

DOI: 10.5846/stxb202007281968

解璐萌, 张英虎, 张明祥, 张振明. 黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征. 生态学报, 2021, 41(19): 7713-7724.

Xie L M, Zhang Y H, Zhang M X, Zhang Z M. Soil preferential flow and nutrient distribution of *Robinia pseudoacacia* Linn community in Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7713-7724.

黄河三角洲刺槐群落土壤优先流及养分分布特征

解璐萌^{1,3}, 张英虎², 张明祥^{1,3}, 张振明^{1,3,*}

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

2 南京林业大学林学院, 南京 210037

3 北京林业大学黄河流域生态保护国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

摘要: 黄河三角洲湿地面临严重的水资源短缺、湿地退化、土壤盐碱化等问题, 湿地土壤干旱缺水, 土壤收缩产生裂隙等优先流路径, 在小尺度上改变湿地内部以及湿地板块之间水文连通性, 小尺度水文效应往往制约大尺度水文连通性, 基于当前社会对湿地修复的迫切需求, 从小尺度对水文连通研究有必要加以重视。然而, 目前的研究多集中在大尺度水文连通的阐述, 为进一步明确黄河三角洲湿地小尺度水文连通和养分随优先流路径运移分布情况, 以此区域典型刺槐群落为研究对象, 基于室外染色示踪实验和室内图像处理技术, 分析土壤优先流形态和分布特征, 并探究优先流和土壤养分含量之间的关系。结果表明: (1) 刺槐群落染色面积比随土壤深度变化主要包括 2 个阶段, 第一阶段: 优先流和基质流相互影响作用显著, 第二阶段: 优先流和基质流相互作用不显著, 优先流强度逐渐增强, 明显存在指流现象, 极少部分管流现象。(2) 刺槐群落染色面积比、基质流深度和百分之五十染色深度的数值较大, 优先流区染色面积比较小, 基质流深度发生在土壤深 10—15 cm 区间, 该类型植被群落水流均匀入渗深度较大, 优先流和基质流相互作用程度大, 水文连通性较高。(3) 优先流区土壤有机碳、有机质、全氮、全磷和有效磷含量值均高于基质流区; (4) 土壤优先流区染色面积比与 5 种养分指标均呈负相关关系, 有机碳、有机质和有效磷含量受优先流路径影响显著。(5) 土壤中有有机碳、有机质和有效磷含量在一定程度上可以衡量土壤优先流发育水平。研究结果可为黄河三角洲湿地生态系统保护和管理提供参考。

关键词: 黄河三角洲; 优先流; 刺槐群落; 染色示踪; 土壤养分

Soil preferential flow and nutrient distribution of *Robinia pseudoacacia* Linn community in Yellow River Delta

XIE Lumeng^{1,3}, ZHANG Yinghu², ZHANG Mingxiang^{1,3}, ZHANG Zhenming^{1,3,*}

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 School of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 The Key Laboratory of Ecological Protection in the Yellow River Basin of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: More serious environmental problems including water shortage, wetland degradation, and soil salinization are gradually recognized in the Yellow River Delta wetland. Due to water deficiency of wetland soils, preferential pathways including soil cracks occur as soil shrinkage which changes the hydrological connectivity of inside wetlands or between wetlands at small scale, and small scale hydrological processes tend to affect the large scale hydrological cycle, depending on our urgent needs to restore wetlands, it is necessary to pay attentions to the study of hydrological connectivity research from microcosmic perspectives to promote the understanding of connotation of hydrological connectivity. However, most of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771547)

收稿日期: 2020-07-28; 修订日期: 2021-03-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenmingzhang@bjfu.edu.cn

the current studies focused on the hydrological connectivity from macroscopical perspectives. In order to clarify the small-scale hydrological connectivity in the Yellow River Delta, the morphology and distribution characteristics of preferential flow in soil were analyzed based on outdoor dyeing tracer experiment and indoor image processing technology. The relationship between preferential flow and soil nutrient content was explored. The results show that: (1) There are two stages in the variation of the dry coverage of *Robinia pseudoacacia* Linn community with soil depth. The first stage: the interaction between preferential flow and matrix flow is significant; the second stage: the interaction between preferential flow and matrix flow is not significant, and the intensity of preferential flow is gradually increasing, finger flow phenomenon and a small part of pipe flow phenomenon is observed. (2) Vertical soil-profile indexes (dry coverage, dry coverage of preferential pathway, depth of diffusion area, and depth of 50% dry coverage) reveal a strong interaction between preferential flow and matrix flow, and depth of diffusion area occurs in the range of 10—15cm in the soil, which indicates that this type of vegetation community has large depth of water infiltration flow uniformly and the hydrological connectivity is high; (3) The contents of soil organic carbon, organic matter, total nitrogen, total phosphorus and available phosphorus in preferential flow area were higher than those in matrix flow area; (4) The dye coverage ratio of preferential flow area was negatively correlated with the five nutrient indexes, and the contents of organic carbon, organic matter and available phosphorus were significantly affected by preferential pathway. (5) The content of organic carbon, organic matter and available phosphorus in soil can measure the development level of preferential flow to a certain extent. These results can provide references for wetland ecosystem protection and management in the Yellow River Delta.

Key Words: Yellow River Delta; preferential flow; *Robinia pseudoacacia* Linn; dry tracer; soil nutrient

黄河三角洲盐沼湿地是太平洋西海岸重要的生态屏障,为东亚-澳大利西亚迁飞区候鸟提供大量栖息地,具有很高的生态和社会价值^[1]。黄河三角洲湿地地下水埋藏浅矿化度高^[2],蒸发量大,可溶性盐类易随水流上升蒸发、浓缩^[3],加上人为活动和气候变化的影响,湿地退化、土壤盐碱化^[4]等问题不容忽视。这些问题的出现会影响湿地生态功能的发挥,改变湿地内部及湿地斑块之间的水文连通性^[5]。基于对湿地修复的需求,众多学者从较大尺度研究了黄河三角洲水文连通特征^[6-8],但小尺度水文效应往往会制约大尺度水文连通性。

