

# 亚热带红壤区不同土地利用方式下的土壤剖面水流特征

张海林<sup>1,2</sup>, 杨秀锋<sup>1</sup>, 易军<sup>1,2</sup>, 刘晓利<sup>3</sup>, 刘秀芸<sup>1</sup>, 刘目兴<sup>1,2</sup>, 陶凯<sup>1</sup>, 李胜龙<sup>1</sup>

(1.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,武汉 430079; 2.华中师范大学可持续发展研究中心,武汉 430079; 3.中国科学院南京土壤研究所,南京 210008)

**摘要:**以江西省鹰潭市的典型旱地、稻田和林地研究对象,采用野外亮蓝染色示踪试验结合室内图像处理的方法,量化了各样地土壤剖面染色特征参数,明确了水流类型的剖面分布规律,并揭示了土壤理化性质对水流特征的影响机制。结果表明:染色面积比(SAR)随着土层深度的增加急剧降低,0—60 cm 土层的平均 SAR 表现为稻田(28.16%)高于旱地(21.95%)和林地(18.64%),SAR 差异主要体现在 5—25 cm 土层;染色路径数(SPN)随着土层深度的增加先增加后减小,整个剖面的平均 SPN 为稻田最多(20 条),旱地其次(12 条),林地最少(9 条)。各样地 0—20 cm 土层染色路径宽度(SPW)均以 1—10 cm 为主,水流类型从上至下依次为均质流、非均质指流和高相互作用大孔隙流;对于 20 cm 以下土层,旱地和稻田的 SPW 以 <1 cm 为主,水流类型分别以低相互作用大孔隙流和混合作用大孔隙流为主,林地以 1—10 cm 的 SPW 为主,主要水流类型为高相互作用大孔隙流。有机质含量、根系密度和土壤机械组成等性质影响了土壤的孔隙特征,进而影响了土壤的饱和导水率和水流特征。为提高红壤区的水分利用效率、减少水土流失,可以通过破除旱地犁底层、减少稻田干湿交替下的裂隙发育,以及增加林地植被多样性等多种方式实现。

**关键词:**染色示踪;染色面积比;染色路径数;水流类型;土壤理化性质

**中图分类号:**S157.1; S155.2<sup>+</sup>5 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2019)06-0233-09

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbxb.2019.06.033

## Characteristics of Red Soil Water Flows Under Different Land Use Types in the Subtropics Zone

ZHANG Hailin<sup>1,2</sup>, YANG Xiufeng<sup>1</sup>, YI Jun<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoli<sup>3</sup>,

LIU Xiuyun<sup>1</sup>, LIU Muxing<sup>1,2</sup>, TAO Kai<sup>1</sup>, LI Shenglong<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Hubei Province, Wuhan 430079; 2.Research Institute of Sustainable Development, Central China Normal University, Wuhan 430079; 3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract:** In this study, the water flow of red soils in upland field, paddy field, and forest in Yingtan city were studied by the dye tracing experiment and digital image analysis. The parameters of dye distribution characteristics in three fields were quantified and their water flow patterns were defined. The effects of soil physiochemical properties on the water flow patterns were revealed. The results showed that the staining area ratio (SAR) decreased sharply with increasing soil depth. The higher average SAR of 0—60 cm soil layer was observed in paddy field (28.16%) than that in upland field (21.95%), and forest (18.64%), and these differences in SAR mainly happened in 5—25 cm soil layer. The staining path number (SPN) in three fields increased from soil surface to 15 cm soil depth, and then decreased continuously along the soil profile. The highest average SPN of 0—60 cm soil profile was observed in paddy field (20), followed by upland field (12) and forest (9). The soil layer of 0—20 cm depth in three fields were mainly occupied by the type of 1—10 cm staining path width (SPW), and their water flow patterns were defined as the homogeneous matrix flow, heterogeneous matrix flow, and high interaction macropore flow successively along the soil profile. For the soil layers underneath 20 cm, the upland field and forest were mainly occupied with SPW of <1 cm and water flow pattern of low interaction macropore flow and mixed interaction macropore flow. However, the SPW

收稿日期:2019-05-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41601215,41771261);湖北省自然科学基金项目(2016CFA027);华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(CCNU17ZDJC06, CCNU18QN002, CCNU19TS005)

第一作者:张海林(1976—),男,副教授,主要从事土壤地理学与环境地理学研究。E-mail:hailzhang@mail.ccnu.edu.cn

通信作者:易军(1987—),男,博士,讲师,主要从事土壤水文研究。E-mail:yijun@mail.ccnu.edu.cn

of 1—10 cm and the water flow pattern of high interaction macropore flow were mainly defined for the forest soil below 20 cm depth. The soil saturated water conductivity and water flow characteristics in three fields were strongly depended on the soil pore characteristic, which was mainly affected by the organic matter content, root density and soil particle size. In order to improve the water use efficiency and reduce soil erosion in the red soil area, the methods of breaking the plough pan of upland field, reducing soil crack formation in paddy field by rational irrigation management, and increasing the vegetation diversity of forest would be efficient.

**Keywords:** dye tracing; stained area ratio; stained path number; water flow type; soil physicochemical properties

土壤水流包括基质流和优先流,优先流的存在将显著改变水循环过程<sup>[1-2]</sup>。降雨或灌溉可以通过土壤中的大孔隙或裂隙等优先流路径快速地入渗到深层土壤,从而降低地表水土流失风险;但同时也会引起水分和养分的快速渗漏,导致水分利用效率降低、地下水污染风险加剧<sup>[3-4]</sup>。土地利用方式的差异会显著影响土壤的理化性质和根系分布,进而影响土壤的水流特征<sup>[5]</sup>。亮蓝由于具有较好的流动性、高可见性、低毒性等特征,作为常用的染色示踪剂被广泛用于土壤水流特征研究<sup>[6-9]</sup>。田香姣等<sup>[10]</sup>、魏虎伟等<sup>[11]</sup>对重庆市四面山地区黄壤的研究表明,根系显著促进了草地和林地土壤优先流的发生,导致其优先流发生深度较耕地更深。戴翠婷等<sup>[12]</sup>分析了 3 种土地利用类型下高砾石含量紫色土的优先流特征,发现林地染色深度深且不规则,耕地染色区域分布均匀,但染色面积小,且存在大量的侧向流,而脐橙园地染色范围广且优先流路径连通性好。由于不同类型土壤基础性质差异较大,导致同一土地利用方式下不同类型土壤的物理性质和水流特征影响也存在区别,因此关于不同土地利用方式下的土壤水流特征研究还需要继续完善。

