

文章编号: 1008-2786-(2016)4-393-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000143

根-土间隙对斜坡降雨入渗的贡献 ——以头寨和段家营地区为例

王帮团^{1,4}, 徐则民^{2*}, 王帮圆³, 赵付万¹

(1. 昆明理工大学地球科学系, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学土木系, 云南 昆明 650500;

3. 云南地质工程勘察设计院, 云南 昆明 650041; 4. 中国有色金属工业昆明勘察设计院, 云南 昆明 650051)

摘 要: 在植被发育程度较高的云南昭通头寨试验区和呈贡段家营试验区, 使用亚甲基蓝和罗丹明 B 溶液多次进行染色示踪渗透试验, 发现根-土间隙的导流现象十分明显, 其导流作用很可能已经超过了传统的三类土体大孔隙。对不同尺寸根-土间隙流道内水分入渗速度模型进行推导与理论计算, 并将其与实测实值进行比较分析, 最后讨论了头寨试验区和呈贡段家营试验区斜坡土体中根-土间隙在降雨入渗过程中导流量所占比例。结果表明: 昭通头寨和呈贡段家营试验区斜坡土体中根-土间隙的尺寸主要集中在 0.5 ~ 1.0 mm, 多数间隙尺寸为 0.5 mm 左右, 根-土间隙流道内水分下渗速度主要分布在区间 0.027 ~ 0.203 mm/s 和 0.014 ~ 0.102 mm/s, 两试验区土体中根-土间隙的导流量分别占总入渗量的 72% ~ 82% 和 54% ~ 70%。相同面积上, 头寨试验区土体中根-土间隙的导流量是呈贡段家营试验 1.67 倍, 根-土间隙对降雨入渗的贡献是显著的。

关键词: 植被发育斜坡; 滑坡; 降雨入渗; 根-土间隙

中图分类号: P642.1, S157.1

文献标志码: A

植被发育的斜坡发生滑坡、泥石流是自然界中常见的一种自然现象, 如 1998 年美国 Ohio 东南部发生大量滑坡, 77 号公路滑坡密度为 1 处/km, 滑源区植被根系是滑坡堆积区的主要成分^[1]。2004 年云南盈江县北部的支那、盏西、芒璋等乡镇遭受总降雨量高达 301 mm 的特大暴雨袭击, 引发滑坡、泥石流灾害, 该区域植被覆盖度高达 100%, 此次灾害造成 59 人死亡失踪, 直接经济损失 1.59 亿人民币^[2]。同年 12 月, 意大利 Umbria 植被发育斜坡区发生滑坡 486 处, 最大密度超过 12 处/km²^[3]。植被对滑坡、泥石流发生的促进作用主要表现为对降雨入渗的促进。具体而言, 主要是土体中植被根系形成大

孔隙系统产生的优先流效应。由于土体中孔隙的大小及其空间分布的不均匀性, 渗流过程中的孔隙流动呈现出沿着一些优先途径的集中流动, 统称为优先流^[4]。由于土体孔隙的复杂性, 难以对孔隙流动进行解析或数值计算, 多用染色示踪试验或概化模型等手段对优先流现象进行定性分析^[5-10]。本文在昭通头寨和呈贡段家营两试验区采用亚甲基蓝和罗丹明 B 配水溶液进行染色示踪渗透试验。在多次试验过程中发现, 根-土间隙的导流现象十分明显。作为土体大孔隙的一个重要类型, 根-土间隙在降雨入渗过程中发挥着重要的导流作用, 在降雨入渗过程中其导流作用很可能已经超过了传统的三

收稿日期(Received date): 2014-12-14; 修回日期(Accepted): 2015-01-19。

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); 高等学校博士学科点专项科研基金(20135314110005)。

[The National Natural Science Foundation of China-Yunnan Province Joint Fund and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China.]

作者简介(Biography): 王帮团(1985-), 男, 云南昭通人, 硕士, 主要从事水文地质与工程地质方面研究。[Wang Bangtuan(1985-), male, born in Zhaotong, Yunnan Province, master major in hydrogeology and engineering geology.] E-mail: wangbangtuan0910@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 徐则民(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事滑坡灾害孕育过程方面研究。[Xu Zemin(1963-), male, professor, mainly engaged in the process of landslide disaster.] E-mail: abc5100@188.com

类土体孔隙。本文在使用染色方法确定植被发育的斜坡土体发生优先流区域的基础上,取代表剖面,对染色区典型根-土间隙进行了量化分析,旨在进一步深入和完善土体大孔隙流的研究,揭示根-土间隙对降雨入渗的贡献。

