

# 三峡库区不同垂直带森林土壤大孔隙染色实验

刘目兴,王文德,张海林,杜文正

( 华中师范大学 城市与环境科学学院 湖北 武汉 430079 )

**摘 要:** 降雨过程中森林土壤大孔隙内优先流的发生,是森林植被调蓄径流和保持水土的主要方式。利用染色示踪法,对三峡库区宜昌大老岭-邓村地区不同垂直带内森林土壤大孔隙特征进行了实验研究。结果表明,山地植被-土壤类型的梯度变化使不同垂直带内土壤大孔隙数量差异显著,在土壤垂直剖面内呈现不同分布模式。亚高山阔叶林覆盖的山地棕壤下,土壤剖面染色面积比达 62.3%,染色区域主要集中在根系发达的腐殖质层,染料下渗深度较浅。低山针叶林黄壤剖面染色比例低于亚高山阔叶林棕壤,但染料下渗深度较深可达 69.5 cm,腐殖质层、淋溶淀积层和母质层间染色比例无显著差异。中山灌丛幼林黄棕壤剖面染色比例和染料下渗深度较小,腐殖质层染色比例显著高于淋溶淀积层,母质层几乎无染色现象。与森林土壤相比,低山弃耕坡地的染料下渗深度和染色面积比显著减小,染色区域集中在耕作表层。植物根孔、母质裂隙、土壤发育程度和土地耕作是造成山地不同垂直带间土壤大孔隙结构差异的主要因素。

**关键词:** 土壤大孔隙;染色示踪;亮蓝;垂直地带;三峡库区

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

土壤大孔隙是受干湿交替、冻融变化、植物根系枯萎、动物活动及人为耕作等因素的影响,在土体内形成直径大于 1 mm 的物理孔隙<sup>[1]</sup>。大孔隙只占土壤体积的 0.1% ~ 5%,但是,降雨或灌溉水会沿根孔、洞穴和裂隙等大孔隙通道形成优先流,绕过土壤基质,快速到达土壤深层或补给地下水<sup>[2-3]</sup>。土壤优先流改变了水土交界面的水文过程,增加了水分入渗,降低了地表径流和土壤侵蚀度。森林土壤根系丰富,大孔隙结构复杂,且能保持很长时间,降雨入渗过程中易产生优先流<sup>[4]</sup>。土壤大孔隙内优先流的发生改变了森林的地表水文过程,增加了水分入渗,促进壤中流的发育,是森林涵养水源和调节径流的主要方式<sup>[5]</sup>。因此,研究森林土壤大孔隙结构的优先流效应对理解土壤水分运动的物理过程,防治水土流失具有重要的理论价值和实际意义。

三峡库区位于我国中亚热带北缘,地处青藏高原与长江中下游平原的过渡带,山地、丘陵占总面积

的 95% 以上,海拔落差超过 2 000 m,坡度陡,年降水量 1 000 ~ 1 340 mm,降水集中且多暴雨,侵蚀力强,是我国水土流失严重,生态系统脆弱的地区之一<sup>[6]</sup>。长期垦殖和砍伐后,以栲属(*Castanopsis*)、楠木属(*Phoebe*) 为主的原生常绿阔叶林破坏严重,原始森林在中山以上地段出现,低山丘陵地带被杉木、马尾松、柏木、华山松等浅根针叶林覆盖<sup>[7]</sup>。杨海龙等<sup>[8]</sup>和王鹏程等<sup>[9]</sup>研究发现针叶林地表土壤水分入渗性能显著低于常绿阔叶林,“管流”对森林土壤的入渗率影响较大,入渗过程与植物根系、动物洞穴、母质裂隙等大孔隙结构密切关系<sup>[4,10]</sup>。国内外学者通过多种观测方法,对林地或农田的土壤大孔隙结构进行了研究,其中染色示踪法观测直观、费用低、可重复度高,适合调查数量丰富、空间变异较大的森林土壤大孔隙结构<sup>[11-12]</sup>。本研究以库区内植被垂直梯度变化大、水土流失严重的大老岭-邓村地区为研究区,利用亮蓝溶液对土壤剖面孔隙结构

收稿日期( Received date ): 2011 - 11 - 08; 改回日期( Accepted ): 2012 - 01 - 04。

基金项目( Foundation item ): 国家自然科学基金项目( 41001125 ), 湖北省自然科学基金( 2010CDB01205 ), 武汉市晨光计划( 201150431112 )。

[ National Natural Science Foundation of China( 41001125 ), Natural Science Foundation of Hubei Province( 2010CDB01205 ), Chenguang Plan of Wuhan( 201150431112 ) . ]

作者简介( Biography ): 刘目兴( 1979 - ), 男, 山东巨野人, 副教授, 博士, 主要从事土壤水文学研究。 [ Liu Muxing( 1979 - ), associate Prof. , main interested soil hydrology research. ] E - mail: liumuxing@ yahoo. cn

