

不同植被发育斜坡土体优先流特征

徐宗恒¹ 徐则民^{1,*} 宫琦² 张露月¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院土木系, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学国资学院地球科学系, 云南 昆明 650000)

摘 要: 以昆明市呈贡新区马卡山云南松和狗牙根两类典型植被发育斜坡土体为研究对象, 采用染色示踪试验研究了水分通过斜坡土体大孔隙网络以优先流形式下渗这一过程。对采集到的剖面染色示踪图像进行处理, 得到了土体优先流特征参数的变化规律。结果表明: 不同植被发育斜坡土体对降雨的响应是不同的; 平均染色面积比和染色路径数量在同一深度不同剖面间以及不同深度处同一剖面间均表现出明显的异质性; 除了表层 2 cm 深度范围外, 其余深度处云南松发育斜坡土体中平均染色面积和平均染色路径数量比狗牙根的大, 说明前者优先流发生和发展较后者活跃。最后, 通过对土体中分层根系生物量的测定, 发现其与总染色面积比以及染色路径数量随深度增加呈较好的正相关关系, 说明斜坡土体中优先流特征与植被根系分布有着密切的关系。

关键词: 优先流; 染色示踪; 图像处理; 染色面积比; 染色路径

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

滑坡是我国山区的主要灾害之一, 滑坡的触发因素很多, 其中以降雨特别是暴雨诱发最为普遍。近年来, 在气候变暖的背景下, 全球范围内越来越频繁的强降雨、强热带风暴、热浪等极端天气气候事件导致在广大的谷坡区形成了大规模的区域性、群发性斜坡失稳地质灾害^[1-5]。据国土资源部通报, 2011 年全国共发生包括 11 491 起滑坡在内的地质灾害 15 664 起, 造成 245 人死亡、32 人失踪, 直接损失达 40.1 亿元^[6]。众多的地质灾害事件给广大人民群众生活和安全构成了极大地威胁, 给生态环境造成了极大地破坏, 严重影响了当地的经济和生活秩序。

由降雨触发的滑坡被称为“降雨型滑坡”, 降雨主要是通过雨水转化为地下水发生水岩相互作用, 改变原有的斜坡平衡状态从而诱发滑坡的。降雨型滑坡的既有研究, 主要集中于降雨与滑坡的关系以及降雨转化为地下水以后的水岩相互作用, 而往往忽视了降雨转化为地下水这一基础过程^[7], 实际

上, 降雨诱发滑坡主要是水分通过斜坡大孔隙网络以快速优先流形式快速入渗引起的, 降雨与滑坡两者之间的关系是间接的, 这一关系的形成受控于降雨转化为地下水, 对这一过程进行深入研究具有重大的现实意义。

1 试验地点和染色示踪试验

本次研究试验点位于昆明市呈贡大学城附近的马卡山林区, 斜坡区发育有长势较好的天然和人工种植的森林植被, 物种资源丰富, 生物区和生物地理成分相对简单, 生态环境受外界扰动相对较小, 林区的原始状态保持较完整。马卡山最高峰海拔 2 085 m, 坡脚海拔 2 002 m, 坡高 83 m, 平均坡度 35°。通过对林区进行植被调查, 试验区植被覆盖度在 95% 以上, 主要植被类型共计 24 种, 草本植被 10 种, 木本植被 14 种, 木本植被以云南松(*Pinus yunnanensis* Franch) 为典型, 草本植被以狗牙根(*Cynodon dac-*

收稿日期(Received date): 2012 - 05 - 024; 改回日期(Accepted): 2012 - 06 - 11。

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) 和交通部西部科技项目(200831876723)。[The National Natural Science Foundation of China - Yunnan Joint Fund and the Ministry of Western science and technology project.]

