

马卡山不同植被群落斜坡土体中根土环隙导流特性^①

郭丽丽^{1,2}, 曾强³, 徐则民^{3*}, 张有为³, 杨继清⁴

(1 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650500; 2 武汉工程科技学院, 武汉 430200;

3 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500; 4 云南农业大学建筑工程学院, 昆明 650204)

摘 要: 根土环隙作为一种新型的特殊土壤大孔隙类型, 在植被发育斜坡土体降雨入渗过程中发挥着重要作用。采集呈贡实验区高盖度不同植被群落斜坡土体, 基于水分穿透法, 获取大孔隙特征参数, 结合套管数学模型, 进行了土体中根土环隙的导流特性研究, 结果表明: 木本和草本植被群落土体根土环隙尺寸范围分别为 0.62 ~ 1.02 mm、0.67 ~ 1.12 mm, 且前者土体各层环隙尺度均小于后者。两种植被群落土体中根土环隙流道 u/u_m 的最大值均随深度增加而增大, 但大小基本一致; 深度范围内, 土体各层 u/u_m 达到最大值时的 r 值提前, 且木本土体各层相应 r 值均大于草本; 根系及环隙尺寸的差异是形成其特征的主要原因。相同流道数量及雷诺数条件下, 平均流速、最大流速及环隙导流贡献率均随深度增加而增大, 流量则反之, 且木本土体各层流速、流量及贡献率均大于草本。

关键词: 植被发育斜坡; 滑坡; 降雨入渗; 根土环隙; 雷诺数

中图分类号: S152 **文献标识码:** A

在山区, 包括暴雨、大暴雨和特大暴雨在内的强降雨过程不仅会在狭窄的河谷区形成山洪, 而且还会在更为广大的谷坡区诱发滑坡泥石流等区域性、群发性斜坡灾害^[1-3]。降雨是滑坡最常见的诱发因素^[4-6], 无论何种性质的降雨过程, 只要雨水不转化为地下水, 就不会对斜坡稳定构成直接威胁^[7]。腐烂根系通道、动物活动通道及洞穴、干缩裂缝及团聚体间结构性孔隙等大孔隙在植被发育斜坡非饱和带土体中普遍存在^[8-13], 为斜坡土体降雨入渗提供了渗流路径。大孔隙是一个相对概念, 本文采用文献^[14]定义: 不论孔隙大小、形状如何, 能够提供优先水流路径的任何孔隙。文献^[15]对云南头寨和呈贡试验区进行斜坡现场示踪渗透试验, 发现根土环隙导流现象十分明显。传统的大孔隙及大孔隙流^[16-17]研究忽略根土环隙这一新型的特殊大孔隙类型, 高估了其他类型大孔隙的导流作用。因此, 本研究采集了不同植被群落斜坡土体, 基于水分穿透试验, 获取大孔隙特征参数, 结合套管数学模型, 进行了土体中根土环隙导流特性研究, 对斜坡土体降雨入渗机理、滑坡灾害孕育机制研究具有一定的促进意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究采样点在滇中呈贡新区, 属螳螂川流域的捞鱼河右侧马卡山。木本植被群落(M)和草本植被群落(C)斜坡土样采集地理位置分别为 102°52'16.87" E, 24°51'57.74" N 和 102°52'7.14" E, 24°51'36.76" N。木本基盖度为 0.31%, 草本基盖度为 1.14%。木本植被包括 12 种植物: 细齿叶柃(*Eurya nitida* Korthals)、云南油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)、滇青冈(*Themeda triandra* Forsk. Var. *Japonica* (Willd.) Makino)、华山松(*Pinus armandii* Franch)、云南松(*Pinus Yunnanensis* Franch)、车桑子(*Dodonaea viscosa* (Linn.) Jacq)、小雀花(*Campylotropis polyantha* (Franch.) Schindl)、圆柏(*Sabina chinensis* (Linn.) Ant)、沙针(*Osyris wightiana* wall)、银荆(*Acacia dealbata* Link)、蓝桉(*Eucalyptus globulus* Labill); 草本植被包括 10 种植物: 白花鬼针草(*Bidens pilosa* L. var. *radiata* Sch.-Bip)、紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum* Speng)、细柄草(*Capillipedium*

基金项目: 国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1502232, U1033601)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20135314110005)资助。

* 通讯作者(abc5100@188.com)

