

利用染色示踪法研究四面山两种 林地优先路径分布特征

魏虎伟¹, 程金花¹, 杜士才², 李辉乾², 徐贵来¹, 张欣¹, 田香姣¹

(1. 北京林业大学 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 重庆市林业局, 重庆 401147)

摘要: [目的] 研究不同林种土壤的优先路径分布特征, 为土壤水的高效利用以及植物生长环境改善等方面的研究提供理论参考。[方法] 以重庆四面山张家山的针阔混交林和楠竹林为研究对象, 在林地土壤存在优先路径的情况下, 运用染色示踪法研究了水分及溶质的运移, 并对采集的垂直剖面染色图像进行处理分析。[结果] 两种林地对水分入渗的响应不同, 染色路径宽度和染色路径数量在同一剖面不同深度处及不同剖面同一深度处均呈现明显的异质性: (1) 针阔混交林染色路径宽度曲线呈“倒阶梯型”; (2) 楠竹林染色路径宽度曲线呈 S 形。两种林地的土壤优先流宽度和数量在一定范围内均随着深度增加而逐渐下降。[结论] 两种林地均存在优先流现象, 随着深度增加优先流路径不均匀递减, 在 0—20 cm 深度内, 植物根系对土壤优先流影响较大。

关键词: 优先流; 染色示踪; 染色路径宽度; 染色路径数量

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)02-0193-05

中图分类号: S153.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.038

A Study on Characteristics of Preferential Flow Paths in Two Kinds of Forest Soil in Simian Mountains Using Dyeing Tracer Method

WEI Huwei¹, CHENG Jinhua¹, DU Shicai², LI Huiqian², XU Guilai¹, ZHANG Xin¹, TIAN Xiangjiao¹

(1. Soil and Water Conservation of Beijing Engineering Research Center, Beijing Forestry

University, Beijing 100083, China; 2. Chongqing Forestry Administration, Chongqing 401147, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of preferential flow path in the two kinds of forest soil were studied in order to provide a theoretical reference for some reseaches such as efficient utilization of soil water and improving plant growth environment. [Methods] Dyeing tracer method was used and dyed soil profiles where there was preferential flow way occurred were photographed for further process and analysis. [Results] The patterns of water infiltration in the two kinds of forest soil were different. Width and amount of staining paths were heterogeneous in different depths of a profile and different profiles at the same depth. (1) The dying path's shape of soil under conifer-broadleaf forest looked like "inverted ladder"; (2) the shape under *Phyllostachys pubescens* land looked like a S-type. The width and the number of staining path in these two forests reduced gradually with the increase of soil depth. [Conclusion] It is concluded that preferential flow occurred in both of the forests, and its way unevenly decreased with the increase of soil depth. Plant roots at depth of 0—20 cm have a more remarkable influence on preferential flow germination as compared to the roots at other depths.

Keywords: preferential flow; dyeing tracer; stained path way width; number of stained path ways; process of preferential flow

优先流是一种非平衡流, 是土壤学家针对土壤平衡入渗流而提出的^[1-2], 而优先路径是指水分及其溶

质在多孔介质中绕过土壤基质优先传导的通道^[3]。在自然土壤中, 优先路径普遍存在, 无论农田灌溉还

收稿日期: 2014-03-05

修回日期: 2014-03-19

资助项目: 国家林业局推广项目“三峡库区低山丘陵区水土保持型植物群落建设技术”(2012-42); 国家自然科学基金项目(41271300; 30900866)

第一作者: 魏虎伟(1988—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: tiannongrena@126.com。

通信作者: 程金花(1979—), 女(汉族), 山东省东阿县人, 副教授, 主要从事土壤侵蚀、植被恢复方面的研究。E-mail: Jinhua_chen@126.com。

