

鹤大高速(G11)低路基边坡土壤优先流特征

张东旭¹, 程金花¹, 王伟², 张洪江¹, 刘涛²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029)

摘要: 为了探明盐分在低路基公路边坡土壤中的运移方式,以鹤大高速公路(G11)低路基段边坡土壤为研究对象,引入优先流,来探讨盐分随土壤水分运动的过程。采用亮蓝染色示踪和图像解析方法,分析土壤剖面优先路径水平和垂直分布特征。结果显示:染色区和非染色区的土壤性质存在显著差异,染色区土壤存在较多的大孔隙。在水平剖面上,相同影响半径优先路径数量随着土层深度的增加而减少,同一土层中 1.0~10.0 mm 影响半径的优先路径数量要远远多于>10.0 mm 影响半径的优先路径数量。在垂直剖面上,优先流特征指标染色覆盖率(DC)、均匀入渗深度(UF)、优先流分数(PF-fr)、长度指数(LI)和峰值(PI)分别为 40.10%, 4.10 cm, 801.96 cm², 74.44%, 543.6 cm 和 5。低路基边坡土壤这种重塑的土体中存在较为明显的优先流现象,且优先流对氯盐在土壤中的运移起着重要的作用。优先流指标的提出,为今后量化土壤优先流发生程度提供了一个很好的研究方法。

关键词: 边坡土壤; 氯盐迁移; 优先路径; 分布特征

中图分类号:S152.5

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2016)05-0076-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.013

Characteristics of Preferential Flow in Slope Soils of Low Roadbed Highway

ZHANG Dongxu¹, CHENG Jinhua¹, WANG Wei², ZHANG Hongjiang¹, LIU Tao²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029)

Abstract: To prove salt transport in roadside soil of low roadbed highway, Heda highway (G11) roadside soil was selected as the research object. The preferential flow principle was used to explore the salt transport in the soil water movement process. Analyzed soil profile preferential flow horizontal and vertical distribution characteristics by using brilliant blue dye tracing and image analysis method. The results showed that: Staining area and non-staining area of soil properties had significant differences, staining area had more macropores. In the horizontal profile, the number of preferential flow paths with different influence radius decreased with the increase of soil depth. The number of preferential flow paths with 1.0~10.0 mm influence radius in the same layer were far more than the number of paths >10.0 mm influence radius. In the vertical profile, the preferential flow characteristic index as dye coverage (DC), uniform infiltration depth (UF), preferential flow fraction (PF-fr), length index (LI) and peak (PI) were 40.10%, 4.10 cm, 801.96 cm², 74.44%, 543.6 cm and 5 respectively. There was obvious preferential flow in roadside soil of low roadbed highway which played an important role in the transportation of salt in soil. The proposed indices provided a good research method to quantify the occurrence degree of soil preferential flow in the future.

Keywords: slope soil; salt transport; preferential flow paths; distribution characteristics

我国东北地区冬季降雪量较大,受经济条件限制,目前多数公路长期使用工业盐进行除雪。东北平原微丘区公路多采用低路基设计方式,其路基高度一般在 2 m 以内,采用路面散排结合放缓边坡的设计方式。融雪后,工业盐通过公路排水系统进入边坡表层土壤,导致土壤有机质含量下降和土壤板结,绿化植物发生严重的盐害,继而危害路基的稳定^[1-2]。边

坡土壤层结构在公路修筑过程中受到扰动,表现出非均质性质,水分和溶质在通过时以非平衡流方式运动^[3]。在公路路面径流污染物迁移行为的研究中,许多研究人员往往只关注地表径流水文过程对氯盐迁移影响,忽视了优先流发生对氯盐迁移的作用,使得研究结果不能全面地表现出氯盐在公路边坡的积累、扩散和迁移过程,无法准确评估氯盐积累区域,影响了路域

收稿日期:2016-03-14

资助项目:国家自然科学基金项目(41271300,30900866)中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(20140601)