作者简介(Biography): 徐宗恒(1987 -), 男, 云南永胜人, 博士研究生, 主要从事水文地质与工程地质方向研究工作。[Xu Zongheng(1987 -), male, doctoral candidate, majoring in hydrogeology and engineering geology research.] E-mail: xzh2008@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 徐则民(1963 -), 教授, 博士生导师, E-mail: abc5100@188.com

tylon (Linn.) Pers) 为典型, 另外还有白草、蔗茅、野艾蒿、白花鬼针草、黄背草、小雀花、细柄草等。选择在典型植被(云南松和狗牙根)发育斜坡土体区域(下文简称试验点1和试验点2)进行相关的试验, 两处的地理位置分别为 $102^{\circ}52'16.87''\text{E}$ 、 $24^{\circ}51'57.74''\text{N}$ 和 $102^{\circ}52'7.14''\text{E}$ 、 $24^{\circ}51'36.76''\text{N}$, 海拔分别为 2 024 m 和 2 043 m, 坡度分别为 23° 和 18.7° 。

试验点的选择主要考虑与周围植被的距离关系和场地的平整度, 一般选择植被中间一片坡度不宜过大较为平整的区域, 不宜离植被过近以避免植被主根系对开挖剖面以及观测时造成的影响。在试验开始之前, 先去除土体表层范围内的大根枯枝和大块砾石, 并清除周围有可能妨碍试验的外伸树枝。在清理的时候注意尽量不要扰动土体表层枯枝落叶层及腐殖层。清理好试验现场以后, 顺着坡向沿 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的正方形区域四边开挖约 20 cm 深的沟槽, 将用螺栓连好的 4 块木板组成的矩形框(尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.25\text{ m}$) 埋入沟槽中, 并将矩形框边缘空隙区域填土夯实。采用均匀喷洒方式, 将配置好的 1.5 g/L 总量为 150 L 的亚甲基蓝溶液用 2 个喷壶轮流缓慢均匀的喷洒到矩形框内, 连续喷洒 5 h(喷洒的整个过程中并未出现明水和径流)。溶液喷洒完毕后, 用保温薄膜覆盖于矩形框上以减少蒸发和夜间自然降雨的影响。喷洒染色剂 24 h 以后, 开始开挖土体优先流观测剖面, 剖面间距 25 cm, 共开挖典型剖面 4 个(图 1 和图 2), 每一个剖面都用小铁锹整理平齐, 然后用毛刷将剖面上附着土颗粒及杂物清理干净, 用遮阳伞遮挡太阳光线以后, 用 820 万有效像素的 Canon EOS 20D 数码相机进行剖面染色

图像的采集。

2 结果与分析

2.1 图像处理

图像处理是针对染色示踪试验所取得的染色图像进行的, 是提取和分析植被发育斜坡土体优先流特征参数的基础。此处, 将取得的染色示踪图像依次经过类型转换、曝光阈值、降噪滤镜和数值化 4 个步骤的处理^[8](所采用的软件为 MATLAB 7.0, Adobe Photoshop CS3 和 Image-Pro Plus 6.0), 最终可以得到一个仅由 0 和 255 组成的 1000×400 阶的位图数值矩阵, 将其存入 Microsoft Excel 表格以方便优先流形态特征参数的计算。

图 3 为以试验点 1 某剖面的染色图像的各阶段处理成果图像来说明图像处理的过程。

2.2 形态特征参数计算

对优先流的形态特征的研究, 主要通过计算剖面上染色图像的染色面积比和染色路径 2 个参数实现的^[8]。染色面积比是指在某一深度土层中染色像素数占图像宽度方向上总像素(本次研究中取 1 000 pixels)的比值, 通过计算得到的染色面积比随深度的变化趋势可揭示出优先流分布的范围和连续性。染色路径数量是指在某一深度处渗流通道的数量, 数值可根据染色与未染色之间的节点数量(即位图矩阵中每行 0 和 255 的节点)计算得到, 染色路径数量随着深度的变化趋势可以揭示出优先流路径的复杂性、连通性和分支性。

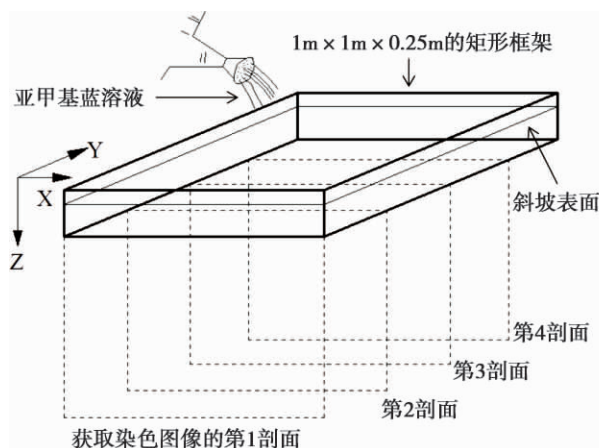


图 1 染色示踪试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram for dye tracer experiments



