

DOI: 10.5846/stxb201305151079

张英虎, 牛健植, 朱蔚利, 韩旖旎, 杜晓晴, 陈上杰. 森林生态系统林木根系对优先流的影响. 生态学报, 2015, 35(6): 1788-1797.

Zhang Y H, Niu J Z, Zhu W L, Han Y N, Du X Q, Chen S J. Effects of plant root systems on preferential flow in forest ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1788-1797.

森林生态系统林木根系对优先流的影响

张英虎, 牛健植*, 朱蔚利, 韩旖旎, 杜晓晴, 陈上杰

北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083

摘要: 土壤水和溶质运移是土壤学和环境科学研究的难点和热点, 优先流是一种常见的土壤溶质运移形式, 绕过土壤基质而优先运移至地下水源, 造成土壤养分的流失和水质的恶化。林木根系是土壤层的重要部分, 其结构形态影响着优先流过程, 为量化林木根系结构对土壤优先流的影响, 以首都圈森林生态系统鹫峰定位监测站为研究区域, 利用野外染色示踪与室内分析相结合的方法, 定量分析根长密度和根系生物量在优先流区和基质流区的变化。结果表明: 1) 随着土层深度的增加, 根长密度表现为减小的趋势, 对径级 $d < 1$ mm, $1 < d < 3$ mm 和 $3 < d < 5$ mm 根系而言, 根长密度在优先流区大于基质流区发生概率分别为 66.7%, 88.9% 和 83.3%; 2) 根系 $d < 1$ mm 对优先流贡献度最大, 均值为 94.8%, $1 < d < 3$ mm 和 $3 < d < 5$ mm 根系对优先流贡献度较小, 均值分别为 4.3% 和 0.9%; 3) 研究点根系生物量进行统计, 66.7% 优先流区根系生物量大于基质流区根系生物量。开展根系对优先流的影响研究, 有助于探明土壤水分运移规律, 分析地表地下水水质恶化根源, 为生态环境安全提供理论指导和技术支持。

关键词: 优先流; 优先流区; 基质流区; 根长密度; 根系生物量; 鹫峰国家森林公园

Effects of plant root systems on preferential flow in forest ecosystems

ZHANG Yinghu, NIU Jianzhi*, ZHU Weili, HAN Yini, DU Xiaoqing, CHEN Shangjie

Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The study of the transportation of soil water and solutes, especially preferential flow, is a hot topic in pedology, ecology, and related environmental fields. Preferential flow, now recognized as a common pedological phenomenon, generally occurs without reaching equilibrium or as a non-uniform, random, highly variable process both spatially and temporally and is essentially unpredictable. Preferential flow and soil matrix flow are two typical permeating patterns of water flow and solute transport. Flow in soil matrix pores at the pedon scale results from spatial variation in soil texture and bulk density; it is affected by the presence of stones or rock fragments and by the ability of some substrates to repel water. Flow in large, continuous pores or macropores at the pore scale arises from different soil interactions such as biopores formed by root systems and macrofauna, cracks formed by freeze and thaw or shrink/swell circles, as well as voids formed by irrigation, cultivation, and tillage. Consequently, preferential flow results in complex flow patterns that bypass the normal soil matrix patterns; this increases the risk that pollutants (e.g. heavy metals, radionuclides) will reach greater soil depths than would otherwise occur or that this also may allow pollutants to even reach the groundwater. Many factors control preferential flow including soil bulk density, soil structure, soil moisture content, rainfall intensity and tillage systems. Plant roots and other abiotic factors are some of the most important factors influencing preferential flow. In particular, the growth of plant roots influences the process of preferential flow. Obviously, root growth is a dynamic process and involves the formation of a continuous macropore network; plant roots may also create a series of well-connected pores that enhance

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271044)

收稿日期: 2013-05-15; 网络出版日期: 2014-04-25

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

preferential flow. Plant roots are widely known to play a key role in the development of preferential flow at the plot scale, but a quantitative description of the interaction between plant roots, the development of micropores and preferential flow is still a major challenge in preferential flow studies. This study investigated a forest ecosystem located in Jiufeng National Forest Park, Beijing, China, with the goal of characterizing and quantifying the effects of plant roots on preferential flow and the related complex interactions. Field dye tracing methods and laboratory experiments were applied to confirm and evaluate changes in root length density and root biomass along preferential pathways as well as in the soil matrix. Results indicated that 1) root length density, in general, decreased with an increase in soil depth. Root length density was larger in preferential pathways than in the surrounding soil matrix and was 66.7%, 88.9% and 88.3% for plant roots with a diameter (d) of <1 mm, $1 < d < 3$ mm and $3 < d < 5$ mm respectively. 2) The contribution of plant roots $d < 1$ mm to preferential flow was almost 94.8% for all experimental plots, while it was 4.3% and 0.9% for plant roots $1 < d < 3$ mm and $3 < d < 5$ mm, respectively. 3) The proportion of root biomass in the preferential pathways larger than in the soil matrix was 66.7% for all experimental plots. Evaluating the effects of plant roots on preferential flow will help researchers to better understand the factors controlling soil water and solute transportation and may prevent subsurface flow and groundwater being polluted for forest ecosystems containing relatively more plant roots and stones, especially allowing for protection of the environment from pollution.