1 根-土间隙的研究背景

1.1 研究区概况

头寨沟位于云南省昭通市,地处云贵高原乌蒙山系西缘,是金沙江一级支流横江流域的盘河支流流域左岸一条较大的沟谷。头寨沟村国土面积约 7.95 km²,沟口和沟头海拔分别为 1 830 m 和 2 583 m;属北纬亚热带、暖温带共存的高原大陆季风气候,年平均气温 11.6℃,最热月和最冷月平均气温分别 19.8℃ 和 2℃。每年 5—9 月为雨季,降雨充沛,2013 年 10 月至 2014 年 9 月测定的年降雨量为 1 728 mm。1991-09-23T18:00 左右,头寨沟村发生巨型山体滑坡,共造成 216 人遇难,8 人受伤,202 间房屋被毁,254 头牲畜被埋,摧毁耕地约 20 hm²,直接经济损失约 1 200 万元,为我国 20 世纪 90 年代以来最为惨重的非地震诱发的重大滑坡灾害事件^[11]。

呈贡段家营试验区位于云南省昆明市东南部呈贡县马卡山、李凹山,海拔在 2 000 ~ 2 085 m 之间,

地理位置为 24°51'34" ~ 24°51'55"N, 102°52'04" ~ 102°52'20"E。根据 1951—2008 年的气象数据统计,最高气温 31.5℃,最低气温为 -7.8℃,年平均气温 14.7℃,年平均降雨量 1 001 mm,年降雨量变化率 10% ~ 15%,月平均降雨量 83.4 mm。

1.2 根-土间隙及其普遍性

染色法可将大孔隙流路径清晰地呈现在土体剖面上,不仅可以直接查看分析大孔隙流路径,还可以对大孔隙流类型及其分布进行辨析^[12],因此,使染色法成为了研究土体大孔隙特征及大孔隙流路径的首选方法^[13-14]。为了查明植被发育斜坡土体中大孔隙的发育情况、降雨条件下主要的优先流导水路径及水流在林下土体中的运移情况,在呈贡段家营试验区和头寨试验区 2 号、3 号试验点分别用亚甲基蓝(规格 25 g/瓶)和罗丹明 B(规格 25 g/瓶)配水溶液进行多次染色示踪渗透试验,染色溶液浓度均为 1.5 g/L,模拟总降雨量 200 L。从开挖剖面观察,在 0 ~ 100 cm 深度土层范围内,几乎所有根系及其周围土体均被染色,特别是在 0 ~ 30 cm 深度,染色效果十分明显,即便是在更深层土体中根系已经大幅衰减,但也有根系被染色的现象。图 1 给出了试验过程中典型剖面上根-土间隙的导流现象,从现场试验观察发现,根-土间隙的导流特性十分明显,这说明在良好的降雨条件下,植被发育斜坡土体中根-土间隙对降雨入渗起着重要的导流作用。

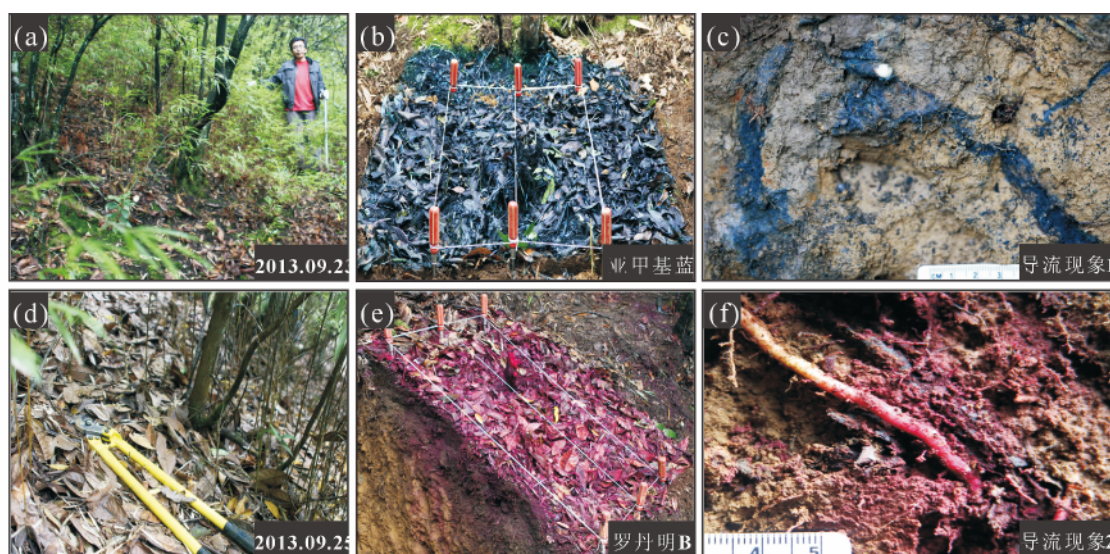


图 1 根-土间隙导流现象

(图 1 中(a) ~ (c)、(d) ~ (f) 分别表示用亚甲基蓝和罗丹明 B 溶液染色的试验过程)