是天然降雨,只要水分经过土壤渗透区都会产生优先流。研究优先流最常用的方法是染色示踪法,Kathleen^[4]等人通过溴化物和示踪剂相结合的方法研究了人工湿地养分通过优先流的方式传输过程及其速率,Edward^[5]等运用荧光粉结合一个二维物理模型的方法研究了染色剂分区运移及其与非水性液体之间的作用。目前常用的染料为亮蓝,不仅因为它的廉价性,还因为它具有无毒,显像性强的特点,能够很直观地显示整个土壤剖面中优先流路径的空间分布^[6]。王康等人^[7]基于碘—淀粉染色和亮蓝染色两种方法研究了异质土壤水分迁移及其与大孔隙之间的关系,孙龙等^[8]人通过亮蓝染色研究了不同林龄柑橘地中大孔隙与优先流的关系,王彬伊^[9]等人研究了农地中大孔隙数量特征。但是,目前优先流的研究方法没有统一的标准,由于优先流具有局域特性、土壤异质性以及研究过程中针对优先流过程及优先流空间三维结构专业设备很少,导致优先流研究进展缓慢,直到目前优先流运动机理尚未明确。有少部分学者使用 TDR^[10]、多传感电容探针^[11]进行连续观察优先流过程,分析优先流的湿润峰以及其他影响因素,对优先流的研究具有促进意义。对于森林而言,优先流路径的存在可以降低地表径流的发生,提高水资源的利用率;同时可促进植物根系的生长,增加土壤有机质含量,对改善植物的生长环境具有积极意义。本研究采用亮蓝做染色示踪剂,在重庆四面山张家山林区选择针阔混交林和楠竹林作为研究对象,分析不同林地以及同一林地在垂直方向的优先流路径特征。

1 研究区概况

研究区设在重庆市四面山张家山林区,28°31′14″—28°46′00″N,106°17′22″—106°30′00″E,海拔 900~1 500 m。属于热带季风性湿润区,雨季多集中在 5—9 月,多年年均降雨量 1 522.3 mm,最高月平均气温为 31.5℃(8 月),最低月平均气温 -5.5℃(1 月),全年无霜期为 285 d,多年平均日照时数为 1 082.7 h。研究区内林地土壤类型主要是黄棕壤和黄壤,呈微酸性至酸性。

试验地分别选取针阔混交林和楠竹林,其中针阔混交林主要植被有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、乌蕨(*Stenoloma chusanum*)等;竹林主要植被有楠竹、山梅花(*Philadelphus incanus*)、绣球(*Hydrangea macrophylla*)、猪头红(*Sarcopyramis nepalensis*)、粽叶狗尾草(*Setaria palmifolia*)等。

2 研究方法

2.1 原位染色、图像采集

在针阔混交林和楠竹林内确定地表较完整,人为干扰小的地块作为试验点,每种林地各选取 2 个样点,在选定的试验点剔除表层未分解的枯枝落叶、碎石等,同时减少清除过程中人为扰动对表层土壤结构的破坏,以免影响试验效果。然后将长×宽×高为 70 cm×70 cm×50 cm 的铁框埋入土中 20 cm,为了防止亮蓝溶液沿铁框下漏,用木槌捣实距铁框内壁 5 cm 范围内的松动土壤。将 12 L 浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液喷洒在铁框 50 cm×50 cm 范围内,24 h 后,每 10 cm 为一层开挖垂直土壤剖面,将亮蓝染色的区域命名为优先流发生区,每一个剖面都采用 500 万像素相机拍照,并在剖面边缘设置刻度尺保证剖面规格一致,每个剖面开挖的最大深度都超过染色区域 10 cm,以保证垂直剖面完整。

2.2 图像处理

利用 photoshop-cs5 将采集的剖面图像依据图片上的刻度截取 50 cm×50 cm 的区域,通过变形、扭曲、曝光校正因拍摄所造成的拍摄角度、距离、受光不均匀所造成的缺陷。设置照片像素为 1 890×1 890,保证照片面积和像素一致。将校正后的图像进行颜色替换、调整阈值,使染色区为黑色、染色区变为白色。然后导入 image pro plus 图像分析软件,进行 filter-enrode-dilate, segmemation 处理,简化照片属性信息,使其二值化(0 和 255)。然后通过 bitmap analysis 导入 Excel 中进行后期数据处理。

