

文章编号: 1008-2786-(2016)4-401-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000144

碘-淀粉显色试验研究植被发育斜坡非饱和带土体水流路径

张家明^{1,2} 李峰² 徐则民¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 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: 植被发育斜坡非饱和带土体中共同存在基质孔隙和大孔隙。为研究强降雨条件下植被发育斜坡非饱和带土体中水流路径分布模式及水流运动过程。在云南螳螂川流域的马卡山开展碘-淀粉显色示踪试验, 基于顺坡方向的垂直染色剖面, 采用经典 K 均值聚类算法和一般统计法研究水流路径分布特征。结果表明: 1. 水流路径分布是非均匀的, 顺坡方向的异质性比垂直方向显著, 湿润前锋面不是平面, 降雨入渗不是活塞式, Darcy 定律和 Richards 方程等均匀多孔介质水流理论不能完整地描述强降雨条件下植被发育斜坡非饱和带土体的水流运动过程; 2. 随着非饱和带土体深度增加, 水流从基质流渐变到优先流与基质流的过渡流, 深部土体以优先流为主; 3. 应该从三维流场方面对植被发育斜坡非饱和带土体中的水流运动过程进行精细描述。

关键词: 植被发育斜坡; 碘-淀粉显色试验; 经典 K 均值聚类算法; 优先流; 水流路径

中图分类号: P642.1 P642.2

文献标志码: A

在温湿气候区, 植被发育斜坡非饱和带土体中除存在基质孔隙外, 还广泛存在各种大孔隙, 如动物洞穴、根系通道、根-土界面、砾-土界面、团聚体间大孔隙和干缩裂缝^[1-3]。因此, 在长历时强降雨过程中, 入渗水在非饱和带土体中的运动共同存在缓慢基质流(达西流)和优先流。优先流促进降雨入渗, 提高地下水对降雨的响应速率, 诱发斜坡灾害^[4]。此外, 斜坡非饱和带土体及地表面的各种化学物质可通过优先流快速到达深层土体或地下水中, 则来不及被土体基质吸附或被植被利用, 造成地下水污染^[5]。优先流研究是土体水流运动机理从均质走向非均质领域的标志而成为山坡水文学目前的研究热点。

优先流诱发湿润前锋动力学不稳定^[6], 出现锋

面非水平、非平面, 甚至非连续, 导致入渗剖面的水流路径分布异质性非常显著。水流路径研究在水流运动研究中处于重要地位, 是评价优先流与基质流相互作用的基础, 对完善山坡水文和灾害理论及流域生态水文过程理论具有重要意义。

1 观测土体水流路途的方法

现场观测水流路径的方法有很多, 如染色示踪剂法、荧光成像法、探地雷达、核磁共振成像法、时域反射计法、射线扫描法、电阻率 X 线断层摄影术和单光子发射 X 线断层摄影术^[7]。其中, 染色示踪剂法是最盛行、经济、方便的方法^[7]。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

收稿日期(Received date): 2014-12-17; 改回日期(Accepted): 2015-04-07。

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), 云南省人培项目(KKSY201406009)和云南省自然科学基金(2014FD007)。[Project supported by the Joint key Funds of the National Natural Science Foundation of China with the Natural Science Foundation of Yunnan (U1033601), Science Foundation for Fostering Talents in Basic Research of the Natural Science Foundation of Yunnan (KKSY201406009) and the Natural Science Foundation of Yunnan (2014FD0007).]

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, Ph.D., post Ph.D. mainly engaged in hillslope hydrology.] E-mail: zjm_engeo@163.com, Tel: 13888442865

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^[2,8]和亮蓝^[9]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,故又称为显色示踪剂法,如碘离子^[10]、溴离子^[9]。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,第一类染色剂仅能用于辨识优先流路径,而第二类染色剂可用于辨识全局水流路径^[9-11],即优先流与基质流的双重流路径。

