doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.020

基于数量生态学的农地优先路径水平分布特征研究^{*}

陈晓冰^{1,2} 张洪江^{1,2} 程金花^{1,2} 张福明³ 张 欣^{1,2} 阮芯竹^{1,2} (1.北京林业大学水土保持学院,北京100083; 2.北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心,北京100083; 3.重庆市四面山森林资源管理局,重庆402296)

摘要:应用数量生态学中的空间点格局分析方法(g(r)函数),经 Monte - Carlo 随机模拟检验,对三峡库区紫色砂 岩区农地(垂直土层深度 10~50 cm)不同影响半径土壤优先路径水平分布特征、以及与生物活动的空间关联性进 行分析。结果表明:同一影响半径的优先路径随土层深度的增加,数量逐渐减少,同一土层随影响半径的增加优先 路径的数量逐渐减少;同一土层,较小影响半径优先路径仅在小尺度(0~20 mm)上呈聚集分布,但随影响半径和尺 度的增加,聚集分布状态逐渐明显;不同影响半径的优先路径随土层深度的增加,也逐渐表现为聚集分布格局,较 大影响半径优先路径聚集分布状态显著大于较小影响半径的优先路径;优先路径的分布与形成,不仅受到土壤自 身膨胀、干缩等因素影响,而且与生物活动的空间关联性呈正相关关系,对大影响半径(R≥1.0 mm)的优先路径影 响较大。空间点格局分析法相比 CT 扫描、土壤水分穿透曲线等测定土壤优先路径的方法更简单易行,所得结果相 一致。这种方法能从形态学角度来量化分析土壤优先路径的分布特征,更好地揭示其潜在形成过程。 关键词:农地 优先路径 数量生态学 空间点格局分析 分布特征 空间关联性

中图分类号: S152.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0130-09

Horizontal Distribution Characteristics of Preferential Flow Paths in Farmland Based on Quantitative Ecology

Chen Xiaobing^{1,2} Zhang Hongjiang^{1,2} Cheng Jinhua^{1,2} Zhang Fuming³ Zhang Xin^{1,2} Ruan Xinzhu^{1,2}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Soil and Water Conservation of Beijing Engineering Research Center,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Chongqing Forest Resource Management Bureau of Simian Mountain, Chongqing 402296, China)

Abstract: In order to analyze the horizontal distribution characteristics of different influence radius preferential flow paths and the spatial associations of biological activity in purple sandstone regions of farmland (vertical soil depths of $10 \sim 50 \text{ cm}$) in Three Gorges Reservoir Area, the spatial point pattern analysis method (g(r) function) of quantitative ecology was used. After the Monte – Carlo stochastic simulation test, the results showed that the number of preferential flow paths with the same influence radius decreased with the soil depth's decreasing, while the number of preferential flow paths with lower influence radii only displayed an aggregated distribution at a small scale ($0 \sim 20 \text{ mm}$). But the aggregated distribution was obviously as the increase of influence radius and scales. The preferential flow paths with different influence radii also displayed an aggregated distribution in deeper soil layer. The preferential flow paths with different influence radii also displayed an aggregated distribution in deeper soil layer. The preferential flow paths with different influence radii also displayed an aggregated distribution in deeper soil layer. The preferential flow paths with different influence radii also displayed an aggregated distribution in deeper soil layer. The preferential flow paths with different influence radii also displayed an aggregated distribution in deeper soil layer. The preferential flow paths with higher influence radius were more significantly aggregated distribution than those with lower influence radius. The distribution and formation of preferential flow paths were not only influenced

作者简介:陈晓冰,博士生,主要从事水土保持研究,E-mail: 191138045@qq.com

收稿日期: 2014-11-20 修回日期: 2014-12-23

^{*}北京高等学校"青年英才计划"资助项目(YETP0750)和国家自然科学基金资助项目(41271300、30900866)

通讯作者:张洪江,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与流域管理研究,E-mail: zhanghj@ bjfu.edu.cn

by the soil swelling and shrinkage, but also exhibited a positive correlation with animal activity in spatial associations, especially the preferential flow paths with larger influence radius ($R \ge 1.0 \text{ mm}$). The spatial point pattern analysis method is simpler than CT and soil water breakthrough curves methods to estimate the preferential flow paths. This proposed method can quantitatively analyze horizontal distribution characteristics of the preferential flow paths with morphology and it is better to reveal the underlying formation process.