2.3 数据处理

运用图像处理得到的 Excel 数据计算染色路径宽度、染色路径数量。王伟等人^[12]也进行染色路径研究,但所选尺度较大(1 cm 深度),无法在细微尺度上说明优先流的变化规律,所以本文计算每 1 mm 土壤深度染色路径宽度,通过统计各个土壤剖面的垂直深度上每 1 mm 优先流发生区域像素数值,求取每种林地剖面的平均值;染色路径数量是通过统计每 1 mm 深度范围水平方向上染色区与未染色区间隔数,每一个间隔称为一条独立染色路径,然后通过做图分析优先流染色路径宽度和路径数量随深度的变化趋势。

3 结果与分析

3.1 不同林地染色路径宽度计算

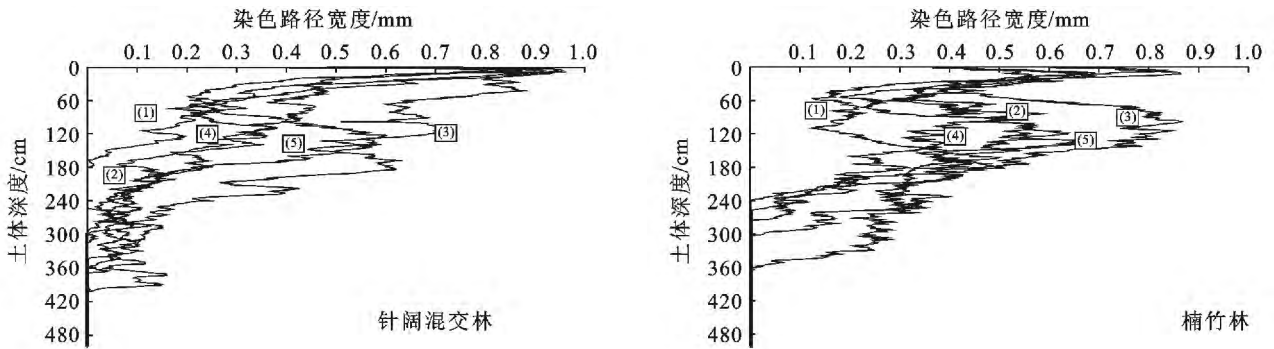
染色路径宽度是指在某一指定深度处,被染色的优先流区域所占的宽度(mm)。通过 Excel 数据计算

针阔混交林和楠竹林各个垂直剖面每 1 mm 深度染色路径宽度,图 1 为针阔混交林和楠竹林各个垂直剖面染色路径宽度;通过各个剖面染色路径宽度求取 5 个剖面的平均染色路径宽度,图 2 为两种林地平均染色路径宽度。

3.1.1 针阔混交林土壤剖面染色路径宽度变化规律

从图 1 可以看出,针阔混交林各个剖面的染色路径宽度随着土壤深度的增加逐渐下降,下降幅度相对较快,在 0~10 mm 范围内,各个垂直剖面染色路径宽度平均达 450 mm 以上。所有剖面的染色路径宽度均在 10 mm 深度处处达到最大值,分别为 473.21, 476.58,459.06,436.64,406.87 mm,分别占对应宽度(500 mm)80%以上,10 mm 以下各个剖面的染色