作者简介: 郭丽丽(1985—), 女, 内蒙古人, 硕士研究生, 主要从事植被发育斜坡稳定性方面研究。E-mail: gllsygn@163.com

parviflorum (B.Br)Schindl)、黄背草(*Themeda japonica* (Willd.) Tanaka)、野艾蒿(*Artemisia laandulaefolia* DC)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers)、丝茅(*Imperata koenigii* (Retz.) Beauv)、牛至(*Origanum vulgare* Linn)、蔗茅(*Erianthus rufipilus* (Steud.) Griseb)、白草(*Pennisetum flaccidum* Griseb)。马卡山最大坡高 83.0 m , 平均坡度为 35°, 土体深度不超过 1 m ; 年均降雨量和年均气温分别为 790 mm , 14.7℃。

1.2 研究方法

分别在木本和草本试验点开挖 1 m 深度土体剖面 , 垂直方向每隔 10 cm 的间距分 4 层采样 , 每层采集 3 个环刀平行样(5 cm × 5 cm) , 用来测定土体基本特性。采用挖掘法取 20 cm × 20 cm × 10 cm 土样测定根密度(%)及二级根系平均径级(表 1) , 以测土样基本特性相同的手段采集水分穿透样进行室内渗透试验。

对于大孔隙特征参数(表 2) , Poiseulle 方程^[18]建

立流量和孔隙半径间关系：

$$q = \pi r_0^4 \Delta p / (8 \eta \tau L)$$
(1)

出流量达到稳定状态：

$$q = \pi r_0^2 \tau L / t$$
(2)

据(1)、(2)式推求大孔隙当量半径：

$$r_0 = \tau L \sqrt{8 \eta / t \Delta p}$$
(3)

式中： q 为单位出流量(cm^3/s)； r_0 为大孔隙半径(cm)； p 为压力水头(cm)； η 为水黏滞系数($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$)； τ 为大孔隙弯曲系数，一般取 1.2； L 为土柱高度(cm)； t 为第一次加水开始计时的时间(s)。

假定某个孔隙出流速率为 $v(\text{cm}/\text{s})$, 则单位出流量为：

$$q_e = n \pi r_1^2 v$$
(4)

取每个大孔隙半径范围的中间半径 r_1 , 利用式(4)求大孔隙数量 n 。

表 1 土体相关特性
Table 1 Characteristics of tested soils

植被	坡度 (°)	土层深度 (cm)	含水率 (%)	体积质量 (g/cm^3)	总孔隙度 (%)	根密度 (%)	平均根径 (mm)
木本	23	0 ~ 10	20.1	1.10	68.7	2.69	2.14
		10 ~ 20	25.8	1.35	59.4	1.91	1.80
		20 ~ 30	30.7	1.47	57.4	0.86	1.21
		30 ~ 40	30.8	1.54	55.6	0.53	0.95
草本	18	0 ~ 10	22.9	1.12	66.9	1.04	1.33
		10 ~ 20	29.3	1.45	57.6	0.59	1.00
		20 ~ 30	29.2	1.47	57.0	0.13	0.47
		30 ~ 40	29.8	1.44	58.2	0.05	0.29

2 结果与分析

2.1 马卡山不同植被群落斜坡土体大孔隙特征

表 2 显示 , M 和 C 土体各层大孔隙数量分别为 211.9、147.5、71.3、56.3 个/ dm^2 和 60、63.7、19.2、33.9 个/ dm^2 , M 土体各层大孔隙量明显大于 C 土体 ; 土体上层大孔隙加权半径并不一定大于下层(如 M2、M3 和 C2、C3) , C 土体各层加权孔径均大于 M 土体 , 说明并非木本植被群落土体中形成的大孔隙尺寸大 , 根系尺寸并不是控制大孔隙尺寸的唯一因素 ; 两种植被群落土体各层大孔隙度、稳渗速率特征与大孔隙数量特征一致。整体上 , 两种植被群落斜坡土体大孔隙数量、大孔隙加权孔径、大孔隙度、稳渗速率均随土体深度的增加而减小。

