doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.024

基于林分空间结构分析方法的土壤大孔隙空间结构研究*

陈晓冰[1,2]　程金花[1,2]　陈引珍[2]　张洪江[1,2]　张福明[3]　姚晶晶[1,2]

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;
3.重庆市四面山森林资源管理局,重庆 402296)

摘要:土壤大孔隙的形成和分布具有重要的生态学意义,但尚未有研究者利用生态学方法研究其空间结构。以三峡库区紫色砂岩区的 3 种典型土地利用类型下的土壤大孔隙为研究对象,将图像处理技术与林分空间结构分析方法相结合,从形态学和生态学角度量化分析土壤大孔隙的空间结构。结果表明:3 种土地利用类型的土壤大孔隙形状、空间结构复杂程度高,空间分布格局随土壤深度的增加均呈聚集分布趋势,且深层土壤的大孔隙组成较表层单一,其中草地最明显,大孔隙发育程度均随土壤深度的增加而降低;3 种土地利用类型的土壤优先流发育程度由大到小为:草地、果园、农地,同一土地利用类型不同孔径范围的大孔隙所形成的优先路径的连通性、导水性和发育程度由大到小依次为:草地孔径范围[5.0 mm,∞)、[2.5 mm,5.0 mm)、[1.0 mm,2.5 mm)、(0,1.0 mm),农地和果园孔径范围[1.0 mm,2.5 mm)、[2.5 mm,5.0 mm)、(0,1.0 mm)、[5.0 mm,∞);将林分空间结构分析方法与土壤大孔隙位置密度分布、大孔隙变异度和复杂度指标进行对比,并与以往研究土壤大孔隙空间结构的方法进行比较,所得结果相同,证明该方法可以用于土壤大孔隙空间结构的分析和研究。林分空间结构分析方法简单易行,从生态学的角度完善了大孔隙空间结构的分析,弥补了目前基于物理化学方法在大孔隙结构理论分析的不足,进一步揭示了土壤大孔隙空间结构形成和分布的原因。

关键词:土地利用类型　大孔隙　林分空间结构分析　优先路径发育程度　定量分析

中图分类号:S152.5;S758.5+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)11-0174-13

Study of Soil Macropore Spatial Structure Based on Stand Spatial Structure Analysis Method

Chen Xiaobing[1,2]　Cheng Jinhua[1,2]　Chen Yinzhen[2]　Zhang Hongjiang[1,2]　Zhang Fuming[3]　Yao Jingjing[1,2]

(1. *School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
3. *Chongqing Forest Resource Management Bureau of Simian Mountain, Chongqing* 402296, *China*)

Abstract: The soil macropores development and distribution in the field play an key ecological role in soil ecosystems, because of the complex interaction of soil's structures, moisture condition, stress level and biological activities. However, few researchers have used the ecological method to study the spatial structures of the soil macropores. This paper presents a new method (i.e., combining with the ecology and morphology) to quantitatively investigate the spatial structure characteristics of macropores in purple sandstone regions the typical three land use types in Three Gorges Reservoir Area, with the stand spatial structure analysis method and image processing technology. The results demonstrated that the shapes and spatial structures of the soil macropores of three land use types were highly complicated. The soil macropores were mainly represented a gradual tendency of clumped distribution pattern and community

收稿日期:2015-08-21　修回日期:2015-09-22

*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)

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

通讯作者:程金花,副教授,主要从事土壤侵蚀与流域管理研究,E-mail:jinhua_cheng@126.com

structures (i. e., composing of the same pore size macropore with increasing soil depth), especially the grassland. The development degree of macropores in three land use types gradually decreased with the increase of soil depth. Three land use types' development degrees of the preferential flow were in this order from high to low: grassland, orchard and farmland. The spatial connectivity, the development degree and water conductivity of different preferential flow paths in same land use type were in this order from high to low: for grassland, [5.0 mm, ∞), [2.5 mm, 5.0 mm), [1.0 mm, 2.5. mm), (0, 1.0 mm), however, for farmland and orchard, [1.0 mm, 2.5 mm), [2.5 mm, 5.0 mm), (0, 1.0 mm), [5.0 mm, ∞). The analysis results of stand spatial structure analysis method were compared with distribution density of the soil macropore, variability, complexity and previous research methods. The same result proved the accuracy and applicability of stand spatial structure analysis method used to analyze the spatial structures of macropores. This new method provides an effective, convenient, rapid and more economical method for studying spatial structures of macropores, and gives us more spatial structure information from the viewpoint of ecology. Meanwhile, it compensates for the deficiency of the current methods (e. g., dye tracer, visual liquid latex, water breakthrough curves analysis and CT technique) based on physical and chemical analysis about theoretical analysis of macropores structures, and further reveals the reasons about the formation and distribution of spatial structure of the soil macropores.

