

浑河源头水源涵养林土壤优先流特征

吕刚¹, 金兆梁¹, 凌帅², 李叶鑫¹, 翟景轩³,
王韞策⁴, 郑洋¹, 杜昕鹏¹, 董亮¹

(1.辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁, 阜新 123000; 2.辽宁省实验林场, 辽宁 清原 113311;
3.杭州大地科技有限公司, 杭州 310004; 4.北京林丰源生态环境规划设计院有限公司, 北京 100089)

摘要:以浑河源头4种类型水源涵养林为研究对象,采用野外染色示踪和室内理化分析等研究方法,研究不同水源涵养林土壤优先流的形态特征与变化规律,揭示浑河源头水源涵养林保护和治理过程中优先流的形成机理及影响因素。结果表明:4个样地土壤优先流的入渗深度范围为30~38 cm,且其深浅与根系的根长密度关系密切;0~10 cm土层的土壤优先流染色面积比依次为82.41%, 75.44%, 91.03%, 79.82%, 土壤优先流染色面积比随土层深度的增加而减小,4个样地上层土壤显著大于下层土壤染色面积比;土壤优先流染色面积比与土壤容重、总孔隙度、有机质、总根长密度呈极显著或显著正相关,均影响着优先流的发生程度,并且得到土壤优先流染色面积比与其影响指标的多元函数关系;根据各主成分得分及其权重,得到水源涵养林土壤优先流特征综合得分为混交林地(3.134)>落叶松(1.660)>采伐迹地(-1.946)>红松(-2.847)。研究结果可为深入探究浑河源头水源涵养林的生态水文过程及植被建设提供科学依据。

关键词:水源涵养林; 染色深度; 根长密度; 染色面积比

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0287-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.040

Characteristics of Soil Preferential Flow in Water Conservation Forest at Hunhe River Source

LÜ Gang¹, JIN Zhaoliang¹, LING Shuai², LI Yexin¹, ZHAI Jingxuan³,
WANG Yunce⁴, ZHENG Yang¹, DU Xinpeng¹, DONG Liang¹

(1.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000;
2. Liaoning Experimental Forestry Farm, Qingyuan, Liaoning 113311; 3. Hangzhou Dadi Technology Co. Ltd.,
Hangzhou 310004; 4. Beijing Linfengyuan Environment Planning and Design Institute Co. Ltd., Beijing 100089)

Abstract: Taking four types of water conservation forests at the Hunhe River source as the research object, the morphological characteristics and change regularity of soil preferential flow in different water conservation forests were studied by field dyeing tracer and indoor physicochemical analysis, to reveal the formation mechanism and influencing factors of preferential flow in the process of protection and management of water conservation forest. The results showed that the infiltration depth of the soil preferential flow ranged from 30 cm to 38 cm in the four plots, and its depth was closely related to root length density. The dyeing area ratios of soil preferential flows in 0—10 cm soil layer were 82.41%, 75.44%, 91.03% and 79.82%, respectively, and the dyeing area ratio of soil preferential flow decreased with the increasing of soil depth, and the dyeing area ratio of upper soil was significantly larger than that of the lower soil in the four plots. The dyeing area ratio of soil preferential flow was significantly or positively correlated with soil bulk density, total porosity, organic matter and total root length density, which all affected the occurrence degree of preferential flow, and got the multi-function relationship between the soil preferential flow dyeing area ratio and the influence index. According to the score and weight of each principal component, the comprehensive scores of soil priority flow characteristics of water conservation forests were mixed forest land (3.134)>larch forest (1.660)>cutting area (-1.946)>Korean pine forest (-2.847). The results could provide scientific basis for further study on ecological hydrological process and vegetation construction of water conservation forest at Hunhe River source.