第一作者:张东旭(1989—),男,博士研究生,主要从事土壤水文研究。E-mail:dongxu_zhang1989@126.com

通信作者:程金花(1979—),女,教授,主要从事土壤侵蚀与流域管理研究。E-mail:Jinhua_cheng@126.com

土壤环境保护成效。引入优先流分析工业盐污染物在边坡土壤中的迁移机制,对揭示低路基公路工业盐污染物迁移和路域环境的作用机制具有重要意义。

通过染色示踪技术研究氯盐在土壤中的迁移,可以直观地反映出优先流对盐分在土壤中的迁移特征。研究氯盐在边坡土壤中的快速迁移特征,首先要弄清边坡中的优先流特征。由于亮蓝染色剂溶于水,且为非吸附性溶质,在土壤中不会发生化学反应,特性与氯盐基本相同。这种非吸附性的溶液在实质上与水流在土壤中运动的方式相一致,因此用亮蓝进行染色示踪实验具有可行性。

目前关于优先流的研究主要集中在林地、农地等自然立地条件的土壤^[4-6]。近年来,随着开发建设项目日渐增多,对地下水的污染和对环境的破坏日益加重,一些学者开始研究垃圾填埋场和矿区的优先流,但低路基公路边坡中的优先流还鲜有研究^[7]。本文以鹤大高速(G11)低路基公路边坡土壤为研究对象,旨在证明低路基公路边坡中存在优先流,通过研究低路基公路边坡中优先流的形态特征,探明边坡土壤优先流发生的机理,为今后研究氯盐随水流在边坡中的运移提供一定的理论基础。

1 研究区概况

本研究区位于鹤岗至大连高速公路(G11)丹东至通化段宽甸互通处(124°43′39.70″E,40°43′58.07″N),此处路段为低路基(路基高度≤2 m)公路。该区地处辽东断块山地丘陵区,地势自北向南、自西北向东南降低,呈阶梯状,平均海拔为 500 m,属东亚季风区,温带湿润大陆性季风气候。春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽少雨,冬季寒冷干燥,四季分明。年平均气温 6.5℃。无霜期 129 d,年平均降水量在 1 000~1 200 mm,年降雨量的 2/3 集中在 6—8 月。土壤发育较好,多为褐土。

2 研究方法

2.1 染色示踪试验

将长 100 cm、宽 100 cm、高 50 cm、厚 0.5 cm 的自制铁框顺坡埋入边坡土壤中。依据路面产流特性,配制 10 L 浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液作为示踪溶液,将预制的亮蓝溶液自边坡顶部均匀的输入铁框内部,然后用塑料布遮盖铁框上部。染色示踪试验完成 24 h 后除去覆盖的塑料布和埋置的铁框挖掘边坡剖面,用标尺标注剖面的长度与宽度,使用高像素数码相机采集垂直染色剖面图像,各垂直剖面拍摄照片 5 张。在染色范围内取其中 50 cm×50 cm 面积,以 10 cm 深度为标准,分层挖掘水平剖面,根据染色剂分布状况将剖面分为染色区和未染色区,染色试验示意图和

现场试验照片分别见图 1 和图 2。

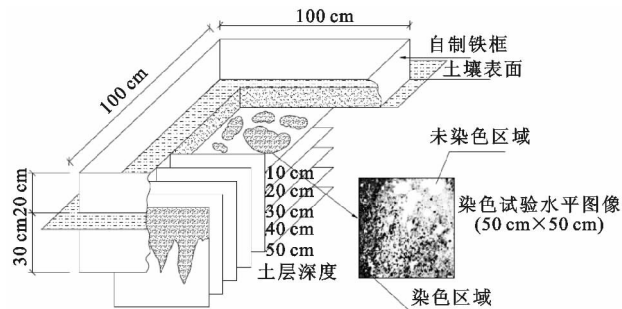


图 1 染色试验示意图



图 2 染色试验现场照片

2.2 土壤基本理化性质测定

在各土层水平剖面的染色区和未染色区内,使用环刀采集原状土样,用于测定土壤容重和孔隙度,各原状土样均取 3 个重复;同时采集各层土壤混合样品 200 g,用于土壤质地和有机质含量的分析。土壤质地分级标准采用国际制,土壤有机质采用稀释热—重铬酸钾容量法测定^[8]。上述指标的测定均重复 3 次。