Fig. 1 The phenomenon of soil-root clearance diversion

(Fig. 1 (a) ~ (c), (d) ~ (f) is the test processes of using methylene blue and rhodamine B solution, respectively)

经现场调查研究发现,段家营试验区植被覆盖度为90%,草本植被基盖度(植被基部的覆盖面积,即植被基部投影面积所占地表面积的百分比)为1.14%,木本植被群落基盖度为0.30%,并对两个试验区外围植被进行取样。经西南林业大学园林学院鉴定,段家营试验区植被共计24种,其中木本植被14种,草本植被10种,分别是:云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast)、华山松(*Pinus armandii* Franch)和狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers)等;昭通头寨试验区植被主要有31种,主要是:马兰(*Kalimeris indica*)、绵毛杜鹃(*Rhododendron floccigerum*)、云南柳(*Salix cavaleriei*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucooides*)和乌鸦果(*Vaccinium fragile*)等。

大孔隙广泛存在于植被发育斜坡土体中^[15],同时也是产生土体优先流的主要原因^[16]。根-土间隙作为土体大孔隙的一个重要类型,在降雨入渗过程中扮演着很主要的角色,越来越多的试验证据表明,根-土间隙是植物根系的一种普遍现象,其导流现象具有普遍存在性,不受地域、植被类型、气候条件以及地质条件的限制。

2 斜坡土体中根系含量

衡量土体中根系含量的一个常用的指标是“根的面积比率”(简记为RAR),它是指在一个土层断面上(水平断面或垂直断面)根的截面面积占总断面面积的比率。Shields和Gray^[17]在美国加利福尼亚州萨克拉门托河地区试验研究表明,根的面积比率是土体深度的函数,随着土体深度的增加RAR迅速减小,到1.2 m以下时根的含量已经很小。既有的研究表明,通常情况下1级根系的面积可忽略不计,而3级根系的功能是吸收水分及其他营养物质,因此,根-土间隙主要是由2级根系及其周围土体构成。本文通过试验测得在0~30 cm土体范围内,深度为20 cm横断面处,呈贡试验区和头寨试验区土体中RAR分别为1.01%和1.89%,其中2级根的数量分别为12 900根/m²和24 213根/m²,根系平均径级为1 mm。

另一种衡量土体中根系含量的方法就是“根的生物量集度”^[18],即单位体积土体中根系的质量,它和RAR存在一定的转化关系。通过对头寨试验区和呈贡试验区斜坡土体取样测试得到两试验区不同深度土体根的生物量集度(图2)。

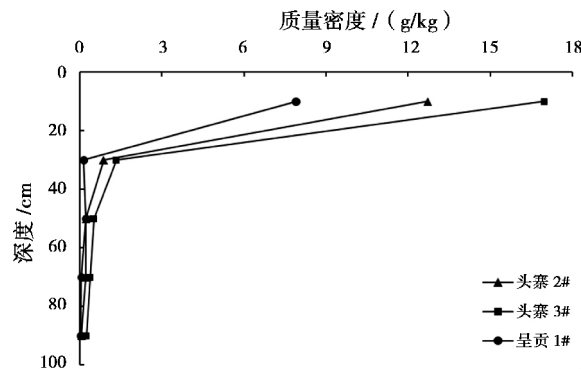


图2 根系质量密度随深度的变化

Fig. 2 The change of root mass density with depth

图2表明,两试验区根的生物量集度均随深度的增加而减小,在0~30 cm范围内分布最广泛且头寨试验区根的生物量集度高于呈贡试验区。

3 根-土间隙内流体速度分布

将根系视为非透水物质,不考虑根-土间隙内水分的径向渗透,沿间隙轴向展开即为平行板窄缝,假设在 x 方向上无限延伸,水流速度 u 只是垂直于水流方向的 y 坐标(或 r)的函数

$$\begin{cases} \partial u / \partial x = 0 & \partial^2 u / \partial x^2 = 0 \\ v = 0 & v_r = 0 \end{cases} \quad (1)$$

因此,在二维稳定流动状态下,流体在平行板间的动量方程式,可根据纳维埃-斯托克斯方程式

$$\rho \frac{Du}{D\tau} = -\frac{\partial p}{\partial x} \mu \nabla^2 u + X \quad (2)$$

$$\text{边界条件为: } \begin{cases} u_{y=d} = 0 \\ \partial u / \partial y (y=0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