Key words: Farmland Preferential flow path Quantitative ecology Spatial point pattern analysis Distribution characteristic Spatial association

引言

土体中存在着因土壤的干缩、膨胀和植物根系 穿插而产生的根孔以及动物活动等形成的指状通 道,它的存在可以快速传输水分和溶质,一般称其为 "优先路径",而水分和溶质经过优先路径通过多孔 介质的过程称为优先流^[1]。土壤孔隙的结构和分 布能够反映优先路径,用以研究土壤优先流特征。 国内目前主要使用 CT 扫描法^[2-4]、土壤水分穿透 曲线法^[5-6]、张力渗透仪法^[7]来研究土壤剖面大孔 隙的数量和分布特征,但存在耗时多、操作复杂、花 费大、研究尺度小等缺点。

近些年来少量研究者从优先路径相距距离上来 研究其分布特征^[8],但缺少对优先路径的量化研 究。程云等^[9]使用空间统计学中的 Morisita 指数检 验法,对三峡库区花岗岩坡面管流路径空间分布特 征进行了研究,发现其呈聚集分布状态,在一定程度 上揭示了优先路径的空间分布关系,但仅研究了坡 脚部分,代表性不强,具有一定局限性。吕文星 等^[10]采用 Ripley's K(r)函数,对林地10~20 cm 土 壤表层优先路径分布进行研究,得出优先路径多呈 聚集分布和均匀分布两种状态,但该函数局限于小 尺度的空间同质性估计,且边界有偏性,存在估计值 偏差等问题,不能准确反映空间分布状态。

本文以三峡库区紫色砂岩区农地染色图像数据为基础,应用数量生态学中空间点格局分析方法 (g(r)函数),该方法常用于不同空间尺度下生物种 群个体定量空间分布研究上^[11-13],并结合图像技术 中的形态学理论,利用g(r)分布函数分析不同层次 不同影响半径优先路径的水平分布特征以及生物活 动对其分布的影响关系,以揭示农地土壤优先路径 水平分布及其与生物活动的空间关联性,同时推动 数量生态学-空间点格局分析这种简单、易行的方法 在土壤优先路径空间分布研究上的应用。

1 研究区概况

试验地位于三峡库区尾端的重庆市江津区四面 山农地区,地理坐标为 E106°23′~ E106°24′, N28°36′~N28°37′,距重庆市主城区 140 km,海拔高 度 500~1780 m,地势南高北低,年均气温 13.7℃, 年均降水量 1 522.3 mm,属中亚热带湿润性季风气 候。研究区土壤类型主要为紫色土和黄壤土,土壤 质地为砂壤土。研究区内选择 2 块相邻的农地作为 研究样地,试验时间为 2013 年 6 月 7 日—7 月 7 日, 样地基本情况如表 1、2 所示。

表1 样地基本情况

Tab.1 Basic conditions of experimental plots

立地名称	海拔高度/m	坡向	坡度/(°)	作物类型	生长状况
农地1	1 190	西北	3	玉米	苗期
农地2	1 190	西北	3	玉米	苗期

2 研究方法

2.1 样地选择

选择2块70 cm×70 cm的正方形样地(农地1、 农地2),用薄膜塑料布覆盖2块样地,以避免降雨、 动物等对其影响,农地处理时间为7 d。

表 2 样地土壤基本性质

Tab. 2Basic soil properties of experimental plots							
土层厚度/	土壤容重/	孔隙度/	砂粒质量	粉粒质量	粘粒质量	上撞舌地	有机质
cm	$(g \cdot cm^{-3})$	%	分数/%	分数/%	分数/%	工壊灰地	质量分数/%
0 ~ 10	1.07	52.02	71.97	24.16	3.87	砂质壤土	1.52
$10 \sim 20$	1.19	52.41	74.34	21.38	4. 28	砂质壤土	1.60
20 ~ 30	1.18	49.93	61.81	32.31	5.88	砂质壤土	1.38
$30 \sim 40$	1.26	49.43	43.94	46.99	9.07	粉砂质壤土	1.35
40 ~ 50	1.38	47.65	35.85	53.19	10.96	粉砂质壤土	1.34

