencing mechanisms of hydrological connectivity in hillslope-riparian-stream continuums [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.