Key Words: preferential flow; preferential pathways; soil matrix; root length density; root biomass; Jiufeng National Forest Park

长期以来,土壤水分和溶质运移始终是土壤学研究的焦点和难点^[1],土壤溶质主要通过水动力弥散作用、流动区与不流动区间扩散作用以及优先流作用进行运移^[2],其中优先流是一种常见现象,它与地表地下水水质、土壤养分吸收息息相关,其研究理论被广泛应用于地下水污染、污染物迁移和土壤盐分运动等方面。影响优先流因素很多,主要包括土壤容重^[3]、初始含水量^[4]、根系^[5]、石砾^[6]等。林木根系是土壤层的重要组成部分,根系在土壤内可形成巨大的空间网络结构,形成根系通道,加快优先流过程,如 Li 和 Ghodrati^[7]指出根系通道可以促使硝酸盐快速运移;Jørgensen 等^[8]认为根系通道能够促进水分和溶质在土壤层内的快速运移;Dušek 等^[9]利用模型模拟出溶质主要在根系分布区运移。上述结果反映出林木根系可以加速水分及溶质在土壤层中的运移过程,但有关林木根系结构与优先流之间有什么量化关系一直没有得到有效解决。根长密度和根系生物量作为林木根系结构的重要指标,影响着优先流过程^[10-11],但它们之间关系研究大多是定性研究,造成理论不足、解释不清等问题,不能深入揭示优先流的驱动影响因子。林木根系影响优先流过程,是不是每种植被的根系都影响优先流过程?林木根系与优先流存在何种量化关系等是目前人们面临的难题。大量有关根系和优先流关系研究主要集中在农田生态系统等,而森林生态系统自身复杂性验证却很少。

华北土石山区是重要的水源涵养区,地下水源污染和水质恶化影响着首都北京的饮水安全,区内林木根系和石砾含量较高,土层深度约为 30 cm 左右,结构错综复杂,优先流现象普遍。本文以首都圈森林生态系统鹫峰定位监测站为研究点,分析林木根系是否是优先流发生的驱动影响因子以及它们之间有什么量化关系将有助于研究区域土壤水分运移规律研究,揭示研究区水质恶化根源,并将在防止水源破坏,预防泥石流、滑坡等自然灾害发生等方面提供理论及技术支持。

1 研究区概况

首都圈森林生态系统鹫峰定位监测站建在鹫峰国家森林公园内,隶属于北京市海淀区苏家坨镇,地理坐标为东经 116°28',北纬 39°34'。鹫峰国家森林公园海拔在 60—1100 m 之间,主峰海拔 465 m,公园最高峰 1153 m;属于华北暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均气温 11.6 °C,多年平均降雨量为 630 mm,年蒸发量达到 1800—2000 mm,降雨主要集中在 6—9 月份,占全年降雨量的 70%—80%左右。鹫峰国家森林公

园属于暖温带落叶阔叶林区,海拔 800 m 以下,油松(*Pinus tabulaeformis*)、国槐(*Sophora japonica* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* Franco)、槲树(*Quercus dentata* Thunb.)等人工林和山杏(*Prunus armniaca* L.)灌丛等错落分布;海拔 800—1100 m 之间,人为干扰较少,以松栎天然混交林、落叶松(*Platycladus orientalis*)为主^[12]。

2 材料和研究方法

2.1 供试样地选择

2012 年 7 至 9 月进行采样,根据区域的植被生长状况,选取国槐(*Sophora japonica* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* Franco)和槲树(*Quercus dentata* Thunb.)3 种植被,每种植被类型选择 2 棵,共设 6 个研究点,分别编号为国槐 1 和国槐 2、侧柏 1 和侧柏 2、槲树 1 和槲树 2,研究点分布在同一海拔高度,坡度坡向相同,地势较为平坦且植被生长状况良好的 10 m×10 m 样方内。

2.2 野外染色示踪试验

染色示踪法已广泛应用于优先流研究中,由于亮蓝毒性较低、可见性高、不易被土壤颗粒吸附,所以本文选取亮蓝为染色试剂,分别在 6 个研究点进行野外示踪处理。在每块研究点内,以样树为中心,设置 1.0 m×1.0 m 的样方,除去土壤表层的植物体以及较厚地被物后,在样方内施加浓度 5 g/L、共 50 L 的亮蓝溶液进行示踪染色。施加溶液 24 h 之后开挖垂直剖面,进行样品采集和水分运移路径分析。将上述开挖的土壤剖面用 3000×4000 像素数码相机进行拍摄,保持相机镜头与土壤剖面相互垂直,所切剖面深度不得低于最大染色深度,所有剖面图像用 Photoshop CS5 进行处理,滤去土壤颜色,只保留示踪剂运移路径的颜色,观察优先流区和基质流区。

在上述染色垂直剖面上的优先流区和基质流区用直径为 7 cm,高为 5 cm 的小环刀采集土壤样品,取样深度分别为 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm,每一层优先流区和基质流区各取 2 个小环刀,用来分析土壤含水量、孔隙度等土壤物理性质指标及根长密度、根系生物量等根系结构指标。

2.3 土壤基本物理性质指标测定

研究利用烘干法测定土壤含水量,利用土柱法测定土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度(研究点土壤基本物理性质见表 1)。

表 1 研究点土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil in experimental plots

研究点 Experimental plots	土壤含水量 Soil moisture/%	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%
国槐 1 <i>Sophora japonica</i> Linn.1	15.83	44.13	30.52	11.12
国槐 2 <i>Sophora japonica</i> Linn.2	12.68	44.76	34.89	13.21
侧柏 1 <i>Platycladus orientalis</i> Franco 1	13.79	46.72	21.58	12.43
侧柏 2 <i>Platycladus orientalis</i> Franco 2	12.13	46.53	38.34	10.13
槲树 1 <i>Quercus dentata</i> Thunb.1	13.86	45.87	38.54	10.26
槲树 2 <i>Quercus dentata</i> Thunb.2	11.31	46.56	35.67	11.82

2.4 根系结构指标测定

根长密度 小环刀土石和根系混合土样移入塑料袋内,放置冰箱内,恒温 4 ℃,之后用筛子将其分开,根系表面附着的土石,自然风干 5 min 将其分离,最后水洗法洗出所有根系^[13],之后用 WinRHIZO 软件测定根长密度;