Key words: Land use type　Macropores　Stand spatial structure analysis　Development degree of preferential flow paths　Quantitative analysis

引言

土壤孔隙结构具有高度的空间异质性和复杂性。土壤的伸缩和膨胀形成的干缩缝隙、植物根系生长死亡穿插形成的孔洞、土壤动物活动产生的虫洞,以及因湿润锋不稳定形成的指状渗透孔隙,常被称为土壤的"大孔隙"[1-3],水分和溶质快速运移通过由大孔隙组成的空间网络通道即为土壤的"优先路径"[4]。总的来说,土壤大孔隙结构促进了区域水资源的交换和补给[5-6],显著影响了区域地下水资源的质量安全,特别是农地、果园等受人为管理的土地。土壤大孔隙的存在,在降雨和灌溉条件下,氮、磷等养分随土壤水分快速运移到地下,造成水资源的污染与浪费[6]。

目前,国内外学者主要通过土壤染色示踪法[7-9]、树脂填充法[10-11]、穿透曲线法[9,12]、张力渗透仪法[9,13]、离子示踪法[14]和扫描法[15-18]等对土壤大孔隙空间结构特征进行观测和研究,取得了一定的研究成果,但这些方法主要集中在应用物理模型假设、图像分析和化学反应方法揭示土壤大孔隙的大小、数量和分布状况等空间结构特征。然而,大孔隙的形成和分布是一个受人为、植被、土壤生物和土壤自身影响的生态过程,具有重要的生态学意义,尚未有研究者通过生态学的方法对其空间结构特征进行研究的报道。

惠刚盈等[19-20]提出了相临木关系-林分空间结构分析方法,包括角尺度(W)、混交度(M)和大小比数(U)3 个评体价指标,可以由个体到整体,由单一林种到多林种进行详尽、全面地分析林分空间结构。土壤大孔隙的形成是一个生态过程,因此可将土壤剖面视为一个空间整体,剖面上的每个土壤大孔隙视为该空间整体上的一个独立个体,即可等效为一棵树木,通过分析不同土壤大孔隙的角尺度、混交度和大小比数,用以描述土壤大孔隙的空间结构特征。

本文以三峡库区紫色砂岩区的 3 种典型土地利用类型(草地、农地和果园)为研究样地,在田间尺度下,基于染色示踪实验,从生态学的角度出发,应用林分空间结构分析方法,结合形态学图像处理技术,对草地、农地和果园土壤大孔隙的空间结构分布特征进行定量分析,并与土壤大孔隙位置密度、大孔隙变异度和复杂度的分析结果进行对比和验证,以评价林分空间结构分析方法的准确性与适用性,同时推动这种简单、快速、低成本的生态学分析方法在量化研究土壤大孔隙空间结构和优先路径分布特征上的应用,以期为区域水循环、流域水资源评价提供理论基础和技术支持。

1　研究区概况

研究地位于三峡库区重庆市的四面山,地理坐标为 106°17′~106°30′E,28°31′~28°43′N,距重庆市主城区 140 km,海拔高度 500~1 780 m,地势南高北低,年平均气温 13.7℃,年平均降水量 1 522.3 mm,属中亚热带湿润性季风气候,土壤类型

主要为紫色土和黄壤土,土壤质地为砂壤土。

2 研究方法

2.1 样地选择

选取四面山 3 种典型土地利用类型:草地、农地和果园作为研究对象,在综合考虑每种土地利用类型海拔高度、坡向、坡度、植被类型等因素相似性的前提条件下,在同一土地利用类型的一个大区域内各选择 6 块等距相邻的 100 m^2 的样方,总计 18 块样方,且所选 3 种土地利用类型研究地形成时间均在 15 ~ 17 a 之间,实验时间为 2014 年 5 月 15 日,样地基本情况如表 1 所示。

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic conditions of experimental plots

类型	海拔高度/m	坡向	坡度/(°)	植物种类	盖度/%	郁闭度	大孔隙及根系特征
草地	1 189	西北	3	苜蓿、中华里白、芒萁	95		蚯蚓洞 15 ~ 30 个/m^2,开启程度高,贯穿深度可达土壤 47 cm;0 ~ 40 cm 土层植物根孔较多;根系深度可达 40 cm,根长平均密度为 5.23 mm/cm^3
农地	1 186	西北	3	大豆	53		蚯蚓洞 6 ~ 17 个/m^2,开启程度高,贯穿深度可达土壤 35 cm;0 ~ 30 cm 土层植物根孔较多;根系深度可达 30 cm,根长平均密度为 2.43 mm/cm^3
果园	1 170	西北	3	柑橘树		0.42	蚯蚓洞 13 ~ 21 个/m^2,开启程度高,贯穿深度可达土壤 40 cm;0 ~ 30 cm 土层植物根孔较多;根系深度可达 38 cm,根长平均密度为 3.63 mm/cm^3

2.2 样地布设

在每块样方内,选择 1 个距离样方边界等距且表面平整的位置,将厚度为 5 mm,长、宽、高分别为 60、60、50 cm 的金属小样方板缓慢砸入,砸入深度 30 cm,露出高度 20 cm,形成 1 个小样方,用以进行土壤染色示踪观测实验。

2.3 染色示踪实验

2.3.1 样地处理

在进行染色示踪实验前,对小样方分别进行实验前预处理,用高密度聚乙烯薄膜覆盖观测小样方,保证实验样方免受降雨、动物等外界条件的影响,预处理时间均为 48 h。

2.3.2 染色处理

每个小样方预处理 48 h 后,移走塑料薄膜,清理样方表面枯枝落叶,以免其对实验结果产生影响,采用积水渗透方式[21],将 4 g/L 的 9.6 L 亮蓝溶液使用安装有喷头的恒流泵(保定齐力 BT100 - 02 型),以 24 h 累计降雨量 25 mm(当地大雨强度)的降雨强度均匀喷洒至样方内,历时 27 h,喷洒结束后,再次用塑料薄膜覆盖样方。再经过 24 h 后,移走塑料薄膜,避免边界影响,选取样方中央的50 cm ×50 cm 的正方形核心区(图 1),以 10 cm 高度为土层间隔,水平向下缓慢挖掘,直至染色消失(本研究草地为 60 cm 处,农地和果园为 50 cm 处),对所挖土壤水平剖面使用 1300 万像素的单反相机,配合灰阶比色卡进行拍摄。

