

不同降雨条件下海南省典型农田土壤优先流特征及其对溶质运移的影响

李道宽^{1,2}, 吴小龙^{2,3}, 陈淼^{2,3}, 王文峰¹

(1.海南大学热带农林学院,海南儋州 571737; 2.中国热带农业科学院环境与植物保护研究所,海南海口 571101; 3.海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站,海南儋州 571737)

摘要: [目的] 探究海南省典型农田土壤不同降雨条件下优先流发育特征及其对溶质运移的影响,为热带地区农业水环境污染治理与风险防控提供理论依据。[方法] 以海南省典型砖红壤为研究对象,采用野外染色示踪、Br⁻模拟溶质运移以及图像分析技术,研究不同降雨条件下土壤垂直剖面优先流发育与离子分布特征,分析优先流特征指数、壤中流类型组成比例等与优先流区、土壤基质区离子浓度的相关关系。[结果] ①大雨(30 mm)和暴雨(60 mm)降雨条件下的总染色面积分别为 506.85 和 857.86 cm²,最大染色深度分别为 16.80 和 31.08 cm,优先流综合评价指数分别为 0.25 和 0.55,表明降雨量从 30 mm 增至 60 mm 时优先流发育程度更高。②30 mm 降雨量条件下,5—10,10—15 cm 土层优先流路径中的离子浓度较土壤基质路径显著增加了 22.14%~63.91%;60 mm 降雨量下,10—15,15—20 cm 土层优先流路径中的离子浓度较土壤基质路径显著增加了 54.98%~63.54%,优先流对溶质运移存在显著促进作用。③大孔隙流与溶质浓度变异系数呈显著正相关,土壤大孔隙流比例越高,土层溶质浓度差异越大。[结论] 海南省典型农田土壤存在明显优先流现象,优先流综合评价指数随降雨量增加而增大,土层中大孔隙流比例越高溶质浓度差异越大,优先流路径对溶质运移具有显著促进作用。

关键词: 优先流; 基质流; 壤中流类型; 溶质运移; 热带地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0086-12 中图分类号: S152.7⁺2, S157.1

文献参数: 李道宽, 吴小龙, 陈淼, 等. 不同降雨条件下海南省典型农田土壤优先流特征及其对溶质运移的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 86-97. Li Daokuan, Wu Xiaolong, Chen Miao, et al. Preferential flow characteristics of typical farmland soils in Hainan Province under different rainfall conditions and their effects on solute transport [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 86-97. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.009; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.009.

Preferential flow characteristics of typical farmland soils in Hainan Province under different rainfall conditions and their effects on solute transport

Li Daokuan^{1,2}, Wu Xiaolong^{2,3}, Chen Miao^{2,3}, Wang Wenfeng¹

(1.College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China;

2.Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences Environment and Plant Protection Institute, Haikou, Hainan 571101, China;

3.Danzhou Tropical Agroecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: [Objective] Preferential flow development and its effects on solute transport under different rainfall conditions in typical farmland in Hainan were examined to provide a theoretical basis for agricultural water pollution control and risk prevention in tropical areas. [Methods] Using typical latosol in Hainan Province as the research subject, field dye tracing, Br⁻ simulated solute transport, and image analysis techniques were used to investigate the development of preferential flow and ion distribution in soil vertical profiles under different rainfall conditions. Correlations between preferential flow indices, composition ratios of interflow types, and ion concentrations in preferential flow zones and soil matrix zones were analyzed. [Results] ① Under heavy rain (30

收稿日期: 2024-11-04

修回日期: 2025-01-20

采用日期: 2025-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“农田土壤优先流驱动的地膜源微塑料迁移富集机制”(42307097); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630042023008); 热区农业面源污染监测与防控科技创新团队项目(1630042025011)

第一作者: 李道宽(1995—), 男(汉族), 四川省眉山市人, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染防治。Email: 740912311@qq.com。

通信作者: 吴小龙(1993—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 助理研究员, 主要从事水土保持与农业面源污染防治方面研究。Email: wuxiaolong2022@126.com。

mm) and rainstorm (60 mm) conditions, the total stained areas were 506.85 cm² and 857.86 cm², respectively. The maximum staining depths were 16.80 cm and 31.08 cm, respectively. The evaluation indices for preferential flow were 0.25 and 0.55, respectively, indicating that the degree of preferential flow development was higher when rainfall increased from 30 mm to 60 mm. ② With 30 mm rainfall, the ion concentrations in the preferential flow paths of the 5—10 cm and 10—15 cm soil layers increased significantly by 22.14%—63.91% compared to the soil matrix paths. Under 60 mm rainfall, the ion concentrations in the preferential flow paths of the 10—15 cm and 15—20 cm soil layers increased significantly by 54.98%—63.54% compared to those in the soil matrix paths. This demonstrated that preferential flow significantly promotes solute transport. Macropore flow showed a significant positive correlation with the coefficient of variation of solute concentration. The higher the proportion of macropore flow, the greater the difference in solute concentration across the soil layers. [Conclusion] Preferential flow was evident in the typical farmland soils in Hainan Province. The comprehensive evaluation index of the preferential flow increased with rainfall. The difference in solute concentration across the soil layers was greater with a higher proportion of macropore flow. The preferential flow paths significantly promote solute transport.

Keywords: preferential flow; matrix flow; interflow type; solute transport; tropical region

优先流也称为非平衡流^[1],具体表现为大孔、指状、漏斗和地下侧向流等水分运移形式,其高导水率的土壤大孔隙网络结构使得水分和溶质可以绕过部分土壤基质,迅速向下运移至更深的土壤层^[2]。由于优先流相对于基质流的速率更快,因此可以产生快速的横向和纵向水流,虽然优先流占土壤体积的比例很小,但优先流在土壤水分总渗透量所占比例却可以达到约11%~94%^[3]。优先流在土壤或流域的径流产生、水分分配和养分运输过程中起着关键作用,同时也会导致土壤养分和水分的快速流失以及加剧土壤侵蚀、地下水污染和地质灾害等现象发生的潜在可能性^[4]。

目前关于优先流对溶质运移的研究较少,大多集中在土壤养分、污染物运移等方面。曾辉等^[5]研究了大孔隙优先流对于土体中水分和硝态氮运移的影响,结果发现大孔隙存在会显著增加硝态氮淋洗量;刘蕾等^[6]研究了不同土地利用类型优先流对磷素迁移淋溶的风险,结果表明设施土壤优先流路径中土壤速效磷的增加速率是基质流路径的2倍;张英虎等^[7]研究了优先流区和基质流区土壤重金属浓度分布特征,结果表明90%以上重金属赋存于土壤表层且分布受优先流影响显著,优先流区重金属浓度大于基质流区;Li Mingfeng等^[8]研究了不同降雨量下优先流和Br⁻、NO₃⁻的运移特征,结果表明降雨量增大促进了溶质向深层运移。上述研究表明优先流对于养分、污染物等溶质运移有较大影响,但并未深入分析土壤剖面壤中流组成类别与溶质运移的相关关系。

海南岛属热带季风海洋性气候,物产资源丰富,年降水量为940.8~2 388.2 mm^[9],降雨量大的同时养分淋溶十分严重^[10]。因此,本研究以海南典型农田为研究对象,通过亮蓝染色示踪与Br⁻模拟溶质运移

并结合图像处理与数据分析的方法探究海南典型农田土壤在不同降雨量条件下的优先流发育特征及其对溶质运移的影响,以期明确不同降雨量下的优先流发育特征及其溶质分布情况,并进一步探明优先流类型及其路径分布对溶质运移的影响,研究结果对预防优先流引起的环境风险和保护水环境安全具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于中国热带农业科学院环境与植物保护研究所文昌试验基地,该研究区属于滨海平原,地理坐标110.46°E,19.32°N,土壤质地为砂壤土(黏粒:15.0%,粉粒:8.6%,砂粒:76.4%),类型为砖红壤,肥力较低。基地常年轮作辣椒、木薯、玉米等作物,年均降水量1 721.6 mm,雨季主要在5—10月,占全年的79%。年均温为23.9℃,积温为8 474.3℃,属于热带海洋季风气候。极端天气通常为夏季暴雨和春季干旱。