Keywords: water conservation forest; dyeing depth; root length density; dyeing area ratio

优先流作为土壤内部水分运动的常见形式,指土壤内存在水分等液体溶质会绕过土壤基质层而优先运移到地下水源,进而影响土壤质量,造成土壤养分大量流失,以及污染涵养的水源^[1]。通俗来讲,土壤内部的水分由于重力作用,在向下运动的时候,土壤内部的土体颗粒并非均匀分布,内部存在着由于根系的伸展或动物蠕动的爬行后而形成的孔、洞,当内部存在孔隙的时候,类似于水分等溶质会优先通过孔隙向下移动。有研究^[2]表明,植被根孔、掘穴昆虫产生的虫洞、土壤自身条件是影响山地优先流无论是横向剖面还是纵向剖面的重要影响因素,并且在森林覆盖度较高的地区,由于植被资源、昆虫资源丰富,更有利于优先流的发生发育。相关研究^[1,3-4]表明,降雨特性、初始含水量、土壤性质对优先流影响较大,其发展程度随着初始含水量的增大,呈现先增大后减小的趋势,幼龄林、中龄林及过熟林土壤中的优先流类型是大孔隙流,在成熟林坡积物土壤中的优先流类型是指流,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,这主要是由根系在土壤层内的空间异质性造成的。优先流是流域水文过程重要组成部分之一,其存在会对土壤水分运动和溶质迁移产生一定影响,在森林涵养水源和调节径流方面具有重要作用^[5]。

浑河源头位于辽宁省东部,属于辽东山地丘陵水土流失重点预防区^[6],是辽宁省森林资源、水资源以及再生植被资源的重要区域。辽东水源涵养用材林区作为辽宁中部城市群、工农业基地的绿色屏障和集水区具有重要地位。科学经营和保护好辽东水源涵养林资源,研究新形势下水源涵养林的经营理论、技术措施和经营策略,对提高水源涵养林质量与生态环境建设水平,具有极其重要的意义^[7]。浑河源头区域降雨条件充沛、森林资源丰富,根系、根孔、虫洞分布广泛,大部分土壤水分和溶质绕过土壤基质快速向下运动,为土壤优先流的发生与发育提供基础条件,不

仅增强了土壤入渗与蓄水能力,同时也提高了水资源利用效率与森林涵养水源能力。因此,开展浑河源头水源涵养林土壤优先流研究可深化对辽东山区森林生态系统土壤水文过程的认识,同时为该区水源涵养林建设提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于辽宁省清原县城东南部辽宁省实验林场(124°59′—125°18′E, 41°51′—42°00′N),面积 8 406.26 hm²,属长白山系、千山山脉、龙岗山支脉的北坡,是浑河发源地之一。海拔 500~800 m,地势较缓。属中温带大陆性季风气候,年平均气温 5.3℃,年均降水量 806.5 mm,年均蒸发量 1 275 mm,无霜期 130 d。土壤多为暗棕色森林土和棕色森林土,土层深度为 70—80 cm。本区属长白植物区系,植物种类繁多,生长茂密,森林覆盖率达 90%。地带性森林植物以柞树(*Quercus mongolia* Fisch. ex Ledeb.)林、阔叶混交林为主的天然次生林和以红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、落叶松(*Larix gmelinli.* (Rupr.) Kuzen.)为主的针叶林,林下植被多为毛榛子(*Corylus heterophylla*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii* Rupr.)、暴马丁香(*Syringa reticulata* (Blume) H. Hara var. *amurensis* (Rupr.) J. S. Pringle)、大叶鼠李(*Rhamnus dahurica* Pall.)、金银忍冬(*Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim.)等。

2 材料与方法

2.1 样地设置

2017 年 9 月在研究区进行调查、采样,根据植被生长情况,选取落叶松林地、红松林地、落叶松和红松混交林地、采伐迹地 4 种试验样地(表 1),在每种样地地势较为平坦、且植被生长良好的地方选择有代表性的地段设置 10 m×10 m 的标准样地,在标准样地内选择具有代表性的地点进行优先流试验。

表 1 各林分样地概况

林分 样地	林木 覆盖度/%	枯落物 厚度/cm	枯落物 覆盖度/%	覆盖密度/ (株·hm ⁻²)	植物 总盖度/%	林下优势种
落叶松林地	86	7~8	83	1300	98	花曲柳、水金凤、大叶芹、美汉草、苔草、落新妇、刺五加
红松林地	93	6~12	98	1800	99	水曲柳、花曲柳、苔草、龙牙草
混交林地	88	6~8	92	1200	97	苜蓿、木贼、美汉草
采伐迹地	75	3~5	86	800	85	水曲柳、花曲柳、大叶芹、刺五加