进行了染色观测,对比分析亚高山-中山-低山地带不同植被覆盖下的土壤大孔隙结构及其成因。

## 1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市大老岭林区和夷陵区内(100°51′08″~111°39′30″E,30°00′13″~31°28′30″N),地处鄂西山地向江汉平原的过渡地带,下游紧邻三峡大坝,海拔400~1800 m,地质基础以中上元古界的酸性结晶岩为主。气候具有亚热带季风气候特征,据夷陵区近20 a气象观测资料,年平均气温16.7℃,平均降水量1101.1 mm,平均蒸发量950 mm,≥10℃的积温5403.7℃,无霜期283 d。山地气候垂直变化明显,海拔每升高100 m,气温降低0.4~0.6℃,降水量增加10~15 mm。中山以上气候冷湿,多云雾,空气相对湿度较大<sup>[13]</sup>。随海拔的升高和人类干扰强度的变化,研究区植被-土壤垂直地带性分异明显,基带为亚热带针阔混交林黄壤,在海拔700~1000 m的低山地带为针叶林-山地黄壤,海拔1000~1600 m的中山地带为灌丛幼林-山地黄棕壤,海拔1600 m以上的亚高山地带为原生阔叶林-山地棕壤。研究区土壤母质为花岗岩

风化物,质地较粗,偏酸性,易于流失。植被类型丰富,物种多样,乔木有樟树(*Cinnamomum camphora*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、鹅掌楸(*Liriodendron L.*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、茅栗(*Castanea seguinii*)等。草本植物有艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、禾草、车前草等。大老岭林场-邓村乡一线植被-土壤类型的垂直地带性在三峡地区有较强的代表性<sup>[13]</sup>。

## 2 实验方法

### 2.1 染色实验

染色实验于2011-07-09进行,沿大老岭林区-夷陵区邓村乡一线选取大老岭林区、白水头村、罗家岩村、竹林湾村等4个地点,分别对原生阔叶林山地棕壤、灌丛幼林山地黄棕壤、草本弃耕坡地及针叶林山地黄壤等4种植被-土壤类型的土壤大孔隙结构进行调查,每种类型下选取2~3个样地用亮蓝溶液(Brilliant Blue)染色观测。研究区各垂直带内实验点的基本概况如表1所示。

表1 土壤染色实验区概况

Table 1 Characteristic of study area with soil dye tracing test

实验地区	大老岭林区	白水头地区	竹林湾地区	罗家岩地区
地理位置	110°55′07″E,31°04′11″N	110°57′08″E,31°02′10″N	110°51′55″E,31°00′01″N	110°56′57″E,31°00′33″N
海拔/m	1700	1173	740	942
植被类型	鹅掌楸、马尾松	杉木、松树幼林	松树、杉木针叶林	蒿草
表土重量含水率/%	68.4	41	21	19.6

为了避免实验之间的相互影响,同一地点不同实验样地之间相距10 m以上。实验开始前,剪去样地表面的植物,并十分小心地将表层刮平,尽可能不破坏土壤的原状结构。土壤染色实验采用双环法,不锈钢圆环高15 cm,内环直径为0.6 m或0.8 m,外环直径为0.8 m或1 m。为减少染色颜料的侧渗,将不锈钢圆环楔入土壤5 cm,在内环土壤表面均匀喷洒亮蓝溶液,溶液浓度为4 g/L,内环直径0.6 m时喷洒量为11 L,内环直径0.8 m时喷洒量20 L,外环注入同等的纯水。染色剂溶液渗入土壤后,取掉不锈钢环,用枯枝落叶和草本植物覆盖地表,防止水分和颜料的蒸发。入渗24 h后,沿X方

向等距离依次挖掘并修整成竖直剖面,剖面走向与等高线平行,用钢卷尺标定剖面的深度和宽度,用Canon IXUS70型数码相机(700万像素)对各垂直剖面进行逐层照相,记录土壤剖面染色模式。实验共观测了28个垂直剖面,均位于染色区域内,剖面宽度与内环宽度基本保持一致,挖掘深度与染料下渗深度大致相同(图1)。为了保证拍摄照片可用于定量分析,调节相机至钢卷尺清楚后拍摄。

### 2.2 室内图像分析

将野外拍摄的照片输入计算机,利用CorelDRAW 12.0和Photoshop 7.0软件计算染色面积占剖面总面积的比例即染色面积比,描述土壤剖面染

色结果。具体操作步骤如下。

1. 在 CorelDRAW 12.0 下新建图层 1,输入要处理的真彩色图像,染色部分为蓝色。以图像内的钢卷尺为标尺矫正照片拍摄产生的变形。在视图框内新建图层 2,将图层 2 设为透明可编辑状态并置于图层 1 之上。然后,将图层 1 内的剖面照片放大至肉眼可辨别染色区域和未染色区域,在图层 2 内利用贝塞尔曲线沿染色与未染色区域的边界对染色部分进行矢量化,并将所绘曲线转换为闭合区域,填充黑色表示染色区域,未染色区域为白色。
2. 染色部分全部填充黑色后,以图层 1 内照片上钢卷尺作为标尺,计算垂直和水平方向上照片的

