贡嘎山暗针叶林土壤优先流形成因素的初步研究

牛健植 余新晓 赵玉涛 张东升 陈丽华 张志强

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要 该研究以长江上游贡嘎山暗针叶林生态系统的降雨过程、地被物层、根系层及土壤层的生长发育特点和水分运动状况为基础, 利用自制实验仪器, 在研究区域开展室内土柱实验, 与野外实地示踪影像分析及树种根系调查相结合, 针对研究区域土壤包气带根系层中水分快速运动的优先流形成的内外影响因子展开研究工作。研究结果表明研究区域土壤松散和多孔, 土壤的孔隙度较大, 大部分降雨为低强度、低雨量级和长历时, 并具有较厚的地被物层和丰富的根系层, 这些诱发因素存在, 使研究区域——贡嘎山高山生态系统具有优先流形成的条件, 降雨不会对土壤造成击溅作用, 水分运移沿着土壤孔隙或植物根孔等处开辟优先路径, 在地被物层及土壤层形成一个水流通道, 随着长历时的降雨的继续, 水分及其所携带的溶质继续沿着此路径向下运移。

关键词 贡嘎山暗针叶林 优先流 影响因子

STUDY OF SOIL PREFERENTIAL FLOW IN THE DARK CONIFEROUS FOREST OF GONGGA MOUNTAIN, CHINA

NIU Jian-Zhi YU Xin-Xiao ZHAO Yu-Tao ZHANG Dong-Sheng CHEN Li-Hua and ZHANG Zhi-Qiang
(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Background and Aims Preferential flow is the physical phenomenon of rapid transport of water and solutes in soil. It occurs in most soils and determines field-scale transport of contaminants in soils, thereby contributing to groundwater pollution.

Methods Research on preferential flow involves studying the mechanism of soil water movement and can answer key questions that could not be explained by Darcy's law and Convective-Diffusive Equation in early hydrological research. Experimental or technological analyses are difficult because this movement is not detected easily. Preferential flow increases the difficulty and complexity of the research due to non-equilibrium, regional characteristics and the involvement of many influencing factors. To date, the mechanism of the movement of preferential flow has not been properly defined. This study involved detailed research on the influencing factors of preferential flow, using a soil column experiment in combination with dye-tracer analyzes in the root zone of the dark coniferous ecosystem in the upper drainage of the Yangtze River. Factors examined included rainfall processes, growth characteristics and water movement states of litter, moss, roots and soil.

Key Results The soil of the research area is porous with large pores, and rainfall is low in amount and intensity and long-lasting. The soil also has thick litter and moss and is rich in roots. Therefore, the Gongga Mountain ecosystem may have preferential flow. Water transport has opened up preferential flow pathways along soil pores and root channels, forming a water channel in litter, moss and soil.

Conclusions Soil will be transported continuously along these channels with longtime rainfall.

Key words Dark coniferous forest of Gongga Mountain, Preferential flow, Influencing factors

优先流是近年来针对土壤水运动所提出的术语, 它是一种常见的土壤水分运动现象, 大量研究表明, 只要水入渗穿过土壤中的渗透区域, 就有优先流出现(Flury *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 1998; Dekker *et al.*, 1999)。优先流是发生在土壤中的一种水分

快速非平衡运动(Flury *et al.*, 1994), 与人类的生产生活及生态安全息息相关, 其所携带的溶质可造成地表及地下水水质污染(Flury, 1996), 并间接影响到流域的产汇流过程。开展优先流研究是土壤水运动机理研究由均质走向非均质领域的标志, 许多专家

针对所研究内容,对“优先流”提出自我认识(张洪江等,2000;Beven & Germann,1982;Bouma,1981;Helling & Gish,1991)。目前,对于土壤优先流定义公认的观点是“优先流是用于描述在多种环境条件下发生的非平衡流过程的术语”(Flühler,2001)。优先流表现形式较多,如大孔隙流(Macropore flow)(Beven & Germann,1981;Bouma *et al.*,1982;Hornberger *et al.*,1991;Lawes *et al.*,1882)、环绕流(Bypass flow)、管流(Pipe flow)(Elsenbeer *et al.*,1995;Elsenbeer & Lack,1996;Jones,1971;Walsh & Howells,1988;Woo & di-Cenzo,1988)、指流(Finger flow)(Hill & Parlange,1972;Mabuchi,1961;Miller & Gardner,1962;Ritsema *et al.*,1998)、漏斗流(Funnel flow)(Kung,1990a)、沟槽流(Channel flow)、短路流(Short circuiting flow)、部分置换流(Partial displacement)、地下强径流(Subsurface storm flow)、非饱和重力流(Gravity-driven unstable flow)(Bauters *et al.*,1998;de Rooij,1995;de Rooij & de Vries,1996;Dekker & Ritsema,1996;Glass *et al.*,1989;Hendrickx *et al.*,1993;Jamison,1945;Flint *et al.*,1996;Ritsema & Dekker,1993;Ritsema *et al.*,1998;van Dam *et al.*,1990)、异质流(Heterogeneity-driven flow)(Roth,1995;Tani,1997)、摆动流(Oscillatory flow)及低洼再蓄满(Depression-focused recharge)(Freeze & Banner,1970;Lissey,1971;Nieber & Misra,1995;Nieber *et al.*,1998)等,其运移过程一般具有环绕性(Flury *et al.*,1996;Beven,1991)和非平衡性(Jarvis,1998;Skopp,1981)两个重要特征。由于优先流形成的影享因子多样、获取较困难且是一种常见现象,它的发现带来了许多不确定因素,并增加了水文学及生态学等领域研究的难度。