图 1 和图 2 表明 , M 和 C 土体大孔隙数量(M_1 、 C_1)与根密度(G_M 、 G_C)的关系分别为 $M_1 = 72.788 G_M$

$+ 12.749 (R^2 = 0.995\ 5)$, $C_1 = 38.364 G_C + 26.840 (R^2 = 0.681\ 4)$; 加权孔径(M_2 、 C_2)与根密度(G_M 、 G_C)关系分别为 $M_2 = 0.143\ 6 G_M + 0.604\ 9 (R^2 = 0.754\ 9)$, $C_2 = 0.286\ 9 G_C + 0.810\ 2 (R^2 = 0.449\ 6)$; 大孔隙度(M_3 、 C_3)与根密度(G_M 、 G_C)关系分别为 $M_3 = 10.993 G_M - 4.094\ 7 (R^2 = 0.901\ 7)$, $C_3 = 7.152\ 5 G_C + 1.963\ 5 (R^2 = 0.965\ 5)$; 稳渗速率(M_4 、 C_4)与根密度(G_M 、 G_C)关系分别为 $M_4 = 0.200\ 2 G_M - 0.089\ 7 (R^2 = 0.885\ 3)$, $C_4 = 0.176\ 3 G_C + 0.020\ 2 (R^2 = 0.969\ 8)$; M 土体大孔隙数量、加权孔径与根密度相关性均高于 C 土体 ($M_1 > C_1$ 、 $M_2 > C_2$) , 而大孔隙度、稳渗速率与根密度相关性则低于 C 土体 ($M_3 < C_3$ 、 $M_4 < C_4$) ; M 土体大孔隙特征参数与根密度相关性大小为 $M_1 > M_3 > M_4 > M_2$, C 土体相应大小为 $C_4 > C_3 > C_1 > C_2$; 说明根密度对不同植被群落斜坡土体大孔隙特征的影响程度不同。

表 2 大孔隙特征参数
Table 2 Characteristic parameters of macropores of tested soils

土样 编号	土层深度 (cm)	孔径范围 (mm)	中间孔径 (mm)	数量 (个/dm ²)	加权孔径 (mm)	大孔隙度 (%)	稳渗速率 (ml/s)
M1	0~10	1.9~1.5	1.7	7.2	1.02	28.61	0.51
		1.5~1.3	1.4	11.0			
		1.3~1.0	1.15	51.4			
		1.0~0.8	0.9	142.3			
M2	10~20	1.0~0.9	0.95	21.0	0.81	11.73	0.19
		0.9~0.8	0.85	44.3			
		0.8~0.7	0.75	82.2			
M3	20~30	1.1~0.9	1.0	15.1	0.83	6.48	0.11
		0.9~0.8	0.85	21.0			
		0.8~0.7	0.75	35.2			
M4	30~40	0.7~0.6	0.65	31.0	0.62	2.65	0.03
		0.6~0.5	0.55	25.3			
C1	0~10	1.8~1.5	1.65	2.6	1.12	8.92	0.21
		1.5~1.3	1.4	5.1			
		1.3~1.1	1.2	15.3			
		1.1~0.9	1.0	37.0			
C2	10~20	1.7~1.4	1.55	2.4	0.93	7.09	0.11
		1.4~1.2	1.3	3.5			
		1.2~1.0	1.1	7.1			
		1.0~0.7	0.85	50.7			
C3	20~30	1.6~1.4	1.5	1.6	1.04	2.74	0.06
		1.4~1.1	1.25	3.5			
		1.1~0.9	1.0	7.4			
		0.9~0.8	0.85	6.7			
C4	30~40	0.9~0.8	0.85	5.2	0.67	2.05	0.02
		0.8~0.7	0.75	4.8			
		0.7~0.6	0.65	11.5			
		0.6~0.5	0.55	12.4			

注：表中的 M、C 分别指木本植被群落和草本植被群落。

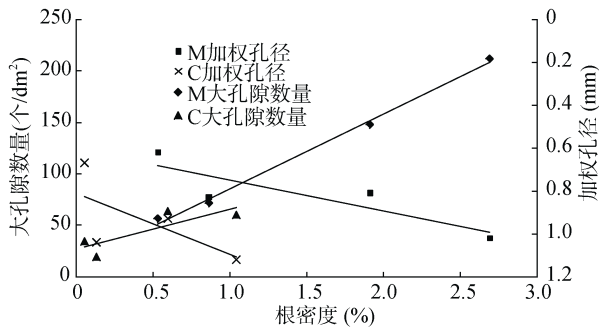


图 1 根密度与大孔隙量和孔径的关系
Fig. 1 Correlations among root density, size and number of macropores

