

DOI: 10.5846/stxb201901150121

朱钊岑, 刘冰, 刘婵, 司瑞. 荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征. 生态学报, 2020, 40(12): 3979-3990.

Zhu Z C, Liu B, Liu C, Si R. Characteristics of preferential flow and water infiltration in desert oasis wetland. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 3979-3990.

荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征

朱钊岑^{1,2}, 刘冰^{1,*}, 刘婵^{1,2}, 司瑞^{1,2}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院中国生态系统网络陆河内河流域研究站, 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 地表水分、溶质和污染物以土壤优先流的形式下渗到深层土壤或地下水中, 将导致土壤养分流失与地下水污染等问题。因此, 土壤优先流研究将为干旱区荒漠绿洲湿地水分运移与盐分积累过程提供理论依据。以荒漠绿洲湿地为研究区, 选取柽柳灌丛、盐碱草地和杨树林, 以道路为对照, 采用室外染色示踪法对湿地土壤优先流特征与水分入渗进行研究。结果表明: 不同植被类型土壤优先流入渗深度存在显著差异, 其柽柳灌丛和盐碱草地几乎是杨树林和道的 2 倍; 染色面积比随深度的增加而波动下降, 0—20 cm 土层染色面积比占总染色面积的 54.42%—89.27%; 染色路径宽度以 20—250 mm 和 >250 mm 为主; 优先流类型以高相互作用混合流和非均质指流为主。在荒漠绿洲湿地, 砾石促进土壤优先流发生, 增加了侧向流; 同时, 粗根的减少抑制了优先流的发生; 此外, 土壤盐分通过影响土壤大孔隙分布而影响水分入渗过程。因此, 荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗差异是土壤质地、根系分布与盐分离子共同作用的结果。

关键词: 荒漠绿洲湿地; 土壤优先流; 染色示踪; 染色面积比; 染色路径

Characteristics of preferential flow and water infiltration in desert oasis wetland

ZHU Zhaoen^{1,2}, LIU Bing^{1,*}, LIU Chan^{1,2}, SI Rui^{1,2}

1 Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Network Research, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Surface moisture, solutes and pollutants infiltrate into deep soil or groundwater in the form of preferential flow, which will lead to soil nutrient loss and groundwater pollution. Therefore, the soil preferential flow study may provide a theoretical basis for the process of moisture transport and salt accumulation in the desert oasis wetland in arid areas. In this paper, *Tamarix chinensis*, Saline-alkali grassland and *Poplar* forest were selected as the study area in desert oasis wetland, and path were taken as control. The characteristics of soil preferential flow and moisture infiltration were studied by outdoor dyeing tracer method. The results showed that there was a significant difference in the infiltration depth of the soil between different vegetation types. The *tamarix chinensis* and saline-alkaline grassland were almost twice as large as that of *poplar* forest and path. The staining area ratio fluctuated with the increase of depth. The staining area in 0—20 cm soil layer accounted for 54.42%—89.27% of the total staining area. The dyeing path width was mainly 20—250 mm and > 250 mm. The preferential flow types is dominated by highly interacted macropore flow and heterogeneous figure flow. In desert oasis wetland, gravel promoted the occurrence of soil preferential flow and increased lateral flow. At the same time, the decrease of coarse roots inhibited the occurrence of preferential flow. In addition, soil salinity affects the process of water infiltration

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0504305-01); 国家自然科学基金项目 (41771038, 41807150)

收稿日期: 2019-01-15; 网络出版日期: 2020-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liubing@lzb.ac.cn

by affecting the distribution of soil macropores. Therefore, the difference between soil preferential flow and water infiltration in desert oasis wetland is the result of soil texture, root distribution and salt segregation.

Key Words: desert oasis wetland; preferential flow; tracer experiments; stained area ratio; stained path

湿地是水陆相互作用的自然综合体,具有丰富的生物多样性与独特的生态格局^[1-3]。尽管干旱区湿地面积较小且在空间分布上呈明显的不连续状,但其作为荒漠绿洲的组成部分和重要水源,对维持干旱区生态平衡和生态系统稳定具有重要作用^[4]。在荒漠绿洲湿地,水文条件在湿地形成、发展和衰亡整个过程中起着主导作用^[5]。在干旱区,降水稀少,地下水和河流侧渗水是荒漠绿洲湿地的重要水分来源,河流径流变化与地下水位的波动,导致干旱区湿地存在干湿交替的季节性变化与积盐、洗盐过程的周期性^[6],同时,受植物根系与动物活动等影响,土壤大孔隙在干旱区湿地广泛存在^[7]。当降水发生时,土壤大孔隙作为地表水分、溶质快速入渗的通道,从而形成土壤优先流,使水分、溶质和污染物快速入渗到深层土壤和地下水中,导致水分、养分流失以及地下水污染风险增大^[8-11]。同时,土壤大孔隙使盐分与土壤接触面积减小,降低了盐分运移过程中土壤吸附比例,致使土壤盐分含量降低^[12]。因此,对荒漠绿洲湿地土壤优先流研究能为干旱区湿地水分运移与盐分累积过程提供理论依据。

土壤空间异质性是导致土壤优先流的主要原因。尽管优先流路径占土壤体积的比例极小,但其水流速度为均质土壤的 4—18 倍^[13],且大多数土壤饱和入渗量都是通过优先流而传导^[14],同时土壤优先流对深层土壤水分补给具有重要作用^[15]。目前,国内外关于土壤优先流的研究方法有很多种^[8-11],其中染色示踪法具有直观、高可视度等优点被广泛应用到土壤水分入渗的研究中。目前,众多学者结合染色示踪与土壤剖面染色图像处理在不同研究区域对不同类型土壤优先流与水分下渗及其影响因素进行了大量研究^[15-20]。在干旱区,土壤优先流的研究主要侧重于绿洲农田和荒漠植被,以揭示土壤优先流对深层土壤水分和地下水补给的水文效应^[7]。在荒漠绿洲湿地,较浅地水位的波动导致土壤盐分不断富集,植物群落优势种群结构由物种丰富的淡水群落向物种匮乏的耐盐性群落过渡^[6],荒漠绿洲湿地物种组成、群落结构的复杂性导致土壤优先流与水分入渗具有较强的空间异质性和不确定性。然而,荒漠绿洲湿地植物物种组成、群落结构及其植物根系分配对土壤优先流与水分入渗的影响机制与反馈机理的定量研究仍是薄弱环节,使得难以反映出真实的水分入渗和溶质迁移过程。因此,以黑河中游荒漠绿洲湿地怪柳灌丛、盐碱草地、杨树林为研究对象,以泥质道路为对照,通过野外染色示踪实验和室内样品分析等方法,研究不同植被类型的土壤水分入渗与染色特征差异,探讨土壤优先流分布特征与水分入渗过程的影响机制,将为干旱区湿地水盐运移模型与盐碱化治理提供参考依据。