截止目前,植被发育斜坡非饱和带土体水流路径研究主要集中于采用第一类染色剂辨识优先流路径,而运用第二类染色剂可视化全局水流路径的研究相对较少,且大多数是定性讨论其分布特征。例如,张家明等^[2]选用亚甲基蓝染色剂研究马卡山草本和木本植被群落下优先流路径垂直剖面分布模式差异及土体有机质量含量、颗粒级配、根系密度对分布模式的影响;刘目兴等^[12]采用亮蓝染色剂研究三峡库区大老岭和夷陵地区不同垂直带内森林土体优先流路径垂直分布特征;Schwärzel等^[13]运用亮蓝染色剂可视化毛榉树根系对优先流路径的影响;No-bles等^[9]分别用亮蓝和溴离子研究美国德克萨斯州中部某植被发育斜坡土体优先流路径和全局水流路径,并定性分析不同微地形下水流路径差异;Bonger等^[10]综合运用亮蓝、碘离子和极值理论研究挪威云杉林下土体的水流路径;Hangen等^[14]选用碘化钾示踪剂研究德国科特布斯市附近某欧洲松林下土体的水流路径。但在农业土体方面,已有一些学者综合运用显色示踪试验和统计学理论研究水流路径分布异质性。比如,盛丰等^[15]采用碘化钾示踪剂法和分形特征参数定量评价入渗初始条件、边界条件对武汉某农业土体水流路径分布非均匀程度的影响;Wang和Zhang^[11]选用亮蓝和碘化钾示踪法、信息理论、分层聚类分析法研究水流路径分布异质性;Wang等^[16]综合采用亮蓝、氯化物和信息熵理论研究水流异质性。

本文采用碘化钾示踪剂,在马卡山植被发育斜坡开展碘-淀粉显色示踪试验,试验过程尽量避免对枯枝落叶层的扰动,试验获得顺坡方向的垂直染色剖面。基于染色剖面 and 染色覆盖率的垂直分布模式,采用经典K均值聚类算法和一般统计方法,分

析垂直方向和顺坡方向的水流路径分布特征及水流非均匀性。

2 现场显色示踪试验

2.1 试验场地特征

试验场地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2 000~2 085 m。场地土层厚度为50~100 cm,往下为不同风化程度的二叠系峨眉山玄武岩。地下水位常年在地表以下2~3 m之间变化。场地详细的工程地质条件见文献[17]。试验场地气温为 $0^{\circ}C\sim 31.5^{\circ}C$,平均年降雨量1 001 mm,最小、最大和平均月降雨量分别为13 mm(2月和12月)、211 mm(7月)和83.4 mm。

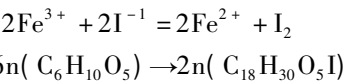
马卡山植被覆盖度在90%以上,木本植被基盖度为0.30%。主要植被有小雀花(*Campylotropis polyantha* (Franch.) Schindl.)、云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast.)、银荆(*Acacia dealbata* Link.)、沙针(*Osyris wightiana* Wall.)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides* Schott.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume.)。

2.2 显色试验原理

所选示踪剂-指示剂不同,显色原理也不同。Tamm和Troedsson^[18]选用硫氰酸根离子(SCN^{-})作为示踪剂,氯化铁($FeCl_3$)溶液作为指示剂,两者反应后产生红色即可显示水流路径,但因硫氰酸根离子有剧毒性,该方法不具有实用性。van Ommen等^[19]使用碘离子(I^{-})作为示踪剂,在水平剖面上均匀地喷洒淀粉粉末,然后喷洒漂液(Cl_2),碘离子与漂液发生化学反应生成碘分子(I_2),淀粉与碘分子反应,颜色从灰白色变成暗蓝紫色。该方法要求谨慎地喷洒漂液和淀粉粉末,过多的漂液会漂白淀粉-碘化物络合物的暗蓝紫色,降低水流路径的可视化效果,淀粉粉末厚度要均匀,而且此法不能可视化竖直剖面的水流路径。Wang等^[20]选择碳酸铵作为水流示踪剂,喷洒pH指示剂可视化水流路径。

Lu和Wu^[7]介绍了溴离子和碘离子可视化水流路径的机理。碘化钾溶液提供的碘离子作为示踪剂,硝酸铁($Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$)与水溶性线性淀粉($C_6H_{10}O_5$)的水溶液作为指示剂,铁离子(Fe^{3+})作为碘离子的中温和氧化剂使碘离子变成碘分子,淀

粉与碘分子反应显示暗蓝紫色即可可视化水流路径 整个过程的化学反应如下所示:



在该法中,过多的铁离子不会漂白淀粉-碘化物络合物的颜色,而且淀粉是以水溶液的形式喷洒到剖面上,避免碘离子溶液湿润淀粉粉末层的不便操作。指示剂溶液的配制,以配制 1 L 为例,先将 50 g 淀粉溶于 0.05 L 去离子水中,然后倒入到 0.8 L 沸腾的去离子水中,振荡淀粉溶液直至溶液变得清澈。冷却淀粉溶液至室温,然后向淀粉溶液中加入 20.20 g 的硝酸铁,振荡至硝酸铁完全溶解,最后向指示剂溶液中添加去离子水,使溶液体积为 1 L,指

示剂溶液要保存在非透明玻璃瓶中。

2.3 试验步骤

项目组于 2012 年 10 月—2012 年 12 月,在马卡山开展了 3 个显色示踪试验,试验条件如表 1 所示。试验结果表明,所有试验的水流路径分布规律基本一致,故本文选择试验 1 作为代表进行分析。试验 1 场地土体的物理、化学性质如表 2 所示。