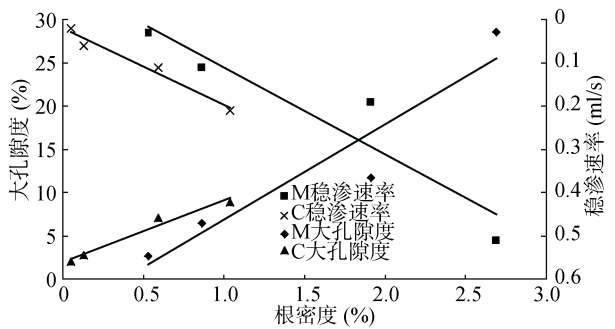


图 2 根密度与大孔隙度和稳渗速率的关系
Fig. 2 Correlations among root density, macropore porosity and steady infiltration rate

2.2 马卡山不同植被群落斜坡土体根土环隙导流特性

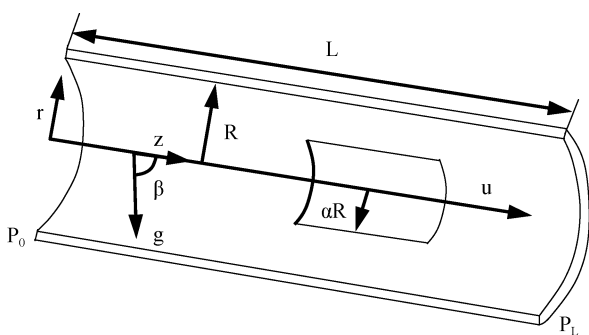
2.2.1 基本假设及流道概念模型 水分穿透法认为土体大孔隙为圆管状,可以获得土体各层大孔隙数量及尺度等特征参数,假定所有大孔隙均为根土环

隙,则圆管直径即为根土环隙的水力当量直径,结合实测土体各层根系特征,可以得到根土环隙特征参数(表 3),且推求可知流道长度与环隙尺度之比远大于 1。实际根土环隙不同于圆形双套管模型,为便于算例计算,提出几点基本假设: 环隙流道无偏心; 环隙

表 3 根土环隙特征参数
Table 3 Characteristic parameters of root-soil annulus

土样编号	深度 (cm)	根量 (个/dm ²)	内径 aR (mm)	外径 R (mm)	环隙尺寸 (mm)	内外径比 α	环隙体积 (cm ³)
M1	0 ~ 10	211.9	1.070	2.090	1.02	0.51	21.04
M2	10 ~ 20	147.5	0.900	1.710	0.81	0.53	9.61
M3	20 ~ 30	71.3	0.605	1.435	0.83	0.42	3.72
M4	30 ~ 40	56.3	0.475	1.095	0.62	0.43	1.69
C1	0 ~ 10	60.0	0.665	1.785	1.12	0.37	5.07
C2	10 ~ 20	63.7	0.500	1.430	0.93	0.35	3.52
C3	20 ~ 30	19.2	0.235	1.275	1.04	0.18	0.93
C4	30 ~ 40	33.9	0.145	0.815	0.67	0.18	0.67

周围土体基质及根系均为非透水介质；工质为不可压牛顿流体，且为纯水；不考虑水分的径向及环向流动，仅沿环隙流道作轴向层流运动，即一维零散度黏性稳定流。因此，根土环隙相当于圆管内部插入一根直径不沿程变化的实心根系，模型建立柱坐标系如图 3。



(图中 L 代表根土环隙长度； $P_L - P_0$ 代表压力梯度； R 代表外环半径； r 代表柱坐标系方向； z 代表柱坐标系方向； g 代表重力加速度； u 代表流速； β 代表根系与垂直方向的夹角)

图 3 流道概念模型

Fig. 3 Runner conceptual model

2.2.2 流道速度分布 由纳维-斯托克斯方程 (N-S 方程) 可推求圆形管道速度方程为：

$$\frac{du}{dr} = -\frac{r\Delta p'}{2\mu L} + \frac{A_1}{r\mu} \quad (5)$$

式中： u 为与圆管半径 r 有关的流速， p'/L 为压力梯度 ($p' = p - \rho g z \cos \beta$)， β 为重力与流速方向的夹角， 90° 时代表水平根土环隙， 0° 时代表垂直根土环隙， $(0^\circ, 90^\circ)$ 代表倾斜根土环隙， μ 为流体动力黏度， A_1 、 A_2 均为积分常数。