图 2 待开挖剖面的研究区域

Fig. 2 Survey region for profile excavation

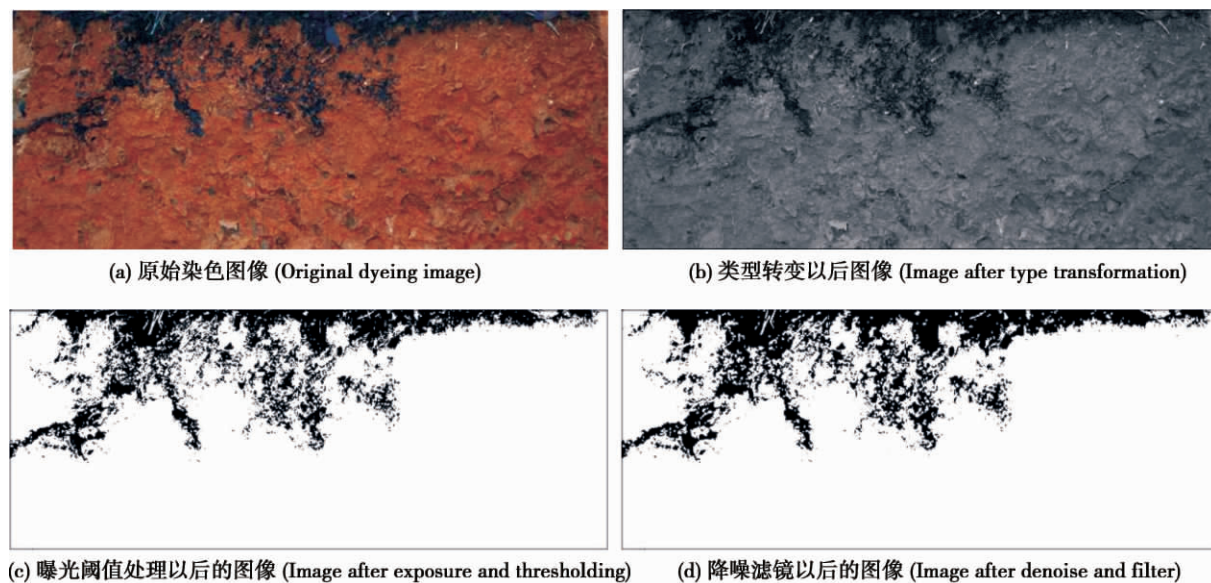


图3 染色示踪图像处理示意图

Fig. 3 Four steps for image processing

2.3 染色面积比计算结果

利用图像数字化以后得到的位图数值矩阵数据,可以计算得到两类植被发育斜坡土体各剖面的染色面积比,通过各剖面的染色面积比可以计算得到平均染色面积比。染色面积比随深度的变化趋势如图4与图5所示,图4为两类植被发育斜坡土体各剖面的染色面积比变化图;图5为剖面的平均染色面积比变化图。

2.3.1 云南松发育斜坡土体染色面积比变化规律

云南松发育斜坡土体4个观测剖面上的染色面积比随深度变化规律见图4所示,随着深度的增加,整体上每个剖面上染色面积比均下降,但下降的程度相对较均匀,在表层0~5 mm范围内,染色面积比均能达到95%以上。由于存在水分的侧向入渗,染色面积比并不是随着深度的增加而单调递减,局部位置染色面积比会突然增大。在4 cm深度处,各剖面的染色面积比基本相等,在4 cm深度以上,沿顺坡方向,染色面积比依次减小,在4 cm深度以下,染色面积比大小刚好相反,说明在此深度以上,水流的活动程度沿坡向依次降低,沿坡向向下方向优先流活跃程度越来越高。图5为4个剖面上的平均染色面积比随着深度的变化曲线,其中“ $\bar{a}_v + \text{std}$ ”和“ $\bar{a}_v - \text{std}$ ”^[9]2条曲线是为了表示各个剖面间染色面积的波动变异程度,由图可以看出,染色面积比在同一深度不同剖面间以及不同深度处同一剖面间均表现出明显的异质性,且在深度3~10 cm之间不同

