

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.012

李珠宇, 李志成, 徐贵迁, 等. 干热河谷冲沟系统土壤团聚体对优先路径的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 304-315.

LI Zhuyu, LI Zhicheng, XU Guiqian, et al. Effect of soil aggregate on preferential path in gully system of dry-hot valley[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 304-315.

## 干热河谷冲沟系统土壤团聚体对优先路径的影响

李珠宇<sup>1</sup>, 李志成<sup>1</sup>, 徐贵迁<sup>1</sup>, 段旭<sup>1,2</sup>, 张广贺<sup>1</sup>, 赵洋毅<sup>1,2</sup>

(1.西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2.国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224)

**摘要:** [目的] 为探究金沙江干热河谷冲沟系统土壤团聚体结构对优先路径形成的影响, 深化对冲沟系统土壤水分和溶质运移的认识。[方法] 选取金沙江干热河谷活跃和稳定冲沟不同部位(集水区、沟头、沟床和沟底)为研究对象, 基于染色示踪和形态学图像解析技术, 提取土壤水平剖面优先路径。采用 RDA、灰色关联和耦合协调度等分析方法探究土壤团聚体结构与优先路径的关系。[结果] (1) 稳定冲沟土壤团聚体稳定性高于活跃冲沟。除个别土层外, 活跃冲沟  $>0.25$  mm 机械稳定性团聚体 ( $DR_{0.25}$ )、水稳定性团聚体 ( $WR_{0.25}$ )、平均质量直径 (MWD) 含量均显著小于稳定冲沟 ( $p < 0.05$ )。团聚体破坏率 (PAD) 和不稳定团粒指数 ( $E_{LT}$ ) 则呈相反趋势。冲沟系统由集水区向沟底延伸, 土壤大团聚体占比减少, 团聚体稳定性下降。(2) 活跃冲沟优先路径数量和连通性优于稳定冲沟, 冲沟系统由集水区向沟底延伸优先路径连通性变差。各部位以  $>10$  mm 优先路径为主要通道。活跃冲沟 Simpson 指数较稳定冲沟增加 3.12%, 不同径级的优先路径丰富度高于稳定冲沟。(3) 优先路径的形成和分布受土壤团聚体稳定性的影响, MWD 和  $WR_{0.25}$  与优先路径数量达到极强关联且影响最为显著 ( $p < 0.01$ )。(4) 冲沟系统由集水区向沟底延伸, 土壤团聚体结构与优先路径的耦合协调性降低, 整体上表现为沟头  $>$  集水区  $>$  沟底  $>$  沟床。[结论] 土壤团聚体结构是优先路径形成的重要驱动因素之一, 优先路径的分布对干热河谷冲沟系统发育具有重要影响。

**关键词:** 干热河谷; 冲沟系统; 优先路径; 团聚体结构

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0304-12

## Effect of Soil Aggregate on Preferential Path in Gully System of Dry-hot Valley

LI Zhuyu<sup>1</sup>, LI Zhicheng<sup>1</sup>, XU Guiqian<sup>1</sup>, DUAN Xu<sup>1,2</sup>, ZHANG Guanghe<sup>1</sup>, ZHAO Yangyi<sup>1,2</sup>

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. National Forestry Observation and Research Station of Yuxi Forest Ecosystem,

National Forestry and Prairie Bureau, Kunming 650224, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the impact of soil aggregate structure on the formation of preferential pathways in the gully system of the dry-hot valley of the Jinsha River to enhance our understanding of soil moisture and solute transport in the gully system. [Methods] We selected different sections (i.e., catchment area, gully head, gully bed, and gully bottom) of both active and stable gullies in the dry-hot valley of the Jinsha River as our research subjects. We used staining tracers and morphometric image analysis techniques to extract the preferential pathways from the soil level profile. RDA (Redundancy Analysis), gray correlation, and coupled coordination were used to explore the relationship between soil aggregate structure and preferential pathways. [Results] (1) The stability of soil aggregates in stable gullies were higher than those in active gullies. Except for specific soil layers, the contents of mechanically stable aggregates ( $>0.25$  mm,  $DR_{0.25}$ ), water-stable aggregates ( $>0.25$  mm,  $WR_{0.25}$ ) and average mass diameter (MWD) in active gully were significantly lower than those in the stable gully ( $p < 0.05$ ). The aggregate destruction rate (PAD) and unstable aggregate index ( $E_{LT}$ ) showed the opposite trend. As the gully system extends from the

收稿日期: 2023-07-04

修回日期: 2023-09-10

录用日期: 2023-10-08

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-01-16

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42067005); 云南省农业联合专项面上项目 (202101BD070001-075); 云南省基础研究计划面上项目 (202001AT070136); 云南省青年人才专项 (YNWR-QNBJ-2019-215, YNWR-QNBJ-2019-226); 云南省自然生态监测网络项目 (2022-YN-13)

第一作者: 李珠宇 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1040357539@qq.com

通信作者: 赵洋毅 (1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与恢复生态研究。E-mail: yyz301@foxmail.com

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

catchment towards the gully bottom, the fraction of large soil and the stability of aggregates all decreased. (2) The number and connectivity of preferential pathways in active gullies were higher than those in stable gullies. However, the connectivity of the preferential pathways in the gully system deteriorated as it extended from the catchment to the bottom of the gully. The preferential pathways with a diameter  $>10$  mm served as primary channel. The Simpson index of active gullies exhibited an increase by 3.12% compared to stable gullies, indicating a higher richness of preferential pathways across different diameter classes. (3) The formation and distribution of preferential pathways were affected by the stability of soil aggregates, and MWD and  $WR_{0.25}$  were strongly correlated with the number of preferential pathways and had the most significant influence ( $p < 0.01$ ). (4) As the gully system extended from the catchment to the bottom of the gully, the coupling coordination between the soil aggregate structure and the preferential pathways decreased. Overall, the order of performance was as follows: gully head  $>$  catchment area  $>$  gully bottom  $>$  gully bed. [Conclusion] Soil aggregate structure is an of the important driving factors for the formation of preferential paths, and the distribution of preferential paths has significant impact on the development of gully systems in dry-hot valleys.

**Keywords:** dry-hot valley; gully system; preferential pathways; aggregate structure

Received: 2023-07-04

Revised: 2023-09-10

Accepted: 2023-10-08

Online(www.cnki.net): 2024-01-16

金沙江干热河谷属于我国西南典型的生态环境脆弱区<sup>[1]</sup>,在地形、气候、植被以及人类活动等因素的综合作用下,该区域地形破碎,溯源侵蚀强烈,冲沟系统发育极为显著,一方面加剧坡面侵蚀程度,另一方面导致土地资源严重退化,对流域生态安全构成极大威胁<sup>[2-4]</sup>。优先流作为土壤水分和溶质运移的特殊形式,在冲沟系统发育过程中起到重要作用<sup>[5-6]</sup>,是导致区域滑坡、塌陷、沟岸侵蚀、土壤水分失衡和土壤结构破坏等问题的直接因素<sup>[7-10]</sup>。优先流的形成及运动特征受优先路径的影响,产生的通道破坏原有的土壤结构,而水分和溶质沿优先路径快速移动,加快土壤颗粒的迁移,增加土壤紧实度,从而导致土壤稳定性下降<sup>[11]</sup>。有研究<sup>[12]</sup>表明,土壤质地和结构的空间异质性是优先路径形成的基础,对优先路径发育起到决定作用。因此,探析土壤结构与优先路径的关系对于缓解土地退化以及冲沟系统治理研究具有十分重要的意义。

针对优先路径的形成及空间分布问题,多年来一直受到国内外学者的广泛关注。相关研究<sup>[13-14]</sup>证实,土壤性质以及外部环境等因素都对优先路径的数量、组成及分布产生重要影响;JARVIS等<sup>[15]</sup>引入概念模型对优先路径的影响因素进行研究发现,土壤结构和土壤颗粒变化致使其他土壤性质发生变化,而这些变化受多个变量的影响,且每个变量对优先路径的影响程度各不相同。优先路径的形成与土壤孔隙的数量、形态以及分布有着密切联系,土壤黏粒含量越高孔隙结构越显著,优先流现象越明显<sup>[16]</sup>。土壤团聚体作为衡量土壤结构与性质优劣的关键指标,其稳定性和粒径分布对优先路径的形成具有重要影响,因此