优先流路径具有空间可变性(Quisenberry *et al.*,1994;Wildenschild *et al.*,2000;Gerrit *et al.*,2002),其产生主要是由静态(内在)和动态(外在)两方面因素共同作用的结果,静态因素主要指土壤基本特征,具体来说就是土壤的流动特性,包括组织、结构、容积密度、孔隙度、孔隙形态(具有相同意义的圆柱体直径、长度、弯曲度)、土壤孔隙连通性、生物活动(蚯蚓、植物根等)和土壤初始含水量等。优先流的动态因素表现在土壤和农作物管理,主要包括耕作和轮作交通等方面,同时林冠层和降雨强度影响着水在土壤表层再分配,也是外在的动态变化因素的直观表现。动态因素可能导致速度更快,如车轮交通及表层在干旱裂隙后的降雨郁闭的干湿交替过程,但也可能变化非常慢或有季节性,如伴随的农

作物生长或残余物管理。对产生及影响优先流的这些内外因素具体详细了解,以及在一个给定研究区域中,清楚明白什么因素是最重要的影响因子,将有助于确定研究方法、明确现象特点及利用模型模拟优先流及优先迁移过程(Andreini & Steenhuis,1990;Shipitalo *et al.*,1990;Edwards *et al.*,1990)。由于研究区域是保存较好的原始林带,不涉及车轮交通及耕作管理,本文从研究区域土壤的内在属性及地被物层和根系层入手,针对贡嘎山地区暗针叶林土壤的优先流产生的影响因子展开分析。

1 研究区域概况

试验区位于长江上游四川省泸定县贡嘎山东坡海螺沟,海拔3000 m处的峨嵋冷杉(*Abies fabri*)原始林林区,29°20′~30°20′ N,101°30′~102°15′ E,从地貌部位看,位于冰川河谷左岸叠加的冰川侧碛堤台地上,冰川泥石流冲击扇的东部边缘。区内受海洋性山谷冰川和泥石流影响,形成两种不同的土壤类型,即冰川推移形成冰碛物土壤类型及泥石流冲积形成坡积物土壤类型。试验区主要是峨嵋冷杉、冬瓜杨(*Populus purdomii*)与杜鹃(*Rhododendron*)的演替群落,且杜鹃相对较少。通常按照峨嵋冷杉的演替过程将研究区分为过熟林、成熟林、中龄林和幼龄林区域,成熟林是坡积物土壤类型,幼龄林、中龄林及过熟林是冰碛物土壤类型。因在成熟林坡积物土壤的土层相对较厚,易于取样,所以我们主要在成熟林坡积物土壤中取样分析。

土壤土层薄,石砾含量高,水分渗漏速度快,基本无地表径流出现,土壤侵蚀主要为重力侵蚀。同时研究区域有明显的干季(11月~翌年4月)和湿季(5~10月),湿季降水量约占全年降水量的80%,其大部分降雨为低强度、低雨量级、长历时,33.33%的场降雨雨强在1.0~1.5 mm·h⁻¹之间,大于1.5 mm·h⁻¹的降雨次数仅为24.24%,雨强较小不会对土壤造成击溅作用,但会利于沿土壤孔隙或植物根孔等处开辟优先路径,同时随着长历时的降雨的继续,水分及其所携带的溶质继续沿着此路径向下运移,为优先流现象形成创造条件。

2 研究方法

2.1 土柱试验

2.1.1 试验装置

虽然优先流较为常见,但它在常规条件下不易发现。本文采用的实验装置是由供水装置、人工降

雨器装置、土柱装置及集水装置构成。

供水装置主要由一个带有 3 个孔的有机玻璃桶和一个普通塑料桶组成,有机玻璃桶置于降雨发生器的上方,其下孔为出水孔,与降雨发生器连通;中间的孔为进水孔,由一个水泵从下往上不断打水;上孔为溢流孔,用来排除多余水,这样就形成一个恒定的水面,从而得到了一个恒定水头;有了恒定水头,再通过闸伐控制,那么就能得到若干组恒定的雨强。

人工降雨装置包括降雨发生器和流量计。降雨发生器的基础材料是有机玻璃,上下两个不同半径的同心原板夹住一个柱状旋转体而构成一个内部中空的闭合环境。柱状旋转体中安有一小板,用来分散水流,减小一定速度的流水对下板中心孔的冲击,使各点雨滴均匀;下板有若干分布均匀的小孔,上接小孔径硬管,并在硬管上安装医药针头,这样既可用于控制水头;又使降雨发生器降雨分布均匀,使雨滴直径近似于天然雨滴的直径;上板中心有一大孔,插有一管,能接外来溶液。