1.2 样地选取与布设

野外试验于2023年12月进行,试验样选择当地常见的玉米种植地作为试验样地,在种植地内分别设置2个60 m²的试验小区进行试验,海南岛降雨量年内分配不均,汛期(5—11月)降雨量占全年降雨量的80%以上,依据海南省水务厅2018—2023年发布的年降雨量数据,结合当地实际降雨情况设置30 mm(大雨),60 mm(暴雨)两个降雨量进行研究。本研究分别模拟大雨3场,暴雨3场进行分析,试验样地的基本情况详见表1。

1.3 染色示踪试验

在试验样地内分别选择地表相对平坦的位置,

每个试验样地设置 3 个面积为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的重复样方,每个样方之间间隔不低于 2 m ,小于 4 m 。每个样地的 3 个重复样方确定后,将样方内的地表植物和枯枝落叶等杂落物清理掉,将地表进行简单平整。然后将长、宽分别为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的方形金属板缓慢砸入样地土壤中,砸入深度为 20 cm ,露出地面高度 10 cm (表 2)。在砸入前用凡士林涂抹钢板与土壤接触面,避免染色剂沿缝隙流发生侧向入渗影响试验结果。

表 1 样地基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of experimental plot

土层深度/cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水量/%	田间持水量/%	总孔隙/%
0—10	1.35 ± 0.06	31.96 ± 3.04	19.47 ± 1.67	42.88 ± 2.56
10—20	1.42 ± 0.08	28.48 ± 3.31	17.96 ± 1.13	40.10 ± 2.80
20—30	1.82 ± 0.10	15.00 ± 1.83	10.46 ± 0.57	27.18 ± 1.82
30—40	1.76 ± 0.06	16.70 ± 1.47	10.81 ± 0.88	29.29 ± 2.06

注:数据为平均值±标准误。

随后使用浓度为 4 g/L 的亮蓝^[11]作为染色示踪剂进行土壤优先流观测, 10 g/L 的 KBr ^[12]来模拟溶质运移。根据布设的染色样方表面积和实际消耗量计算出染色示踪试验所需溶液为 P_{30} 处理 7.5 L (30 mm 降雨)和 P_{60} 处理 15 L (60 mm 降雨)。然后使用背负式喷洒器以均匀速率(1.3 L/min)将亮蓝与 KBr 混合溶液均匀喷洒于金属框内,喷洒均匀度为 0.95 。喷洒结束后,用遮光防水帆布覆盖于金属框之上持续 24 h ,以免染色溶液蒸发或染色剖面受到降雨等影响。

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	试验编号	小区尺寸/ cm^2	对应降雨量/mm
P_{30}	A	50×50	30
	B	50×50	30
	C	50×50	30
P_{60}	A	50×50	60
	B	50×50	60
	C	50×50	60

1.4 样品采集与测定

染色示踪试验开始前,在处理区样方的金属边框外 10 cm 处,以垂向 10 cm 为间距,分层采集 $0\text{—}40\text{ cm}$ 的土壤样品,每个样方 4 钻合为 1 个样,用于测定土壤的容重、含水量、孔隙度等基本物理性质。染色示踪试验结束 24 h ,取下防水帆布并将金属框从土壤中移走,进行染色剖面挖掘。垂直染色剖面挖掘以水平宽度 5 cm 由外到内进行挖掘,深度为每一面的染料

最大渗透深度。每个重复样方均挖掘 3 个土壤剖面,共计 18 个土壤染色剖面。对土壤剖面进行挖掘后使用土壤刀和毛刷对挖掘后的水平剖面进行平整与修整,并使用佳能 EOS80D 数码相机对土壤剖面进行拍摄,参数设置为快门 2 s ,ISO100,F5.6。拍照时使用 2 副直尺呈 90° 平行放置于每个土壤剖面边缘,方便后期图像校正处理。

对土壤剖面拍照完毕后,使用特制的 $50 \times 50\text{ cm}$ 网格线框进行土壤样品采集。每个样方采集 2 个土壤剖面,共计 12 个土壤样品采集剖面。将采集的土壤剖面样品风干研磨过筛,取 10 g 以 $1:5$ 的土水比添加去离子水并放置于振荡器上 12 h 进行震荡,随后将混合溶液放置于离心机以 $3\ 000\text{ rpm/h}$ 的速度进行离心操作,利用定性滤纸对混合溶液上清液进行过滤,最终利用溴离子计(PXSJ-216F,上海雷磁)对溴离子浓度进行测定。

1.5 图像处理与数据分析

将拍摄的土壤剖面照片用 Adobe Photoshop CC 2019 进行几何校正以及染色、未染色区域的黑白二值化处理,最后将得到的 tif 文件用 Image Pro Plus v6.0 软件包进行位图分析,然后将得到的数据储存在 Excel 表格中进行染色图像解析。

1.5.1 优先流特征指标参数计算

(1) 土壤染色面积比(DC, %)。是指土壤垂直剖面图像内被亮蓝染色部分的面积占土壤垂直剖面图像总面积的比值,即水分渗透区域面积占总剖面的面积之比^[13]。

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

式中:DC 为染色面积所占比例(%); D 表示染色区域(cm^2); ND 表示未染色区域(cm^2)。

(2) 基质入渗深度(UniFr, cm)。指基质流在垂直剖面上染色面积比降低到 80% 之前的土壤垂直剖面深度^[14]。

(3) 剖面染色面积比变异系数(C_v)。指染色剖面图像的染色差异程度,是衡量土壤垂直剖面中优先流引起的土壤染色区与未染色区之间的差异大小的指标^[15]。该指标也与剖面染色图像的不均匀性有关,剖面染色面积比变异系数越小时,优先流发育程度越高。

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (DC_i - \overline{DC})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC_i} \quad (2)$$

式中: n 为土壤垂直剖面的层数; DC_i 为第 i 层土壤染色面积比; \overline{DC} 为染色面积比的平均值。

(4) 优先流比(PFfr, %)。是指在垂向剖面所有以优先流形式入渗的水流面积占剖面总水流流路的面积比例,当优先流比越大,优先流发育程度高^[14]。

$$\text{PFfr} = \left(1 - \frac{\text{UniFr} \cdot W}{\text{TSA}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:PFfr表示土壤剖面优先流区染色面积分数(%); W 为土壤垂直剖面水平方向宽度,本文取值为50 cm;TSA为土壤剖面总染色区面积(cm^2)。

(5) 长度指数(LI, %)。即指在土壤垂直剖面连续两层中,下一层的染色面积比与上一层染色面积比差值的绝对值之和。

$$\text{LI} = \sum_{i=1}^n |\text{DC}_{i+1} - \text{DC}_i| \quad (4)$$

式中: DC_{i+1} , DC_i 分别代表土壤剖面中第*i*+1层和第*i*层对应的染色面积比; n 为土壤剖面中垂直土层的总数,本试验中*n*为500。

(6) 染色深度(Depth, cm)。土壤垂直剖面中亮蓝染色剂所抵达的最深处的距离。

(7) 染色路径宽度(SPW, mm)。指定土壤层中独立染色路径的宽度^[16]。

$$\text{SPW} = \frac{\text{SN}}{R} \quad (5)$$

式中:SN指独立染色路径所占像素点个数(pixel); R 为图像分辨率,本次研究中 R 为1 pixel/mm。

(8) 壤中流类型划分。根据 Weiler 和 Flüher^[17] 所提出的划分标准,对垂直剖面染色路径形态和壤中流类型进一步划分。

1.5.2 优先流发育程度综合评价指数 采用多指标法对优先流发育程度进行综合评价^[18],即用极差法对染色面积比、基质流深度、染色面积比变异系数、优先流比、长度指数、染色深度等6个优先流特征参数进行无量纲标准化处理后得到优先流综合评价指数PFI。