化简方程(2)得:

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

式中 $Du/D\tau$ 表示速度对时间的全导数, $\tau = \mu du/dy$ (N/m^2) 表示剪切力与法向速度梯度成正比, X 表示单位容积的体积力在 x 方向上的分量, $\partial p / \partial x = 0$ 为流体轴向的压力梯度, d 为根-土间隙的半宽度(mm); y 表示从平行板中心线开始计算的距离(mm)。

对二阶常微分方程(4)进行二次积分,同时可根据方程(3)的边界条件确定其两个积分常数,从而得到根-土间隙流道内流体的速度分布

$$u = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{d^2 - y^2}{2} \right) \quad (5)$$

由于流体速度分布关于间隙中心线对称,因此,可取横截面积的一半确定平板间按质量的平均速度

$$u_m = \frac{1}{\rho d} \int_0^d \rho u dy = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{d^2}{3} \quad (6)$$

联立方程(5)和(6)解得在流体在流道内的速度分布如下

$$\frac{u}{u_m} = \frac{3}{2} [1 - (\frac{y}{d})^2] \quad (7)$$

根-土间隙当量直径与雷诺数方程分别为方程(8)、方程(9)

$$D_h = 4A_c/U \quad (8)$$

$$R_e = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (9)$$

联立方程(7)、(8)和(9)解得

$$u = \frac{3}{2} [1 - (\frac{y}{d})^2] \cdot u_m = \frac{3\mu R_e}{4\rho d} [1 - (\frac{y}{d})^2] \quad (10)$$

式中 A_c 为根-土间隙横截面的面积, U 为湿润周边长, ρ 为水的密度, μ 为动力粘性系数。

根据方程(10),代入已知参数化简得到根-土间隙为 0.5~3.0 mm 流道内水流速度方程

$$\begin{cases} u = 9.03 \times 10^{-6} R_e (1 - 16y^2) \delta = 0.5 \text{ mm} \\ u = 4.52 \times 10^{-6} R_e (1 - 4y^2) \delta = 1.0 \text{ mm} \\ u = 3.01 \times 10^{-6} R_e (1 - 1.78y^2) \delta = 1.5 \text{ mm} \\ u = 2.23 \times 10^{-6} R_e (1 - y^2) \delta = 2.0 \text{ mm} \\ u = 1.81 \times 10^{-6} R_e (1 - 0.64y^2) \delta = 2.5 \text{ mm} \\ u = 1.51 \times 10^{-6} R_e (1 - 0.44y^2) \delta = 3.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

式中 u 为根-土间隙内水流速度(mm/s), δ 为根-土间隙宽度(mm)。

本文采用双环渗透试验测得,昭通头寨2号、3号试验点地表0~30 cm 范围内水分的渗透速度范围分别为 0.037~0.136 mm/s 和 0.017~0.526 mm/s,对于相同的土层范围,呈贡段家营1号、2号

试验点水分的渗透速度范围分别为 0.014~0.091 mm/s 和 0.042~0.096 mm/s。

双环渗透试验的主要步骤有五步:1) 试验地点的选择,选取坡度平缓、地面平整的试验场地。2) 将试验选地挖到预定深度,并将双套管放到预定位置,拍照采集信息,而后用铁锤砸入内、外环,两环插入土体深度均取 8 cm,此过程中尽量减少对土体的扰动及套管振动。3) 测量碎石的体积并将其均匀平铺在内环内的土体表面,同时,在内、外环间的土体表面均匀铺撒一层碎石,其目的是减小加水过程中对土体造成的扰动、损坏。4) 先准备好量筒、导管、秒表以及足量水源,并读出量筒内盛水体积。试验开始时需同时完成三个操作:迅速在内、外环内建立 5 cm 压力水层;开启秒表;通过导管加水并时刻保持压力水层高度不变。5) 试验开始后定时记录量筒读数,并时刻保持内、外环水位相同,试验过程直至水分渗透速度达到稳定时方可终止试验。双环渗透试验示意图见图 3。