引起国内外学者的广泛关注和研究。王佩佩等<sup>[17]</sup>基于SEM结构方程模型分析黄土丘陵区典型坡面土壤优先流特征发现,优先流染色面积比受团聚体的直接影响;卢华兴等<sup>[18]</sup>则通过灰色关联分析进一步证实土壤团聚体结构是影响优先路径形成的主要因素。此外,前人<sup>[19-20]</sup>研究还指出,相比于基质流区,土壤团聚体含量在优先流区更高,土壤抗侵蚀能力更强。综上所述,优先路径的形成及空间分布与土壤团聚体结构密切相关,而干热河谷冲沟系统强烈的土壤侵蚀过程,导致土壤层的剥蚀和破坏。这些土壤侵蚀过程加速土壤团聚体的破碎和流失,可能进一步促进优先路径的形成。

冲沟系统发育受降雨强度、地表覆盖和土壤结构、地形坡度以及时间尺度等多种因素的综合影响<sup>[3,6]</sup>。特殊的水热条件致使冲沟系统发生剧烈的溯源侵蚀,进而引起沟头前进、沟壁崩塌和沟床下切,造成泥沙流失严重,土壤稳定性下降<sup>[21]</sup>。金沙江干热河谷冲沟系统因发育规模大,动力过程复杂,监测困难,一直是沟蚀研究的焦点和难点<sup>[22]</sup>。优先路径的存在加快土壤水分和溶质的运移,进一步破坏土壤结构,加剧冲沟的土壤侵蚀,造成冲沟系统发育的恶性循环。随着研究的深入,已有学者<sup>[6,23-24]</sup>对干热河谷冲沟系统集水区优先流特征、优先流影响下的土壤力学特性以及可蚀性进行初步的探索,但有关干热河谷冲沟系统土壤团聚体结构与优先路径的关系研究还鲜有报道,冲沟系统土壤团聚体结构对优先路径的形成和分布有何影响还尚未明确。

因此,本研究以金沙江干热河谷冲沟系统不同部位(集水区、沟头、沟床和沟底)的土壤为研究对象,分

析冲沟系统土壤团聚体结构和优先路径特征,探讨不同发育期冲沟系统对土壤团聚体结构和优先路径的影响,揭示冲沟系统土壤团聚体结构与优先路径的关系,以期为干热河谷冲沟系统侵蚀机理研究提供一定的理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于云南省元谋金雷水土保持科技示范园试验区(101°49′31″E,25°51′15″N),属典型的南亚热带季风气候<sup>[25]</sup>。气候干热,雨量集中,干湿季分明。年平均气温 21.9℃,最高气温达 42.1℃。年平均日照时间 2 664.5 h,坝区全年无霜期达 360 天,年平均降水量 613 mm,潜在蒸发量高达 3 847 mm,是降水量的 5~6 倍。雨季时间为 6—10 月,占全年降水量的 80%以上,持续的强降雨为冲沟系统发育提供必要的动力条件<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀速率约为  $1.64 \times 10^4$

t/(km<sup>2</sup>·a),冲沟平均分布密度为 4.6 km/km<sup>2</sup>,最大密度为 7.5 km/km<sup>2</sup>。该地区自然植被类型为稀树灌草地,植被生长较差,森林覆盖率约为 3.4%~6.3%,部分区域甚至呈现荒裸状态<sup>[22]</sup>。土壤类型主要为燥红土和变性土,是海拔 1 356 m 以下河谷地区的基带土壤,占干热河谷总面积的 56.7%<sup>[26]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地布设

依据沟头跌坎高差、沟头宽深比、集水区和沟床植被盖度等判别标准<sup>[27]</sup>,在研究区内选取活跃和稳定冲沟各 3 条,沿沟道方向按 10 m 间距在每条冲沟的集水区、沟头、沟床和沟底各布设 1 块 10 m×15 m 的样地,共 24 个样地作为试验区。并在每个试验区设置 3 个试验点,用于开展染色示踪试验和土壤样品采集,样地基本概况见表 1。

表 1 研究区样地基本概况

Table 1 Basic overview of sample plots in the study area

| 冲沟类型   | 沟头跌坎高度/m | 坡度/(°) | 海拔/m    | 主要植物种                                | 植被盖度/% |
|--------|----------|--------|---------|--------------------------------------|--------|
| 活跃冲沟 1 | 1.50     | 8~28   | 1109.53 |                                      | 43     |
| 活跃冲沟 2 | 1.80     | 5~23   | 1096.19 | 银合欢( <i>Leucaenaleucocephala</i> )、  | 46     |
| 活跃冲沟 3 | 1.65     | 6~25   | 1092.43 | 车桑子( <i>Dodonaea viscosa</i> )、      | 45     |
| 稳定冲沟 1 | 0.50     | 7~17   | 1097.43 | 扭黄茅( <i>Heteropogon contortus</i> )、 | 72     |
| 稳定冲沟 2 | 0.60     | 6~20   | 1094.57 | 橘草( <i>Cymbopogon goeringii</i> )等   | 68     |
| 稳定冲沟 3 | 0.62     | 7~19   | 1096.76 |                                      | 74     |

### 2.2 染色示踪试验与样品采集

于 2021 年 7—12 月开展试验。染色试验前首先去除样地表层枯落物、植物和砾石等杂物,再将金属框(80 cm×80 cm×50 cm)垂直埋入土中 30 cm,并用橡胶锤夯实金属框内壁 5 cm 以内的土壤。配置 4 g/L 亮蓝溶液 25 L(模拟当地暴雨强度 60 mm/h)均匀喷洒在金属框内,并用防水布覆盖。24 h 后,揭开防水布取出铁框。考虑金属框周围区域可能受水分侧流等因素影响,选择中心区域 50 cm×50 cm 土体进行逐层开挖,以垂直方向 10 cm 为 1 层挖掘水平剖

面,本试验最大开挖深度为 50 cm,开挖过程中采用相机遮光拍摄剖面图像。同时,以 10 cm 为间隔在 0—50 cm 土层,使用 100 cm<sup>3</sup> 标准环刀分层采集原状土样,每层取 3 次重复。同时采用 5 点取样法分层采集混合土样,用于测定土壤基本理化性质和土壤团聚体等。

参照《中华人民共和国林业行业标准 LY/T—1999》,采用环刀法测定土壤容重和总孔隙度<sup>[11]</sup>;采用激光粒度仪测定土壤机械组成<sup>[19]</sup>;采用硫酸—重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量<sup>[12]</sup>(表 2)。

表 2 不同发育期冲沟系统土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties of gully system at different development stages

| 冲沟部位 | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 总孔隙度/<br>%  | 有机质/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | pH         | 土壤机械组成/%    |             |             |
|------|------------------------------|-------------|-------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|      |                              |             |                               |            | 黏粒          | 粉粒          | 砂粒          |
| W—A  | 1.63±0.05a                   | 34.36±3.48a | 5.56±2.86a                    | 8.16±0.17a | 9.67±0.75a  | 52.56±3.08a | 35.19±1.58c |
| W—B  | 1.61±0.06a                   | 37.72±4.22a | 3.18±1.65a                    | 7.80±0.23b | 7.96±0.19b  | 54.31±4.60a | 46.54±1.46b |
| W—C  | 1.56±0.07b                   | 32.93±3.76a | 2.28±1.11a                    | 8.12±0.20a | 7.99±0.41b  | 33.47±4.18b | 51.78±5.59b |
| W—D  | 1.57±0.08b                   | 37.67±2.36a | 3.29±2.16a                    | 7.48±0.08c | 5.82±0.35c  | 30.55±3.42b | 57.16±3.34a |
| H—A  | 1.63±0.09a                   | 34.43±2.31a | 15.26±2.26a                   | 7.65±0.23a | 11.19±0.92a | 45.46±1.36b | 35.70±1.77b |
| H—B  | 1.67±0.03a                   | 29.47±3.03a | 5.48±3.81b                    | 7.63±0.29a | 9.46±0.53b  | 55.13±1.21a | 36.44±2.47b |
| H—C  | 1.57±0.09b                   | 34.64±4.56a | 3.88±2.47b                    | 6.41±0.14c | 5.18±0.25c  | 40.23±5.48c | 61.34±8.34a |
| H—D  | 1.50±0.07b                   | 20.21±4.12b | 2.89±1.64b                    | 7.08±0.18b | 5.42±0.92c  | 36.96±3.06c | 63.71±7.31a |

注:H 为活跃期冲沟;W 为稳定期冲沟;A 为集水区;B 为沟头;C 为沟床;D 为沟底;H—A 表示活跃期冲沟集水区;表中数据为平均值±标准差;同一列中不同小写字母表示同一指标不同部位间的差异性( $p<0.05$ )。