土壤理化性质的异质性,如土壤质地、结构、大孔隙度、容重等会导致水分和溶质的传输移动速度出现变化^[9-11],该变化也与土壤连通孔隙网密切相关^[12],土壤中动物洞穴、植被根系形成的根孔隙通道沿土壤剖面垂向分布,导水效应显著,这种水分和溶质绕过土壤基质非均匀流动现象称为优先流^[13]。土壤优先流不仅会影响地表水和地下水的稀缺性和安全性,而且还影响到土壤中物理水文过程,更好地理解优先流有助于理解土壤的生态和水文功能。研究表明,优先流现象可以在土壤中稳定存在数十年^[14],导致土壤优先流区和基质流区之间的生物化学参数存在差异^[15-16],容易造成资源的异质化,土壤优先流联结驱动的植被与土壤水分、养分之间的动态耦合机制,是影响群落组成结构、分布格局与演变过程的重要驱动力^[17]。与土壤基质流区相比,森林土壤优先流区具有较高的微生物生物量、有机碳含量和较高的氮循环速率^[18]。黄河三角洲区域土壤优先流的研究对土壤养分运移和分布的关注度不高,如果能更广泛地考虑土壤物理、土壤化学、土壤生物学和植物生理学的作用,可以更好地评价和预测土壤水文学中的优先流^[19]。

在相关研究当中,染色示踪技术是标记湿地优先流路径的常用方法^[20-21],相比较计算机断层扫描技术和核磁共振技术,该方法操作方便,节省资源。本研究应用染色示踪技术,结合图像定量分析,得到土壤剖面指标,揭示黄河三角洲刺槐群落垂向土壤优先流特征,了解该区域小尺度水文连通状况;并结合土壤性质,探究土壤优先流和土壤养分分布的关系,为保护区域生态环境提供理论指导。

1 研究区地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市黄河三角洲国家级自然保护区(图1),地理坐标为 $37^{\circ}35'—38^{\circ}12' N$ 、 $118^{\circ}33'—119^{\circ}20' E$ 。保护区内主要划分为陆上、潮滩、潮下带3种地貌类型,主要土壤类型为潮土和盐土,成土母质为黄河冲积物。气候属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬寒夏热,降水量年际变化大,季节分配不均。

保护区内植被类型主要包括落叶阔叶林、沼泽植被和盐生植被,其中刺槐林主要为人工林,分布在一千二、大汶流自然保护区和黄河故道东侧,是我国现存面积最大的刺槐人工林^[22]。其中黄河口管理站刺槐林林龄平均在20a以上,黄河故道东侧刺槐林林龄在20a,分布生境多系由黄河泛滥改道形成的新淤土地,海拔高2—3 m,土壤肥沃,土壤含盐量在0.3%以下。

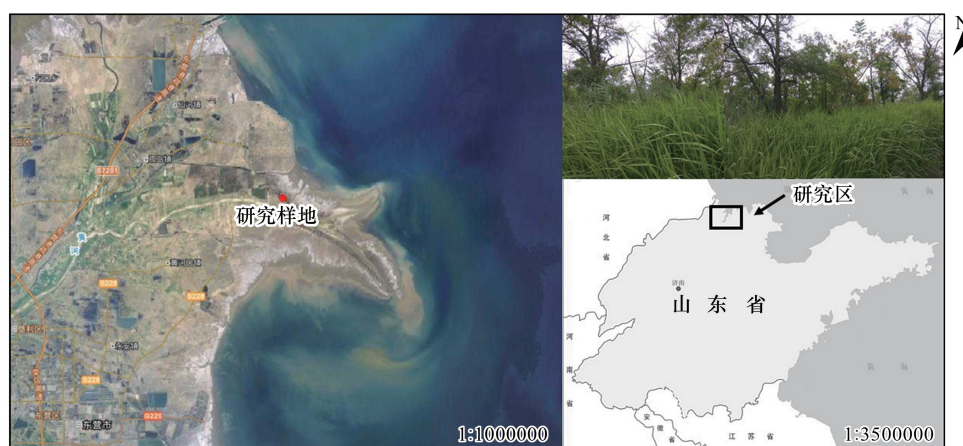


图1 研究区位置及刺槐群落植被长势

Fig.1 Location of the study area and situation of *Robinia pseudoacacia* Linn community

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设

在刺槐群落(经纬度: $37^{\circ}48'00'' N$, $119^{\circ}00'45'' E$, 海拔:4.0 m)中随机选择了CH1、CH2、CH3(相距大于3 km)3个小区,小区内地势平坦、湿地斑块常年无积水,实验前一周没有降水,除去样地内杂草及枯落物,除杂过程中尽量减少对土壤表面的扰动,以样树为中心,设置面积大小为 $1.2 m \times 1.2 m$ 的正方形样方。

1.2.2 野外染色实验

配置浓度为4 g/L,体积为50 L的亮蓝溶液,使用人工喷壶均匀施加至样方土壤表面,待亮蓝染色示踪液施加完成后,用塑料薄膜覆盖样方,以减少降雨冲刷或地表蒸发。待亮蓝染色液施加24 h之后,选取样地中间部分 $1.0 m \times 1.0 m$ (长和宽)为研究采样区,以消除边界效应,开挖垂向剖面。垂向剖面切片之间距离为10 cm,在0 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm处共开挖6个垂向剖面,垂向剖面制取、修正完毕之后,用数码相机拍照,垂向剖面最低开挖深度视亮蓝最大染色深度而定,野外染色样地实验图见图2。

1.2.3 土壤理化测定

实验开始前,从每个小区取3个土壤柱,密封保存后带回实验室;染色实验开始后,用标准环刀($100 cm^3$) 在优先流区和基质流区进行3次重复取样,所有土样密封后带回实验室,以待样品分析。相关指标测量方法参考Vogt等人使用的方法^[23],并根据《中华人民共和国林业行业标准》进行调整。研究区域土壤理化性质见表1。

表 1 刺槐群落土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil in *Robinia pseudoacacia* L. communities

土壤理化性质 Physicochemical properties	样方编号 Plot No.		
	CH1	CH2	CH3
质量含水量 Mass water content/%	23.100±01.3	26.200±3.4	21.200±1.1
容重 Bulk density/(g/cm ³)	01.210±0.209	1.190±0.298	1.240±0.205
总孔隙度 Total porosity/%	50.800±3.3	51.600±6.4	50.100±4.7
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	46.800±0.6	49.900±4.9	49.300±4.4
最大持水量 Maximum moisture capacity/%	43.400±11.2	46.800±20.1	42.000±11.8
毛管持水量 Capillary moisture capacity/%	39.300±6.6	39.900±10.2	38.700±7.9
最小持水量 Minimum moisture capacity/%	36.600±4.0	37.200±8.0	35.600±5.4
土壤贮水量深度 Soil water storage/mm	0.029±0.005	0.032±0.005	0.027±0.005
有机碳 Organic carbon/(g/kg)	5.176±5.028	6.067±7.525	2.237±0.729
有机质 Organic matter/(g/kg)	8.924±8.668	10.460±12.973	5.095±4.354
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	0.558±0.495	0.721±0.856	0.338±0.280
全磷 Total phosphorus/(mg/kg)	0.543±0.054	0.600±0.050	0.536±0.040
有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	2.612±1.048	2.972±2.051	1.744±0.350
pH	9.180±0.130	9.085±0.135	8.843±0.163
电导率 Conductivity/(μS/cm)	159.250±92.190	175.250±122.368	307.375±161.772