1 实验与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑河中游张掖湿地保护区临泽县境内(100°06'E,39°19'N),海拔 1420 m,是典型的荒漠绿洲湿地。该研究区属典型的温带干旱气候,年均降水量为 116.8 mm,65%的降雨发生在 6—9 月,年均温 7.6℃,平均日照时数为 3051 h,年均蒸发量 2390 mm,干旱指数 20.5^[21]。土壤由冲积沉积形成,母质为河流洪积物,土壤质地以粉壤为主,上层土壤结构发育较好,下层土壤仍以砂质为主,土壤结构较差。水分来源包括降水、地下水、河水侧向补给和农田灌溉回归水,其中以地下水和河流侧向补给为主。经过长期的演替与人为干扰,形成了众多的天然植被和人工植被,如冰草(*Agropyron cristatum*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、海乳草(*Glaux maritima*)、芦苇(*Phragmites australis*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、胡杨(*Populus euphratica*)、白杨(*Populus alba*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 染色示踪实验

在研究区内,分别选择具有代表性的盐碱草地、柽柳灌丛、杨树林(10年生),以对下垫面土壤、水文特征^[22]和景观空间格局与过程有显著影响^[23]的人为踩踏泥质道路作为对照,可消除植被对土壤优先流与水分入渗的影响。在试验样地内,选择地形平整、植被均匀且周边植株数量基本一致的样地作为试验点。在试验点,首先将试验点内土体表层的枯枝、砾石移除,并将植被的地上部分用剪刀小心移除。其次,将长1.2 m、宽1 m的矩形铁皮框垂直砸入土体内20 cm,同时用小锤将靠近铁框内壁3 cm的土壤夯实,防止染料沿铁框内壁缝隙下渗。然后,将配好的5 g/L的亮蓝溶液60 L均匀喷洒在矩形框内的土体表面,待喷洒完毕后,用塑料膜将铁框覆盖,确保无降水等其他水分进入,同时减少蒸发^[24-25]。在染色24 h后,将矩形铁皮框小心移除,在框内中心部分以10 cm为间距垂直挖掘土壤剖面,每个剖面修整完毕后放置标尺并用数码相机进行拍照^[26]。

1.2.2 样品采集与土壤物理性质测定

在染色剖面挖掘完毕后,沿土壤剖面以20 cm为间距采集5个环刀样与散土样;样品采集深度为染色深度。利用环刀样测定土壤饱和导水率和容重;散土样测定土壤机械组成(表1)。其中,饱和导水率用定水头法测定,容重用烘干法测定,土壤机械组成用激光粒度仪MS 2000测定,此外,在研究期间(2016年4月—2017年10月),在染色示踪试验点每10日沿土壤剖面以10 cm间距采集土壤样品,在实验室通过1:5水土比测定土壤电导率(RJM/SDB-6型数字温度电导率仪),同时采用称重法测定道路土壤砾石含量。

同时,沿土壤剖面以长20 cm、宽20 cm、高10 cm为单位挖掘土体以采集0—80 cm根系,将根系洗净后依据直径分为粗根(直径>2 mm)和细根(直径≤2 mm),之后烘干至恒重,测定土壤剖面不同土层根系生物量密度(图1)。

表1 土壤物理性质
Table 1 Soil property

植被类型 Vegetation farm	土壤深度 Depth/cm	机械组成 Mechanical composition/%			饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (cm/h)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)
		粘粒 Clay (<2 μm)	粉粒 Silt (2—50 μm)	砂粒 Sand (50—2000 μm)		
柽柳灌丛 <i>Tamarix chinensis</i>	0—20	3.29±0.41	33.91±1.87	62.80±2.86	2.23±1.87	1.27±0.05
	20—40	6.15±1.05	68.44±3.02	25.41±1.47	1.20±0.87	1.29±0.03
	40—60	1.09±1.28	11.72±1.20	87.19±2.84	0.29±0.18	1.36±0.01
	60—80	0.02±0.01	3.83±2.14	96.15±1.83	6.20±0.49	1.38±0.02
盐碱草地 Saline-alkali grassland	0—20	4.85±1.54	61.77±2.11	33.38±3.58	1.54±0.23	1.30±0.09
	20—40	6.08±1.10	82.77±2.93	11.15±0.49	1.45±0.99	1.36±0.04
	40—60	0.68±0.37	7.14±0.52	92.18±2.08	2.00±0.30	1.35±0.03
	60—80	0.18±0.08	3.92±1.62	95.90±1.95	1.57±1.15	1.38±0.04
杨树林 <i>Poplar forest</i>	0—20	0.98±0.10	6.46±1.35	92.56±5.84	2.78±0.44	1.42±0.01
	20—40	1.04±0.48	7.39±3.29	91.57±2.29	1.82±0.54	1.48±0.03
道路 Path	0—20	1.68±1.02	15.18±0.83	83.14±3.17	0.27±0.25	1.50±0.04
	20—40	8.33±0.85	88.26±0.87	3.41±0.52	0.44±0.13	1.45±0.05

1.2.3 图像处理与数据分析

参照 Janssen 和 Lennartz^[27]染色图像处理方法,首先利用 Photoshop 将染色图像进行校正、裁剪,然后利用 Image 对裁剪后的图像进行二值化处理,最后将二值化图像用 Matlab 分析,得到染色面积比和染色路径等水流形态学参数。其中,染色面积比为土壤剖面内染色面积占整个土壤剖面面积的百分比。染色路径包括染色路径数和染色路径宽度,染色路径数指垂直土壤剖面图像中,每行像元中所有染色路径的数量;染色路径宽度指每条染色路径所对应的实际土壤宽度。结合染色路径数和染色路径宽度可表征优先流的连通性和分支性。染色路径数的增大伴随着染色路径宽度的降低,表征土壤优先流具有更多的分支,土壤水分入渗以低相交互