根系生物量 洗好的根系在 85 ℃ 条件下烘干,用电子天平测根系干重,之后计算出根系生物量。

2.5 贡献度指标测定

贡献度 测定整个土壤剖面优先流区内 3 种不同根系径级的根长密度,之后计算出整个剖面所有根系径级总根长密度,最后整个土壤剖面 $d<1$ mm 根长密度与总根长密度之比得到 $d<1$ mm 根系对优先流贡献度,

$1 < d < 3 \text{ mm}$, $3 < d < 5 \text{ mm}$ 计算方法相同;

发生概率 利用数学统计方法分别对 6 个研究点不同土壤深度和根系径级优先流区和基质流区根系指标进行比较,进而计算出所有研究点优先流区根系含量大于基质流区根系含量概率值。

2.6 数据结果处理方法

用 Origin8.0、Excel2003 进行曲线图绘制;土壤剖面图像后期处理运用 Photoshop CS5;用 SPSS18.0 统计软件进行显著性检验和相关性分析,同时进行 one-way Anova 分析等。

3 结果和分析

野外染色示踪试验可以直观观察优先流路径以及发生程度,从而间接分析林木根系对优先流的影响。典型样方尺度范围内,在有根系的区域,示踪物主要通过根孔隙通道运移,且运移路径较远(图 1),因此在森林生态系统,土壤内林木根系对优先流具有一定影响。

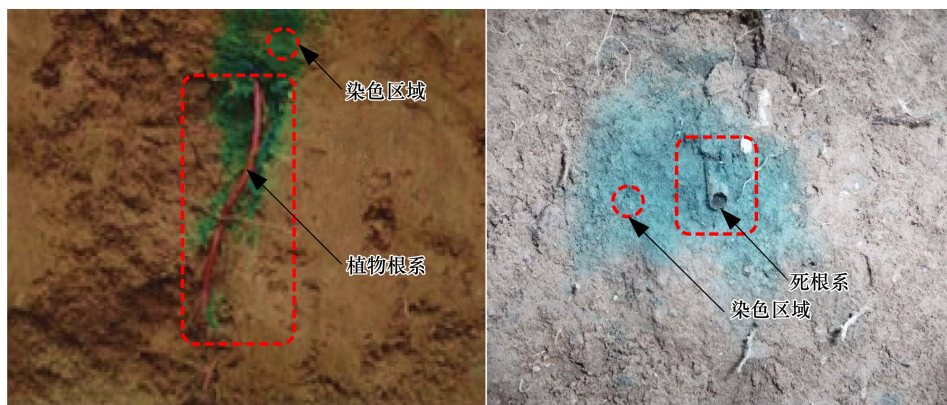


图 1 土壤剖面林木根系对示踪剂分布影响

Fig.1 Effects of plant root systems on distribution of dying tracers in soil profiles

3.1 根长密度对优先流影响分析

典型染色模式较为直观的反映土壤剖面优先流区和基质流区,在土壤表面,染色较为均匀,称之为均匀染色区;Hagedorn 和 Bundt^[14]明确指出,土壤剖面上染色区域称为优先流区,而未染色区域则为基质流区(图 2)。

根长密度通常为单位土体内根系的总长度^[15],是根系特征一项非常重要的指标^[16],其在土壤剖面垂直分布影响着水分和营养物质的吸收^[17]。随着季节的变化,根长密度也会发生相应的改变,一般秋季时活根根长密度达到最大值,而死根系,其根长密度却在冬季为最大值^[11]。根系在土壤内部的分布模式直接影响了其对水分和营养物质的吸收率,根长密度在某种程度上影响着优先流路径,水和溶质会通过其形成的根孔隙绕过土壤基质而优先运移,同时在水和溶质运移过程中,仅有不到 0.1%的溶质和 1%的水会通过优先流区运移至基质流区^[18]。3 种不同植被类型(国槐、侧柏和榉树)不同根系径级根长密度见图 3。

由图 3 可以看出,根长密度随深度增加,有递减的趋势。根长密度均值随根系径级、土壤深度增加均出现减小的趋势,根长密度标准差和变异系数变化值见表 2。对不同土层深度及根系径级来说,6 个研究点均表现出优先流区根长密度总体大于基质流区根长密度^[10],研究点 $d < 1 \text{ mm}$ 根长密度最大,其次是 $1 < d < 3 \text{ mm}$,最后