2.3 图像处理

首先使用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对采集到的原始染色图像进行几何校正,空间校正后的垂直剖面染色图像大小为 500×400 pixel,水平剖面染色图像大小为 500×500 pixel。使用 Adobe Photoshop CS3 软件中图像调整中颜色替换功能,先参照原始照片,用吸管工具对照片中染色土壤的颜色采样,确定染色区域。通过设置色相、饱和度、透明度将染色土壤颜色替换为黑色,未染色区土壤为白色。图像数值化转换可采用 Image-Pro Plus 6.0 软件中的 Bitmap 功能,并以 Excel 格式输出。得到的边坡土壤水平染色图像如图 3 所示。

2.4 优先路径位置信息提取

水分由优先路径进入到深层土壤的过程中,由于含水率变化、侧渗现象等因素影响,其湿周要大于土壤中的实际优先路径,将水分所影响的范围看作是土

壤优先路径的“染色影响范围”^[9]。将每一层的土壤水平剖面视为一个空间整体,优先路径看作为该空间整体上独立的个体或一点,运用图像处理技术提取其水平空间位置和影响半径。把优先路径的染色影响区域水平断面近似考虑为圆,利用染色面积反推其优

先路径的影响半径。利用 Image ProPlus 6.0 软件进行统计,得到优先路径的影响半径及其位置坐标,根据图像处理结果,可按照一定范围将影响半径 R 划分为 $1.0\sim 2.5, 2.5\sim 5.0, 5.0\sim 10.0, >10.0$ mm 4 个等级。

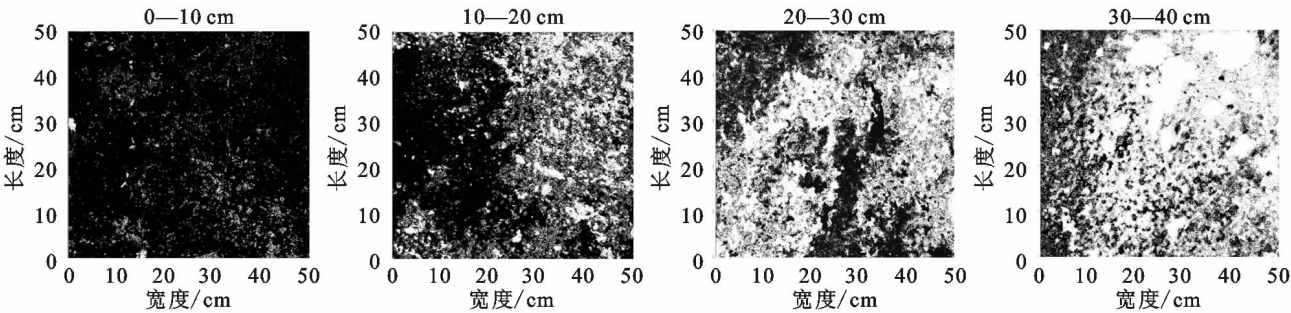


图 3 鹤大高速(G11)低路基边坡水平染色图像

2.5 优先流特征指标计算

优先流特征指标可以判定优先流发生程度的大小,也可以定量地描述优先流特征。利用导出的 Excel 表格计算数值剖面染色图像的各项特征指标,各指标计算方法^[10-12]如下:

染色覆盖率(DC):染色区域面积占总面积的百分比。相比于基质流,优先流是水流在土壤中优先通过的途径,它代表的是容积率较低的土壤基质。因此,染色面积越小,优先流发生程度越高。

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

式中:DC 为染色覆盖率(%);D 为染色区域面积(cm^2);ND 为未染色区域面积(cm^2)。

均匀入渗深度(UF):染色覆盖率降低至 80% 以前,入渗过程主要为均匀入渗,其入渗深度称为均匀入渗深度。其值越低,优先流发生程度越高。

优先流分数(PF-fr):总渗透流量通过优先流路径的分数。

$$PF-fr=100\times\left(1-\frac{UF\times 50}{TSA}\right) \tag{2}$$

式中:PF-fr 为优先流分数(%);UF 为基质入渗深(cm);TSA 为总染色面积(cm^2)。

长度指数(LI):在竖直剖面上每一层与上一层染色面积的差的绝对值之和(方程(3))。这个参数和染料下渗方式的异质性程度有关。染料下渗主要是通过优先流而非基质流,因此,其值越高,土壤优先流发生程度越高。