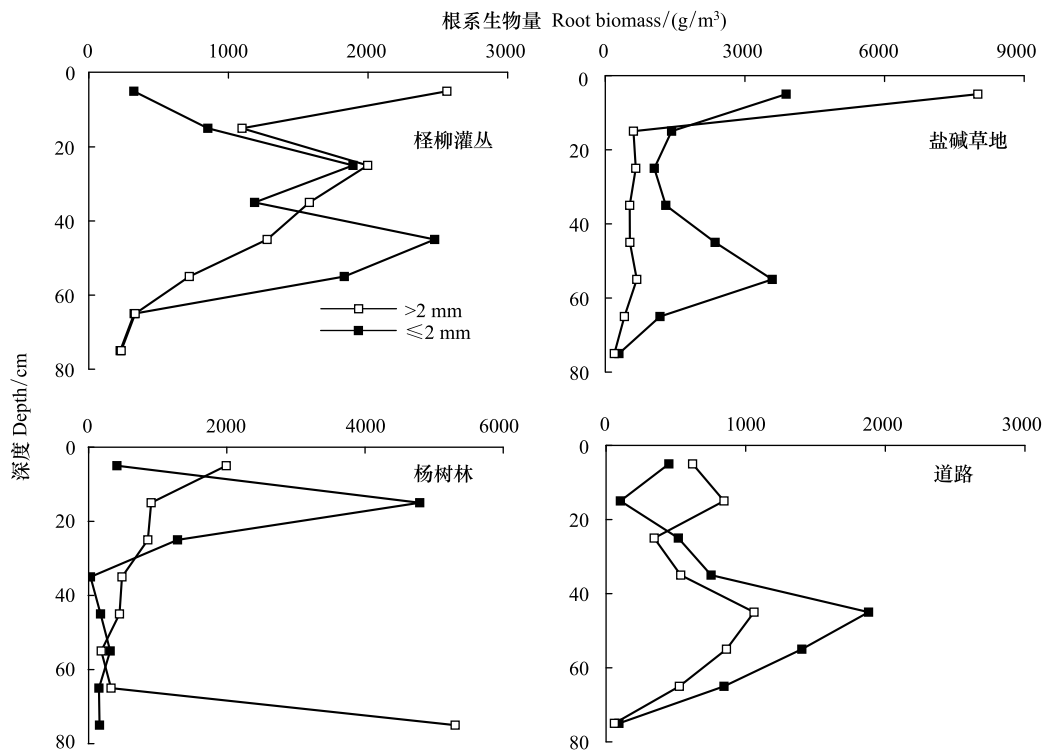


图1 根系生物量分布
Fig.1 Root Biomass Distribution

用混合流为主;反之,染色路径数的减少伴随着染色路径宽度的增大,表征土壤优先流连通性更好,土壤水分入渗以均质流或高相互作用混合流为主^[26]。结合土壤质地与实际染色状况,参照 Weiler 和 Flühler^[28] 的土壤优先流类型分类标准,确定荒漠绿洲湿地土壤染色路径宽度划分标准为<20 mm、20—250 mm 和>250 mm (表 2)。

表 2 土壤优先流分类标准
Table 2 Criteria for classification of preferential flows

优先流类型 Type of preferential flow	染色流态 Pattern of dyed flow	染色路径宽度百分比率 Ratio of staining path width	
		<20 mm	>250 mm
均质流 Homogeneous flow		<20%	>60%
非均质指流 Heterogeneous figure flow		<20%	30%—60%
高相互作用混合流 Highly interacted macropore flow		<20%	<30%
低相互作用混合流 Poorly interacted macropore flow		>50%	>20%
混合作用大孔隙流 Mixed macropore flow		20%—50%	<20%

本文垂直剖面染色数据(染色面积比、染色路径数和染色路径宽度)和土壤优先流类型均采用土壤垂直剖面染色图像的均值。染色路径数与染色面积比和染色路径宽度,根系与染色面积和染色路径的相关性分析采用 SPSS 22.0 进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤优先流分布特征

在荒漠绿洲湿地,对各种植被类型土壤剖面的染色图像进行研究(图 2),黑色代表染色区域。在不同植被类型中,土壤优先流染色深度存在显著差异,怪柳灌丛和盐碱草地水流入渗深度较深,杨树群落和道路较浅。盐碱草地 0—40 cm 染色呈均匀分布,其余试验点均出现不同程度的分支;怪柳灌丛呈现连续均匀和狭长的两个分支;杨树群落 0—18 cm 染色均匀分布,18 cm 以下呈现连续均匀的两个分支;道路土壤呈现连续均匀但染色深度差异极大的两个分支。

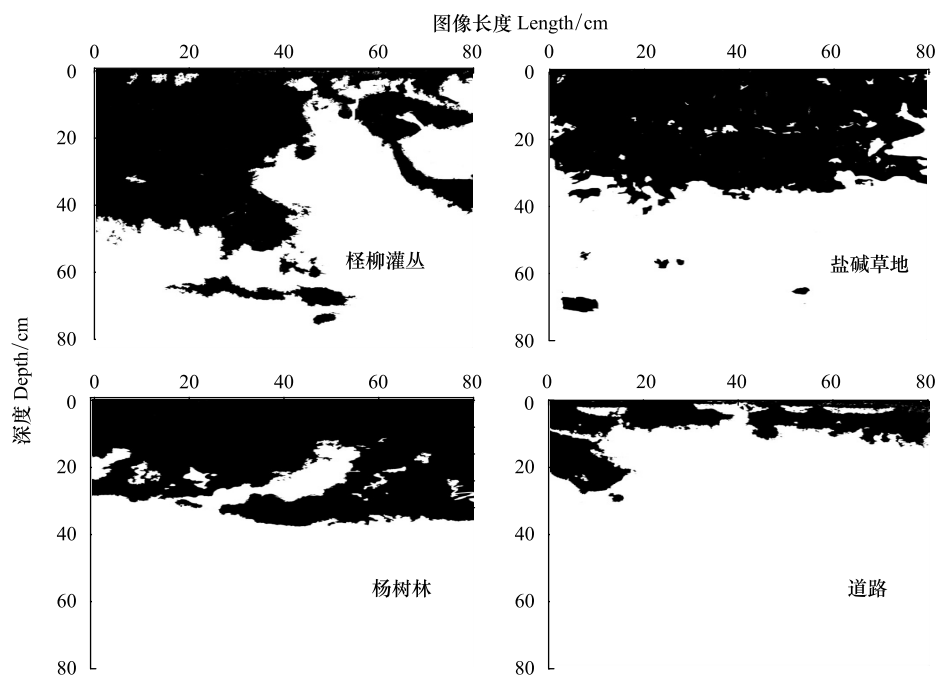


图 2 优先流垂直分布图像

Fig.2 Vertical distribution of preferential flow

2.2 土壤染色面积比

在荒漠绿洲湿地,0—80 cm 土壤剖面总染色面积比的最大值为盐碱草地(39.54%),其次为怪柳灌丛(37.21%)、杨树群落(30.20%)和道路(16.37%)(图 3)。土壤剖面染色深度顺序为怪柳灌丛(74 cm)>盐碱草地(72 cm)>杨树群落(39 cm)>道路(38 cm)。