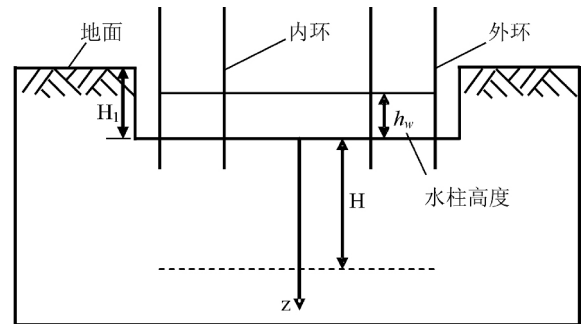


图 3 双环渗透试验示意图

Fig. 3 Sketch map of double ring method for permeability test

根据方程(11)计算得到不同尺寸根-土间隙流道内水流速度如表 1 所示。

表 1 不同尺寸根-土间隙流道水流速度

Tab. 1 The water flow speed in different soil-root interstices

δ /mm	u 理论值 u Theoretical value /(mm/s)	昭通头寨 Toudzhai of Zhaotong		呈贡段家营 Duanjiaying of Chenggong	
		u 实测值 u Measured value 2#/(mm/s)	u 实测值 u Measured value 3#/(mm/s)	u 实测值 u Measured value 1#/(mm/s)	u 实测值 u Measured value 2#/(mm/s)
0.5	0.027~0.203				
1.0	0.014~0.102				
1.5	0.009~0.068				
2.0	0.007~0.050	0.037~0.136	0.017~0.526	0.014~0.091	0.042~0.096
2.5	0.005~0.041				
3.0	0.005~0.034				

4 根-土间隙对降雨入渗的贡献

所谓根-土间隙对降雨入渗的贡献系指在降雨过程中根-土间隙对雨水的导流量与总入渗量的比值,该值越大则根-土间隙的导流特性越明显。由表1中数据及现场测定结果表明,两试验区根-土间隙尺寸以0.5 mm为主。通过对两试验区现场渗透试验数据分析发现,呈贡段家营土体水分入渗速率随时间的增加而呈现出一定幅度的波动,而头寨试验区数据呈单调递增规律,但最终两者均趋于稳定状态,说明土体已经达到或接近饱和状态。因此,本文以模型计算流速的平均值作为两试验区根-土间隙流道内流体速度,根据已知条件和方程(10),即可算出间隙横截面积,从而计算出各时刻根-土间隙的导流量(图4~5)及其所占总入渗量的比例(图6~7),数据见表2。

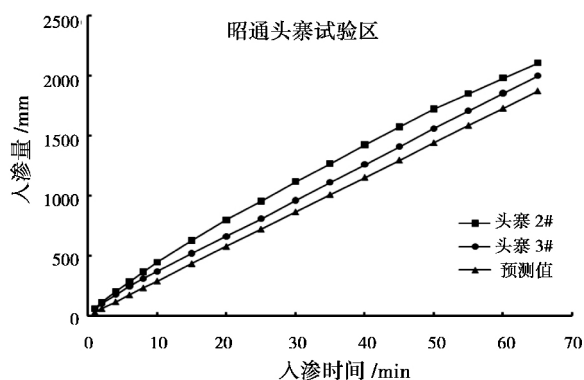


图4 头寨试验区土体水分入渗量随时间的变化

Fig. 4 The change of water infiltration volume with time in the Touzhai test area

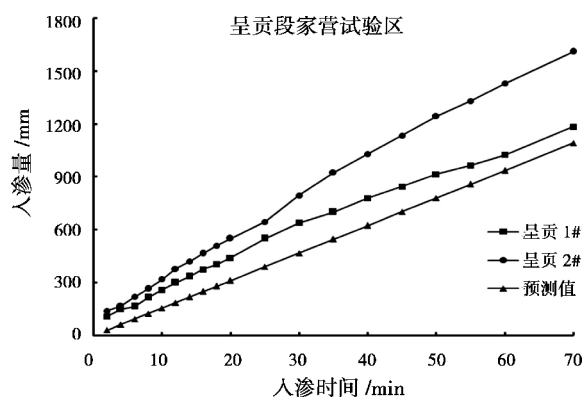


图5 呈贡试验区土体水分入渗量随时间的变化

Fig. 5 The change of water infiltration volume with time in the Chenggong test area

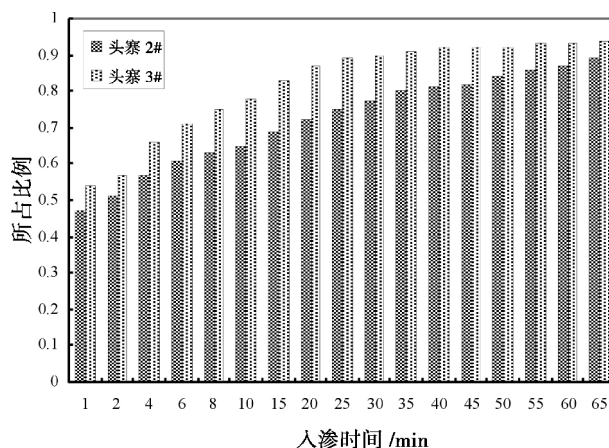


图6 头寨试验区根-土间隙不同时刻导流量所占比例

Fig. 6 The proportion of infiltration volume in soil-root interstice at different time in the Touzhai test area

