

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.019.

刘啟霞, 刘小芳, 田昕, 等. 汾河流域下游不同土地利用方式下土壤性质对优先流发育的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 146-153, 161.

LIU Qixia, LIU Xiaofang, TIAN Xin, et al. Effects of Soil Properties on Preferential Flow Development Under Different Land Use Types in the Lower Reaches of Fenhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 146-153, 161.

# 汾河流域下游不同土地利用方式下 土壤性质对优先流发育的影响

刘啟霞, 刘小芳, 田昕, 杨璐, 赵勇钢

(山西师范大学 生命科学学院, 太原 030031)

**摘要:** [目的] 揭示汾河流域下游不同土地利用方式下土壤理化性质的异质性, 阐明其对优先流发育的影响。 [方法] 以汾河流域下游3种土地利用方式为研究对象进行野外染色示踪试验, 评价优先流发育程度, 分析了土壤染色区分下优先流区与非优先流区土壤性质的差异及其对优先流特征的影响。 [结果] 不同土地利用方式下优先流评价指数表示的优先流发育程度高低依次为草地(1.18)、农地(1.12)和果园(0.88)。土地利用方式、土层和优先流区域对除pH外的土壤性质有显著( $p < 0.05$ )的影响。土壤有机质、总孔隙度、毛管孔隙度和饱和导水率的提高和容重的降低有助于优先流的发育。多元逐步回归分析表明, 优先流区的有机质和总孔隙度是影响染色面积比的主要影响因子, 非优先流区的有机质、容重、砂粒是影响非染色面积比的主要影响因子。 [结论] 相比农地和果园, 草地土壤理化性质在土层以及优先流路径间的异质性更高, 对优先流发育程度影响较大。

**关键词:** 优先流; 染色示踪; 多指标评价; 土壤理化性质

**中图分类号:** S152; S153; S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)05-0146-08

## Effects of Soil Properties on Preferential Flow Development Under Different Land Use Types in the Lower Reaches of Fenhe River Basin

LIU Qixia, LIU Xiaofang, TIAN Xin, YANG Lu, ZHAO Yonggang

(School of Life Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** [Objective] This paper reveals the heterogeneity of physical and chemical properties in soils under different land use patterns in the lower reaches of Fenhe River basin, and expounds its influence on the development of preferential flow. [Methods] Three land use types in the lower reaches of the Fenhe River basin were selected in the field staining and tracing experiments to evaluate the development degree of preferential flow and analyze the differences of soil properties between preferential flow areas and non-preferential flow areas and their effects on preferential flow characteristics. [Results] The development degrees of preferential flow indicated by the index of preferential flow under different land use types were grassland (1.18), cropland (1.12) and orchard (0.88), respectively. Soil properties other than pH were significantly affected by land use types, soil layers, and preferential flow areas ( $p < 0.05$ ). The increase of soil organic matter, total porosity, capillary porosity and saturated hydraulic conductivity, and the decrease of bulk density contributed to the development of preferential flow. The multiple stepwise regression analysis showed that the organic matter and total porosity in preferential flow areas were the main factors affecting the dyeing area ratio, while the organic matter, bulk density and sand particles in non-preferential flow areas were the main factors

收稿日期: 2022-08-27

修回日期: 2022-09-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42007064); 山西省研究生教育创新项目(2021Y482)

第一作者: 刘啟霞(1996—), 女, 山西怀仁人, 硕士研究生, 主要从事植被恢复效应研究。E-mail: 1635319312@qq.com

通信作者: 刘小芳(1981—), 女, 山西榆次人, 博士, 副教授, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: liuxiaofang04@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

affecting the non-dyeing area ratio. [Conclusion] Compared with farmland and orchard, the soil physical and chemical properties of grassland have higher heterogeneity in soil layers and preferential flow areas, which has a greater impact on the development of preferential flow.

**Keywords:** preferential flow; dye tracer; multi-index evaluation; soil physical and chemical properties

优先流是指水分通过优先路径快速运移,在土壤中不均匀流动的过程<sup>[1]</sup>。优先流作为生态水文过程中重要的水文循环<sup>[2]</sup>,对径流形成、土壤水分入渗、地下水补给、水分再分配等方面具有重要影响<sup>[3-4]</sup>。优先流的路径主要是大孔隙所形成的通道,因此优先流的形成和发育受土地利用方式、植被类型、土壤性质等多因素的影响。不同土地利用方式或植被类型下,植物根系生长在土体中穿插形成连通性良好的大孔隙或通道<sup>[5]</sup>,尤其是土壤表层根系形成的大孔隙网络会成为主要的优先流通道<sup>[6-7]</sup>,致使土壤水分运动的形式不同<sup>[8]</sup>。土壤中动物的生命活动可以形成大孔隙增强优先流<sup>[9]</sup>。不同土地利用方式下也会对土壤性质如有机质积累、水稳性团聚体形成和土壤孔隙等产生显著的影响,进而影响优先流路径<sup>[10-11]</sup>。有研究表明,根据土壤是否染色划分的优先流区(染色区域)和非优先流区(未染色区域),两个区域的容重、有机碳、孔隙度、持水特性等土壤性质存在明显的差异<sup>[12-13]</sup>。但目前对优先流特征指标与两个区域土壤性质异质性关系方面的研究仍较缺乏,需进一步明确。

汾河流域是黄河流域的重要组成,汾河流域下游是山西省重要的粮食生产区,同时也是主要的人口聚集区和工业区<sup>[14]</sup>。现有对区域不同土地利用方式下优先流发育程度的研究较少,并且土壤性质对优先流的影响也尚不明确。因此,本研究以汾河流域下游3种不同土地利用方式下的土壤样地为对象,通过野外染色示踪试验,图像分析优先流分布特征,评价优先流发育程度,对比优先流区与非优先流区土壤性质的差异,阐明土壤性质对优先流形成与发育的影响,以期为区域生态恢复和保护提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于汾河流域下游的山西省临汾市尧都区嘉泉村(北纬 35°54′21″—36°19′48″,东经 111°05′07″—111°49′04″),在临汾盆地中央,属半湿润半干旱地区,暖温带大陆性季风气候,具有多种地貌类型。年均降水量 550 mm,年平均气温 9~13℃,年平均日照时数为 1 748.4~2 512.6 h,冬冷夏热,无霜期长。区域土地利用方式主要有农地、果园地和荒草地等。农地种植方式为冬小麦—夏玉米,果园地主要种