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、可见性高及不易被土壤颗粒吸附,所以本文选取亮蓝作为染色试剂。分别在 4 个样地内选择地势平坦、植被生长良好的 3 个样点作为染色试验

观测点。每个样点选 0.5 m×0.5 m 的样方,样方选在 3~4 株相邻乔木中心且地表较为平坦处,使染色剖面距各乔木基本等距,以减少乔木主根对观测结果的影响。清除样方顶部的杂物,并尽量减少对土壤的扰动,每个样方均用 0.65 m×0.50 m 的铁板交错围

起,每块铁板连接处错开 5 cm 距离以保证铁板间的封闭性。之后将铁板埋入地下 30 cm,同时将距铁板内壁 5 cm 以内的土壤用木锤夯实,防止染色溶液沿铁板内壁缝隙侧漏影响观测结果。试验前应确保试验前 1 天内无降雨发生,将 20 L 浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液用喷壶喷洒到样地上,以地表出现积水但不溢出样方为准。染色后在样地表面覆盖 1 层塑料布和绿色植被,防止蒸发和外界的干扰。

在染色示踪试验 24 h 之后,小心去除覆盖的塑料布及绿色植被,水平方向前后去掉 10 cm,然后再每隔 10 cm 开挖 1 个土壤染色剖面,共挖取 3 个染色剖面,剖面深度视染色深度而定。每次开挖剖面后用

小铲子修平土壤剖面。修整后用相机拍照,要求镜头与土壤剖面垂直以降低或消除由此产生的试验误差。在拍照过程中将比例尺置于土壤剖面垂直方向上,便于以后准确计算染色的实际面积。然后垂直方向按每层 10 cm,分 3 层每层取 2 个环刀,用于测定土壤理化性质。

2.3 土壤理化性质测定

试验利用烘干法测定土壤自然含水量;利用环刀法测定土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度;利用排水法测定砾石体积含量;利用 H.H.萨维诺夫法测定土壤团聚体;利用激光粒度仪测定土壤机械组成^[8-9]。各样地土壤理化性质指标见表 2。

表 2 土壤理化性质

土壤理化 性质	落叶松林地			红松林地			混交林地			采伐迹地		
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
土壤自然含水率/%	11.70	10.23	10.47	22.01	17.41	13.26	19.67	12.66	9.75	21.58	17.59	18.54
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0.83	0.94	1.01	1.16	1.20	1.45	0.81	1.04	1.25	1.00	1.12	1.16
总孔隙度/%	66.56	62.93	60.52	55.62	54.31	46.12	67.16	59.55	52.81	61.15	57.01	55.52
毛管孔隙度/%	54.48	51.06	47.33	50.40	42.16	29.74	54.49	47.39	39.18	48.62	47.57	42.19
砾石体积含量/%	3.13	2.50	0.60	1.50	1.55	2.92	3.92	6.30	6.80	1.65	2.50	5.87
有机质含量/(g·kg ⁻¹)	82.22	33.93	36.57	64.44	39.60	31.96	113.79	39.52	29.70	53.50	53.36	40.52
风干土团聚度 GMD/%	1.17	1.08	1.00	1.46	1.28	1.36	0.81	0.92	1.00	1.18	1.24	1.19
水稳性团聚体 GMD/%	0.65	0.41	0.36	0.33	0.32	0.24	0.55	0.82	0.50	0.36	0.30	0.40
风干土团聚度 MWD/%	2.09	2.16	2.58	2.84	2.40	2.63	1.73	1.99	2.00	2.23	2.80	2.70
水稳性团聚体 MWD/%	1.13	0.84	0.77	0.75	0.72	0.50	1.26	1.69	1.17	0.76	0.56	1.21
砂粒/%	13.88	10.68	14.97	9.49	9.15	9.76	14.15	11.70	10.27	11.23	10.82	15.78
粉砂/%	64.42	67.89	64.15	59.49	54.80	50.38	49.15	49.80	59.73	70.74	67.89	63.06
黏粒/%	21.70	21.43	20.88	31.02	36.05	39.86	36.70	38.50	30.00	18.03	21.29	21.16