CH1:刺槐群落 1 Ci Huai 1;CH2: 刺槐群落 2 Ci Huai 2;CH3: 刺槐群落 3 Ci Huai 3

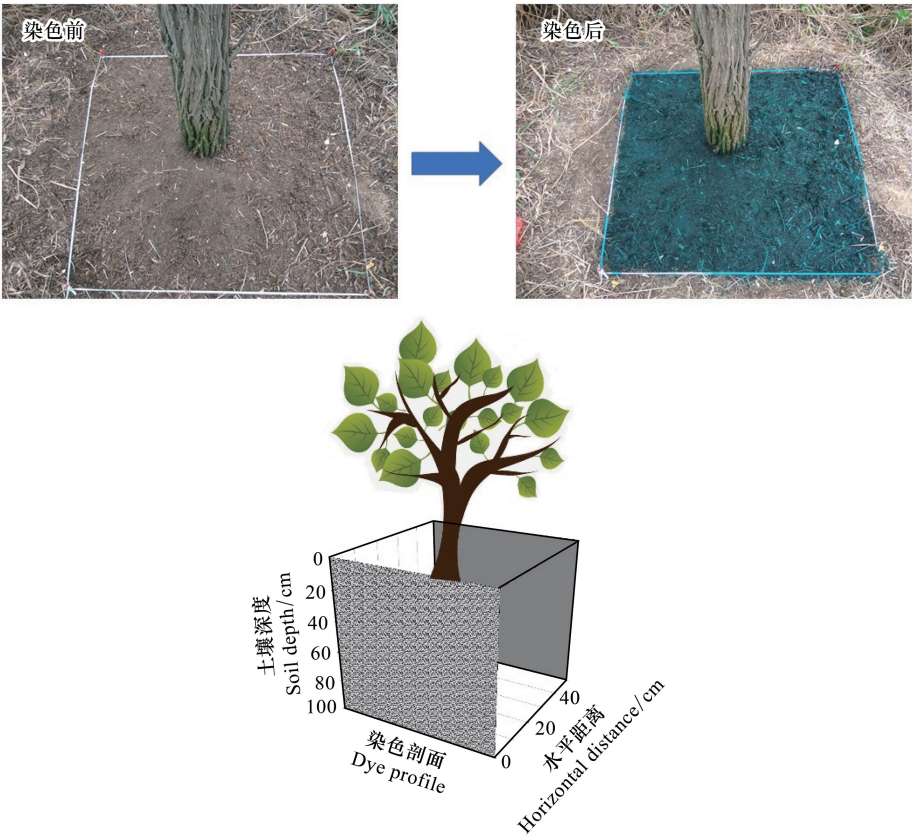


图 2 染色实验及染色剖面处理图
Fig.2 Dyeing experiment and dyeing profile treatment

1.3 图像处理

利用 Photoshop CC 2018 软件,将土壤垂向剖面图片做几何校正,图片大小统一剪裁为 100 cm×70 cm 大小,对应像素为 5000×3500,然后调整色相(135)、饱和度(100)、明度(45)等参数,调整阈值色阶,得到黑白二相图(图 3),使染色区域为黑色,未染色区域为白色;再利用专业图像 Image-Pro Plus 6 软件,对图像进行黑白像素数量统计,并计算不同深度的染色面积比,测量最大染色深度等优先流特征指标。

1.4 数据处理

利用 SPSS 20.0 软件进行均值、标准差等计算,同时对数据进行显著性及相关性检验;利用 Sigmaplot 12.0 和 Photoshop CC 2018 软件作图。图表中数据为平均值±标准差。

水文在土壤中的垂向运动受重力影响,本研究以土壤染色面积比、优先流区染色面积比、基质流深度和最大染色深度作为土壤优先流特征指标,计算公式引自相关研究^[11],具体计算如下:

(1) 染色面积比(DC)

染色面积比是优先流指数的最基本特征参数,其变化反映了土壤剖面优先流强度,在某种程度上可以揭示小尺度水文连通性大小。

$$DC = [D \div (D + ND)] \times 100\%$$

式中,DC 表示染色面积比;D 表示染色面积;ND 表示未染色面积。

(2) 优先流区染色面积比

优先流区染色面积占图像总面积的百分比。

$$DC_{pf} = (D_{pf} \div S) \times 100\%$$

式中,DC_{pf}表示优先流区染色面积比,%;D_{pf}表示优先流区染色面积,cm²;S 表示图像总面积,cm²。

(3) 优先流百分数

优先流百分数是指优先流区染色面积占图像中总染色面积的百分比。

$$P_{F-fr} = (1 - 100 \cdot U_{niFr} / S_{Tot}) \cdot 100\%$$

式中,P_{F-fr}表示优先流百分数,%;U_{niFr}表示基质流深度,cm;S_{Tot}表示总染色面积,cm²;100 表示土壤垂向剖面宽度为 100 cm。

(4) 基质流深度(U_{niFr})

当染色面积比降低至 80%时,水流运动过程主要为基质流,其水流运动深度成为基质流深度,单位为 cm。

(5) 最大染色深度

最大染色深度是指土壤垂直剖面上,示踪液达到的最大深度,单位为 cm。

(6) 百分之五十染色深度

染色面积比在 50%时,所对应的水流运动深度,单位是 cm,是描述优先流快速运动特征的指标。

(7) 最大染色深度/百分之五十染色深度

无量纲数值,其值越大,优先流现象在较深土层越明显。

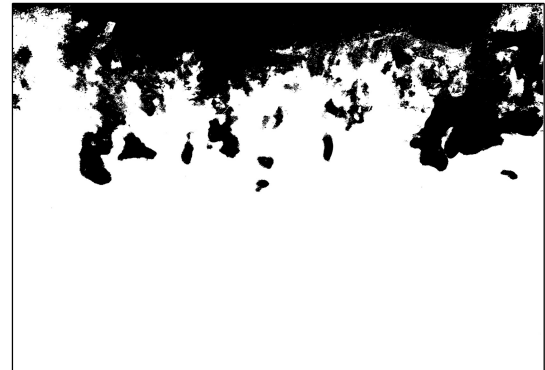


图 3 黑白二相图

Fig.3 Black and white biphasic diagram

2 结果与分析

2.1 刺槐群落垂向剖面优先流特征

2.1.1 优先流分布特征

野外剖面染色模式(图 4)揭示了染色溶液在土壤中的运移情况。由图 4 可知,在刺槐的 3 个群落中,染

色液可以沿着大孔隙快速穿透土壤层,绕过大部分土壤基质,存在明显的优先流现象。该区域刺槐群落优先流类型有两种:(1)大部分垂直剖面在 10—20 cm、20—40 cm 可以观察到染色示踪物呈现“舌状”和“指状”,判定刺槐群落优先流类型为指流,说明该区域土壤中孔隙较多,砂质含量高,也可能是由于土壤饱和导水率下层大于上层。(2)小部分剖面如 CH1 第 3 和第 5 剖面,存在管流现象,染色范围零形状分布,管流与壤中流存在密切联系,且多数发生在土壤底部。说明群落土壤表面及内部存在裂隙,为染色液的流动提供优先流路径,导致土壤深层存在染色特征。