在各种植被类型中,不同深度土层的土壤染色面积比存在显著差异(图 3,表 3)。在 0—20 cm 土层,染色面积比均随深度增加而下降,其中道路下降幅度达 40.58%—81.85%,其次顺序为杨树群落(19.01%—79.28%)、怪柳灌丛(25.25%—35.47%)和盐碱草地(6.02%—24.24%)。在 20—40 cm 土层,杨树群落和道路土壤染色面积急剧下降,分别在 39 cm 和 38 cm 处完全消失;盐碱草地下降幅度(81.17%—97.03%)大于怪柳灌丛(7.36%—74.31%),且盐碱草地染色区域急剧减少主要位于 30—40 cm 土层。在 40 cm 土层以下,怪柳灌丛和盐碱草地染色区域总体呈下降趋势,但是部分土层出现显著增加。其中,60—67 cm 土层怪柳灌丛染色面积显著增加,染色面积比达 32.80%;盐碱草地则在 50—53 cm、65—72 cm 重新出现染色区域。

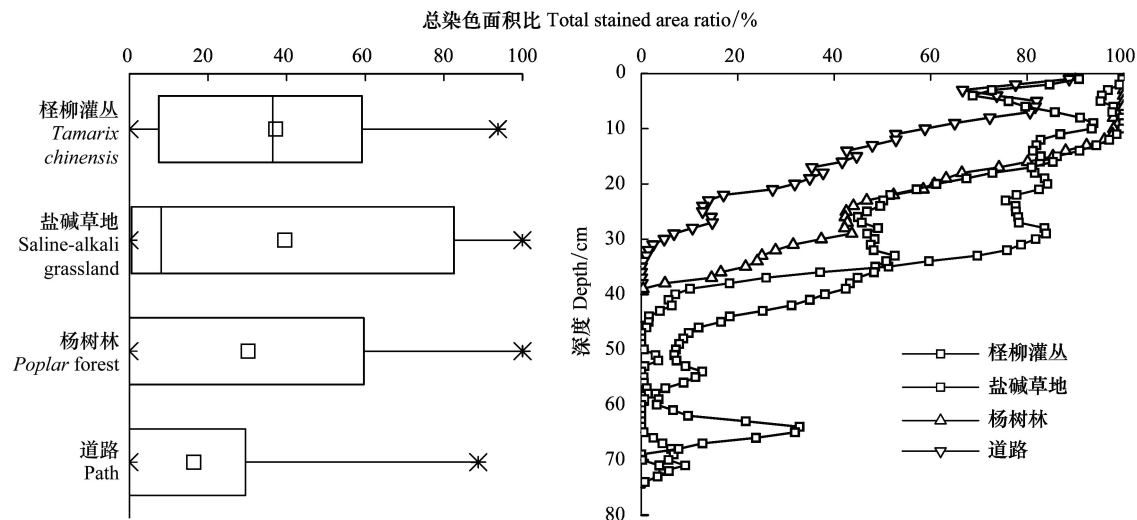


图3 土壤剖面不同位点染色面积比
Fig.3 Stained area ratio of the vertical profiles

表3 不同深度土层染色图像形态学参数

Table 3 Morphological parameters of the dye tracer image relative at the different soil layer						
采样区 Sampling area	染色深度 Depth/cm	染色面积比 Stained area ratio/%	染色路径数 Stained path number	染色路径宽度 Stained path width/%		
				<20 mm	20—250 mm	>250 mm
桤柳灌丛 <i>Tamarix chinensis</i>	0—20	80.99	12	4.70 **	29.07 **	47.22 **
	20—40	47.72	8	3.11 **	20.97	23.64 **
	40—60	12.10 **	5	2.12 **	7.88 **	2.10 **
	60—74	11.45 **	4	1.12 **	10.33 **	0
盐碱草地 Saline-alkali grassland	0—20	93.08 **	5	1.08 **	26.53 **	65.47 **
	20—40	61.52	7	2.39 **	27.64 *	31.49 **
	40—60	1.60 **	2	0.71 **	0.89 **	0
杨树林 <i>Poplar forest</i>	60—72	3.29 **	2	0.39 **	2.90 **	0
	0—20	89.87 **	4	1.59 **	20.27 **	68.00 **
	20—39	32.55 **	5	2.30 **	25.96 **	4.29 *
道路 Path	0—20	58.46	10	2.93 **	38.14 **	17.39
	20—38	7.81 **	3	0.55 **	6.47 **	0.79

* 和 ** 分别表示染色路径数与染色面积比、染色路径宽度在 0.05 和 0.01 水平上的显著相关

随土壤深度的增加,不同植被类型土壤剖面染色面积比波动变异程度均呈现先增大再减小的趋势,但波动变异程度存在显著差异(图4)。总体上,道路>杨树群落>盐碱草地>桤柳灌丛;其中土壤染色面积波动较大的土层分别为,桤柳灌丛24 cm以下,盐碱草地19—32 cm,杨树群落16 cm以下和道路5 cm以下。

2.3 染色路径数和染色路径宽度

湿地不同植被类型土壤剖面染色路径数均随土壤深度的增加而逐渐降低,但最大染色路径数及其出现深度存在较大差异(图5)。在土壤剖面染色深度内,平均染色路径数为灌丛(6.61)>道路(5.61)>白杨林(3.40)>草地(3.36)。桤柳灌丛和道路染色路径数最大值均出现在表层土壤,随土壤深度增加,总体上剖面染色路径数变化规律表现为持续降低的趋势;盐碱草地和杨树群落最大值出现在中层土壤,其变化规律表现为先增加再降低。

染色路径宽度显示,土壤优先流染色路径以20—250 mm和>250 mm为主,占剖面总染色面积的92.79%—97.21%;除道路外,>250 mm染色区域均大于20—250 mm(图6)。不同植被类型相同深度土层染