### 2.3 优先路径提取

使用 Photoshop CC 2018 软件对染色图像进行几何校正、颜色替换、降噪、灰度调节等处理,获取土壤水平剖面黑白两色图像,用 Image Pro Plus 6.0 软件对所得图像进行分割与二值化处理,再将其转置为数据矩阵,提取优先路径数量。利用 Surfer 15 软件对数据矩阵进行处理,得到不同径级的优先路径位置分布。

### 2.4 土壤团聚体测定

土壤团聚体粒径组成测定参照《中华人民共和国林业行业标准 LY/T—1999》,采用干筛法,获取 5 个粒级( $<0.25$ ,  $0.25\sim0.5$ ,  $0.5\sim1$ ,  $1\sim2$ ,  $>2$  mm)土壤团聚体,按比例将各土样配成 50.00 g,采用湿筛法测定水稳定性团聚体含量。用  $>0.25$  mm 机械稳定性团聚体 ( $DR_{0.25}$ ) 和  $>0.25$  mm 水稳定性团聚体 ( $WR_{0.25}$ )<sup>[28]</sup>、平均质量直径(MWD)<sup>[29]</sup>、不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )<sup>[30]</sup>、团聚体结构破坏率(PAD)<sup>[31]</sup>等特征参数评价土壤团聚体稳定性。

### 2.5 数据分析与处理

#### 2.5.1 土壤团聚体稳定性指标计算

$>0.25$  mm 机械稳定性团聚体含量( $DR_{0.25}$ )计算公式为:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

$>0.25$  mm 水稳定性团聚体含量( $WR_{0.25}$ )计算公式为:

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

团聚体平均质量直径(MWD)计算公式为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times d_i)}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (3)$$

团聚体破坏率(PAD)计算公式为:

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )计算公式:

$$E_{LT} = \frac{W_T - WR_{0.25}}{W_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $d_i$ 为第*i*粒级机械稳定性团聚体质量百分比(%); $w_i$ 为第*i*粒级水稳性团聚体质量百分比(%); $x_i$ 为第*i*粒级团聚体的平均直径(mm); $W_T$ 为供试土壤的总质量(g)<sup>[30]</sup>。

2.5.2 土壤优先路径丰富度计算 采用 Simpson 指数来表征优先路径的丰富程度<sup>[32]</sup>,计算公式为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{N_i}{N} \right)^2 \quad (6)$$

式中: $D$ 为 Simpson 指数( $i=1, 2, \dots, m$ ); $m$ 为优先

路径影响半径范围个数; $N$ 为土壤空间中全部优先路径个体总数。

使用 Excel 2019 软件对数据进行统计整理和分析;利用 Photoshop CC 2018、Image Pro Plus 6.0、Surfer 15 等软件对水平剖面染色图像进行处理;用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行 Duncan 差异性分析、双因素方差分析;通过 Origin 2021 软件作图;利用 Canoco 5.0 软件对数据进行冗余分析,用 SPSS PRO 软件进行灰色关联分析和耦合协调性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同发育期冲沟系统土壤团聚体结构特征

3.1.1 土壤团聚体数量特征  $>0.25$  mm 土壤颗粒作为土壤中的最佳粒级,其数量与土壤质量密切相关<sup>[33]</sup>。从图 1 可以看出,不同发育期冲沟在不同土层的大团聚体( $>0.25$  mm)含量各有差异。稳定冲沟 4 个部位  $DR_{0.25}$  为 74.29%~97.36%,依次为沟头>集水区>沟底>沟床,除沟床和沟底个别土层,同一土层不同部位间差异显著( $p<0.05$ );通过湿筛法处理得到  $WR_{0.25}$  含量低于干筛法处理,为 57.87%~89.87%。沟头  $WR_{0.25}$  含量较集水区、沟底和沟床分别增长 7.55%, 24.16%, 34.04%。除沟床和沟底个别土层,同一土层不同部位间差异显著( $p<0.05$ )。4 个部位  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  均随土层深度的增加呈下降趋势。

活跃冲沟 4 个部位  $DR_{0.25}$  为 70.33%~96.96%,  $WR_{0.25}$  为 41.70%~73.13%,从大到小均为集水区>沟头>沟底>沟床,除沟床和沟底个别土层,同一土层不同部位间差异显著( $p<0.05$ )。集水区和沟头  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  均随土层深度的增加呈减少的趋势,而沟床和沟底随土层深度增加  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  出现先下降再上升的趋势。活跃冲沟 4 个部位  $WR_{0.25}$  含量均小于稳定冲沟,比稳定冲沟 4 个部位分别显著减少 16.64%, 30.60%, 30.78%, 28.11% ( $p<0.05$ )。

3.1.2 土壤团聚体稳定性特征 双因素方差分析(表 3)结果显示,冲沟类型和部位对团聚体稳定性产生的影响不同,冲沟类型和部位对 MWD 和  $E_{LT}$  影响极显著( $p<0.01$ ),冲沟类型对 PAD 影响极显著( $p<0.01$ ),二者的交互作用对 PAD 影响显著( $p<0.05$ ),对 MWD 和  $E_{LT}$  影响不显著。

由表 3 可知,稳定冲沟沟头 MWD 显著高于其他部位( $p<0.05$ ),依次为沟头>集水区>沟底>沟床。除沟床和沟底个别土层,同一土层不同部位间均差异显著( $p<0.05$ ),而 PAD、 $E_{LT}$  与 MWD 则呈相反趋势,表现为沟床>沟底>集水区>沟头。活跃冲沟各部位 MWD、PAD 和  $E_{LT}$  变化规律与稳定冲沟基本一

致。稳定冲沟 MWD 较活跃冲沟增加 32.66%，PAD 和  $E_{LT}$  较活跃冲沟分别减少 50.04% 和 42.02%。不

同发育期冲沟集水区和沟头 MWD 均随土层增加而减小，PAD 和  $E_{LT}$  均随土层加深而增大。

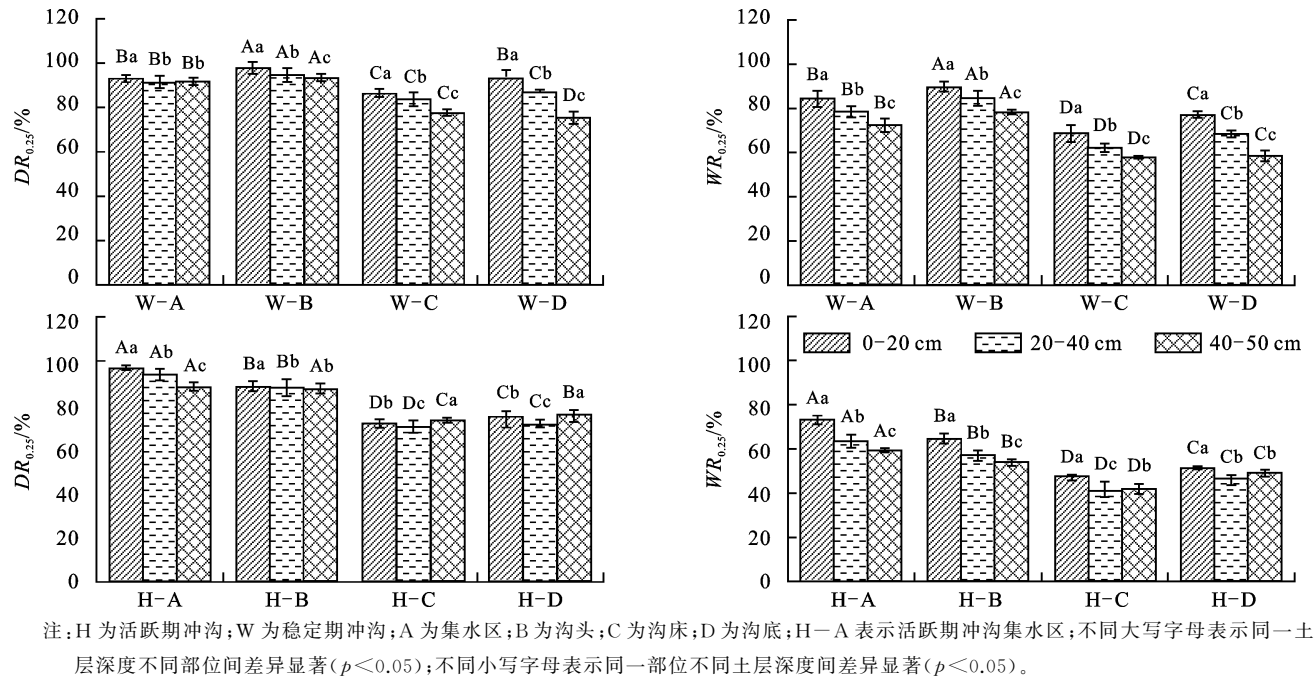


图 1 不同发育期冲沟系统  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  含量

Fig. 1 Content of  $DR_{0.25}$  and  $WR_{0.25}$  in gully system at different development stages