$$LI=\sum_{i=1}^{100}\left(|DC_{i+1}-DC_i|\right) \tag{3}$$

式中:LI 为长度指数;DC_i 指定深度染色面积比($i=1\sim 100$)。

峰值(PI):总染色覆盖率的垂直线与水平染色覆盖率曲线的交点的个数。这个参数与染色图像的异质性有关,其值越高,土壤优先流发生程度越高。

3 结果与分析

3.1 优先流发生区和基质流发生区土壤基本性质

土壤容重、水分含量、孔隙度、质地和有机质等是描述土壤特征的基本理化性质指标。通过土壤优先流发生区(染色区)及基质流发生区(未染色区)土壤理化性质的差异对比分析,可说明土壤结构与优先路径形成和优先流发生之间的关系^[13]。表 1 为研究区边坡土壤剖面染色区与未染色区不同深度的土壤理化性质。由表 1 可以看出,相同土壤深度下土壤容重表现为染色区显著低于未染色区($P<0.05$),土壤容重随土壤深度的增加而增大,土壤质量含水率表现为染色区显著低于未染色区($P<0.05$)。土壤总孔隙度和毛管孔隙度均表现为染色区显著高于未染色区($P<0.05$),二者均表现为随土壤深度的增加而减小。土壤砂粒含量表现为染色区高于未染色区,粉粒含量表现为染色区高于未染色区,黏粒含量表现为染色区低于未染色区($P<0.05$)。染色区内砂粒含量的提高,有利于形成连通的孔隙结构,有助于土壤优先流的发生。土壤有机质含量染色区高于未染色区,这说明优先流的形成与土壤有机质含量的空间变化具有一定关系。有机质含量的提高有助于土壤中团聚结构的形成,区域内土质相对松散,而更有利于土壤水分的快速运移^[14]。

3.2 边坡土壤优先路径水平分布特征

0—10 cm 表层土壤染色区域为 80% 以上,这是由于水分在活动流场的非均匀性,基质流和大孔隙流同时存在于土壤表层^[15],该层不能反映土壤优先路径的分布特征,故本文不对 0—10 cm 土壤层进行优先路径分析。通过图像处理技术得出边坡土壤 10—20 cm,20—30 cm 和 30—40 cm 土层的不同影响半径优先路径的水平空间分布位置(图 4),从左至右分别为: $1.0\leq R<2.5$ mm, $2.5\leq R<5.0$ mm, $5.0\leq R<10.0$ mm 和 $R\geq 10.0$ mm。