2.2 染色处理

首先清理样地表面枯枝落叶,以免对试验结果 产生影响,将长和宽均为70 cm、高50 cm 的金属样 方板砸入处理后的2个样地中,砸入深度30 cm,露 出高度20 cm,将4 g/L的13L亮蓝(相当于当地大 雨)溶液均匀喷洒至样方内,喷洒后,用薄膜塑料布 覆盖2个样方,以免外界因素对试验产生影响。 24 h后,在样方中心未扰动区域以50 cm×50 cm 的 子样方规格、垂直10 cm 高度水平开挖样方(图1), 直至水平染色土壤消失,并使用1300万像素的数 码相机,配合标准灰阶比色卡和标尺,垂直拍摄每层 水平剖面的土壤染色图像,同时记录土壤生物孔洞 和根系孔洞的位置坐标。



Fig. 1 Schematic diagram of soil profile

2.3 图像处理

首先使用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对拍摄的 原始图像进行几何校正,再使用 Photoshop CS 6.0 软件对图像进行裁剪(50 cm × 50 cm),经过光照校 正(标准灰阶比色卡),调整对比度,去雾、去色,使 染色区为黑色(像素值0),非染色区为白色(像素值 255),形成了一个 500 像素 × 500 像素的黑白图像。 由于处理后的黑白照片在转换过程中会存在噪点, 将处理后的黑白图像导入专业图像软件 Image ProPlus 6.0 进行形态学原理^[14]处理。

2.4 优先路径位置及影响半径提取

水分由优先路径进入到深层土壤的过程中,由 于含水率变化、侧渗现象等因素影响,其湿周要大于 土壤中的实际优先路径,将水分所影响的范围看作 是土壤优先路径的"染色影响范围"^[10]。将农地每 一层的土壤水平剖面视为一个空间整体,优先路径 看作为该空间整体上独立的个体或一点,运用图像 处理技术提取其水平空间位置和影响半径。将土壤 水平剖面上的染色范围近似看作为圆,其半径为土 壤优先路径的染色影响半径。利用 Image ProPlus 6.0 软件进行统计,得到各染色路径面积、重心位置 坐标和影响半径,根据图像处理结果,可按照一定范围将影响半径 R 划分为以下 4 个等级:R < 1.0 mm、 1.0 mm $\leq R < 2.5 \text{ mm}$ 、2.5 mm $\leq R < 5.0 \text{ mm}$ 和 $R \geq 5.0 \text{ mm}$ 。

2.5 数据处理

g(*r*)点格局分析函数^[15]是由 Ripley's *K*(*r*)函数^[16]转化而来,公式为

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{\mathrm{d}K(r)}{d_r} \tag{1}$$

式中 r——半径,mm d_r——宽度,mm

g(r)函数也是基于个体与个体间距离的关联 性函数,对半径为r、宽度为d,的圆环内所有个体分 布进行分析。g(r)函数与K(r)函数相比,其优点在 于能够较准确地判别某一空间尺度上点的实际分布 偏离期望值的大小程度,能消除大尺度空间格局分 析时受到小尺度的累加效应这一缺陷,是目前分析 空间聚集分布程度的重要方法。

在置信区间为 99% 的检验条件下,通过 Monte - Carlo 随机模拟 99 次计算,在单点格局(单一变量) 分析中,g(r)函数分布曲线位于包迹线之上为聚集 分布,位于 2 条包迹线之间为随机分布,位于包迹线 之下为均匀分布;多元点格局(双变量)分析中,g(r)函数位于包迹线之上 2 类格局空间关联性为显 著正相关关系,位于 2 条包迹线之间无关联性,位于 2 条包迹线之下为负相关关系。以样地边长的 1/4 边长为研究尺度,即空间尺度为 125 mm。

2.6 处理软件

采用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对拍摄的原始 图像进行几何校正; Photoshop CS 6.0 软件和 Image ProPlus 6.0 对图像数据进行处理; Excel 2010 进行 数据统计; R(×64) 3.0.3 软件对数据进行统计分 析和作图, g(r)函数采用 R 语言中 Spatstat 软件包 进行空间点格局分析。