2.4 图像处理

首先使用 ERDAS IMAGINE v9.2 软件对相机拍摄的土壤水平剖面染色原始图像进行几何校正,然后将校正后的图像,参照样地标尺,等比例裁剪为 50 cm ×50 cm 的图像,再经过光照校正,调整对比度、去色和调节阈值,转化为一个由黑色(像素值 0)和白色(像素值 255)组成的 500 像素 ×500 像素二元信息矩阵图像。由于处理后的黑白照片在转换过程中会产生噪点,因此需使用 Image ProPlus v6.0 软件中的膨胀和腐蚀功能对黑白图像进行图像形态学降噪处理[21]。

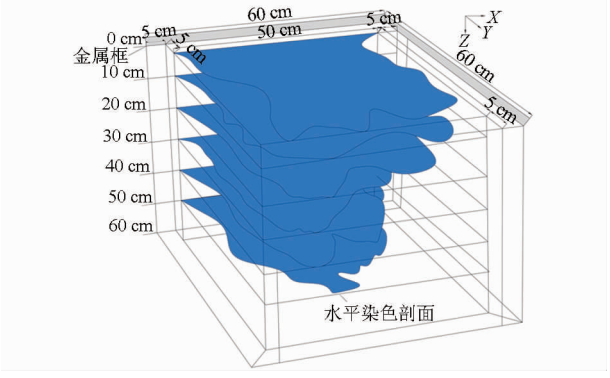

图 1 土壤剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the soil profile

2.5 土壤大孔隙提取

与土壤基质区的孔隙相比,土壤大孔隙只是一个相对的概念,众多研究者在当量孔径[22]、毛细势[23]、导水率[24]等方面界定了土壤大孔隙,然而,研究者发现根据土壤大孔隙的功能、作用来定义土壤大孔隙相比以上 3 种更为全面、客观,即无论土壤孔隙形状、大小如何,能够发生优先流(水分和溶质优先运移现象)运动的孔隙都称为土壤大孔隙。本研究中土壤水平剖面染色区即为土壤优先流区,将

降噪处理后的图像，通过使用 Image ProPlus v6.0 图像处理软件的形态学方法对染色图像进行形态学处理，提取出土壤大孔隙所占图像像元数量和重心坐标位置，并计算出面积、周长和孔径，根据孔径(D)的范围将大孔隙划分为 4 个等级：(0，1.0 mm)，[1.0 mm，2.5 mm)，[2.5 mm，5.0 mm)，[5.0 mm，∞)。

2.6　数据处理

2.6.1　大孔隙空间结构分析指标

研究者在对土壤大孔隙空间分布特征的长期研究过程中得出了一些分析指标，用以表征土壤大孔隙的空间分布特征。选取土壤孔隙变异度和复杂度这 2 个常用的分析指标对草地、农地和果园的土壤大孔隙结构特征进行定量描述，并与林分空间结构分析方法进行对比分析和验证。

(1) 土壤孔隙变异度

土壤孔隙变异度[25]为不同深度处的相对土壤水平剖面孔隙的变化程度，其值越大，说明土壤孔隙变异程度越大。本研究中土壤大孔隙随深度变化的变异程度计算公式为

$$P_k = \frac{n_k}{n_k + m_k} \times 100\% \tag{1}$$

$$V_{SVP} = \frac{2 \mid P_{k+l} - P_k \mid}{P_{k+l} + P_k} \tag{2}$$

式中　P_k——深度 k 处的土壤水平剖面大孔隙度，%

n_k——深度 k 处的土壤水平剖面大孔隙所占染色图像的像元总个数

m_k——深度 k 处的土壤水平剖面大孔隙以外的所有像元总个数

V_{SVP}——深度为 $k \sim (k+l)$ 土层的土壤大孔隙变异度

P_{k+l}——深度 $(k+l)$ 处的土壤水平剖面大孔隙度，%

l——土层间隔，取 10 cm

(2) 土壤孔隙复杂度

土壤孔隙复杂度[25]可以用孔隙的面积与周长之间的关系来定量评价，其值越大，说明孔隙复杂，扭曲程度越高。本研究中土壤大孔隙随深度变化的复杂度计算公式为

$$D_k = \frac{2\lg A}{\lg P} \tag{3}$$

式中　D_k——深度 k 处的土壤大孔隙复杂度

A——深度 k 处的土壤水平剖面大孔隙面积，mm^2

P——深度 k 处的土壤水平剖面大孔隙周长，mm

2.6.2　林分空间结构分析指标

(1) 角尺度

角尺度[19-20]定义了相临木围绕参照树(中心树)的均匀性，用以描述林木个体或种群在空间上的分布格局。角尺度是以参照树(中心树)为角点，任意2 株最近相临木之间形成的最小夹角 α 小于最近相邻木均匀分布时的标准夹角 α_0($\alpha_0 = 72°$)的个数占所考察的 4 个夹角的比例，公式为

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{4} z_{ij} \tag{4}$$

其中　$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & (\alpha < \alpha_0) \\ 0 & (\alpha \geqslant \alpha_0) \end{cases}$$

式中　i——参照树序号

W_i——第 i 株参照树的角尺度

z_{ij}——参数

当考虑参照树周围的 4 株相临木时，角尺度 W 取值分别为 0、0.25、0.50、0.75 和 1.00，这 5 个角尺度分别代表 4 株最近相临木相对于参照树呈很均匀、均匀、随机、聚集和高度聚集的分布状态。研究者常使用平均角尺度 $\overline{W}$ 来研究林木的空间格局分布，其值小于 0.475 为均匀分布，在[0.475，0.517]范围内为随机分布，大于 0.517 为聚集分布状态。