(1) 优先流指数标准化。

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中: Z_{ij} 为优先流指标数据标准化处理后的值; X_{ij} 为优先流指标数据实测值; X_{\min} 为数据中的最小值; X_{\max} 为最大值。

(2) 随机变量均值 $E(G_j)$ 。

$$E(G_j) = \frac{1}{m} Z_{ij} \quad (7)$$

(3) 指标 G_j 的均方差:

$$\sigma(G_j) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [Z_{ij} - E(G_j)]^2} \quad (8)$$

(4) 指标 G_j 的权重系数 W_j :

$$W_j = \frac{\sigma(G_j)}{\sum_{j=1}^6 \sigma(G_j)} \quad (9)$$

(5) 优先流综合评价指数PFI:

$$\text{PFI} = Z_{ij} W_j \quad (10)$$

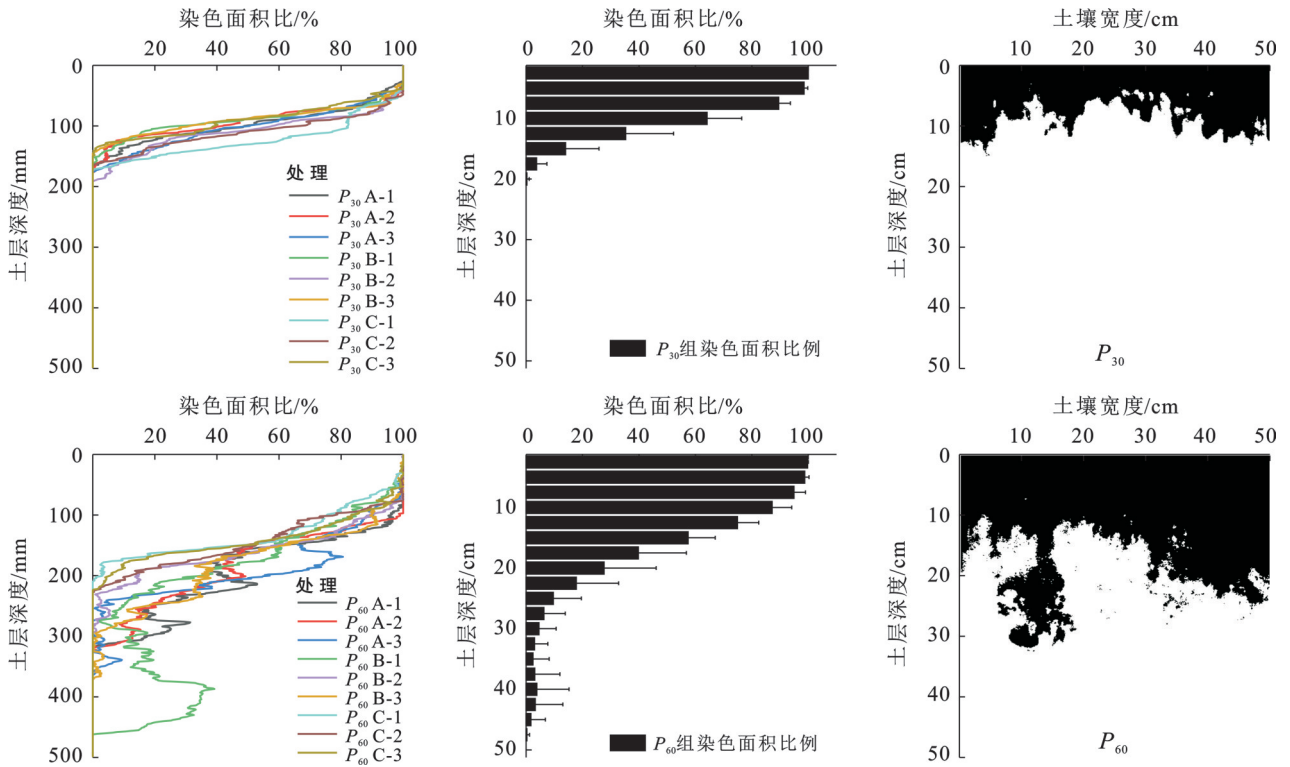
本研究采用 Excel 2019 对数据进行处理,使用 SPSS 25 进行独立、配对样本 *t* 检验、Spearman 相关分析,使用 Origin 2021 进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 不同降雨量下土壤优先流分布特征

2.1.1 优先流分布特征 由图1可知,两种降雨量下,海南典型农田土壤均存在优先流现象,且随降雨量的增加而逐渐明显,不同降雨量对土壤垂直剖面的染色程度影响较大。 P_{30} 处理下,深度为0~7.8 cm的土层染色均匀,随着水分入渗加深,7.8 cm 土层深度以下的染色路径开始分化,水分绕过土壤大部分基质以指流、漏斗流等形式向下进行渗透,分布范围为7.8~16.8 cm。整体的染色面积比变化曲线随土层深度的增加呈现出单调的L形递减,且速率较快。 P_{60} 处理下,土壤剖面的染色区域明显增大,并且出现侧偏移和零星色斑,这说明土壤中存在明显的裂隙和迂回的孔隙网络结构,这为水分的快速下渗提供了路径和通道。相较于 P_{30} 处理, P_{60} 处理的土壤剖面染色面积比曲线变化整体呈现出S形。

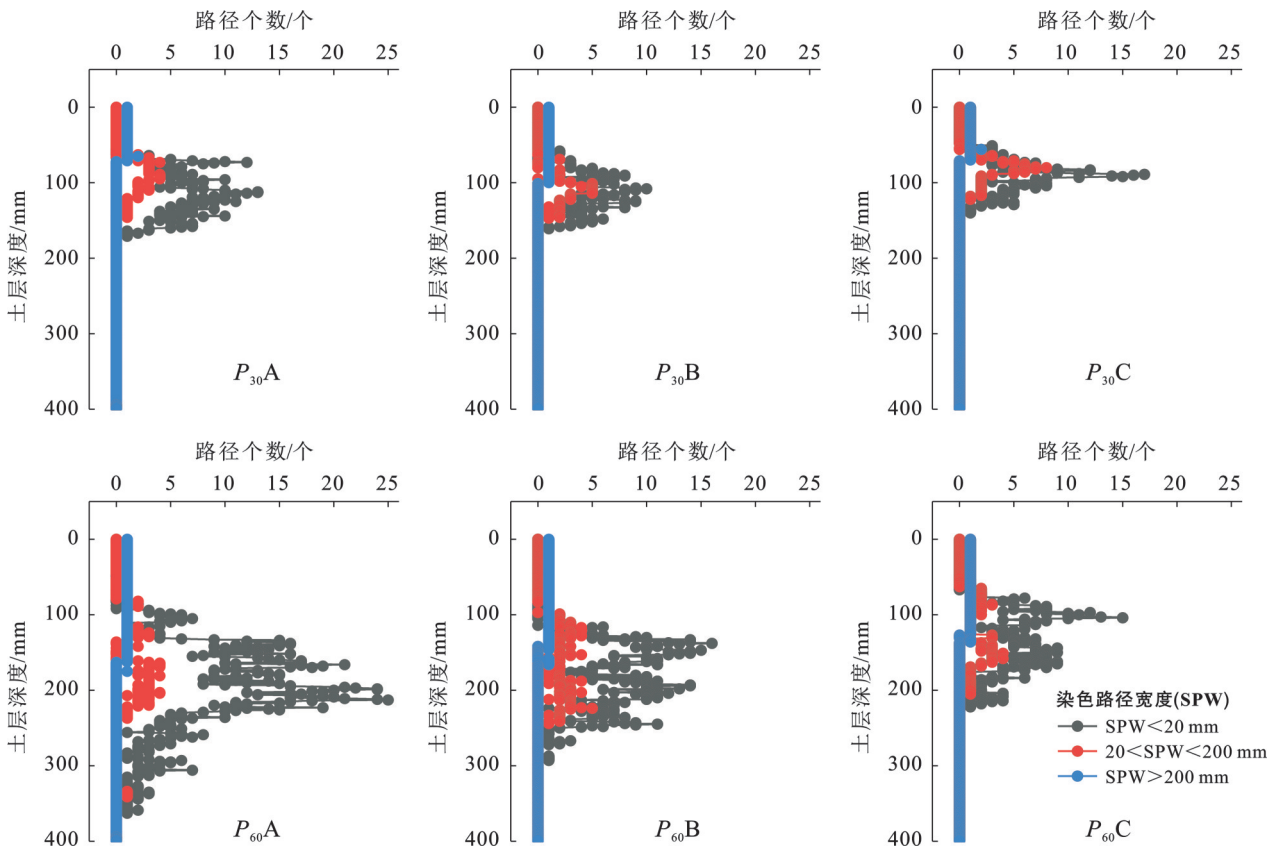
2.1.2 染色路径宽度与壤中流类型 土壤染色剖面独立染色路径的形态分布与其导水能力存在一定的联系。根据对不同宽度染色路径面积比可以对土壤剖面壤中流类型进行分类,从而进一步对剖面优先流种类进行探究^[17,19]。 P_{30} 和 P_{60} 处理的土壤剖面中的染色路径分布如图2—3所示。不同处理土壤垂直剖面中的路径宽度(SPW) <20 mm的染色路径数量都大于 $20 < \text{SPW} < 200$ mm和 $\text{SPW} > 200$ mm。并且 $\text{SPW} < 20$ mm的染色路径数随着土层深度的增加出现明显的峰值变化。 P_{30} 处理下 $\text{SPW} < 20$ mm的染色路径数量在0~17范围内,主要出现在5 cm以下和20 cm以上土层深度区域。 P_{60} 处理下, $\text{SPW} < 20$ mm的染色路径数量在0~25范围,路径主要分布在10—35 cm的土层深度。不同处理下, $\text{SPW} > 200$ mm的染色路径数量比例最小,且主要分布在浅层土壤,相较于 P_{30} 处理, P_{60} 处理 $\text{SPW} > 200$ mm染色路径向15 cm土层延伸。在图3中,不同处理下的土壤剖面中 $\text{SPW} > 200$ mm的染色路径面积所占比例随着土层深度的加深而呈现减小趋势。而 $20 < \text{SPW} < 200$ mm, $\text{SPW} < 20$ mm的染色路径面积比例则是随着土层深度的增加逐渐增大。