植苹果(*Malus pumila*)、核桃(*Juglans regia*)等,荒草地以撂荒地为主,主要植被有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、荆条(*Vitex negundo var. heterophylla*)、黄背草(*Themeda japonica*)等。

### 1.2 试验设计

研究选取农地、果园地和草地 3 种土地利用方式样地,于 2018 年 8 月进行试验,每个样地选取条件相似的两个样方作为重复。农地种植年限超过 70 a,种植方式为冬小麦和夏玉米轮作。草地为农地撂荒 4 a 左右的荒草地,果园为种植 10 a 左右的苹果园。

### 1.3 试验方法与指标测定

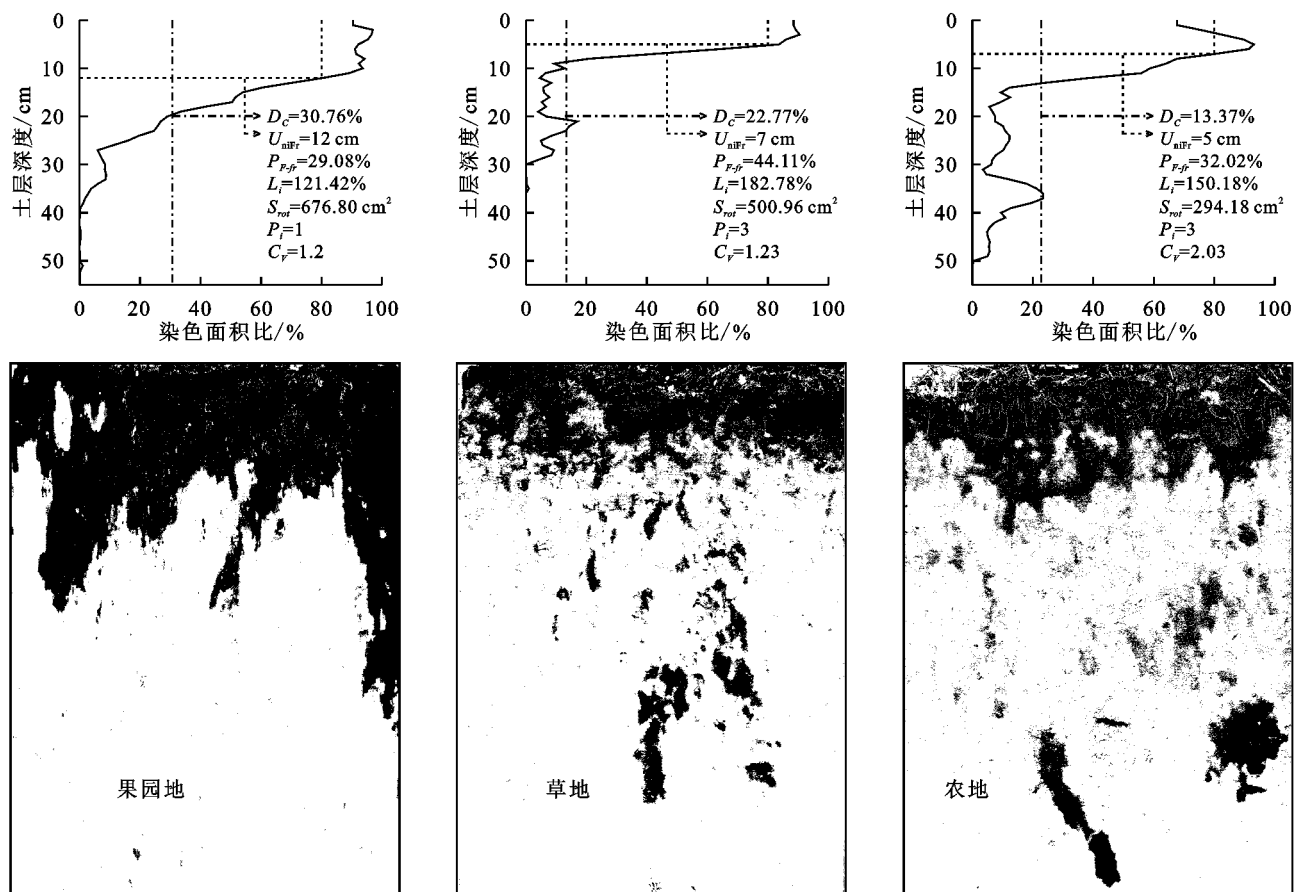
**1.3.1 染色示踪试验** 使用亮蓝溶液作为染色剂进行野外染色示踪试验<sup>[15-16]</sup>。开始试验前,清理样方表面的枯枝落叶及杂物。将染色试验用的铁框(长 50 cm、宽 50 cm、高 30 cm)垂直砸入土壤中约 20 cm,压实染色框内外周边 5 cm 的土壤。根据当地上一年的最大降雨量计算,用 6.75 L 浓度为 5 g/L 亮蓝溶液恒流均匀注入染色框中,并用塑料薄膜覆盖,防止降雨影响及亮蓝溶液挥发。24 h 后,取下塑料薄膜并小心去除染色框,每边去除 5 cm 以消除边缘效应。以水平方向 10 cm 为间隔小心挖取垂直剖面,放置标尺和色卡,并用数码相机垂直于土壤剖面进行拍照。拍照用的数码相机为佳能 80 D,像素为 6 000×4 000。所拍得的照片用 Photoshop CC 2019 软件进行几何校正,并对照色卡调整照片的色相、饱和度、明暗程度等,使优先流区(染色区)与非优先流区(非染色区)区分明显<sup>[17]</sup>。之后,使用软件的切割功能对照片进行切割处理,得到宽度为 1 cm 的图像。用 Image J 1.48 软件调整阈值将处理好的照片进行二值化。调整后的二值化图像优先流区为黑色,非优先流区为白色(图 1)。用 Image J 软件中的 Analyze Particles 插件对照片进行分析,所获取的数据用来计算各项优先流指标<sup>[18]</sup>。