2.4 根系的测定方法

用筛子筛出将室外取回的根系土样中的根系,用清水洗去土壤,采用根系扫描仪扫描洗净的根系,得到根系扫描图片,再用 win RHIZO 洗根测量分析软件分析图片,得到根系指标见表 3。

表 3 根系指标

样地	土层	根重/ 深度/cm (mg·cm ⁻³)	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)	根体积密度/ (cm ³ ·cm ⁻³)
落叶松林地	0—10	3.285	5.140	1.356	0.033
	10—20	14.797	4.535	1.711	0.055
	20—30	1.350	2.377	1.140	0.043
红松林地	0—10	25.205	8.400	1.637	0.028
	10—20	12.375	5.415	1.223	0.032
	20—30	8.130	2.491	0.473	0.007
混交林地	0—10	7.000	5.722	1.819	0.054
	10—20	5.173	2.906	1.115	0.035
	20—30	4.641	3.916	1.322	0.043
采伐迹地	0—10	20.562	5.803	1.098	0.018
	10—20	8.500	4.881	0.769	0.010
	20—30	7.490	2.905	0.551	0.008

2.5 数据处理方法

用 Excel 2003 软件进行曲线图绘制,土壤剖面图像后期处理运用 Photoshop CS5 软件;采用 SPSS 18.0 统计软件进行显著性检验和相关性分析等。

3 结果与分析

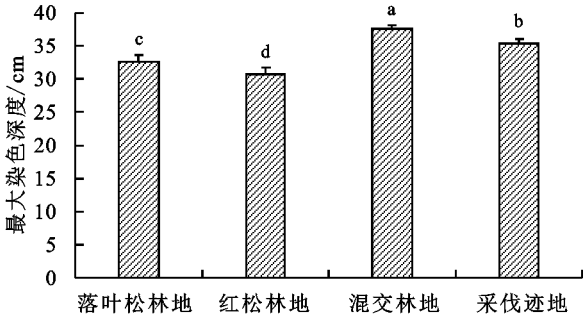
3.1 土壤优先流最大染色深度

最大染色深度指水分在土壤剖面上达到的最大入渗深度,最大染色深度能够描述优先流的快速运动特征^[10]。由图 1 可知,各个样地土壤优先流最大染色深度依次为混交林地(37.57 cm) > 采伐迹地(35.33 cm) > 落叶松林地(32.67 cm) > 红松林地(30.67 cm),各样地之间差异显著($p < 0.05$),各样地的最大染色深度均小于 40 cm,优先流染色锋部处其形态较为锋利,说明优先流染色深度及形态特征能够准确反映其优先流过程。

各样地优先流入渗深度并未随土壤自然含水率降低而加深,这与高朝侠等^[11]在对土壤初始含水率对优先流的影响研究得出的结论不同,可能是因为研究区的土壤多为暗棕色森林土和棕色森林土,此类土壤表土层以下为白浆化暗棕色黏土和暗棕色黏土,非毛管孔隙所占的比例很小,土壤传导率很低,大孔隙流只发生在表面的枯枝落叶层和壤土层,而染料溶液到达深层土壤是由于在该层土壤中有与壤土层连通的植物根孔或动物孔洞向下或侧向延伸,染料溶液沿着植物根孔或动物孔洞运移^[12],所以该样地的土壤

