

文章编号: 1108-2786-(2015)1-1-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000001

# 植被发育斜坡土体大孔隙分布特征的 染色示踪法研究

张家明<sup>1,2</sup> 徐则民<sup>1</sup> 李峰<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学土木工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘 要:** 植被发育斜坡土体中广泛存在由各种大孔隙组成的大孔隙网络系统, 其分布特征影响斜坡水文行为和孔隙水压力场, 对斜坡稳定性有重要影响。运用亚甲基蓝溶液分别在木本植被群落斜坡和草本植被群落斜坡土体进行染色示踪渗透试验。通过对垂直剖面大孔隙分布模式的分析和对整个试验区大孔隙的深度分布的统计分析, 研究大孔隙分布的非均匀特征。研究结果表明: 1. 大孔隙在垂直方向和横坡方向上的分布都表现出非均匀性, 顺坡方向表现出明显的变异性; 2. 大孔隙分布表现出显著的各向异性特征, 横坡方向的非均匀性比顺坡方向的非均匀性显著; 3. 草本植被群落斜坡土体大孔隙分布的非均匀性和变异性比木本植被群落斜坡显著; 4. 在 100 cm × 100 cm 的尺度下研究大孔隙分布特征是合理的。

**关键词:** 植被发育斜坡; 染色示踪渗透试验; 大孔隙; 互相关函数分析; 异质性

**中图分类号:** P642.1

**文献标志码:** A

在潮湿气候区, 植被发育斜坡土体中广泛存在各种大孔隙, 如动物洞穴、根系通道、根-土界面、干缩裂缝等<sup>[1]</sup>。在强降雨条件下, 多山国家的潮湿气候区植被发育斜坡流域经常发生群发性滑坡、泥石流灾害<sup>[2]</sup>。大孔隙可以加快降水入渗、提高渗流场对降雨过程的敏感度、促进斜坡水循环, 无论从岩土体长期演化还是从滑坡灾害激发的角度看, 大孔隙对斜坡稳定性都是不利的<sup>[3]</sup>。大孔隙分布特征影响斜坡土体孔隙水压力场的时空演变。许多降雨诱发型植被发育斜坡灾害调查表明, 大孔隙产生的优先流是此类斜坡灾害发生的主要影响因素<sup>[4-6]</sup>。因此, 研究大孔隙分布特征对植被发育斜坡灾害机理研究具有重要理论意义。

染色示踪剂法是辨识土体大孔隙分布的重要而有效手段。染色剂溶液经过的区域, 土体被染色剂染成明显不同于土体本身的颜色, 从而将染色剂溶

液经过的区域与没有经过的区域区别开来。根据染色原理, 染色剂可分为两类: 第一类通过本身的作用直接对土体进行染色, 如亚甲基蓝<sup>[7]</sup>和亮蓝<sup>[8]</sup>等; 第二类本身不能直接染色, 需要附加的指示剂与染色剂进行显色反应才能显示染色剂溶液经过的区域, 如碘离子<sup>[9]</sup>、溴离子<sup>[8]</sup>。与实际降水在土体中的流动性相比, 亚甲基蓝、亮蓝溶液的流动滞后性相对显著, 而碘离子、溴离子溶液的流动性与实际降水相似。因此, 第一类染色剂常用于辨识大孔隙分布, 而第二类染色剂常用于辨识水流路径分布<sup>[9-10]</sup>。

植被发育斜坡与裸坡的显著差异是其地表面存在枯枝落叶层, 但目前大多数植被发育斜坡土体染色示踪试验都剔除枯枝落叶层<sup>[11]</sup>, 可能导致大孔隙在降雨模拟过程中被土粒堵塞, 与实际情况相比, 试验结果可能低估了大孔隙分布。此外, 既有大孔隙分布特征研究主要集中于染色面积分布方面<sup>[12]</sup>, 其

收稿日期(Received date): 2014-06-05; 改回日期(Accepted): 2014-07-10。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1033601), 昆明理工大学自然科学基金(KKSY201406009)。[Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China with the Natural Science Foundation of Yunnan (U1033601) and The Natural Science Foundation of Kunming University of Science and Technology(KKSY201406009).]