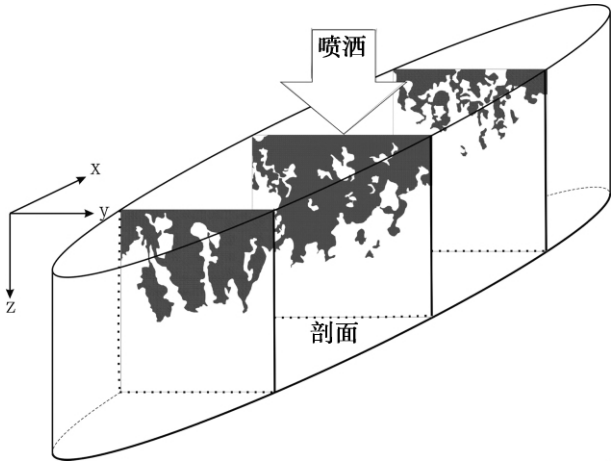


图 1 土壤剖面染色分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil profile analysis with dye tracing method

1 cm 表示的实际长度,为图层 2 内绘制的剖面染色图添加标尺。然后关闭图层 1,将图层 2 通过输出文件转换为 TIF 格式的栅格图像。

3. 在 Photoshop 7.0 内打开转换后的黑白二元栅格图像,在图像菜单的直方图内查看图像总像素数( P0)。然后,利用魔术棒选中所有黑色部分后,再次查看直方图得出染色区域像素数( P1)。土壤剖面的染色面积比等于  $P1/P0^{[12]}$ 。同时,观察剖面染色图的标尺,记录剖面染料下渗深度。

4. 土壤剖面内各发生层染色面积比是根据各土壤剖面的发生层厚度,在 Photoshop 7.0 下将剖面图像垂直分割成不同部分,然后利用相同方法计算不同发生层的染色面积比。另外,使用 SPSS13.0 软件对不同垂直地带内土壤剖面的染色特征进行差异分析与比较。

2.3 土壤性状调查

在染色实验进行前,分别对亚高山大老岭棕壤样地 1、中山白水头黄棕壤样地 2、低山竹林湾黄壤样地 1 和低山罗家岩弃耕坡地的土壤剖面进行分层采样,用环刀法测量土壤容重,用密度计法测量土壤机械组成<sup>[14]</sup>。各实验点土壤基本理化性质如表 2。

3 结果分析

3.1 不同垂直地带内森林土壤染色特征

森林土壤的大孔隙结构与动植物活动、干湿交替、冻融变化及人类活动等因素有关。研究区地处中

表 2 不同垂直带内土壤性状  
Table 2 Soil property of different altitudinal zones

样地类型	土壤发生层	厚度 /cm	容重 /( g · cm <sup>-3</sup> )	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	土壤类型
				0.05 ~ 2 mm	0.002 ~ 0.05 mm	< 0.002 mm	
亚高山大老岭 棕壤样地 1	腐殖质层	0 ~ 10	0.81	23.95	58.86	17.19	粉壤土
	淋溶淀积层	10 ~ 40	0.86	13.69	66.74	19.57	粉壤土
	母质层	40 ~ 70	1.15	14.18	70.38	15.44	粉壤土
中山白水头 黄棕壤样地 2	腐殖质层	0 ~ 12	0.85	29.4	50.78	19.82	粉壤土
	淋溶淀积层	12 ~ 50	0.93	36.06	46.6	17.34	壤土
	母质层	50 ~ 60	1.35	25.86	49.57	24.57	粉壤土
低山竹林湾 黄壤样地 1	腐殖质层	0 ~ 5	1.26	60.04	21.28	18.68	多砾砂壤土
	淋溶淀积层	5 ~ 20	1.61	63.03	17.5	19.47	多砾砂壤土
	母质层	20 ~ 55	1.63	79.36	7.71	12.93	多砾砂壤土
低山罗家岩 弃耕坡地	耕作层	0 ~ 15	1.59	81.42	7.39	11.19	砂壤土
	底土层	15 ~ 40	1.60	72.67	11.5	15.83	壤砂土

亚热带北缘山区,干湿冻融变化较弱,大孔隙的形成主要受动植物活动、土壤母质及人类活动的影响。实验分别观测了大老岭林区 3 个亚高山原生阔叶林-山地棕壤样地的 10 个土壤剖面,白水头村 2 个中山灌丛幼林-山地黄棕壤样地的 8 个土壤剖面、竹林湾村 2 个低山针叶林-山地黄壤样地的 6 个土壤剖面,以及罗家岩附近低山草本-弃耕坡地的 4 个土壤剖面。亮蓝溶液入渗 24 h 后,4 种植被-土壤类型下剖面染色的最大深度和染色面积比例如表 3。

利用 SPSS13.0 的单因素方差分析法,对 4 种植被-土壤类型下土壤剖面染色的最大深度和染色面积百分比进行差异比较。结果显示,大老岭原生阔叶林-山地棕壤、白水头灌丛幼林-山地黄棕壤、竹林湾针叶林-山地黄壤及罗家岩草本-弃耕坡地的