(2) 混交度

混交度[19-20]描述了树种的空间隔离程度，反映了林分树种组成和在空间分布上的复杂程度。混交度是表示最近相临木与参照树(中心树)不属于同一树种的个数所占 4 株相临木的比例，公式为

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{4} v_{ij} \tag{5}$$

其中　$$v_{ij} = \begin{cases} 0 & (i \text{ 和 } j \text{ 为同一树种}) \\ 1 & (i \text{ 和 } j \text{ 为不同树种}) \end{cases}$$

式中　M_i——第 i 株参照树的混交度

v_{ij}——参数

当考虑参照树周围的 4 株相临木时，混交度 M 取值分别为 0、0.25、0.50、0.75 和 1.00，这 5 个混交度分别代表 4 株最近相临木与参照树呈零度、弱度、中度、强度和极强度的混交状态。

(3) 大小比数

大小比数[19-20]描述了林木个体大小分化程度，表征了不同树种的生长优势程度。大小比数是表示最近相临木大于参照树(中心树)的个体数所占 4 株相临木的比例，公式为

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{4} k_{ij} \tag{6}$$

其中　$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \text{ 树某一指标小于 } j \text{ 树对应的指标}) \\ 0 & (i \text{ 树某一指标大于 } j \text{ 树对应的指标}) \end{cases}$$

式中 U_i——第 i 株参照树的大小比数

k_{ij}——参数

当考虑参照树周围的 4 株相临木时，大小比数 U 取值分别为 0、0.25、0.50、0.75 和 1.00，这 5 个大小比数分别代表参照树相对于 4 株最近相临木呈优势、亚优势、中庸、劣势和绝对劣势的生长状态。研究者常选定某一指标（胸径、树高等）下的平均大小比数 $\overline{U}$ 来描述树种的优势程度，其值越小，优势程度越高。

2.6.3 处理软件

使用 ERDAS IMAGINE v9.2 软件对染色图像进行校正、裁剪和黑白处理；Image ProPlus v6.0 软件对黑白图像进行图像形态学处理和土壤大孔隙提取；使用 Crancod v1.4 软件对土壤大孔隙空间结构进行分析；使用 Excel 2010 软件对实验数据进行统计，计算平均值、标准差和变异系数；使用 Sigma plot v12.5 软件制图；使用 SPSS v18.0 软件对同一土壤深度不同孔径范围对应的数据之间、同一孔径范围不同土壤深度对应的数据之间、同一土地利用类型不同孔径范围对应数据之间以及同一土地利用类型不同土壤深度对应数据之间均进行单因素方差分析，当其通过方差齐性检验时（$P>0.05$），则进行 Duncan 显著性检验；若其不能通过方差齐性检验（$P<0.05$），则进行 Tamhane's T2 显著性检验；本文所有图、表中，除图 6 中数据为平均值外，其余均为“平均值 ± 标准差”。

3 结果与分析

通过进行草地、农地和果园的野外亮蓝染色示踪实验，对应的土壤最大染色深度分别为 50、40、40 cm，在描述结果时，除土壤大孔隙位置分布密度图像只选择草地 1、农地 1 和果园 1 的位置数据外（其他样方与其对应样方 1 的位置密度图像相似），其余结果分析均选择 18 个样方总计 78 个土壤染色剖面的数据。

3.1 土壤大孔隙数量及位置特征

由于水分在活动流场的非均匀特性[5]，导致 0～10 cm土壤表层（基质流区）土壤染色面积达 95% 以上，无法提取出染色区域的土壤大孔隙，故本研究只分析 10、20、30、40、50 cm 土壤深度处对应的不同孔径的大孔隙。表 2 显示，草地土壤大孔隙总体高于农地和果园，这一结果不仅与植物和土壤生物等因素有关，还说明人为管理活动在一定程度上破坏了土壤大孔隙，特别是农地的耕作措施[3-4]。水平方向上，同一深度不同孔径范围的大孔隙数量由大到小表现为：草地孔径范围（0，1.0 mm）、[1.0 mm，2.5 mm）、[2.5 mm，5.0 mm）、[5.0 mm，∞），农地和园地孔径范围[1.0 mm，2.5 mm）、[2.5 mm，5.0 mm）、（0，1.0 mm）、[5.0 mm，∞）；竖直方向上，草地、农地和果园的大孔隙总数以及不同孔径的大孔隙数量均随土壤深度的增加而降低，表层大孔隙的数量显著大于深层，是其 2～17 倍，说明了土壤大孔隙数量随土壤深度增加而降低这一规律[3,17]。

表 2 不同孔径土壤大孔隙数量

Tab.2 Number of soil macropores with different diameters

类型	土壤深度/cm	孔径/mm			
		(0,1.0)	[1.0,2.5)	[2.5,5.0)	[5.0,∞)
草地	10	587 ± 60.25	388 ± 61.50	280 ± 36.50	197 ± 77.50
	20	604 ± 54.32	355 ± 52.50	250 ± 25.35	172 ± 23.42
	30	421 ± 63.77	251 ± 51.50	201 ± 29.34	111 ± 29.00
	40	293 ± 48.00	210 ± 45.43	118 ± 11.50	63 ± 13.65
	50	240 ± 26.34	61 ± 15.50	32 ± 6.00	12 ± 5.50
农地	10	316 ± 38.48	541 ± 54.39	351 ± 34.83	82 ± 14.45
	20	215 ± 28.55	355 ± 17.65	230 ± 26.07	67 ± 27.50
	30	206 ± 37.32	230 ± 12.72	170 ± 21.63	37 ± 14.00
	40	106 ± 12.44	144 ± 8.50	115 ± 4.55	13 ± 3.34
果园	10	333 ± 54.32	545 ± 50.50	395 ± 46.34	67 ± 17.56
	20	243 ± 32.35	515 ± 67.43	322 ± 62.49	63 ± 14.92
	30	142 ± 21.62	224 ± 24.62	185 ± 24.38	32 ± 11.34
	40	105 ± 6.75	166 ± 23.50	116 ± 12.00	12 ± 5.35