3 结果与分析

图 2 中 2 个样地 0~10 cm 土壤表层染色区域 均占 95% 以上,这是由于水分在活动流场的非均匀 性^[17-18],基质流和大孔隙流同时存在于土壤表层, 该层不能反映土壤优先路径的分布特征,故本文不 对 0~10 cm 土壤层进行优先路径分析。2 个样地 的土壤水平染色剖面和染色深度均相同,土壤染色 深度均为 50 cm,数据分析所得分布特征情况一致, 故本文只选择一个样地(农地 1)水平染色剖面进行 优先路径的分布特征及关联性分析。

3.1 不同影响半径优先路径数量分布特征

对农地1、2不同影响半径优先路径数量进行提



图 2 0~10 cm 土层水平剖面染色图 Fig. 2 0~10 cm soil profile dyeing diagram (a) 农地 1 (b) 农地 2

取统计,表 3 显示,农地 20~30 cm 土层影响半径 *R* < 1.0 mm 的优先路径数量较 10~20 cm 土层多, 由于农地耕作层土壤深度为 0~20 cm,在翻耕等人 为因素作用下,表层土壤疏松,大孔隙较多,影响半 径大的优先路径较多,而深层未受到扰动,土壤紧 实,较小影响半径的优先路径数量较多。土层总体 上表现为随土层深度的逐渐增加,同一影响半径优 先路径数量逐渐减少;同一层水平土壤剖面上,优先 路径数量表现为随影响半径 *R* 的增大而减少。原 因是随着土层深度,缺少了土壤间相互挤压、剪切以 及作物根系(活根和死根)、土壤动物的影响,土壤 紧实度加强,大影响半径的优先路径数量较表层显 著降低。优先路径农地 1、2 各土层优先路径总数量 基本一致,分别为 2 412 个和 2 316 个。

表 3 不同影响半径优先路径数量 Tab. 3 Number of preferential flow paths with different influence radii

立地	土层深	影响半径 R/mm					
名称	度/cm	(0,1.0)	[1.0,2.5)	[2.5,5.0)	[5.0,∞)	量	
农地1	$10\sim 20$	209	253	188	160		
	$20\sim 30$	370	220	150	72		
	$30 \sim 40$	201	180	102	65	2 412	
	$40\sim 50$	59	127	46	10		
农地 2	$10 \sim 20$	222	264	163	151	2.216	
	$20\sim 30$	349	235	132	52		
	$30 \sim 40$	186	149	119	53	2 316	
	$40\sim 50$	78	110	30	23		

3.2 土壤剖面优先路径水平分布格局分析

3.2.1 不同影响半径优先路径水平分布格局

通过图像处理技术得出农地 10~20 cm、20~ 30 cm、30~40 cm 和 40~50 cm 土层的不同影响半 径优先路径水平空间分布位置(图 3),从左至右分 别为:R < 1.0 mm、1.0 mm $\leq R < 2.5$ mm、2.5 mm $\leq R < 5.0$ mm 和 $R \geq 5.0$ mm。

g(r)函数曲线的波动表示空间个体的分布变 化程度。单变量点格局分析显示(图 4,每行从左至 右分别为: $R < 1.0 \text{ mm} \le R < 2.5 \text{ mm} \le$ 2.5 mm $\le R < 5.0 \text{ mm} , R \ge 5.0 \text{ mm}), 10 \sim 20 \text{ cm} 土壤剖$ 面上,4种影响半径的优先路径在10~20 mm 距离 尺度处均表现出显著的聚集分布格局,20~125 mm 距离尺度为随机分布格局;20~30 cm 土壤剖面上, 影响半径 *R* < 1.0 mm、1.0 mm ≤ *R* < 2.5 mm 和 2.5 mm ≤ R < 5.0 mm 的优先路径在 10 ~ 20 mm 距 离尺度处均表现出显著的聚集分布状态, R ≥5.0 mm 的优先路径在 10~40 mm 距离尺度上表现 为聚集分布,其他尺度上为随机分布格局;30~ 40 cm和 40~50 cm 土层中影响半径 R < 1.0 mm 的 优先路径在 0~30 mm 距离尺度上呈聚集分布状 态,其他尺度上呈随机分布状态。1.0 mm $\leq R <$ 2.5 mm、2.5 mm ≤ R < 5.0 mm 和 R ≥ 5.0 mm 的优先 路径在 5~125 mm 的距离尺度上均呈现聚集分布 格局。在同一土层上,不同影响半径优先路径分布 曲线的最高峰随影响半径的逐渐增大向距离尺度较 大位置移动,即波峰出现的位置所对应的距离尺度 随影响半径的增大而逐渐增大。随着距离尺度的逐 渐增加,变化程度表现为先变大最后逐渐趋于平稳, 不同影响半径下的优先路径分布逐渐呈聚集分布格 局,且聚集状态最大值(波峰)一般出现在0~30 mm 距离尺度之间。