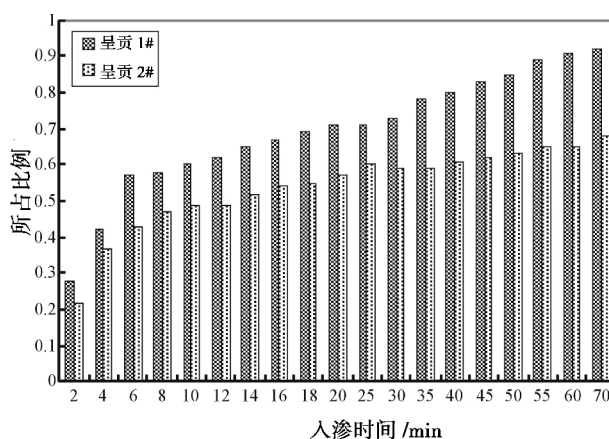


图7 呈贡试验区根-土间隙不同时刻导流量所占比例

Fig. 7 The proportion of infiltration volume in soil-root interstice at different time in the Chenggong test area

根据图4~5分析,植被发育斜坡土体中根-土间隙的导流量,模型预测值均低于昭通头寨2号、3号及呈贡段家营1号、2号水分入渗总量。两试验区相比,在相同的降雨条件下,头寨试验区土体达到或接近饱和状态所需要的时间较呈贡段家营试验区短,这是由于头寨土体初始含水率比呈贡试验区土体初始含水率高(试验测得)。根据图6、图7研究表明,头寨试验区和呈贡试验区斜坡土体中根-土间隙的导流量分别占总入渗量的72%~82%和54%~70%,在相同面积上,头寨试验区土体中根-土间隙的导流量是呈贡段家营试验1.67倍。显然,在良好的降雨条件下,根-土间隙作为土体大孔隙的一个重要类型,削弱或抑制了地表径流的产生,这一结论也印证了前人的研究成果^[19-22]。

表 2 头寨和呈贡试验区不同时刻模型计算值

Tab. 2 The model calculation results of different time at the Chenggong and the Touzhai test area /(mL)

呈贡段家营 Duanjiaying of Chenggong					昭通头寨 Touzhai of Zhaotong				
观察时间 Observed time/min	间隔时间 Interval /s	1#入渗量 1# infiltration	2#入渗量 2# infiltration	预测值 Predicted value	观察时间 Observed time/min	间隔时间 Interval /s	2#量筒读数 2# measuring cylinder reading	3#量筒读数 3# measuring cylinder reading	预测值 Predicted value
2	120	110.0	140.0	31.2	1	60	61.0	53.0	28.8
4	120	150.0	170.0	62.4	2	60	114.0	101.0	57.6
6	120	165.0	220.0	93.6	4	120	202.0	175.0	115.2
8	120	215.0	265.0	124.8	6	120	283.0	245.0	172.8
10	120	260.0	320.0	156.0	8	120	367.0	309.0	230.4
12	120	300.0	380.0	187.2	10	120	446.0	368.0	288.0
14	120	335.0	420.0	218.4	15	300	628.0	518.0	432.0
16	120	375.0	465.0	249.6	20	300	797.0	659.0	576.0
18	120	405.0	510.0	280.8	25	300	954.0	806.0	720.0
20	120	440.0	550.0	312.0	30	300	1 117.0	958.0	864.0
25	300	550.0	645.0	390.0	35	300	1 265.0	1 109.0	1 008.0
30	300	640.0	795.0	468.0	40	300	1 424.0	1 259.0	1 152.0
35	300	700.0	925.0	546.0	45	300	1 572.0	1 407.0	1 296.0
40	300	780.0	1 030.0	624.0	50	300	1 721.0	1 558.0	1 440.0
45	300	845.0	1 135.0	702.0	55	300	1 848.0	1 705.0	1 584.0
50	300	915.0	1 245.0	780.0	60	300	1 978.0	1 850.0	1 728.0
55	300	965.0	1 330.0	858.0	65	300	2 103.0	1 995.0	1 827.0
60	300	1 025.0	1 430.0	936.0	/	/	/	/	/
70	600	1 185.0	1 610.0	1 092.0	/	/	/	/	/