由(5)式积分得到：

$$u = -\frac{r^2 \Delta p'}{4\mu L} + \frac{A_1}{\mu} \ln r + A_2 \quad (6)$$

对于圆形套管内的层流流动速度方程与圆管中相同，其边界条件如下：

$$u|_{r=aR} = 0, \quad u|_{r=R} = 0 \quad (7)$$

式中： α 为套管内外半径比。

代入(6)式得到速度分布方程为：

$$u = \frac{R^2 \Delta p'}{4\mu L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \frac{1 - \alpha^2}{\ln(1/\alpha)} \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] \quad (8)$$

当 $r = R \sqrt{[(1 - \alpha^2)/2 \ln(1/\alpha)]}$ 时，最大速度为：

$$u_{\max} = \frac{R^2 \Delta p'}{4\mu L} \left\{ 1 - \frac{1 - \alpha^2}{2 \ln(1/\alpha)} \left[1 - \ln \left(\frac{1 - \alpha^2}{2 \ln(1/\alpha)} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

平均速度方程为：

$$u_m = \frac{1}{\pi R^2 (1 - \alpha^2)} \int_{aR}^R u 2\pi r dr = \frac{R^2 \Delta p'}{8\mu L} \left[\left(1 + \alpha^2 \right) - \frac{1 - \alpha^2}{\ln(1/\alpha)} \right] \quad (10)$$

由式(8)与式(10)得：

$$\frac{u}{u_m} = 2 \frac{\left(R^2 - r^2 \right) \ln \left(\frac{1}{\alpha} \right) + R^2 (1 - \alpha^2) \ln \left(\frac{r}{R} \right)}{R^2 \left[\left(1 + \alpha^2 \right) \ln \left(\frac{1}{\alpha} \right) + \alpha^2 - 1 \right]} \quad (11)$$

将参数 R 和 α 值代入(11)，MATLAB 绘制流速分布如图 4，表明：在根土环隙流道两侧根系表面和土体基质壁面处流速为零；同一环隙流道，流速在根系表面向土体走向上表现为先增大后减小，呈非对称抛物线型；两种植被群落土体中根土环隙流道 u/u_m 的最大值随深度增加而增大，且大小基本一致；深度范围内，土体各层 u/u_m 达到最大值时的 r 值提前，且木本植被群落土体各层的此 r 值均大于草本植被群落，造成上述特征的原因主要是不同植被群落土体各层根系及环隙尺寸的差异。

体积流量方程为：

$$q_V = \pi R^2 (1 - \alpha^2) u_m = \frac{\pi R^4 \Delta p'}{8\mu L} \left[\left(1 - \alpha^4 \right) - \frac{(1 - \alpha^2)^2}{\ln(1/\alpha)} \right] \quad (12)$$

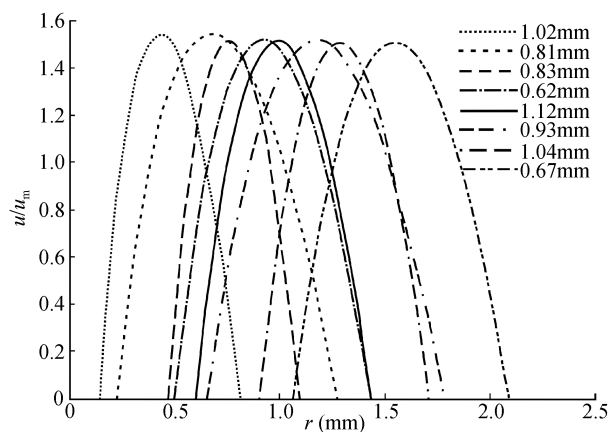


图 4 环隙流道速度分布
Fig. 4 Velocity distribution of annular flow

式中：当 $\alpha = 0$ 时，上述套管公式可转化为圆管公式。
圆形套管的水力当量直径为：

$$D = \frac{4A}{O} = \frac{4\pi R^2(1-\alpha^2)}{2\pi R(1+\alpha)} = 2R(1-\alpha) \quad (13)$$