对于同一影响半径、不同土层的优先路径来说, 影响半径为 R < 1.0 mm 的优先路径随土层的逐渐 加深,g(r)函数曲线在 0~40 mm 距离尺度上波动 程度较大,随着距离尺度的逐渐增加,呈先增大后减 小最后趋于平稳的趋势,呈现聚集到随机分布格局; 影响半径为 1.0 mm ≤ R < 2.5 mm 、2.5 mm ≤ R < 5.0 mm和 R≥5.0 mm 的优先路径分布曲线均随土 层的加深,变化程度逐渐增强,且在 30~50 cm 土层 变化最明显,变幅均大于 R < 1.0 mm 的优先路径, 0~125 mm 距离尺度上呈现聚集分布格局。同一影 响半径下,随土层深度的逐渐增加,其分布曲线的波 峰出现的距离尺度位置并没有发生变化,说明优先 路径在土壤垂直剖面上具有较好的连通性,发育程 度较高;同一影响半径下,随土层深度的逐渐增加, 优先路径的分布状态逐渐呈现聚集分布格局,土层 越深聚集分布格局越明显。

3.2.2 不同影响半径优先路径的空间关联性

相同土层的同一影响半径优先路径的分布特征 不仅受到土壤自身发育过程中的涨缩、组成颗粒大 小、有机质含量^[19]等因素的影响,还受到其他影响 半径优先路径的影响。通过对比分析同一土层、不 同影响半径间的空间格局关联性,来揭示不同影响 半径之间在空间分布格局上的相互影响关系。如图 5 所示,每列从上至下依次为: $R < 1.0 \text{ mm} \leq 1.0 \text{ mm} \leq R < 5.0 \text{ mm}$ 、





R < 1.0 mm 与 R ≥ 5.0 mm, 1.0 mm ≤ R < 2.5 mm 与2.5 mm ≤ R < 5.0 mm, 1.0 mm ≤ R < 2.5 mm 与 R ≥5.0 mm, 2.5 mm ≤ R < 5.0 mm 与 R ≥ 5.0 mm 优先路 径的空间关联性。

双变量点格局分析显示(图 5),10~20 cm 土 层,各影响半径之间在 0~10 mm 距离尺度上呈现 负相关性,10~125 mm 距离尺度上,g(r)函数线接 近且部分与上包迹线重合,因此多表现为正相关性; 20~30 cm 土层,各影响半径之间主要表现出无关 联性;30~40 cm 土层,R < 1.0 mm 的优先路径分别 与 1.0 mm $\leq R < 2.5$ mm、2.5 mm $\leq R < 5.0$ mm 和 $R \ge 5.0$ mm 的优先路径之间均表现为正相关, 1.0 mm $\leq R < 2.5$ mm、2.5 mm $\leq R < 5.0$ mm 和 $R \ge 5.0$ mm 的优先路径之间均表现为正相关, 1.0 mm $\leq R < 2.5$ mm、2.5 mm $\leq R < 5.0$ mm 和 $R \ge 5.0$ mm 的优先路径之间均表现为正相关, 的正相关,即各影响半径的优先路径在土壤剖面上 的空间分布数量均同时增加,反之同时减小;40~ 50 cm 土层各影响半径下的优先路径分布的空间关 联性呈显著正相关,说明该层土壤剖面上的优先路 径的分布相互影响,相互制约。较小影响半径的优 先路径在发育过程中,随着数量的增多,土粒数量逐 渐增多,空隙形成,会对土体内部的稳定性造成影 响,使其发生崩塌,多个较小影响半径的优先路径形 成大的优先路径^[19]。