自然含水率对优先流入渗的深度影响不大。其中混交林地的染色深度最深,但是混交林地的根长密度在

10—20 cm 土层深度最低,这也说明土壤中的水分不仅通过根孔传送,也通过动物孔洞传送(图 2)。



注:图中不同小写字母表示不同样地之间差异性显著($p<0.05$)。

图 1 各样地土壤优先流最大染色深度和根长密度

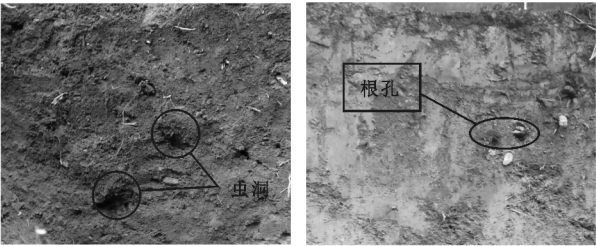
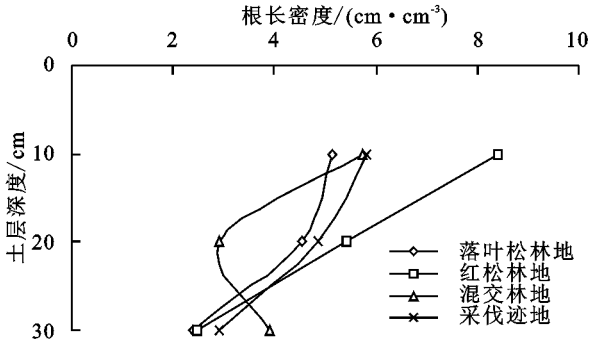
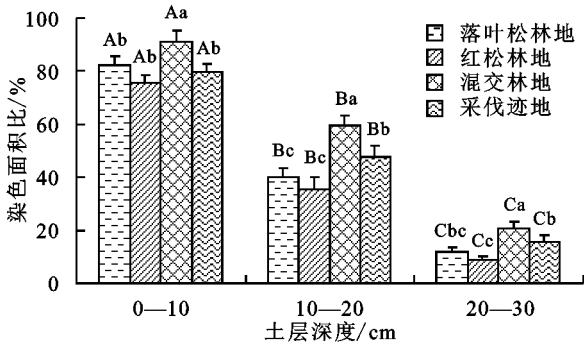


图 2 土壤剖面优先流染色示意

3.2 土壤优先流染色面积比

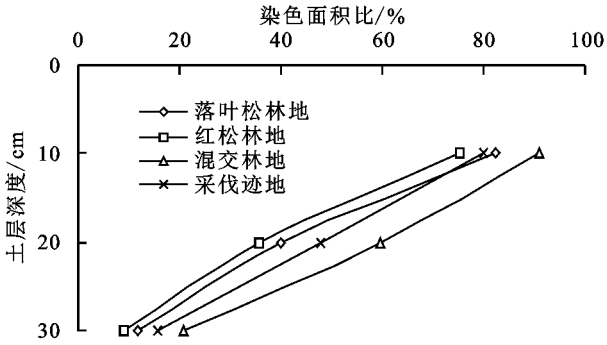
染色面积比指一定垂直深度土层中被亮蓝染色的土壤像素的个数占整个开挖剖面图像的宽度比例^[13]。采用土壤优先流染色面积比来分析土壤优先流的形态特征,能够准确反映土壤优先流的分布特征与发育程度。由图 3 可知,各样地土壤剖面范围内土壤优先流染色面积比存在差异,落叶松林地、红松林地、混交林地、采伐迹地 0—10 cm 土层土壤优先流染色面积比依次为 82.41%,75.44%,91.03%,79.82%,混交林地与其他 3 个样地间差异显著($p<0.05$);

10—20 cm 土层土壤优先流染色面积比依次为 40.17%,35.50%,59.43%,47.88%,混交林地显著大于其他 3 个样地($p<0.05$),采伐迹地显著大于落叶松林地和红松林地($p<0.05$),落叶松林地和红松林地之间无显著差异($p>0.05$);20—30 cm 土层土壤优先流染色面积比依次为 11.78%,9.00%,20.82%,15.58%,混交林地显著大于其他 3 个样地($p<0.05$),在 3 个土层深度的土壤优先流染色面积比均为混交林地最大,其原因是混交林地内植物种类组成复杂,根系网络分布密集,有利于垂直水分运移通道的形成^[14]。同一样地不同土层之间差异显著($p<0.05$),落叶松林地、红松林地、混交林地和采伐迹地 0—10 cm 土层土壤优先流染色面积比显著大于 10—20,20—30 cm 土层($p<0.05$),10—20 cm 土层显著大于 20—30 cm 土层($p<0.05$),各样地土壤优先流染色面积比均随着土层深度的增加而减小,这主要是由于土壤下层的植物根系分布以及土壤动物活动均比上层少^[15]。