注： P_{30} 、 P_{60} 分别为30 mm、60 mm降雨量处理组。下同。

图1 不同降雨量下各剖面染色面积比

Fig.1 Ratio of stained area for each profile under different rainfall amounts



注：SPW为染色路径宽度；A、B、C为试验编号。下同。

图2 不同降雨量下土壤垂直剖面染色路径数分布趋势

Fig.2 Distribution trend of stained path numbers in soil vertical profiles under different rainfall amounts

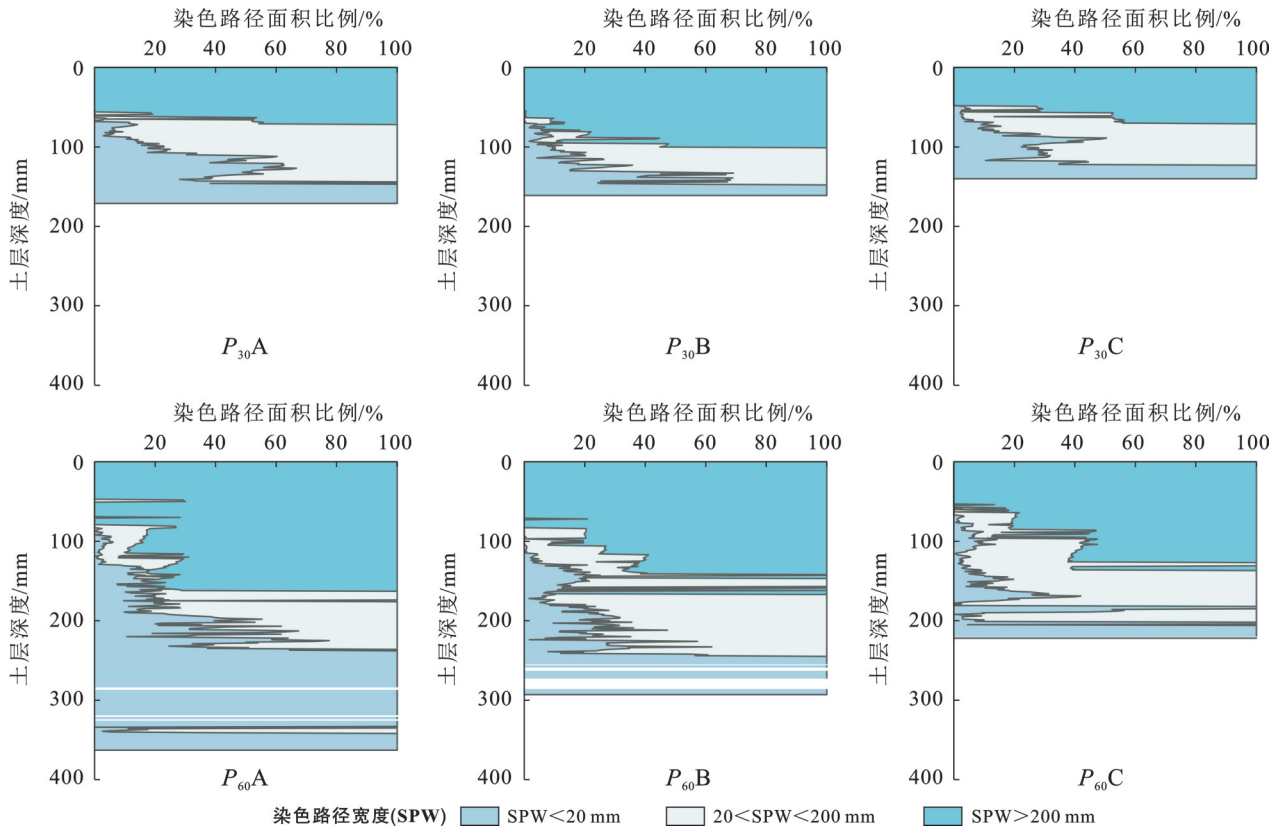


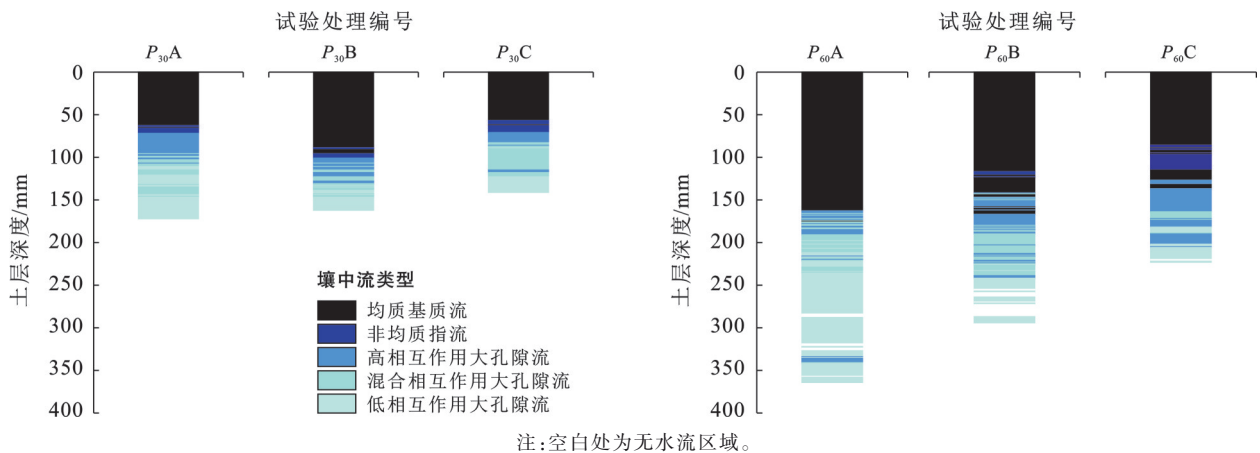
图 3 不同降雨量处理下土壤垂直剖面染色路径面积比例

Fig.3 Proportion of stained path area in soil vertical profiles under different rainfall treatments