剖面染色最大深度分别为 52.4 cm、56.37 cm、69.5 cm 和 26.5 cm。显著性检验表明,竹林湾针叶林-山地黄壤的染料下渗深度最大,其次是白水头灌丛幼林-山地黄棕壤,两者均在 0.01 的水平上显著大于罗家岩草本-弃耕坡地的染料下渗深度,而大老岭原生阔叶林-山地棕壤的染料下渗深度在 0.05 的水平上显著大于罗家岩草本-弃耕坡地。此外,竹林湾针叶林-山地黄壤的染料下渗深度在 0.05 的水平上大于大老岭原生阔叶林-山地棕壤。

入渗深度与土壤大孔隙数量、大孔隙分布结构及其成因密切相关。各种类型下土壤剖面染色面积比分析表明,原生阔叶林-山地棕壤、灌丛幼林-山地黄棕壤、针叶林-山地黄壤及草本-弃耕坡地的大孔隙体积分别占土体的 62.3%、42.1%、45.4% 和 26.3%。显著性检验表明,在 0.01 的水平上原生

表 3 不同植被-土壤类型下土壤剖面染色特征

Table 3 Dye Characteristic of soil profile under different kinds of vegetation and soil types

	亚高山大老岭样地 1				亚高山大老岭样地 2		
	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 4	剖面 1	剖面 2	剖面 3
剖面宽度/cm	40.3	45.7	58.8	65.1	42.9	74.4	70.3
剖面深度/cm	63	50.2	50.1	54	24.7	40.9	46.8
染料下渗深度/cm	62	48	56	51	23	40	50
染色面积比/%	37.77	57.52	74.25	62.06	58.16	77.45	53.28
	亚高山大老岭样地 3			中山白水头样地 1			
	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 4
剖面宽度/cm	54.2	73.4	86.5	78.3	78.7	80.9	75.1
剖面深度/cm	58.8	60	65.6	63.3	65.4	84.5	91
染料下渗深度/cm	57	62	75	61	67	83	89
染色面积比/%	49.96	68.26	84.41	35.65	48.46	46.22	38.57
	中山白水头样地 2				低山竹林湾样地 1		
	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 4	剖面 1	剖面 2	剖面 3
剖面宽度/cm	78.7	82.7	89.2	72.5	64.8	75.6	75.9
剖面深度/cm	38.9	42.3	55.6	35.5	66.9	83.5	81.9
染料下渗深度/cm	32	39	46	34	64	71	76
染色面积比/%	40.07	47.37	51.22	29.33	44.39	47.24	53.89
	低山竹林湾样地 2			低山罗家岩弃耕坡地			
	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 1	剖面 2	剖面 3	剖面 4
剖面宽度/cm	61.4	72.7	70.9	88.7	88.2	94.3	84.8
剖面深度/cm	73.8	105.9	60	27.7	28.8	37.2	28.9
染料下渗深度/cm	73	82	51	25	32	36	13
染色面积比/%	65.61	41.42	19.80	41.04	31.59	19.13	13.43

注:剖面深度为挖掘剖面下沿的平均深度,因染料沿树根下渗很深,在部分剖面甚至超过下沿平均深度。

阔叶林-山地棕壤的大孔隙体积百分比显著大于灌丛幼林-山地黄棕壤和草本-弃耕坡地,在0.05的水平上显著大于针叶林-山地黄壤。针叶林-山地黄壤大孔隙体积百分比在0.05的水平上大于草本-弃耕坡地,而灌丛幼林与针叶林、灌丛幼林与弃耕坡地的差异不大。

由以上分析可见,罗家岩草本-弃耕坡地的大孔隙结构比最低,且分布较浅,染料入渗深度和染色面积显著小于森林植被-土壤类型。而大老岭阔叶林山地棕壤根系发达,单个剖面上根系达数十根,土壤大孔隙体积比最高,染色面积比最大。但是,由于大老岭阔叶林棕壤下土壤基质对染色颜料的吸附,以及表层土壤毛细管对水分的保持,其染色最大深度小于腐殖质含量较少、土壤质地较粗的针叶林山地黄壤和灌丛幼林山地黄棕壤。竹林湾针叶林-山地黄壤成土母岩为酸性结晶的花岗岩,土壤发育程

度低,质地粗,且土壤母质中多裂隙,入渗中土壤颗粒对颜料的吸附弱,亮蓝溶液沿裂隙入渗速度快,垂直剖面染料下渗深度最大(见表2)。

### 3.2 土壤大孔隙特征的垂直剖面分布

在染色法分析土壤大孔隙结构的垂直分布特征时,陈风琴等<sup>[12]</sup>和王伟等<sup>[15]</sup>利用不同深度的水平拍照法,邱琳等<sup>[16]</sup>和盛丰等<sup>[17]</sup>则应用垂直剖面拍照法。前者易于表达土体中大孔隙的水平分布,后者则与土壤发生层特征结合更紧密。本研究利用垂直剖面法分析土壤大孔隙的垂直分布,以大老岭山地棕壤样地1、白水头山地黄棕壤样地2、竹林湾黄壤样地1和罗家岩弃耕坡地为例,计算4种地表类型下土壤腐殖质层、淋溶淀积层和母质层的染色面积比,其值是样地内所有剖面该发生层染色面积比的平均值(图2)。