**1.3.2 优先流染色图像特征指标** 各优先流特征指标计算公式如下<sup>[19-21]</sup>:

染色面积比( $D_c$ ,%)为土壤垂直剖面染色面积占总面积的百分比,计算公式为:

$$D_c = \left( \frac{D}{D + N_D} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D$  为土壤垂直剖面染色面积( $\text{cm}^2$ ); $N_D$  为土壤垂直剖面非染色面积( $\text{cm}^2$ )。



注:黑色为优先流区,白色为非优先流区。

图1 不同土地利用方式下土壤垂直剖面染色图像与优先流指标计算结果示例

非染色面积比( $ND_C$ ,%)为土壤垂直剖面非染色面积占总面积的百分比,计算公式为:

$$ND_C = 1 - D_C \quad (2)$$

基质入渗深度( $U_{niFr}$ ,cm)是水分基质入渗(单位土层染色面积比大于80%)所到达的土层深度。

优先流分数( $P_{F-fr}$ ,%)为土壤垂直剖面优先流区的染色面积占总染色面积的百分比,计算公式为:

$$P_{F-fr} = \left(1 - \frac{U_{niFr}}{T_{otStAr}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $U_{niFr}$ 为土壤垂直剖面基质入渗深度(cm); $T_{otStAr}$ 为土壤垂直剖面总染色面积( $cm^2$ )。

变异系数( $C_V$ )是土壤垂直剖面 $D_C$ 的标准差与均值的比值,表征了染色的差异程度,计算公式为:

$$C_V = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_{ci} - \bar{D}_C)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{ci}} \quad (4)$$

式中: $n$ 为土壤垂直剖面的土层数目,单位土层高度为1cm; $D_{ci}$ 为土壤垂直剖面第 $i$ 层染色面积比(%); $\bar{D}_C$ 为土壤垂直剖面平均染色面积比(%)。

长度指数( $L_i$ ,%)为土壤垂直剖面相邻两层之间 $D_C$ 差值的绝对值求和,通过染色的空间差异来表

征优先流的发育情况,计算公式为:

$$L_i = \sum_{i=1}^{55} |D_{ci+1} - D_{ci}| \quad (5)$$

式中: $D_{ci}$ 为土壤垂直剖面第 $i$ 层染色面积比(%)。

峰值( $P_i$ )是在土壤垂直剖面染色面积比随土层深度变化的曲线上作一条染色面积比的垂线,垂线与曲线交点的个数为峰值的数值。

1.3.3 优先流评价指数 为消除优先流指标之间的差异,通过极差法对6个优先流表征指标数据进行标准化处理,得到无量纲值并求得均值、均方差与权重系数,据此计算出优先流评价指数( $P_{FI}$ )<sup>[22]</sup>,综合评价土壤优先流发育程度。 $P_{FI}$ 数值越大,说明土壤优先流发育程度越高。

1.3.4 优先流区与非优先流区土壤性质的测定 在土壤垂直剖面的优先流区与非优先流区分别采铝盒样、环刀样、原状土和混合样,将土壤样品带回实验室内风干一星期后,进行土壤理化性质的测定。土壤理化性质测定采用常用方法<sup>[23-24]</sup>。土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化外加热法,土壤容重、毛管持水量采用环刀法测定,饱和导水率采用定水头法测定,土壤颗粒分析采用马尔文MS 2000型激光粒度仪测定,pH(土水比1:2.5)采用电极法测定。

1.4 数据分析

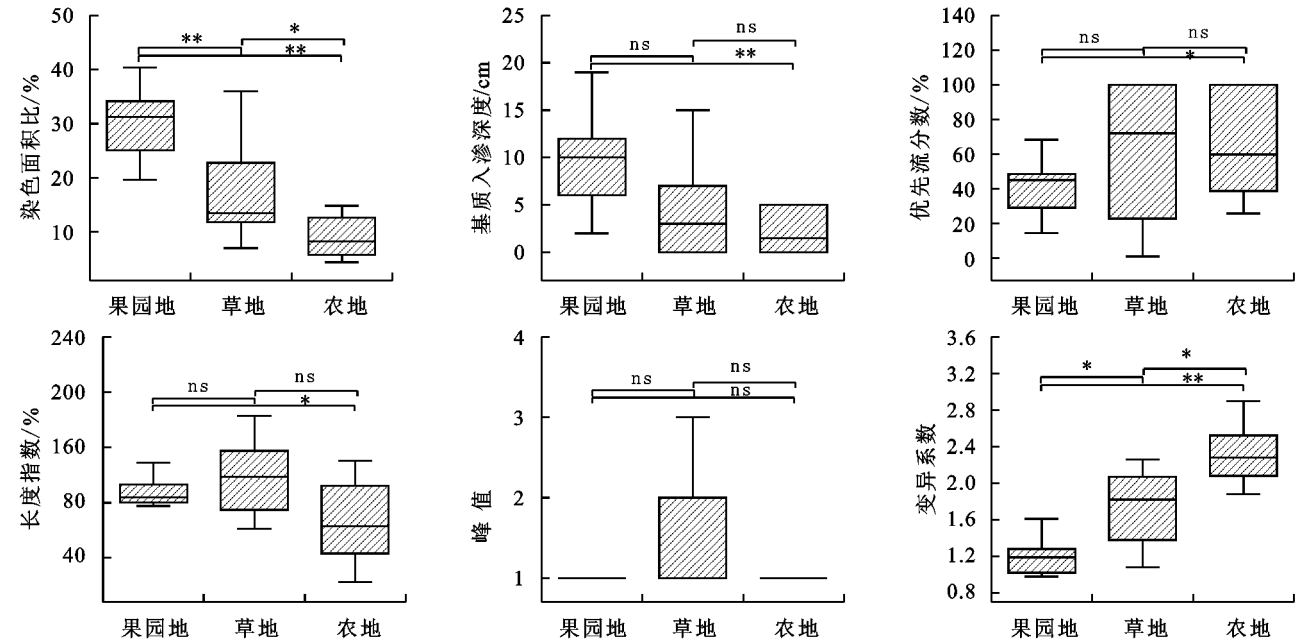
用 Wilcoxon 符号秩检验对不同土地利用方式下各优先流特征指标进行显著性差异比较( $p<0.05$ )。用三因素方差分析 LSD 法检验土地利用方式、土层、优先流区域对土壤理化性质的影响( $p<0.05$ )。土壤理化性质与优先流区染色面积比或非优先流区非染色面积比的关系用 Pearson 系数表示。采用多元逐步回归分析不同土地利用方式下影响优先流区染色面积比和非优先流区非染色面积比的主要土壤因子。所有数据统计分析均通过 SPSS 17.0 软件完成,使用 Origin 2019 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 优先流染色图像特征指标分析