将 3 种土地利用类型不同土壤深度处同一孔径范围的土壤大孔隙分布位置进行叠加，得到不同孔径土壤大孔隙的位置分布密度图（图 2）。当大孔隙大量聚集、重叠出现在某一区域或位置时，密度图像颜色最为明显，呈红色（数值为 5），此区域反映了该孔径范围下的大孔隙在 10～50 cm 土层中所形成的

土壤优先路径较其他区域具有高度连通性，草地孔径范围[5.0 mm，∞）的大孔隙在 10～50 cm 土层中所形成的土壤优先路径连通性最高，其次为孔径范围[2.5 mm，5.0 mm）和[1.0 mm，2.5 mm）的大孔隙，相比以上 3 个孔径范围的大孔隙，孔径（0，1.0 mm）的大孔隙连通性最差，而农地和果园在 10～40 cm 土层中大孔隙的连通程度具有一致性，即连通性最高的大孔隙范围为[1.0 mm，2.5 mm），其次为孔径范围[2.5 mm，5.0 mm）的大孔隙，然后为孔径范围（0，1.0 mm）的大孔隙，而[5.0 mm，∞）的大孔隙连通性最差。主要原因是根系和土壤动物[11,16]形成的大孔隙显著影响了其对应孔径范围的优先路径的连通性，草地植被的根径主要集中在 2.0～3.0 mm，且在野外实验过程中发现草地都存在有开启程度较高的蚯蚓孔洞（表 1），而农地和果园的植物根径主要集中在 1.0～2.5 mm 之间，同时蚯蚓孔洞的数量以及土层贯穿深度均较草地小，连通性也间接地表征了该孔径范围的优先路径的发育程度和导水性能，同时农地和果园都存在人为管理活动[11]，这些活动在一定程度上破坏了土壤原有的大孔隙结构，降低了大孔隙所组成的优先路径的连通性。3 种不同土地利用类型的不同孔径下的优先路径发育程度由大到小表现为：草地孔径范围[5.0 mm，∞），[2.5 mm，5.0 mm），[1.0 mm，2.5 mm），（0，1.0 mm），农地和果园孔径范围[1.0 mm，2.5 mm），[2.5 mm，5.0 mm），（0，1.0 mm），[5.0 mm，∞）；优先路径总体发育程度由大到小表现为：草地、果园、农地。