显色示踪试验的设计方案如图 1 所示。第一步是固定好木框和开挖顺坡凹槽。首先选定试验区,横坡方向定为 X 向,顺坡方向定为 Y 向,垂直坡面向下定为 Z 向,铅垂向下定为 Z'向,坡度为 α,顺坡方向开挖两条长、宽、深分别为 120 cm、3 cm、20 cm 的凹槽,凹槽间距为 120 cm。然后将两块尺寸为 120

表 1 试验条件

Tab. 1 Experimental conditions

试验序次 Experiments ordinal	施加碘化钾溶液 Applying a solution of potassium iodide/L	模拟降雨强度 Simulated rainfall intensity /(mm/h)	尺度 Scale scale /cm ²	示踪剂 Tracer	海拔 Altitude /m	坡度 Slope/°
试验 1	50	43.4	120 × 120	碘化钾(20 g /L)	2 051	12
试验 2	35	25.7	120 × 120	碘化钾(20 g/ L)	2 054	18
试验 3	70	45.0	120 × 120	碘化钾(20 g /L)	2 054	23

表 2 试验 1 场地土体物理、化学性质

Tab. 2 Selected physical and chemical properties of the soil at experiment site 1

深度 Depth /cm	有机质 Organic matter /(g/kg)	孔隙率 Porosity /%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	初始含水率 The initial moisture content /%	颗粒大小分布 Particle size distribution /%			
					>2 mm	0.075 ~ 2 mm	0.005 ~ 0.075 mm	<0.005 mm
0 ~ 10	63.6	68.72	1.00	19.73	37.2	9.6	37.1	16.1
10 ~ 20	19.4	59.41	1.35	25.89	32.6	6.5	41.9	19.0
20 ~ 30	13.1	57.44	1.47	26.53	33.1	6.1	40.5	20.3
30 ~ 40	9.8	55.61	1.54	33.25	34.6	5.9	38.1	21.4
40 ~ 50	4.9	57.69	1.46	32.07	35.1	5.6	36.5	22.8

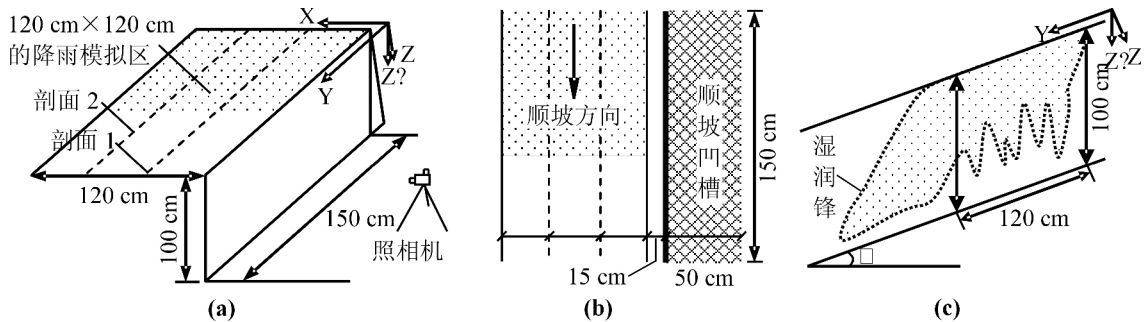


图 1 试验方案设计

Fig. 1 Schematic experimental set up

cm(长) × 25 cm(高)的木板分别放入凹槽中,用土将木板两侧密封并用木锤击实,以防止水流顺木板边壁向下流动[图 1(a)]。最后在坡面顺坡方向右侧距木板距离为 15 cm 的外围开挖一个顺坡方向长、宽、深分别为 150 cm、50 cm、100 cm 的凹槽[图 1(b)],其作用是用于架设照相机拍摄染色剖面。

第二步是配制和喷洒碘化钾示踪剂。Lu 和 Wu^[7]建议碘化物浓度为 2 ~ 4 g/L,也有学者^[14,19]采用 15 ~ 30 g/L 的浓度。碘离子在有氧环境下容易氧化成碘分子,碘离子浓度可能会降低,故碘化物浓度尽可能高。但采用较高的碘浓度,化学扩散作用可能使碘离子进入非自由孔隙水域,导致显色区域不能合理表示真实的水流路径^[5]。Wang 和 Zhang^[16]采用碘化物浓度为 5 g/L、10 g/L、20 g/L 的 3 种溶液开展显色试验,水量平衡计算表明 20 g/L 的碘化物溶液适合可视化水流路径。因此,此次试验配制 20 g/L 的碘化钾溶液作为示踪剂。现场配制示踪剂并立即用手动喷壶在 120 cm × 120 cm 的降雨模拟区等强度均匀喷洒模拟降雨。