3 种不同土地利用方式典型的土壤垂直剖面染色分布和优先流指标结果如图 1 所示。可以看出,果园地存在大面积染色,染色分布相对较为均匀,而草

地、农地染色分布较为随机。3 种土地的染色面积比呈现随着土层深度的增加而减小的趋势,优先流的路径已经超过 40 cm 土层。6 个量化优先流发育程度的特征指标在不同土地利用方式间均存在显著性差异( $p<0.05$ ,图 2)。果园与农田在除峰值外的特征指标始终显著差异( $p<0.05$ )。不同土地利用方式间的染色面积比和变异系数指标具有显著差异( $p<0.05$ )。果园地和草地量化优先流程度的各指标总体趋势相同,均表现出草地优先流程度高于果园地。农地则出现相反的趋势,农地在染色面积比、基质入渗深度、长度指数、峰值的中位数值出现最低趋势,但在优先流分数和变异系数分别表现出居中和最高的趋势。为消除不同优先流指标间的差异,引入优先流评价指数  $P_{FI}$  综合评价了不同土地利用方式下优先流的发育程度(图 3)。3 种土地利用方式的优先流评价指数分别为果园地 0.88,草地 1.18 和农地 1.12,可以表示优先流发育程度的高低依次为草地、农地、果园地。



注: \* 表示  $p<0.05$ ; \*\* 表示  $p<0.01$ ; ns 表示  $p>0.05$ 。

图 2 不同土地利用方式下土壤优先流指标箱线图

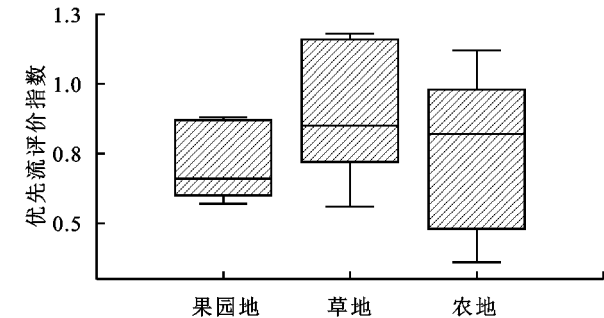


图 3 不同土地利用方式下土壤优先流评价指数

2.2 优先流区与非优先流区土壤理化性质

土地利用方式对有机质、毛管孔隙度、非毛管孔隙

度和土壤颗粒组成(黏粒、粉粒、砂粒)有显著( $p<0.05$ )影响(表 1)。土层对除 pH 外的土壤理化性质指标均有显著( $p<0.05$ )影响。优先流区域对除非毛管孔隙度和 pH 外的其他土壤理化性质指标均有显著( $p<0.05$ )影响。土地利用方式、土层和优先流区域三因素间的交互作用对非毛管孔隙度、黏粒、粉粒、砂粒均有显著( $p<0.05$ )影响。

3 种土地利用方式下优先流区与非优先流区土壤理化性质的分析结果见表 2。不同土地利用方式下的土壤理化性质除 pH 外均具有显著差异( $p<0.05$ )。有机质、总孔隙度、非毛管孔隙度、砂粒在果园地最高,粉粒和容重在农地最高,黏粒、pH、毛管孔隙度和饱和



导水率在草地最高。随着土层深度的增加,有机质、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和导水率和砂粒呈现减小的趋势,非毛管孔隙度、容重、黏粒呈现增加趋势,并且 3 种土地利用方式间土壤理化性质的差异性也减少。优先流区与非优先流区土壤理化性质具有显著差异( $p < 0.05$ ),整体上,优先流区有机质、总孔隙度、毛管孔隙度、黏粒、粉粒和饱和导水率高于非优先流区,容重、非毛管孔隙度和砂粒则低于非优先流区。优先流区和非优先流区之间土壤理化性质的差异可能对于土壤水分的优先流路径有重要影响。

表 1 土地利用方式、土层、优先流区域对土壤理化性质影响的方差分析

| 因子        | 有机质      | 容重       | 总孔隙度     | 毛管孔隙度    | 非毛管孔隙度   | 黏粒       | 粉粒        | 砂粒        | 饱和导水率     | pH   |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------|
| 土地利用方式(A) | 3.98 *   | 1.03     | 1.03     | 11.96 ** | 27.03 ** | 19.42 ** | 560.18 ** | 132.03 ** | 0.77      | 0.03 |
| 土层(B)     | 52.61 ** | 28.21 ** | 28.21 ** | 58.67 ** | 24.86 ** | 69.13 ** | 128.18 ** | 296.04 ** | 25.75 **  | 0.06 |
| 优先流区域(C)  | 96.39 ** | 47.10 ** | 47.10 ** | 15.55 ** | 2.49     | 56.45 ** | 53.57 **  | 192.82 ** | 117.88 ** | 1.45 |
| A×B       | 2.44     | 2.70 *   | 2.70 *   | 6.98 **  | 14.03 ** | 31.00 ** | 4.58 **   | 57.40 **  | 0.73      | 0.18 |
| A×C       | 0.74     | 0.94     | 0.94     | 3.40 *   | 2.11     | 10.33 ** | 70.58 **  | 72.58 **  | 0.44      | 0.07 |
| B×C       | 11.26 ** | 0.02     | 0.02     | 6.67 **  | 10.34 ** | 75.00 ** | 130.55 ** | 301.84 ** | 13.92 **  | 0.14 |
| A×B×C     | 1.37     | 1.75     | 1.75     | 0.86     | 2.83 *   | 36.83 ** | 49.14 **  | 116.46 ** | 0.22      | 0.19 |