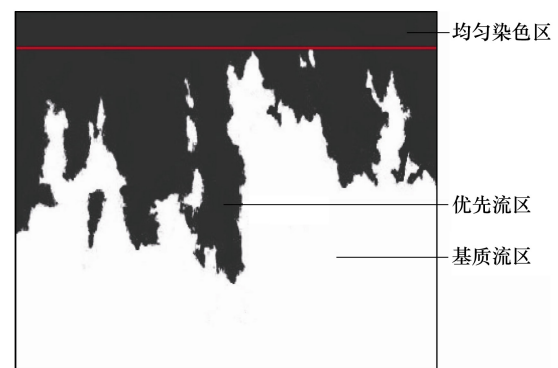


图 2 优先流区和基质流区在土壤剖面分布

Fig.2 Distribution of preferential pathways and soil matrix in soil profiles

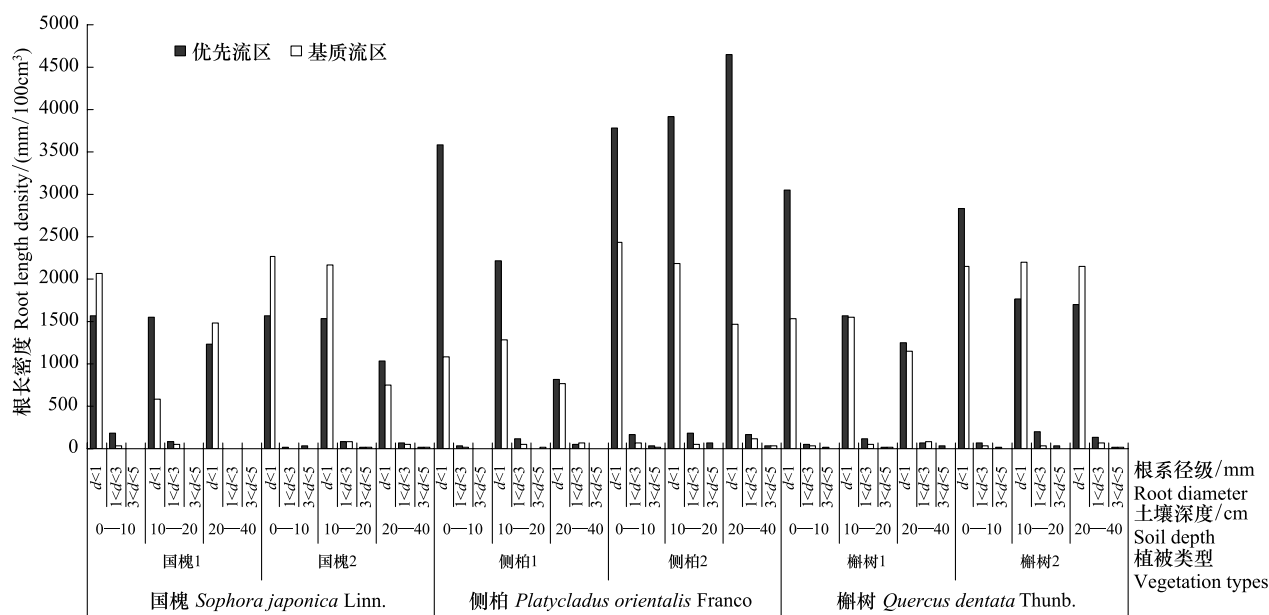


图3 不同植被类型根长密度在优先流区和基质流区的分布

Fig.3 Distribution of root length density in preferential pathways and soil matrix for different vegetation types

是 $3 < d < 5$ mm。对比优先流区和基质流区根长密度, $d < 1$ mm 根长密度优先流区大于基质流区的概率约为 66.7%; 同时 $1 < d < 3$ mm 约为 88.9%, $3 < d < 5$ mm 约为 83.3%。同时由图 3 可知, 国槐 1 和国槐 2 根系径级 $d < 1$ mm 根长密度对优先流的贡献度分别为 94.1% 和 94.2%, 根系径级 $1 < d < 3$ mm 的贡献度分别为 5.6% 和 4.0%, 根系径级 $3 < d < 5$ mm 的贡献度分别为 0.3% 和 1.8%; 侧柏 1 和侧柏 2 根系径级 $d < 1$ mm 根长密度对优先流的贡献度分别为 97.5% 和 94.5%, 根系径级 $1 < d < 3$ mm 的贡献度分别为 2.4% 和 3.9%, 根系径级 $3 < d < 5$ mm 的贡献度分别为 0.1% 和 1.6%; 槲树 1 和槲树 2 根系径级 $d < 1$ mm 根长密度对优先流的贡献度分别为 95.2% 和 93.1%, $1 < d < 3$ mm 的贡献度分别为 3.8% 和 5.8%, $3 < d < 5$ mm 的贡献度分别为 1.0% 和 1.1%。

表2 优先流区根长密度均值和标准差随根系径级及土壤深度的变化

Table 2 Changes of mean value and standard error of root length density refer to root diameter and soil depth

根系和土壤 Root systems and soil	根系径级 Root diameter/mm			土壤深度 Soil depth/cm		
	$d < 1$	$1 < d < 3$	$3 < d < 5$	0—10	10—20	20—40
根长密度均值 Average value of root length density/(mm/100cm ³)	2200	100	21	2836	2249	1878
标准差 Standard deviation	1140	61	18	966	983	1490
变异系数 Coefficient of variation	0.518	0.610	0.857	0.341	0.437	0.793

同一个研究点同一土层深度根长密度有时会出现较大差异, 这是由根系结构在土壤内的异质性决定的, 根系生长是一个动态的变化过程^[19], 需要足够的土壤空间网络^[20], 不同的土壤质地和立地条件, 根系生长分布格局多种多样, 同时植物生长过程中, 根系生长模式也不同。由于土壤内水分和营养成分的差异, 使得根系空间分布存在垂直和水平差异。研究点死根周围染色效果明显 (图 1), 活根系和死根系形成的根通道都可以促进优先流^[21]和水流的非平衡运动^[22-25], 死根系作用效果更加明显^[26], 同时活根系也可以促进死根系的分解和降解过程^[27]。

综上所述: 优先流区根长密度很大一部分大于基质流区, 这是因为无论是活根系还是死根系, 都会产生优先流通道, 改善土壤理化性质^[28], 根系与土壤接触面之间的缝隙提高了溶质运移的速率, 根系形成的根孔隙也是重要的运移通道。对于基质流区, 土壤质地、土壤结构、孔隙度均受到了限制, 植物根系分布较少, 土壤理化性质改善效果不明显。同时研究点均表现出细根系 (根系径级 $d < 1$ mm) 对优先流的高贡献度, 均值在

94.8%左右,而相对较粗根系(根系径级 $d > 1 \text{ mm}$)贡献度却很小,因为土样均取自 0—40 cm 细根系主要分布土壤层,土壤表层细根系之间会形成巨大的空间连通网络^[20],细根系(根系径级 $d < 1 \text{ mm}$)主要通过交错和穿插作用分布在土壤表层,使本来紧实板结的土壤变的更加松动,土壤结构发生变化,同时土壤表层死根系由于自身的死亡腐烂,转化成为有机物,加快土壤团聚体的形成,进而有效改善土壤理化性质^[28],根系通道某种程度上促进了土壤水和溶质的运移^[8]。优先流区根系含量较高,示踪物在土壤剖面染色百分比作为优先流程度指标,与根系含量有一定联系,染色百分比表示亮蓝溶液染色区域占整个土壤剖面的比例。3 种不同植被类型染色百分比与根长密度关系见图 4。