除去离样树中心较远的第 1,第 2 和第 6 剖面外,可以观察到,在 0—10 cm 土壤垂直剖面上,染色面积明显大于其余剖面,土壤均匀染色面积较大,均匀染色深度较深,说明优先流和基质流相互作用较强,导致两区水流扩散能力较大,基质流作用显著,水流既能够在可动区通过对流作用入渗,也可以在不可动区通过弥散作用,导致染色均匀。且基质流以下优先流路径较宽,水文连通性较高。

2.1.2 垂向剖面优先流相关指标

土壤垂向剖面优先流特征指标计算结果见表 2。

表 2 不同样地土壤垂直剖面优先流指标统计分析

Table 2 Statistical analysis on indexes of vertical soil profiles in different plots

相关指标 Vertical soil-profile indexes	样地编号 Plot No.		
	CH1	CH2	CH3
染色面积比 Dry coverage	0.23±0.05a	0.20±0.06a	0.18±0.09a
优先流区染色面积比 Dry coverage of preferential pathway	0.09±0.01a	0.14±0.02a	0.09±0.03a
优先流百分数 Percentage of preferential pathway	0.28±0.03b	0.41±0.03a	0.36±0.09b
基质流深度 Depth of diffusion area /cm	15.23±1.26ab	13.61±1.33a	11.06±2.37b
最大染色深度 Maximum dyed depth/cm	46.60±12.10a	40.67±4.16a	35.75±1.71a
百分之五十染色深度 Depth of 50% dye coverage /cm	21.24±4.67a	19.01±6.24a	18.46±4.71a
最大染色深度/百分之五十染色深度 Maximum dyed depth/depth of 50% dye coverage	2.27±0.62a	2.07±0.29a	2.46±0.42a

显著性水平为 0.05;不同小写字母表示样地间染色面积比显著性差异

染色面积比是在一定土壤深度内土壤水平平均入渗的结果,染色面积比越大,说明优先流现象越不明显^[24]。不同刺槐群落土壤垂向剖面染色面积比随土壤深度变化见图 5,总体而言,3 个群落染色面积比随着土壤深度的增加呈现非线性减小趋势,在土壤剖面局部位位置会达到峰值。刺槐群落 CH1,土壤深度 0—10 cm 时染色均匀,染色面积比随着土壤深度的增加逐渐减小,土壤表层水流均匀入渗;土壤深度 10—15 cm 时,染色面积比随着土壤深度的增加呈增大趋势;土壤深度大于 15 cm 时,染色面积比随着土壤深度的增加出现一定波动,但总体呈下降趋势;对于刺槐群落 CH2 和 CH3 而言,染色面积比随土壤深度呈波动下降趋势,同一土壤深度,越靠近刺槐植被树干,染色面积比相对较大,从一定程度上说明,远离刺槐树干越远的区域植被根系,尤其是细根系分布复杂,形成的孔隙较多,使得优先流的分布也更加复杂。刺槐群落 CH1、CH2 和 CH3 染色面积比随土壤深度变化差异不显著($P>0.05$)。三块样地内优先流区染色面积比不存在显著性差异($P>0.05$)。

刺槐群落基质流深度,样地 CH1 和 CH3 基质流深度存在显著性差异($P=0.006<0.05$),其余样地间不存在显著性差异。跟染色面积比相比,优先流区染色面积比较小,说明该群落中土壤优先流作用不强,基质流作用显著。该群落基质流深度发生在土壤深度 10—15 cm 区间,说明该类型植被群落水流均匀入渗深度较大,优先流和基质流相互作用程度大,水文连通性较高。

刺槐群落(CH2 和 CH1/CH3)不同样地优先流百分数存在显著性差异($P<0.05$),刺槐群落水流均匀入渗深度较大,优先流和基质流相互作用较强,与同区域桤柳群落相比,其优先流路径百分数占比较小^[25]。