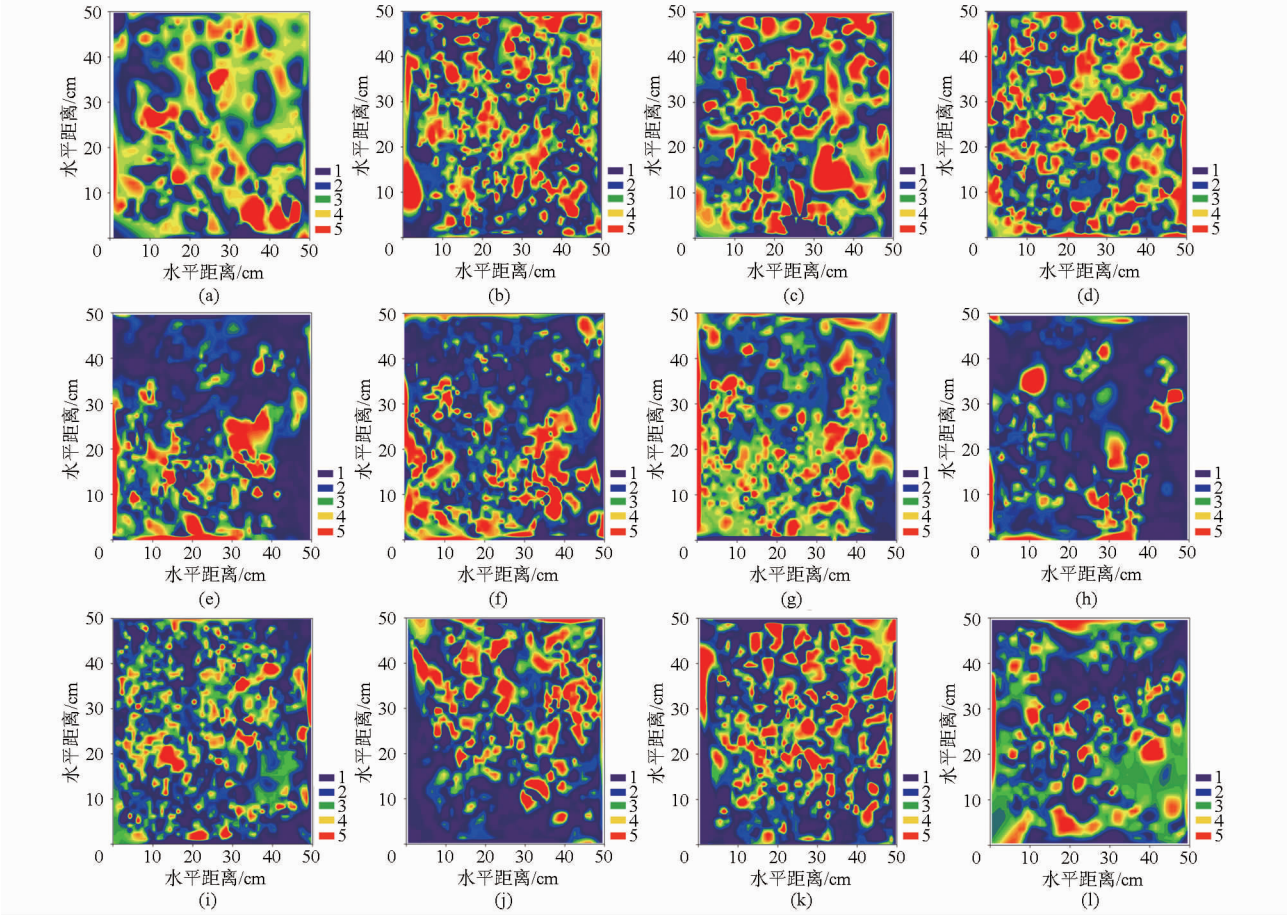

图 2　不同土地利用类型的不同孔径土壤大孔隙位置分布密度图

Fig. 2　Distribution density images of soil macropores with different diameters of different land use types

（a）草地（0，1.0 mm）　（b）草地[1.0 mm，2.5 mm）　（c）草地[2.5 mm，5.0 mm）　（d）草地[5.0 mm，∞）
（e）农地（0，1.0 mm）　（f）农地[1.0 mm，2.5 mm）　（g）农地[2.5 mm，5.0 mm）　（h）农地[5.0 mm，∞）
（i）果园（0，1.0 mm）　（j）果园[1.0 mm，2.5 mm）　（k）果园[2.5 mm，5.0 mm）　（l）果园[5.0 mm，∞）

3.2　土壤大孔隙空间结构特征

3.2.1　土壤大孔隙变异度和复杂度

通过分析土壤大孔隙在不同土层深度的变异度，揭示大孔隙空间结构分布上的总体变化程度。由图 3 得出，对于同一土层、不同孔径的大孔隙变异度之间对比发现，草地孔径范围（0，1.0 mm）较其他孔径的大孔隙变异度差异显著（$P<0.05$），其余孔径变异度之间差异不显著，随着土壤深度的增加，总体上孔径之间差异性表现相一致；而农地、果园则表现为孔径范围（0，1.0 mm）和[5.0 mm，∞）的大孔

隙变异度之间差异不显著,与孔径[1.0 mm,2.5 mm)和孔径[2.5 mm,5.0 mm)之间差异显著,主要由于农地和果园存在人为管理活动,在一定程度上破坏了土壤中已形成的大孔隙,通过调查发现,在经济作物生长时期,根系主要集中在1.5~3.5 mm之间,促成了该孔径范围的大孔隙形成;对于同一孔径范围,不同土层深度的大孔隙变异度对比发现,不同土层间变异度差异显著,在相同孔径范围下,变异度与土壤深度呈正比关系,说明了大孔隙在土壤中具有高度的复杂性,变化程度高。

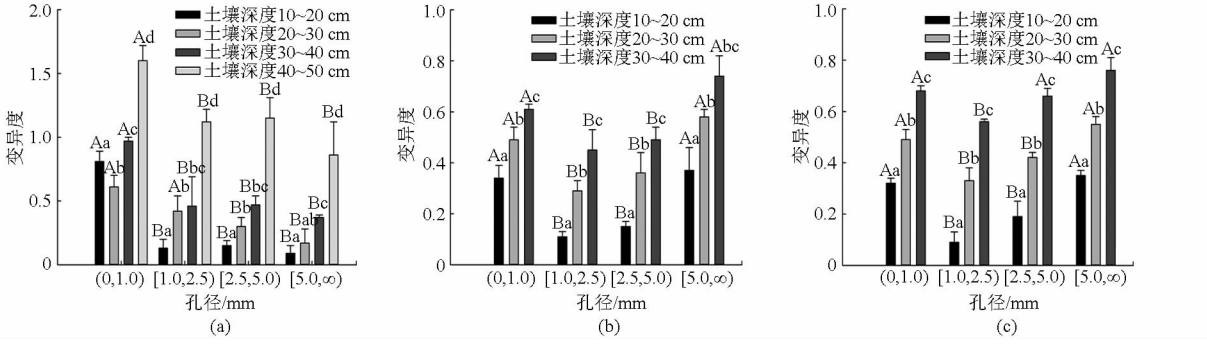

图 3 不同孔径土壤大孔隙变异度随土层变化特征

Fig. 3 Characteristics of soil macropores variability of different diameters with increasing soil depth