红壤作为我国南方重要的土壤类型,在农业及经济发展中占有重要的地位<sup>[13]</sup>,但经过历年的开发已出现严重的生态退化,特别是水土流失问题<sup>[14]</sup>。与黄土高原<sup>[5]</sup>、华北平原<sup>[9]</sup>、西南地区<sup>[10-11]</sup>和中部地区<sup>[12]</sup>的土壤相比,南方红壤黏粒含量高(>40%)、结构水稳性差,土壤基质的饱和导水率往往更低,且该地区降雨丰富,因此优先流对促进降雨入渗和减少水土流失具有更为重要的意义。在不同土地利用方式下,耕作措施和植被作用于红壤,进而对其水分运动特征产生显著影响<sup>[15-16]</sup>。鲍文等<sup>[17]</sup>对湘中花岗岩红壤的土壤特性研究表明,造林能显著改善红壤的物理性质,而长期的耕种引起耕地的土壤理化性质和功能退化,持水能力降低。刘祖香等<sup>[18]</sup>对鹰潭红壤旱地的研究表明,耕作导致下层土壤容重增大,土壤孔隙度减小,不利于土壤的通气透水和水分保持。毕利东等<sup>[19]</sup>开展的红壤性水稻土的优先流染色示踪试验发现,稻田犁底层具有显著的防渗功能;Zhang 等<sup>[20]</sup>认

为,裂隙的发育会削弱犁底层的防渗能力。目前围绕红壤区不同土地利用方式的对比研究多集中于土壤理化性质和养分,而水流特征的研究主要关注单一土地利用类型<sup>[21-22]</sup>,定量对比不同土地利用方式下的红壤剖面水流特征研究较少。

本文以江西鹰潭红壤地区的典型旱地、稻田和林地土壤为研究对象,采用亮蓝染色示踪和数字图像处理的方法,量化 3 种土地利用方式下的土壤剖面水流特征,并揭示土壤性质对水流特征的影响机制,以期为合理的土地利用方式规划和水土流失控制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样地选取

研究区位于江西省鹰潭市余江县(28°04′—28°37′N, 116°41′—117°09′E),该地处于中亚热带季风气候区,平均气温 17.7~18.5℃,年降水量 1 537 mm,年潜在蒸发量 1 100~1 200 mm。其中,3—6 月为雨季,占全年降水量的 61%~69%,7—9 月为旱季,占全年蒸发量的 40%~59%。主要土壤类型为第四纪黏土母质发育的红壤<sup>[23]</sup>。

在中国科学院鹰潭红壤生态实验站附近选取典型旱地、稻田和林地作为试验样地。旱地和稻田均由林地开垦而来;旱地开垦年限为 20 年,主要作物类型有花生、西瓜、红薯和芝麻;稻田开垦年限为 30 年,以双季稻种植为主。林地为自然生长的马尾松纯林,平均胸径、树高和冠幅分别为 0.06, 7.98, 1.59 m,林下鲜有草本或灌木生长。所选的旱地、稻田和林地土壤母质相同、空间距离较小,且地形相似,可以认为旱地和稻田在未开垦前其土壤性质与林地相近。

### 1.2 土样采集与室内分析

于 2017 年 11 月在上述样地的中间区域各挖取 1 个深度为 80 cm 的土壤剖面。明确土壤分层后,在各土层内分别采集扰动和原状土壤样品(100 cm<sup>3</sup> 环刀),3 个样地共采集 24 个扰动土样和 120 个环刀土样。扰动土样用于根系密度(烘干法)、有机质含量(重铬酸钾容量法)和土壤颗粒组成(吸管法,国际制)的测定。原状环刀土样用于测定直径>0.1 mm 土壤大孔隙(沙箱法)、饱和导水率(定水头法)和容重(烘

干法)<sup>[24]</sup>,其中饱和导水率按照实测温度转化为 10℃ 的值。土壤主要理化性质见表 1。

表 1 土壤主要理化性质

样地	土层深度/cm	发生层	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	机械组成/%			有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	根系密度/ (g·kg <sup>-1</sup> )	>0.1 mm 当量 孔径/%	饱和导水率/ (cm·d <sup>-1</sup> )
				黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)				
旱地	0—15	耕作层	1.08±0.05	44.39	25.18	30.42	8.74±0.48	1.934	6.42±2.03	41.33±10.47
	15—27	犁底层	1.42±0.06	46.17	28.70	25.13	8.56±0.90	0.935	2.59±1.03	5.27±12.25
	27—80	心土层	1.27±0.07	48.46	28.00	23.54	5.29±0.32	0.053	3.46±1.41	13.26±8.33
稻田	0—20	耕作层	1.32±0.03	29.22	22.84	47.94	17.77±3.42	2.878	4.21±1.48	9.39±5.92
	20—30	犁底层	1.57±0.11	37.53	19.88	42.59	8.18±0.52	0.395	0.90±0.68	2.67±11.04
	30—80	心土层	1.27±0.30	42.41	21.69	35.89	2.93±1.03	0.072	1.55±0.72	9.04±5.55
林地	0—5	腐殖质层	1.18±0.02	37.42	23.65	38.94	16.61±0.53	5.231	9.56±2.20	16.39±9.03
	5—30	淋溶层	1.27±0.09	41.97	29.46	28.57	7.13±3.18	1.291	5.50±2.21	17.52±13.32
	30—80	淀积层	1.27±0.13	43.79	28.19	28.02	4.93±0.87	0.088	6.22±3.62	21.12±12.40

### 1.3 亮蓝染色试验与图像处理

在选定的 3 块样地分别清理出 1 m×1 m 的染色试验区,去除地表枯枝落叶和杂草。将长、宽、高分别为 1.0,1.0,0.3 m 的铁框打入试验点土层 0.15 m 深,并夯实紧挨铁框内、外壁的土壤,防止染液沿此处缝隙快速渗漏。然后在铁框内均匀喷洒浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液 50 L(相当于 50 mm 降雨),结束后用塑料薄膜覆盖铁框防止染液蒸发。染液喷洒结束 24 h 后开挖铁框内土壤并拍照以获取土壤染色图片。土壤剖面挖取分为垂直方向和水平方向(图 1a);垂直剖面沿图示方向以 10 cm 为间隔挖掘,共获取 5 个染色剖面;水平剖面沿图示方向在 0—20 cm 深度以 5 cm 为间隔、20—60 cm 深度以 10 cm 为间隔挖掘,共获取 8 个水平染色剖面。各剖面挖取后放置标尺,并在遮光条件下用数码相机对其进行拍摄,以获取染色图片。