注:图中不同大写字母表示同一样地不同土层之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一土层不同样地之间的差异显著($p<0.05$)。

图 3 各样地土壤优先流染色面积比



采用线性函数和逆函数回归方程对研究区 4 个样地观测剖面染色面积比(y)及其对应的土层深度(x)进行回归分析(表 4)。由表 4 可知,不同样地的拟合效果均较好,可以用来预测土壤优先流。

3.3 土壤优先流影响因素分析

土壤优先流的形成通常通过外部因素和内部因素共同作用而实现^[16],与土壤结构、水分特征、根系

分布状况等密切相关。选取土壤含水率(X_1)、土壤容重(X_2)、土壤总孔隙度(X_3)、土壤毛管孔隙度(X_4)、土壤非毛管孔隙度(X_5)、砾石体积含量(X_6)、土壤有机质(X_7)、风干土团聚体 GMD(X_8)、水稳性团聚体 GMD(X_9)、风干土团聚度 MWD(X_{10})、水稳性团聚度 MWD(X_{11})、总根重密度(X_{12})、总根长密度(X_{13})、总根表面积密度(X_{14})、总根体积密度

(X_{15}) 共计 15 个影响因子,对土壤优先流染色面积比与各个指标因子进行 Spearman 相关分析。

表 4 优先流染色面积比(y)与土层深度(x)的关系

样地	$y=ax+b$		$y=a\ln x+b$	
	拟合函数	R^2	拟合函数	R^2
落叶松林地	$y=-3.53x+115.41$	0.987	$y=-63.92\ln x+230.15$	0.999
红松林地	$y=-3.32x+106.42$	0.987	$y=-60.17\ln x+214.46$	0.999
混交林地	$y=-3.51x+127.31$	0.997	$y=-61.94\ln x+236.71$	0.958
采伐迹地	$y=-3.21x+111.99$	0.999	$y=-57.13\ln x+213.44$	0.977

由表 5 可知,土壤优先流染色面积比与土壤容重、总孔隙度、土壤有机质、总根长密度呈极显著或显著相关。由表 5 可以看出,4 个样地的土壤容重均随土层的增加而增加,其染色面积比却随着土层的增加而减小,容重与染色面积比之间呈负相关关系;土壤总孔隙度随着土层的增加而降低,与染色面积比呈正相关关系;土壤有机质是维持土壤肥力的重要因素之一,是评价土壤质量的关键指标^[17],也是影响土壤团聚体结构的最重要因素之一^[18]。各样地土壤有机质含量与土层深度的变化无相关性,落叶松林地土壤有机质含量随土层深度的增加呈现先减小后增大的变化趋势,红松林地、混交林地和采伐迹地土壤有机质含量均随着土层深度的增加而减小。植物根系在土壤空间中的生长过程形成了复杂的三位空间网络,水分和溶质通过这些网络路径可运移至土壤深层。由此可知,总根长密度与土壤染色面积比相关性显著,由表 2 可以看出,林地根系的根长密度随土层深度的增加而减小,优先流染色面积比也具有同样的规律。有研究^[19]表明,土壤中植物根系的生长和死亡所形成的孔隙通道是土壤水分和溶质快速运移的重要通道,即土壤中优先流路径的重要来源,尤其是在没有人为干扰的植物群落中,由植物根系形成的孔隙通道能够发生明显的水流优先运移现象。在野外染色示踪试验过程中同样发现,部分亮蓝染色溶液根系产生的孔隙通道向下入渗,根系周围的 75%~90% 的土壤都发生了染色现象。因此,土壤中的植物根系活动对土壤优先流的形成具有重要的影响作用。