第三步是开挖剖面、喷洒指示剂和拍照。喷洒完碘化钾溶液后,用塑料薄膜遮盖试验区以防止水分蒸发,1 h 后顺坡方向开挖 2 个竖直剖面,剖面顺坡方向长 150 cm,深度 100 cm,剖面间距为 40 cm(图 1)。开挖完成后,用小刀轻轻地削平剖面,并用毛刷清除开挖过程时粘附在土体剖面上的松散颗粒。然后用压力喷雾器均匀地、缓慢地向剖面喷洒指示剂溶液,1 ~ 2 h 后就会形成鲜明的颜色对比。最后用佳能单反数码相机拍摄土体剖面,数码照片的分辨率是 3500 × 2300 像素,把照片下载到电脑后用软件对照片进行最后处理。

基于染色剖面照片,选取顺坡方向长 150 cm、垂直(Z)深度视染色深度而定的长方形区域,按照文献[2]的方法对染色照片进行图像处理,得到二值化图像及 0 和 1 组成的数据矩阵,0 表示非染色区域,即非水流路径,1 表示染色区域,即水流路径。

2.4 经典 K 均值聚类算法

聚类分析又称为集群分析,是研究(指标或样本)分类问题的一种统计分析方法。K 均值聚类算法是最经典的聚类分析法,该法只适用于数值属性数据的聚类,具有算法简单、快速、易于实现的特点,能处理比较大的数据库,有很强的局部搜索力,被广泛用于图像分割处理^[21-22]。由于水流路径分布的异质性,在剖面任一深度染色区域与非染色区域是

间隔发生的,两个断点之间的直线距离作为独立水流路径通道宽度,称为单通道水流路径宽度。水流具有连续性和渐变性,相邻深度的水流路径通道信息是相近的。因此,可采用 K 均值聚类算法对水流路径通道信息进行组合与分类。

K 均值聚类算法的基本思想是:选取 k 个初始聚类中心,把数据中所有对象分成 k 类,通过迭代计算,逐次更新各类的中心,直到算法收敛到一定的约束条件,输出聚类结果。此算法基本过程如下:设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ 为 0 和 1 组成 n 个 R^d 空间的数据矩阵,首先选取适当的分类数目和初始聚类中心,设选取的分类数目 k ,对应的 k 个初始聚类中心为: $O_1^{(1)}, O_2^{(1)}, \dots, O_k^{(1)}$,其中 $O_j^{(p)}$ 代表在第 p 次迭代中第 j 个聚类中心。其他样本则根据它们与这些聚类中心的相似度(距离)分别分配到最相似的类中, $x_i \in s_j^{(p)}$,式中 $s_j^{(p)}$ 表示第 p 次迭代中以 $O_j^{(p)}$ 为中心的类。 x_i 与 $O_j^{(p)}$ 的距离及相似度计算公式分别为:

$$d(x_i, O_j^{(p)}) = \sqrt{(x_i^1 - O_j^{(p)1})^2 + \dots + (x_i^l - O_j^{(p)l})^2 + \dots + (x_i^d - O_j^{(p)d})^2}$$

$$s(x_i, O_j^{(p)}) = 1/d(x_i, O_j^{(p)})$$

然后计算每个更新的聚类中心,假设第 j 个类中的样本为 $\{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{jn_j}\}$,即包含 n_j 个样本,则该类的聚类中心 $O_j^{(p)} = (O_j^{(p)1}, O_j^{(p)2}, \dots, O_j^{(p)l}, \dots, O_j^{(p)d})$ 。其中 $O_j^{(p)l}$ 为类中心 $O_j^{(p)}$ 的第 l 个属性,计算公式如下:

$$O_j^{(p)l} = \frac{x_{j1}^l + x_{j2}^l + \dots + x_{jn_j}^l}{n_j}$$

然后不断重复以上过程,直到标准测度函数收敛为止。采用均方差作为标准聚类测度函数,其公式为:

$$J = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji} - O_j^{(p)l})^2}{n-1}}$$

3 结果与分析

3.1 垂直(Z)方向上的分布特征

经典 K 均值聚类算法在聚类前要选择聚类个数 k ,若聚类个数过小,可能导致同一类内的样本差别过大,若聚类个数过多,可能导致不同类间的样本差别过小,达不到有效聚类的目的。Weiler 和 Flühler^[23]根据染色路径宽度将水流进一步划分为 5 类:与基质流相互作用(低、中或高)的优先流、异质基质流和均匀基质流。本文除基于单通道水流路径