5 讨论

通过对云南昭通头寨试验区和昆明呈贡段家营试验区植被发育斜坡进行植被调查、染色示踪试验以及典型剖面观察取样室内分析,结合本文推导的模型计算得到不同尺寸根-土间隙流道内水分速度分布,并将其与实测值进行对比分析,表明:头寨试验区和呈贡段家营试验区土体中根-土间隙的导流量分别占了总入渗量的很大部分,高达 82% 和 70%。该结论有力的解释了现场模拟降雨过程中或自然降雨条件下,该斜坡表面不会产生地表径流或地表径流十分微弱现象。由于根据染色示踪渗透试验、双环渗透试验、室内渗透试验以及在研究区安置的气象站所测得的数据均具有实时性,因此试验结果和数据是基于水分动态测量过程,该结果从一定程度上反映了土体水分与根-土间隙的关系,对今后研究土体大孔隙流具有一定的参考价值。

另外,根据本文研究的思路,在一定程度也反映了水分入渗量与根-土间隙尺寸的关系。虽然模型预测值比实测值略低,其原因可能是忽视了土体中

根系的空间分布,即根-土间隙的连通性。有学者指出^[21]在土体非饱和带中,大孔隙的连通程度比其孔径大小对土体水分运动的影响更重要。另外,导致这一现象的原因,也可能是受到土体所含砾石的影响(现场试验开挖剖面过程中发现深层土体中含大量砾石),但模型预测的结果还是令人满意的。因此,若能把根-土间隙尺寸范围与其平均体积、弯曲程度之间的空间组合形式和其连通程度相结合,共同分析根-土间隙对斜坡土体水分运动的影响,就能从很大程度上根本反映出根-土间隙的导流特性。将来的相关研究应该注意在不同气候梯度下,探讨根-土间隙与植被类型、根系级数、季节变化以及土体基质特性等的相关性。今后还需要进一步深入开展根-土间隙导流特性的机理研究。本文的研究结果仅是一些初步的尝试,但也为土体大孔隙流的研究提供了重要的科学视野,有关根-土间隙导流特性方面的研究还有待进一步深入。

6 结论

根-土间隙的优先流效应是植被发育斜坡降雨

入渗的主要途径。本文基于多次室内、外试验数据,研究了植被发育斜坡土体中根-土间隙对降雨入渗的贡献,得出以下结论:

1. 昭通头寨和呈贡段家营研究区植被发育斜坡土体中根-土间隙的尺寸主要集中在0.5~1.0 mm范围内,以0.5 mm为主,两研究区斜坡土体中根-土间隙流道内水分的入渗速度主要分布在0.027~0.203 mm/s和0.014~0.102 mm/s区间,相同面积上,昭通头寨土体中根-土间隙的导流量是呈贡段家营的1.67倍。

2. 在降雨过程中,植被发育斜坡土体中根-土间隙的导流作用显著,其中,头寨试验区根-土间隙的导流量占总入渗量的72%~82%,而呈贡段家营试验区根-土间隙导流量比头寨试验区略低,占总入渗量的54%~70%。由于根-土间隙的存在促进了降雨入渗,从而消弱或抑制了地表径流的产生。

参考文献(References)