作者简介(Biography): 张家明(1984-), 男, 讲师, 博士, 博士后, 主要从事斜坡水文学研究。[Zhang Jiaming (1984-), male, lecturer, doctor, post doctorate, mainly engaged in hillslope hydrology.] E-mail: zjm\_engeo@163.com, Tel: 13888442865

主要描述大孔隙面积随入渗深度的变化,不能有效地描述大孔隙在不同方向上的异质性。

本文采用亚甲基蓝染色剂,结合降雨模拟试验,在两种不同植被群落斜坡土体开展染色示踪试验,试验过程尽量避免对枯枝落叶层的扰动。基于土体染色剖面,研究不同植被群落下土体大孔隙分布的异质特征;运用统计学方法研究大孔隙分布在顺坡方向、横坡方向、垂直方向及不同试验之间的变异特征;运用互相关函数分析大孔隙非均匀分布的方向性和变异性。

## 1 现场染色示踪渗透试验

### 1.1 试验区特征

试验区位于金沙江二级支流螳螂川流域的马卡山,地理位置为  $24^{\circ}51'34'' \sim 24^{\circ}51'55''N$ ,  $102^{\circ}52'04'' \sim 102^{\circ}52'20''E$ ,海拔为  $2\,000 \sim 2\,085\text{ m}$ 。试验区土层厚度为  $50 \sim 100\text{ cm}$ ,往下为不同风化程度的二叠纪峨眉山玄武岩。试验区气温为  $0^{\circ}\text{C} \sim 31.5^{\circ}\text{C}$ ,平均年降雨量  $1\,001\text{ mm}$ ,最小、最大和平均月降雨量分别为  $13\text{ mm}$ (2月和12月)、 $211\text{ mm}$ (7月)和  $83.4\text{ mm}$ 。

马卡山主要有两种类型的植被群落,一种为木本植被群落,另一种为草本植被群落。马卡山植被覆盖度为  $90\%$ ,其中木本植被群落基盖度为  $0.30\%$ ,草本植被群落基盖度为  $1.14\%$ 。木本植被群落的主要物种有小雀花(*Campylotropis polyantha* (Franch.) Schindl.)、云南松(*Pinus yunnanensis*

Franch.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast.)、细齿叶桉(*Eurya nitida* Korthals.)、银荆(*Acacia dealbata* Link.)、沙针(*Osyris wightiana* Wall.)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides* Schott.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume.);草本植被群落的主要物种有狗牙根[*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.],白草(*Pennisetum flaccidum* Griseb.)、蔗茅(*Eriarthus rufipilus* (Steud.) Griseb.)、野艾蒿(*Artemisia laandulaefolia* DC.)、黄背草[*Themeda japonica* (Willd.) Tanaka.],牛至(*Origanum vulgare* Linn.)、丝茅[*Imperata koenigii* (Retz.) Beauv.]。

### 1.2 试验步骤

项目组于2011年12月至2012年3月,在木本植被群落斜坡(试验1)和草本植被群落斜坡(试验2)开展染色示踪渗透试验,两个试验的距离约为  $800\text{ m}$ 。两个试验的渗透量、尺度规模和示踪剂完全相同,试验场地土体的物理、化学参数如表1所示。

染色示踪渗透试验的设计方案如图1所示。第一步是固定好木框。首先在坡体表面沿着  $100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$  正方形开挖深度为  $20\text{ cm}$ 、宽度为  $3\text{ cm}$  的凹槽,然后将尺寸为  $100\text{ cm}$ (长)  $\times 100\text{ cm}$ (宽)  $\times 25\text{ cm}$ (高)的正方形木框放入凹槽中,最后用土将木框外侧密封并用木锤击实,以防止表土层发生侧向水流。

第二步是开展染色示踪渗透试验。首先在木框前端(下坡方向)  $1\text{ m}$  处开挖一个宽  $1.4\text{ m}$ 、长  $1.8\text{ m}$  和深为  $1\text{ m}$  的深沟,在沟壁从地表面向下在  $0 \sim 10\text{ cm}$ 、 $10 \sim 20\text{ cm}$ 、 $20 \sim 30\text{ cm}$ 、 $30 \sim 40\text{ cm}$ 、 $40 \sim 50\text{ cm}$  范

表1 两个试验区土体物理、化学性质

Table 1 Selected physical and chemical properties of the soil at two experimental plots

试验区 Test area	深度 Depth	有机质 Organic matter	孔隙率 Porosity	容重 Bulk density	初始含水率 Initial moisture content	颗粒大小分布 Particle size distribution /%			
	/cm	/(g/kg)	/%	/(g/cm <sup>3</sup> )	/%	>2 mm	0.075~2 mm	0.005~0.075 mm	<0.005 mm
试验1	0~10	63.6	68.72	1.00	20.14	37.2	9.6	37.1	16.1
	10~20	19.4	59.41	1.35	25.79	32.6	6.5	41.9	19.0
	20~30	13.1	57.44	1.47	30.73	33.1	6.1	40.5	20.3
	30~40	9.8	55.61	1.54	30.81	34.6	5.9	38.1	21.4
	40~50	4.9	57.69	1.46	30.07	35.1	5.6	36.5	22.8
试验2	0~10	39.7	66.85	1.07	22.90	14.1	15.2	50.6	20.1
	10~20	17.6	57.56	1.45	29.28	16.9	13.3	48.4	21.4
	20~30	9.8	57.00	1.47	29.16	21.9	13.1	42.3	22.7
	30~40	5.1	58.22	1.44	29.83	21.5	13.2	41.2	24.1
	40~50	3.3	58.41	1.43	30.41	22.3	12.5	40.1	25.1