表 3 不同发育期冲沟系统土壤团聚体稳定性特征

| 冲沟类型    | MWD/mm      |             |             | PAD/%        |              |              | $E_{LT}/\%$  |              |              |
|---------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|         | 0—20 cm     | 20—40 cm    | 40—50 cm    | 0—20 cm      | 20—40 cm     | 40—50 cm     | 0—20 cm      | 20—40 cm     | 40—50 cm     |
| W-A     | 2.97±0.14Ba | 2.83±0.15Bb | 2.69±0.06Bc | 9.50±4.56Cb  | 13.60±3.67Cb | 19.56±2.67Ca | 15.76±3.66Cc | 21.54±2.48Cb | 27.61±3.03Ba |
| W-B     | 3.30±0.12Aa | 3.13±0.1Ab  | 2.67±0.04Ac | 7.62±3.51Cb  | 9.99±4.85Da  | 15.40±0.82Ca | 10.13±2.20Dc | 15.42±3.37Db | 21.62±1.04Ca |
| W-C     | 1.41±0.17Db | 1.83±0.39Ca | 1.35±0.11Cc | 19.92±4.54Aa | 24.97±3.94Aa | 24.99±1.17Aa | 31.35±3.85Ac | 37.90±1.93Ab | 42.13±0.69Aa |
| W-D     | 1.85±0.26Cb | 1.93±0.31Ca | 1.51±0.05Cc | 16.77±2.98Bb | 21.03±2.20Ba | 20.69±4.51Ba | 22.81±1.45Bc | 32.04±1.62Bb | 41.52±2.45Aa |
| H-A     | 2.86±0.17Aa | 2.23±0.34Ab | 2.18±0.36Ab | 24.57±1.30Cb | 32.28±3.83Ba | 32.85±2.02Ca | 26.87±1.54Dc | 36.52±2.91Db | 40.64±0.96Da |
| H-B     | 2.13±0.33Ba | 1.99±0.18Bb | 1.89±0.12Bc | 26.97±3.70Cb | 35.08±3.86Ba | 38.52±1.14Ba | 35.32±2.28Cc | 43.03±2.34Cb | 46.19±1.40Ca |
| H-C     | 1.18±0.21Db | 1.28±0.21Da | 1.04±0.08Cc | 34.31±2.10Ab | 40.60±5.70Aa | 42.82±2.70Aa | 52.95±1.32Ac | 58.30±3.45Aa | 58.18±2.29Ab |
| H-D     | 1.31±0.33Cb | 1.47±0.26Ca | 1.15±0.21Cc | 29.91±4.35Bb | 35.88±4.05Ba | 34.59±3.95Ca | 48.56±0.70Bc | 54.09±2.26Ba | 50.96±1.53Bb |
| 冲沟类型    | 34.44 **    |             |             | 3.93 **      |              |              | 63.18 **     |              |              |
| 冲沟部位    | 47.05 **    |             |             | 0.55         |              |              | 14.92 **     |              |              |
| 类型 * 部位 | 2.66        |             |             | 4.12 *       |              |              | 1.15         |              |              |

注：H 为活跃期冲沟；W 为稳定期冲沟；A 为集水区；B 为沟头；C 为沟床；D 为沟底；H-A 表示活跃期冲沟集水区；表中大写字母表示同一土层深度不同部位间差异显著 ( $p < 0.05$ )；小写字母表示同一部位不同土层深度差异显著 ( $p < 0.05$ )；\* 表示在  $p < 0.05$  水平显著相关；\*\* 表示在  $p < 0.01$  水平显著相关。

3.2 不同发育期冲沟系统土壤优先路径特征

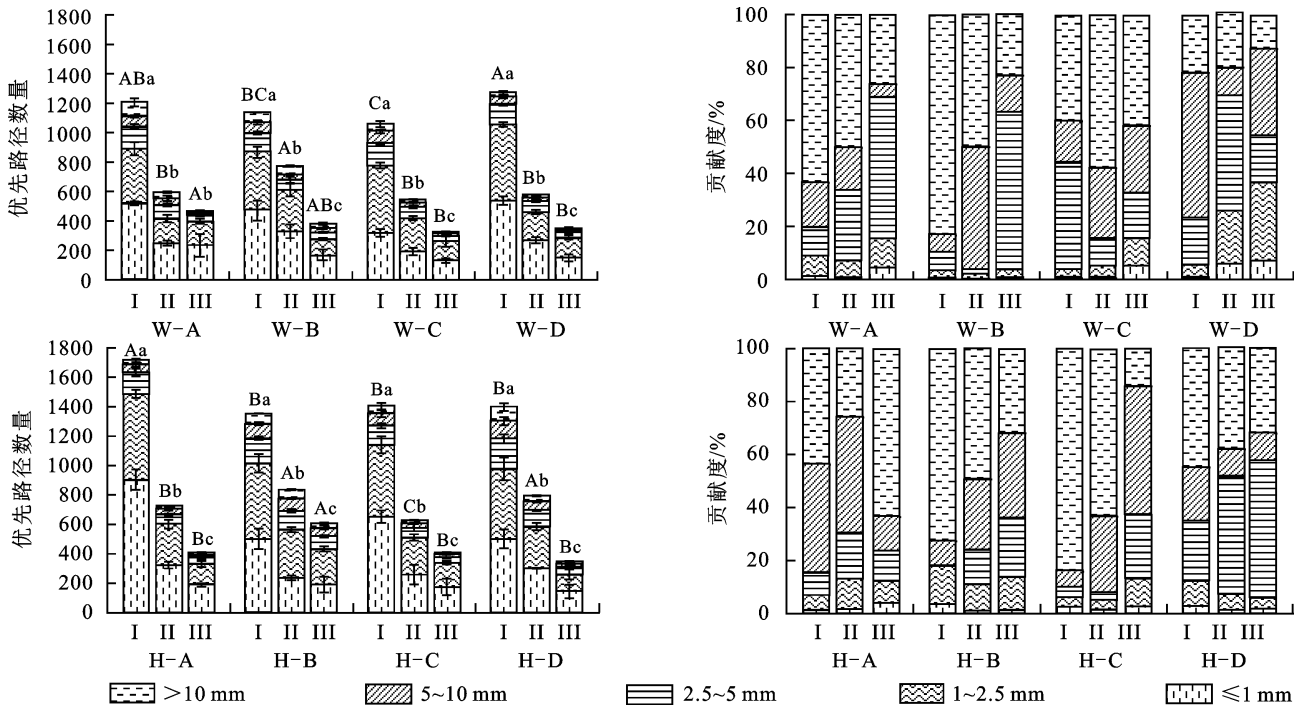
3.2.1 优先路径数量特征 将染色路径的影响半径划分为 $\leq 1, 1\sim 2.5, 2.5\sim 5, 5\sim 10, >10$  mm 5 个径级。通过不同影响半径的优先路径所占总染色路径的面积比来表征不同半径对优先流过程的贡献度<sup>[34]</sup>。不同发育期冲沟系统水平剖面优先路径数量特征见图 2。稳定冲沟中，沟头的优先路径数量最多，集水区、沟底、沟床较沟头分别减少 0.11%，4.14%，15.75%。在水平方向上，集水区、沟头和沟

底不同径级的优先路径数量由大到小均表现为 $\leq 1, 1\sim 2.5, 2.5\sim 5, 5\sim 10, >10$  mm，沟床为  $1\sim 2.5, \leq 1, 2.5\sim 5, 5\sim 10, >10$  mm。垂直方向上，4 个部位不同径级优先路径数量随土层深度增加而降低 ( $p < 0.05$ )。虽然 $\leq 1$  mm 优先路径数量最多，但其对水平剖面的贡献度最少，不同部位 $\leq 1$  mm 的贡献度均小于 10%，相反 $>10$  mm 优先路径数量最少，但其贡献度最大。在 0—20 cm 土层，沟头 $>10$  mm 优先路径贡献度达 83.37%，集水区、沟头和沟底 $>10$  mm 优