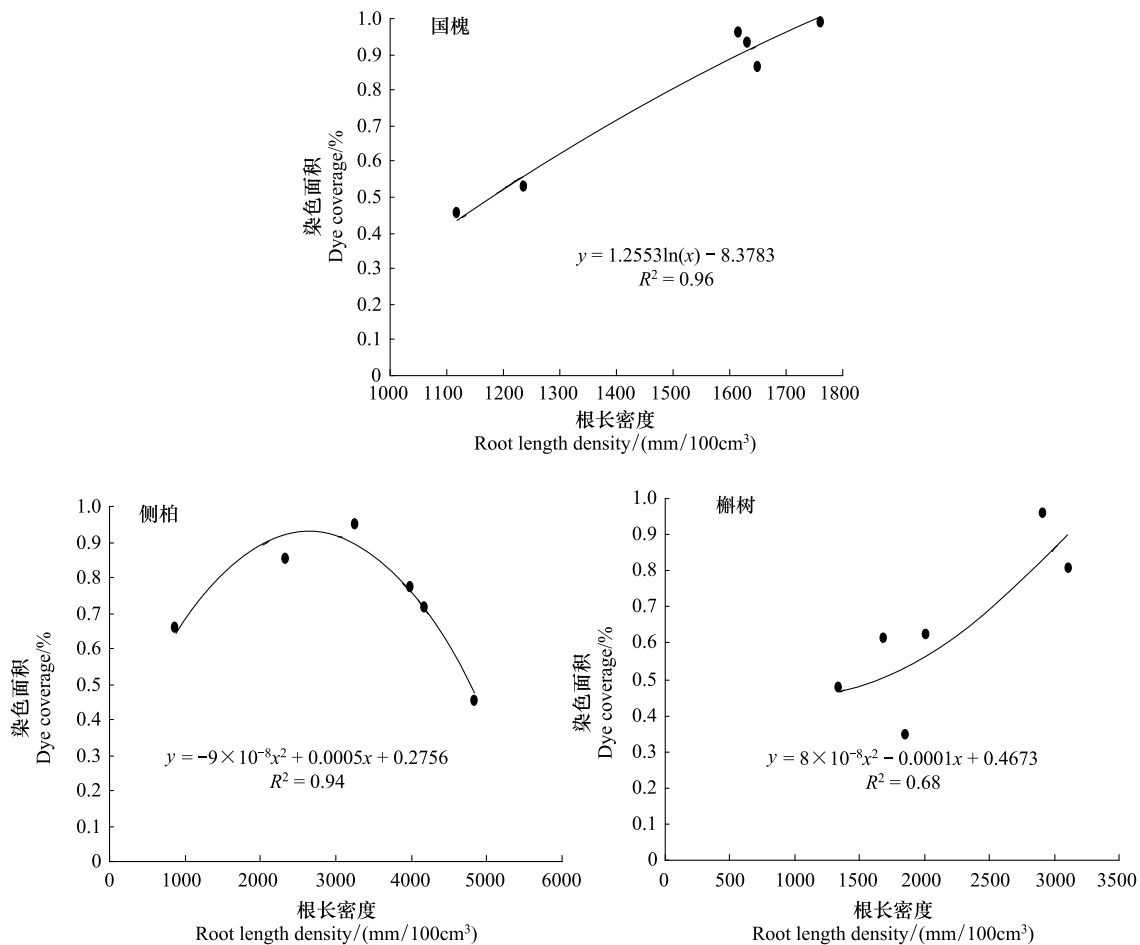


图 4 国槐、侧柏和槲树染色百分比与根长密度之间关系

Fig.4 Relationship between dye coverage and root length density for different vegetation types (*Sophora japonica* Linn., *Platycladus orientalis* Franco, *Quercus dentata* Thunb.)

图 4 中,根长密度表示 0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm 土壤深度内 $d < 5 \text{ mm}$ 根长密度之和,染色百分比表示 0—10 cm、10—20 cm 和 20—40 cm 土壤深度平均染色百分比。由图 4 可知,随着根长密度的增加,染色百分比总体表现为增加的趋势,首先是因为根系主要集中在土壤表层,根系含量较高^[29-31],根系会形成连通网络,根系与土壤接触促使大孔隙的形成^[32],增加大孔隙的密度^[33]和土壤孔隙的连续性^[34],有研究表明水分和溶质含量在根系区域会明显增加^[9],根系本身在土壤层内会形成根孔隙通道,改善土壤理化性质,降低土壤容重,使本来结实的土壤变的松弛^[28],根系在促使大孔隙形成的同时,又可以生长在大孔隙(微生物孔隙、洞穴、裂隙等)内部^[32],相互作用,共同影响土壤结构,因此土壤表层染色效果明显,优先流程度高;然而在土壤表层以下,根系含量较低,根系伸长很难抵抗机械压力,大孔隙密度较小,染色效果不佳;其次,根系可以向土壤内释放复杂的有机混合物,如氨基酸、有机酸、糖类、酶等,这些物质可以被释放出来润滑与土壤仅仅接

触的根尖部分,使得根系在较为压实的土壤层内生长^[35],促使根系的有效生长,间接影响大孔隙的变化,土壤表层根系含量丰富,根系释放土壤内有机质含量高,更易促进根系延伸以及大孔隙的形成;最后,土壤表层根系改良土壤理化性质明显,特别是表层根系腐烂及自身死亡,死根系形成的路径更容易诱导优先流的产生^[25],研究中已观察到死根系周围染色效果(图1),而表层石砾对优先流路径及大孔隙的影响较小,深层石砾对其影响则较为显著^[33]。然而侧柏却是个例,随着根长密度的增加,染色百分比先增加后降低,因此根系含量和染色面积之间并不是绝对的关系,其它生物因素及外部因素也有可能導致结果的差异,如树龄、土壤质地和物理性质、动物体造成的裂隙等。