表 5 染色面积比与影响指标的 Spearman 相关性

影响指标	相关系数	双侧显著性 检验	样本数/ 个
土壤容重(X_2)	-0.628*	0.029	12
总孔隙度(X_3)	0.678*	0.015	12
土壤有机质(X_7)	0.818**	0.001	12
总根长密度(X_{13})	0.797**	0.002	12

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

上述 4 个指标与土壤优先流染色面积比耦合程度较高,但是土壤容重与总孔隙度关系密切。因此,选取土壤容重(X_2)、土壤有机质(X_7)、总根长密度(X_{13}),建立落叶松林地、红松林地、混交林地和采伐迹地土壤优

先流染色面积比与上述指标的多元函数关系(公式(1))。由线性回归方程可知,优先流染色面积比与各影响指标的拟合效果较好,决定系数 R^2 为 0.823。

$$y=31.179-42.859X_2+0.504X_7+12.149X_{13}$$
$$R^2=0.972,F=5.588,\text{Sig.}=0.029\tag{1}$$

3.4 土壤优先流主成分分析

采用主成分分析法对影响土壤优先流的因素进行分析。选取土壤优先流影响因素的 15 个影响因子($X_1\sim X_{15}$)见表 6。由表 6 可知,经降维处理后筛选出 3 个主成分(F_1 、 F_2 、 F_3),其贡献率大小依次为 F_1 (70.310%)> F_2 (17.325%)> F_3 (12.365%),累计贡献率为 100%,解释整个总方差;3 个主成分的特征根分别为 16.171, 3.985,2.844,均大于 1,说明采用这 3 个主成分来表征 15 个土壤优先流影响因子是合理的。

表 6 水源涵养林土壤优先流的总方差分析

主成分	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
F_1	16.171	70.310	70.310
F_2	3.985	17.325	87.635
F_3	2.844	12.365	100.000

表 7 为未旋转的主成分矩阵,将表 7 中的数据除以主成分相应特征值的开平方值,得到主成分中每个指标的对应的特征向量,进而得到 3 个主成分表达式。

$$F_1=-0.205X_1-0.219X_2+0.220X_3+0.188X_4+0.185X_5+0.135X_6+0.209X_7-0.235X_8+0.234X_9-0.228X_{10}+0.207X_{11}-0.248X_{12}-0.223X_{13}+0.197X_{14}+0.220X_{15}$$
$$F_2=-0.073X_1+0.236X_2-0.235X_3-0.259X_4-0.116X_5+0.073X_6+0.087X_7+0.011X_8+0.086X_9-0.140X_{10}+0.077X_{11}+0.032X_{12}+0.223X_{13}+0.264X_{14}+0.190X_{15}$$
$$F_3=0.325X_1+0.021X_2-0.020X_3+0.236X_4-0.372X_5+0.490X_6+0.306X_7-0.192X_8+0.174X_9-0.167X_{10}+0.314X_{11}-0.008X_{12}-0.002X_{13}-0.185X_{14}-0.159X_{15}$$

根据各主成分得分及其权重,按照公式(2)计算其综合指数(表 8)。由表 8 可知,水源涵养林土壤优先流特征综合得分为混交林地(3.134)>落叶松林地(1.660)>采伐迹地(-1.946)>红松林地(-2.847),混交林地最大,红松林地最小,说明混交

林地容易发生土壤优先流现象;红松林地小于采伐迹地,说明通过采取适当的采伐措施能够有效增强土壤的水源涵养能力。

表 7 水源涵养林土壤优先流未旋转的主成分矩阵

影响指标	主成分		
	F_1	F_2	F_3
土壤含水率(X_1)	-0.824	-0.146	0.548
土壤容重(X_2)	-0.882	0.471	0.036
总孔隙度(X_3)	0.883	-0.468	-0.034
毛管孔隙度(X_4)	0.758	-0.517	0.398
非毛管孔隙度(X_5)	0.743	-0.232	-0.627
砾石体积含量(X_6)	0.544	0.146	0.826
土壤有机质(X_7)	0.839	0.174	0.516
风干土团聚度 GMD(X_8)	-0.946	0.021	-0.324
水稳性团聚体 GMD(X_9)	0.941	0.171	0.294
风干土团聚度 MWD(X_{10})	-0.918	-0.280	-0.281
水稳性团聚体 MWD(X_{11})	0.834	0.154	0.530
总根重密度(X_{12})	-0.998	0.064	-0.013
总根长密度(X_{13})	-0.896	0.445	-0.004
总根表面积密度(X_{14})	0.791	0.527	-0.312
总根体积密度(X_{15})	0.886	0.378	-0.268