先路径随土层深度增加对染色面积的贡献度逐渐减少,沟床>10 mm 优先路径随土层深度增加贡献度呈先增后减的变化趋势。

而在活跃冲沟中,集水区的优先路径数量最多,分别是沟头、沟底和沟床的1.02,1.12,1.16倍。水平方向上,集水区、沟床和沟底在同一土层深度不同径级的优先路径数量由大到小为 $\leq 1$ ,1~2.5,2.5~5,5~10,>10 mm,沟头为1~2.5, $\leq 1$ ,2.5~5,5~10,

>10 mm。垂直方向上,4个部位变化趋势基本一致,优先路径数量都随土层增加呈递减的趋势( $p < 0.05$ )。>10 mm 优先路径贡献度最大,集水区>10 mm 优先路径随土层深度增加贡献度呈为先减后增的变化规律,沟头、沟床和沟底>10 mm 优先路径随土层深度增加贡献度逐渐减少。整体上,冲沟系统集水区和沟头优先路径数量高于沟床和沟底,各部位以>10 mm 优先路径为主要通道。



注:H为活跃期冲沟;W为稳定期冲沟;A为集水区;B为沟头;C为沟床;D为沟底;H-A表示活跃期冲沟集水区;I为0~20 cm土层;II为20~40 cm土层;III为40~50 cm土层;图中不同大写字母表示同一土层深度不同部位间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一部位不同土层深度间差异显著( $p < 0.05$ )。

图2 不同发育期冲沟系统优先路径数量特征

Fig. 2 Quantitative characteristics of preferential paths of gully system in different development stages

3.2.2 优先路径分布特征 图3中不同颜色表示优先流路径聚集度不同,深蓝色表示基本无聚集度,浅蓝色表示出现聚集现象,绿色表示聚集度一般,黄色表示聚集度高,红色表示聚集度最大,聚集度越高表示土壤优先流在不同土层间连通性越好<sup>[34]</sup>。从图3可以看出,稳定冲沟集水区以5~10 mm 优先路径连通性最好, $\leq 1$ ,1~2.5,2.5~5 mm 优先路径连通性相似,>10 mm 优先路径连通性最差。沟头1~2.5,2.5~5,5~10,>10 mm 优先路径连通性相似,相比以上4个径级 $\leq 1$  mm 优先路径连通性最差。沟床以 $\leq 1$  mm 优先路径连通性最好,5~10 mm 优先路径连通性最差。沟底以1~2.5 mm 优先路径连通性最好,2.5~5 mm 优先路径连通性最差。稳定冲沟各部位优先路径连通性由大到小表现为沟头、集水区、沟底、沟床。

活跃冲沟集水区以 $\leq 1$  mm 优先路径连通性最

好,>10 mm 优先路径连通性最差。沟头 $\leq 1$ ,2.5~5,5~10,>10 mm 优先路径连通性相似,相比以上4个径级1~2.5 mm 优先路径连通性最差。沟床以 $\leq 1$  mm 优先路径连通性最好,5~10 mm 优先路径连通性最差。沟底以>10 mm 优先路径连通性最好, $\leq 1$  mm 优先路径连通性最差。活跃冲沟各部位优先路径连通性由大到小表现为集水区、沟头、沟底、沟床。

3.2.3 优先路径发育特征 不同发育期冲沟系统优先路径丰富度有所差异(图4),稳定冲沟集水区和活跃冲沟沟头不同径级的优先路径在土壤空间中的丰富程度最高且稳定性最好。稳定冲沟 Simpson 指数为0.63~0.66,集水区最大为0.66,沟头、沟底、沟床较集水区分别减少2.00%,3.49%,4.31%;活跃冲沟 Simpson 指数为0.60~0.71,沟头最大为0.71,集水区、沟床、沟底较沟头分别减少1.11%,10.96%,15.43%。



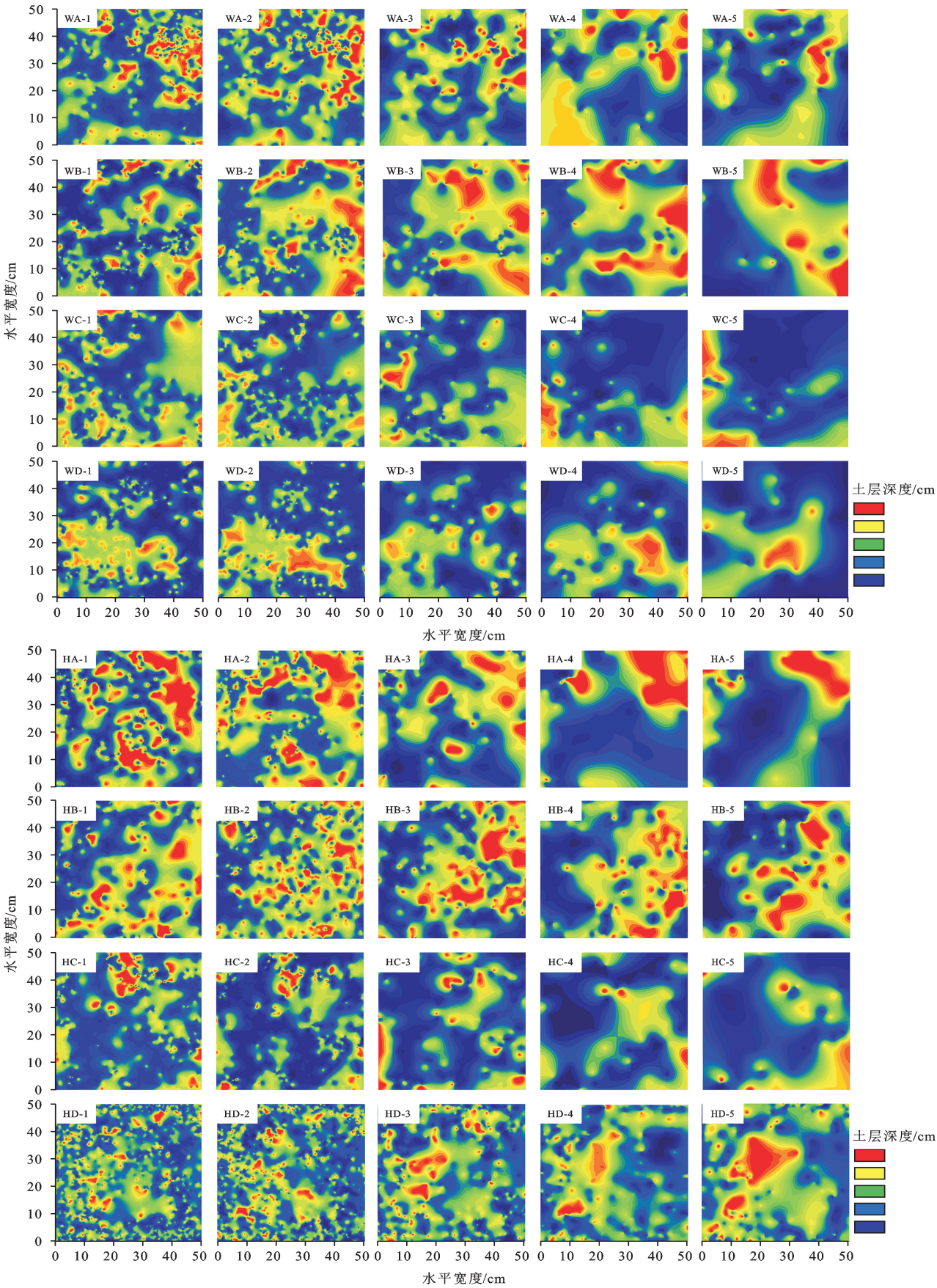
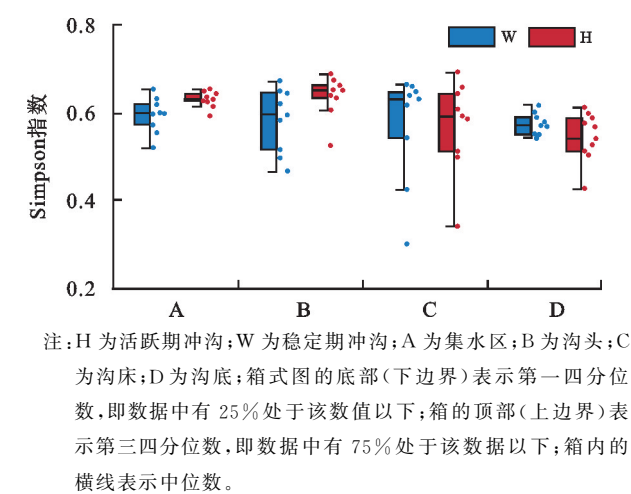