3.2.3 优先路径与生物活动的空间关联性

土壤优先路径的形成,不仅受到土壤自身膨胀、 干缩的影响,在一定程度上还受到植物根系的生长、 死亡、土壤中的生物如蚯蚓、蚂蚁等生物活动的影 响,因此研究土壤中生物活动对优先路径空间分布





特征的影响是十分必要的^[19-21]。

试验过程中发现,农地的生物活动(农作物根 系和虫洞)主要集中在 0~20 cm 土层,但由于 0~ 10 cm 土层中基质流的存在,水平剖面染色面积比 达 95% 以上,故本文只分析 10~20 cm 土层生物活 动与不同影响半径优先路径的空间关联性。图 6 所 示为不同影响半径优先路径空间位置与生物活动位 置的空间关联性。

双变量点格局分析显示(图 6),R < 1.0 mm的 优先路径空间分布与生物活动在 0~20 mm 距离尺 度上呈负相关关系,20~125 mm 距离尺度上无空间 关联性;1.0 mm $\leq R < 2.5$ mm、2.5 mm $\leq R < 5.0$ mm 和 $R \ge 5.0$ mm的土壤优先路径空间分布与生物活 动随影响半径的增大,其g(r)双变量函数估计值曲 线逐渐接近并高于上包迹线,表现为小影响半径的 土壤优先路径在水平空间分布格局上几乎不受生物 活动的影响,而当影响半径大于 1 mm 时,生物活动 对其土壤优先路径的空间分布及数量都产生正相关 影响,尤其对大影响半径下的土壤优先路径。因为 对农作物根系和虫洞的调查过程中发现均以较大的 半径尺寸存在,故在生物活动的整个过程中,对小影 响半径优先路径的形成和水平空间分布影响甚小。 将 10~20 cm 土层的单变量点格局分析图像与不同 影响半径优先路径和生物活动的双变量点格局分析 图像进行比较发现,变化趋势基本一致,说明生物活 动和土壤自身变化均对土壤优先路径的空间分布格 局产生影响。

4 讨论

以上结果表明,数量生态学中的空间点格局分 析方法可以在一定程度上揭示土壤水平剖面优先路 径的空间分布特征,将不同影响半径优先路径与生 物活动进行结合分析,为土壤优先路径的量化分析 提供了一种较 CT 扫描、土壤水分穿透曲线法等方 法更简单、易行的新方法。

R语言的 Spatstat 软件包中 g(r) 函数采用 1/4



Fig. 5 Spatial associations of preferential flow paths with different influence radii in soil profile

(a) 10~20 cm 土层 (b) 20~30 cm 土层 (c) 30~40 cm 土层 (d) 40~50 cm 土层

最短边的距离尺度,有效降低了边界累积偏差对研 究较大尺度的分布特征判断的影响,消除了不断累 积的小尺度效应,不但可进行空间同质性分析,还可 进行空间异质性分析。空间格局与空间关联性分析 为研究揭示了许多潜在的生态学过程,同时提供了 其在土壤中的变化信息。

对土壤优先路径空间分布特征的研究,仅靠空

间格局分析还不能完全解决,因为相同格局可能 由不同生态过程共同作用产生,对其形成和分布 的研究还需深入。同时,本文仅对农地土壤优先 路径的水平空间分布格局进行了分析,今后还需 对其他区域不同立地,通过对比分析与验证,以探 讨这种方法在土壤优先流空间分布特征研究上的 适用性。





5 结论

(1)对三峡库区紫色砂岩区农地土壤进行染色示踪试验,农地优先路径发育深度可达 50 cm。同一土层,随影响半径的增加,优先路径数量逐渐减少;同一影响半径的优先路径数量随土层深度的增加而降低。这与吕文星^[22]、田香姣等^[23]对农地,以及陆斌等^[24]对林地采用土壤水分穿透曲线法测定 土壤优先路径即大孔隙数量变化趋势的结果相一致。