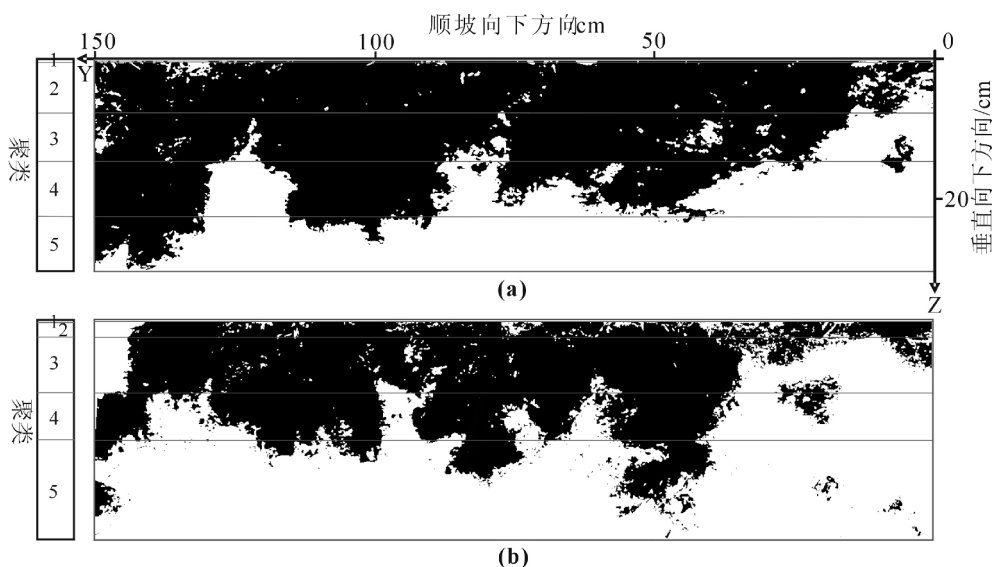


图2 水流路径分布模式及垂直方向的聚类分布

(a)、(b) 分别对应第1、2剖面

Fig. 2 The distribution pattern of water flow paths and the vertical distribution of cluster

(a) and (b) is respectively the 1th and 2th profile

宽度拟将水流分为3类(即优先流、基质流及优先流与基质流的过渡流)外,还将分析顺坡剖面的水流运动特征。因此,本文K均值聚类算法选择5个聚类。

图2给出两个剖面的水流路径分布模式及垂直方向的聚类分布,第1剖面和第2剖面水流路径分布最大垂直深度分别为37.4 cm和39.4 cm。通过该图可以看出,整个剖面的水流路径分布是非均匀的,湿润前锋不是光滑曲线,其深度不一、形态各异,揭示湿润前锋面并非等速扩展,降雨下渗并不是活塞式^[24]。因此,Darcy定律及基于Darcy定律的Richards方程等均匀多孔介质水流理论不能完整地描述在长历时强降雨过程中植被发育斜坡非饱和带土体的降雨入渗过程。

两个剖面的垂直方向聚类分布都没有出现叠置现象(图2),揭示水流运动在垂直方向上具有连续渐变性。图3给出两个剖面各个聚类的中心,斜坡剖面在顺坡(Y)方向上0~120 cm的范围是降雨模拟区(图1)。第1剖面表土层土体的聚类1和聚类2在顺坡方向上的水流路径分布都是均匀的,但随着垂直深度增加,从聚类3、4过渡到聚类5,降雨模拟区(0~120 cm范围)土体的水流路径(即染色区域)越来越少,而在120~150 cm范围的土体均有水流路径[图2(a)和图3(a)],第2剖面也有类似的特征[图2(b)和图3(b)]。以上分析表明,在强降雨

过程中,植被发育斜坡非饱和带土体入渗水除发生垂直向下运动外,还发生顺坡向下流动,据此水流运动过程最简可概化为二维流场问题。

第1剖面的聚类1的单通道水流路径宽度分布不均匀,以宽通道为主,水流以基质流为主^[11,24],这是由于聚类1分布在0~0.7 cm深度范围,土体含有一些未完全腐烂分解的枯枝落叶,影响局部水流运动。聚类2范围的土体均匀分布大量团聚体,具有海绵结构,水流路径宽度比聚类1大,水流以基质流为主。与聚类2相比,聚类3的水流路径宽度减小,水流通道数增多,水流属于优先流与基质流的过渡流(优先流与基质流相互作用显著)。聚类4的水流路径宽度进一步减小,水流通道数增多,水流以优先流为主。聚类5的水流路径宽度最小,水流属于优先流。第2剖面的水流类型分布也表现出类似的渐变关系[图2(b)和图3(b)]。综上所述,在强降雨条件下,随着植被发育斜坡非饱和带土体深度增加,土体中水流运动从基质流渐变到优先流与基质流的过渡流,深部土体以优先流为主。