注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ 。

表 2 不同土地利用方式下优先流区和非优先流区土壤理化性质

| 土壤性质                        | 土层<br>深度/cm | 果园地      |          | 草地      |         | 农地      |          |
|-----------------------------|-------------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|
|                             |             | 优先流区     | 非优先流区    | 优先流区    | 非优先流区   | 优先流区    | 非优先流区    |
| 有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )   | 0—10        | 52.60A   | 34.00abB | 60.90A  | 36.80aB | 55.80A  | 25.10bB  |
|                             | 10—20       | 33.00    | 27.60    | 36.80A  | 23.30B  | 34.30A  | 21.90B   |
|                             | 20—30       | 39.00aA  | 26.10B   | 28.40b  | 21.70   | 26.70b  | 19.80    |
| 容重/(g·kg <sup>-1</sup> )    | 0—10        | 1.22B    | 1.37A    | 1.29    | 1.35    | 1.29B   | 1.37A    |
|                             | 10—20       | 1.33bB   | 1.47A    | 1.45a   | 1.48    | 1.32bB  | 1.47A    |
|                             | 20—30       | 1.39abB  | 1.48A    | 1.34bB  | 1.48A   | 1.45a   | 1.51     |
| 总孔隙度/%                      | 0—10        | 53.80A   | 48.20B   | 51.40   | 48.90   | 51.30A  | 48.20B   |
|                             | 10—20       | 49.70aA  | 44.40B   | 45.10b  | 44.20   | 50.00aA | 44.50B   |
|                             | 20—30       | 47.50abA | 44.10B   | 49.50aA | 44.10B  | 45.20b  | 42.90    |
| 毛管孔隙度/%                     | 0—10        | 35.30bA  | 23.70bB  | 39.90a  | 36.90a  | 41.90aA | 36.60aB  |
|                             | 10—20       | 31.60    | 29.50    | 31.50   | 30.20   | 29.70   | 30.30    |
|                             | 20—30       | 26.10    | 23.20    | 27.00   | 26.90   | 26.70   | 26.50    |
| 非毛管孔隙度/%                    | 0—10        | 18.60aB  | 24.50aA  | 11.50b  | 12.00b  | 9.40b   | 11.60b   |
|                             | 10—20       | 18.10aA  | 14.90B   | 13.70b  | 14.00   | 20.30aA | 14.10B   |
|                             | 20—30       | 21.30    | 20.80    | 22.60A  | 17.30B  | 18.50   | 16.40    |
| 黏粒/%                        | 0—10        | 28.70aA  | 23.50bB  | 27.30aA | 25.50aB | 21.90bB | 24.30abA |
|                             | 10—20       | 30.90aA  | 23.60cB  | 27.90cA | 25.70bB | 30.00bA | 26.20aB  |
|                             | 20—30       | 23.80cB  | 28.60abA | 30.10a  | 29.50a  | 27.40b  | 27.70b   |
| 粉粒/%                        | 0—10        | 32.30bA  | 28.80cB  | 31.40cA | 30.30bB | 33.80a  | 34.00a   |
|                             | 10—20       | 33.60cA  | 30.60bB  | 34.00bA | 30.50bB | 34.40aB | 35.40aA  |
|                             | 20—30       | 30.30cB  | 33.20bA  | 32.80b  | 32.70b  | 35.00aB | 36.20aA  |
| 砂粒/%                        | 0—10        | 39.00cB  | 47.60aA  | 41.30bB | 44.10bA | 44.40aA | 41.70cB  |
|                             | 10—20       | 35.50bB  | 45.80aA  | 38.00aB | 43.80bA | 35.60bB | 38.30cA  |
|                             | 20—30       | 45.80aA  | 38.20aB  | 37.10b  | 37.80a  | 37.60bA | 36.10bB  |
| 饱和导水率/(mm·h <sup>-1</sup> ) | 0—10        | 29.60A   | 8.80B    | 30.80A  | 8.40B   | 28.60A  | 8.80B    |
|                             | 10—20       | 18.00abA | 4.60B    | 22.60aA | 8.10B   | 15.20bA | 6.30B    |
|                             | 20—30       | 10.50A   | 6.00B    | 11.70A  | 5.50B   | 12.70A  | 6.60B    |
| pH                          | 0—10        | 8.29     | 8.35     | 8.35    | 8.37    | 8.32    | 8.36     |
|                             | 10—20       | 8.29     | 8.35     | 8.31    | 8.36    | 8.29    | 8.39     |
|                             | 20—30       | 8.34     | 8.41     | 8.32    | 8.36    | 8.35    | 8.30     |

注:不同小写字母表示在相同区域和深度的不同样地差异显著( $p < 0.05$ );不同大写字母表示在相同样地和深度的不同区域差异显著( $p < 0.05$ )。

2.3 优先流指标与土壤理化性质的关系

染色面积比能够准确直观地反映土壤优先流程度与分布特征。染色面积比越大,说明水分入渗越多。本研究采用染色面积比和非染色面积比分别对优先流区与非优先流区土壤性质进行相关性分析,以明确两区土壤理化性质异质性对优先流特征的影响。染色面积比

与优先流区土壤理化性质的相关性见表 3。染色面积比与优先流区的有机质、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和导水率呈极显著正相关,与容重呈极显著负相关( $p<0.01$ )。结合表 2 的数据来看,优先流区土壤有机质、总孔隙度、毛管孔隙度和饱和导水率的提高和容重的降低均有助于优先流的形成与发育。

表 3 优先流区染色面积比与土壤理化性质相关性分析

| 参数     | 有机质    | 容重      | 总孔隙度    | 毛管孔隙度   | 非毛管孔隙度  | 黏粒    | 粉粒    | 砂粒      | 饱和导水率   | pH    |
|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|---------|-------|
| 染色面积比  | 0.57** | -0.58** | 0.58**  | 0.53**  | -0.23   | -0.09 | -0.01 | -0.03   | 0.46**  | -0.09 |
| 有机质    |        | -0.47** | 0.47**  | 0.73**  | -0.58** | -0.21 | 0.06  | 0.18    | 0.67**  | 0.11  |
| 容重     |        |         | -1.00** | -0.65** | 0.05    | -0.15 | -0.12 | 0.17    | -0.51** | -0.09 |
| 总孔隙度   |        |         |         | 0.65**  | -0.05   | 0.15  | 0.12  | -0.17   | 0.51**  | 0.09  |
| 毛管孔隙度  |        |         |         |         | -0.80** | -0.26 | -0.03 | 0.19    | 0.82**  | 0.01  |
| 非毛管孔隙度 |        |         |         |         |         | 0.43* | 0.13  | -0.36   | -0.67** | 0.06  |
| 黏粒     |        |         |         |         |         |       | 0.23  | -0.86** | -0.13   | 0.21  |
| 粉粒     |        |         |         |         |         |       |       | -0.57** | 0.13    | 0.20  |
| 砂粒     |        |         |         |         |         |       |       |         | 0.04    | -0.24 |
| 饱和导水率  |        |         |         |         |         |       |       |         |         | 0.02  |