土柱装置主要有填充土柱和原状土柱两类。填充土柱由 PVC(Polyvinyl chloride)板材制成,外直径 159 mm、内直径 149 mm、高度 650 mm;上端敞口,下端封闭且中间挖空,接一根长 35 mm、外直径 14 mm、内直径 10 mm 的小 PVC 管,用于出流,且内径足够大,不会造成土柱管内积水,形成一个良好的水流通路;在贡嘎山按森林土层结构,分层取土,袋装,做好封标签,带回实验室,在自然状态下风干后用 2 mm 筛子分选,装填时按照各层取土高度及容重,分层装填;在土柱装填前,应注意需首先将 3 种直径分别为 5~10、2~5 和 2 mm 以下的细砂依次装入钢管底部,制作填充厚度分别为大沙砾为 2 cm,中沙砾为 2 cm,小沙砾为 1 cm 的反滤层。原状土柱是由不锈钢管制成,外直径 159 mm、内直径 149 mm、高度 650 mm,形如一大环刀;两端开口,一端钝,配有一开孔(内孔径等于圆柱内径,外孔径足够宽,且 4 个角各有一孔,便于整体固定)的方形木板,另一端锋利,用于原状取土;取土时,土柱锋利端向下,垂直置于取样点,缓慢将钢管打入土壤,深度约 60 cm,然后将土柱完整取出,用海绵将两端塞住,不使两端土壤散出,并用塑料胶带包装,带回实验室;打开包装,首先制作反滤层,方法是用刀在钢管底部削掉略 5 cm 厚度的土壤,其余做法同填充土柱;最后用一个中心焊有开口细管的不锈钢盘状(盘上 4 角各有一孔)将反过滤层反扣在钢管底部,并用 4 根铁杆、8 个螺钉,

将方形木板和钢盘及不锈钢圆柱紧紧夹住。在原状土柱的钢管管壁上开有 6 孔,孔径 25 mm,用于安装负压计,以分析测定淋洗的过程中的土柱的不同高度水势的变化,这 6 个孔洞之间的距离是 5.5 cm,最底下的孔洞的下维与不锈钢钢管的下口之间距离是 7 cm。集水装置:用若干容量为 200 ml 的锥形瓶集水,并以可以满足溶液淋洗和分析目的且是恒定的时间间隔置换锥形瓶。

2.1.2 试验材料

研究选定材料来自峨眉冷杉成熟林坡积物土壤样地。

2.1.2.1 坡积物土壤中取原状土柱

1)含地被物层的原状土柱:在坡积物的坡上和坡下,各任意选取 3 处土层较厚,石砾较少,适宜取原状土柱的位置,将不锈钢管打入土后,连同上面的地被物层及其下的土壤层一起取,具体做法见 2.1.1 所述原状土柱的制作。这样坡积物土壤层与其上面的地被物层及不锈钢钢管构成一个原状土柱(取含地被物层的原状土柱 3 个,以利于重复试验)。

2)不含地被物层的原状土柱:在上述取原状土柱位置周围,选取土层较厚,石砾较少,适宜取原状土柱的位置,去掉土壤上层的地被物层,利用 2.1.1 中的原状土柱制作方法,制作只含有土壤层的原状土柱(取不含地被物层的原状土柱 3 个,以利于重复试验)。

3)由地被物组成的原状土柱:成熟林坡积物土壤上附有较厚的地被物层,利用 2.1.1 所述原状土柱的制作方法,在坡积物的坡上和坡下位置,只取土壤上层的地被物层,制作只含有地被物层的原状土柱(取由地被物组成的原状土柱 3 个,以利于重复试验)。

2.1.2.2 制作用于对照分析的过筛填充土柱

在成熟林坡积物土壤中,按照土壤的发生层分层取土,带回实验室,按照 2.1.1 所述填充土柱的制作方法制作填充土柱(制作用于对照分析的过筛填充土柱 3 个,以利于重复试验)。

以上述土柱为基础实验材料,形成土柱实验装置图(图 1)。

2.1.3 试验过程

优先流产生的最初的判定条件就是土壤中有相对较大的孔隙,它促使水分快速向下运移,所以本文通过 4 个样地的土壤孔隙状况,即通过计算毛管孔隙度、非毛管孔隙度及总孔隙度数(华孟和王坚,

图 1 土柱实验装置示意图
Fig.1 Schematic graph of soil column experiment

1993)来分析土壤的内在属性对优先流形成的影响。

整体试验是在降雨较为充足的 5 和 6 月进行的,土壤优先流运移模拟实验的雨强(水头)分别是 0.22、0.50 和 1.00 mm·min⁻¹,实验在上述 3 个雨强下,将清水以稳定均匀输入(阶跃输入)从土壤表层输入土柱,整个试验过程中严格记录初始出流时间以及其后的单位时间内收集的出流液,通过土柱底部出流的出流量及负压计变化来分析研究区域优先流产生的影响因子,每次试验 3 次重复,取平均值。

无论是原状土柱实验还是填充土柱实验,都可以通过负压计,判定土柱中基质势变化,利用土壤水分特征曲线表征公式 $S = 10.07\theta_v^{-0.74}$ (赵玉涛, 2002)来计算从水入流到试验结束整个期间的土壤水分含量变化(试验时间较长,负压计充分平衡)。由于研究区域地被物层较厚,许多地方的地被物层(包括腐殖质层、半分解层、未分解层和苔藓层)厚度常超过 20 cm,在成熟林坡积物土壤中,用目测法选取地被物层较厚、中等及较薄 3 个测量厚度的样点,求其分层平均值及总平均厚度,可知腐殖质层平均厚度为 5.5 cm,未分解层平均厚度为 3.8 cm,半分解层平均厚度为 3.3 cm,苔藓层平均厚度为 4 cm,总平均厚度为 16.5 cm,所以地被物层原状土柱试验

中,利用负压计测定地被物层上、下两层的基质势,进而得到其含水量值。

2.2 野外示踪实验

贡嘎山地区的土壤呈现一种黄且微红色,根据贡嘎山土壤类型特点,以黑墨汁为染色示踪剂,通过示踪物在野外条件下的运移路径反映土壤水分运移过程。步骤如下:

用 TRIME(便携式时域反射仪)首先测定坡积物和冰碛物土壤的当日初始含水量,取 3 次重复的平均值,预估需要的灌水量;

在 4 个样地处各挖 1 m×1 m 的土壤剖面(选择易挖剖面的任意位置),并用长 1 m、宽 1 m、高 30 cm 的白铁皮围起,以防水分侧渗,根据预估量将黑墨水均匀喷洒在土壤剖面表面;

由于研究区属于湿润性气候,尤其在 5 和 6 月实验期,每天晚上都有降雨,所以在施加黑墨水后的第二天(降雨后),打开白铁皮,分层开挖剖面,分析土壤剖面,观察黑墨水的示踪路径。

2.3 土壤根系调查

对峨眉冷杉、冬瓜杨和杜鹃进行根系生物量调查(黄建辉等, 1999),确定在不同土层下,3 种树种不同根径的根系长度、根系重量及其占总根系

的比例。

3 结果与分析

3.1 优先流问题提出

示踪物经过前一夜的雨强较小、历时较长的降雨过程后,从纵向分层挖土壤剖面而呈现出野外示踪影像(图 2~5)。

图 2 示踪物在幼龄林中的运移路径影像图
Fig.2 Image chart of the tracer movement in young forest

图 3 示踪物在中龄林中的运移路径影像图
Fig.3 Image chart of the tracer movement in middle-aged forest

图 4 示踪物在成熟林中的运移路径影像图
Fig.4 Image chart of the tracer movement in mature forest

图 5 示踪物在过熟林林中的运移路径影像图
Fig.5 Image chart of the tracer movement in over-mature forest

虽然上面几个黑墨水示踪图并没有定量化地反映出土壤水分运移特征,但是它以一种较高的分辨率,使我们清楚地看到降雨过后的土壤水分流动路径,此路径的颜色明显重于土壤的其它位置,基本是沿一条或几条独立路径向下运移的,示踪物在此路径中向下运移,而环绕土壤的其它部分,此类较为明显的路径出现,正符合示踪物优先流路径的现象表现,由此可以反映出在贡嘎山 4 个不同演替阶段的林地上有优先流现象发生。

3.2 土壤孔隙状况

研究区域毛管孔隙度、非毛管孔隙度及总孔隙度数值见表 1。从表 1 可知研究区域的不同演替阶段的土壤孔隙度都较大,平均超过 50%,且随峨眉冷杉林演替进展,孔隙度逐渐增大,且土壤的非毛管孔隙度也占土壤总孔隙较大比重,孔隙度较大,造成不同演替阶段的土壤通气性较强。试验所用的原状土柱代表实地孔隙情况,填充土柱代表没有孔隙的土柱实验情况,通过试验明显可以看到原状土柱中出流相对较快,原状土柱流速变化较填充土柱流速变化更加不均匀。为表征孔隙对土壤优先流的影响,表 2 可见原状土柱及其对照过筛填充土柱在 100 min 内的累计出流流量。

原状土柱反映的是有优先流的实地情况,填充土柱反映的是水分在土柱中均匀流动的状态,从表 2 中可知,在某一固定时间内,在成熟林坡积物坡下(样地 D)和坡上(样地 E)所取的原状土柱中的累计出流量均高于其对照过筛填充土柱中累计出流量,由此可以说明孔隙大小与优先流产生密切相关,坡上和坡下分别代表不同景观位置,可表示不同空间尺度上的孔隙分布存在差异,各自的优先流路径中的累计出流流量也不同,反映出不同空间尺度孔隙分布是优先流产生的影响因子。

表 1 研究地区土壤孔隙分布状况表
Table 1 Distribution status of soil pores in study area

林地类型 Type of forest land	土层深度 Depth(cm)	毛管孔隙度 Capillary(%)	总孔隙度 Total porosity(%)	非毛管孔隙度 Non-capillary(%)	土壤通气度 Ventilation(%)
过熟林 Over-mature forest	0 ~ 20	83.47	95.32	11.86	94.79
	20 ~ 40	25.14	28.14	2.99	28.03
成熟林 Mature forest	0 ~ 20	61.27	64.94	3.67	64.56
	20 ~ 40	77.03	79.01	1.97	78.55
	40 ~ 60	64.07	65.90	1.84	65.46
	60 ~ 80	64.20	65.21	1.01	64.84
	80 ~ 100	62.28	64.02	1.74	63.77
	100 ~ 120	61.45	62.51	1.06	62.27
中龄林 Middle-aged forest	0 ~ 20	72.68	79.70	7.02	79.31
幼龄林 Young forest	20 ~ 40	42.01	43.37	1.36	43.12
	0 ~ 20	42.53	52.74	10.21	52.53

表 2 0.22、0.50 和 1.00 mm·min⁻¹雨强下,在规定时间内 100 min 内,成熟林坡积物原状土柱及其过筛填充土柱的土壤出流流量
Table 2 Accumulative outflow of the undisturbed column and corresponding repacked column in the settled time of 100 min at rainfall intensities of 0.22, 0.50 and 1.00 mm·min⁻¹

雨强 Rainfall intensities (mm·min ⁻¹)	100 min 规定时间内,成熟林坡积物土壤所取土柱累计出流流量 Accumulative outflow of mature forest in the settled time of 100 min(ml)		
	样地 D 原状土柱 Undisturbed column of plot D	样地 E 原状土柱 Undisturbed column of plot E	对照过筛填充土柱 Corresponding repacked column
0.22	305	493	59
0.50	593	542	82
1.00	702	601	98