利用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对原始图像进行校正(图 1b),然后借助 Image J 2.0 软件对校正后的图像进行剪裁、亮度调整和阈值调整,接着提取染色图像和进行二值化处理,生成由数值 255 和 0 组成的数值矩阵图像(图 1c),再将图像导入 Matlab 中计算生成数据后,依据 Janssen 等<sup>[25]</sup>以及 Weiler 等<sup>[26]</sup>染色图像处理办法,计算出土壤染色面积比(stained area ratio, SAR)、染色路径数(stained path number, SPN)和染色路径宽度(stained path width, SPW)。具体计算方法为:

(1)SAR 是指剖面染色面积占剖面总面积的百分比,可以反映出染色水流的总体分布比例,计算公式为:

$$SAR = \frac{a_j}{A_j}$$

式中:SAR 为土壤剖面染色面积比(%); $j$  为土层深度(cm); $a$  为染色像素数; $A$  为图像宽度(pixel)。

(2)SPN 是指每行像元中独立染色路径数量,计算公式为:

$$SPN = \left( \frac{I_j}{L_j} + 1 \right) L$$

式中:SPN 为染色路径数; $j$  为土层深度(cm); $I$  为染色和未染色像素节点数; $L$  为土壤剖面总宽度(cm)。

(3)染色路径宽度指每条独立染色路径对应的土壤实际水平宽度,可以反映染色水流的分化程度和水流特征,计算公式为:

$$SPW = \frac{l}{r}$$

式中:SPW 为染色路径宽度(cm); $l$  为独立染色路径像素数(pixel); $r$  为图像分辨率(pixel/cm)。

结合样地土壤实际染色状况,确定 SPW 划分标准为<1,1~10,>10 cm,再依据 Weiler 等<sup>[26]</sup>对水流类型的划分方法,划分低相互作用大孔隙流、混合作用大孔隙流、高相互作用大孔隙流、非均质指流和均质流等 5 种水流类型。

### 1.4 数据处理

用 SPSS 22 软件进行正态分布检验和 Pearson 相关性分析,采用 Origin 9.1 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 剖面染色形态

土壤剖面的垂直染色特征可以表征水流的垂直运动路径和入渗深度。二值化后的垂直剖面染色分布图(图 2a)表明,各样地土壤剖面均染色明显,随土层深度的增加,染色区域减少。旱地和稻田染色水流主要分布在犁底层以上;对于犁底层以下,旱地染色水流沿少数优先流路径快速运移至深层土壤,而稻田染色水流则沿大量细小、破碎的路径运移。林地腐殖质层染色较均匀,大部分区域被着色;腐殖质层以下染色区域呈狭长条带状,整体连通性较好。各染色剖面均有独立的条带状水流路径,表明优先流在各样地广泛存在。