剖面间染色面积比波动变异较大。

2.3.2 狗牙根发育斜坡土体染色面积比变化规律

图4中狗牙根发育斜坡在4个观测剖面上的染色面积比随深度变化规律,从图中亦可以看出,随着深度的增加,整体上每个剖面的染色面积比均逐渐下降。染色面积比在表层2 cm深度范围内较高,2 cm深度处染色面积迅速下降,在12 cm深度以下染色较为均匀,染色面积比为5%~10%,说明此深度范围内水分以优先流形式分化较严重,水分沿着较少且稳定的快速渗流通道向垂直深度处迁移。同理,从图5可以看出,整体上染色面积比波动变异程度没有云南松发育斜坡土体剖面间的严重,在表层2~12 cm范围内波动较严重,从12 cm深度之下波动程度降低,各剖面的染色面积比发展较稳定。

2.3.3 不同植被发育斜坡土体平均染色面积比变化规律比较

将图5中2组平均染色面积比进行比较可以看出,在任意深度处,云南松发育斜坡土体平均染色面积比均较大,说明云南松发育斜坡土体中优先流现象比狗牙根下的活跃。细节处,在0~5 mm的范围内,染色面积比均达到0.8以上,表层腐殖层的范围内基本被染色,随着土体深度的增加,狗牙根下的土体染色面积比具有减小趋势,且很少出现较大反弹上升的情况,说明狗牙根下土体中发生侧向流的几率很小,相比而言,云南松发育斜坡土体中在某些位置处侧向流相对较活跃。

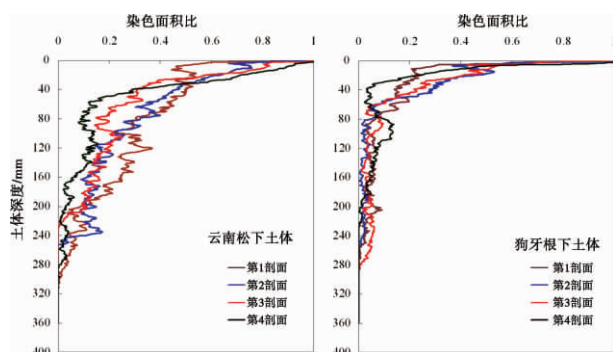
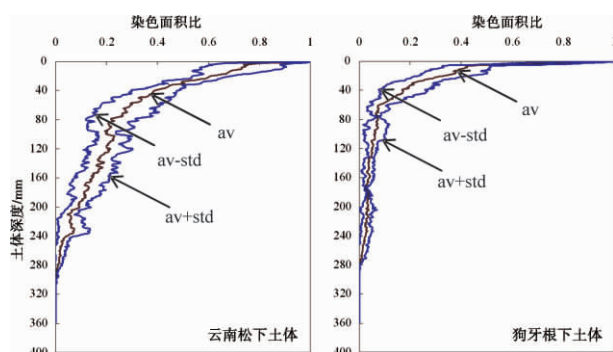


图4 土体剖面染色面积比变化图

Fig. 4 Dyeing area ratio of soil profiles covered



(“av” and “std” in the figures represent average value and standard deviation, respectively)

图5 土体平均染色面积比变化图

(注: av 表示均值, std 表示标准差)

Fig. 5 Average dyeing area ratio of soil profiles covered

2.4 染色路径数量计算结果

2.4.1 云南松发育斜坡土体中染色路径数量变化规律

图6为云南松下土体4个染色剖面染色路径数量变化图,从图可以看出,剖面染色路径数量范围为0~600个,在深度为40 mm和120 mm的地方出现2个波峰,在此深度范围内染色路径数量达到了顶峰,水分流动在此深度处分化最为严重。随着深度的增加,分化程度逐级改变,下层土体水分沿着一些独立的路径向下游迁移,染色路径数量总体上逐渐减小。云南松下土体染色路径数量变化波动(反弹上升情况)较频繁,说明优先流路径随深度变化极不稳定。