样地 D 代表成熟林坡下位置,样地 E 代表成熟林坡上位置 Plot D is the lower situation of nature forest, Plot E is the upper situation of nature forest

同时表 2 也反映出不同降雨强度大小对土壤流的产生及发生强度的影响。成熟林坡积物土壤所取的原状土柱在规定时间内 100 min 内的土壤出流累计流量数值随雨强的增大而增加,表明降雨强度与优先流发生程度密切相关,随着雨强的增大,沿优先流路径出流的流量就越多。反映到实地情况,可以认为在土壤适应的降雨强度下,随雨强增大,优先流的表现越明显。

3.3 地被物层及根系层对优先流影响分析

3.3.1 地被物层对优先流影响分析

本研究所指的地被物层包括腐殖质层、半分解层、未分解层和苔藓层,研究通过在 0.50 和 1.00 mm·min⁻¹两个雨强作用下,坡积物土壤中取得地被物层原状土柱的含水量变化(图 6,图 7),及通过只含地被物层的原状土柱、只含土壤层的原状土柱以及既有地被物层又有土壤层的原状土柱中的流量变化(图 8~11)来分析优先流产生的影响因子。

从图 6 和图 7 中可知,地被物的上层和下层在降雨初期,含水量变化较为明显,随着时间推移,变化较小,反映出地被物层具有较大的持水保水特性,此特性反映在野外条件下,则表现为具有一定的截留能力,相对于其下土壤层而言,则起到蓄水及提供

水运动初始能量的作用(图 6,图 7)。在 0.50 mm·min⁻¹雨强下,地被物层上、下层对土壤含水量的影响不显著,在 1.00 mm·min⁻¹雨强下,地被物层上、下层对土壤含水量的影响显著(表 3,表 4),说明地被物层的截留水分能力有一定的限度,随雨强增大或者持续时间的增加,地被物层吸水达到一定程度时,将不再吸水,地被物层中存储的水分,在初始能量的作用下,会沿着土壤层往下运移,成为水流通

道。在 0.50 和 1.00 mm·min⁻¹两个雨强下(图 8,图 9),成熟林样地 D 和 E 中的累计出流量与时间均成线性关系,表明在一定降雨强度下,不论是地被物层还是下面的土壤层,在中雨强及大雨强下,已形成一个水流通,水分始终沿着此通道向下运行。地被物层在土壤层的上层,当雨强相对较大时,水通过地被物层中的水流通进入土壤层非饱和带中的优先流区域,继续沿优先流路径向下运移。

在中、大雨强条件下,地被物层整体对土壤水分运移具有显著影响(表 5,表 6),综合表 3 和表 4 以及优先流是研究区域土壤水分运动的重要形式,可知研究区域的地被物层对优先流具有显著影响。

成熟林坡积物土壤中土壤层及地被物层中的水

图 6 $0.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,成熟林坡积物土壤样地 D 中所取地被物原状土柱土壤含水量变化

Fig.6 Soil moisture change of the undisturbed column in the zones of litters and moss of mature forest 's plot D at rainfall intensities of $0.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

图 7 $1.00\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,成熟林坡积物土壤样地 D 中所取地被物原状土柱土壤含水量变化

Fig.7 Soil moisture change of the undisturbed column in the zones of litters and moss of mature forest 's plot D at rainfall intensities of $1.00\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

图 8 $0.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,在成熟林坡积物土壤样地 D 和 E 的土壤层及地被物层所取原状土柱累计出流量与时间的关系

Fig.8 The schematic graph of accumulative outflow and time in the zones of soil , litters and moss of mature forest 's plot D at rainfall intensities of $0.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

图 9 $1.00\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,在成熟林坡积物土壤样地 D 和 E 的土壤层及地被物层所取原状土柱累计出流量与时间的关系

Fig.9 The schematic graph of the relation of accumulative outflow and time in the zones of soil , litters and moss of mature forest 's plot D at rainfall intensities of $1.00\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

图例同图 8 Legends see Fig. 8

分流动波动。在 $0.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,成熟林坡积物土壤中地被物层及其下面的土壤层的水分流动呈波动性(图 10),在 $1.00\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下,流速变

化幅度相对较小,并且水分在地被物层速度开始呈直线上升趋势,并高于下层的土壤层,当流速达到最大值以后,其出流速度开始迅速减小,并低于下层的土壤层的流速,呈较为均衡状态,反映出地被物层所具有的持水蓄水特征(图 11)。土壤层中出流速度开始上升,迅速达到 $0.7\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 流动速度时,就

表 3 0.50 mm·min⁻¹雨强下 地被物层上、下层土壤含水量方差分析

Table 3 The square deviation analysis of effects of the upper and lower of the zones of litters and moss on soil moisture at the rainfall intensity of 0.50 mm·min⁻¹

差异源 Differential source	SS	自由度 df	MS	F	F crit
组间 Inter-group	0.004 443 271	1	0.004 443 271	3.235 885 9	4.46
组内 Intra-group	0.010 984 988	8	0.001 373 124		
总计 Total	0.015 428 259	9			

表 4 1.00 mm·min⁻¹雨强下 地被物层上、下层土壤含水量方差分析

Table 4 The square deviation analysis of effects of the upper and lower of the zones of litters and moss on soil moisture at the rainfall intensity of 1.00 mm·min⁻¹

差异源 Differential source	SS	自由度 df	MS	F	F crit
组间 Inter-group	0.004 429 688	1	0.004 429 688	8.036 300 0	4.26
组内 Intra-group	0.013 228 958	24	0.000 551 207		
总计 Total	0.017 658 646	25