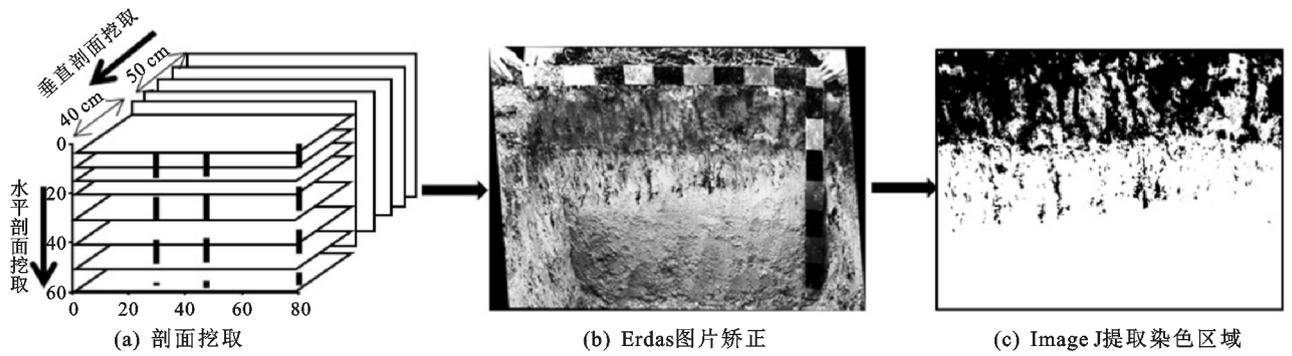


图 1 土壤剖面染色图片获取与分析示意

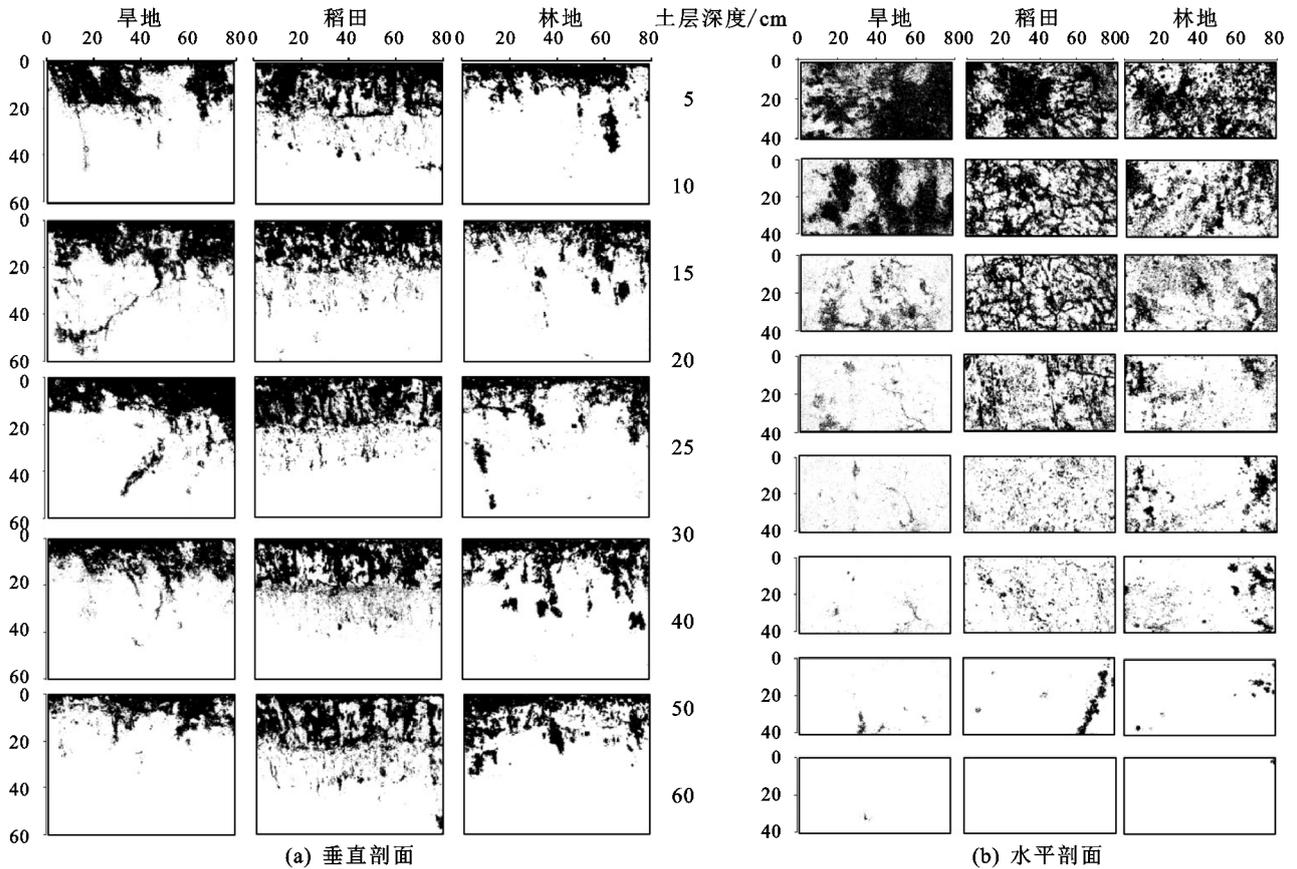


图 2 旱地、稻田和林地垂直剖面 and 水平剖面的染色形态二值化图

土壤剖面的水平染色特征可以反映不同深度土层的水流通道。研究结果(图 2b)表明,随土层深度的增加,水平剖面染色面积逐渐减小,这与垂直剖面染色面积分布特征一致。3 种样地在 15—40 cm 土层深度水流通道有较大差异,表现为稻田独立的水流通道要远多于旱地和林地;稻田的水流通道分布密集但横截面积较小,而林地存在一些横截面积较大的水流通道。

## 2.2 染色面积比与染色路径数

### 2.2.1 垂直染色面积比与水平染色面积比

同一样地不同垂直剖面的染色面积比(SAR)分布差异均较小(图 3)。染色区主要分布在上层土体,其中 0—25 cm 土层的染色面积占整个剖面总染色面积的 91%~94%。不同样地的平均 SAR 存在差异,整体上表现为稻田(28.16%)>旱地(21.95%)>林地(18.64%)。3 种

样地 0—5, 25—60 cm 土层的 SAR 差异较小,变化范围分别为 86.31%~86.80%和 2.09%~3.28%;但 5—25 cm 土层差异较为明显,表现为稻田(57.08%)>旱地(40.5%)>林地(29.03%)。SAR 均随土层深度的增加先急剧减少,而后缓慢下降;对于 0—25 cm 土层,稻田(75.65%~91.23%)和林地(77.95%~89.56%)下降幅度较旱地缓慢(82.23%~98.16%)。

水平剖面的 SAR 与垂直染色剖面整体表现出相近的变化趋势(图 3),25 cm 土层深度以上的水平 SAR 随着土壤深度的增加急剧降低,25 cm 以下则降幅较缓。稻田水平 SAR(36.80%)最大,林地(28.45%)与旱地(28.33%)较为接近。稻田水平 SAR 与旱地和林地的差异主要体现在 5—25 cm 土层,分别是旱地和林地的 1.30, 1.35 倍,25 cm 以下稻田和林地的水平 SAR 较为接近,且均大于旱地。

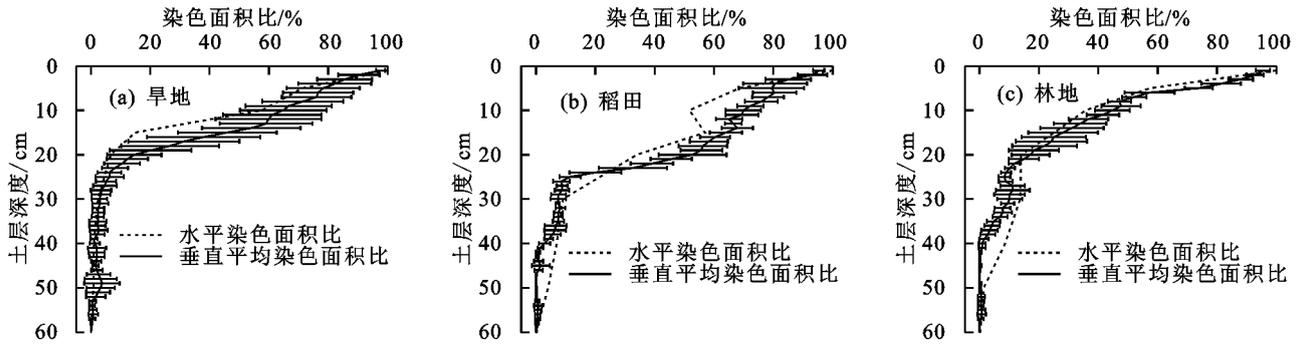


图3 旱地、稻田和林地垂直剖面 and 水平剖面的染色面积比

2.2.2 染色路径数 从图4可以看出,各样地平均染色路径数(SPN)随土层深度的增加均呈现先增加后减小的特征。旱地、稻田和林地5个染色剖面的SPN峰值分别出现在5—19,18—24,6—11 cm。3种样地的平均SPN有较大差异,表现为稻田最多(20条)、旱地其次(12条)、林地最少(9条)。

从不同深度看,0—10 cm 土层,各样地平均SPN差异较小(23.2~24.4条);但10—40 cm 土层平均SPN差距较大,稻田平均SPN分别是旱地和林地的2.1,3.3倍;在40 cm 以下,除旱地剖面2以外,各样地剖面的SPN均较小,平均SPN表现为旱地略多于林地和稻田。