- [1] Shakoor A, Smithmyer AJ. An analysis of storm-induced landslides in colluvial soils overlying mudrock sequen-ces, southeastern Ohio, USA[J]. *Engineering Geology* 2005, 78(3/4): 257-274
- [2] 马东涛, 张金山, 冯自立, 等. 2004. 7. 20 云南盈江滑坡泥石流山洪灾害成因及减灾[J]. *灾害学* 2005, 20(1): 67-71 [Ma Dong-tao, Zhang Jinshan, Feng Zili, et al. Main causes of the landslide, debris flow and torrential flood disasters on July 20, 2004 in Yingjiang of Yunnan and the disaster reduction measures[J]. *Disaster Science* 2005, 20(1): 67-71]
- [3] Cardinali M, Galli M, Guzzetti F, et al. Rainfall induced landslides in December 2004 in south-western Umbria (central Italy): types, extent, damage and risk assessment[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2006, 6: 237-260
- [4] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. *应用生态学报* 2007, 18(4): 888-894 [Li Weili, Jin Changjie, Wang Anzhi, et al. Research progress in soil macropore flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2007, 18(4): 888-894]
- [5] Morris C, Mooney S J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers[J]. *Geoderma* 2004(118): 133-143
- [6] Jens T Birkholzer, Clifford K Hob. A probabilistic analysis of episodic preferential flow into superheated fractured rock[J]. *Journal of Hydrology* 2003(284): 151-173. Susan K Swanson, Jean M Bahr, Kenneth R, et al. Evidence for preferential flow through sandstone aquifers in Southern Wisconsin[J]. *Sedimentary Geology* 2006(184): 331-342
- [7] Hakan Rosqvist, Gorgia Destouni. Solute transport through preferential pathways in municipal solid waste[J]. *Journal of Contaminant Hydrology* 2000, 46: 39-60
- [8] 黄延章, 于大森. 微观渗流实验力学及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. [Huang Yanzhang, Yu dasen. *Microcosmic seepage experimental mechanics and its application* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press 2001.]
- [9] 吴华山, 陈效民, 邱琳, 等. 染色法测定、计算机解译农田土壤中孔隙数量的研究[J]. *水土保持学报* 2006, 20(3): 145-149 [Wu Huashan, Chen Xiaomin, Qiu Lin, et al. Study on quantity of macropore in farmland soils with computer interpretation and coloration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2006, 20(3): 145-149]
- [10] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制[J]. *地质论评* 2007, 53(5): 691-698 [Xu Zemin, Huang Runqiu, Tang Zhengguang. The engineering geological characteristics and its mechanism of the landslide in Touzhai[J]. *Geological Review* 2007, 53(5): 691-698]
- [11] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. *生态学报* 2006, 26(1): 231-243 [Niu Jianzhi, Yu Xinxiao, Zhang Zhiqiang. The present future research on preferential flow. *Acta Ecologica Sinica* 2006, 26(1): 231-243]
- [12] Ehlers W. 1975. Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil[J]. *Soil Science* 119: 242-249
- [13] Omoti U, Wild A. Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soils under leaching condition. 2. Filed experiment[J]. *Soil Science* 1979, 128: 98-104
- [14] 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 Yingge. The large pore in unsaturated vegetation development slope[J]. *Mountain Research* 2012, 30(4): 439-449]
- [15] Pierret A, Capowiez Y, Belzunces L, et al. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis[J]. *Geoderma* 2002, 106: 247-271
- [16] Shields F D, D H Gray. Effects of woody vegetation on the structural integrity of sandy levees[J]. *Water Resources Bulletin* 1993, 28(5): 917-931
- [17] Bohm W. *Methods of Studying Root Systems*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
- [18] Watson K W, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of tension infiltrometer[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 578-582
- [19] Moidrup P, Olesen T, Schjonning P, et al. Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics[J]. *Soil Sci Soc Am* 2000, 64(8): 94-100
- [20] Moidrup P, Olesen T, Komatsu T, et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases[J]. *Soil Sci Am J* 2001, 65(4): 613-623
- [21] Olesen T, Moldrup P, Yamaguchi T, et al. Constant slope impedance factor model for predicting the solute diffusion coefficient in unsaturated soil[J]. *Soil Sci* 2001, 166(2): 89-99

The Contribution of Soil-root Interstice to Rainfall Infiltration on a Vegetated Slope:

A Case Study at the Duanjiaying and Touzhai Area ,Yunnan Province ,China

WANG Bangtuan^{1,4} ,XU Zemin² ,WANG Bangyuan³ ZHAO Fuwan¹

(1. Department of Earth Science ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming 650093 ,China;

2. Department of Civil Engineering ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming 650500 ,China;

3. Department of Yunnan Geological Engineering Survey and Design Institute ,Kunming 650041 ,China;

4. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry ,Kunming 650051 ,China)

Abstract: The experimental area with high vegetation at the Touzhai ,Zhaozhong and Duanjiaying ,Chenggong ,Yunnan Province ,respectively using methylene blue and rhodamine B solution dyed tracer penetrant test had been used many times and It found that the guiding flow phenomenon was very obvious. The diversion function is likely more important than the traditional three kinds of soil macropore. A water infiltration velocity model was derived and the theoretical calculation was performed at different sizes of the soil-root interstices ,and compared with the measured values ,finally ,the guide flow proportion of soil-root interstice is discussed of the rainfall process in the Touzhai and Duanjiaying test area. Results show that the size of soil-root interstice are mainly concentrated in the size 0.5 ~ 1.0 mm ,most of the size is about 0.5 mm ,the water infiltration speed in soil-root interstice are in the range of 0.027 ~ 0.203 mm/s and 0.014 ~ 0.102 mm/s in the Touzhai and Duanjiaying test area. The infiltration volume accounted for 72% ~ 82% and 54% ~ 70% of total amount of infiltration in two test areas ,on the same area ,the seepage flow of the Touzhai test area is 1.67 times more than the Duanjiaying test area ,the contribution of soil-root interstice to the rainfall infiltration is notable.

Key words: a vegetated slope; landslide; rainfall infiltration; soil-root interstice