图 3 不同发育期冲沟水平剖面优先路径位置分布

Fig. 3 The distribution of preferential path position of gully horizontal section in different development stages



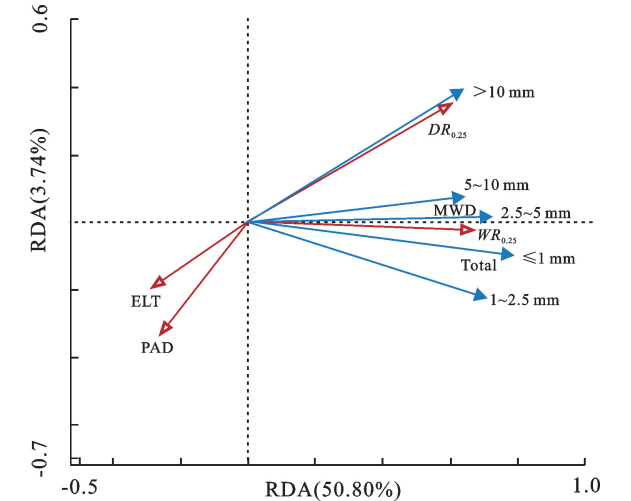
注: H 为活跃期冲沟; W 为稳定期冲沟; A 为集水区; B 为沟头; C 为沟床; D 为沟底; 箱式图的底部(下边界)表示第一四分位数,即数据中有 25% 处于该数值以下;箱的顶部(上边界)表示第三四分位数,即数据中有 75% 处于该数据以下;箱内的横线表示中位数。

图 4 不同发育期冲沟土壤优先路径的多样性

Fig. 4 Diversity of preferential paths in gully soil at different developmental stages

3.3 土壤团聚体特征与优先路径的关系

3.3.1 团聚体结构与优先路径冗余分析 对不同径级的优先路径(被解释变量)和土壤团聚体特征指标(解释变量)进行 RDA 分析。RDA 排序图详细描述了优先路径数量和土壤团聚体特征指标之间的关系。结果(图 5)表明,2 个排序轴累积解释团聚体结构与优先路径关系的 54.54%。团聚体稳定性指标中, $WR_{0.25}$  和 MWD 对优先路径的影响达到极显著水平( $p<0.01$ ),对组分变异的解释量分别为 23.00%, 15.30%。不同径级的优先路径数量与 MWD、 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$  呈正相关关系,与 PAD、 $E_{LT}$  呈负相关关系。



注:  $DR_{0.25}$  为  $>0.25$  mm 机械稳定性团聚体;  $WR_{0.25}$  为  $>0.25$  mm 水稳定性团聚体; MWD 为平均质量直径;  $E_{LT}$  为不稳定团粒指数; PAD 为团聚体结构破坏率;  $\leq 1$ ,  $1\sim 2.5$ ,  $2.5\sim 5$ ,  $5\sim 10$ ,  $>10$  mm 5 个影响半径; Total 为优先路径总数。

图 5 团聚体结构与优先路径的 RDA 分析

Fig. 5 RDA analysis of aggregate structure and preferential path

3.3.2 团聚体结构与优先路径灰色关联分析 将不同径级的优先路径数量作为母序列,5 个团聚体结构

特征作为子序列进行灰色关联分析(表 4),结果显示,土壤团聚体结构与不同径级的优先路径关联度为 0.552~0.884,均值为 0.748,属较强关联,表明优先路径数量与团聚体结构特征间存在较强的关联作用。不同径级的优先路径数量与团聚体结构特征指标间关联度由大到小分别为 2.5~5 mm(0.756 0), 1~2.5 mm(0.755 8),  $\leq 1$  mm(0.751 4), 5~10 mm(0.742 0),  $>10$  mm(0.728 0)。其中,2.5~5 mm 优先路径与团聚体结构特征指标关联度最高,反馈作用最强。 $>10$  mm 优先路径与团聚体结构特征指标关联度最低,反馈作用最弱。在 5 个团聚体结构特征指标中,MWD 和  $WR_{0.25}$  与优先路径数量达到极强关联且影响最为显著, $E_{LT}$  和 PAD 与优先路径数量属中等关联,说明 MWD 和  $WR_{0.25}$  是影响优先路径形成的关键因子。

表 4 团聚体结构与优先路径灰色关联度

Table 4 Grey correlation degree between aggregate structure and preferential path

| 染色半径     | MWD   | $WR_{0.25}$ | $DR_{0.25}$ | $E_{LT}$ | PAD   |
|----------|-------|-------------|-------------|----------|-------|
| $\leq 1$ | 0.882 | 0.877       | 0.848       | 0.598    | 0.552 |
| 1~2.5    | 0.870 | 0.871       | 0.859       | 0.615    | 0.564 |
| 2.5~5    | 0.884 | 0.882       | 0.863       | 0.597    | 0.554 |
| 5~10     | 0.864 | 0.858       | 0.840       | 0.596    | 0.552 |
| $>10$    | 0.873 | 0.854       | 0.810       | 0.571    | 0.532 |
| 总数       | 0.882 | 0.883       | 0.858       | 0.599    | 0.553 |

3.3.3 团聚体结构与优先路径耦合协调度分析 为进一步揭示金沙江干热河谷冲沟系统土壤团聚体结构与优先路径的耦合协调程度<sup>[35]</sup>,对冲沟系统土壤团聚体结构特征指标与优先路径数量间的耦合协调度进行计算(表 5)。活跃和稳定冲沟集水区和沟头耦合协调度(D 值)为 0.73~0.61,耦合协调程度达到中级协调,沟床和沟底耦合协调度(D 值)为 0.49~0.32,属低级协调。说明活跃和稳定冲沟集水区和沟头土壤团聚体结构与优先路径的耦合协调性较好,由集水区向沟底延伸土壤团聚体结构与优先路径的耦合协调性降低,整体上表现为沟头 $>$ 集水区 $>$ 沟底 $>$ 沟床。

表 5 团聚体结构与优先路径耦合协调度

Table 5 Coupling coordination degree of aggregate structure and preferential path

| 部位  | 耦合度(C 值) | 协调指数(T 值) | 耦合协调度(D 值) | 耦合协调程度 |
|-----|----------|-----------|------------|--------|
| W-A | 0.82     | 0.56      | 0.68       | 中级协调   |
| W-B | 0.85     | 0.64      | 0.73       | 中级协调   |
| W-C | 0.70     | 0.26      | 0.39       | 低级协调   |
| W-D | 0.81     | 0.33      | 0.49       | 低级协调   |
| H-A | 0.71     | 0.53      | 0.61       | 中级协调   |
| H-B | 0.93     | 0.51      | 0.69       | 中级协调   |
| H-C | 0.65     | 0.19      | 0.32       | 低级协调   |
| H-D | 0.73     | 0.33      | 0.48       | 低级协调   |



## 4 讨论

### 4.1 不同发育期冲沟系统对土壤团聚体的影响

$DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$  作为定量评价土壤结构的重要指标,其含量越高,土壤结构稳定性越好,抗蚀性越强<sup>[28,30]</sup>。研究结果表明,除个别土层外,活跃冲沟各部位  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  含量均小于稳定冲沟,说明整体上稳定冲沟的土壤团聚体稳定性要高于活跃冲沟。相关研究<sup>[36]</sup>证实,沟蚀发育过程中土壤团聚体间发生剧烈碰撞,在径流搬运过程中被剥蚀和消解,从而破坏大团聚体结构,微团聚体含量增加。本研究得出,不同发育期冲沟系统集水区和沟头  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  含量均大于沟床和沟底,说明集水区和沟头的土壤结构性能较沟床和沟底更好。原因可能是集水区和沟头的微团聚体被径流优先迁移至沟床和沟底,导致沟床和沟底有大量微团聚体累积。大量研究<sup>[29-30,33]</sup>表明,PAD、 $E_{LT}$  和 MWD 可较好地反映土壤团聚体稳定性,MWD 越大,PAD 和  $E_{LT}$  越小,土壤结构越稳定,土壤抗侵蚀能力也越强。本研究得出,稳定冲沟 MWD 相比活跃冲沟增加 32.66%,PAD 和  $E_{LT}$  较活跃冲沟分别减少 50.04% 和 42.02%,进一步说明稳定冲沟的土壤团聚体稳定性较活跃冲沟更好。稳定冲沟相比于活跃冲沟植被覆盖度增加 59.68% (表 1),地上植被可有效减缓土壤团聚体崩解流失,有机质可有效促进土壤颗粒间的胶结,提高土壤团聚体稳定性。张钦弟等<sup>[37]</sup>研究发现,土层深度变化对土壤团聚体结构存在影响显著,表层土壤的团聚体稳定性和抗蚀性比深层土壤更强,与本研究结果基本一致。