注:\*表示  $p<0.05$ ; \*\*表示  $p<0.01$ 。

土壤垂直剖面非优先流区土壤理化性质与非染色面积比的相关性见表 4。土壤垂直剖面非染色面积比与非优先流区土壤有机质、总孔隙度和砂粒呈显著负相关,与容重和粉粒呈极显著正相关( $p<0.05$ )。

结合表 2 的数据来看,非染色面积比(也即没有优先流的区域占比)高与该区域较低的有机质含量、总孔隙度和砂粒含量以及较高的容重和粉粒含量有关,这些土壤性质均可能限制优先流的发育程度。

表 4 非优先流区非染色面积比与土壤理化性质的相关性分析

| 参数     | 有机质     | 容重     | 总孔隙度    | 毛管孔隙度   | 非毛管孔隙度  | 黏粒    | 粉粒     | 砂粒      | 饱和导水率 | pH    |
|--------|---------|--------|---------|---------|---------|-------|--------|---------|-------|-------|
| 非染色面积比 | -0.61** | 0.56** | -0.56** | -0.13   | -0.17   | 0.32  | 0.44*  | -0.45*  | -0.11 | 0.01  |
| 有机质    |         | -0.39* | 0.39*   | 0.13    | 0.08    | -0.27 | -0.04  | 0.17    | 0.21  | -0.15 |
| 容重     |         |        | -1.00** | -0.49** | 0       | 0.12  | 0.15   | -0.15   | -0.25 | -0.21 |
| 总孔隙度   |         |        |         | 0.49**  | 0       | -0.12 | -0.15  | 0.15    | 0.25  | 0.21  |
| 毛管孔隙度  |         |        |         |         | -0.87** | 0.08  | 0.02   | -0.06   | 0     | 0.03  |
| 非毛管孔隙度 |         |        |         |         |         | -0.15 | -0.10  | 0.14    | 0.15  | 0.09  |
| 黏粒     |         |        |         |         |         |       | 0.49** | -0.84** | 0.04  | 0.11  |
| 粉粒     |         |        |         |         |         |       |        | -0.88** | 0.14  | -0.31 |
| 砂粒     |         |        |         |         |         |       |        |         | -0.11 | 0.13  |
| 饱和导水率  |         |        |         |         |         |       |        |         |       | 0.16  |

注:\*表示  $p<0.05$ ; \*\*表示  $p<0.01$ 。

将优先流区与非优先流区的有机质(SOM)、容重(BD)、总孔隙度(TP)、毛管孔隙度(CP)、非毛管孔隙度(NP)、黏粒(Clay)、粉粒(Silt)、砂粒(Sand)、饱和导水率( $K_s$ )、pH 分别作为自变量 X,染色面积比( $D_c$ )和非染色面积比( $ND_c$ )分别作为因变量 Y,进行多元线性逐步回归分析,得到如下方程:

$$D_c=0.01SOM+0.03TP-1.74$$

$(R^2=0.40,p<0.05)$

$$ND_c=-0.02SOM+1.98BD-0.03Sand-0.62$$

$(R^2=0.57,p<0.05)$

可以看出,优先流区有机质(SOM)、总孔隙度(TP)是影响优先流区染色面积比的主要影响因子。通径分析结果显示(表 5),自变量 SOM,TP 对因变量  $D_c$  的直接作用分别为 0.41,0.36。SOM 通径系数绝对值最大,表明 SOM 是染色面积比的最直接影响因素。非优先流区有机质(SOM)、容重(BD)、砂粒(Sand)是影响非优先流区非染色面积比的主要影响因子。通径分析结果显示(表 6),自变量 SOM,BD、砂粒(Sand)对因变量  $ND_c$  的直接作用分别为-0.35,0.37,-0.33。BD 通径系数绝对值最大,表明 BD 是非染色面积比的最直接影响因素。

表5 优先流区通径分析结果

| 因子  | 相关系数 | 直接作用 | 间接作用 |      |
|-----|------|------|------|------|
|     |      |      | SOM  | TP   |
| SOM | 0.58 | 0.41 |      | 0.17 |
| TP  | 0.55 | 0.36 | 0.19 |      |

表6 非优先流区通径分析结果

| 因子   | 相关系数  | 直接作用  | 间接作用  |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      |       |       | SOM   | BD    | Sand  |
| SOM  | -0.55 | -0.35 |       | -0.14 | -0.06 |
| BD   | 0.56  | 0.37  | 0.14  |       | 0.05  |
| Sand | -0.45 | -0.33 | -0.06 | -0.06 |       |

### 3 讨论

优先流是非均匀性入渗过程,分布状况也呈现差异性,因而评价优先流发育程度时常用多指标进行表征。本研究中,3种土地利用方式中草地和果园地量化优先流程度的各指标总体趋势相同,且数值均表现出草地高于果园地,农地则出现相反的趋势。优先流分数表明染色区域对应的优先路径占比,长度指数反映优先流路径不规则程度,染色面积比量化了水分的运移量,变异系数体现土层间染色变化程度。草地的优先流分数和长度指数中位数值高于其他两种样地,表明草地优先流程度最高,孔隙之间连通性较好。农地的染色面积比中位数值最低,但其变异系数中位数值最高,水分运移量较低,随土层深度增加染色变化程度较大,与农地表层受耕种影响土壤大孔隙被破坏难以入渗情况相符。果园地的各项指标表明其在3种样地中水分运移量最大,优先入渗占比最低,土层间染色变化程度低。田香姣等<sup>[25]</sup>对重庆四面山2种土地利用方式下的优先流形态特征参数进行了分析,结果表明受耕作措施和植物根系的不同作用草地优先路径发育程度要比农地要高。这与本研究的结果相似。本研究中3种土地利用方式下优先流指标差异的原因可能与植被类型、土壤性质、耕作方式等因素有关<sup>[15]</sup>。