从图 4 可以看出,两种降雨量下的土壤剖面都出现了明显的优先流现象, P_{30} 处理下,土壤垂直剖面中的均质基质流占 45.43%,非均质指流占 6.07%,大孔隙流占 48.47%。

P_{60} 处理下的土壤垂直剖面均质基质流占 49.8%,非均质指流占 4.23%,大孔隙流占 45.97%。表明随着降雨量的增大,土壤垂直剖面中的大孔隙

流路径逐渐趋于饱和,冗余的水分向着水平方向侧向流动,从而导致土壤垂向剖面中均质基质流比例增大,而优先流比例有所减小。相较于 P_{30} 处理, P_{60} 下的土壤剖面基质流深度更深,优先流发育程度也更高。两种降雨量下土壤垂直剖面染色路径发育情况均呈现出均质基质流—非均质指流—大孔隙流的变化趋势。



注:空白处为无水流区域。

图 4 不同降雨量处理下的土壤剖面壤中流类型

Fig.4 Subsurface flow types in soil profiles under different rainfall treatments

2.1.3 优先流特征参数 将获得的不同降雨量下的有关优先流发育情况的 6 个特征指标进行无量纲化处理,并进一步计算相应的优先流综合评价指数,用

以对不同降雨量处理下的优先流发育情况进行更为直观地评价。各项优先流评价指标的均值、均方差和权重系数详见表 3。

表 3 各项优先流评价指标的相关转换参数
Table 3 Correlation and conversion parameters for each preferential flow evaluation indicator

评价指标	均值	均方差	权重系数
染色面积比	0.39	0.34	0.19
染色面积比变异系数	0.59	0.31	0.17
基质流深度	0.48	0.33	0.19
优先流比	0.38	0.21	0.12
长度指数	0.23	0.29	0.16
最大染色深度	0.30	0.29	0.16

由表 4 可知,两种降雨量条件下不同优先流特征指标均存在显著差异($p < 0.05$)。P₃₀, P₆₀处理条件下

表 4 不同降雨量下优先流特征指标

Table 4 Indicators of preferential flow characteristics under different rainfall amounts

对应降雨量	DC/%	TSA/cm ²	CV	UniFr/cm	PFfr/%	LI/%	Depth/cm	P _{FI}
30 mm	20.27±2.30 ^a	506.85±57.62 ^a	1.78±0.13 ^a	7.84±1.27 ^a	22.86±4.73 ^a	119.2±6.48 ^a	16.80±1.44 ^a	0.25±0.03 ^a
60 mm	34.31±5.27 ^b	857.86±131.71 ^b	1.18±0.21 ^b	11.8±1.54 ^b	30.63±7.41 ^b	223.47±80.33 ^b	31.08±8.25 ^b	0.55±0.14 ^b

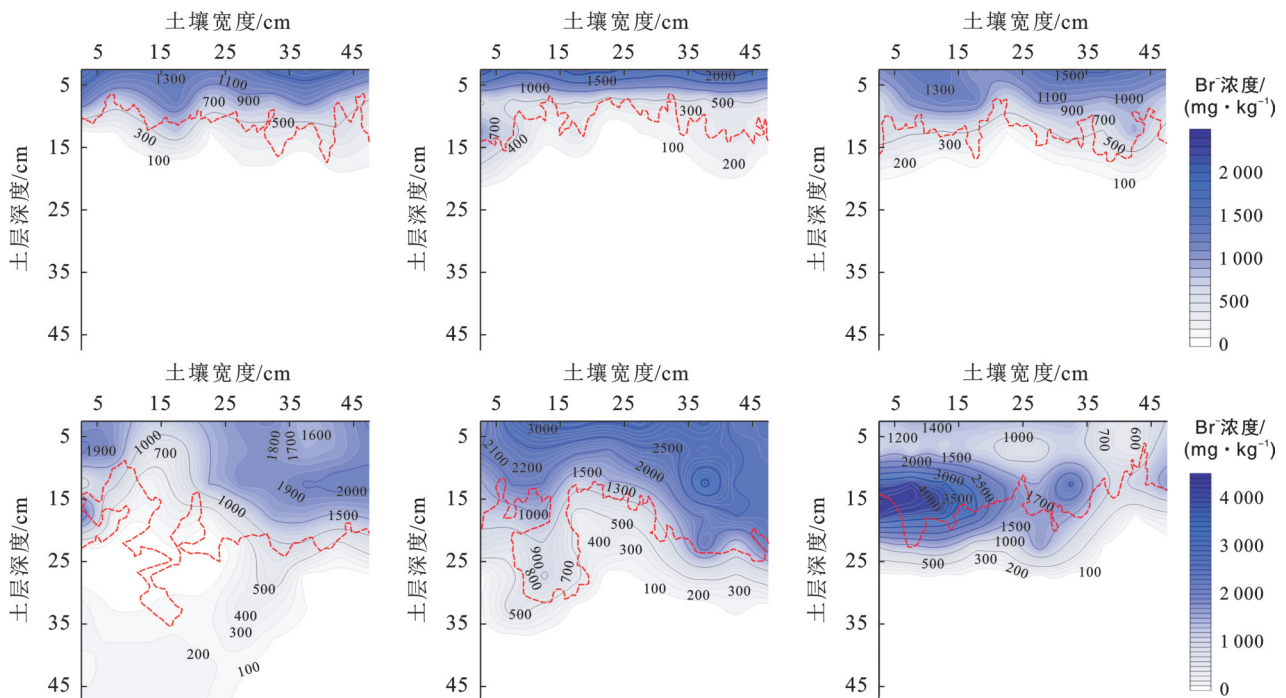
注:①DC, TSA, CV, UniFr, PFfr, LI, Depth, P_{FI}分别为染色面积比、总染色面积、染色变异系数、基质流深度、优先流比、长度指数、最大染色深度、优先流综合评价指数;②同列不同小写字母表示优先流特征指标在不同降雨量下差异显著($p < 0.05$)。

2.2 土壤优先流对溶质运移的影响

2.2.1 不同降雨量下溶质分布特征 从图 5 可以看出,两种降雨量下,溶质浓度整体随土层深度的增加而逐渐降低。P₃₀处理下,随着土层深度的加深,溶质浓度变异系数逐渐增大,在 15—20 cm 深度处达到最

染色面积比分别为 20.27% 和 34.31%,总染色面积分别为 506.85, 857.86 cm²。染色面积比变异系数越小,表示优先流发育程度越好, P₆₀处理染色面积比变异系数为 1.18,显著小于 P₃₀处理的 1.78。相较于 P₃₀处理的 7.84 cm, P₆₀处理基质流深度为 11.8 cm,说明随着降雨量的增大,相应的优先流发生区也逐渐延后。优先流比和长度指数越大,优先流发育程度越好, P₆₀处理下优先流比和长度指数分别为 30.63% 和 223.47%,均显著大于 P₃₀处理下的 22.86%, 119.2%。当降雨量从 30 mm 提升至 60 mm 时,土壤优先流综合评价指数(P_{FI})由 0.25 显著增加至 0.55。

大,为 105.49%。表明该土层深度溶质浓度空间异质性最大。而 P₆₀处理下,溶质浓度变异系数呈现出先随土层深度的加深而增大后减小的趋势,在 20—25 cm 深度处达到最大,为 86.03%。证明在该土层深度,溶质浓度的空间异质性最大。



注:红色标线为亮蓝染色区域边界线。

图 5 不同降雨量下土壤垂直剖面溶质浓度分布

Fig.5 Distribution of solute concentration in soil vertical profiles under different rainfall amounts