### 4.2 不同发育期冲沟系统对优先路径的影响

土壤结构的异质性造成优先路径的水力性质、数量以及分布出现差异<sup>[34]</sup>。活跃冲沟各部位优先路径数量和连通性高于稳定冲沟,且集水区和沟头的优先路径数量和连通性高于沟床和沟底。活跃冲沟相比稳定冲沟植被盖度更低,使得降雨可直接冲刷地表,同时集水区地表裸露导致水流大量汇集为优先路径的形成提供条件。此外,沟头跌坎较深进一步加大水流速度和侵蚀力度,更有利于优先路径的形成和扩张。值得注意的是,高黏粒含量和细腻质地的土壤也促进优先路径的形成<sup>[12]</sup>。

本研究发现,冲沟系统沟头和集水区黏粒和粉粒含量显著高于沟床和沟底,因此,集水区和沟头更容易形成数量较多且连通性较好的优先路径。SUKHIJA 等<sup>[38]</sup>研究发现,花岗岩和砂岩中优先流在地水入渗补给中贡献率较大,占总入渗补给的

75% 和 33%,但在冲积物中优先流不显著。这与本研究结果相同,沟床和沟底多为上游冲刷的泥沙淤积而成,不利于优先路径的形成和发育。

本研究发现, $\leq 1, 1 \sim 2.5$  mm 的优先路径在不同发育期冲沟系统中的数量较多,但其对水平剖面染色面积贡献度较小。相反, $> 10$  mm 的优先路径数量最少,但对水平剖面染色面积贡献度最大。相比于其他径级, $> 10$  mm 的优先路径虽然数量较少但直径更大,在水平染色剖面中占有绝对的优势。本研究使用 Simpson 物种组成多样性指标来反映干热河谷冲沟系统土壤空间中优先路径个体组成的丰富程度,其适用性和合理性已得到相关学者<sup>[32]</sup>的验证。研究得出活跃冲沟 Simpson 指数比稳定冲沟增加 3.12%,不同径级的优先路径丰富度高于稳定冲沟,进一步说明活跃冲沟优先路径发育组成状况相对较好。

### 4.3 土壤团聚体对优先路径的影响

$WR_{0.25}$  和 MWD 值越大,表示土壤中大团聚体占比越大,土壤粒径团聚度越高,土壤结构性和稳定性越好<sup>[29]</sup>。优先路径的形成受土壤团聚体稳定性的影响,通过 RDA 和灰色关联分析得出, $WR_{0.25}$  和 MWD 与优先路径数量达到极强关联且影响为极显著 ( $p < 0.01$ ),说明 MWD 和  $WR_{0.25}$  可以较好地表征土壤团聚体结构与优先路径间的关系。

本研究表明,不同发育期冲沟由集水区向下延伸土壤团聚体结构与优先路径的耦合协调性降低,集水区和沟头耦合协调程度达到中级协调,沟床和沟底耦合协调程度属低级协调。卢华兴等<sup>[18]</sup>研究得出,4 种林地土壤团聚体结构和优先路径的平均耦合度为 0.683,相比于冲沟系统土壤团聚体结构和优先路径平均耦合度降低 13.50%。造成这种差异的原因一方面在于滇中亚高山磨盘山森林资源丰富,林木根系发达,而本研究属于热河谷冲沟发育区,特殊的水热条件特殊和强烈的溯源侵蚀,导致土壤结构和质地存在明显差异;另一方面,干湿交替<sup>[39]</sup>、土壤有机质含量<sup>[40]</sup>、降雨强度等因素都可能对冲沟系统优先路径的形成和发育产生重要的影响。这些因素可能通过影响水分分布、侵蚀程度和土壤稳定性等方式,导致土壤团聚体结构与优先路径的耦合度差异。未来的研究可以进一步探讨这些影响因素的具体作用机制,以深入理解冲沟系统土壤的复杂性。

## 5 结论

(1) 稳定冲沟土壤团聚体稳定性要高于活跃冲沟。除个别土层外,活跃冲沟 4 个部位机械稳定性和

水稳性团聚体含量均显著小于稳定冲沟( $p < 0.05$ )。稳定冲沟土壤团聚体平均质量直径(MWD)相比于活跃冲沟增长32.66%,团聚体破坏率(PAD)和不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )较活跃冲沟分别减少50.04%和42.02%。整体上各部位MWD均随土层深度增加而减小,PAD和 $E_{LT}$ 则呈相反趋势。冲沟系统由集水区向沟底延伸,土壤大团聚体占比减少,团聚度减弱,团聚体稳定性下降。

(2)活跃冲沟优先路径数量和连通性优于稳定冲沟,冲沟系统由集水区向沟底延伸优先路径连通性变差。不同径级优先路径数量随土层深度增加而降低( $p < 0.05$ ),各部位以 $> 10$  mm优先路径为主要通道。活跃冲沟Simpson指数较稳定冲沟增加3.12%,不同径级的优先路径丰富度高于稳定冲沟。

(3)优先路径的形成和分布受土壤团聚体稳定性的影响, $WR_{0.25}$ 和MWD与优先路径数量呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ )。土壤团聚体结构与不同径级的优先路径存在较强的关联作用,MWD和 $WR_{0.25}$ 与优先路径数量达到极强关联且影响最为显著。

(4)冲沟系统由集水区向沟底延伸,土壤团聚体结构与优先路径的耦合协调性降低。集水区和沟头土壤团聚体结构与优先路径耦合协调程度达到中级协调,沟床和沟底属低级协调,整体上表现为沟头 $>$ 集水区 $>$ 沟底 $>$ 沟床。

#### 参考文献:

- [1] YANG D, XIONG D H, ZHANG B J. Impacts of grass basal diameter on runoff erosion force and energy consumption in gully bed in dry-hot valley region, Southwest China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(7): 2048-2061.
- [2] 徐婷, 杨丹, 舒成强, 等. 干热河谷陷穴形态特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(2): 142-149.  
XU T, YANG D, SHU C Q, et al. Analysis of morphological characteristics and causes of the sink holes in dry-hot valley[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(2): 142-149.
- [3] 冉红, 蒋婷, 杨晓, 等. 干热河谷区冲沟侵蚀研究进展[J]. 绿色科技, 2017(16): 125-127.  
RAN H, JIANG T, YANG X, et al. A review on the study of gully erosion in dry-hot valley[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017(16): 125-127.
- [4] 张斌艳, 熊东红, 刘琳, 等. 干热河谷冲沟沟床土壤水分时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 83-90.  
ZHANG B Y, XIONG D H, LIU L, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture in gully bed of dry-hot valley[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 83-90.
- [5] 子桂才, 李庆华, 赵丽芳, 等. 干热河谷区生态修复研究进展[J]. 广西林业科学, 2023, 52(1): 141-145.  
ZI G C, LI Q H, ZHAO L F, et al. Study progress of ecological restoration in dry-hot river valleys[J]. Guangxi Forestry Science, 2023, 52(1): 141-145.
- [6] 徐贵迁, 赵洋毅, 王克勤, 等. 金沙江干热河谷冲沟系统优先流影响下的土壤可蚀性[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(4): 101-113.  
XU G Q, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Soil erodibility under the influence of preferential flow in the gully system of the Jinsha River Dry Hot Valley[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(4): 101-113.
- [7] 牛凤娇, 潘成忠, 崔永生, 等. 晋西黄土区土地利用对降雨入渗产流模式和优先流分布的影响试验研究[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4154-4166.  
NIU F J, PAN C Z, CUI Y S, et al. Experimental investigation to the effect of different land-use on rainfall infiltration runoff patterns and preferential flow distribution in the loess area of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4154-4166.
- [8] 陈思婕, 李美骏, 罗雅婕, 等. 优先流对土壤水文及滑坡触发的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9698-9705.  
CHEN S J, LI M J, LUO Y J, et al. The impact of preferential flow on soil hydrology and landslide-triggering[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9698-9705.
- [9] 潘网生, 胡向红, 卢玉东, 等. 黄土孔隙、裂隙及其优先流研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 163-169.  
PAN W S, HU X H, LU Y D, et al. Research progress of pore, fracture and preferential flow for loess[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(8): 163-169.
- [10] 陶禹. 崩岗坡面壤中流及其水动力特征与崩岗侵蚀的关系[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.  
TAO Y. The effect of subsurface flow along a hillslope of benggang and its hydrodynamic characteristics on benggang erosion[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [11] 艾力夏提·库尔班. 黑龙江省东部山地针叶人工林土壤优先流及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.  
AILIXIATI · K. Study on soil preferential flow and its influencing factors of coniferous plantation at Eastern Mountain in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [12] 程金花, 张洪江, 张晓晖, 等. 重庆四面山根系及土壤特性对优先路径分布的影响[J]. 世界科技研究与发展,