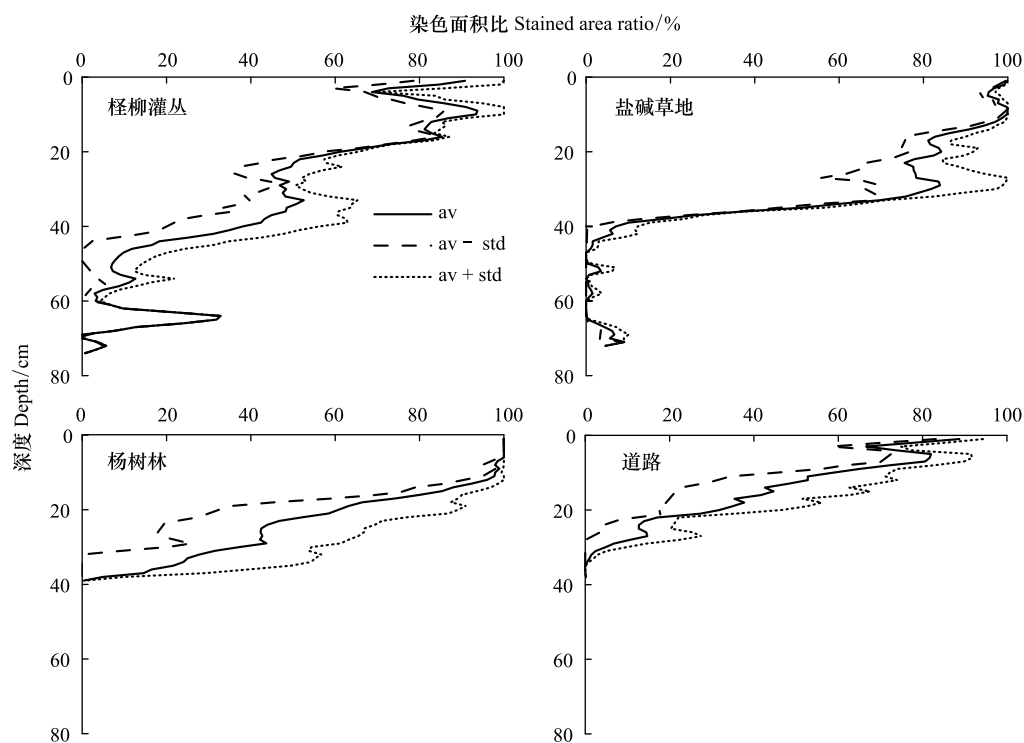


图 4 土壤剖面平均染色面积变化

Fig.4 Average stained area ratio of the vertical profiles

av: 平均值 Average value; std: 标准差 Standard deviation

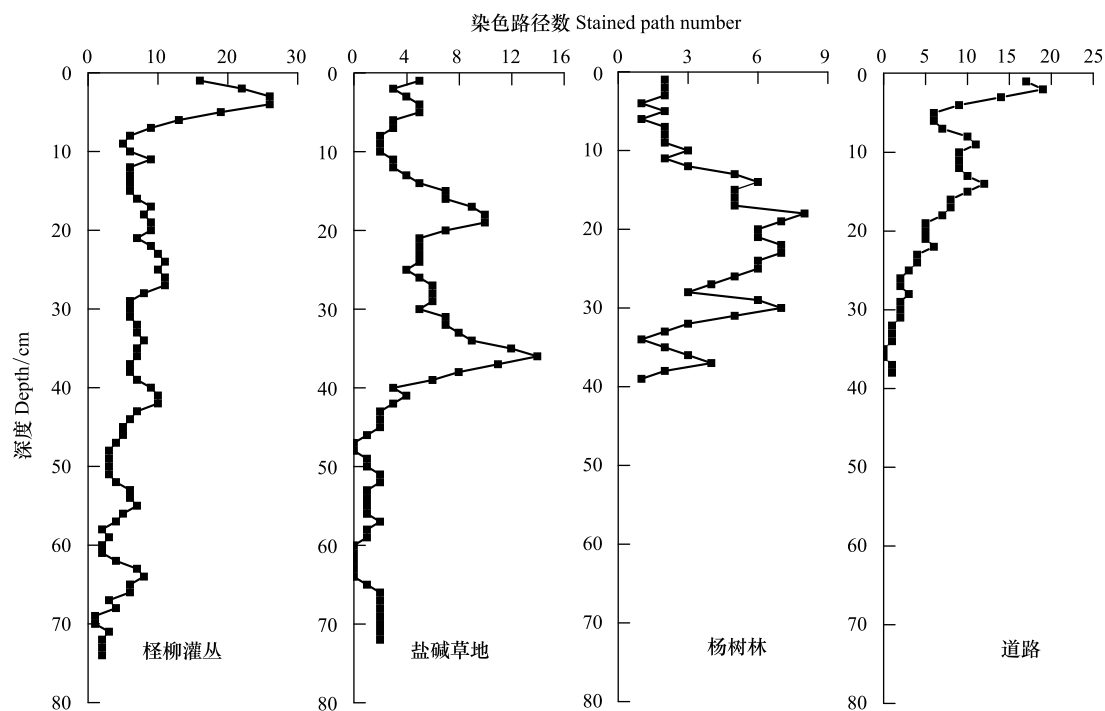


图 5 土壤剖面不同位点染色路径数

Fig.5 Stained path number of the vertical profiles

色路径宽度存在较大差异,染色区域主要集中于0—20 cm 土层,占剖面总染色面积比的54.42%—89.27%;除道路染色路径宽度主要为20—250 mm 外,其余均以>250 mm 为主,且<20 mm 染色区域占比较低(1.08%—4.70%)。20—40 cm 土层,杨树群落和道路以20—250 mm 为主,而桤柳灌丛和盐碱草地以20—250 mm 和>250 mm 为主。在40 cm 以下土层,桤柳灌丛和盐碱草地以20—250 mm 为主,但桤柳灌丛仍有>250 mm 染色区域出现。