表 1 宽甸互通边坡土壤性质

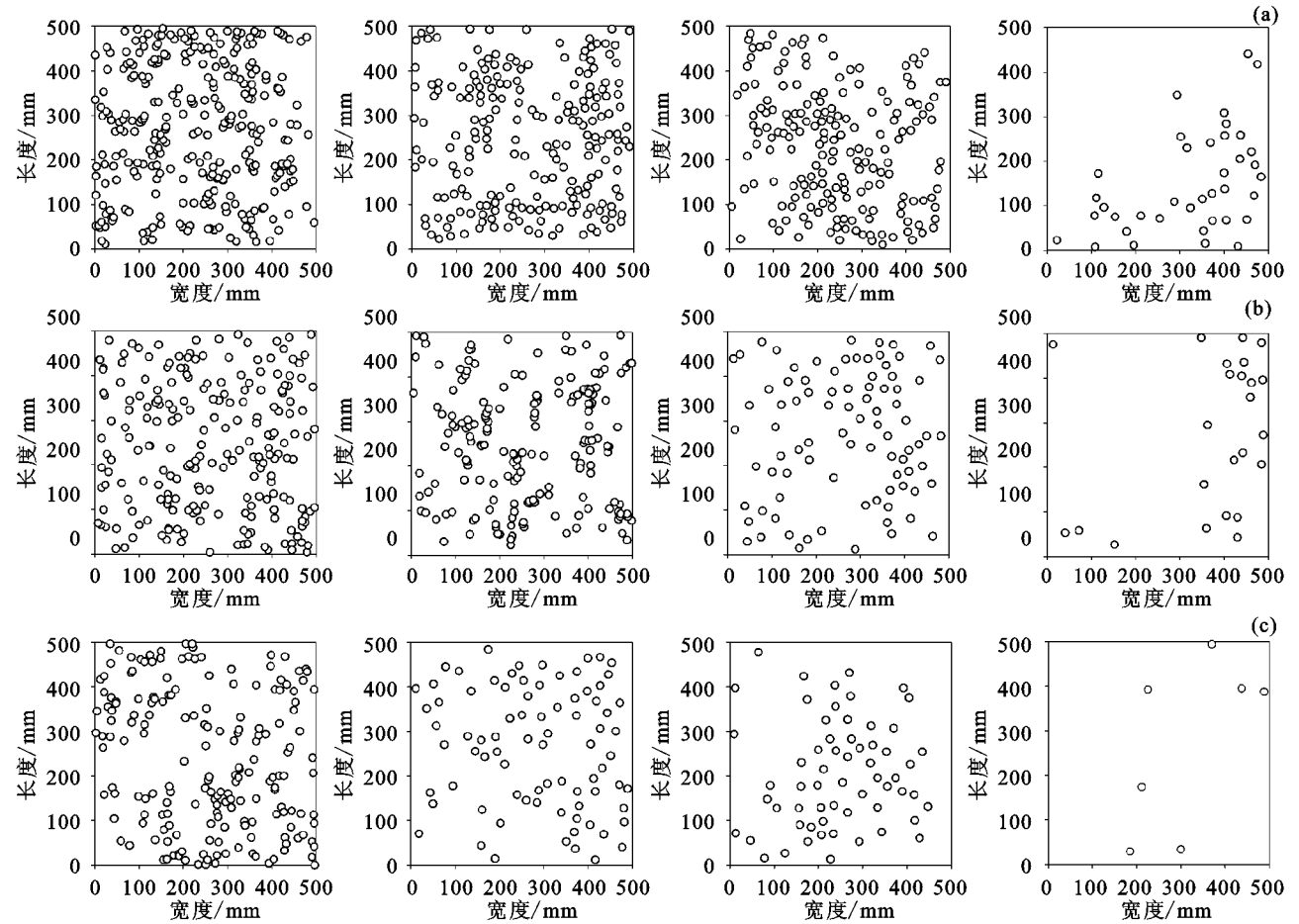
区域	土壤深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	质量 含水率/%	毛管孔 孔隙度/%	总孔隙度/ %	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	有机质/ (g·kg ⁻¹)
染色区	0—5	1.42±0.09	8.19±1.06	28.3±5.33	31.83±5.76	89.05±3.4	5.85±1.4	5.10±1.50	10.55±0.50
	5—10	1.55±0.10	7.31±1.04	22.83±5.50	30.89±4.76	87.96±3.7	5.58±0.7	6.96±1.27	9.86±0.50
	10—20	1.74±0.08	8.68±0.95	23.65±3.76	28.79±4.36	86.45±4.0	5.30±1.4	8.25±1.50	7.28±0.38
	20—30	1.71±0.06	4.88±0.76	21.65±4.77	26.06±4.89	86.62±2.1	5.07±1.5	8.31±1.37	4.39±0.56
	30—40	1.84±0.07	6.36±0.69	16.93±2.58	21.22±4.04	85.00±2.9	5.74±0.2	9.26±2.25	3.69±0.64
未染色区	0—5	1.63±0.07	4.07±0.33	23.48±5.35	27.76±5.83	85.70±3.4	8.04±1.4	6.26±1.26	8.15±0.47
	5—10	1.71±0.12	6.95±0.97	20.03±4.43	23.24±5.35	87.76±2.7	5.51±0.7	6.73±1.42	6.99±0.59
	10—20	1.72±0.08	5.64±0.65	22.31±4.26	25.76±5.91	85.87±3.0	4.55±1.4	9.58±2.50	5.02±0.32
	20—30	1.95±0.07	2.56±0.29	18.23±3.04	19.88±3.85	83.69±3.1	4.68±0.5	11.63±2.29	3.71±0.41
	30—40	1.93±0.09	6.05±0.65	18.32±2.60	20.3±4.72	80.32±2.9	4.26±1.2	15.42±2.41	2.13±0.55