- 2011,33(4):519-523.
- CHENG J H, ZHANG H J, ZHANG X H, et al. Effect of roots and soil properties on preferential flow paths distribution in Simian Mountains, Chongqing[J]. World Sci-Tech R&D, 2011,33(4):519-523.
- [13] QIN X, CAI J, WANG G. Pore-scale modeling of pore structure properties and wettability effect on permeability of low-rank coal [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023,33(5):573-584.
- [14] MENG A X, TAN Y Q, XING C, et al. Investigation on preferential path of fluid flow by using topological network model of permeable asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2020,242:e118163.
- [15] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2020,71(3):279-302.
- [16] TANG Y B, LI M, BERNABE Y, et al. Viscous fingering and preferential flow paths in heterogeneous porous media [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020,125(3):35-48.
- [17] 王佩佩, 苏雪萌, 周正朝, 等. 黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021,35(5):16-23.
- WANG P P, SU X M, ZHOU Z C, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow on slope of typical vegetation communities in loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):16-23.
- [18] 卢华兴, 赵洋毅, 段旭, 等. 滇中亚高山林地土壤团聚体结构及其对优先路径的影响[J]. 林业科学研究, 2022, 35(6):23-34.
- LU H X, ZHAO Y Y, DUAN X, et al. Soil aggregate structure of subalpine woodland and its influence on priority path in central Yunnan [J]. Forest Research, 2022,35(6):23-34.
- [19] 欧阳田甜, 段旭, 赵洋毅, 等. 元江干热河谷典型林草地优先流区和基质流区土壤团聚体特征[J]. 水土保持研究, 2023,30(3):146-153.
- OUYANG T T, DUAN X, ZHAO Y Y, et al. Characteristics of soil aggregates in the preferential flow area and matrix flow area of typical forest-grassland in Yuanjiang dry-hot valley [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):146-153.
- [20] 任泽莹, 赵勇钢, 吕银彦, 等. 汾河流域下游不同土地利用方式下优先流区与基质流区土壤团聚体稳定性分析[J]. 水土保持研究, 2022,29(6):59-64.
- REN Z Y, ZHAO Y G, LÜ Y Y, et al. Analysis on soil aggregate stability of preferential flow and matrix flow domains under different land use types in the lower reaches of Fen River watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):59-64.
- [21] 张素, 熊东红, 校亮, 等. 冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异[J]. 土壤, 2016,48(6):1270-1276.
- ZHANG S, XIONG D H, XIAO L, et al. The difference of soil mechanical composition and soil anti-scourability on different positions of gullies [J]. Soils, 2016, 48(6):1270-1276.
- [22] 张素, 熊东红, 杨丹, 等. 干热河谷不同活跃度冲沟土体抗剪强度分异及理化性质[J]. 水土保持学报, 2014,28(6):124-129,160.
- ZHANG S, XIONG D H, YANG D, et al. Soil shear strength and its related physical properties on different active degree type of gullies in dry-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(6):124-129,160.
- [23] 徐贵迁, 赵洋毅, 王克勤, 等. 金沙江干热河谷冲沟区优先流影响下的土壤力学特性[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2):100-110.
- XU G Q, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Soil mechanical properties under the influence of preferential flow in the gully area of Jinsha River's dry-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):100-110.
- [24] 李志成, 赵洋毅, 王克勤, 等. 金沙江干热河谷活跃和稳定冲沟集水区土壤优先流特征[J]. 水土保持学报, 2022,36(6):119-127.
- LI Z C, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Soil preferential flow characteristics in active and stable gully catchment areas of the dry-hot valleys of the Jinsha River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):119-127.
- [25] 杨淦舟, 何光熊, 王艳丹, 等. 干热河谷燥红土坡面水分时空分布特征及其对覆被类型的响应[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021,19(5):90-98.
- YANG H Z, HE G X, WANG Y D, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of moisture on dry red soil slope in dry-hot valley and its response to cover type [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(5):90-98.
- [26] SU Z G, XIONG D H, DONG Y F, et al. Simulated headward erosion of bank gullies in the Dry-Hot Valley Region of southwest China [J]. Geomorphology, 2014, 204:532-541.
- [27] YAZIE T, MEKONNEN M, DEREBE A. Gully erosion and its impacts on soil loss and crop yield in three decades,



- northwest Ethiopia[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 7(4): 2491-2500.
- [28] 孙文泰, 马明, 牛军强, 等. 陇东雨养苹果覆膜对土壤团聚体结构稳定性与细根分布的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1582-1593.
- SUN W T, MA M, NIU J Q, et al. Effects of film mulching on soil aggregate structure stability and fine root distribution of rain-fed apple in eastern Gansu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1582-1593.
- [29] 杨洪炳, 肖以华, 许涵, 等. 城乡梯度下不同林分类型土壤团聚体分布及其稳定性[J]. 林业科学研究, 2022, 35(3): 82-92.
- YANG H B, XIAO Y H, XU H, et al. Distribution and stability of soil aggregates in different forest types under an urban-rural gradient [J]. Forest Research, 2022, 35(3): 82-92.
- [30] 王志康, 祝乐, 许晨阳, 等. 秦岭天然林凋落物去除对土壤团聚体稳定性及细根分布的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5493-5503.
- WANG Z K, ZHU L, XU C Y, et al. Effects of litter removal on soil aggregate stability and distribution of fine roots in natural forests of Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5493-5503.
- [31] 张相, 李肖, 林杰, 等. 南方红壤丘陵区侵蚀沟内土壤团聚体及有机碳特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 115-123.
- ZHANG X, LI X, LIN J, et al. Characteristics of soil aggregates and organic carbon in eroded gully in red soil region of Southern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 115-123.
- [32] 陈晓冰, 吴晗, 姜波, 等. 广西岩溶区稻田土壤优先路径的空间分布[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4099-4108.
- CHEN X B, WU H, JIANG B, et al. Spatial distribution of preferential flow paths in paddy field in the Karst Area of Guangxi[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4099-4108.
- [33] 林立文, 邓羽松, 王金悦, 等. 南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3647-3656.
- LIN L W, DENG Y S, WANG J Y, et al. Effects of plantation on aggregate distribution and stability of lateritic red soil in south subtropical China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3647-3656.
- [34] 吴小龙. 半干旱区放牧管理草地土壤水分-溶质运移与优先流响应机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- WU X L. Mechanism of soil water-solute transport and preferential flow characteristic in a semi-arid grassland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [35] 刘子玥, 王伟宸, 骆丕昭, 等. 湘西石漠化地区植物多样性与土壤因子的耦合关系[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(5): 471-477.
- LIU Z Y, WANG Y C, LUO P Z, et al. Coupling relationships between plant diversity and soil characteristics in rocky desertification areas of Western Hunan [J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(5): 471-477.
- [36] 高燕. 黑土区不同侵蚀方式对土壤团聚体和泥沙颗粒流失的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- GAO Y. Impacts of soil erosion on soil aggregates and particles losses in the black soil region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.
- [37] 张钦弟, 刘剑荣, 杨磊, 等. 半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9057-9068.
- ZHANG Q D, LIU J R, YANG L, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9057-9068.
- [38] SUKHIJA B S, REDDY D V, NAGABHUSHANAM P, et al. Recharge processes: Piston flow vs preferential flow in semi-arid aquifers of India[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(3): 387-395.
- [39] 万艳萍, 赵洋毅, 段旭, 等. 干湿交替对红河干旱河谷区土壤优先流形成特征的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2397-2406.
- WAN Y P, ZHAO Y Y, DUAN X, et al. Influence of alternated drying and wetting on the characteristics of soil preferential flow formation in Honghe Arid Valley [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2397-2406.
- [40] 管凝, 程金花, 侯芳, 等. 西南喀斯特地区典型林分土壤优先流特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 31-38.
- GUAN N, CHENG J H, HOU F, et al. Characteristics and influencing factors of soil preferential flow in typical stands of Karst area in southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 31-38.