土壤剖面最大染色深度不同样地间不存在显著性差异($P>0.05$),刺槐群落最大染色深度均值最小,为

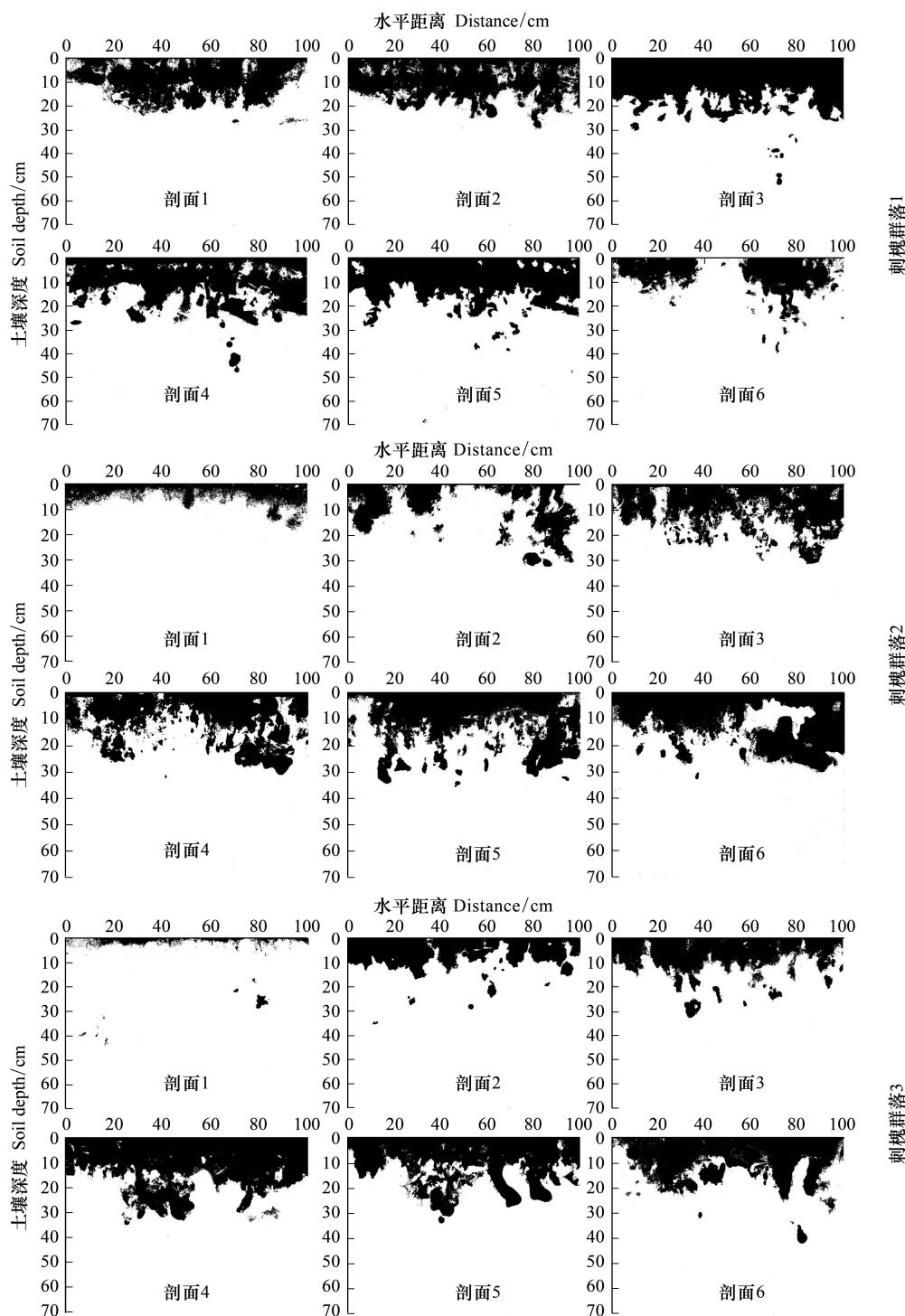


图4 刺槐群落垂向剖面染色图

Fig.4 Dyeing pattern of vertical profiles in *Robinia pseudoacacia* Linn community

41.01 cm, 变异系数为 0.13, 土壤保土保水性更强, 刺槐群落最大染色深度分布较浅, 优先流和周围土壤基质相互影响较大, 横向和垂向优先流路径网同时开启, 孔隙网相连通, 均匀染色深度较大, 刺槐群落水文连通性较大。

土壤剖面百分之五十染色深度、最大染色深度/百分之五十染色深度不同样地间不存在显著性差异 ($P > 0.05$), 刺槐群落百分之五十染色深度较高, 其均值在土壤深度 20 cm 左右, 土壤剖面染色面积比随土壤深度

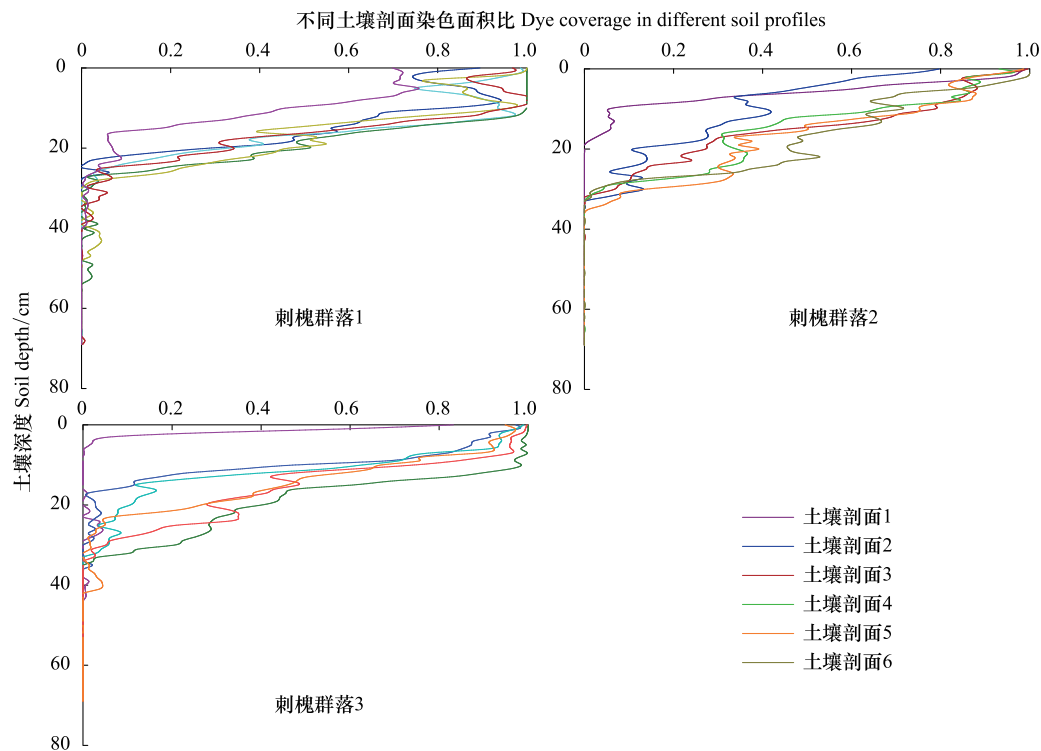


图5 土壤剖面染色面积比随土壤深度的变化
Fig.5 The changes of dye coverage with soil depth

并没有快速减小,土壤深层几乎没有优先流现象发生。

2.2 优先流区和基质流区土壤养分含量分析

染色实验完成后在优先流区和基质流区每隔 10 cm 分层取土样,土层 A 为 0—10 cm 层,土层 B 为 10—20 cm 层,土层 C 为 20—30 cm 层,选取土壤有机碳(OC)、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)和有效磷(AP) 5 个指标,分析优先流区和基质流区其含量差异(图 7)。由图 6、图 7 和表 3 可知,优先流区土壤有机碳、有机质、全氮、全磷和有效磷含量值均高于基质流区,土壤两区内全氮和全磷含量差别不大。独立样本 t 检验结果显示,优先流区和基质流区土壤有机碳($P=0.059>0.05$)、有机质($P=0.059>0.05$)、全氮($P=0.187>0.05$)、全磷($P=0.232>0.05$)和有效磷($P=0.076>0.05$)含量没有显著性差异(95%置信区间)。