围内,在每层取一个  $1\ 600\text{ cm}^3$  ( $10\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ) 土样测定根系质量密度,其定义为根系质量( $g$ )与土体总质量( $kg$ )的比值,单位为  $g/kg$ 。然后将  $250\text{ L}$  浓度为  $1.5\text{ g/L}$  的亚甲基蓝溶液在  $5\text{ h}$  内均匀地喷洒在木框内,即降雨模拟区。两个试验过程中均没有出现地表积水现象。喷洒完成后,用不透明塑料薄膜和树枝叶遮盖试验区以防止水分蒸发。

第三步是开挖垂直剖面 and 拍照。喷洒完亚甲基蓝溶液  $24\text{ h}$  后,在每个试验区从深沟向上坡方向用铁锹和手动工具开挖垂直土体剖面,共开挖  $3$  个剖面,且剖面间距离为  $30\text{ cm}$ ,剖面垂直于斜坡倾向。开挖完成后,用小刀轻轻地削平剖面以防止染色剂拖尾,并用毛刷清除开挖过程中粘附在土体剖面上的松散颗粒。最后用数码相机拍摄染色剂染色的土体剖面,照片的分辨率是  $3\ 500 \times 2\ 300$  像素,把照片下载到电脑后用软件对照片进行最后处理。

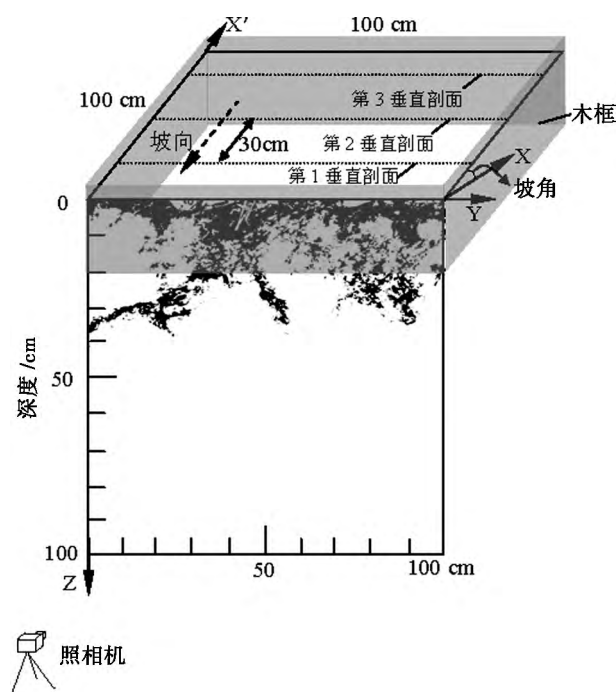


图1 试验装置简图

Fig.1 Diagram of the experimental setup

### 1.3 图像处理

染色示踪渗透法将染色区域定义为大孔隙,非染色区域定义为基质孔隙<sup>[10]</sup>。基于染色剖面照片,根据以下步骤获得染色覆盖率:1. 采用 Photoshop CS2<sup>®</sup>几何校正图像,输出像素大小不变的 RGB 模式的 JPG 格式图像文件;2. 运用 Matlab 7.0 图像处理工具箱将 RGB 模式图像转换为灰度图像,输出

TIFF 格式图像文件,一个像素表示  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ;3. 使用 Photoshop CS2<sup>®</sup>对图像进行曝光阈值处理,染色区域变成黑色,其他区域变成白色;4. 采用 Photoshop CS2<sup>®</sup>将图像二值化,0 代表黑色,225 代表白色;5. 运用 Image-Pro Plus 6.0 提取图像位图数值矩阵,存入 Excel 文件。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 垂直(Z)方向上的分布特征

从 3 个方面来分析:大孔隙分布模式、染色覆盖率和孔隙分布最大深度。图 2 给出两个试验 6 个剖面的大孔隙分布模式。可以看出,两种植被群落下土体大孔隙分布模式非常复杂,而且差异显著。试验 1 所有剖面的大孔隙主要分布在  $0 \sim 30\text{ cm}$  的深度,而试验 2 的第 1 剖面的大孔隙也主要分布在  $0 \sim 30\text{ cm}$  的深度,但其他两个剖面的大孔隙主要分布在  $0 \sim 10\text{ cm}$  深度。所有剖面的大孔隙在  $0 \sim 5\text{ cm}$  深度范围均匀分布。受到植被根系分布形态等因素的共同影响,在  $5\text{ cm}$  以下深度范围,大孔隙呈网络结构模式和局部聚集模式(图 2,试验 2-3)。说明大孔隙不是一直保持铅垂向下展布的,而是在三维空间中相互交织形成三维网络结构。