图4展示两个剖面的染色覆盖率在垂直方向和顺坡方向的分布模式。如图4(a)所示,两个剖面的染色覆盖率在垂直方向上的分布模式相似,即随着深度增加,染色覆盖率先增大后减小,而且是波状变化的。说明在强降雨过程中,植被发育斜坡非饱和带土体产生顺坡向下的地下径流,水流路径分布不

均匀。在垂直方向上,第1剖面的染色覆盖率最大值为96.26%,位于地表以下4.7 cm,平均值为58.18%。染色覆盖率分布的变异系数为56.30%;第2剖面的染色覆盖率最大值为87.07%,位于地表以下2.2 cm,平均值为41.72%。染色覆盖率分布的变异系数为76.40%。因此,两个剖面的水流路径在垂直方向上的分布差异是显著的。

3.2 顺坡(Y)方向上的分布特征

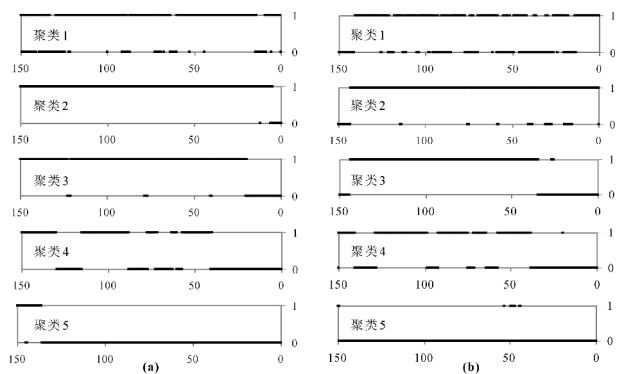


图3 聚类分析的最终聚类中心

(a)、(b) 分别对应第1、2剖面(横坐标为顺坡方向,单位:cm)

Fig. 3 The final cluster centers of k-means cluster analysis for the 1th (a) and 2th profile (b)

图5给出两个染色剖面的水流路径在顺坡方向的聚类分布,第1剖面共划分为12段,第2剖面共划分为17段。其与垂直方向聚类分布的显著差异在于顺坡方向聚类分布存在叠置现象,说明水流路径在顺坡方向的分布异质比垂直方向显著。

如图4(b)所示,第1剖面的染色覆盖率在顺坡方向的最大值为36.9%,位于顺坡方向140.9 cm位置,第2剖面的染色覆盖率最大值为32.1%,位于

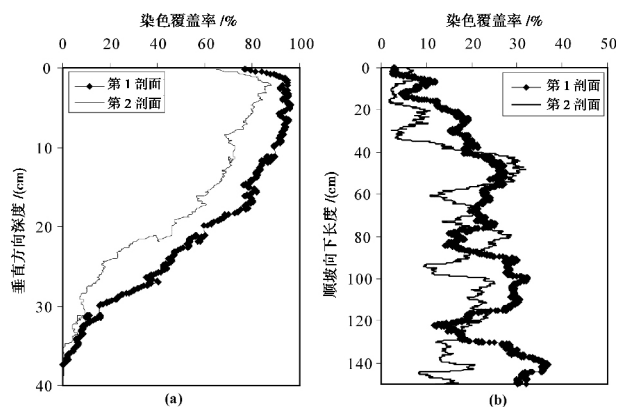


图4 染色覆盖率在垂直方向(a)和顺坡方向(b)的分布模式

Fig. 4 The vertical distribution pattern (a) and dip direction distribution pattern (b) of dye stained coverage