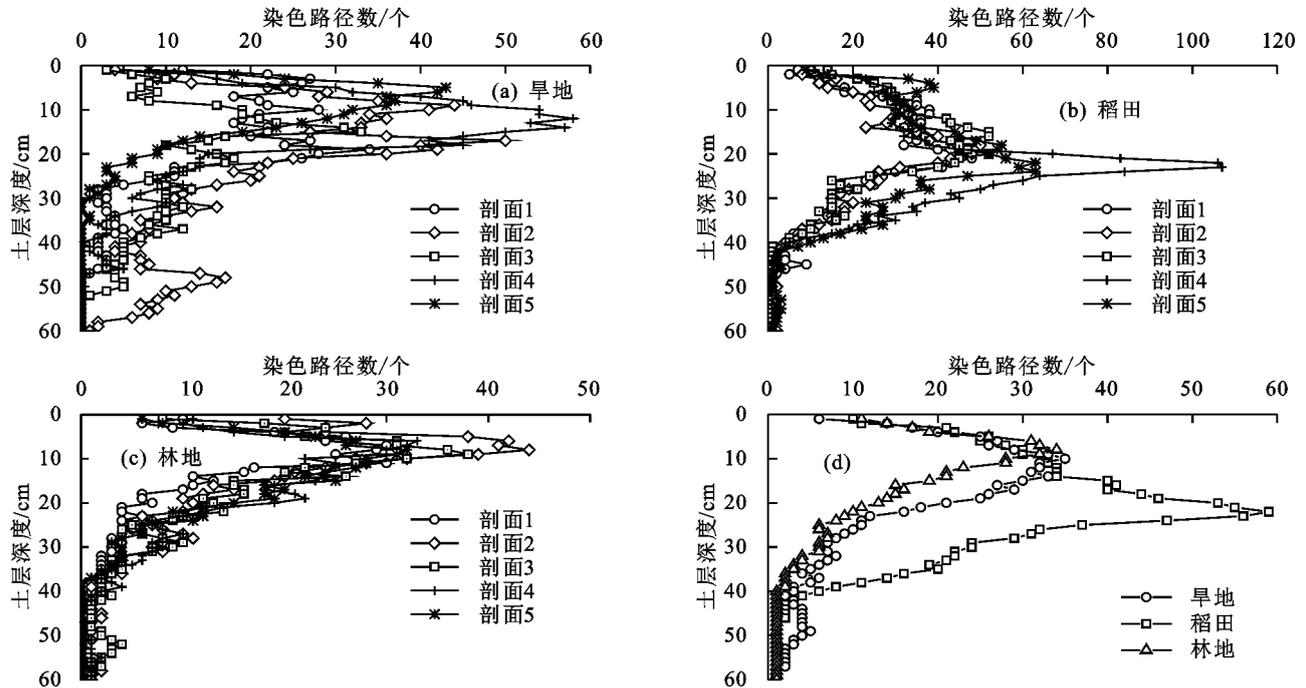


图4 旱地、稻田和林地垂直剖面的染色路径数

### 2.3 染色路径宽度与水流类型剖面分布

各样地平均染色路径宽度(SPW)显示(图5), <1 cm SPW 和 1~10 cm SPW 均随土层深度的增加先增加后减少; >10 cm SPW 则集中在0—10 cm 土层,且随土层深度的增加而减少。从不同深度看,0—5 cm 土层,各样地 SPW 均以 >10 cm SPW 为主,占总 SAR 的 54%~69%;对于 5—25 cm 土层,各样地 SPW 均以 <1 cm 和 1~10 cm SPW 为主,且其峰值均出现在该层;对于 25 cm 以下土层,稻田以 <1 cm SPW 为主(占比 77%),林地以 1~10 cm SPW 为主(占比 84%),而旱地这 2 种 SPW 占比相近。

根据各样地不同深度的水平剖面染色二值化结果制成水流分布示意图(图6)。可以看出,各样地水流主

要分布在0—40 cm 土层;其中旱地和稻田水流主要分布在0—10,0—20 cm 土层深度范围,林地相对于旱地和稻田水流垂直分布则更均匀(0—40 cm)。

水流类型分类结果(表2)表明,各样地均质流和非均质指流主要分布在0—10 cm 的浅层土壤中;10 cm 以下水流类型均表现为不同类型大孔隙流的混合分布,其中旱地和稻田主要为低相互作用大孔隙流和混合作用大孔隙流,林地主要为高相互作用大孔隙流和混合作用大孔隙流。

### 2.4 土壤理化性质与染色特征参数的相关性分析

为探讨不同土地利用方式下红壤的理化性质对水流特征的影响机制,对各理化性质与染色特征参数进行了相关分析(表3)。

从表 2 可以看出,有机质含量、黏粒含量、砂粒含量、直径 $>0.1$  mm 孔隙、根系密度和饱和导水率 6 种土壤性质均影响剖面染色特征。其中,平均 SAR 分别与有机质含量、砂粒含量、直径 $>0.1$  mm 孔隙、根系密度和饱和导水率呈显著或极显著正相关,与黏粒含量呈极显著负相关;平均 SPN 与砂粒含量呈显著

正相关,与黏粒含量呈显著负相关;对于 SPW, $<1$  cm SPW 与各土壤性质均无显著相关关系, $1\sim 10$  cm SPW 与大部分土壤性质呈显著或极显著正相关,与黏粒含量呈极显著和显著负相关。此外,部分染色特征参数之间或土壤理化性质之间也有较强的相关关系。

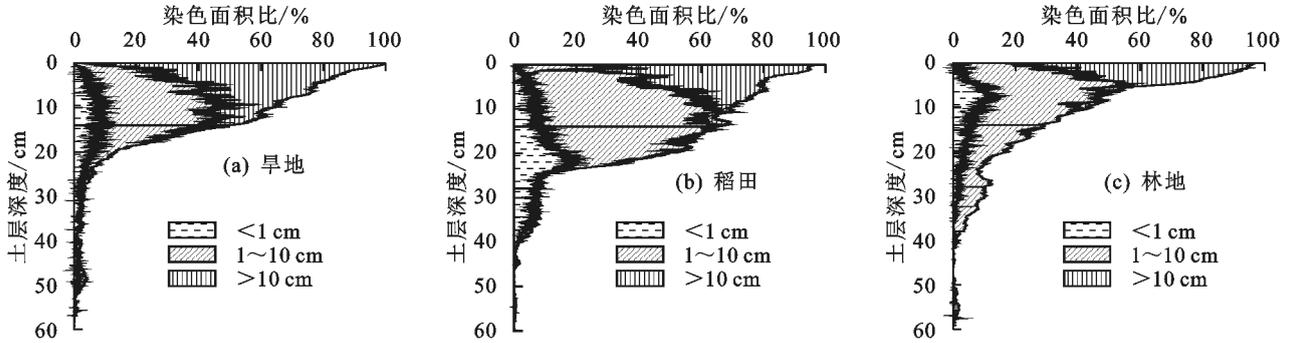
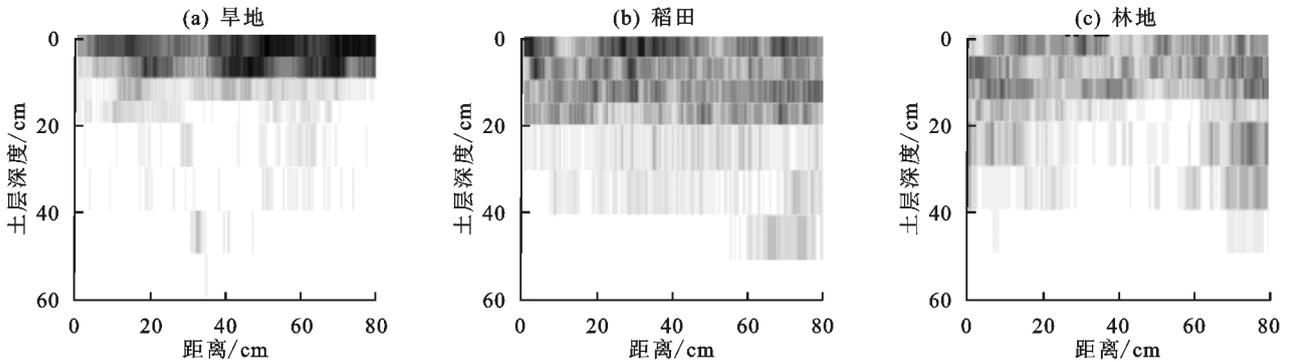