图 10 0.50 mm·min⁻¹雨强下 成熟林坡积物土壤样地 D 土壤层、地被物层及包含地被物层及土壤层的原状土柱流速波动曲线示意图
Fig.10 The schematic graph of velocity of outflow in the zones of soil ,litters and moss and undisturbed column of mature forest 's plot D at rainfall intensity of 0.50 mm·min⁻¹

图 11 1.00 mm·min⁻¹雨强下 成熟林坡积物土壤样地 D 土壤层、地被物层及包含地被物层及土壤层的原状土柱流速波动曲线示意图
Fig.11 The schematic graph of velocity of outflow in the zones of soil ,litters and moss and undisturbed column of mature forest 's plot D at rainfall intensity of 1.00 mm·min⁻¹

图例同图 10 Legends see Fig. 10

以此为基点 ,水分以相对于此变化幅度不大的流速向下运移。由此反映出地被物层影响了土壤优先流所具有的非平衡性及流速波动性。同时 ,我们发现所取的包含地被物层的原状土柱中水分出流速度比不包含地被物层的原状土柱中的水分出流速度要小 ,由此进一步反映出地被物层的持水蓄水作用。

3.2.2 根系对优先流影响分析

水分传输通量在很大程度上取决于研究区域的林木根系状况 ,开展研究区域的植物根系特征及其吸水特点分析对于研究优先流产生的驱动因子分析具有重要意义。在独立示踪的路径旁常伴随有树枝及根系物(图 2~5) ,由此表明示踪物优先流运移过程与树枝及根系物有着非常密切的关系。

通过实践调查可知 ,贡嘎山高山生态系统主要根系类型是峨眉冷杉、冬瓜杨及杜鹃的根系 ,根系丰富 ,我们将根系类型分为水平型、垂直型和须根型。峨眉冷杉根系属水平型 ,树体根系大部分为水平形态 ,冬瓜杨根系属垂直型 ,树体的垂直根系较发达 ,水平根系较少 ,杜鹃根系属须根型 ,根系毛根占较大比例 ,主直根系不发达。

从表 7 可知 ,土壤上层根系较细 ,单位根长的根重较小 ,随土层加深 ,粗根增多 ,单位根长的根重较大 ,杜鹃根系主要集中分布在 0~20 cm 土层内 ,根系长度约占根系总长的 99.9% ,根系重量约占总根重的 86.7% ,出现此情况的原因是杜鹃根系属须根型 ,具有丰富的毛根和细根 ,而峨眉冷杉是水平型 ,总根长的 71%、总根重的 73% 分布在 0~20 cm 土层 ,29% 左右的根系分布在 20 cm 土层下 ,冬瓜杨根系是垂直型 ,所以只有总根长的 12.5%、总根重的 33.6% 在 0~20 cm 土层内分布。同时在实际调查

表 5 0.50 mm·min⁻¹雨强下 ,地被物层对土壤水分运移影响的方差分析

差异源	Differential source	SS	自由度 <i>df</i>	MS	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i> crit
组间	Inter-group	0.048 492	1	0.048 492	5.471 513	0.023 45	4.038 384
组内	Intra-group	0.434 267	49	0.008 863			
总计	Total	0.482 759	50				

表 6 1.00 mm·min⁻¹雨强下 ,地被物层对土壤水分运移影响的方差分析

差异源	Differential source	SS	自由度 <i>df</i>	MS	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i> crit
组间	Inter-group	0.531 891	1	0.531 891	29.115 960	1.87E-06	4.034 320
组内	Intra-group	0.913 401	50	0.018 268			
总计	Total	1.445 291	51				

表 7 峨眉冷杉、冬瓜杨和杜鹃根系生物量调查表

根系类型	土层 Soil (cm)	≤1 mm		1 ~ 3 mm		3 ~ 5 mm		5 ~ 10 mm		10 ~ 30 mm		30 ~ 50 mm		50 ~ 100 mm	
		根长	根重	根长	根重	根长	根重	根长	根重	根长	根重	根长	根重	根长	根重
		Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Weight (g)
峨眉冷杉 <i>Abies fabric</i>	0 ~ 20	4 284	42	7 530	87	436	40	840	149	630	432	116	342	172	2 530
	20 ~ 40	1 270	13	1 940	68	453	38	354	151	444	404	72	158	0	0
	40 ~ 60	120	57	75	81	12	184	0	0	0	0	0	0	0	0
	60 ~ 100	75	36	24	18	25	52	0	0	0	0	0	0	0	0
冬瓜杨 <i>Populus purdomii</i>	0 ~ 20	0	0	45	0.8		2.7	0	0	13	45	0	0	15	1 050
	20 ~ 40	521	6	143	16	0	0	38	13	20	26	0	0	18	1 105
	40 ~ 60	226	6	220	8	50	6	180	42	0	0	0	0	40	1 250
	60 ~ 100	0	0	72	1.9	0	0	0	0	0	0	50	450	0	0
杜鹃 <i>Rhododendron</i>	0 ~ 20	6 596	36	4 010	43	309	35	321	70	110	350	60	173	15	600
	20 ~ 40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	200	0	0
	40 ~ 60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	60 ~ 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