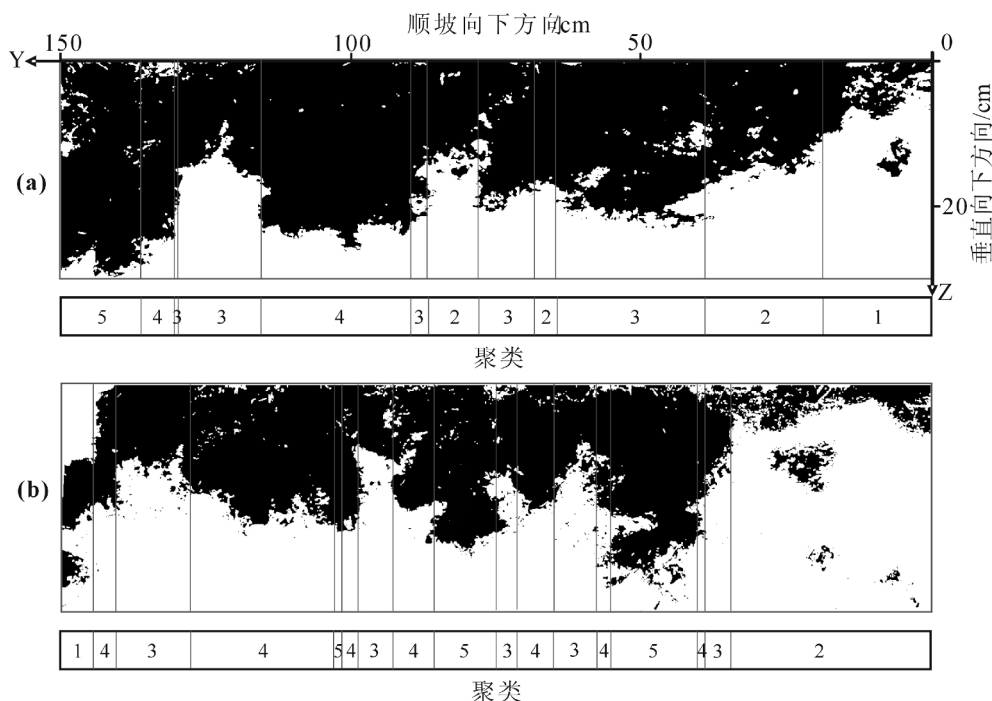


图5 水流路径沿顺坡向下方向的聚类数分布

(a)、(b) 分别对应第1、2剖面

Fig. 5 The cluster number distribution of water flow paths along downhill direction

(a) and (b) is respectively the 1th and 2th profile

顺坡方向 48.3 cm 位置。第 1 剖面的染色覆盖率顺坡向下总体增大,而第 2 剖面的染色覆盖率呈先增大后减小的趋势。第 1 剖面染色覆盖率的平均值为 21.77%,变异系数为 35.37%,第 2 剖面染色覆盖率的平均值为 16.36%,变异系数为 39.92%,第 2 剖面表现出更明显的变异性。

综上所述,两个剖面的水流路径分布差异是显著的,入渗水可能产生侧向流,这与大孔隙结构三维空间分布有关。结合前文分析,认为在强降雨条件下,植被发育斜坡非饱和带土体入渗水水流运动过程应该从三维流方面进行分析。

4 结论与展望

应用碘-淀粉显色示踪法研究在强降雨条件下植被发育斜坡非饱和带土体水流路径分布特征,评价水流运动过程,研究结果表明:

1. 顺坡方向的垂直剖面的水流路径分布是非均匀的,湿润锋面非等速扩展,降雨下渗不是活塞式,Darcy 定律及基于 Darcy 定律的 Richards 方程等均匀多孔介质水流理论不能完整地描述在长历时强降雨过程中植被发育斜坡非饱和带土体的降雨入渗过程。

2. 水流路径在顺坡方向分布的异质性的垂直方向显著。

3. 随着土体深度增加,单通道水流路径宽度总体减小,土体中水流运动从基质流渐变到优先流与基质流的过渡流,深部土体以优先流为主。

4. 植被发育斜坡非饱和带土体入渗水除发生垂直向下和顺坡向下流动外,还发生侧向流,应该从三维流场方面对水流运动过程进行精细描述。

参考文献(References)

- [1] 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 [Zhang Jiaming, Xu Zemin, Pei Yinge. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes [J]. Mountain Research, 2012, 30(4): 439-449]
- [2] 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 [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]
- [3] 徐则民. 植被与斜坡非饱和带大孔隙[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 134-142 [Xu Zemin. Vegetation and macropores in vadose zone of hill slopes [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 134-142]
- [4] Uchida T, Kosugi K, Mizuyama T. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: a review of pipeflow studies in forested headwater catchments [J]. Hydrological Processes, 2001, 15: 2151-2174
- [5] Feyen H, Wunderli H, Wydler H, Papritz A. A tracer experiment to study flow paths of water in a forest soil [J]. Journal of Hydrology, 1999, 225: 155-167
- [6] 秦耀东,任理,王济. 土壤中大孔隙流研究进展与现状[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 203-207 [Qin Yaodong, Ren Li, Wang Ji. Review on the study of macropore flow in soil [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(2): 203-207]
- [7] Lu JH, Wu LS. Visualizing bromide and iodide water tracer in soil profiles by spray methods [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32: 363-367
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 刘目兴,王文德,张海林,等. 三峡库区不同垂直带森林土壤大孔隙染色实验[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 147-155 [Liu Muxing, Wang Wende, Zhang Hailin, et al. Forest soil macropore of different altitudinal zones with dye tracing method in Three Gorges Reservoir Area [J]. Mountain Research, 2012, 30(2): 147-155]
- [13] Schwärzel K, Ebermann S, Schalling N. Evidence of double-funneling effect of beech trees by visualization of flow pathways using dye tracer [J]. Journal of hydrology, 2012, 470/471(1): 184-192
- [14] Hangen E, Gerke HH, Schaaf W, et al. Flow path visualization in a lignitic mine soil using iodine-starch staining [J]. Geoderma, 2004, 120(1): 121-135
- [15] 盛丰,王康,张仁铎,等. 用分形特征参数定量描述土壤水流运动的不均匀程度[J]. 水力学报, 2009, 40(12): 1432-1439 [Sheng Feng, Wang Kang, Zhang Renduo, et al. Characterizing soil water flow heterogeneity using fractal characteristic parameter [J]. Shui Li Xue Bao, 2009, 40(12): 1432-1439]
- [16] Wang K, Zhang RD, Hiroshi Y. Characterizing heterogeneous soil water flow and solute transport using information measures [J]. Journal of hydrology, 2009, 370: 109-121
- [17] 张家明. 植被发育斜坡非饱和带土体大孔隙对降雨入渗影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013. [Zhang Jiaming. Research on the influence of macropores in non-saturated soil of vegetation development slope on rainfall infiltration [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.]