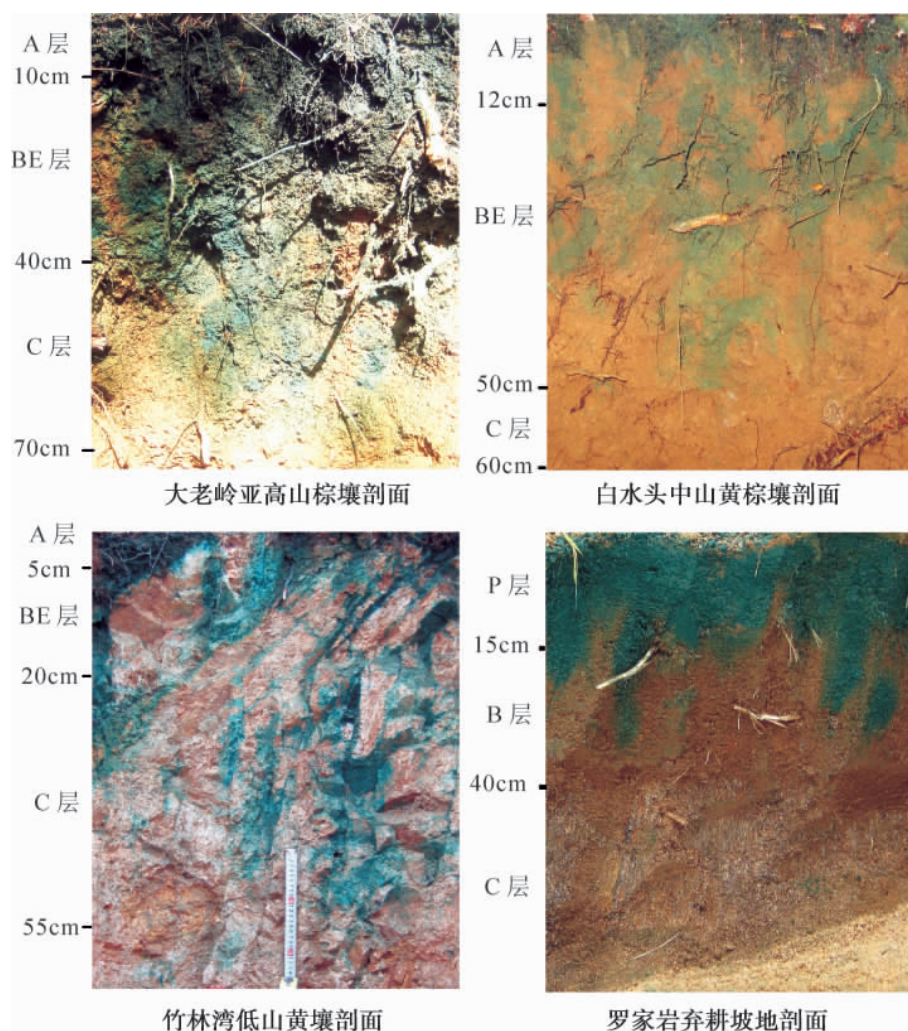


图2 不同垂直带内土壤剖面染色特征

Fig. 2 Dye characteristic of soil profile in different altitudinal zones

研究区各垂直带内不同植被覆盖下土壤染色面积比均随土层深度的增加而逐渐减少,亚高山大老岭棕壤、中山白水头黄棕壤、低山竹林湾黄壤、低山罗家岩弃耕坡地的土壤腐殖质层染色面积比分别为 93.09%、67.62%、86.14% 和 55.82%,淋溶淀积层染色面积比为 67.97%、18.6%、67.98% 和 6.27%,母质层染色面积比为 15.33%、0、67.09% 和 0。大老岭亚高山山地棕壤和竹林湾低山山地黄壤的染色比例在垂直剖面上呈逐渐降低的趋势,腐殖质层、淋溶淀积层与母质层均有染色区域。白水头中山黄棕壤与罗家岩弃耕坡地的剖面染色比例随土层深度的增大迅速降低,亮蓝染色区域集中在土壤表层,母质层未被染色(见图 2)。利用 SPSS13.0 的单因素方差分析法,分别对 4 种植被-土壤类型下土壤剖面腐殖质层、淋溶淀积层和母质层的染色面积百分比进行差异比较。

由表 4 不同垂直带内土壤发生层间染色比例比较,大老岭亚高山棕壤腐殖质层和淋溶淀积层在 0.01 的水平显著高于母质层,腐殖质层在 0.05 的水平上大于淋溶淀积层。白水头中山黄棕壤腐殖质层在 0.01 的水平显著大于淋溶淀积层,母质层未染色。竹林湾低山黄壤腐殖质层、淋溶淀积层间和母质层的染色比例显著不差异。罗家岩弃耕地表土层染色比例在 0.05 水平上显著大于底土层。由以上分析可见,森林土壤腐殖质层根系穿插、动物活动最为剧烈,大孔隙较多,土壤容重最小,亮蓝颜料在表