2.4.2 狗牙根发育斜坡土体中染色路径数量变化规律

与云南松下土体相比,图6中狗牙根下土体中染色路径数量下降趋势较为稳定,波动不太激烈,最大染色路径数量约为520个,较前者少。在表层范

围内,染色路径数量最大,水分流动形态分化最为显著,表层土体至70 mm范围内,染色路径数量急剧下降,说明在此分界面上,水分沿原来较多的渗流路径转变为相对独立的几条优先流路径向下渗透。在70 mm以下深度范围,染色路径数量相对稳定,说明土体中水分沿着几条主要的渗流路径迁移而未发生改变。

2.4.3 不同植被发育斜坡土体中染色路径数量比较

土体染色路径数量随深度的变化规律可以说明土体中水流的流态和水流分化的程度。图7为两类植被发育斜坡土体剖面上平均染色路径数量比较图,除表层2 cm的范围内,其余位置处云南松发育斜坡土体中染色路径数量皆比狗牙根下土体中的多,并且狗牙根下土体中染色路径数量随深度减少很少出现反弹升高的情况。由此反映出,狗牙根下的土体中水分仅依靠几条传导能力较强的优先迁移路径往下渗透,而在云南松下土体中,则分布有较多

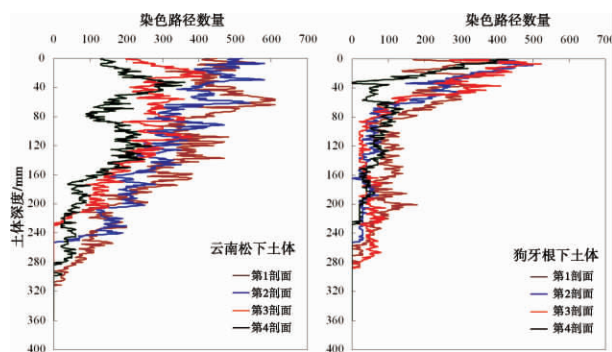


图6 土体中染色路径数量变化图

Fig. 6 Dyeing paths of soil profiles covered

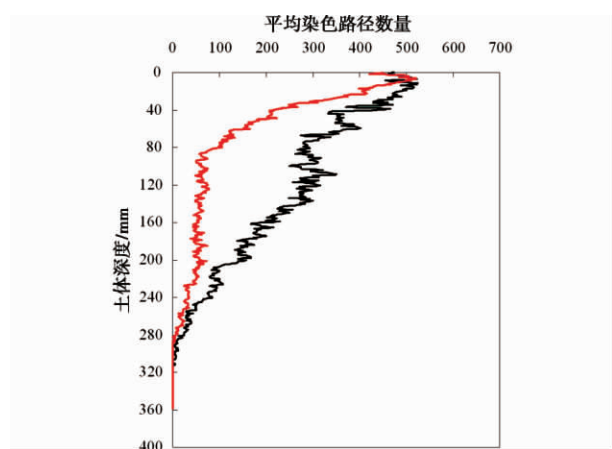


图7 不同植被下土体中平均染色路径数量比较图

Fig. 7 Comparison diagram about average dyeing paths of soil profiles in two different vegetated slopes

条优先渗透路径,优先流路径的发育程度明显高于狗牙根下的土体。

3 动植物活动对优先流特征的影响

植被是控制斜坡大孔隙形成、规模和稳定性的决定性因素。植被中细小的根系和相关的菌丝会捕捉周围土体颗粒形成团聚体,而枯枝落叶层、根系分泌物和真菌的腐殖化形成的有机质是重要的团聚体胶结物,也是土体中打洞动物的主要食物来源^[10],所以说,植被根系分布和打洞动物通道在土体中时常会存在着共生关系。图8显示了动物通道和植物根系的共生的关系,图8(a)为试验点2处表层土体20 cm深度范围内蚂蚁通道追踪根系曲折延伸的情况;图8(b)和(c)为试验点1处在斜坡区表面1 m×1 m范围内发育的动物通道(图中红圈处)及其下坡剖面20 cm深度方向上根系生长情况。