(2)在所研究的距离尺度下,农地土壤优先路 径的格局分布主要表现为:在垂直和水平方向上,各 影响半径的优先路径在 10~50 cm 土层中,均以聚 集分布为主,随土层深度的逐渐增加,聚集分布格局 越明显,且大影响半径的优先路径较小影响半径的 优先路径显著,这种非随机分布状况,进一步说明研 究农地土壤优先路径的分布状况是十分必要的。这 与 Peyton 等^[25]、冯杰等^[2]采用 CT 扫描法得出农地 土壤大孔隙的分布随土层深度的增加,离散程度越 小的结论相一致; $R < 1.0 \text{ mm} (1.0 \text{ mm} \leq R < 2.5 \text{ mm} (2.5 \text{ mm} \leq R < 5.0 \text{ mm} \pi R \geq 5.0 \text{ mm} 4 种影 响半径的优先路径在水平剖面上分布格局趋于相同,这与点格局分析中的对同一地区空间同质性假 设相一致^[15-16]。$

(3) 在较小的距离尺度(0~10 mm)上,小影响 半径的优先路径与大影响半径的优先路径之间呈负 相关关系,但随着距离尺度的增大和土层深度的增 加,两者之间的空间关联性转变为正相关关系,说明 小影响半径优先路径的发育在较大程度上可促进大 影响半径优先路径的形成,这与官琦等^[26]对玄武岩 斜坡土体大孔隙等得出的结论一致。

(4) 在农地 10~20 cm 土壤水平剖面上,土壤中 的生物活动与优先路径之间的空间关联性呈正相 关,促进了土壤中优先路径的形成和空间分布,一方 面加快水分的垂直入渗,另一方面促进作物吸收水 分生长。再一次证明土壤自身的发育(膨胀、干缩、 冻融、颗粒组成等)以及土壤中的生物活动(根系、 土壤动物)都能影响优先路径的形成和分布^[27]。

参考文献

- 1 Isensee A R, Helling C S, Gish T J, et al. Groundwater residues of atrazine, alachlor, and cyanazine under no-tillage practices [J]. Chemosphere, 1988, 17(1):165 - 174.
- 2 冯杰,郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. 水科学进展,2002,13(5):611-617.
- Feng Jie, Hao Zhenchun. Distribution of soil macropores characterized using computed tomography [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5):611-617. (in Chinese)
- 3 Luo L, Lin H. Lacunarity and fractal analyses of soil macropores and preferential transport using micro-X-ray computed tomography [J]. Vadose Zone Journal, 2009,8(1):233.
- 4 Baveye P C, Laba M, Otten W, et al. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data[J]. Geoderma, 2010, 157(1-2):51-63.
- 5 魏虎伟,程金花,张洪江,等.四面山2种林地大孔隙特征与优先流关系研究[J].水土保持学报,2012,28(4):263-268. Wei Huwei, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, et al. Relationships between soil macropores properties and preferential flow about two kind of woodlands in Simian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,28(4):263-268. (in Chinese)
- 6 王彬徑,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.
 Wang Binyan, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, et al. Macropores properties of agricultural land at Changping District in Beijing
 [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(3):189-193. (in Chinese)
- 7 Watson K M, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3):578 - 582.
- 8 Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils [J]. Geoderma, 2004, 120(1-2):137-153.