路径宽度开始明显下降。由于土壤大孔隙的连通性,使得土壤水分发生侧渗,染色路径宽度并不是随着土壤深度增加而单调递减,在局部深度范围区域染色路径宽度会出现反弹。剖面 1 在 180 mm 处染色路径宽度变为 0,直到 250 mm 染色路径再次出现,从试验现场观测得知是因为在 250 mm 处出现一根径较大的植物根系,使得染色再次出现。剖面 4 染色路径宽度也呈现下降趋势,变化幅度较大,整个曲线出现双峰值,在 172 mm 处出现第二个的峰值,染色宽度达 311.50 mm。剖面 2,3,5 染色路径宽度均随着土壤深度的增加而下降,下降趋势较急,说明优先路径在剖面发育良好,随着土壤深度增加,优先流快速渗入地下,表现出优先路径的连贯性和优势性。



注:图中(1),(2),(3),(4),(5)分别代表不同的染色剖面。下同。

图 1 两种林地染色路径宽度

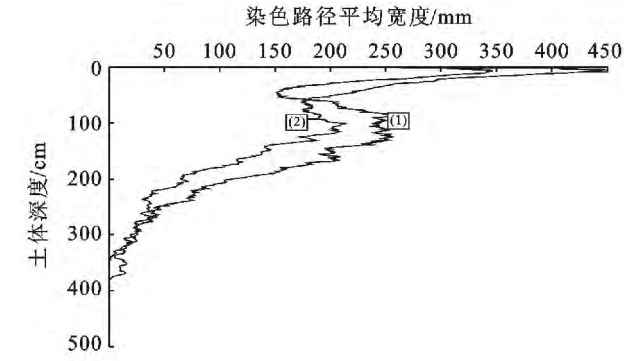
3.1.2 楠竹林土壤剖面染色路径宽度变化规律

由图 1 可以看出,楠竹林所有剖面的染色路径宽度随土壤深度的增加逐渐下降,但每个剖面染色变化波动较大,在 20 和 120 mm 左右出现峰值,各个剖面峰值分别为 416.13 和 123.01 mm,429.03 和 383.53 mm, 299.40 和 253.04 mm,343.58 和 194.31 mm,269.17 和 322.15 mm。楠竹林所有剖面染色路径宽度变化趋势都不呈现单调下降,在 50 mm 深度处出现路径宽度拐点值,在 60—210 mm 深度范围内出现反弹,曲线整体呈 S 形分布。楠竹林林地土体染色路径出现的最大深度集中在 240—300 mm,导致表层土壤较疏松,水分很容易发生侧渗,亮蓝溶液停留在表层土壤。

染色路径宽度逐渐下降,说明水分在混交林土壤中开始沿着某些固有的路径绕过上层土壤基质层,快速流入深层土壤中储存,针阔混交林染色路径的下降趋势较楠竹林剧烈,整个曲线呈现“倒梯形”。楠竹林同样随着土壤深度的增加染色路径宽度逐渐下降,在 50 mm 深度以下,楠竹林的染色路径宽度在 60—210 mm 范围内出现明显反弹,说明楠竹林主要发生侧渗流,不断延伸水平范围内的染色路径宽度。

3.1.3 两种林地土壤平均染色路径宽度曲线对比

从两林地的平均染色路径宽度来看(图 2),在 0—50 mm 深度范围内,染色路径宽度先增大后减小,可能是因为表层剖面边缘不整齐使得图像处理出现误差,使得 0 mm 深度处染色宽度不等于 500 mm。在 20 mm 处出现一个宽度拐点,拐点以下深度,两林地优先流活动较活跃。随着深度的增加,针阔混交林的



注:(1)代表混交林;(2)代表楠竹林。

图 2 两种林地染色路径平均宽度

3.2 不同林地土体染色路径数量计算

染色路径数量是指在某指定深度处,染色部分与未染色部分之间出现的间隔数^[13],本试验统计染色路径数量基于 1 mm 深度范围水平方向上的间隔数。

3.2.1 针阔混交林土壤中染色路径数量变化 针阔混交林的 5 个染色剖面染色路径数量如图 3 所示。由图 3 可以看出,各个染色路径数量范围为 0~470 条,每个剖面染色路径数量出现峰值的位置均不同,但都集中在 0—15 mm 深度范围内,说明在此深度范围内水分流动分化较严重。随着深度的增加,各个剖面的染色路径数量都呈现逐渐下降的趋势,其中剖面 2 和剖面 4 再次出现双拐点,但二者出现的位置截然