层的染色比例也最大(见表 2)。随着土壤深度的增加,土壤砂粒增多,加之表层土壤淋溶的粘粒淀积作用,土壤淋溶淀积层大孔隙减少,染色比例迅速降低。母质层内土壤孔隙度更低,白水头中山黄棕壤母质层甚至没有染色。但是,竹林湾低山黄壤母质为花岗岩,土壤质地为多砾砂壤土(见表 2),直径 > 2 mm 的砾石含量在 40.6% ~ 62.3% 之间,染料下渗路径以直径较大的裂隙为主,不同发生层内均有较多裂隙,染色特征没有显著差异(见图 2)。

亚高山棕壤、中山黄棕壤、低山黄壤和弃耕地等 4 种不同类型土壤的同一发生层相比较,大老岭亚高山棕壤和竹林湾低山黄壤腐殖质层的染色比例显著大于弃耕坡地腐殖质层,与白水头中山黄棕壤差异不显著。淋溶淀积层染色比较,大老岭亚高山棕壤和竹林湾低山黄壤淋溶淀积层的染色比例显著大于白水头中山黄棕壤和罗家岩弃耕坡地,棕壤与黄壤以及黄棕壤与弃耕地底土层染色比例差异不显著。母质层染色特征比较,竹林湾低山黄壤染色比例显著大于大老岭亚高山棕壤,而白水头中山黄棕壤和罗家岩弃耕地的母质层没有染色现象。可见,与森林土壤相比,罗家岩弃耕地土壤层染料下渗深度较浅,最大深度仅 36 cm,地表耕作层和犁底层的染色比例较低。这因为弃耕地表土层植物根系少,土壤容重较大,土壤质地粗,大孔隙数量较少(见图 2)。

### 3.3 土壤大孔隙结构的成因

表 4 不同垂直带内土壤各发生层染色特征分析

Table 4 Dye characteristic analysis of different soil layers in different altitudinal zones

土壤样 地类型	发生层	亚高山大老岭棕壤			中山白水头黄棕壤		低山竹林湾黄壤			低山罗家岩弃耕坡地	
		A	BE	C	A	BE	A	BE	C	P	B
亚高山 大老岭棕壤	A	/	*	**	N		N			**	
	BE	*	/	**		**		**			**
	C	**	**	/					**		
中山白水头 黄棕壤	A	N			/	**	N			N	
	BE		**		**	/		**			N
低山 竹林湾黄壤	A	N			N		/	N	N	*	
	BE		N			**	N	/	N		**
	C			**			N	N	/		
低山罗家岩 弃耕坡地	P	**			N		*			/	*
	B		**			N		**		*	/

注: A 为腐殖质层、BE 为淋溶淀积层、C 为母质层、P 为耕作层、B 为底土层; \*\* 表示在 0.01 的水平上差异显著, \* 表示在 0.05 的水平上差异显著, N 表示差异不显著。



土壤剖面染色面积和染料下渗深度,受土壤孔隙的大小、密度和分布等影响。动植物活动、土壤剖面熟化度、土壤自身的收缩与膨胀和人类活动等,都会使土壤的孔隙结构发生变化。实验选取的样地处于大老岭-邓村地区的不同垂直带内,植被类型和土壤质地差异大,土壤大孔隙结构成因不同。

### 3.3.1 植物根系和裂隙

植物根系产生的根孔是土壤孔隙中常见的一种,森林土壤中这种孔隙普遍存在,而且直径0.3 mm以上的大孔隙较多。大老岭样地原生阔叶林覆盖度高,植物根系发达,分布十分密集,剖面挖掘时发现直径5~25 mm的根系多达13根,此类根孔在白水头灌丛幼林样地同样较多(见图2)。根系的水平与垂直延伸使土壤中的孔隙形成交错网络,成为亮蓝溶液入渗的主要通道<sup>[15]</sup>。裂隙是土壤孔隙的另一存在形式,土壤在不同的发生阶段,裂隙存在差异。自成土母质、原始土壤至成熟土壤,有机质的含量不断提高,表层的腐殖质层和淋溶层等成熟阶段较高的土壤层逐渐增厚,裂隙的密度也随之降低。阔叶林覆盖的大老岭样地土壤裂隙较少,而针叶林为主的白水头和竹林湾样地土壤裂隙较多,土壤入渗表现为裂隙流(见图2)。山地黄壤地表20 cm以下亮蓝溶液主要沿母质裂隙下渗,最大染料下渗深度可达82 cm。