植被根系通道和动物通道等大孔隙是斜坡土体优先流的重要通道。对于森林土体,大孔隙的形成与根系有着很大的关系,其中根系腐烂以后形成的

大孔隙占土体总体积35%,Gaiser^[11]曾在1 hm²的森林土体上发现了4 000余个的垂直的根孔。另外,根系的生长以及温度的变化,会使得根系与土体产生不协调变形而在根壁和周围土体之间形成环状孔隙。图9(a)~(d)为试验点1研究样地第3染色剖面、试验点2第2和第3染色剖面上揭露出来的根系通道和动物通道的导水“证据”。从图中可以看出,剖面上零星的分布着独立点状或者长条状的染色区域,且染色区域多与植被根系和动物通道呈高度相关性,随着土体深度的增加,宏观上植物根系逐渐较少,染色面积也相应减少,减小趋势与所计算得到的特征参数变化趋势基本一致。

为了得到不同斜坡区植被根系生物量随着土体深度增加而变化的规律,从而研究其对优先流特征的影响。在染色试验剖面开挖以后遗留的沟槽旁随机的选取长宽为1 m、深度为1.5 m的生物量取样区域,去除表层杂物,将土体剖面按0~10 cm、10~30 cm、30~40 cm分为4个层次,筛取各层根系并称取每层土样的重量,室内筛去泥沙杂物和死根并进行清洗后,自然状态晾干至恒定质量,计算每个土体深

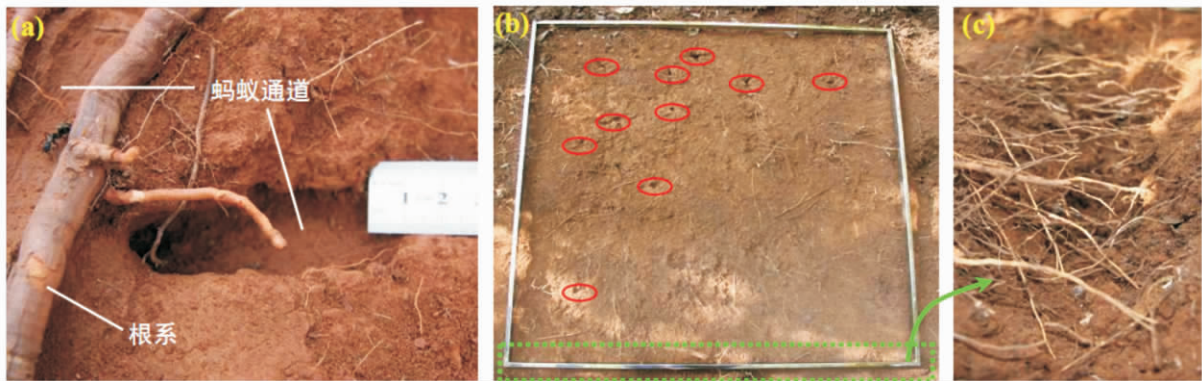


图8 动物通道和植物根系的共生关系

Fig. 8 Symbiotic relationship between faunal tunnels and plant roots

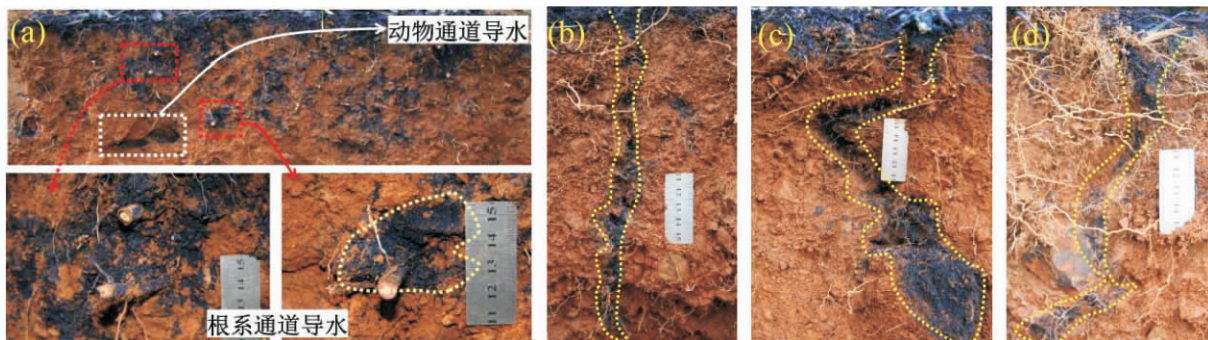


图9 植被根系通道和动物通道组成的快速导水路径

Fig. 9 Rapid water infiltration paths made up of faunal tunnels and root channels