为全面反映土壤的优先流特征,张东旭等<sup>[26]</sup>利用多指标评价法计算了优先流程度评价指数,其值越高,优先流现象越明显,优先流发育程度越高。该研究中对6个优先流特征指标、优先流程度评价指数和分形维数,并分析了坡耕地优先流发育程度,结果表明南瓜地和柑橘地的优先流程度高于玉米地,证明了用优先流评价指数评价优先流程度的可行性与合理性。本研究中优先流分数与优先流评价指数呈现相同趋势,其他5项量化优先流指标中除农地外均与评价指数趋势相同,优先流发育程度由高到低为草地、农地、果园地。这些结果表明本研究采用的优先流综合评价指数可以较好地表明优先流发育程度。

土地利用方式、土层和优先流区域对除pH外的土壤性质有显著( $p < 0.05$ )的影响,并且这种影响随着土层深度的增加而降低。有机质、总孔隙度、非毛管孔隙度、砂粒在果园地最高,粉粒和容重在农地最高,黏粒、pH、毛管孔隙度和饱和导水率在草地最高。农地和果园地与草地土壤性质的差异受人为管理模式如耕作、施肥等影响较大<sup>[27-30]</sup>。除此之外,也与植物或作物根系类型、在土层中的分布有关<sup>[31-32]</sup>。本研究中染色面积比与优先流区的有机质、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和导水率呈极显著正相关,与容重呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。并且通径分析得出有机质是增大染色面积比的最直接影响因素,而容重则与之相反。这与已有的研究较一致<sup>[13]</sup>。高朝侠等<sup>[33]</sup>研究表明,黄土丘陵区刺槐林地、草地、小麦地和苹果林地土壤大孔隙度、数目及大孔隙连通性有明显差异。王佩佩等<sup>[32]</sup>对黄土丘陵区3种典型植被群落的研究表明,优先流染色面积比主要受土壤总孔隙度、团聚体稳定性、根系生物量密度和有机质含量的影响。优先流发育的程度主要取决于优先流通道(土壤大孔隙、根孔、土壤动物活动等)的形成<sup>[18,32]</sup>。本研究3种土地利用方式中,相比农地和果园地,草地具有较高的有机质含量,这有助于降低土壤容重、提高土壤结构的稳定性,加之丰富的根系生长,促进了土壤大孔隙的形成、增加土壤孔隙度,提高土壤水力性质(如饱和导水率),扩大了优先流通道所影响的范围。

优先流区和非优先流区的土壤性质表现出较大的差异。与非优先流区相比,优先流区有较高的有机质、总孔隙度、毛管孔隙度、黏粒、粉粒和饱和导水率,有较低的容重、非毛管孔隙度和砂粒。

杜晓晴等<sup>[34]</sup>对华北方土石山区林地的研究表明,优先流区比基质流区有较高的非毛管孔隙度和总孔隙度,但毛管孔隙度无明显差异。王赵男等<sup>[12]</sup>研究认为黑龙江天然次生林土壤染色区非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均高于未染色区,但容重低于未染色区。Jiang等<sup>[2]</sup>研究表明,橡胶林土壤优先流区容重和田间持水量较非优先流区低,非毛管孔隙度和饱和持水量则较非优先流区高。本研究结果与以上研究结论基本一致。土壤理化性质的这种异质性在空间上促使了优先流运动的形成,改变了水分在土壤中的入渗和再分配过程<sup>[18]</sup>。一些研究也表明优先流区和非优先流区土壤性质的差异可能主要受根系类型和形态参数的诱导<sup>[32,35]</sup>。优先流区多为近根区,其土壤理化性质受根系穿插、活根生长、死根腐烂等作用的极大影响<sup>[36]</sup>;而非优先流区多为远根区,其受到根系的影响作用较小<sup>[35]</sup>。今后的

研究还应考虑根系的分布及其形态特征,以准确地评价根系对优先流发育的影响。

## 4 结论

(1) 基于多指标评价法的优先流评价指数由大到小为草地(1.18)、农地(1.12)、果园地(0.88)。草地优先流发育程度较高,农地其次,果园地较低。

(2) 方差分析表明土地利用方式、土层和优先流区域对除 pH 外的土壤性质有显著( $p < 0.05$ )的影响。土壤有机质、总孔隙度、毛管孔隙度和饱和导水率的提高和容重的降低有助于优先流的发育,土壤容重则会导致相反的结果。

(3) 多元逐步回归分析表明,优先流区的有机质和总孔隙度是影响染色面积比的主要影响因子,非优先流区的有机质、容重、砂粒是影响非染色面积比的主要影响因子。有机质(SOM)是染色面积比的最直接影响因素。容重(BD)是非染色面积比的最直接影响因素。