相反,这说明大孔隙及其优先路径的复杂性以及异质性,即使在很小尺度范围的土体深度内,水分在土壤中下渗过程均不一样。

3.2.2 楠竹林土壤中染色路径数量变化 从图 3 可以看出,与针阔混交林相比,楠竹林的所有剖面的染色路径数量都较小,除剖面 2 路径数量最大值出现在 135 mm 处,其余剖面均在表层范围内达到最大值,这也说明了大部分剖面在土壤表层的水流形态分化最为严重。在 60—180 mm 范围内,染色路径数量曲线出现较大反弹,均在 180 mm 处开始急剧下降,这说明随着土壤深度的增加,优先路径数量逐渐减少,优先路径并不完全连续,可能由于土壤动植物的活动导致优先路径的断裂。

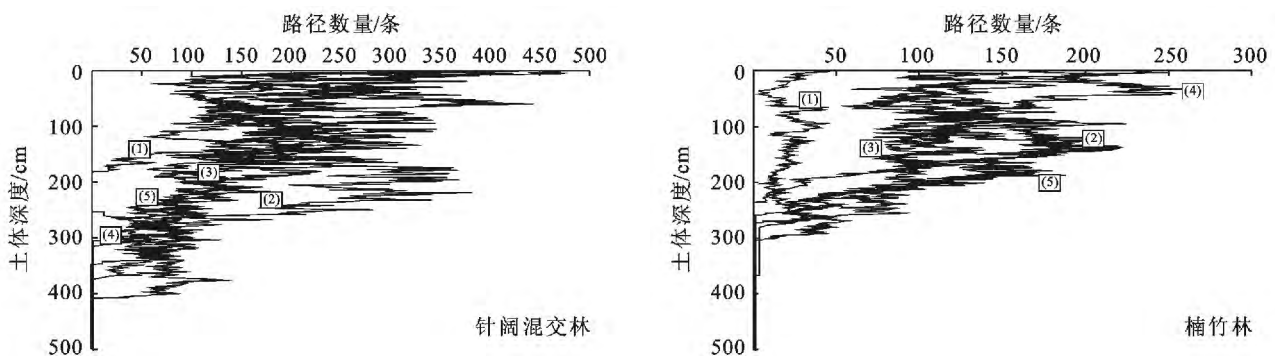
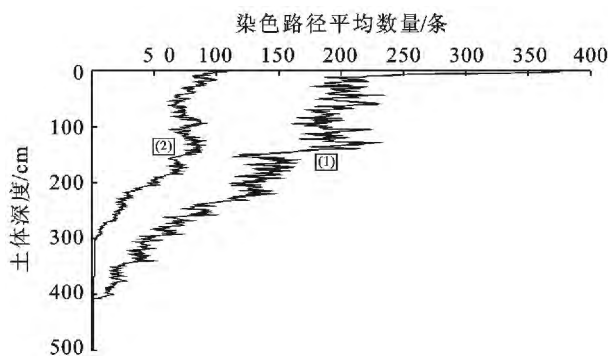


图 3 两种林地染色路径数量

3.2.3 两种林地平均染色路径数量比较 通过图 4 对混交林和楠竹林各个剖面染色路径平均数量随着深度的变化规律进行分析,两个剖面的路径数量变化趋势一致,整体均呈现逐渐下降的趋势,在土壤表层两种林地水流分化程度均较严重,随着土壤深度的增加,针阔混交林路径数量下降趋势较急,楠竹林总体趋势下降平缓。每种林地的路径数量曲线都出现不同程度的波动现象,说明优先流路径随着土体深度的增加变化不稳定。