图 5 旱地、稻田和林地垂直剖面的染色路径宽度



注:图中颜色越深表明水流越集中。

图 6 旱地、稻田和林地水平染色剖面的水流分布特征

表 2 旱地、稻田和林地垂直剖面的水流类型

旱地		稻田		林地	
土层深度/cm	水流类型	土层深度/cm	水流类型	土层深度/cm	水流类型
0—4	a	0—2	a	0—2	a
4—9	b	2—6	b	2—4	b
9—16	e	6—17	e	4—7	e
16—23	c	17—22	c	7—11	c
23—28	d	22—43	d	11—14	e
28—29	c	43—46	c	14—15	c
29—40	d	46—53	d	15—16	e
40—43	c	53—54	e	16—25	c
43—45	d	54—56	c	25—38	e
45—52	c	56—58	e	38—41	c
52—60	d	58—60	d	41—48	d
				48—49	c
				49—51	d
				51—52	c
				52—53	e
				53—54	c
				54—57	e
				57—60	d

注:表中 a 为均质流;b 为非均质指流;c 为混合作用大孔隙流;d 为低相互作用大孔隙流;e 为高相互作用大孔隙流。

## 3 讨论

### 3.1 土地利用方式对红壤理化性质的影响

对于相同母质来源的土壤,土地利用方式的差异会引起土壤理化性质的分异。旱地和稻田经过长期的人为耕作以后,形成结构致密的犁底层,与林地对应深度土壤相比有更大的容重与更少的直径 $>0.1$  mm 孔隙。邹文秀等<sup>[27]</sup>对黑土的研究也发现,犁底层的存在导致农田相对于林地、草地和裸地的土壤容重更大,总孔隙度更小。对于耕作层土壤,旱地表层土壤受翻耕影响导致其容重小于林地。而稻田土壤耕作层容重高于林地腐殖质层,与淋溶层较为接近,这是由于泥浆化导致其耕层土壤的团聚体被破坏,大孔隙减少。另外,由于翻耕作业的差异,旱地的耕作层深度较稻田浅。

农业耕作影响土壤的有机质含量,旱地表层土壤在经历长期耕作后,有机质含量(8.74 g/kg)显著低于林地表层土壤(16.61 g/kg),而稻田耕作层有机质含量(17.77 g/kg)与林地较为接近。一是外源有机质输入量的差异,林地表层土壤的有机质会受到枯枝落叶的补充,水稻根系和残茬也给稻田输入较多的新

鲜有机质,而旱地作物的新鲜有机质输入较少;二是土壤通气状况的差异,旱地长期翻耕改善了土壤的通气状况,矿化速率加快,而稻田频繁灌溉导致土壤长期处于厌氧状态,有利于有机质的保存<sup>[28]</sup>。此外,耕作也会影响土壤的机械组成,主要表现为稻田耕作层

和犁底层黏粒含量更低。Zhang 等<sup>[29]</sup>认为,在地下水埋深较大的条件下,稻田土壤的黏粒颗粒会被大量的灌溉水淋洗出土壤剖面。土地利用方式的改变能够直接影响地表植被状况,进而影响根系分布,总体表现为林地的根系密度要高于稻田和旱地。

表 3 不同土地利用方式的土壤理化性质与染色特征参数相关分析

因子	平均 SAR	平均 SPN	<1 cm SPW	1~10 cm SPW	>10 cm SPW	容重	有机质 含量	黏粒 含量	粉粒 含量	砂粒 含量	>0.1 mm 孔隙	根系 密度	饱和导 水率
平均 SAR	1												
平均 SPN	0.795	1											
<1 cm SPW	0.694	0.986 **	1										
1~10 cm SPW	0.965 **	0.876 *	0.784	1									
>10 cm SPW	0.897 *	0.487	0.373	0.752	1								
容重	-0.236	0.226	0.347	-0.153	-0.403	1							
有机质含量	0.975 **	0.786	0.705	0.906 *	0.916 *	-0.122	1						
黏粒含量	-0.954 **	-0.856 *	-0.784	-0.928 **	-0.822 *	0.233	-0.940 **	1					
粉粒含量	-0.260	-0.146	-0.111	-0.230	-0.275	-0.197	-0.341	0.122	1				
砂粒含量	0.950 **	0.823 *	0.746	0.916 *	0.835 *	-0.147	0.963 **	-0.946 **	-0.438	1			
>0.1 mm 孔隙	0.896 *	0.600	0.466	0.891 *	0.797	-0.433	0.822 *	-0.797	-0.444	0.868 *	1		
根系密度	0.929 **	0.557	0.447	0.801	0.997 **	-0.369	0.944 *	-0.863 *	-0.275	0.872 *	0.820 *	1	
饱和导水率	0.834 *	0.401	0.248	0.783	0.839 *	-0.528	0.763	-0.682	-0.426	0.758	0.960 **	0.841 *	1

注: \*\* 表示在置信度(双测)为 0.01 时相关性显著; \* 表示在置信度(双测)为 0.05 时相关性显著。

土壤性质的改变共同影响土壤的孔隙特征,表现为旱地与稻田的犁底层和心土层>0.1 mm 直径的孔隙度明显低于其耕作层与林地土壤。孔隙的改变进一步影响土壤的饱和导水率,相关性分析表明,饱和导水率与直径>0.1 mm 孔隙含量呈极显著正相关( $r=0.960, P<0.01$ ),表明研究区土壤的入渗速率主要受直径较大的孔隙控制,刘祖香等<sup>[18]</sup>对鹰潭地区红壤旱地的研究也有类似发现。