(a) 草地 (b) 农地 (c) 果园

表 3 显示,草地不同孔径范围的大孔隙变异度由大到小为:(0,1.0 mm)、[1.0 mm,2.5 mm)、[2.5 mm,5.0 mm)、[5.0 mm,∞),而农地和果园不同孔径范围的土壤大孔隙变异度由大到小为:[5.0 mm,∞)、(0,1.0 mm)、[2.5 mm,5.0 mm)、[1.0 mm,2.5 mm)。草地孔径范围(0,1.0 mm)、农地和果园孔径范围[5.0 mm,∞)的大孔隙随土壤深度的变化最大,其空间结构最复杂,分别相对于草地孔径范围[5.0 mm,∞)的大孔隙,以及农地和果园孔径范围[1.0 mm,2.5 mm)在 10~50 cm 土壤空间的结构分布变化程度、差异显著、复杂性最大。变异度不仅可以反映大孔隙在土壤空间上的变化程度,还描述了大孔隙的连通性,即大孔隙空间变化越小,上下土层空间的大孔隙形状、面积越接近,结构变化程度低,其大孔隙变异度低,越容易形成优先路径,其相应孔径的优先路径发育程度越高。由表 3 的变异度得出了同一孔径范围下草地的不同土壤大孔隙形成的发育程度由大到小表现为:草地孔径范围[5.0 mm,∞)、[2.5 mm,5.0 mm)、[1.0 mm,2.5 mm)、(0,1.0 mm),农地和果园孔径范围[1.0 mm,2.5 mm)、[2.5 mm,5.0 mm)、(0,1.0 mm)、[5.0 mm,∞)。

研究显示,土壤孔隙数量随土壤深度的增加而降低[25],其可以作为一个指标来反映土壤深度的变化,大孔隙变异度与土壤深度之间在一定程度上间接地反映了变异度与大孔隙度之间的关系。如草地随土壤深度(10、20、30、40、50 cm)的变化对应的平均大孔隙度分别为:47.36%、24.56%、21.48%、9.77%、1.64%,而 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 土层对应的平均大孔隙变异度分别为 0.30、0.38、0.57、1.18,农地和果园也具有相一致的变化规律。以上表明随土壤深度的增加,土壤大孔隙度降低,变异度增加,两者之间存在明显的反向关系,这也进一步说明土壤是空间变异性较高的介质[4]。

表 3 不同孔径土壤大孔隙变异度

Tab. 3 Variability of soil macropores with different diameters

类型	孔径/mm			
	(0, 1.0)	[1.0, 2.5)	[2.5, 5.0)	[5.0, ∞)
草地	1.00 ± 0.10^{a}	0.53 ± 0.15^{b}	0.49 ± 0.09^{bc}	0.38 ± 0.12^{c}
农地	0.47 ± 0.09^{a}	0.28 ± 0.06^{b}	0.33 ± 0.05^{b}	0.56 ± 0.04^{a}
果园	0.48 ± 0.02^{a}	0.33 ± 0.05^{b}	0.38 ± 0.02^{b}	0.57 ± 0.09^{ac}

土壤大孔隙复杂度揭示了空间大孔隙的扭曲程度,反映了大孔隙形状的复杂性。本研究为同一土壤深度的水平剖面染色图像中所有大孔隙的复杂度,不具体涉及图像中单一大孔隙。图 4 显示,草地、农地和果园的大孔隙复杂度随土壤深度呈锯齿状变化,总体上呈降低趋势,最大大孔隙复杂度均出现在土壤表层,草地、农地和果园表层复杂度分别为 1.812、1.867 和 1.832,最大土壤深度的复杂度分别为 1.709、1.797 和 1.724,虽然土壤较深处土壤大孔隙度低、大孔隙数量和孔隙所占面积少,但整个土层总体上扭曲度高,且大孔隙复杂度均在 1.700 以上,大孔隙的形状复杂[25]。同时,由土壤表层至深层,不同样地之间的土壤大孔隙复杂度由大到小表现为:农地、果园、草地,间接反映农地土壤大孔隙空间复杂程度最高,即扭曲程度高、大孔隙形状最复杂,草地最低,这主要是由于土壤在耕作措施的扰动下,

农地和果园的土壤中原有的联通大孔隙结构被破坏，形成支离破碎的孔隙结构，相对于未受扰动的草地，大孔隙结构变复杂，且农地人为活动又多于果园，反之，根系发育深、动物活动程度高都会促进上下层土壤空间形成高连通的大孔隙结构，大孔隙空间结构较扰动的土壤复杂程度低，且易于水流的快速运移。