表 3 优先流区和基质流区土壤养分含量
Table 3 Content of soil nutrient in different areas

养分指标 Soil nutrient indexes	优先流区 Preferential flow area			基质流区 Matrix flow area		
	CH1	CH2	CH3	CH1	CH2	CH3
有机碳 Organic carbon	10.491±4.801	8.030±3.210	7.497±4.880	6.190±2.481	4.795±1.678	3.148±0.978
有机质 Organic matter	18.087±8.277	13.844±5.534	12.925±8.414	10.672±4.278	8.267±2.894	5.427±1.686
全氮 Total nitrogen	1.192±0.513	0.829±0.385	0.766±0.460	0.730±0.277	0.532±0.291	0.327±0.130
全磷 Total phosphorus	0.549±0.085	0.495±0.084	0.593±0.043	0.590±0.019	0.535±0.041	0.593±0.082
有效磷 Available phosphorus	4.822±1.340	3.455±0.752	3.547±0.996	2.359±0.383	2.239±0.914	2.779±0.285

2.3 优先流对土壤养分含量的影响

选取土壤有机碳(A_1)、有机质(A_2)、全氮(A_3)、全磷(A_4)和有效磷(A_5) 5 个土壤养分指标,与土壤中的

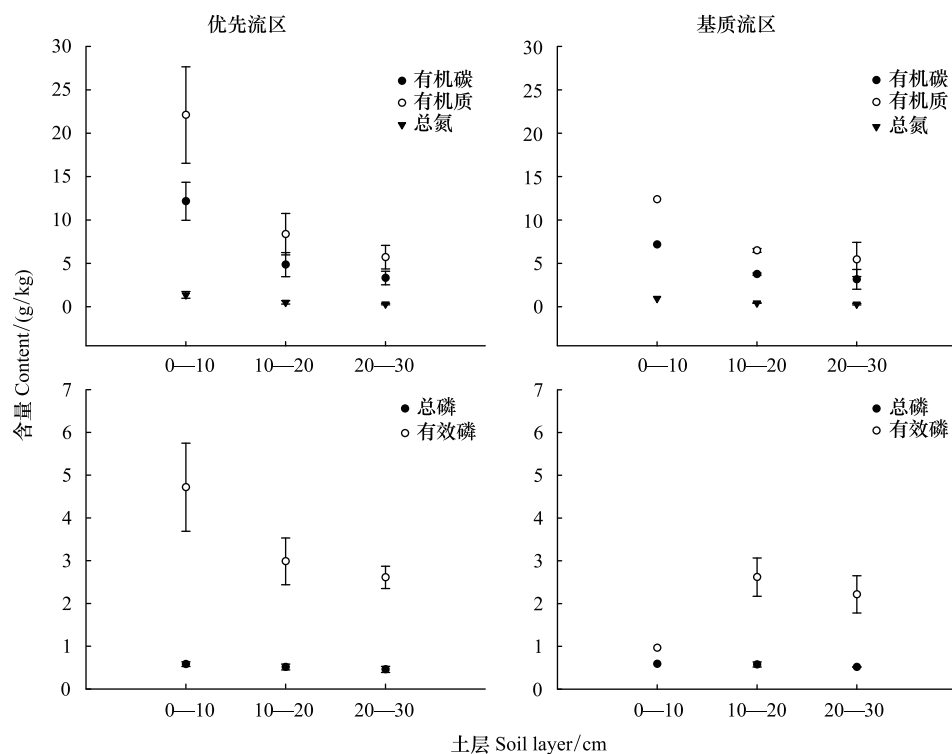


图 6 优先流区和基质流区不同土层养分含量

Fig.6 Content of soil nutrients in different areas

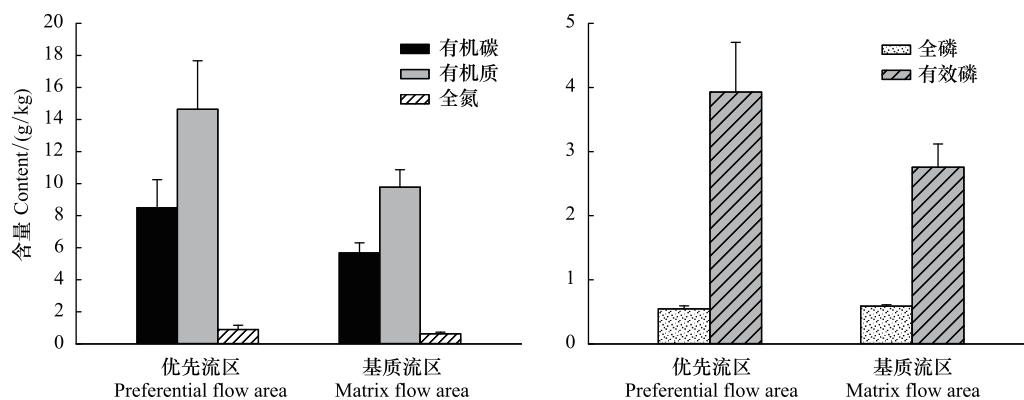


图 7 优先流区和基质流区养分含量差异

Fig.7 The differences of nutrient content between different areas

优先流区染色面积比进行 Spearman 相关性分析(表 4)。分析表明,土壤优先流路径形成与 5 种养分指标均呈负相关关系,且有机碳、有机质和有效磷与优先流面积比显著相关($P < 0.05$)。为了进一步确定土壤养分含量对土壤优先路径形成的作用机理,以显著性系数小于 0.05 为标准,筛选出有机碳、有机质、有效磷 3 个指标,进行主成分分析(表 5)。分析可知,对土壤优先流区面积产生影响的有 1 个主成分,可以解释 81.911% 的方差变异情况,说明土壤中有机碳、有机质和有效磷含量在一定程度上可以衡量土壤优先流发育水平。通过计算主成分分析变换矩阵,得主成分分析的表达式为 $F_1 = 0.53A_1 + 0.53A_2 + 0.42A_5$ 。

表 4 Spearman 相关性分析结果

Table 4 Results of Spearman correlation analysis

土壤养分指标 Soil nutrient indexes	相关系数 Correlation coefficient	Sig	土壤养分指标 Soil nutrient indexes	相关系数 Correlation coefficient	Sig
有机碳(A_1) Organic carbon	-0.627	0.039	全磷(A_4) Total phosphorus	-0.364	0.272
有机质(A_2) Organic matter	-0.627	0.039	有效磷(A_5) Available phosphorus	-0.609	0.047
全氮(A_3) Total nitrogen	-0.582	0.060			

表 5 主成分分析结果

Table 5 Results of principal component analysis

土壤养分指标 Soil nutrient indexes	主成分得分 Principal component score
	1
有机碳(A_1) Organic carbon	0.967
有机质(A_2) Organic matter	0.967
有效磷(A_5) Available phosphorus	0.766