- search on the effects of macropores on rainfall infiltration in vadose zone soils of well vegetated slope [D]. Kunming: Kunming University of science and technology ,2013.]
- [18] Tamm CO , Troedsson T. A new method for the study of water movement in soil [J]. Geologiska Föreningeni Stockholm Förhandlingar ,1957 ,79: 581 – 587
- [19] van Ommen HC ,Dekker LW ,Dijkma R ,et al. A new technique for evaluating the presence of preferential flow paths in nonstructured soils [J]. Soil Science Society of America Journal ,1988 ,52: 1192 – 1193
- [20] Wang Z ,Lu JH ,Wu LS ,et al. Visualizing preferential flow paths using ammonium carbonate and a pH – indicator [J]. Soil Science Society of America Journal 2002 ,66: 347 – 351
- [21] 曾接贤 ,王军婷 ,符祥. K 均值聚类分割的多特征图像检索方法[J]. 计算机工程与应用 2013 ,49(2) : 226 – 230 [Zeng Jiexian , Wang Juntong , Fu Xiang. Multi-feature image retrieval method based on K – means clustering segmentation [J]. Computer Engineering and Applications 2013 ,49(2) : 226 – 230]
- [22] 李光 ,王朝英 ,侯志强. 基于 K 均值聚类与区域合并的彩色图像分割算法 [J]. 计算机应用 ,2013 ,30(2) : 354 – 358 [Li Guang , Wang Zhaoying , Hou Zhiqiang. Color image segmentation algorithm based on K – means clustering and region merging [J]. Journal of Computer Applications 2010 ,30(2) : 354 – 358]
- [23] Weiler M , Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils [J]. Geoderma ,2004 ,120: 137 – 153
- [24] 王大纯 ,张人权 ,史毅虹 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社 ,1995. [Wang Dachun , Zhang Renquan , Shi Yigui , et al. The basis of hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House ,1995.]

Flow Paths of Water in Unsaturated Soil Slope with Well Vegetation Using Iodine-starch Staining Experiments

ZHANG Jiaming^{1 2} , LI Feng² , XU Zemin¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Architecture 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: Matrix porosity and macropore are coexisted in unsaturated slope soil with well vegetation. The objectives of this study were to study flow path distribution patterns and water flow process in unsaturated soil in well vegetated slopes under intensive rainfall. Iodine-starch staining experiments were carried out in the Maka Mountain the Yunnan Province ,China. Based on vertical stained profiles ,classical K – means clustering algorithm and common statistical method were used to study flow path distributions. The results show that: 1) the flow path distribution of water was heterogeneous and the heterogeneity of flow paths of distribution of water in vergence direction was more significant than those in vertical direction. Rainfall infiltration in unsaturated soil of well vegetated slopes is short-circuiting type infiltration. Homogeneous porous medium water flow theory , such as Darcy Law and Richards' Equation , isn't capable of completely describing the water flow process in unsaturated soils of well vegetated slopes under intensive rainfall. 2) The changes from matrix flow to transition flow between matrix flow and preferential flow with the depths of unsaturated soils become larger , and the main flow in deep soils is preferential flow. 3) Water flow process in unsaturated soils of well vegetated slopes should be studied on basis of three-dimension flow.

Key words: well vegetated slopes; iodine-starch staining experiment; preferential flow; classical k-means clustering algorithm; flow paths of water