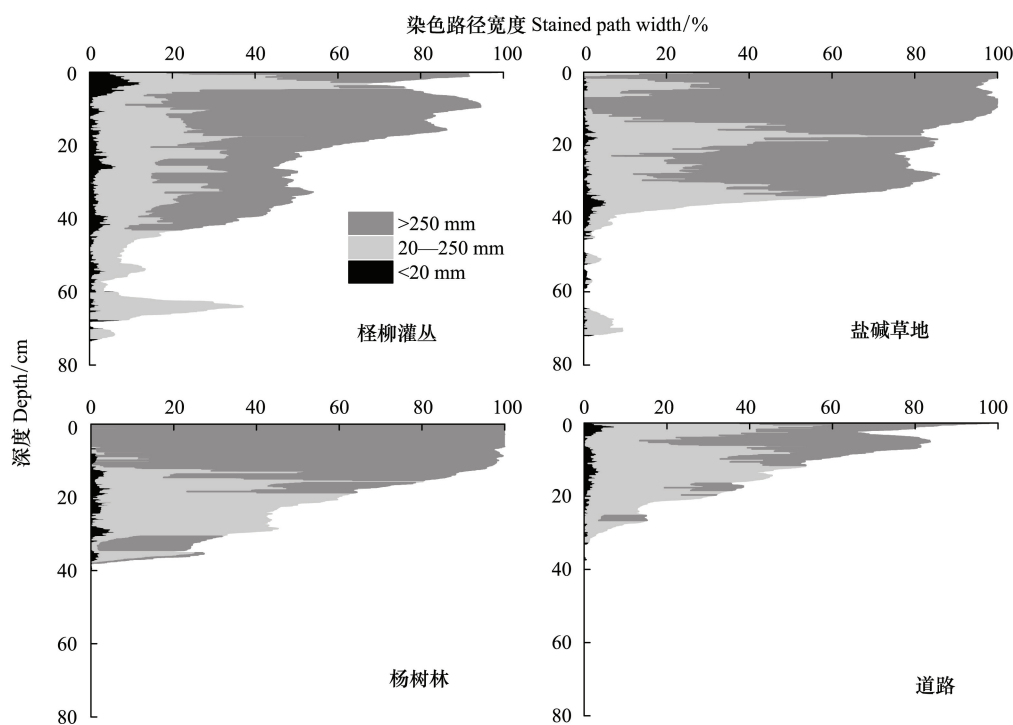


图6 土壤剖面不同染色路径宽度分布

Fig.6 Stained path width of the vertical profiles

2.4 土壤优先流类型

结合染色路径宽度和土壤优先流分类标准,不同植被类型土壤水流类型呈现明显优先流特征,整体上为非均质指流—高相互作用大孔隙流(图7)。除道路外,其他植被群落均出现均质流,但均质流强度存在明显差异,杨树群落(0—19 cm)>盐碱草地(0—14 cm)>桤柳灌丛(6—16 cm)。同时除杨树群落外,不同植被类型均存在非均质指流,其分布范围存在显著差异,灌丛分布于0—2 cm 和16—21 cm,草地分布于14—34 cm,道路分布于0—10 cm。高相互作用混合流除桤柳灌丛在上层土壤2—5 cm 有分布外,其余均分布于下层土壤。

3 讨论

3.1 湿地不同植被类型对水分入参与染色分布特征的影响

染色示踪剂能提供水分在土壤中分布状况的视觉信息^[20],通过反映水分入参与染色分布以揭示湿地土壤优先流分布特征。在荒漠绿洲湿地,不同植被类型土壤容重、质地、孔隙度、根系及生物活动等存在的显著差异性^[7-11],显著影响湿地水分入渗过程与染色分布特征。在荒漠绿洲湿地,尽管乔木比草地能更有效的垂直向下传递水分^[29],但是盐碱草地染色深度为杨树群落的1.85倍,同时盐碱草地染色面积最大。然而,这与Alaoui等^[29]关于森林与草地的研究结果不一致,因为在他们的试验点土壤粘粒含量较高、结构较紧实,粘土延迟了水分进入大孔隙的过程,减少了优先流的发生。在荒漠绿洲湿地,土壤粘粒含量较少,砂粒含量极高,且结构较松散(表1),水流进入大孔隙的时间较短;同时,砂土对优先流的发生有一定的促进作用^[20]。尤其

是杨树群落砂粒含量 $>90\%$,水分入渗过程中各水流通道距离较近且通道宽度相近,导致其水分入渗过程中均质流(0—19 cm)占比较大,染色路径以 >250 mm 为主。此外,怪柳灌丛与盐碱草地土壤质地相近且二者染色面积相近,但怪柳灌丛染色深度比盐碱草地大,表明怪柳灌丛水分垂直向下传递效率较盐碱草地高,与 Mei 等^[20]研究结果相符。因此,土壤异质性是形成优先流的根本原因。

研究表明砾石与土壤间的缝隙为土壤优先流能提供快速入渗的通道^[19],并通过改变土壤孔隙密度、半径与孔隙间的联通性将对土壤水分入渗的产生重要的影响^[30-31]。在荒漠绿洲湿地,道路 0—20 cm 土层砾石含量达 14.65%,导致道路 0—20 cm 染色路径数增多(图 5),染色路径以 20—250 mm 为主(图 6),没有均质流发生(图 7);同时,砾石促进侧向水流增加,导致 >250 mm 染色区域出现。然而,怪柳灌丛、盐碱草地和杨树林地砾石含量均低于 2%,染色路径数减小,染色路径宽度 >250 mm 的分布区域较多,土壤均质流分布范围较大。因此,砾石促进荒漠绿洲湿地土壤优先流发生,提高了水流通道的连通性,增加了侧向流。

3.2 荒漠绿洲湿地根系、土壤盐分对土壤优先流的影响

在荒漠绿洲湿地,植物根系能为土壤中水和空气提供储存空间^[32],其分布方式影响着土壤孔隙度、导水率和容重等土壤物理性质^[33],改变土壤空间异质性。同时,水分可以通过根系与周边土壤的非均质界面快速向下运动,对优先流的产生具有重要作用^[15,31]。怪柳灌丛细根比盐碱草地少,但下层土壤粗根较多(图 1),因此其水流通道连通性比盐碱草地差,但下层土壤水流通道较多,导致在 0—40 cm 土壤中盐碱草地染色区域较大;40 cm 以下土壤怪柳灌丛染色区域较多且染色深度较大(表 3)。