图 3 给出两个试验 6 个剖面的染色覆盖率随深度的分布形式。染色覆盖率定义为指定深度的被染色的水平像素点数与总水平像素点数( $1\ 000$ )的比值。可以看出,染色覆盖率随深度增加而减小,但不是单调递减,而是在局部区域会出现染色覆盖率随深度增加而增大。说明大孔隙在垂直方向的分布是不均匀的。在  $0 \sim 40\text{ cm}$  深度范围,试验 1 和试验 2 的 3 个剖面的染色覆盖率分别为  $0.119\ 3$ 、 $0.185\ 7$ 、 $0.160\ 2$  和  $0.162\ 9$ 、 $0.055\ 8$ 、 $0.076\ 2$ (表 2),标准偏差和变异系数分别为  $0.033\ 5$ 、 $0.056\ 9$  和  $0.216\ 0$ 、 $0.578\ 7$ 。说明试验 2 顺坡方向大孔隙分布异质性比试验 1 显著。在  $0 \sim 10\text{ cm}$ 、 $10 \sim 20\text{ cm}$ 、 $20 \sim 30\text{ cm}$ 、 $30 \sim 40\text{ cm}$  深度,试验 1 和试验 2 的染色覆盖率分别为  $0.418\ 8$ 、 $0.153\ 1$ 、 $0.048\ 2$ 、 $0.000\ 1$  和  $0.293\ 9$ 、 $0.073\ 3$ 、 $0.045\ 9$ 、 $0.000$ 。在对应深度范围,试验 1 和试验 2 的根系质量密度分别为  $26.94\text{ g/kg}$ 、 $19.14\text{ g/kg}$ 、 $8.55\text{ g/kg}$ 、 $5.34\text{ g/kg}$  和  $10.38\text{ g/kg}$ 、 $5.86\text{ g/kg}$ 、 $1.25\text{ g/kg}$ 、 $0.52\text{ g/kg}$ ,两个试验的根系质量密度差异显著( $P < 0.05$ )。染色覆盖率与根系质量密度均呈高度正相关关系( $R_1 = 0.958$ ,  $R_2 =$

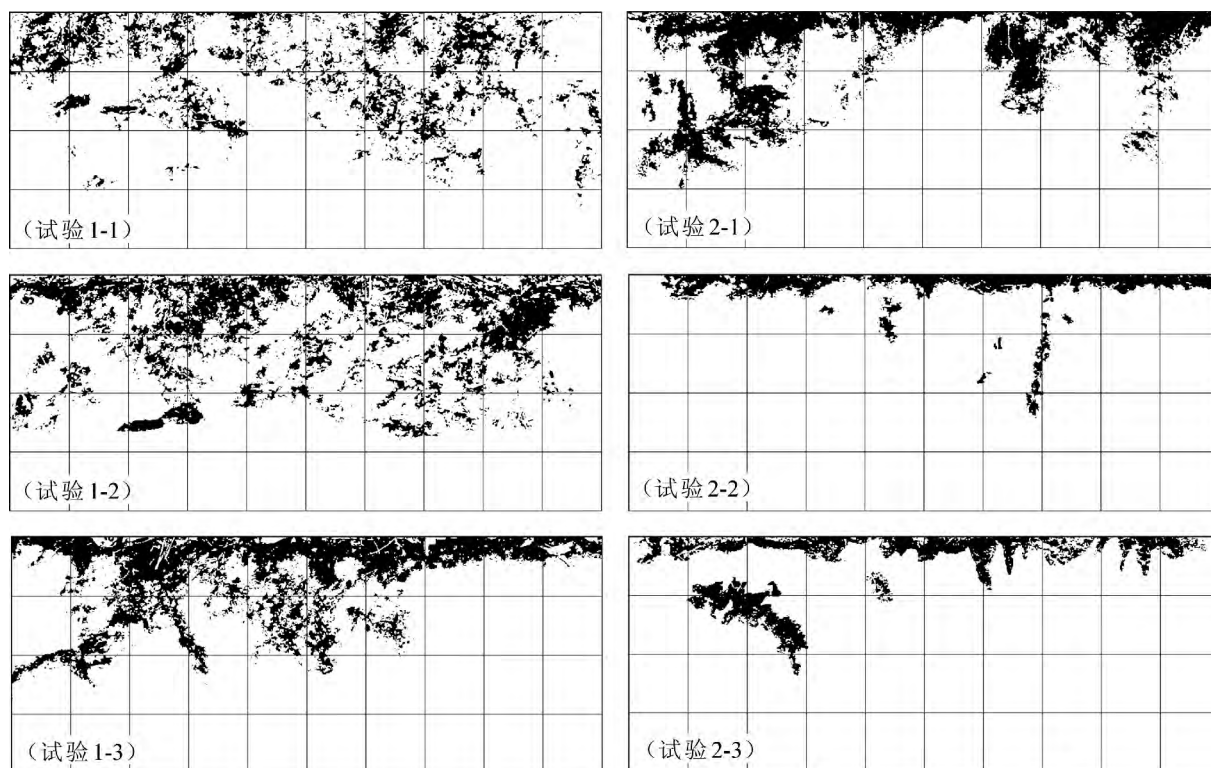
0.948) ,但试验 1 的根系对染色覆盖率的影响程度强于试验 2 (  $F_1 = 22.190$  ,  $P_1 = 0.042 < 0.05$ ;  $F_2 = 17.715$  ,  $P_2 = 0.052 > 0.05$  ) 。说明植被根系对大孔隙分布的影响随根系规模增大而逐渐显著。