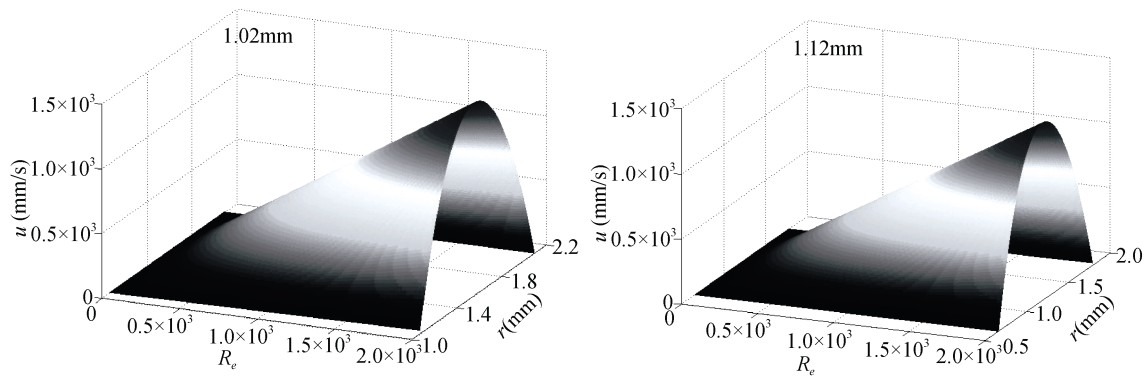


图 5 流速与雷诺数、环隙尺寸的关系
Fig. 5 Relations between velocity with Reynolds number and annulus size

实际情况中，土体各层根系量及流道雷诺数存在时空变异，为获得确定的流量，假定木本植被群落和草本植被群落土体各层雷诺数相等(取 $R_e = 1$)，并通过计算得到环隙流道流量分布如表 4。整体上，平均流速、最大流速均随深度增加而增大，流量均随深度

雷诺数方程为：

$$R_e = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (14)$$

联立方程(11)和(14)得：

$$u = \frac{\mu R_e}{\rho R(1-\alpha)} \frac{(R^2 - r^2) \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) + R^2(1-\alpha^2) \ln\left(\frac{r}{R}\right)}{R^2 \left[(1+\alpha^2) \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) + \alpha^2 - 1 \right]} \quad (15)$$

一般情况下，转捩雷诺数^[19-21] $R_e = 2\,000$ 是套管层流运动的上限，在压强为 101.325 kPa、温度为 20℃的条件下， μ/ρ 取 $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1.01 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。据(15)式，以环隙尺寸分别为 1.02 mm、1.12 mm 为例，绘制流速与雷诺数 R_e 、环隙尺寸 α 的关系如图 5，关系图具有相同的发展形式，流速与雷诺数明显为线性关系；相同雷诺数条件下，环隙流道尺寸范围决定流速的大小及分布。

增加而减小，木本植被群落土体各层流速、流量均大于草本植被群落；两种植被群落土体中根土环隙导流贡献率均随深度增大而增大，木本土体各层占比均大于草本，其值范围分别为 40.91%~93.33%、15.00%~50.00%。

表 4 环隙流道流量分布
Table 4 Flow distributions of annular channels

土样编号	深度(cm)	R_e	$u_m(\text{mm/s})$	$u_{\max}(\text{mm/s})$	$q_v(\text{ml/s})$	贡献率(%)
M1	0~10	1	0.495	0.743	0.209	40.98
M2	10~20	1	0.624	0.947	0.119	62.63
M3	20~30	1	0.608	0.917	0.045	40.91
M4	30~40	1	0.815	1.223	0.028	93.33
C1	0~10	1	0.451	0.681	0.046	21.91
C2	10~20	1	0.543	0.824	0.038	34.55
C3	20~30	1	0.486	0.745	0.009	15.00
C4	30~40	1	0.754	1.165	0.010	50.00

3 结论

1) 木本植被群落土体各层大孔隙数量、大孔隙度、稳渗速率均大于草本植被群落；根系尺寸并非控制大孔隙尺度的唯一因素；整体上，两种植被群落斜坡土体大孔隙特征参量均随土体深度增加而减小。根密度对不同植被群落斜坡土体大孔隙特征的影响程度不同，木本植被群落土体大孔隙数量、加权孔径与根密度相关性均高于草本植被群落，而大孔隙度和稳渗速率则反之。

2) 基于水分穿透法，获得了土体大孔隙特征值，并得到两种植被群落土体根土环隙尺寸范围分别为 0.62 ~ 1.02 mm、0.67 ~ 1.12 mm，且草本植被群落土体各层环隙尺度均大于木本植被群落。