3.3 动植物活动对优先流的影响

丰富的林地植被对大孔隙的形成以及稳定性具有决定作用,枯落物、植物根系分泌物、土壤中大的块石以及林地中植物细小的根系能够固定周围土体形成团聚体,图 5a,5b 显示了植物根系在染色剖面纵横交叉的情况,在染色区域穿插很多较大的植物根系,在试验过程中被亮蓝染成蓝色;图 5c 说明了根系对亮蓝的“通道”作用,图 5d 说明了腐烂根系和裂隙也会成为水分下渗的优先路径。相比针阔混交林土壤染色区和未染色区的根系情况,在楠竹林中,木本植物根系较稀疏,而草本植物生长茂盛,虽然单个根系直径远小于木本植物根系,但由于草本植物生长年限低于木本植物的生长年限,故而它具有庞大的数量,所以在大量的草本植物死亡后根系也会腐烂,形成大量细小的孔隙,对水分入渗起到至关重要的作用。而针阔混交林的草本植物较稀疏,主要为木本植物根系,根系生长以纵向生长为主,这为优先流的发展提供了便利,其次植物根系和根系分泌物也是食根性动物和根系寄生生物的主要食物来源,根系的生长状况会影响到这些土壤动物的数量,而这些动物的活动会改变其活动范围内的土壤养分进而影响植物根系的生长。说明植物根系对亮蓝下渗有一定的影响作用。



注:(1)代表针阔混交林;(2)代表楠竹林。

图 4 两种林地染色路径平均数量



a 楠竹林染色剖面根系



b 针阔混交林染色剖面根系



c 活根与优先流细节图



d 腐烂根与优先流细节图

图 5 植物根系与亮蓝染色关系

4 结论

(1) 通过分析两林地不同剖面,不同深度处的染色路径宽度,发现针阔混交林剖面染色路径宽度呈“倒阶梯型”的变化规律。在 60 mm 处染色路径宽度出现下降拐点,在此深度以下,优先流现象更加显著。而楠竹林染色路径宽度呈 S 形变化规律,路径宽度曲线下下降趋势较混交林平缓,在 50 mm 深度处出现下降拐点,但是在 60~210 mm 范围内,曲线反弹现象较显著,说明楠竹林土壤在此范围内,优先流垂直过程减缓,而侧向流现象明显增强。

(2) 通过统计每 1 mm 深度范围内的染色路径数量,发现两种林地的染色路径数量均随着深度的增加而出现较大的波动,这说明无论混交林还是楠竹林,在不同深度处优先流路径数量相对不稳定。楠竹林在 30~210 mm 范围内路径数量反弹最剧烈,说明在此范围内分布着较多的优先流路径,其发育程度较高,与混交林相比,发生侧向流的几率较大。

(3) 植物根系、土壤动物活动和大的块石形成的通道是土壤中优先流的重要通道。从剖面染色情况

可以看到,在 200 mm 以上的范围内,土体中分布着大量的植物活根和死亡腐烂根系,在有根系的部位亮蓝染色较深,说明植物根系对水分及其溶质的运移有较大的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Flury M, Fluhler H, Jury W A. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. *Water Resources Research*, 1994,30(7):1945-1954.
- [2] Dekker L W, Ritsema C J, Wendroth O. Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands [J]. *Journal of Hydrolog*, 1999,215(1):4-22.
- [3] Muqiu Zhao, Xin Chen, Yi Shi, et al. Phosphorus vertical migration in aquatic brown soil and light chernozem under different phosphorus application rate: A soil column leaching experiment[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009,82(1):85-89.
- [4] Kathleen H B. Nutrient removal from effluents by an artificial wetland: Influence of rhizosphere aeration and preferential flow studied using bromide and dye tracers [J]. *Water Research*, 1987,21(5):591-599.