在荒漠绿洲湿地,灌丛细根生物量与染色路径数量和染色路径宽度 <20 mm 的染色面积呈极显著正相关($P<0.01$),相关性系数为 0.913 和 0.898;草地细根生物量与染色路径宽度 >250 mm 的染色面积呈现显著正相关($P<0.05$),相关性系数为 0.737;其余根系生物量与染色面积、染色路径数量和染色路径宽度的相关性均不显著(表 4)。表明细根较粗根在荒漠绿洲湿地水分入渗过程中具有更重要作用。其主要原因是水分通过土壤孔隙运动的作用力主要是重力和类似于毛管力的一种吸附力^[34]。细根在水分运动中能起到类似毛管的作用^[32],可以使水分逐渐向细根分布区运动,因此在水分入渗过程中细根比粗根具有更重要的作用。

然而,许多研究认为植物根系与染色面积、染色路径呈现显著正相关关系^[18, 35]。例如,刘目兴和杜文正^[18]及田香姣等^[35]实验地点位于亚热带季风湿润山地,植被为常绿阔叶林,根系分布广泛且以粗根为主,土壤粘粒含量较荒漠绿洲湿地高、结构较好,土壤空间异质性较大,增加了根系对优先流的影响。然而,在荒漠绿洲湿地,地下水埋深较浅,土壤盐渍化严重(图 8),植被生长受到严重的盐分胁迫^[36],从而粗根所占比例减小(图 1),导致土壤优先流减小。同时,湿地土壤砂粒含量较高,土壤结构较松散,水分下渗通道多且连通性好,减弱了根系对水分入渗的影响。因此,在荒漠绿洲湿地,土壤优先流与水分入渗差异是土壤质地、根系分布与盐分离子共同作用的结果。

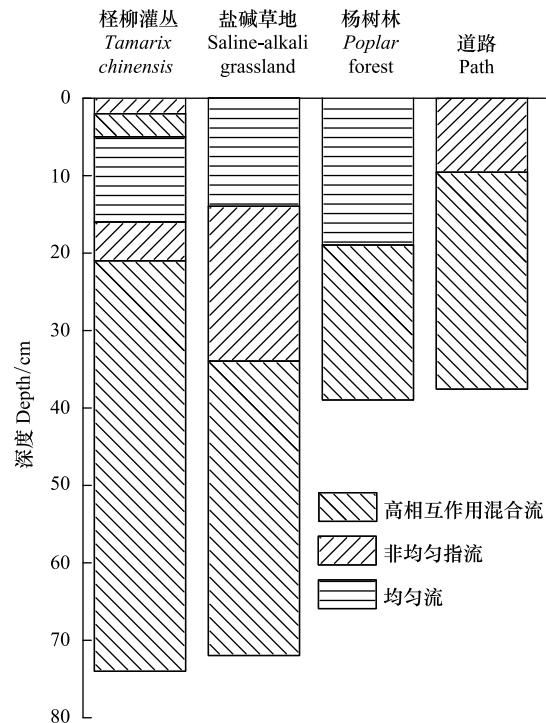


图 7 土壤优先流类型

Fig.7 Type of preferential flow

表 4 根系生物量与染色面积、染色路径数量和染色路径宽度的相关分析

Table 4 Correlation analysis of root biomass and stained area, stained path number, stained path width						
采样区 Sampling area	分析参数 Analysis parameter	染色面积 Stained area	染色路径数 Stained path number	染色路径宽度 Stained path width		
				<20 mm	20—250 mm	>250 mm
怪柳灌丛 <i>Tamarix chinensis</i>	总根系生物量	0.118	0.337	0.380	0.094	0.100
	粗根生物量	-0.485	-0.387	-0.316	-0.557	-0.442
	细根生物量	0.703	0.913 **	0.898 **	0.747	0.629
盐碱草地 Saline-alkali grassland	总根系生物量	0.467	-0.086	-0.229	-0.063	0.650
	粗根生物量	0.143	-0.232	-0.234	-0.267	0.314
	细根生物量	0.570	-0.006	-0.201	0.042	0.737 *
杨树林 <i>Poplar forest</i>	总根系生物量	0.632	0.519	0.419	0.541	0.273
	粗根生物量	0.375	0.665	0.603	0.660	-0.020
	细根生物量	0.860	-0.489	-0.615	-0.398	-0.921
道路 Path	总根系生物量	-0.227	-0.314	-0.302	-0.399	0.041
	粗根生物量	-0.539	-0.687	-0.738	-0.792	-0.097
	细根生物量	0.496	0.611	0.689	0.0671	0.162

* 和 ** 分别代表在 0.05 和 0.01 水平上显著相关

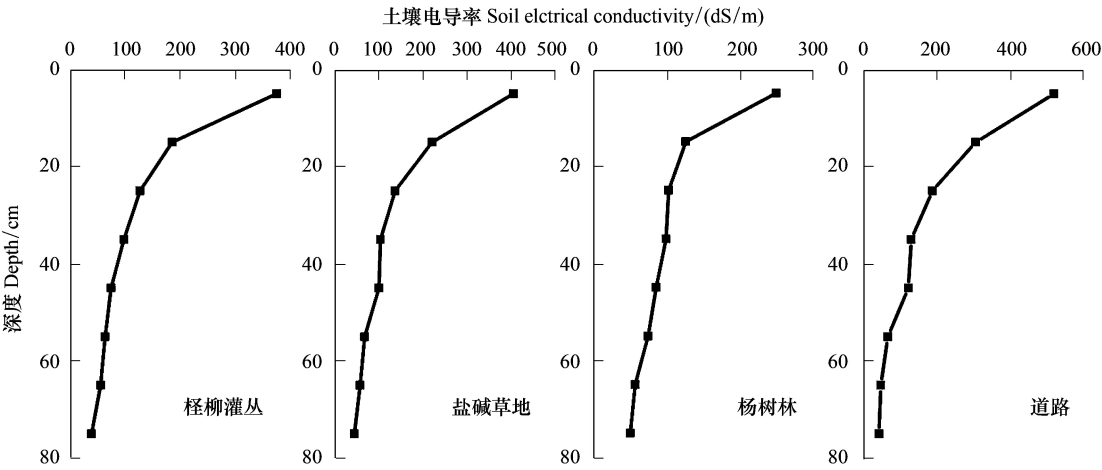


图 8 不同位点土壤电导率平均值
Fig.8 The average value of soil electrical conductivity

在荒漠绿洲湿地,除染色路径数和染色路径宽度 20—250 mm 呈正相关外,其余指标均与土壤电导率呈现负相关(表 5)。因为水是土壤盐分运移的载体,盐分运移通道与水流通路基本一致^[37],表现为土壤电导率与染色路径数的变化趋势一致。此外,土壤盐碱化导致土壤板结,土壤水流通路直径减少,从而使土壤小孔隙(<20mm 染色路径宽度)与土壤大孔隙(>250mm 染色路径宽度)数量减少,导致土壤优先流以 20—250 mm 为主。与此同时,土壤板结致使水流面积减小,相应地染色面积随之减小,表现为土壤电导率与土壤染色面积呈现负相关。因此,在荒漠绿洲湿地,土壤盐分通过影响土壤大孔隙分布而影响土壤优先流与水分入渗过程。