$$F = \frac{16.171}{16.171 + 3.985 + 2.844} F_1 + \frac{3.985}{16.171 + 3.985 + 2.844} F_2 + \frac{2.844}{16.171 + 3.985 + 2.844} F_3 \quad (2)$$

表 8 水源涵养林土壤优先流特征主成分分析综合指数

样地	主成分			综合得分	排序
	F_1	F_2	F_3		
落叶松林地	2.929	-0.804	-2.104	1.660	2
红松林地	-4.418	1.915	-0.590	-2.847	4
混交林地	3.852	1.318	1.597	3.134	1
采伐迹地	-2.363	-2.429	1.098	-1.946	3

4 结论

(1) 4 个样地的土壤优先流最大染色深度均小于 40 cm, 优先流染色锋部处其形态较为锋利, 试验获取的优先流染色深度及形态特征能够准确反映其优先流过程。优先流染色深度的深浅与根系的根长密度关系密切。

(2) 土壤优先流染色面积比随着土层深度的增加而减小, 4 个样地在 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层中土壤优先流染色面积比混交林地均最大; 4 个样地上层土壤显著大于下层土壤染色面积比。

(3) 土壤优先流染色面积比与土壤容重、总孔隙度、有机质、总根长密度呈极显著或显著正相关, 均影响着优先流的发生程度。土壤优先流染色面积比与其影响指标的多元函数关系的拟合效果较好。

(4) 由主成分分析可知, 其贡献率大小依次为 F_1 、 F_2 、 F_3 , 累计贡献率为 100%; 浑河源头水源涵养

林土壤优先流特征综合得分为混交林地>落叶松林地>采伐迹地>红松林地, 其中混交林地最大, 红松林地最小。

参考文献:

[1] 张英虎, 牛健植, 朱蔚利, 等. 森林生态系统林木根系对优先流的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1788-1797.

[2] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 871-880.

[3] 段晓倩, 倪晨, 陈姣, 等. 基于含水量高频监测的花岗岩崩岗侵蚀红壤优先流研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 82-88.

[4] 牛健植. 长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.

[5] 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.

[6] 刘立权. 辽宁省水土流失重点防治区划分与防治对策[J]. 中国水土保持, 2015(2): 6-9.

[7] 张昱. 辽宁东部山区农村能源与水源基地建设关系的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.

[8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理分析[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[9] 张洪江. 水土保持与荒漠化防治实践教程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[10] 牛健植. 森林生态系统优先流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[11] 高朝侠, 徐学选, 赵传普, 等. 土壤初始含水率对优先流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1): 46-54.

[12] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 长白山北坡两种类型森林土壤的大孔隙特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1213-1218.

[13] Wildenschild D, Jensen K H, Villholth K, et al. A laboratory analysis of the effect of macropores on solute transport[J]. Ground Water, 2010, 32(3): 381-389.

[14] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩区林地优先流影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 28-33.

[15] 李金中, 裴铁璠, 牛丽华, 等. 森林流域坡地壤中流模型与模拟研究[J]. 林业科学, 1999, 35(4): 3-9.

[16] Zhang H J, Cheng J H, Shi Y H, et al. The distribution of preferential paths and its relation to the soil characteristics in the Three Gorges Area, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2007, 22(1): 39-48.

[17] Ding G, Novak J M, Amarasingiwardena D, et al. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2): 421-429.

[18] 赵鹏, 史东梅, 赵培, 等. 紫色土坡耕地土壤团聚体分形维数与有机碳关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 137-144.

[19] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩地区优先流对渗流和地表径流的作用[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 18-23.