中可知 ,峨眉冷杉和杜鹃的根系分布层次较浅 ,在冰碛物土壤中通过在岩石中迂回缠绕 ,从较大范围内将岩石、土壤等压在其下而保存 ,结构较为散乱 ;在坡积物土壤中 ,通过水平方向上的缠绕作用 ,采用拉、压两种方式作用于其上、下坡位的土体。冬瓜杨分布层次较深 ,毛根很发达 ,土壤颗粒间的桔结程度较好。土壤水分运移过程中 ,在 0 ~ 20 cm 土层范围内 ,根系生长以峨眉冷杉和杜鹃根系为主 ,根较多、较细 ,水分沿着根与土壤及岩石的交点处向下渗透 ,进入土壤深层 ,以冬瓜杨根系为主 ,根量减少 ,根较粗 ,根系垂直生长 ,土壤水分以及其所携带的溶质就沿着根系中根孔所形成的通道向下垂直运移 ,促使土壤水分以及其所携带的溶质沿着一条或几条较为优先的路径垂直向下运移 ,从而间接起到阻拦地表水流 ,减小土壤表面侵蚀 ,防治水土流失的作用。

为验证分析地被物层在土壤水分运动以及优先流等方面的作用 ,我们将黑墨水分别施加到土壤表面以及直接施加到土壤上层的地被物层 ,研究发现黑墨水在地被物层下渗更快 ,由此可见 ,地被物层直接影响优先流路径长短 ,是优先流形成的诱发因子之一。综合野外示踪实验可知 ,长江上游贡嘎山地区土壤具有优先流现象发生 ,并且优先流作用与树枝、根系物及其上的地被物层有显著关系。

4 结论与讨论

本研究对贡嘎山暗针叶林生态系统的土壤孔隙分布情况、地被物层及根系层的特征及其对优先流的驱动影响进行系统分析 ,具体结论如下 :

1)研究区域的土壤孔隙度平均超过 50% ,土壤非毛管孔隙度占土壤总孔隙较大比重 ,土壤通气性

较强,土壤较为松散、多孔,其地质和地貌成因及特点有效诱发优先流产生。

2)在中及大雨强下,在地被物层及土壤层中形成一个水流通道,水分始终沿着此通道向下运行,反映出研究区域较厚的地被物层有效诱发优先流形成及其运移过程。

3)贡嘎山高山生态系统中的根系丰富,直径较大,具有固持较大范围内土壤的作用,促使土壤水分以及其所携带的溶质沿着一条或几条较为优先的路径垂直向下运移。

4)开展优先流形成的影响因子分析时,需尽量进行量化分析。在以后的工作中,可以进行野外示踪实验量化,并针对实地降雨条件、土壤状况等作主成分分析,同时由于在所研究区域具有丰富的根系是优先流产生的重要诱发因子,今后的研究需调查所研究区域整体根系总量,针对根系对优先流产生的影响进行量化分析。

参 考 文 献

- Andreini MS, Steenhuis TS (1990). Preferential flow paths under conventional and conservation tillage. *Geoderma*, 46, 85 – 102.
- Bauters TWJ, DiCarlo DA, Steenhuis TS, Parlange JY (1998). Preferential flow in water-repellent sands. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 1185 – 1190.
- Beven K, Germann P (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18, 1311 – 1325.
- Beven K, Germann P (1981). Water flow in soil macropores. 2. A combined flow model. *Journal of Soil Science*, 32, 15 – 29.
- Beven K (1991). Modeling preferential flow: an uncertain future? In: Gish TJ, Shirmohammadi A eds. *Preferential Flow*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1 – 11.
- Bouma J, Belmans CFM, Dekker LW (1982). Water infiltration and redistribution in a silt loam subsoil with vertical worm channels. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 917 – 921.
- Bouma J (1981). Soil morphology and preferential flow along macropores. *Agriculture Water Management*, 3, 235 – 250.
- de Rooij GH (1995). A three-region analytical model of solute leaching in a soil with a water repellent top layer. *Water Resource Research*, 31, 2701 – 2707.
- de Rooij GH, de Vries P (1996). Solute leaching in a sandy soil with a water-repellent surface layer: a simulation. *Geoderma*, 70, 253 – 263.
- Dekker LW, Ritsema CJ (1996). Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena*, 28, 89 – 105.
- Dekker LW, Ritsema CJ, Wendroth O, Jarvis N (1999). Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany. *Journal of Hydrology*, 215, 4 – 22.
- Edwards WM, Shipitalo MJ, Owens LB, Norton LD (1990). Effect of *Lumbricus terrestris* L. burrow on hydrology of continuous no-till corn fields. *Geoderma*, 46, 73 – 84.
- Elsenbeer H, Lack A, Cassel K (1995). Chemical fingerprints of hydrological compartments and flow paths at La Cuenca, western Amazonia. *Water Resources Research*, 31, 3051 – 3058.
- Elsenbeer H, Lack A (1996). Hydrometric and hydrochemical evidence for fast flowpaths at La Cuenca, western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 180, 237 – 250.
- Flühler H, Ursino N, Bundt M (2001). The preferential flow syndrome—a buzzword or a scientific problem. In: David B, Kevin K eds. *International Symposium on Preferential Flow* 2nd edn. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 21 – 24.
- Flury M (1996). Experimental evidence of transport of pesticides through field soils—a review. *Journal of Environment Quality*, 25, 25 – 45.
- Flury M, Flühler H, Jury W A, Leuenberger J (1994). Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resources Research*, 30, 1945 – 1954.
- Freeze RA, Banner J (1970). The mechanisms of natural groundwater recharge and discharge. 2. Large column experiments and field measurements. *Water Resources Research*, 6, 138 – 155.
- Gerrit H, de Rooij, Stagnitti F (2002). Spatial and temporal distribution of solute leaching in heterogeneous soils: analysis and application to multisampler lysimeter data. *Journal of Contaminant Hydrology*, 54, 329 – 346.
- Glass RJ, Steenhuis TS, Parlange JY (1989). Mechanism for finger persistence in homogeneous unsaturated porous media: theory and verification. *Soil Science*, 148, 60 – 70.
- Helling CS, Gish TJ (1991). Physical and chemical processes affecting preferential flow. In: Gish TJ, Shirmohammadi A eds. *Preferential Flow*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 77 – 86.
- Hendrickx JMH, Dekker LW, Boersma OH (1993). Unstable wetting fronts in water repellent field soils. *Journal of Environment Quality*, 22, 109 – 118.
- Hill DE, Parlange JY (1972). Wetting front instability in layered soils. *Soil Science Society of America Process*, 36, 697 – 702.
- Hornberger GM, Germann PF, Beven KJ (1991). Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment. *Journal of Hydrology*, 124, 81 – 99.
- Hua M (华孟), Wang J (王坚) (1993). *Soil Physics (土壤物理学)*. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)
- Huang JH (黄建辉), Han XG (韩兴国), Chen LZ (陈灵芝) (1999). Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 19, 270 – 277. (in Chinese with English abstract)
- Jamison VC (1945). The penetration of irrigation and rain water into sandy soils of central Florida. *Soil Science Society of America Pro-*