经统计,不同影响半径优先路径数量见表 2。10—20,20—30,30—40 cm 土层优先路径总量分别为 713,510,341 个,优先路径数量随着土层深度的增加而减少。相同影响半径优先路径数量也随着土层深度的增加而减少。表层土壤疏松,会促进大孔隙的形成^[16],因此优先路径数量较多,而深层土壤未受到扰动,土壤紧实,优先路径数量较少。在同一土层中,1.0~10.0 mm 影响半径的优先路径分布较多,>10.0 mm 的分布极少,小影响半径的优先路径数量要远远多于大影响半径优先路径的数量,这是由于边

坡土壤较为密实,很难形成较大的孔隙。这与吕文星^[17]、田香皎等^[18]对农地以及陆斌等^[19]对林地采用土壤水分穿透曲线法测定土壤优先路径即大孔隙数量变化趋势的结果相一致。

表 2 不同影响半径优先路径数量 个

土层/ cm	不同影响半径 R/mm				总量
	1.0~2.5	2.5~5.0	5.0~10.0	>10.0	
10—20	288	209	179	37	713
20—30	214	186	87	23	510
30—40	184	89	61	7	341



注:(a)10—20 cm 土层;(b)20—30 cm 土层;(c)30—40 cm 土层。

图 4 土壤剖面不同影响半径优先路径水平分布

3.3 边坡土壤优先路径垂直分布特征

图 6 为边坡土壤垂直剖面优先流特征指标($n=5$)。从图 5 中可以看出,土壤优先流在垂直剖面上具有一定的空间异质性,但优先流的空间异质性并不是我们讨论的重点。经过图像分析,优先路径在垂直剖面上分布特征情况基本一致,染色深度均为 40 cm,因此本文选择其中一个剖面进行优先路径的分布特征研究。优先路径发育的边坡土壤由均匀基质流区和非均匀优先流区组成^[20]。图 6 为边坡土壤垂直剖面上的优先路径分布特征。从图 6 中可以看出,边坡土壤优先流特征指标染色覆盖率(DC),均匀入渗深度(UF),优先流分数(PF-fr),长度指数(LI)和峰值(PI)分别为 40.10%,4.10 cm,801.96 cm²,74.44%,543.6 cm 和 5。这些指标可以量化优先流的发育程度,证明边坡土壤中存在明显的优先流。从整体上看,研究区低路基边坡的溶质壤中流过程的趋势为“均质基质流—非均质指流—大孔隙流”,表面 4 cm 土壤层主

要受基质流的作用,土壤优先流主要发生于 4 cm 以下范围内。同一样地不同试验剖面的土壤孔隙结构存在差异,导致其壤中流过程具有一定的差异性,然而即便有这种差异,不同剖面壤中流的形态还是极为相似的。尽管在表层土壤染色区域优先流现象客观存在,但从长时间尺度看,此区域可定义为基质流区^[21]。均匀入渗发生在前 4 cm 范围内,边坡土壤中优先流区域远大于基质流区域。由此可见,低路基边坡土壤中存在较为明显的优先流,而优先流的发生对盐分在土壤中的运移起着重要的作用。由于土壤本身的异质特性增加了研究难度,目前对于优先流的判定,还只是停留在定性的描述上,许多研究人员根据自己的研究内容及目的,提出各自的判断标准。但缺乏一个系统的、应用性较强的判定标准。在今后的研究中,我们可以利用本文中提到的 5 个特征指标,对优先流的发生程度进行定量地分析和评价,从而比较不同土壤优先流的特征差异。