### 3.3.2 土壤发育程度

森林土壤发生层可分为腐殖质层、淋溶层、淀积层和母质层,由前文分析可知土壤不同发生层染色特征差异显著(见表4)。3种森林土壤的垂直剖面上染色面积较大的区域集中在腐殖质层和淋溶淀积层,母质层极少有亮蓝溶液的渗入,熟化度最高的腐殖质层染色面积最大。各种森林土壤剖面染色总量比较,土壤发育程度(剖面分异)最高的阔叶林山地棕壤染色比例最高。这与熟化度不同的土壤或土层内孔隙度密切相关,发育程度高的土壤或土层内动植物活动多,土壤疏松,孔隙度更高。

### 3.3.3 土地耕作

农业耕作一方面使自然土壤的表层变得疏松,但另一方面破坏了原有的孔隙结构,特别使森林土壤中较大的根孔和裂隙减少,耕作层以下土壤孔隙度大大降低。罗家岩弃耕地为弃耕3~4 a的红薯地,地表植被为蒿草,密度为76株/m<sup>2</sup>。草本植物根系细小,伸展深度很浅,主要分布在0~15 cm的耕作层表层,土壤中较大的根孔极少。另外,弃耕地

土壤结构破碎,基本不存在土壤裂隙,大孔隙数量远小于森林土壤(见图2)。实验结果显示,草本弃耕坡地的亮蓝染色面积小,入渗深度浅,主要在地表耕作层。

## 4 结论与讨论

森林土壤大孔隙结构的优先流效应是森林生态系统涵养水源、调蓄径流、保持水土的主要途径。通过亮蓝溶液入渗示踪法对三峡库区大老岭-邓村地区山地不同垂直带内的土壤大孔隙结构进行了实验研究,得出以下主要结论。

1. 三峡库区山地不同垂直带内植被-土壤类型的差异,使得土壤剖面染色特征存在不同。大老岭亚高山阔叶林下山地棕壤剖面染色面积比最高,其次是中山灌丛幼林黄棕壤和低山针叶林黄壤。由于母质裂隙较深,低山针叶林黄壤剖面的染料下渗深度最大,而亚高山棕壤则因表层腐殖质对入渗溶液的吸持,染料下渗深度较小。草本覆盖的弃耕坡地下土壤结构性差,根孔和裂隙少,染色面积比和深度显著低于森林土壤。

2. 不同垂直带内森林土壤剖面染色特征在各发生层间呈现不同的变化趋势。大老岭亚高山棕壤的大孔隙结构自腐殖质层至母质层呈现逐渐降低的趋势,各发生层的染色比例存在显著差异。由于剖面内大孔隙以裂隙为主,低山针叶林黄壤剖面内各发生层的染色比例没有显著差异。白水头中山黄棕壤与罗家岩弃耕坡地的剖面染色比例随深度的增加迅速降低,各发生层间差异显著,亮蓝染色区域集中在土壤表层,母质层几乎无染色现象。

3. 植物根孔、母质裂隙是三峡库区山地森林土壤大孔隙形成的主要原因。土壤有机质丰富,风化度高的腐殖质层和淋溶淀积层内大孔隙结构以根孔为主,质地较粗、发育程度低的母质层内大孔隙以裂隙为主。此外,土地耕作对土壤大孔隙结构的破坏严重,与森林土壤比较,弃耕坡地的土壤大孔隙显著减少。

山地生态系统的垂直地带性是影响森林土壤大孔隙的数量与剖面分布的重要因素。研究区内气候垂直梯度变化明显,基带气候温和湿润,具有亚热带季风气候特征,中山和亚高山地带气候冷湿,多云雾,空气湿度较大<sup>[13]</sup>。随气候的垂直梯度变化,植被-土壤类型分异明显,基带为常绿阔叶林黄壤,海

拔 700 ~ 1 000 m 的低山为针叶林山地黄壤,海拔 1 000 ~ 1 600 m 的中山为灌丛幼林山地黄棕壤,海拔 1 600 m 以上的亚高山为阔叶林山地棕壤。气候特征和植被类型的差异,使得各垂直带内植物根系密度、土壤发育程度以及人为干扰强度变化显著。植物根孔、裂隙等大孔隙结构存在明显差异,森林土壤调蓄径流和保持水土的生态功能随之变化。因此,在生态环境脆弱的山地丘陵区开展不同垂直带内土壤大孔隙特征及其优先流效应的研究,对山区的水土保持和生态重建具有实际意义。