(下转第 204 页)

绩效水平是由过程绩效和结果绩效共同决定的,综合绩效更多地受制于过程绩效。因此,在实施农地整理项目后期管护时,首先应注重管护过程,管护过程规范有序,就一定能得到好的管护绩效。

(3) 从农地整理项目绩效障碍因子诊断结果来看,管护过程中的管护主体、管护制度、管护资金、管护措施等 4 项因素对提升农地整理项目后期管护综合绩效水平均有比较大的影响;障碍度较大的因子主要包括管护主体的明确程度、巡查的有效性、劝阻的有效性、工程设施维修与疏通的有效性。因此,为了取得良好的农地整理项目后期管护绩效水平,应在以下几个方面规范管护过程: ① 明确管护主体,自发成立的村级农民组织应成为农地整理项目后期管护的首选主体,没有成立农民组织的地方,则由村民委员会承担后期管护责任; ② 制定切合实际的农地整理项目后期管护的制度体系,使管护主体切实承担相应的管护责任,规范日常管护程序,使管护主体充分注重日常管护措施的及时性和有效性; ③ 多渠道筹集农地整理项目后期管护资金,建立健全农地整理项目后期管护运行机制,充分调动管护主体的管护积极性和广大农民参与监督的积极性。

[参 考 文 献]

- [1] 熊凯. 农地整理中工程设施的产权配置与管护模式研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [2] 汪文雄, 杨钢桥, 李进涛. 农户参与农地整理项目后期管护意愿的影响因素研究[J]. 中国土地科学, 2010, 24(3): 42-47.
- [3] 汪文雄, 杨钢桥, 李进涛. 农地整理项目后期管护效率的影响因素实证研究[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1169-1176.
- [4] 王炜, 杨晓东, 曾辉, 等. 土地整理综合效益评价指标与方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 70-73.
- [5] 罗文斌, 吴次芳, 吴一洲. 基于物元模型的土地整理项目绩效评价方法与案例研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1321-1325.
- [6] 朱志刚. 财政支出绩效评价研究[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2003: 21-25.
- [7] 吴冠岑, 刘友兆, 付光辉. 基于熵权可拓物元模型的土地整理项目社会效益评价[J]. 中国土地科学, 2008, 22(5): 40-46.
- [8] 许文杰, 许士国. 湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 125-127.
- [9] 朱国宇, 熊伟. 模糊评价法与综合指数法在生态影响后评价中的应用比较研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(2): 54-59.
- [10] 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1092-1097.
- [11] 文高辉, 杨钢桥, 李文静, 等. 基于农民视角的农地整理项目绩效评价及其障碍因子诊断[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 26-34.
- [12] 杨奇勇, 杨劲松, 姚荣江, 等. 基于 GIS 的耕地土壤养分瘠化评价及其障碍因子分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1375-1382.
- [13] 刘喜广. 山东省农业可持续发展能力评估及障碍因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2009, 30(3): 51-55.
-
- (上接第 197 页)
- [5] Jones E H, Smith C C. Non-equilibrium partitioning tracer transport in porous media: 2-D physical modeling and imaging using a partitioning fluorescent dye[J]. Water Research, 2005, 39(20): 5099-5111.
- [6] 牛建植, 于新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统基于 KDW 运动弥散波模型的优先流研究[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3541-3555.
- [7] 王康, 周祖昊. 土壤性质对入渗再分布影响的显色示踪试验研究[J]. 水土保持通报, 2012, 43(3): 578-562.
- [8] 孙龙, 张洪江, 程金花, 等. 柑橘地土壤大孔隙与优先流的关系研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 76-79.
- [9] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 等. 北京昌平区农地土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 189-193.
- [10] Merdun H. Investigation of interactive effects on water flow and solute transport in sandy loam soil using time domain reflectometry[J]. Sensors, 2012, 12(7): 9749-9772.
- [11] Hardie M, Lissou S, Doyle R, et al. Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow in the formation of hillslope runoff[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(2): 252-259.
- [12] 王伟, 张洪江, 程金花, 等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [13] 徐宗恒, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被发育斜坡土体优先流特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 521-527.