### 3.2 红壤理化性质对染色形态及其特征参数的影响

地表土壤由于直接与染色液接触,因此表现为较大的 SAR 和 SPW,表层土壤的水流类型以均质流和非均质指流为主。随着土层深度的增加,水分入渗能力下降,且部分染液被上层土体吸附,导致 SAR 和 SPW 逐渐减小,这与已有研究<sup>[7,9-12]</sup>结果基本一致。而土地利用方式差异造成的土壤理化性质分异也会改变红壤的水流特征,在 3 块样地中表现为不同的染色形态。被压实的犁底层土壤容重高、大孔隙少、饱和导水率低,阻挡了染色溶液的垂直入渗,从而增加了染液与耕层土壤充分接触的时间;且耕作层土壤较疏松,水流与土壤基质的交换作用强烈<sup>[12]</sup>,最终导致耕作层染色面积增加、染色分布较为均一,表现为以>10 cm 的 SPW 为主。林地土壤由于没有犁底层对水流的阻挡,染液可以自由下渗,且林地往往存在一些由于根系凋亡而形成的大孔隙通道,染液将沿着这些优先流路径快速下渗至深层土体,导致林地 0—20 cm 土层的 SAR 较早地和稻田小(图 3)。田香娇等<sup>[10]</sup>对重庆四面山地区的紫色土研究发现,农业耕

作措施打破了大孔隙的垂直连通性,阻碍优先流的下渗,导致表层土壤以 SPW>20 cm 的基质流为主;戴翠婷等<sup>[12]</sup>研究也发现,耕地的染色区域主要分布在表层土壤,且耕作土壤的染色路径宽度较林地和园地大。犁底层的存在将显著降低降雨的入渗速率,由于旱地没有田埂包围,导致其地表径流与侵蚀将显著增加。因此,对于长期耕作的红壤旱地可以采用深耕的方式破除犁底层对水分入渗的限制,进而增加降雨入渗,减少地表径流和土壤侵蚀的风险。

犁底层的阻挡减少了农田染液的下渗,特别是旱地,在 20—40 cm 土层表现为最低的 SAR。林地 20 cm 以下土层的直径>0.1 mm 孔隙比例最高,导致 20—40 cm 土体更大的 SPW(图 5),在水流类型上表现为高相互作用大孔隙流和混合作用大孔隙流交替出现。而旱地和稻田 20 cm 以下土体的大孔隙较少,导致 SPW 较小,在水流类型上表现为低相互作用大孔隙流和混合作用大孔隙流占主导。Liu 等<sup>[30]</sup>对比了三峡地区不同海拔梯度的林地和 1 块耕地的染色特征,也发现 20 cm 以下土层耕地的 SAR(20%)小于中山林地(40%)和低山林地(35%);田香娇等<sup>[10]</sup>、戴翠婷等<sup>[12]</sup>同样发现,20 cm 以下土层林地的 SAR(15%)远高于耕地(5%),且林地路径更宽;他们认为压实和根系差异导致土壤大孔隙分布的区别,从而影响了水流特征。由于旱地是由林地转变而来,因此在旱地部分染色剖面 20 cm 以下土层也可以观测到一些连通性较好、宽度较大的染色路径(图 2)。而稻田中由于林地根系凋亡后残留的优先流通道会逐渐

被上层土壤淋洗的土壤颗粒逐渐填充<sup>[29]</sup>,导致 SPW 降低,仅在 50 cm 深度土层观察到一条较宽的染色路径(图 2)。由于植被根系和残留根系通道分布的异质性,造成大孔隙分布在不同土层存在差异,从而导致不同类型大孔隙流的交替出现。

尽管 3 个样地 0—15 cm 土层的 SPN 较为接近,但旱地和林地 15—40 cm 土层的 SPN 远少于稻田。这是由于稻田频繁干湿交替产生了大量裂隙,部分染液可以通过这些裂隙向下迁移,最终导致这些土层中有较多密集分布但破碎化的染液分布(图 2)。由于土壤样品是在饱和之后测定的,田间干湿交替形成的裂隙已经闭合,导致稻田耕作层和心土层实测的直径 $>0.1$  mm 孔隙度较小;但在染色试验过程中这些土层仍处于非饱和状态,裂隙未闭合,染液仍可以较快通过。因此,在水稻种植过程中应该尽量避免土壤裂隙的大量形成,特别是对于犁底层土壤。另外,晒田后的首次灌溉要尽量减小灌溉量,且不要进行施肥;待裂隙闭合后再增加单次灌溉量或进行施肥,以减少水分和肥料的淋失。

戴翠婷等<sup>[12]</sup>的研究表明,林地剖面的平均 SAR 显著大于旱地,Liu 等<sup>[30]</sup>和赵娇娜<sup>[31]</sup>的研究也有类似发现。而本研究却发现,旱地剖面的平均 SAR 与林地较为接近,这主要是由于林地表层土壤的 SAR 低于旱地;而 20—40 cm 土层的 SAR(5%)只略高于旱地(3%),且远低于已有研究(15%~40%)<sup>[12,30-31]</sup>。这种差异可能是由于腐殖质层性质、林地根系含量和土壤机械组成等因素的差异造成。本研究林地土壤的腐殖质层厚度(5 cm)远小于上述研究样地(15 cm)<sup>[12,30-31]</sup>,且其有机质含量(9.56 g/kg)远低于 Liu 等<sup>[30]</sup>试验样地(18.35~78.94 g/kg)。这是由于本研究林地植被单一,林下植被很少,而马尾松林的凋落物也显著少于上述阔叶林,最终导致有机质输入较少。而土壤有机质的增加会促进土壤团聚体的形成,从而改善土壤孔隙结构,促进土壤染液的入渗<sup>[32]</sup>。本研究林地腐殖质层厚度小、有机质含量低的特点导致其土壤高 SAR 的深度较浅,小于旱地耕作层(高 SAR)深度。其次,红壤林地腐殖质层以下土层的根系密度(1 g/kg)远低于 Liu 等(2~5 g/kg)<sup>[30]</sup>和赵娇娜<sup>[31]</sup>的研究结果(2~11 g/kg);而根系的存在可以增加土壤优先流通道,进而提高 SAR。另外,第四纪红色黏土发育的红壤质地黏重,相对于上述研究中的黄壤<sup>[30]</sup>、黄棕壤<sup>[30]</sup>、紫色土<sup>[10,12]</sup>和黄绵土<sup>[31]</sup>等土壤的饱和导水率更低,进而削弱了优先流通道中的染液与红壤基质的水分交换,最终导致较低的 SAR。较弱的水分交换也促使染液更易通过大孔隙向下快速迁移,导致上层土体不易保存降雨,水分利用效率降低<sup>[33]</sup>。因此,对于红壤地区,可以通过改善林地植物