度范围内的根系生物量密度 (g/kg) ,并根据特征参数随深度的变化值计算得到 4 个层次内的总染色面积比和染色路径数量。最后将计算结果进行曲线拟合,得到每一层土体范围内根系生物量与总染色面积比以及染色路径数量的关系如图 10 所示。

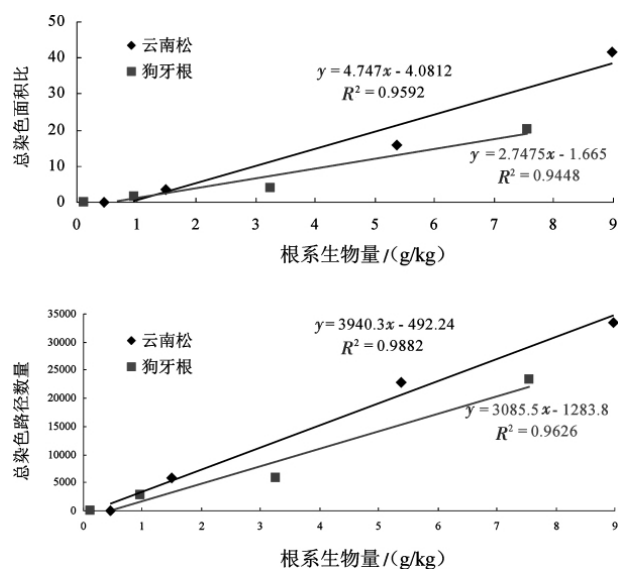


图 10 分层根系生物量与特征参数的关系

Fig. 10 The relationship between root biomass and characteristic parameters of dyeing images

从图中可以很明显的看出,随着土体深度的增加,根系生物量与总染色面积比以及染色路径数量呈较好的正相关关系(相关性系数均在 0.9 以上),说明土体中根系通道的存在极大地影响着斜坡区土体中优先流的发生和发展。并且在任意一个深度范围内,云南松发育斜坡土体中根系生物量要高于狗牙根的,同时对应的两类植被发育斜坡土体中剖面总染色面积比和总染色路径数量也呈现同种情况,这与现场开挖剖面得到的宏观表象是一致的。由此可以说明植被发育斜坡土体中优先流特征与植被根系分布有着密切的关系。

4 结论与分析

雨水通过斜坡大孔隙网络快速下渗引起的地下水响应的过程直接制约着“降雨与滑坡”这一关系的形成,对其深入进行研究具有重大的现实意义。本文主要以强降雨引发植被高盖度山区流域斜坡群发性失稳为背景,以昆明市呈贡新区马卡山两类典型植被发育斜坡土体为研究对象,利用染色示踪试

验方法研究了“降雨”以优先流形式补充斜坡地下水这一过程。

1. 对染色示踪图像进行类型转换、曝光阈值、降噪滤镜和数值化 4 个步骤的处理,提取图像位图数值矩阵,计算两类植被发育斜坡土体中染色面积比和染色路径数量随土体深度的变化规律。由结果可以看出,不同植被发育斜坡土体给水分提供的渗流路径不同导致对降雨的响应是不同的。

2. 染色面积比在同一深度不同剖面间以及不同深度处同一剖面间均表现出明显的异质性,证明了土体中优先流的存在。染色面积比随深度增加具有总体上减小的趋势,且在任一深度处,云南松发育斜坡土体的平均染色面积比都要比狗牙根的大,说明前者土体中优先流发生和发展较后者活跃。

3. 随着深度的增加,云南松发育斜坡土体中染色路径数量比狗牙根的变化波动严重,说明在不同深度处优先流路径数量相对不稳定。从两者的平均值可以看出,除表层 2 cm 深度范围以外,前者土体中平均染色路径比后者的多,并且后者的染色路径数量随深度增加很少出现反弹升高的现象,说明前者土体中分布有较多的优先流路径,而且发生侧向流的几率大,优先流路径发育程度明显高于后者。