表 2 给出各试验剖面的大孔隙分布最大深度 (  $Z_{\max}$  ) 以及染色面积  $\geq 0.075$ 、0.50 和 0.25 的深度值 ( 即  $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.50}$ 、 $Z_{0.25}$  ) 。试验 1 和试验 2 三个剖面

的大孔隙分布最大深度分别为 32.9 cm、28.0 cm、27.4 cm 和 29.9 cm、24.3 cm、23.7 cm ,两者差异显著 (  $P < 0.01$  ) 。试验 2 的  $Z_{0.75}$ 、 $Z_{0.25}$  比试验 1 大 ,而试验 2 的  $Z_{0.50}$  比试验 1 小 ,说明试验 2 的大孔隙分布异质性比试验 1 显著。

## 2.2 横坡 (Y) 方向上的分布特征

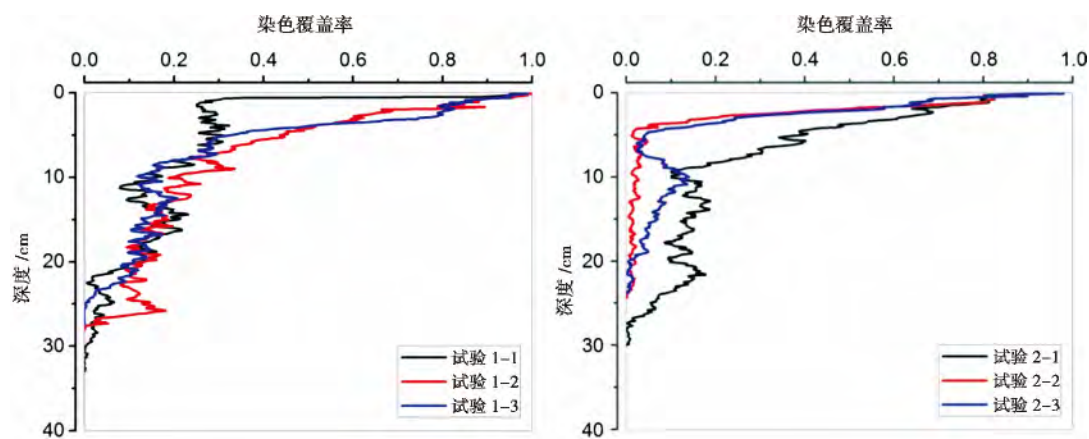
如图 2 所示 ,大孔隙分布最大深度以上的土体



“试验 1-1”表示试验区 1 的第 1 个染色剖面 ,依此类推 ,网格尺寸是 10 cm × 10 cm

图 2 土体典型染色剖面模式

Fig. 2 Typical dye stained patterns for the profiles



“试验 1-1”表示试验区 1 的第 1 个染色剖面 ,依此类推

图 3 两个试验染色覆盖率与深度的关系

Fig. 3 Dye stained coverage vs. depth of the two experiments

表 2 各染色剖面的相关计算值  
Table 2 Calculated results for dye profiles

染色剖面 Staining profile	染色覆盖率 Staining coverage	$Z_{\max} / \text{cm}$	$Z_{0.75} / \text{cm}$	$Z_{0.5} / \text{cm}$	$Z_{0.25} / \text{cm}$	最大实际深度 Actual maximum depth/cm	$C_{ua} / \%$	变异系数 Coefficient of variation
试验 1-1	0.119 3	32.9	0.5	0.6	7.5	12.6	45.50	0.555 1
试验 1-2	0.185 7	28.0	1.9	4.2	7.6	13.5	32.68	0.386 8
试验 1-3	0.160 2	27.4	3.1	3.9	7.6	17.6	44.83	0.541 5
试验 2-1	0.162 9	29.9	1.4	3.7	7.7	18.0	57.33	0.675 0
试验 2-2	0.055 8	24.3	1.2	1.9	2.7	9.1	43.33	0.631 2
试验 2-3	0.076 2	23.7	0.6	2.1	3.0	9.8	57.03	0.718 8