群落的多样性,以增加腐殖层厚度、有机质含量和根系含量,进而提高土壤的入渗速率和表层土体的储水量,在减少地表径流和土壤侵蚀的同时,进一步提高植被对降雨的利用效率。

## 4 结论

(1)3 个样地的 SAR 均随土层深度的增加而迅速减少,旱地和稻田的染色区主要集中在耕作层,林地集中在腐殖质层;稻田平均 SAR 高于旱地和林地;各样地 SPN 随土层深度增加呈现先增加后减少的特征,稻田 SPN 最多,旱地其次,林地最少。

(2)各样地 0—20 cm 土层 SPW 均以 1~10 cm 为主,水流类型从上至下依次为均质流、非均质指流和高相互作用大孔隙流;对于 20 cm 以下土层,旱地和稻田的 SPW 以 $<1$  cm 为主,主要水流类型分别为低相互作用大孔隙流和混合作用大孔隙流,林地以 1~10 cm 的 SPW 为主,高相互作用的大孔隙流占主导。

(3)耕作和灌溉改变了旱地和稻田的土壤性质,进而导致其水流特征与林地产生分异;破除旱地犁底层对降雨入渗的限制,防止稻田干湿交替产生大量裂隙,以及提高林地植被多样性是减少红壤区水土流失、提高水分利用效率的重要手段。

### 参考文献:

- [1] 倪余文,区自清,应佩峰.土壤优先水流及溶质优先迁移的研究[J].应用生态学报,2001,12(1):103-107.
- [2] 徐绍辉,张佳宝.土壤中优势流的几个基本问题研究[J].水文地质工程地质,1999,26(6):27-30.
- [3] Larsbo M, Koestel J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2014,18(12):5255-5269.
- [4] 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,2007,58(3):523-546.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Alaoui A, Caduff U, Gerke H H, et al. A Preferential flow effects on infiltration and runoff in grassland and forest soils[J].Vadose Zone Journal,2011,10(1):367-377.
- [8] Demand D, Weiler M. A novel experiment for measuring infiltration into seasonal frozen soil[C]//European Geosciences Union. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna Austria: European Geosciences Union,2016,18(1):642.

- [9] Wu Q H, Liu C L, Lin W J, et al. Quantifying the preferential flow by dye tracer in the North China Plain [J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(3): 435-444.
- [10] 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.
- [11] 魏虎伟,程金花,杜士才,等.利用染色示踪法研究四面山两种林地优先路径分布特征[J].*水土保持通报*, 2015, 35(2): 193-197.
- [12] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].*水土保持学报*, 2017, 31(1): 103-108.
- [13] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].*生态学报*, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [14] 黄国勤,赵其国.红壤生态学[J].*生态学报*, 2014, 34(18): 5173-5181.
- [15] 王毅.壤中流控制机制及其生态水文效应的试验和模拟研究[D].北京:中国科学院大学, 2011.
- [16] 王亮亮,张中彬,彭新华.南方红壤丘陵区不同土地利用方式土壤水力学性质研究[J].*土壤*, 2013, 45(5): 875-882.
- [17] 鲍文,赖奕卡.湘中红壤丘陵区不同土地利用类型对土壤特性的影响[J].*中国水土保持*, 2011(10): 47-50.
- [18] 刘祖香,陈效民,靖彦,等.典型旱地红壤水力学特性及其影响因素研究[J].*水土保持通报*, 2013, 33(2): 21-25.
- [19] 毕利东,张斌,潘继花.运用 Image J 软件分析土壤结构特征[J].*土壤*, 2009, 41(4): 654-658.
- [20] Zhang Z B, Peng X, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146(1): 53-65.
- [21] 王艳玲,刘翠英,徐江兵,等.长期有机无机肥配施条件下的旱地红壤水分特征分析[J].*土壤通报*, 2015, 46(2): 334-340.
- [22] 尹梅,洪丽芳,付利波,等.曲靖市坡耕地土壤养分的空间变异性及其与利用方式的关系[J].*土壤通报*, 2013, 44(1): 35-41.
- [23] 武琳,黄尚书,叶川,等.土地利用方式对江西红壤旱地碳库管理指数的影响[J].*土壤*, 2017, 49(6): 1275-1279.
- [24] 程东娟,张亚丽.土壤物理实验指导[M].北京:中国水利水电出版社, 2012: 13-111.
- [25] Janssen M, Lennartz B. Characterization of preferential flow pathways through paddy bunds with dye tracer tests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1756-1766.
- [26] Weiler M, Fluhler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils[J]. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137-153.
- [27] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J].*水土保持学报*, 2015, 29(5): 187-193.
- [28] Kölbl A, Schad P, Jahn R, et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China) [J]. *Geoderma*, 2014, 228/229(18): 67-89.
- [29] Zhang G L, Gong Z T. Pedogenic evolution of paddy soils in different soil landscapes [J]. *Geoderma*, 2003, 115(1/2): 15-29.
- [30] Liu M X, Guo L, Yi J, et al. Characterising preferential flow and its interaction with the soil matrix using dye tracing in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. *Soil Research*, 2018, 56(6): 588-600.
- [31] 赵娇娜.长武塬区不同土地利用类型土壤大孔隙流研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
- [32] 王鹏程.三峡库区森林植被水源涵养功能研究[D].北京:中国林业科学研究院, 2007.
- [33] 黎建强,张洪江,程金花,等.长江上游不同植物篱系统的土壤物理性质[J].*应用生态学报*, 2011, 22(2): 418-424.

(上接第 232 页)

- [21] 徐强.工业碱木质素基缓释氮肥的制备及缓释性能研究[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2017.
- [22] 王秋静.木质素在生物质炭尿素肥料中的应用研究[D].哈尔滨:东北农业大学, 2015.
- [23] Modolo L V, Da-Silva C J, Brandão D S, et al. A minireview on what we have learned about urease inhibitors of agricultural interest since mid-2000s[J]. *Journal of Advanced Research*, 2018, 13: 29-37.
- [24] He T H, Liu D Y, Yuan J J, et al. Effects of application of inhibitors and biochar to fertilizer on gaseous nitrogen emissions from an intensively managed wheat field[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628: 121-130.
- [25] Rosales E, Meijide J, Pazos M, et al. Challenges and recent advances in biochar as low-cost biosorbent: From batch assays to continuous-flow systems [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 246: 176-192.
- [26] Zhou K, Sui Y Y, Xu X, et al. The effects of biochar addition on phosphorus transfer and water utilization efficiency in a vegetable field in Northeast China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 324-329.
- [27] 吕婷雯.木质素对施用有机肥下盆栽平邑甜茶生长及土壤环境的影响[D].山东 泰安:山东农业大学, 2016.