- cess, 10, 25 – 29.
- Jarvis N(1998). Modeling the impact of preferential flow on non-point source pollution. In: Selim HH, Ma L eds. *Physical Non-equilibrium in Soils: Modeling and Application*. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, 195 – 221.
- Jones JAA(1971). Soil piping and stream channel initiation. *Water Resources Research*, 7, 602 – 610.
- Kung KJS(1990a). Preferential flow in a sandy vadose zone soil. 1. Field observation. *Geoderma*, 46, 51 – 58.
- Kung KJS(1990b). Preferential flow in a sandy vadose zone soil: 2. Mechanism and implications. *Geoderma*, 46, 59 – 71.
- Lawes JB, Gilbert JH, Warington R(1882). *On the Amount and Composition of the Rain and Drainage Water Collected at Rothamsted*. Williams, Clowes and Sons, London, UK.
- Lissey A(1971). Depression-focused transient groundwater flow patterns in Manitoba. *Geological Association of Canada Special Paper*, 9, 333 – 341.
- Mabuchi T(1961). Infiltration and ensuing percolation in columns of laggard glass particles packed in laboratory. *Transactions Agriculture Engineering Society of Japan*, 13 – 19.
- Miller DE, Gardner WH(1962). Water infiltration into stratified soil. *Soil Science Society of America Process*, 26, 115 – 119.
- Nieber JL, Misra D(1995). Modeling flow and transport in heterogeneous, dual-porosity drained soils. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*, 9, 217 – 237.
- Nieber JL, van den Eertwegh GAPH, Feddes RA(1998). Modeling multidimensional water flow and solute transport in dual-porosity soils. In: Brown LC ed. *Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment. Proceedings of the 7th Annual Drainage Symposium*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 227 – 235.
- Quisenberry VL, Phillips RE, Zeleznik JM(1994). Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1294 – 1300.
- Ritsema CJ, Dekker LW, Nieber JL (1998). Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, 34, 555 – 567.
- Ritsema CJ, Dekker LW(1993). Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research*, 29, 2183 – 2193.
- Ritsema CJ, Nieber JL, Dekker LW (1998). Stable or unstable wetting fronts in water repellent soils—effect of antecedent soil moisture content. *Soil & Tillage Research*, 47, 111 – 123.
- Roth K(1995). Steady state flow in an unsaturated, two-dimensional, macroscopically homogeneous, Millersimilar medium. *Water Resources Research*, 31, 2127 – 2140.
- Shipitalo MJ, Edwards WM, Dick WA, Owens LB(1990). Initial storm effects on macropore transport of surface applied chemicals in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 1530 – 1536.
- Skopp J(1981). Comment on“ Micro-, meso-, and macroporosity of soil”. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1246.
- Tani M(1997). Runoff generation processes estimated from hydrological observation on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *Journal of Hydrology*, 200, 84 – 109.
- van Dam JC, Hendrickx JMH, van Ommen HC (1990). Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil. *Journal of Hydrology*, 120, 359 – 379.
- Walsh RPD, Howells KA(1988). Soil pipes and their role in runoff generation and chemical denudation in humid tropical catchment in Dominica. *Earth Surface Process and Landforms*, 13, 9 – 17.
- Wang Z, Feyen J, Ritsema CJ(1998). Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow. *Water Resources Research*, 34, 2169 – 2182.
- Wildenschild D, Vaz CMP, Rivers ML, Rikard D (2000). Using x-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. *Journal of Hydrology*, 267, 285 – 297.
- Woo M, diCenzo P(1988). Pipe flow in James Bay coastal wetlands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25, 625 – 629.
- Zhao YT (赵玉涛) (2002). Study on hydrological process and modeling of dark coniferous forest ecosystem of upper reach of Yangtze River. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Zhang HJ (张洪江), Wang YJ (王玉杰), Bei YZ (北原曜) (2000). A study in pipe flow on the slope of granite region of the three-gorge of Yangtze River. *Journal of Beijing Forestry University*(北京林业大学学报), 22(5), 53 – 57. (in Chinese with English abstract)