2.2.2 优先流路径、土壤基质中的溶质分布特征 如图 6 所示, P₃₀处理下, 5—10 cm, 10—15 cm 土层中

优先流路径的溶质浓度显著高于土壤基质($p < 0.05$), 而 15—20 cm 土层范围, 优先流路径和土壤基

质中的溴离子浓度没有显著差异。5—10 cm, 10—15 cm 土层优先流路径溶质浓度分别比土壤基质高出 22.14%, 63.91%。P₆₀ 处理条件下, 10—15 cm, 15—20 cm 土层中优先流路径的溶质含量显著高于

土壤基质($p < 0.001$), 而 20—25 cm, 25—30 cm 土层范围, 优先流路径和土壤基质中的溴离子浓度无显著差异。10—15 cm, 15—20 cm 土层, 优先流路径溶质浓度分别比土壤基质高出 54.98%, 63.54%。

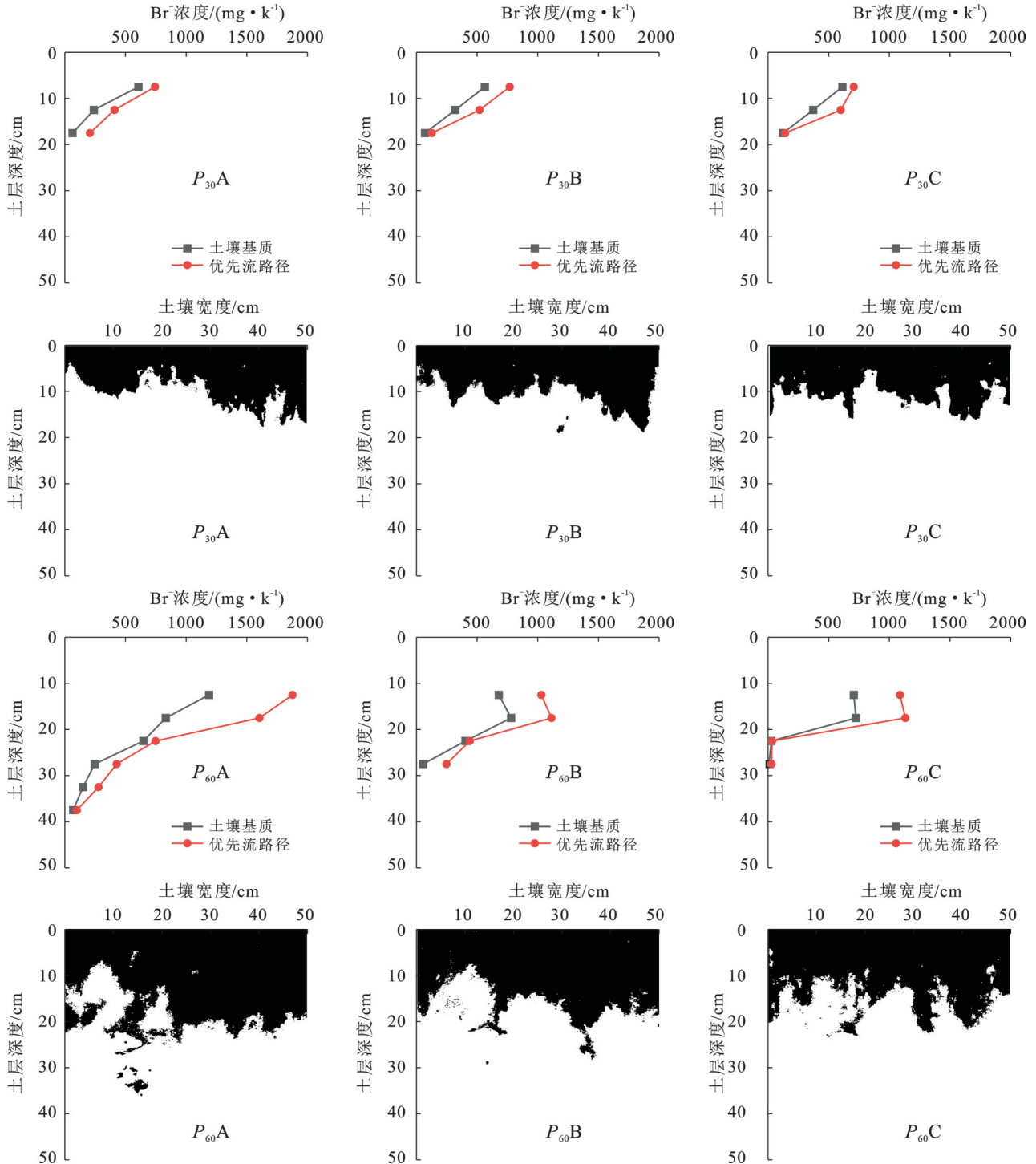


图 6 不同降雨量下两种路径的溶质垂直分布特征

Fig.6 Vertical distribution characteristics of solutes in two pathways under different rainfall amounts

2.2.3 优先流发育对溶质运移的影响 从表 5 可知, 基质流深度、长度指数与 5—20 cm 土层溴离子浓度显著正相关。优先流比与 0—15 cm 土层溴离子浓

度无显著相关, 但与 15—20 cm 土层的溴离子浓度显著正相关。染色面积比变异系数与 5—20 cm 土层的溴离子浓度显著负相关。染色面积比、最大染

色深度、优先流综合评价指数等皆与 5—20 cm 土层的溴离子浓度显著正相关。表明相较于 0—5 cm 土壤,优先流发育程度与 5—20 cm 土层深度溶质浓度关联性更强,且对 5—20 cm 土层深度的溶质分布影响更大。

表 5 优先流发育程度对不同深度溶质分布的影响
Table 5 Impact of preferential flow development on solute distribution across different depths

优先流发育指标	土层深度 Br 浓度			
	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	15—20 cm
基质流深度	0.138	0.769**	0.832**	0.741**
长度指数	0.253	0.730**	0.821**	0.791**
优先流比	0.457	0.38	0.443	0.558*
染色面积比变异系数	-0.237	-0.781**	-0.883**	-0.817**
染色面积比	0.204	0.814**	0.878**	0.801**
最大染色深度	0.193	0.770**	0.801**	0.757**
优先流综合评价指数	0.22	0.696**	0.831**	0.776**

注:**表示在 0.01 级别,相关性显著;*表示在 0.05 级别,相关性显著。

对优先流综合评价指数与土层深度的溶质浓度进行线性拟合,结果如图 7 所示。0—5 cm 的 R^2 为 0.09,拟合度较差,10—15 cm 的 R^2 为 0.62,拟合度最好,溶质浓度整体上随着土层深度的增加而呈现降低趋势。

表 6 土壤垂直剖面壤中流类型比例与溶质浓度变异系数相关性
Table 6 Correlation between proportion of different types of subsurface flow in soil vertical profile and coefficient of solute concentration variation

项目	e	d	c	b	a	溶质浓度变异系数
e	1					
d	0.231	1				
c	-0.536**	0.199	1			
b	-0.617**	-0.244	0.522**	1		
a	-0.736**	-0.421**	-0.015	0.349**	1	
溶质浓度变异系数	-0.831**	-0.286*	0.279*	0.420**	0.778**	1

注:①e, d, c, b, a 分别表示均质基质流、非均质指流、高相互作用大孔隙流、混合相互作用大孔隙流、低相互作用大孔隙流。②**表示在 0.01 水平相关性显著;*表示在 0.05 水平相关性显著。

3 讨论

本研究结果表明,两种降雨量下,海南典型农田土壤存在明显优先流现象,对比 P_{30} 处理, P_{60} 处理剖面染色深度增加的同时渗流出现侧向偏移和零星色块。此外,相较于 P_{30} 处理的 L 形递减, P_{60} 处理下的染色面积比 S 形递减波动变化范围较大,在局部深度有波峰波谷出现,说明随降雨量增大,非均质土壤的优先流路径空间异质性更强^[20]。不同降雨量下的示