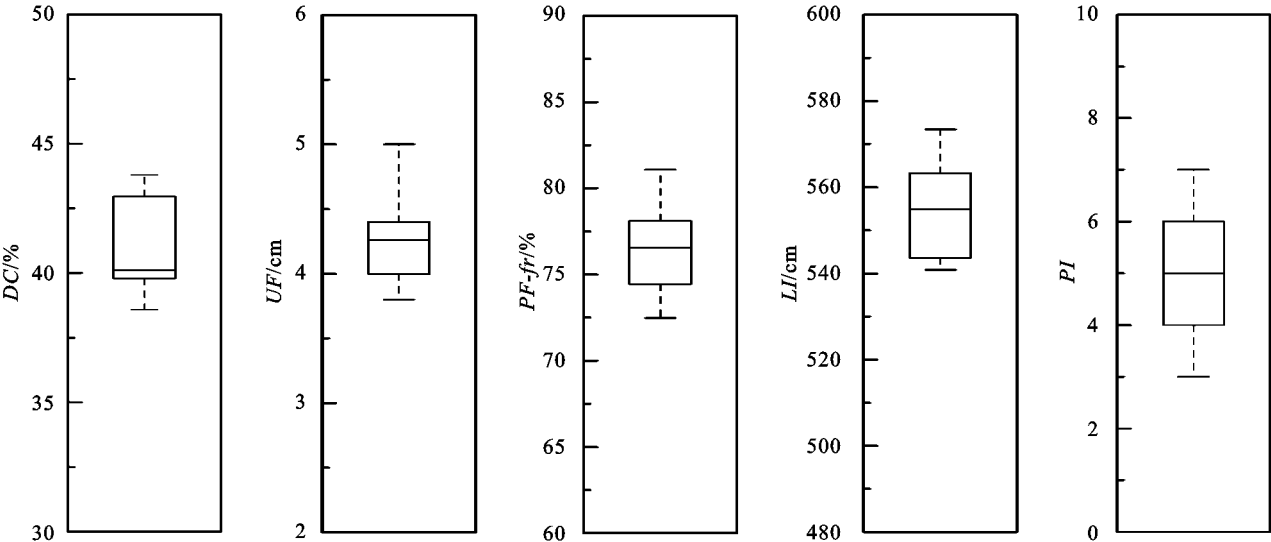


图 5 边坡土壤优先流特征指标

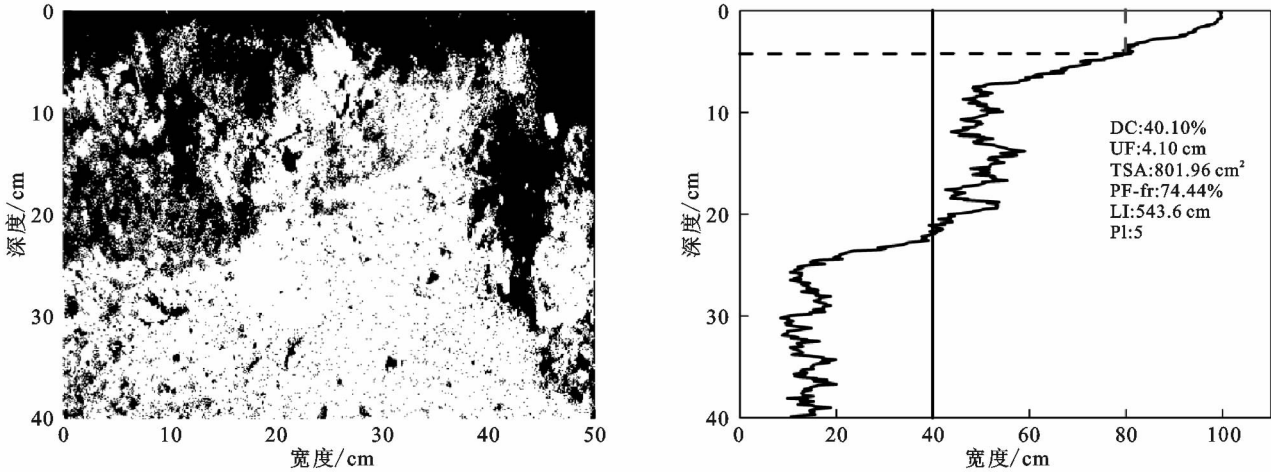


图 6 土壤剖面优先路径垂直分布

本试验样地选在路基边坡土壤上,由于样地距离路面较近,开挖剖面会造成大量的扰动,为了不对

路基和路域环境造成破坏,野外实验不能像农林地一样挖掘大量剖面进行对比分析,只选取了 3 个样点进

行试验,仍存在很大的局限性。但是,理论和试验证明了边坡土壤中是存在优先流的,这为今后研究边坡土壤中优先流特征和溶质优先运移特征提供了依据。在今后的研究中,为了不对路域环境和路基的稳定性造成破坏,我们可以采取室内模拟试验的方式。根据边坡土壤中黏土、砂粒、碎石的配比,在室内对不同基质边坡土壤进行模拟和重塑,能够减少野外诸多的不便。