3.2 根系生物量对优先流影响分析

根系生物量作为一项根系特征指标,通常指的是单位土体中根系的质量^[36]。研究点优先流区和基质流区根系生物量($d < 5 \text{ mm}$)变化情况如图5。

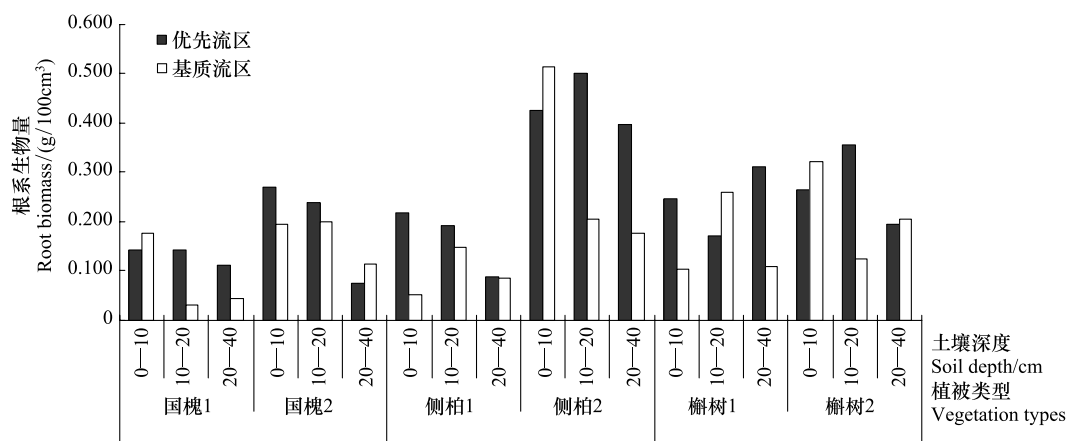


图5 不同植被类型根系生物量在优先流区和基质流区变化

Fig.5 Changes of root biomass in preferential pathways and soil matrix for different vegetation types

对研究点根系生物量进行统计,土层0—10 cm,优先流区根系生物量大于基质流区根系生物量概率为50%;土层10—20 cm为83.3%;土层20—40 cm为66.7%,优先流区和基质流区根系生物量变异情况见表3,研究点大约有66.7%优先流区根系生物量大于基质流区根系生物量,从这一比例来看,根系生物量对优先流路径有一定影响,即林木根系能为水分运动和溶质运移提供优先路径,但这种效果不显著,并不是简单的正相关关系。

表3 优先流区和基质流区根系生物量变异情况

Table 3 Variation of root biomass between preferential pathways and soil matrix

土壤深度 Soil depth/cm	优先流区 Preferential pathways			基质流区 Soil matrix		
	根系生物量均值 Average value of root biomass/ (g/100cm ³)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	根系生物量均值 Average value of root biomass/ (g/100cm ³)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
0—10	0.261	0.093	0.356	0.227	0.167	0.736
10—20	0.268	0.136	0.507	0.162	0.079	0.488
20—40	0.197	0.132	0.670	0.122	0.058	0.475

从优先流区根系生物量>基质流区根系生物量比例分布来判断根系生物量对优先流的影响,此为较为宏观的统计分析方法,但是不同研究点或者不同土壤深度优先流区和基质流区生物量不具有可比性,为此通过对比同一研究点同一土壤深度上优先流区与基质流区根系生物量相差百分比分析根系生物量对优先流的影响,本文相差百分比用 θ 来表示:

$$\theta = \frac{|\text{优先流区根系生物量} - \text{基质流区根系生物量}|}{\text{优先流区根系生物量}}$$

不同研究点根系生物量相差百分比如图 6 所示。

图 6 中,实心部分表示两区域生物量相差百分比大于 50% 情况,而空心部分则小于 50%。研究点根系生物量相差百分比大于 50% 所占比例大约为 55.6%,这一比例范围内根系生物量均出现优先流区大于基质流区,也就是说如果两区域根系生物量相差百分比超过 50%,优先流路径一定发生在根系含量较多的区域,根系生物量主导优先流路径;相反,相邻两区域根系生物量相差百分比不足 50%,则优先流路径可能发生在根系含量较多的区域,也可能发生在根系含量较少的区域,根系生物量对优先流路径不起决定性作用。

4 讨论

Lipiec^[29]、Glab^[30] 和 Bonger^[31] 研究表明植物根系主要分布在土壤表层,有效改善土壤理化性质,降低土壤容重,同时 Bonger^[31] 认为土壤表层根系形成的大孔隙网络是主要的优先流路径。Schenk^[37]、Mosaddeghi^[38] 和 Bonger^[39] 研究表明,根长密度随着土壤深度的增加而降低,根长密度反映根系生长的状况。本试验条件下,分别对国槐、侧柏和榉树 3 种不同植被优先流区和基质流区根系含量比较并进行量化,发现两区内根长密度和生物量总体表现为随土壤深度增加而降低的趋势,这与上述研究结果一致,这是因为土壤表层根系含量高^[29-31],特别是表层根系自身腐烂及死亡后,更易诱导优先流的产生^[25,40],华北土石山区森林生态系统石砾含量较高,已有研究表明石砾与水及溶质运移关系较为复杂^[33],在土壤表层,大孔隙流或优先流主要受林木根系影响,石砾主要对土壤深层水流影响显著^[33];然而在土壤深层,土层较为结实,容重较大,根系生长过程中很难抵抗土层所造成的机械压力而伸长受到限制,因此深层根系含量较低。