致谢:感谢湖北省宜昌市大老岭林场邓友明场长对野外实验的支持和帮助。

### 参考文献(References)

- [1] Luxmoore R J. Micro - meso - and macroporosity of soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 671 - 672
- [2] Liu Wei, Qu Ziqing, Ying Peifeng. Soil macropore and its studying methodology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(3): 465 - 468 [刘伟, 区自清, 应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 465 - 468]
- [3] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resource Research, 1982, 18(5): 1311 - 1325
- [4] Zhang Hongjiang, Cheng Yun, Shi Yuhu, et al. Soil pipe characters and its influence to pipe flow in forest land at the granite slope in the Three - Gorge of the Yangtze river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(1): 55 - 60 [张洪江, 程云, 史玉虎, 等. 长江三峡花岗岩坡面林地土管特性及其对管流的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 55 - 59]
- [5] Shi Hui, Liu Shirong. The macroporosity properties of forest soil and its eco - hydrological significance[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(5): 533 - 539 [石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. 山地学报, 2005, 23(5): 533 - 539]
- [6] Xiao Wenfa, Lei Jingpin. Spatial distribution, disturbance and restoration of forests in the Three Gorges reservoir region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, 13(2): 138 - 144 [肖文发, 雷静品. 三峡库区森林植被恢复与可持续经营研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(2): 138 - 144]
- [7] Xie Zongqiang, Chen Weilie. The remaining evergreen broadleaved forest and its significance in the Three Gorges reservoir area[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(5): 422 - 427 [谢宗强, 陈伟烈. 三峡库区残存的常绿阔叶林及其意义[J]. 植物生态学报, 1998, 22(5): 422 - 427]
- [8] Yang Hailong, Zhu Jinzhao, Bi Lidong. Soil permeability capability research on Yangtze River Three Gorges reservoir area forest watershed ecosystem[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 63 - 69 [杨海龙, 朱金兆, 毕利东. 三峡库区森林流域生态土壤渗透性能的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 63 - 69]
- [9] Wang Pengcheng, Xiao Wenfa, Zhang Shoucong, et al. Study on soil infiltration in some main vegetation types in Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 51 - 55 [王鹏程, 肖文发, 张守攻, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 51 - 55]
- [10] Shi Hui, Chen Fengqin, Liu Shirong. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 507 - 512 [石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分流出速率的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 507 - 512]
- [11] Suzanne E Allaire, Stéphanie Roulier, Allan J Cessna. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378: 179 - 204
- [12] Chen Fengqin, Li Yuguo, Shi Xiujuan. A study on the preferential flow in the forest land by using Methylene Blue Tracer[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 285 - 289 [陈凤琴, 李玉国, 史秀娟. 林地土壤优势流的染色方法研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 285 - 289]
- [13] Shen Zehao, Zhang Xinshi, Jin Yixing. A vertical gradient analysis of the flora of Dalaoling Mountain in the Three Gorges region, China[J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 2001, 39(3): 260 - 268 [沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭植物区系的垂直梯度分析[J]. 植物分类学报, 2001, 39(3): 260 - 268]
- [14] Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Method of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978 [中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978]
- [15] Wang Wei, Zhang Hongjiang, Chen Jinhua, et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broad-leaved forest soils of Simian Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1217 - 1223 [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]
- [16] Qiu Lin, Wu Huashan, Chen Xiaomin, et al. Quantitative study on soil macropores by dye tracing and image processing[J]. Soils, 2007, 39(4): 621 - 626 [邱琳, 吴华山, 陈效民, 等. 利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究[J]. 土壤, 2007, 39(4): 621 - 626]
- [17] Sheng Feng, Wang Kang, Zhang Renduo, et al. Study on heterogeneous characteristics of soil water flow in field by dye tracing method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 101 - 108 [盛丰, 王康, 张仁铎, 等. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 101 - 108]



## Forest Soil Macropore of Different Altitudinal Zones with Dye Tracing Method in Three Gorges Reservoir Area

LIU Muxing ,WANG Wende ,ZHANG Hailin ,DU Wenzheng

( College of Urban and Environment Science ,Huazhong Normal University ,Wuhan 430079 ,China)

**Abstract:** Preferential flow in soil macropore was principle formation of forest function in runoff adjustment and soil and water conservation. Through dye tracing and image analysis ,we studied soil macropore characteristics of different altitudinal zones in Three Gorges Reservoir area from Dalaoling to Dengcun of Yichang City. The results indicated that the number of soil macropore varied greatly at different altitudinal zones ,and the distribution of dyed area in soil profile also show different modes ,which were caused by the vertical gradient changes of forest vegetation and soil type. Under the mountain brown earth covered with subalpine broad-leaf forest ,the ratio between dyeing area and total soil profile is 62.3% ,but dyed zone concentrate on the Humus layer with more roots ,and the dyed depth is shallow. The dyeing area of yellow earth covered with low-mountain conophorium was smaller than that of broad-leaf forest ,but the dyed depth is deeper ,even reached 69.5 cm. Macropores existed not only in the Humus layer , but also in the leaching illuvial layer and the parent material layer ,and no significant difference of dyeing area proportion between different layers. Dyeing area and depth of yellow brown earth covered with young thickets forest in mid-mountain were even smaller ,and dyeing area of Humus layer was significantly larger than that of leaching illuvial layer ,even no dyeing appearance in parent material layer. Compared with three kinds of forest soil ,the dyeing depth and dyeing area of the abandoned farmland in low-mountain were significantly lower ,and dyed zone concentrate in the surface plowing layer. Root channels ,parent material fissures ,development degree of soil and agricultural cultivation are the main reasons which caused the difference of soil macropore characterist between different forest soils under distinct altitudinal zones.

**Key words:** soil macropor; dye tracing; Brilliant Blue; altitudinal zone; Three Gorges Reservoir area