5 结论

(1)利用亮蓝溶液进行染色示踪试验来研究氯盐在土壤中迁移路径的形态特征是可行的。土壤优先流发生区(染色区)及基质流发生区(未染色区)土壤理化性质存在显著差异。染色区土壤容重、含水率、黏粒含量显著低于非染色区,而土壤孔隙度、砂粒、粉粒和有机质含量显著高于非染色区。

(2)在水平剖面上,10—20,20—30,30—40cm 土层优先路径总量分别为 713,510,341 个,优先路径数量随着土层深度的增加而减少。相同影响半径优先路径数量随着土层深度的增加而减少。相同土层内优先路径的分布主要集中在 1.0~10.0 mm 范围内,>10.0 mm 优先路径分布较少。

(3)在垂直剖面上,边坡土壤优先流特征指标染色覆盖率(DC),均匀入渗深度(UF),优先流分数($PF-fr$),长度指数(LI)和峰值(PI)分别为 40.10%,4.10cm,801.96 cm²,74.44%,543.6 cm 和 5。研究区低路基边坡的溶质壤中流过程的趋势为“均质基质流—非均质指流—大孔隙流”。优先流区域远大于基质流区域,存在明显的优先流。优先流的存在会引起氯盐随水流快速运移到更深层次的土壤中。目前优先流特征的研究多为定性描述,优先流指标的提出,为今后量化土壤优先流发生程度提供了一个很好的研究方法。

参考文献:

[1] 陈宗伟,张立塔,刘涛,等.氯盐型融雪剂的环境影响及其替代材料研发进展[J].生态科学,2011,30(5):556-561.

[2] Fay L, Shi X M. Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: state of the knowledge[J]. Water, Air, & Soil Pollution,2012,223(5):2751-2770.

[3] Jarvis N, Etana A, Stagnitti F. Water repellency, near-saturated infiltration and preferential solute transport in a macroporous clay soil[J]. Geoderma,2008,143(3/4): 223-230.

[4] 张财宝,刘目兴,王文德,等.三峡库区森林土壤优先流染色特征[J].水土保持学报,2012,26(2):80-84.

[5] 魏虎伟,程金花,张洪江,等.四面山 2 种林地大孔隙特征与优先流关系研究[J].水土保持学报,2012,28(4): 263-268.

[6] 王彬俨,程金花,张洪江,等.北京昌平区农地土壤大孔隙特征[J].水土保持学报,2012,26(3):189-193.

[7] 官琦,徐则民,田林.植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素[J].应用生态学报,2013,24(10): 2888-2896.

[8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000.

[9] 吕文星,张洪江,吴煜禾,等.基于点格局分析的林地表层土壤优先路径水平分布特征[J].水土保持学报, 2012,26(6):68-74.

[10] Barges-Tobella A, 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.

[11] Flury M, Fluhler 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Chang P G. Chloride characterization from pavement runoff using automated samplers and specific conductivity sensors at three Eastern Massachusetts locations [D]. Environmental & Water Resources Engineering Masters Projects,2009.

[15] 吴庆华,张家发,蒯文静,等.土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J].农业工程学报,2014,30(7):82-90.

[16] 张英虎,牛健植,杜晓晴,等.鹞峰国家森林公园土壤优先流现象分析[J].水土保持学报,2013,27(1):41-45.

[17] 吕文星.三峡库区三种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D].北京:北京林业大学,2013.

[18] 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.

[19] 陆斌,张胜利,李侃,等.秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J].生态学报,2014,34(6):1515-1519.

[20] Kuntz B W, Rubin S, Berkowitz B, et al. Quantifying solute transport at the shale hills critical zone observatory[J]. Vadose Zone journal,2011,10(3):843-857.

[21] 盛丰,张仁铎,刘会海.土壤优先流运动的活动流场模型模拟和敏感性分析[J].农业工程学报,2001,27(4): 72-80.