野外染色示踪条件下,可以直接观察优先流路径及染色模式,本研究表明鹫峰地区森林生态系统存在明显的优先流现象(图 2)。森林生态系统林木根系在促进水和溶质运移起着至关重要的作用,Bengough^[35] 和 Dušek^[9] 研究表明水和溶质主要在根系分布范围内存在,两者之间存在必然的联系,Li 和 Ghodrati^[7] 通过土柱实验表明根系作用下的饱和导水率是无根系条件下饱和导水率的 6 倍;Jørgensen^[8] 研究证明根系通道运移了 94% 的水流,仅仅有 6% 的水流没有通过根系;Perillo^[41] 和 Devitt^[42] 研究表明根系是产生大孔隙流和优先流的重要组成部分,本研究中同样观察到根系(活根系或死根系)对溶质运移的影响(图 1),特别是优先流,这是因为根系生长过程中,既可以在土壤大孔隙(干湿冻融裂隙、洞穴、微生物孔隙)生长,同时又由于自身的动态变化、土壤接触表面以及腐烂等因素产生大孔隙^[22],通常根系只能在比其直径大的孔隙内生长^[43],大很多也不利于根系生长,因为养分没有被根系吸收而通过通道优先运移至深层。优先流区相比基质流区,区内孔隙连通性较好,孔隙密度和数量较大,因此更有利于根系的生长,本试验条件下,对所有研究点进行统计,79.6% 优先流区根长密度大于基质流区,66.7% 优先流区根系生物量大于基质流区,可以间接说明根系可以形成优先通道;同时细根系($d < 1 \text{ mm}$)对优先流的贡献度最大,均值达到 94.8%,这与董宾芳^[40] 研究结果一致。

染色面积百分比作为优先流的一个特性指标,反映优先流的重要参考^[40],将根系含量与染色百分比建立关系目前研究较少,Bouma^[44] 研究认为作为优先流特征参数,染色面积百分比可以监测土壤内孔隙的数量、直径和大小;Vogel^[45] 和 Etana^[46] 研究表明染色百分比随土壤深度的增加呈现降低的趋势,本研究中,染色百分比随土壤深度增加而降低,根长密度的增加而增加(侧柏除外),董宾芳^[40] 认为根长密度与染色面积存在较强的正相关性,研究表明与粗根系相比,细根系与土壤优先流相关性更好,因为细根系寿命短,非木质化程

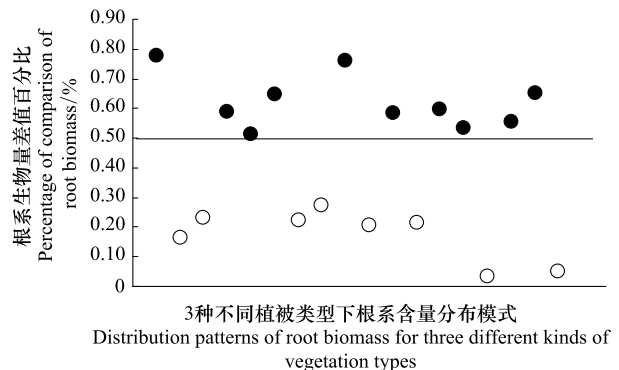


图 6 优先流区和基质流区根系生物量相差百分比

Fig. 6 Difference between percentage of comparison of root biomass in preferential pathways and soil matrix

度高,大量增生及死亡之后会形成更多的根孔隙通道,促进优先流过程。

土壤优先流应该从理论研究、封闭室内试验扩展至景观尺度、区域尺度等大尺度研究上来,同时与现代技术相结合,例如 GIS、CT 探测技术等,进而获取精确的数据来描述优先流运动过程,优化 CDE 模型和 T-R 模型参数,形成系统的优先流分类体系和判定标准。目前,土壤容重、质地、含水量、降雨强度等与水 and 溶质运移,特别是优先流之间的关系验证较多,但是华北土石山区森林生态系统林木根系和石砾含量较高,根系和石砾可以视为综合结构体,即“根石结构”来探讨对优先流的影响,建立林木根系和石砾综合优先流水文过程模型,这也是以后研究的热点和难点。

5 结论

(1)通过分析 6 个研究点根长密度与优先流之间的关系,利用统计学的方法,观察优先流区和基质流区根长密度的变化情况。随着土层深度的增加,根长密度表现为减小的趋势,总体来看,优先流区根长密度大于基质流区根长密度,相对 $d < 1$ mm 根系而言,概率约为 66.7%, $1 < d < 3$ mm 根系约为 88.9%, $3 < d < 5$ mm 根系约为 83.3%。

(2)研究点均表现出细根系(根系径级 $d < 1$ mm)对优先流的高贡献度,均值在 94.8% 左右,而相对较粗根系(根系径级 $d > 1$ mm)贡献度却很小。

(3)染色面积百分比和根系含量存在一定的联系,随着根系含量的增加,染色面积百分比总体表现为增加的趋势,但两者之间的关系并不是绝对的,这主要是由根系在土壤层内的空间异质性造成的。

4)研究点根系生物量进行统计,66.7% 优先流区根系生物量大于基质流区根系生物量,根系生物量相差百分比大于 50% 比例大约为 55.6%,这一比例范围内均出现优先流区根系生物量大于基质流区根系生物量。

参考文献(References):