(4) 土地利用方式通过影响土壤理化性质,使其在土层以及优先流路径间产生异质化,从而影响优先流的发育程度。

### 参考文献:

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982,18(5):1311-1325.
- [2] Jiang X J, Zakari S, Wu J, et al. Can complementary preferential flow and non-preferential flow domains contribute to soil water supply for rubber plantation? [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020,461:117948.
- [3] Liu W J, Zhu C J, Wu J E, et al. Are rubber-based agroforestry systems effective in controlling rain splash erosion? [J]. *Catena*, 2016,147(1):16-24.
- [4] Liu W J, Li J T, Lu H J, et al. Vertical patterns of soil water acquisition by non-native rubber trees(*Hevea brasiliensis*) in Xishuangbanna, southwest China[J]. *Ecohydrology*, 2014,7(4):1234-1244.
- [5] Bogner C, Baltasar T Y W, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering[J]. *Ecological Informatics*, 2013, 15:44-52.
- [6] Van Noordwijk M, Schoonderbeek D, Kooistra M J. Root-soil contact of field-grown winter wheat[J]. *Geoderma*, 1993,56(1/4):277-286.
- [7] Bogner C, Wolf B, Schlather M, et al. Analysing flow patterns from dye tracer experiments in a forest soil using extreme value statistics[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008,59(1):103-113.
- [8] Jiang X J, Liu W J, Chen C F, et al. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China[J]. *Geoderma*, 2018,320: 161-171.
- [9] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. *Water Resources Research*, 2013,49 (6):3071-3092.
- [10] 张希彪,上官周平.人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J].*生态学报*,2006,26(11): 3685-3695.
- [11] 耿韧,张光辉,李振伟,等.基于分层抽样法的小流域土壤物理性质和有机质差异特征[J].*水土保持学报*, 2014,28(6):194-199,205.
- [12] 王赵男,辛颖,赵雨森.黑龙江省水源地优先流区与基岩质流区土壤特性分析[J].*水土保持学报*,2017,31(1): 49-54.
- [13] 解璐萌,张英虎,张明祥,等.黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征[J].*生态学报*,2021,41(19): 7713-7724.
- [14] 杨锐婧,冯民权,汪银龙.汾河下游丰水和枯水期的河流硝酸盐污染来源特征[J].*水土保持通报*,2019,39 (6):211-217.
- [15] 侯芳,杨志,程金花,等.永定河(北京段)滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征[J].*水土保持学报*,2021, 35(3):143-149.
- [16] 张海林,杨秀峰,易军,等.亚热带红壤区不同土地利用方式下的土壤剖面水流特征[J].*水土保持学报*,2019, 33(6):233-241.
- [17] 苏辉东,赵思远,贾仰文,等.崇陵流域土石山区坡面优先流发育路径研究[J].*水文*,2019,39(6):1-6.
- [18] 程竞锋,闫加亮,徐满厚,等.吕梁关帝山不同植被坡面土壤优先流特征及其影响因素[J].*生态学杂志*,2021, 40(12):3890-3900.
- [19] Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semiarid watershed[J]. *Catena*, 2009,78(1):36-47.
- [20] 贾俊平,何晓群,金勇进.统计学[M].5版.北京:中国人民大学出版社,2012:68-70.
- [21] Tobella A B, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso [J]. *Water Resources Research*, 2014,50(4):3342-3354.
- [22] 郭艳红.基于均方差分析法的北京市土地资源承载力评价[J].*资源与产业*,2011,13(6):62-66.
- [23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [24] 吕贻忠,李保国.土壤学试验[M].北京:中国农业出版社,2010.



- [6] Guo B, Zhang J, Meng X, et al. Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN[J]. *Scientific Reports*, 2020,10(1):1-17.
- [7] 李莹,赵珊珊.2001—2020年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J].*气候变化研究进展*,2022,18(2):154-165.
- [8] Tellman B, Sullivan J A, Kuhn C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods [J]. *Nature*, 2021,596:80-86.
- [9] 刘凯,聂格格,张森.中国1951—2018年气温和降水的时空演变特征研究[J].*地球科学进展*,2020,35(11):1113-1126.
- [10] Li L, Yao N, Liu D L, et al. Historical and future projected frequency of extreme precipitation indicators using the optimized cumulative distribution functions in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,579:124170.
- [11] 叶殿秀,王遵娅,高荣,等.1961—2016年我国区域性暴雨过程的客观识别及其气候特征[J].*气候变化研究进展*,2019,15(6):575-583.
- [12] 马铮,王国复,张颖娴.1961—2019年中国区域连续性暴雨过程的危险性区划[J].*气候变化研究进展*,2022,18(2):142-153.
- [13] 陕西省土壤普查办公室.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992:13-16.
- [14] 中国科学院遥感应用研究所.陕北黄土高原地区遥感应用研究[M].北京:科学出版社,1991:1-2.
- [15] 赵业婷.基于GIS的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [16] 石育中,杨新军,王婷.陕南秦巴山区可持续生计安全评价及其鲁棒性分析[J].*地理研究*,2016,35(12):2309-2321.
- [17] 陕西省气象局《陕西气候》编写组.陕西气候[M].西安:陕西科学技术出版社,2009:8-12.
- [18] 刘政鸿.陕西省近50年来降水量时空变化特征分析[J].*水土保持研究*,2015,22(2):107-112.
- [19] 王雯燕,王丽,李国平,等.陕西省汛期极端降水时空演变特征[J].*干旱气象*,2016,34(6):952-957.
- [20] 郑小华,娄盼星,刘环,等.陕西极端降水时空变化特征研究[J].*沙漠与绿洲气象*,2019,13(4):9-16.
- [21] 程维明,周成虎.中国1:400万数字地貌数据集[DB/OL].国家青藏高原科学数据中心, DOI: 10.11888/Geogra. tpdc.270602.2014.
- [22] 路培,吴发启.陕西省近30年降水变化特征分析[J].*水土保持研究*,2013,20(4):64-68.
- [23] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2013:63-66.
- [24] 张志高,张凯昭,蔡茂堂,等.1960—2019年河南省降水结构时空变化特征[J].*水土保持研究*,2022,29(4):159-166.
- [25] 董旭光,顾伟宗,孟祥新,等.山东省近50年来降水事件变化特征[J].*地理学报*,2014,69(5):661-671.

(上接第153页)

- [25] 田香姣,程金花,杜士才,等.2种土地利用方式下的优先流特征[J].*水土保持学报*,2014,28(3):37-41.
- [26] 张东旭,张洪江,程金花.基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J].*农业机械学报*,2017,48(12):214-220,277.
- [27] 阮芯竹.重庆四面山不同土地利用类型优先路径特征[D].北京:北京林业大学,2016.
- [28] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2015,237:9-20.
- [29] Abou Najm M R, Jabro J D, Iversen W M, et al. New method for the characterization of three-dimensional preferential flow paths in the field[J]. *Water Resources Research*, 2010,46(2),Doi:org/10.1029/2009WR008594.
- [30] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,393(1):53-64.
- [31] 刘畅,周明华,张博文,等.张家口坝上地区土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].*土壤与作物*,2021,10(3):333-343.
- [32] 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.
- [33] 高朝侠,徐学选,宇苗子,等.黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J].*应用生态学报*,2014,25(6):1578-1584.
- [34] 杜晓晴,牛健植,侯琨,等.华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J].*中国水土保持科学*,2015,13(3):51-57.
- [35] 武亚楠,张英虎,张振明,等.黄河三角洲湿地植物根区优先流区和基质流区土壤特性分布差异[J].*北京师范大学学报:自然科学版*,2021,57(1):69-75.
- [36] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2010,24(1):33-36.