并非完全被染色,因此引入大孔隙分布实际深度<sup>[13]</sup>

$$h_a(y) = \sum_{i=1}^k \beta(y,z) \Delta h_i$$

式中  $h_a(y)$  为  $y$  位置的大孔隙分布实际深度 (cm), 如果垂直剖面的位置 ( $y,z$ ) 被染色  $\beta(y,z) = 1$ , 反之  $\beta(y,z) = 0$ ;  $\Delta h_i$  为相邻两像素表示的间距, 在本文  $\Delta h_i = 0.1 \text{ cm}$ ;  $k$  为  $x$  位置的大孔隙分布最大深度对应的像素数目。

大孔隙实际深度分布非均匀系数定义为<sup>[13]</sup>

$$C_{ua} = \frac{\sum |h_a(y,z) - h_a|}{Nh_a} \times 100\%$$

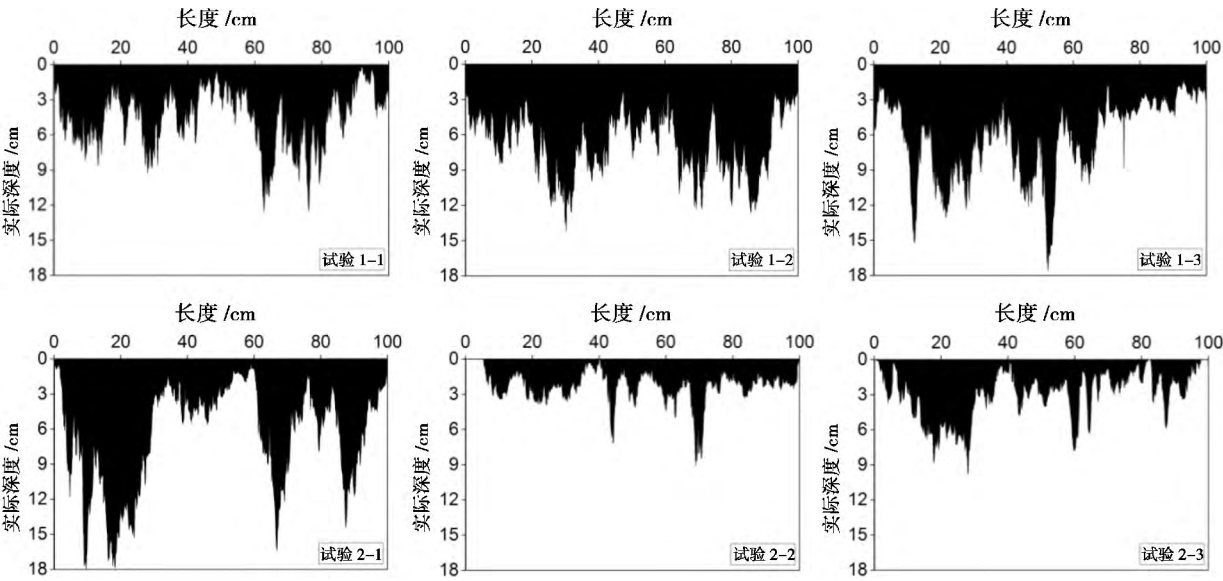
式中  $C_{ua}$  为大孔隙实际深度分布非均匀系数;  $h_a$  为实际深度平均值 (cm);  $N$  为  $Y$  方向的像素总数, 本文  $N = 1\,000$ 。

图 4 给出两个试验 6 个剖面的大孔隙实际深度在  $Y$  方向的分布。表 2 给出最大实际深度和实际深度分布的非均匀系数、变异系数。可以看出, 在横坡

方向, 试验 1 的最大实际深度总体大于试验 2, 而试验 2 的非均匀系数和变异系数大于试验 1。说明大孔隙实际深度分布在横坡方向表现出显著的非均匀特征, 而且顺坡方向也表现出明显的变异性, 试验 2 的非均匀特征和变异性比试验 1 显著。