表 5 土壤电导率与染色面积、染色路径数量和染色路径宽度的相关分析

Table 5 Correlation analysis of soil electrical conductivity and stained area, stained path number, stained path width					
	染色面积 Stained area	染色路径数 Stained path number	染色路径宽度 Stained path width		
			<20 mm	20—250 mm	>250 mm
土壤电导率 Soil electrical conductivity	-0.485	0.279	-0.235	0.540	-0.699

4 结论

通过室外染色示踪实验研究荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征,得出以下结论:(1)在荒漠绿洲湿地,土壤优先流有土壤基质、植物根系与盐离子共同影响,但土壤本身的物理性质是根本因素。(2)均质流在不同植被类型的水分入渗过程中广泛存在,砾石通过促进水流通道的连通性,显著增加侧向流,促进了土壤优先流的发生。(3)植物根系与染色特征相关性不显著,粗根的减少抑制了优先流的发生。

参考文献(References):

- [1] 殷康前,倪晋仁. 湿地研究综述. 生态学报, 1998, 18(5): 539-546.
- [2] Mitsch W J. Wetland creation, restoration, and conservation: a wetland invitational at the Olentangy River Wetland Research Park. *Ecological Engineering*, 2005, 24(4): 243-251.
- [3] 猴倩倩,屈建军,王国华,肖建华,庞营军. 中国干旱半干旱地区湿地研究进展. 干旱区研究, 2015, 32(2): 213-220.
- [4] 章光新,武瑶,吴燕锋,刘雪梅. 湿地生态水文学研究综述. 水科学进展, 2018, 29(5): 737-749.
- [5] 赵贤豹. 湿地生态系统水文连接度研究[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2008.
- [6] Liu B, Zhao W Z, Wen Z J, Zhang Z H. Response of water and energy exchange to the environmental variable in a desert-oasis wetland of Northwest China. *Hydrological Processes*, 2014, 28(25): 6098-6112.
- [7] 张勇勇,富利,赵文智,闫加亮. 荒漠绿洲土壤优先流研究进展. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1189-1195.
- [8] 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.
- [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] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,赵传普,张少妮. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势. 生态学报, 2014, 34(11): 2801-2811.
- [11] 张中彬,彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展. 土壤学报, 2015, 52(3): 477-488.
- [12] 梁建宏. 典型亚高山森林土壤优先流路径特征与溶质运移[D]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [13] 程金花,张洪江,史玉虎,程云. 长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的作用. 水土保持通报, 2007, 27(2): 18-23, 42-42.
- [14] 李伟莉,金昌杰,王安志,裴铁璠,关德新. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2179-2184.
- [15] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, Lin H. Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133-1144.
- [16] Kulli B, Gysi M, Flühler H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil and Tillage Research*, 2003, 70(1): 29-40.
- [17] 盛丰,方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究. 土壤, 2012, 44(1): 144-148.
- [18] 刘目兴,杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究. 土壤学报, 2013, 50(5): 871-880.
- [19] Laine-Kaulio H, Backnäs S, Koivusalo H, Laurén A. Dye tracer visualization of flow patterns and pathways in glacial sandy till at a boreal forest hillslope. *Geoderma*, 2015, 259-260: 23-34.
- [20] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, Zhang D, Wang Y, Hao W J. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [21] Zhao W Z, Liu B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(9): 1297-1306.
- [22] 史志华,陈利顶,杨长春,闫峰陵,彭业轩. 三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验. 生态学报, 2009, 29(12): 6785-6792.
- [23] 宗跃光,周尚意,彭萍,刘超,郭瑞华,陈红春. 道路生态学研究进展. 生态学报, 2003, 23(11): 2396-2405.
- [24] 陈晓冰,张洪江,李世友,张福明,程金花,魏伟虎,田香姣. 紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素. 中国水土保持科学, 2014, 12(6): 42-49.
- [25] 王赵男,辛颖,赵雨森. 黑龙江省水源地优先流区与基质流区土壤特性分析. 水土保持学报, 2017, 31(1): 49-54.
- [26] 李胜龙,易军,刘目兴,张君,杨燕,张海林. 稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究. 土壤学报, 2018, 55(5): 1131-1142.
- [27] Janssen M, Lennartz B. Characterization of preferential flow pathways through paddy bunds with dye tracer tests. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1756-1766.
- [28] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137-153.
- [29] Alaoui A, Caduff U, Gerke H H, Weingartner R. A preferential flow effects on infiltration and runoff in grassland and forest soils. *Vadose Zone*

- Journal, 2011, 10(1): 367-377.
- [30] Alaoui A, Lipiec J, Gerke H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115-116: 1-15.
- [31] Dadkhah M, Gifford G F. Influence of vegetation, rock cover, and trampling on infiltration rates and sediment production. *Journal of the American Water Resources Association*, 1980, 16(6): 979-986.
- [32] Jiang X J, Liu W J, Chen C F, Liu J Q, Yuan Z Q, Jin B C, Yu X Y. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China. *Geoderma*, 2018, 320: 161-171.
- [33] Barzegar A R, Yousefi A, Daryashenas A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil*, 2002, 247(2): 295-301.
- [34] Gardner W H. How water moves in the soil. *Crops Soils*, 1979, 32(2): 13-18.
- [35] 田香姣, 程金花, 杜士才, 李乾坤, 张欣, 魏虎伟. 2 种土地利用方式下的优先流特征. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 37-41.
- [36] Li H J, Yi J, Zhang J G, Zhao Y, Si B C, Hill R L, Cui L L, Liu X Y. Modeling of soil water and salt dynamics and its effects on root water uptake in Heihe Arid Wetland, Gansu, China. *Water*, 2015, 7(5): 2382-2401.
- [37] Zhao X M, Xia J B, Chen W F, Chen Y P, Fang Y, Qu F Z. Transport characteristics of salt ions in soil columns planted with *Tamarix chinensis* under different groundwater levels. *PLoS One*, 2019, 14(4): e0215138.