- 9 程云,张洪江,史玉虎,等.长江三峡花岗岩坡面土管空间分布特征[J].北京林业大学学报,2001,23(5):19-22. Cheng Yun, Zhang Hongjiang, Shi Yuhu, et al, Spatial variability of pipes in granite slope in the Three Gorges of Yangtze River [J]. Journal of Beijing Forestry University,2001,23(5):19-22.(in Chinese)
- 10 吕文星,张洪江,吴煜禾,等. 基于点格局分析的林地表层土壤优先路径水平分布特征[J].水土保持学报,2012,26(6):68-74.
 Lü Wenxing, Zhang Hongjiang, Wu Yuhe, et al. Horizontal distribution characteristics of the preferential flow paths in surface soil of the forest land based on the spatial point pattern analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6):68-74. (in Chinese)
- 11 张春雨,赵秀海.随机区块法在空间点格局分析中的应用[J].生态学报,2008,28(7):3108-3115. Zhang Chunyu, Zhao Xiuhai. Spatial points pattern analysis using random square-quadrats method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(7):3108-3115. (in Chinese)
- 12 袁志良,王婷,朱学灵,等.宝天曼落叶阔叶林样地栓皮栎种群空间格局[J].生物多样性,2011,19(2):224-231.
 Yuan Zhiliang, Wang Ting, Zhu Xueling, et al. Patterns of spatial distribution of *Quercus variabilis* in deciduous broadleaf forests in Baotianman Nature Reserve[J]. Biodiversity Science,2011,19(2):224-231. (in Chinese)
- 13 倪瑞强,唐景毅,程艳霞,等.长白山云冷杉林主要树种空间分布及其关联性[J].北京林业大学学报,2013,35(6):28-35. Ni Ruiqiang, Tang Jingyi, Cheng Yanxia, et al. Spatial distribution patterns and associations of main tree species in spruce-fir forest in Changbai Mountains, Northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2013,35(6):28-35. (in Chinese)
- 14 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,2011:34-35.
 Wang Wei. Characteristics and formation mechanism of preferential flow in forest soils of purple sandstone regions, three gorges reservoir area. [D]. Beijing: Beijing Forest University,2011:34-35. (in Chinese)
- 15 Wiegand T A, Moloney K. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology[J]. Oikos, 2004, 104(2):209 229.
- 16 Diggle P J. Statistical analysis of spatial point patterns [M]. London: Academic Press, 1983:38 72.
- 17 王康,张仁铎,王富庆,等.土壤水分运动空间变异性尺度效应的染色示踪入渗试验研究[J].水科学进展,2007,18(2): 158-163.

Wang Kang, Zhang Renduo, Wang Fuqing, et al. Characterizing scale dependent heterogeneity of soil water movement through dying infiltration experiments [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2):158 - 163. (in Chinese)

- 18 吴庆华,张家发,蔺文静,等.土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J].农业工程学报,2014,30(7):82-90.
 Wu Qinghua, Zhang Jiafa, Lin Wenjing, et al. Appling dyeing tracer to investigate patterns of soil water flow and quantify preferential flow in soil columns[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(7):82-90. (in Chinese)
- 19 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.
 Gao Zhaoxia, Xu Xuexuan, Zhao Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(11):2801-2811. (in Chinese)
- 20 Cey E E, Rudolph D L. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(12): 1768 1779.
- 21 王大力,尹澄清.植物根孔在土壤生态系统中功能[J].生态学报,2000,20(5):869-874.
 Wang Dali, Yi Chengqing. Functions of root channels in the soil system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000,20(5):869-874. (in Chinese)
- 22 吕文星. 三峡库区三种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京:北京林业大学,2013:31-37. Lü Wenxing. Characteristics of preferential flow and its effect on nitrate nitrogen transport in three land use types of the three gorges reservoir area[D]. Beijing: Beijing Forest University,2013:31-37. (in Chinese)
- 23 田香姣,程金花,杜士才,等.2种土地利用方式下的优先流特征[J].水土保持学报,2014,28(3):37-41. Tian Xiangjiao, Cheng Jinhua, Du Shicai, et al. Characteristics of preferential flow under two kinds of land use patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(3):37-41. (in Chinese)
- 24 陆斌,张胜利,李侃,等.秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J].生态学报,2014,34(6):1512-1519.
 - Lu Bin, Zhang Shengli, Li Kan, et al. Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6):1512 1519. (in Chinese)
- 25 Peyton R L, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X-ray computed to mography[J]. Water Resources Research, 1994, 30(3):691-700.
- 26 官琦,徐则民,田林. 植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺及其主要影响因素[J]. 应用生态学报,2013,24(10):2888 2896. Guan Qi, Xu Zemin, Tian Lin. Sizes of soil macropores and related main affecting factors on a vegetated basalt slope[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(10):2888 - 2896. (in Chinese)
- 27 Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils [J]. Water Resources Research, 1982, 18(5):1311-1325.

138