3 讨论

3.1 刺槐群落土壤优先流分布特征

由上述实验结果,可知刺槐群落土壤优先流类型主要为指流,这与刺槐群落地表枯落物和腐殖质层较厚,土壤存在较强斥水性密切相关。土壤斥水性导致水流在土壤近地表层积水,短时间内土壤水势超过孔隙进水压力,土壤大孔隙逐渐充满水分,即染色液在土壤近地表层积水条件下,会产生足够大的压力,优先流作用会快速开启,染色液在下渗过程中产生不稳定湿润峰,产生优先流现象,同时土壤内夹带的空气压缩也会导致指流发生^[26-27],土壤含水量较低时,指流现象相对明显。强降雨条件下,空气阻隔也是指流现象发生的诱导因子。另一方面,指流是重力驱使下的不稳定现象,不稳定现象是重力、毛细管力以及粘性力综合作用的结果。

染色面积比随着土壤深度的增加并不是单调递减,而是在土壤剖面局部位置,染色面积比会突然增加,CH1 染色面积比曲线表现较明显,并且随着土壤深度的增加,其值呈现周期性波动,总体呈下降趋势。分析其原因,首先研究区成土母质为黄河冲积物,土壤分层明显,层状土壤是该区土壤普遍存在的土壤结构^[28],染色面积比突然增加,说明土壤质地由粗变细,即染色液流动至土壤上松下紧接触面,水文角度上,上松下紧接触面称之为水文阻隔层^[29],水文阻隔层导致染色液发生横向流动,优先流侧向入渗效应增强,水文阻隔层滞留效应显著,染色液在水文阻隔层表面累积,染色面积比会突然增加;其次,染色面积比增加土壤局部位置中等直径连通孔隙数量占比最多,虽然与大孔隙相比,中等孔隙优先导水效应不显著,但是有研究证明,当大孔隙网连通性降低或不连通时,中等孔隙连通性可能对水流运动影响显著^[30-31],因此大量中等孔隙在土壤局部位置形成连通网,促进染色液横向和垂向流动,染色面积比增加。

根据垂向剖面优先流相关指标的计算结果,我们发现刺槐群落染色面积比、基质流深度和百分之五十染色深度的数值较大,优先流区染色面积比较小,说明优先流现象不明显,染色液均匀下渗,优先流和基质流相互作用较高,水文连通性较好。这可能是由于刺槐群落地表枯落物和腐殖质层较厚,发生击溅侵蚀和土壤结皮可能性较小,土壤结构功能较好;根系含量与优先流特征密切相关,刺槐群落根系丰富,与土壤接触面形成的孔隙以及根系自身物理分解腐烂形成的根孔隙通道相互连通,导致均匀染色面积更大^[32-33]。同时刺槐群落土壤含水量较低,有研究证明土壤初始含水量较低时,水分运动受阻,水分最大入渗深度较浅^[34],导致土壤表层分布更多连通孔隙网,优先流现象不明显,染色液均匀下渗。

本研究发现即使同一植被类型优先流指标同样存在一定程度的差异,这可能是由于土壤理化性质以及植被根系空间分布模式存在差异造成的,例如微观尺度土壤饱和导水率不同会导致染色模式异质性,也有可能是因为染色液并不能够对土壤内部水流运动路径与土壤基质完全有效分辨。

3.2 优先流区和基质流区土壤养分分布特征

优先流现象的存在,容易导致养分向地下迁移,而不会与土壤上层的化学和生物发生相互作用^[9],对区域养分分布有重要影响。有研究显示,土壤中可溶性活性磷、有机碳、重金属污染物等含量与优先流的存在有

关,优先流流速和可溶性活性磷浓度呈正相关关系^[35];当优先流流速过快时,养分的吸附可能受到限制,此时的养分积累可能发生在较小的优先流路径中^[36];优先流对水溶性有机碳的贡献率存在显著正相关关系,优先流的发育对土壤中水溶性有机碳产生运移作用,与优先流程度评价指数呈显著负相关关系^[37];土壤中的大孔隙也是重金属污染物运移的优势通道,有研究表明土壤表层以下,重金属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,借助优先流路径极易对土壤造成污染^[38-39]。

在本次研究中,优先流区土壤有机碳、有机质、全氮、全磷和有效磷含量值均高于基质流区,土壤优先流评价指数(优先流区染色面积比)与5种养分指标均呈负相关关系,且有机碳、有机质和有效磷与优先流区面积比显著相关。说明该区域土壤养分的主要运输途径是优先流路径,优先流区是土壤养分快速流失的主要区域,与以往研究结果^[40]基本一致。

当然,除优先流路径对养分分布的影响外,林分密度^[41]、生物量^[42]、地表凋落物和根系吸收作用,也对养分的分布产生一定影响:植物残枝落叶在表层积累提供大量有机养分,植物根系又从下部土壤吸收养分,从而造成各养分在土壤剖面上的空间分布特征的异质性^[43],在后续研究中需要加以考虑。

4 结论

(1)刺槐群落染色面积比随土壤深度变化主要包括2个阶段,第一阶段:优先流和基质流相互影响作用显著,第二阶段:优先流和基质流相互作用不显著,优先流强度逐渐增强,明显存在指流现象,极少部分管流现象。

(2)刺槐群落染色面积比、基质流深度和百分之五十染色深度的数值较大,优先流区染色面积比较小,基质流深度发生在土壤深10—15 cm区间,该类型植被群落水流均匀入渗深度较大,优先流和基质流相互作用程度大,水文连通性较高。

(3)优先流区土壤有机碳(A_1)、有机质(A_2)、全氮(A_3)、全磷(A_4)和有效磷(A_5)含量值均高于基质流区,土壤优先流评价指数(优先流区染色面积比)与5种养分指标均呈负相关关系,且有机碳、有机质和有效磷与优先流区面积比显著相关。

(4)土壤中有有机碳(A_1)、有机质(A_2)和有效磷(A_5)含量在一定程度上可以衡量土壤优先流发育水平,通过计算主成分分析变换矩阵,得主成分分析的表达式为: $F_1=0.53A_1+0.53A_2+0.42A_5$

参考文献 (References):