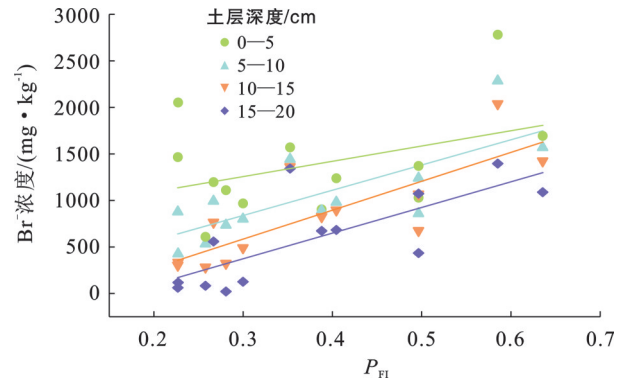


图 7 优先流综合评价指数 (P_{FI}) 对不同土层溶质浓度的拟合
Fig.7 Fitting of preferential flow integrated evaluation index (P_{FI}) to solute concentration in different soil layers

不同降雨量下土壤垂直剖面壤中流类型比例和溶质浓度变异系数相关性分析结果详见表 6。均质基质流与溶质浓度变异系数呈极显著负相关,非均质指流与溶质浓度变异系数呈显著负相关,而高相互作用大孔隙流与溶质浓度变异系数呈显著正相关,混合相互作用大孔隙流、低相互作用大孔隙流与溶质浓度变异系数呈极显著正相关。上述结果表明土层剖面的均质基质流、非均质指流所占比例越大则土层的溶质浓度差异越小,而高相互作用、混合相互作用、低相互作用大孔隙流比例越高,土层的溶质浓度差异越大。

踪试验结果表明:降雨量从 30 mm 增至 60 mm 时,总染色面积、染色面积比、基质流深度、长度指数等指标都在增大,而染色面积比变异系数则呈现出减小趋势,这与以往的研究类似^[21],单一优先流指标无法对优先流发育程度进行较为全面的定量评价,因此选取 6 个优先流特征参数计算优先流综合评价指数,结果发现,随着降雨量增大, P_{FI} 从 0.25 增加至 0.55,这与宋艺琳、程浩等^[22-23]研究结果一致,与管凝、张旭等^[24-25]研究结果相反,原因可能是不同土壤质地、初

始含水量、孔隙分布等存在差异造成的。

本研究中 P_{30} 处理下 5—10 cm, 10—15 cm 土层优先流路径溶质浓度分别比土壤基质高出 22.14%, 63.91%。 P_{60} 处理下, 10—15 cm, 15—20 cm 土层, 优先流路径溶质浓度分别比土壤基质高出 54.98%, 63.54%。这与张虎英、梁建宏、刘蕾等^[6-7, 26]研究结果相似, 即优先流路径对部分溶质运移具有更高贡献。相较 P_{30} 处理下, P_{60} 下溶质分布范围和深度更深, 优先流路径中离子浓度更高, 试验结果也侧面与谢爽、吴庆华等^[27-28]在土柱尺度模拟溶质穿透试验结论相似, 即补给通量或灌溉强度越大, 优先流的影响越明显, 进而引起溶质的快速大量迁移, 导致土壤深层溶质浓度快速提高。 P_{30} 处理下, 土层的溶质浓度变异系数出现随土层深度加深而增大的情况, 这与以往的研究^[29]结果一致, 但在 P_{60} 处理下, 变异系数呈现出随土层深度先增大后减小的趋势, 这与之前的研究不同, 究其原因可能是本研究中随土层深度增加土壤容重增大, 大孔隙数量减少, 溶质空间异质性减弱。

两种降雨量下, $SPW < 20$ mm 路径数最多, 20 mm $< SPW < 200$ mm 宽度路径次之, $SPW > 200$ mm 宽度路径最少, 这与侍世玲、骆紫藤等^[30-31]研究结果一致。汤志恒等^[32]在室内大孔隙渗流试验中发现溶质通量分布呈现沿大孔隙域向周围区域阶梯式下降的趋势, 在土柱穿透试验中得出大孔隙域溶质穿透时间早于附近基质域, 且溶质浓度上升和下降速度也更快。张小娜等^[33]也在室内土槽降雨试验中发现土壤中较大孔隙会使溴离子快速穿透至底层且出流水中溴离子浓度较高。而在本研究中也发现了类似的结果: 壤中流类型比例和溶质浓度变异系数相关分析结果表明, 溶质浓度变异系数和土壤剖面均质基质流、非均质指流呈显著负相关, 与高相互作用大孔隙流、混合相互作用、低相互作用大孔隙流显著正相关, 说明土壤剖面的大孔隙流比例越高, 土壤剖面的溶质浓度空间异质性就越强。本研究表明, 海南典型农田土壤优先流普遍发育, 叠加台风强降水事件频繁极易引发氮磷等溶质淋失风险, 建议通过优化耕作措施、改进灌溉模式以及避免强降雨前施肥可以减少肥料损失降低环境污染风险。

综上所述, 本研究虽然对不同降雨量下的优先流发育情况和溶质运移情况进行初步探索, 为由优先流引发的负面效应如环境污染风险、养分淋失风险等提供了参考, 但研究对象和区域较为单一, 未来可考虑扩大研究范围同时扩大研究的尺度类别, 结合室内土柱试验, 从单个土体、土柱尺度等进行全方位的综合研究, 结合环境因子进一步探明优先流的

形成机制以及对溶质运移的影响过程, 以期降低农业土壤中的优先流引发的环境污染风险以及保护水环境安全提供理论指导。

4 结论

(1) 海南典型农田土壤优先流较为发育, 优先流综合评价指数 P_{FI} 随降雨量的增加而增大, P_{30} , P_{60} 处理下的 P_{FI} 分别为 0.25, 0.55。

(2) P_{30} , P_{60} 处理下土壤垂直剖面中均质基质流、非均质指流、大孔隙流比例分别为 45.43%, 6.07%, 48.47% 和 49.80%, 4.23%, 45.97%。土壤剖面壤中流类别呈现出均质基质流—非均质指流—大孔隙流的变化趋势。

(3) P_{30} 处理下, 5—10 cm, 10—15 cm 土层中优先流路径的溶质含量显著高于土壤基质。 P_{60} 处理下, 10—15 cm, 15—20 cm 土层优先流路径的溶质含量显著高于土壤基质。

(4) 均质基质流、非均质指流与溶质浓度变异系数显著负相关, 而高、混合、低相互作用大孔隙流与溶质浓度变异系数显著正相关。表明土壤剖面的均质基质流、非均质指流比例越大则土壤剖面溶质浓度空间异质性越小, 相反大孔隙流比例越高, 土壤的溶质浓度空间异质性越大。

参考文献 (References)

- [1] Clothier B E, Green S R, Deurer M. Preferential flow and transport in soil: Progress and prognosis [J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(1): 2-13.
- [2] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1): 179-204.
- [3] Alaoui A. Modelling susceptibility of grassland soil to macropore flow [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 536-546.
- [4] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3071-3092.
- [5] 曾辉, 温娜, 张建丰, 等. 华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(1): 66-75.
- [6] Zeng Hui, Wen Na, Zhang Jianfeng, et al. Effect of macropore preferential flow on nitrogen leaching in a North China Plain farmland [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 66-75.
- [6] 刘蕾, 王鹤雄, 张国印, 等. 不同土地利用类型优先流对磷素垂直迁移及淋失风险的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(5): 204-211.
- [6] Liu Lei, Wang Hexiong, Zhang Guoyin, et al. Effect of