3) 流速在同一环隙流道内随 r 值的增大呈先增大后减小的非对称抛物线型；两种植被群落土体中根土环隙流道 u/u_m 的最大值随深度增加而增大，但大小基本一致；深度范围内，土体各层 u/u_m 达到最大值时的 r 值提前，且木本植被群落土体各层相应 r 值均大于草本植被群落；不同植被群落土体各层根系及环隙尺寸的差异是形成上述特征的主要原因。

4) 相同流道数量及雷诺数条件下，平均流速、最大流速及环隙贡献率均随深度增加而增大，流量则反之，且木本植被群落土体各层流速、流量及贡献率均大于草本植被群落； $R_e = 1$ 时，木本和草本植被群落环隙贡献率分别为 40.91% ~ 93.33%、15.00% ~ 50.00%。

5) 不同植被群落斜坡土体各层根量及其尺寸、根土环隙流道尺度及壁面粗糙程度等均不同，有关根土环隙导流特性方面的研究有待进一步开展。

参考文献：

[1] 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
[2] Corominas J, Moya J. A review of assessing land slide frequency for hazard zoning purposes[J]. Engineering

Geology, 2008, 102(3): 193-213
[3] Jakob M, Lambert S. Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia[J]. Geomorphology, 2009, 107(3): 275-284
[4] 张友谊, 胡卸文, 朱海勇. 滑坡与降雨关系研究展望[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 104-108
[5] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055-1060
[6] 张玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 833-841
[7] 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
[8] 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
[9] 周赛, 梁玉婷, 孙波. 红壤微生物群落结构及其演变影响因素的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 272-277
[10] 李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土壤演变的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1180-1187
[11] 周赛, 梁玉婷, 张厚喜, 等. 我国中亚热带毛竹林土壤微生物群落的空间分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2015, 47(2): 369-377
[12] 李宗超, 胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 242-248
[13] 盛丰, 张利勇, 王康. 土壤大孔隙发育特征对水和溶质输移的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 1007-1013
[14] 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
[15] 王帮团, 徐则民, 王帮圆. 植被发育斜坡土体中根-土间隙的导流特性[J]. 山地学报, 2015, 33(3): 257-267
[16] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18(5): 1311-1325
[17] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801-2811
[18] Hillel D. Introduction to soil physics[M]. London: Academic Press, 1982
[19] 孙中宁, 孙立成, 阎昌琪, 等. 窄缝环形流道单相摩擦阻力特性实验研究[J]. 核动力工程, 2004, 25(2): 123-127
[20] 路广遥, 孙中宁, 王经, 等. 窄缝环形通道内流动阻力特性的实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(3): 28-31
[21] 幸奠川, 阎昌琪, 王畅, 等. 矩形通道高宽比对单相层流特性的影响[J]. 力学学报, 2013, 45(3): 331-336

Flow Characteristics of Root-soil Annulus in Slope Soil Under Different Vegetation Communities

GUO Lili^{1,2}, ZENG Qiang³, XU Zemin^{3*}, ZHANG Youwei³, YANG Jiqing⁴

(1 Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2 Wuhan University of Engineering Science, Wuhan 430200, China; 3 Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 4 Faculty of Civil Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650204, China)

Abstract: As a new type of special soil macropore types, root-soil annulus plays an important role in the process of rainfall infiltration of soil on a vegetated slope. Soils were collected in the high coverage slopes of different vegetation communities in the experimental area of Chenggong, the characteristic parameters of the macropores were obtained by using the moisture breakthrough method, then the flow characteristics of the root-soil annulus were studied combined with mathematical model of annular tubes. Results showed there was little difference between the sizes of the root-soil annulus of the woody and herbaceous vegetation communities, which were distributed in the ranges of 0.62–1.02 mm and 0.67–1.12 mm, respectively, and the annulus scales in different layers in the former vegetation community were smaller than those of the latter. The maximum values of u/u_m of root-soil annulus channels in the soils under the two vegetation communities increased with depth, however, the value was nearly the same; within the scope of the depth, the r value was in advance when u/u_m of the soil layer reached the maximum value, and the corresponding r values of all layers of woody soil were greater than those of the herb. The differences between the size of root system and the annulus were the main reasons for the formation of the above characteristics. Under the same of the number of fluid channels and Reynolds number, the average flow velocity, maximum velocity and flow contribution rate of the annular increased with depth, however, the situation of flow was opposite. In addition, the flow rate, flow and contribution rate of woody plant soil in each layer were higher than those of herb plant soil.

Key words: Vegetated slope; Landslide; Rainfall infiltration; Root-soil annulus; Reynolds number