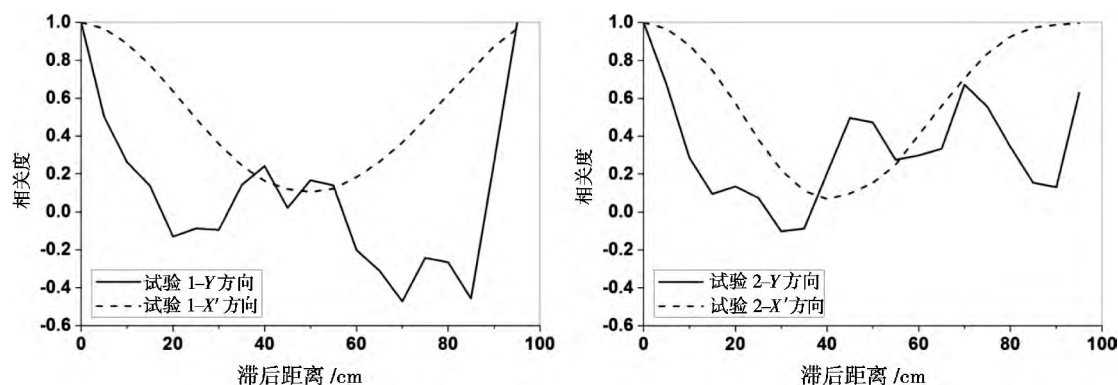
2.3 坡表面 ( $X,Y$ ) 上的分布特征

将每个剖面上的实际深度在  $Y$  方向每 5 cm 上平均, 平均后每个剖面上形成 20 个条带矩形, 矩形宽 5 cm, 高为平均实际深度。沿  $X'$  方向有 3 个剖面, 剖面间距为 30 cm, 基于既有已知剖面的平均实际深度分布, 以 5 cm 为间距, 采用 Matlab 进行二次插值处理。将每个试验的坡表面离散成 400 个面积为 5 cm × 5 cm 的正方形网格, 假设每个正方形网格内的各点的实际深度相等, 等于该网格位于  $X' = i$  ( $i = 0, 5, \dots, 95 \text{ cm}$ ) 剖面上的一条边上的平均实际深度。



“试验 1-1”表示试验区 1 的第 1 个染色剖面, 依此类推

图 4 在横坡方向的实际深度分布  
Fig.4 Actual depths along Y axes



“试验 1-Y 方向”表示试验区 1 的实际深度分布在 Y 方向的相关度,依此类推

图 5 互相关函数曲线

Fig. 5 Cross-correlation curves

互相关函数表示大孔隙实际深度沿不同方向分布的相关程度,其中沿 Y 方向的计算结果用于比较各剖面横坡方向的实际深度非均匀程度,沿 X'方向的计算结果用于分析顺坡方向的非均匀程度<sup>[14]</sup>。将每个试验区域 400 个离散网格的平均实际深度分布用于计算实际深度在不同方向的互相关系数,计算结果如图 5 所示。结果表明,两个试验不同方向计算的互相关函数曲线的变化特征明显不同,说明两个试验的大孔隙分布存在明显的各向异性特征。两个试验沿 X'方向计算的互相关函数值明显大于沿 Y 方向计算的互相关函数值,说明大孔隙在横坡方向的非均匀程度明显大于顺坡方向的非均匀程度。

互相关函数曲线总是从滞后距离为 0、相关度等于 1(自相关)开始下降(互相关),经过一定滞后距离(即相关尺度)后达到一个平台值或曲线变化趋势发生逆转。相关尺度对应于大孔隙分布的可能最大宽度<sup>[15]</sup>。根据图 5 可以得出:试验 1 沿 Y 方向、X'方向大孔隙分布可能最大宽度分别为 20 cm、50 cm,试验 2 沿 Y 方向、X'方向大孔隙分布可能最大宽度分别为 15 cm、40 cm,沿 X'方向的宽度大于 Y 方向宽度,而且这些数值都 < 100 cm。说明在 100 cm × 100 cm 试验尺度研究大孔隙分布特征是可行的,大孔隙分布表现出明显的各向异性特征,试验 2 的非均匀程度较试验 1 显著。

### 3 总结

从大孔隙分布模式、染色覆盖率和大孔隙分布最大深度方面分析大孔隙在垂直方向(Z)上的分布

特征。结果表明,两种不同植被群落下斜坡土体大孔隙分布模式非常复杂,而且差异显著,分布模式非均匀性随深度增加而增大;染色覆盖率和大孔隙分布最大深度分析表明,大孔隙在垂直方向的分布是不均匀的,草本植被群落斜坡土体的顺坡方向大孔隙分布异质性比木本植被群落斜坡显著,植被根系对大孔隙分布的影响随根系规模增大而逐渐显著。

大孔隙实际深度沿横坡方向(Y)的分布在剖面内表现出显著的非均匀性,而且顺坡方向也表现出明显的变异性,草本植被群落斜坡土体的非均匀特征和变异性比木本植被群落斜坡显著。

根据互相关函数曲线的变化特征和大小关系,研究大孔隙分布的方向性(X'和Y方向)和变异性,并计算大孔隙分布可能最大宽度。结果表明,两个试验的大孔隙分布都存在明显的各向异性特征,横坡方向的非均匀程度比顺坡方向的非均匀程度显著,草本植被群落斜坡土体大孔隙分布非均匀程度比木本植被群落斜坡明显;在 100 cm × 100 cm 尺度下讨论大孔隙分布特征是可行性。