4. 植被根系通道和动物通道在内的大孔隙是斜坡土体优先流的重要通道。染色剖面上分布的独立点状或者长条状的染色区域多与植被根系和动物通道呈高度相关性,并且根据分层根系生物量和优先流特征参数的曲线拟合结果,表明植被发育斜坡土体优先流的发生和发展与土体中动植物活动特别是根系分布有着密切的关系。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Yongshuang, Wu Shuren, Zhao Yue, et al. Formation mechanism of debris flow on the Tongmuyuan slope and its early warning index——a case study of the hard rain process on March 31, 2003 in Badong county, Hu bei province [J]. Geological Bulletin of China, 22(20): 833–838 [张永双, 吴树仁, 赵越, 等. 湖北省巴东县桐木园山坡型泥石流的形成机理及预警指标——以 2003-03-31 强降雨过程为例 [J]. 地质通报, 2003, 22(10): 833–838]
- [2] Corominas J, Moya J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3): 193–213
- [3] Rong Guan, Wang Sijun, Wang Enzhi, et al. Stability analysis of Yuanmo highway slope under intensive rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(4): 704–711 [荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008(4): 704–711]

- [4] Jakob M ,Lambert S. Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia [J]. *Geomorphology* ,2009 ,107 (3) : 275 – 284
- [5] Hu Bo ,Wang Dongmei. The preferential flow path study of nonpoint source phosphorus pollution in farmland [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation* ,2007 ,19(2) : 16 – 19 [胡博,王冬梅. 农地非点源磷污染的优先流路径研究[J]. *亚热带水土保持* ,2007 ,19 (2) : 16 – 19]
- [6] China Daly 国际频道:2011 年全国遭地质灾害 15664 起. 2012 – 01 – 06 [OL](available online at: http://www.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2012-01-06/content_4889123.html) [OL]
- [7] 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]
- [8] Wang Wei. Characteristics and formation mechanism of preferential flow in forest soils of purple sandstone regions ,Three Gorges Reservoir Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University ,2011 [王伟. 三峡库区紫色砂岩林地土壤优先流特征及其形成机理[D]. 北京: 北京林业大学 2011]
- [9] Sheng Feng ,Wang Kang ,Zhang Renduo. Study on heterogeneous characteristics of soil water flow in field by dye tracing method [J]. *Shuili Xuebao* ,2009 40(1) : 101 – 108 [盛丰,王康,张仁铎. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究[J]. *水力学报* 2009 40(1) : 101 – 108]
- [10] Xu Zemin. Vegetation and macropores in vadose of hill slopes [J]. *Earth Science Frontiers* 2007 ,14(6) : 134 – 142 [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]
- [11] Gish T J ,Jury W A. Effect of plant roots and root channels on solute transport [J]. *Transactions of the ASABE* ,1983 26(2) : 440 – 444

The Characteristic of Preferential Flow in Different Vegetated Slope Soils

XU Zongheng¹ ,XU Zemin¹ ,GUAN Qi² ,ZHANG Luyue¹

(1. Department of Civil Engineering ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming 650500 ,China

2. Department of Earth Science ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming 650000 ,China)

Abstract: In this study ,we take two kinds of vegetated slope soils of the Mountain Maka in Chenggong new district , Kunming municipality as research objects. Dye tracer experiments were used to study the process of rainfall transferring into groundwater through soil macro pore in the form of preferential flow. Collected staining images were processed to calculated the change regulation of the characteristic parameters of preferential flow. The results showed that there are different response of soil water flow to rainfall in different vegetated slope soils. The staining area ratio and the staining paths amount possess heterogeneity in every profile and obvious in homogeneity between different profiles. Except for the range of 0 ~ 2 cm deep ,they in slope soils covered by Yunnan Pine are larger than those covered by Bermuda Grass at the same depth ,which can demonstrate that preferential flow of the former is more active than the latter. In the end ,from root weight measuring at intervals of 10cm with depth ,we can find out that there is a positive correlation between root biomass and characteristic parameters of dyeing images. It indicates that the characteristics of preferential flow in vegetated slopes has close relation to plant roots.

Key words: preferential flow; dye tracing; image processing; staining area ratio; staining paths