- [1] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, Zeyer J, Blaser P. Preferential flow paths: biological ‘hotspots’ in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(6): 729-738.
- [2] Bryant S L, Paruchuri R K, Saripalli K P. Flow and solute transport around injection wells through a single, growing fracture. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(8): 803-813.
- [3] Reading L P, Baumgartl T, Bristow K L, Lockington D A. Hydraulic conductivity increases in a sodic clay soil in response to gypsum applications: Impacts of bulk density and cation exchange. *Soil Science*, 2012, 177(3): 165-171.
- [4] Sanders E C, Abou Najm M R, Mohtar R H, Klavivko E, Schulze D. Field method for separating the contribution of surface-connected preferential flow pathways from flow through the soil matrix. *Water Resource Research*, 2012, 48(4): 4534-4542.
- [5] Germann P F, Lange B, Lüscher P. Preferential Flow Dynamics and Plant Rooting Systems. *Hydropedology*, 2012: 121-141.
- [6] Jomaa S, Barry D A, Brovelli A, Heng B C P, Sander G C, Parlange J Y, Rosee C W. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments. *Catena*, 2012, 92: 38-48.
- [7] Li Y M, Ghodrati M. Preferential transport of Nitrate through soil columns containing root channels. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 653-659.
- [8] Jørgensen P R, Hoffmann M, Kistrup J P, Bryde C, Bossi R, Villholth K G. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: Field, laboratory, and modeling analysis. *Water Resources Research*, 2002, 38(11): 28-1-28-15.
- [9] Dušek J, Vogel T, Lichner L, Cipáková A, Dohnal M. Simulated cadmium transport in macroporous soil during heavy rainstorm using dual-permeability approach. *Biologia*, 2006, 61(19): S252-S254.
- [10] Bogner C, Gaul D, Kolb A, Schmiedinger I, Huwe B. Investigating flow mechanisms in a forest soil by mixed-effects modelling. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(6): 1079-1090.
- [11] Price J S, Hendrick R L. Fine root length production, mortality and standing root crop dynamics in an intensively managed sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) coppice. *Plant and Soil*, 1998, 205(2): 193-201.
- [12] 王勇. 鹭峰国家森林公园土壤系统分类研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [13] Felderer B, Boldt-Burisch K M, Schneider B U, Hüttel R F J, Schulin R. Root growth of *Lotus corniculatus* interacts with *P* distribution in young sandy soil. *Biogeosciences*, 2013, 10(3): 1737-1749.
- [14] Hagedorn F, Bundt M. The age of preferential flow paths. *Geoderma*, 2002, 108(1/2): 119-132.
- [15] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots. Part1: Laboratory study. *Journal of*

- Electronic Packaging, 2001, 44(5): 1167-1174.
- [16] Volkmar K M. A comparison of minirhizotron techniques for estimating root length density in soils of different bulk densities. *Plant and Soil*, 1993, 157(2): 239-245.
- [17] Gaisera T, Perkons U, Küpper P M, Kautz T, Uteau-Puschmann D, Ewert F, Enders A, Krauss G. Modeling biopore effects on root growth and biomass production on soils with pronounced sub-soil clay accumulation. *Ecological Modelling*, 2013, 256: 6-15.
- [18] Peterson E W, Wicks C M. Fluid and solute transport from a conduit to the matrix in a carbonate aquifer system. *Mathematical Geology*, 2005, 37(8): 851-867.
- [19] Dastidar M G, Jouannet V, Maizel A. Root branching: mechanisms, robustness, and plasticity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 2012, 1(3): 329-343.
- [20] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, Mooney S J. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1528-1537.
- [21] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 55-72.
- [22] 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.
- [23] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林森林生态系统土壤水分运移特征分析. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 240-245.
- [24] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统土壤优先流研究初探. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 246-254.
- [25] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统基于 KDW 运动——弥散波模型的优先流研究. *生态学报*, 2007, 27(9): 3541-3555.
- [26] Mitchell A R, Ellsworth T R, Meek B D. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26(15/16): 2655-2666.
- [27] Van der Krift TAJ, Kuikman P J, Berendse K. The effect of living plants on root decomposition of four grass species. *Oikos*, 2002, 96(1): 36-45.
- [28] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 何淑勤, 文毅, 干晨兵. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 33-36.
- [29] Lipiec J, Medvedev V V, Birkas M, Dumitru E, Lyndina T E, Rousseva S, Fulajtar E. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 2003, 17(2): 61-69.
- [30] Bogner C, Wolf B, Schlather M, Huwe B. Analysing flow patterns from dye tracer experiments in a forest soil using extreme value statistics. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(1): 103-113.
- [31] Glab T. Impact of soil compaction on root development and yield of meadow-grass. *International Agrophysics*, 2013, 27(1): 7-13.
- [32] van Noordwijk M, Schoonderbeek D, Kooistra M J. Root-soil contact of field-grown winter wheat. *Geoderma*, 1993, 56(1/4): 277-286.
- [33] Shi Z J, Xu L H, Wang Y H, Jia Z Q, Guo H, Xiong W, Yu P T. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(39): 9350-9361.
- [34] Cannavo P, Michel J C. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae*, 2013, 151: 11-21.
- [35] Bengough A G. Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control of soil hydrology. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(2), doi: 10.2136/vzj2011.0111.
- [36] 毛伶俐. 生态护坡中植被根系的力学分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [37] Schenk H J. The shallowest possible water extraction profile: A null model for global root distributions. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7: 1119-1124, doi: 10.2136/vzj2007.0119.
- [38] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A, Safadoust A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1): 173-179.
- [39] Bogner C, Trancón y Widemann B, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering. *Ecological Informatics*, 2013, 15: 44-52.
- [40] 董宾芳. 黄土丘陵区林地植物根系与土壤优势流关系研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [41] Perillo C A, Gupta S C, Nater E A, Moncrief J F. Prevalence and initiation of preferential flow paths in a sandy loam with argillic horizon. *Geoderma*, 1999, 89(3/4): 307-331.
- [42] Devitt D A, Smith S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(1): 99-108.
- [43] Logsdon S D, Allmaras R R. Maize and soybean root clustering as indicated by root mapping. *Plant and Soil*, 1991, 131(2): 169-176.
- [44] Bouma J, Dekker L W. A case study on infiltration into dry clay soil. I. Morphological observations. *Geoderma*, 1978, 20(1): 27-40.
- [45] Vogel H J, Cousin I, Ippisch O, Bastian P. The dominant role of structure for solute transport in soil: experimental evidence and modelling of structure and transport in a field experiment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(4): 495-506.
- [46] Etana A, Larsbo M, Keller T, Arvidsson J, Schjønning P, Forkman J, Jarvis N. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma*, 2013, 192: 430-436.