### 参考文献(References)

- [1] Zhang Jiaming, Xu Zemin, Pei Ying. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes[J]. Mountain Research 2012, 30(4): 439 - 449 [张家明, 徐则民, 裴银鸽. 植被发育斜坡非饱和带大孔隙[J]. 山地学报 2012, 30(4): 439 - 449]
- [2] Xu Zemin, Huang Runqiu. The response of the groundwater in vegetated slopes in mountainous catchments to heavy rain events [J]. Advances in Earth Science 2011, 26(6): 598 - 607 [徐则民, 黄润秋. 山区流域高盖度斜坡对极端降雨事件的地下水响应[J]. 地球科学进展 2011, 26(6): 598 - 607]
- [3] Xu Zemin. Vegetation and macropores in vadose zone of hill slopes [J]. Earth Science Frontiers 2007, 14(6): 134 - 14 [徐则民. 植

- 被与斜坡非饱和带大空隙[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 134 – 142]
- [4] Gattinoni P, Francani V. A tool for modeling slope instability triggered by piping [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology 2009, 56: 471 – 477
- [5] Anderson A E, Weiler M, Alila Y. et al. Dye staining and excavation of a lateral preferential flow network [J]. Hydrology and Earth System Sciences 2009, 13(6): 935 – 944
- [6] Bogner C, Bauer F, Trancóny W B, et al. Quantifying the morphology of flow patterns in landslide-affected and unaffected soils [J]. Journal of Hydrology 2014, 511: 460 – 473
- [7] Noguchi S, Nik A R, Kasran B, et al. Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia [J]. Journal of Forest Research, 1997, 2(2): 115 – 120
- [8] Nobles M M, Wilding L P, Lin H S. Flow pathways of bromide and Brilliant Blue FCF tracers in caliche soils [J]. Journal of hydrology 2010, 393(1): 114 – 122
- [9] Bogner C, Wolf B, Schlather M, et al. Analysing flow patterns from dye tracer experiments in a forest soil using extreme value statistics [J]. European journal of soil science 2008, 59(1): 103 – 113
- [10] Wang K, Zhang R. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine [J]. Journal of hydrology 2011, 397(1): 105 – 117
- [11] Yu Kai, Zhao Chuanyan, Jian Shengqi, et al. Soil macropore characteristics under typical vegetations and their affecting factors in Loss hilly region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(6): 67 – 74 [余凯, 赵传燕, 荐圣淇, 等. 黄土丘陵区典型植物种群下土壤大孔隙特征及其影响因素研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 67 – 74]
- [12] Zhang Jiaming, Xu Zemin. A dye tracer experiment to study macropore flow paths in unsaturated zone under different vegetation communities in Maka Mountain, China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition 2013, 43(6): 1922 – 1934 [张家明, 徐则民. 马卡山不同植被群落下非饱和带大孔隙流路径示踪试验 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(6): 1922 – 1934]
- [13] Xie Hua, Wang Kang, Zhang Renduo, et al. Characterizing uniformity of soil water movement by dye infiltration experiment [J]. Journal of Irrigation and Drainage 2007, 26(1): 1 – 4 [谢华, 王康, 张仁铎, 等. 土壤水入渗均匀特性的染色示踪试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 1 – 4]
- [14] Öhrström P, Persson M, Albergel J, et al. Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage [J]. Journal of Hydrology 2002, 257(1): 164 – 173
- [15] 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]

## Heterogeneous Characteristics of Macropores in Soil of Well Vegetated Slopes by Dye Tracing Method

ZHANG Jiaming<sup>1,2</sup>, XU Zemin<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Macropore network systems exist extensively in soil of well vegetated slopes. The distribution pattern of macropores influences the hydrologic behavior of and the pore water pressure field of well vegetated slopes, and macropores have great adverse impact on slope stability. Aqueous solution of methylene blue was chose and dye trace infiltration experiments were carried out in woody plant community slope and in herbaceous community slope, respectively. The heterogeneous characteristics of macropores distributions were analyzed using statistical method based on the dye stained profiles. The results show that: 1) the distribution of macropores exhibited distinct heterogeneity in vertical direction and in transverse direction, while the distribution of macropores exhibited distinct variability in vergence direction; 2) the distribution of macropores exhibited distinct anisotropy, the heterogeneity in transverse direction was more significant than in vergence direction; 3) the heterogeneity of and the variability of the distribution of macropores were higher for herbaceous community slope than for woody plant community slope; 4) it was reasonable to study the distribution characteristics of macropores at 100 cm × 100 cm scale.

**Key words:** well vegetated slopes; dye trace infiltration experiment; macropores; cross-correlation analysis; heterogeneity