- [1] Liu Q S, Liu G H, Huang C, Li H. Soil physicochemical properties associated with quasi-circular vegetation patches in the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 2019, 337: 202-214.
- [2] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征. *生态学报*, 2019, 39(9): 3322-3332.
- [3] 张建锋, 邢尚军, 樊宝敏, 单奇华. 黄河三角洲植被群落和土壤酶活性对湿地退化的响应. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 1-6.
- [4] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 温小虎, 高猛, 邵宏波. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2423-2430.
- [5] Liu J K, Engel B A, Dai L L, Wang Y, Wu Y N, Yan G X, Cong L, Zhai J X, Zhang Z M, Zhang M X. Capturing hydrological connectivity structure of wetlands with indices based on graph theory: a case study in Yellow River Delta. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118059.
- [6] 赵心怡, 李晓, 于森, 于君宝, 王雪宏. 黄河三角洲湿地水文连通受阻现状. *区域治理*, 2019, (49): 78-81.
- [7] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 施伟, 宁中华, 蔡燕子, 宋振峰, 崔保山. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(1): 17-24.
- [8] 郭雨桐, 崔圆, 王晨, 王倩, 修玉娇, 肖蓉, 张明祥. 湿地要素中碳氮同位素特征与水文连通的关系. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2554-2568.
- [9] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1/2): 179-204.
- [10] Lin H, Zhou X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(1): 34-49.
- [11] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, Li H L, Xiao R, Zheng H J, Bech J. Rock fragments and soil hydrological processes: significance and progress. *Catena*, 2016, 147: 153-166.

- [12] Richards K. 'Real' geomorphology revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1994, 19(3): 277-281.
- [13] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [14] Ritsema C J, Dekker L W, W D. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232: 308-319.
- [15] Bogner C, Borken W, Huwe B. Impact of preferential flow on soil chemistry of a podzol. *Geoderma*, 2012, 175-176: 37-46.
- [16] Julich D, Julich S, Feger K H. Phosphorus in preferential flow pathways of forest soils in Germany. *Forests*, 2016, 8(1): 19.
- [17] 余海龙, 樊瑾, 牛玉斌, 朱湾湾, 黄菊莹. 灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆“土壤沃岛效应”的影响研究. *草地学报*, 2019, 27(1): 1-7.
- [18] Bundt M, Jäggi M, Blaser P, Siegwolf R, Hagedorn F. Carbon and nitrogen dynamics in preferential flow paths and matrix of a forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1529-1538.
- [19] Zhang Y H, Zhang Z M, Ma Z W, Chen J X, Akbar J, Zhang S Y, Che C G, Zhang M X, Cerdà A. A review of preferential water flow in soil science. *Canadian Journal of Soil Science*, 2018, 98(4): 604-618.
- [20] Durst R, Imfeld G, Lange J. Transport of pesticides and artificial tracers in vertical-flow lab-scale wetlands. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 554-564.
- [21] Elçi A, Molz F J. Identification of lateral macropore flow in a forested riparian wetland through numerical simulation of a subsurface tracer experiment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 197(1/4): 149-164.
- [22] 杜振宇, 刘方春, 马丙尧, 马海林, 邢尚军. 黄河三角洲盐碱地长期人工林生态服务价值评估. *中国农学通报*, 2013, 29(34): 17-23.
- [23] Vogt D, Tilley J, Edmonds R L. *Soil and plant analysis for forest ecosystem characterization*. Berlin: De Gruyter, 2015: 1-24.
- [24] 金世杰, 费良军, 傅渝亮, 王锦辉, 钟韵, 陈琳. 土壤初始含水率对浑水膜孔灌自由入渗特性影响. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 235-239, 254-254.
- [25] Dai L L, Zhang Y H, Liu Y, Xie L M, Zhao S Q, Zhang Z M, Lv X Z. Assessing hydrological connectivity of wetlands by dye-tracing experiment. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106840.
- [26] Wang Z, Feyen J, Elrick D E. Prediction of fingering in porous media. *Water Resources Research*, 1998, 34(9): 2183-2190.
- [27] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势. *生态学报*, 2006, 26(1): 231-243.
- [28] 李怀恩, 拦继元, 史文娟, 张建丰, 王智, 李贺丽. 层状土壤指流实验研究. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(6): 111-115.
- [29] Chelli A, Zanini A, Petrella E, Feo A, Celico F. A multidisciplinary procedure to evaluate and optimize the efficacy of hydraulic barriers in contaminated sites: a case study in Northern Italy. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(6): 246.
- [30] Larsbo M, Koestel J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5255-5269.
- [31] Müller K, Katuwal S, Young I, McLeod M, Moldrup P, De Jonge L W, Clothier B. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures. *Geoderma*, 2018, 313: 82-91.
- [32] 赵晓晓, 黄炎和, 林金石, 葛宏力, 蒋芳市, 李慧, 王娇, 罗松, 王翊肖. 崩壁不同土层水分运动特征的染色示踪. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2017, 46(2): 199-205.
- [33] Van Stan II J T, Gutmann E, Friesen J. *Precipitation Partitioning by Vegetation; a Global Synthesis*. Cham: Springer, 2020.
- [34] Edwards W M, Shipitalo M J, Owens L B, Dick W A. Factors affecting preferential flow of water and atrazine through earthworm burrows under continuous no-till corn. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(3): 453-457.
- [35] Gächter R, Ngatiah J M, Stamm C. Transport of phosphate from soil to surface waters by preferential flow. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(13): 1865-1869.
- [36] Backnäs S, Laine-Kaulio H, Kløve B. Phosphorus forms and related soil chemistry in preferential flowpaths and the soil matrix of a forested podzolic till soil profile. *Geoderma*, 2012, 189-190: 50-64.
- [37] 连经纬, 胡海波, 王灿, 范真. 枫香麻栎混交林土壤优先流特征及其对碳运移的影响. *中国农业科技导报*, 2019, 21(8): 122-131.
- [38] 张文杰, 李俊涛. 优先流作用下的胶体-重金属共迁移试验研究. *岩土工程学报*, 2020, 42(1): 46-52.
- [39] 张英虎, 汤崇军, 郑海金, 郑太辉, 张杰, Richards B K. 土壤重金属在优先流区和基质流区迁移能力研究. *土壤通报*, 2015, 46(6): 1386-1391.
- [40] 李胜龙. 稻田—田埂过渡区土壤大孔隙分布与水氮渗漏特征[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [41] 李小艳, 孟娟, 牛瑞瑞, 翟红莲, 薛鹏飞. 黄河三角洲地区不同种植模式下人造白蜡林的土壤养分特征研究. *中国农学通报*, 2020, 36(12): 53-57.
- [42] 李冬雪, 李雨岑, 张珂豪, 马旭, 张树岩, 刘伟华, 车纯广, 崔保山. 黄河口典型潮沟土壤碳氮分布特征规律. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 460-471.
- [43] 刘晓霞, 张涛, 谭小丽, 明丽萍, 王伟立. 黄河三角洲湿地柽柳—碱蓬群落土壤中各离子和土壤养分剖面分析. *鲁东大学学报: 自然科学版*, 2020, 36(3): 258-264.