- preferential flow of different land use types on vertical migration and leaching risk of phosphorus [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(5):204-211.
- [7] 张英虎, 汤崇军, 郑海金, 等. 土壤重金属在优先流区和基质流区迁移能力研究[J]. *土壤通报*, 2015, 46(6): 1386-1391.
- Zhang Yinghu, Tang Chongjun, Zheng Haijin, et al. Research of soil heavy metal mobility in preferential flow paths and soil matrix [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(6):1386-1391.
- [8] Li Mingfeng, Yao Jingjing, Yan Ru, et al. Effects of infiltration amounts on preferential flow characteristics and solute transport in the protection forest soil of south-western China [J]. *Water*, 2021, 13(9):1301.
- [9] 吴胜安, 邢彩盈, 朱晶晶. 海南岛气候特征分析[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(4):315-323.
- Wu Sheng'an, Xing Caiying, Zhu Jingjing. Analysis of climate characteristics in Hainan Island [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2022, 13(4):315-323.
- [10] 吕烈武, 王朝弼, 吴蔚东, 等. 海南岛典型水稻土硅形态空间分布特征及其有效性的影响因素[J]. *广东农业科学*, 2020, 47(3):81-89.
- Lyu Liewu, Wang Chaobi, Wu Weidong, et al. Spatial distribution characteristics of silicon fractions and factors influencing their availability in typical paddy soils in Hainan Island [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(3):81-89.
- [11] Ketelsen H, Meyer-Windel S. Adsorption of brilliant blue FCF by soils [J]. *Geoderma*, 1999, 90(1/2): 131-145.
- [12] Flury M, Wai Nu nu. Dyes as tracers for vadose zone hydrology [J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(1): 1002.
- [13] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(7):1945-1954.
- [14] Van Schaik N L M B. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed [J]. *Catena*, 2009, 78(1):36-47.
- [15] 吴庆华, 张薇, 蔺文静, 等. 人工示踪方法评价地下水入渗补给及其优先流程度: 以河北栾城和衡水为例[J]. *地球学报*, 2014, 35(4):495-502.
- Wu Qinghua, Zhang Wei, Lin Wenjing, et al. The estimation of groundwater recharge and preferential flow based on the applied tracers: A case study of Luancheng and Hengshui areas in Hebei Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(4):495-502.
- [16] 王伟, 张洪江, 程金花, 等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1217-1223.
- Wang Wei, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of Simian Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5):1217-1223.
- [17] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils [J]. *Geoderma*, 2004, 120(1/2):137-153.
- [18] 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.
- Zhang Dongxu, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua. Quantitative analysis of preferential flow in slope farmland soils based on multi-index evaluation and fractional dimension [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12):214-220.
- [19] 王伟. 三峡库区紫色砂岩林地土壤优先流特征及其形成机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- Wang Wei. Characteristics and formation mechanism of preferential flow in forest soils of purple sandstone regions, Three Gorges reservoir area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [20] 程竞萱, 程金花, 郑欣, 等. 不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(6): 973-982.
- Cheng Jingxuan, Cheng Jinhua, Zheng Xin, et al. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors under different vegetation cover [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2018, 52(6):973-982.
- [21] 姚晶晶, 程金花, 张洪江, 等. 入渗水量对重庆四面山草地优先流影响的定量评价[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2):45-51.
- Yao Jingjing, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, et al. Quantitative evaluation of effects of infiltration amounts on preferential flow in grassland in Simian Mountain of Chongqing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2):45-51.
- [22] 宋艺琳, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同入渗水量下刺槐林地优先流特征[J]. *土壤*, 2024, 56(2): 448-456.
- Song Yilin, Bi Huaxing, Zhao Danyang, et al. Characteristic of preferential flow in *Robinia pseudoacacia* forests in Loess Plateau in western Shanxi Province under different infiltration conditions [J]. *Soils*, 2024, 56(2): 448-456.
- [23] 程浩, 初磊, 燕超, 等. 人工银杏林土壤优先流多指标定量分析与评价: 以镇江下蜀林场为例[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(12):60-66.
- Cheng Hao, Chu Lei, Yan Chao, et al. Quantitative analysis and evaluation of soil-preferential flow flows in

- artificial economic forests: A case study in Xiashu forest farm of Zhenjiang [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(12):60-66.
- [24] 管凝,程金花,侯芳,等.不同入渗水量下的西南喀斯特地区人工林土壤优先流特征[J].*土壤通报*, 2023, 54(3):587-595.
- Guan Ning, Cheng Jinhua, Hou Fang, et al. Characteristics of preferential flow of artificial forest in karst areas of southwest China under different infiltration amounts [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(3): 587-595.
- [25] 张旭,卢玉东,王博,等.黄土高原南部黄土渗流特征的染色示踪研究[J].*水土保持学报*, 2022, 36(6): 110-118.
- Zhang Xu, Lu Yudong, Wang Bo, et al. Study on the characteristics of loess seepage in the southern Loess Plateau by dye tracing method [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):110-118.
- [26] 梁建宏,吴艳宏,周俊,等.土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价[J].*农业机械学报*, 2017, 48(1): 220-227.
- Liang Jianhong, Wu Yanhong, Zhou Jun, et al. Quantitative evaluation of effect of soil types on preferential flow pathways and soil phosphorus forms [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1):220-227.
- [27] 谢爽.优先流影响下的非均质多孔介质中溶质迁移机理及模型研究[D].湖北武汉:中国地质大学,2022.
- Xie Shuang. Mechanism investigation and numerical-simulation of solute transport in heterogeneous porous media under the influence of preferential flow [D]. Wuhan, Hubei: China University of Geosciences, 2022.
- [28] 吴庆华.基于土壤水入渗补给的优先流定量研究[D].北京:中国地质科学院,2013.
- Wu Qinghua. Quantifying preferential flow for the soil water infiltration [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.
- [29] 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].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- Wu Xiaolong. Mechanism of soil water-solute transport and preferential flow characteristic in a semi-arid grassland [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [30] 侍世玲,韩若琳,蒙仲举.半干旱区放牧管理草地土壤优先流特征及其影响因素研究[J].*节水灌溉*, 2023(8):110-120.
- Shi Shiling, Han Ruolin, Meng Zhongju. Characteristics of soil preferential flow and its influencing factors in grazing grassland in semi-arid area [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(8):110-120.
- [31] 骆紫藤.华北土石山区典型林地根土层优先流特征及其影响因素研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- Luo Ziteng. Features of preferential flow and its influence factors in typical forests root zone in rocky mountain area of northern China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [32] 汤志恒.大孔隙数量孔径组合对土壤水分与溶质运移影响的试验与模拟研究[D].安徽合肥:合肥工业大学,2023.
- Tang Zhiheng. Experimental and simulation study on the effect of the combination of size and quantity of macropore on soil water and solute transport [D]. Hefei, Anhui: Hefei University of Technology, 2023.
- [33] 张小娜,冯杰.大孔隙分布对坡地产汇流及溶质运移的影响[J].*水土保持通报*, 2014, 34(6):22-26.
- Zhang Xiaona, Feng Jie. Effects of soil macropores distribution on slope runoff yield and solute transport [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 22-26.

(上接第85页)

- [21] 柳冬青,张金茜,李红瑛,等.基于地理探测器的流域土壤磷流失影响因素分析[J].*环境科学学报*, 2018, 38(12):4814-4822.
- Liu Dongqing, Zhang Jinxi, Li Hongying, et al. Impact factors of soil phosphorus loss in watershed based on geographical detector [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12):4814-4822.
- [22] 颜晓,卢志红,魏宗强,等.几种典型酸性旱地土壤磷吸附的关键影响因素[J].*中国土壤与肥料*, 2019(3):1-7.
- Yan Xiao, Lu Zhihong, Wei Zongqiang, et al. Key factors influencing phosphorus sorption for several acid upland soils [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(3):1-7.
- [23] 李建辉,李晓秀,张汪寿,等.基于地统计学的北运河下游土壤养分空间分布[J].*地理科学*, 2011, 31(8):1001-1006.
- Li Jianhui, Li Xiaoxiu, Zhang Wangshou, et al. Spatial variation of soil nutrients in downstream districts of Beiyunhe River using geostatistical methods [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8):1001-1006.