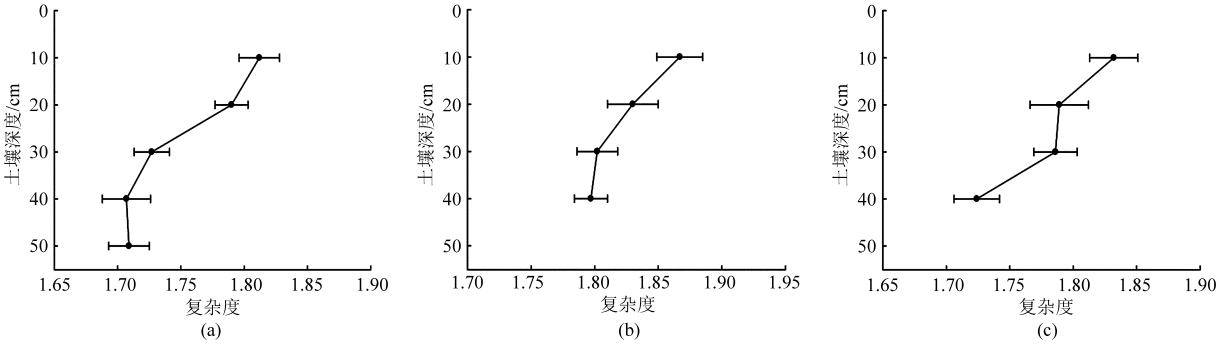

图 4　不同土壤深度土壤大孔隙复杂度

Fig. 4　Complexity of soil macropores at different depths

（a）草地　（b）农地　（c）果园

3.2.2　土壤大孔隙角尺度

通过定量统计分析不同土壤深度处的大孔隙平均角尺度，用以描述大孔隙的空间分布格局。图 5 所示，草地、农地和果园的平均角尺度均大于 0.517，说明各样地的大孔隙空间分布呈聚集状态，但聚集程度存在一定差异。对于同一土壤深度，不同孔径之间的大孔隙平均角尺度总体上差异不显著，无明显变化规律；但对于同一孔径，不同土壤深度之间的大孔隙平均角尺度，表现为土壤表层 0 ~ 20 cm 差异不显著，20 ~ 50 cm 土壤深度之间差异显著（$P < 0.05$），随土壤深度的增加，差异越明显，虽然大孔隙平均角尺度随土壤深度的增加呈现波浪变化，但总体上表现增大趋势，以上结果均表征了相同孔径范围下的大孔隙空间分布格局随土壤深度的增加，呈逐渐聚集状态分布，表层大孔隙分布相对深层更均匀。

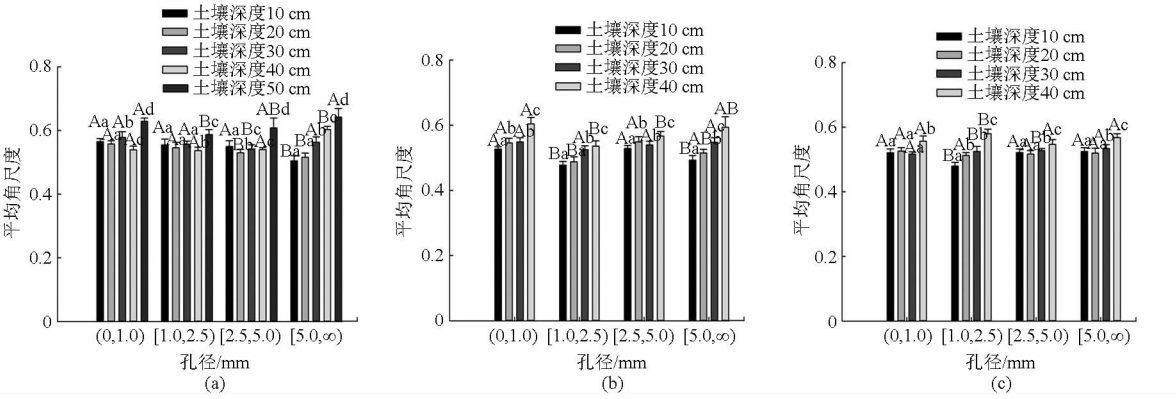

图 5　不同孔径土壤大孔隙平均角尺度随土壤深度变化特征

Fig. 5　Characteristics of soil macropores mean uniform angle index of different diameters with increasing soil depth

（a）草地　（b）农地　（c）果园

将同一土壤深度处的全部大孔隙平均角尺度分别进行统计分析，结果如表 4 所示，草地、农地和果园 10 cm 和 20 cm 土壤深度的大孔隙平均角尺度 $\overline{W}$ 为 0.489 ~ 0.513，即土壤表层的大孔隙呈均匀状态分布，而 30、40、50 cm 的大孔隙平均角尺度均大于 0.517，呈聚集状态分布，土壤表层与土壤深层之间的大孔隙平均角尺度差异显著（$P < 0.05$），表现为沿土壤深度的方向上，大孔隙空间分布形式为逐渐聚集状态，与同一孔径范围下的平均角尺度随土壤深度变化规律相一致（图 5），其主要原因为表层植物根系分布相对均匀，导致以土壤腐殖质、植物根系等物质为生的土壤动物生存活动空间也相对均匀，随土壤深度的逐渐增加，植物根系数量减少，土壤动物活动空间变小，根系和土壤动物形成的大孔隙相对于土壤上一层表现为显著的聚集分布状态，这与 Lou 等[17] 通过分析土壤生物对大孔隙的影响所得研究结果相一致。同时，人为活动等外界影响在一定程度上也促使表层土壤孔隙更加均质化。

表 4 不同土壤深度土壤大孔隙的平均角尺度

Tab. 4 Mean uniform angle index of soil macropores with different soil depths

土壤深度/cm	类型		
	草地	农地	果园
10	0.503 ± 0.009[a]	0.506 ± 0.004[a]	0.489 ± 0.013[a]
20	0.507 ± 0.007[a]	0.512 ± 0.009[a]	0.513 ± 0.011[b]
30	0.519 ± 0.005[b]	0.532 ± 0.012[b]	0.538 ± 0.008[c]
40	0.527 ± 0.010[c]	0.578 ± 0.014[c]	0.560 ± 0.018[d]
50	0.577 ± 0.025[d]		

3.2.3 土壤大孔隙混交度

土壤大孔隙的混交度反映了在同一空间上不同大孔隙的隔离程度,定量分析并描述了不同大孔隙的复杂性。图 6 显示,同一土壤深度,沿混交度变化的方向(M = 0.00 ~ 1.00),分布频数总体上表现为先增大后降低的趋势,波峰出现在 M = 0.75(强度混交)的混交度上,说明 3 种土地利用类型不同深度的土壤大孔隙空间分布结构均较复杂。草地、农地和果园的混交度 0、0.25、0.50、0.75 和 1.00 对应的分布频数主要处于混交度 0.50 ~ 1.00 之间,其中草地、农地和果园的土壤大孔隙混交度分布频数的 50.60%、55.88% 和 52.50% 都集中在混交度为 0.75 ~ 1.00(强度和极强度混交状态),最大分布频数 0.345、0.400 和 0.340 对应的土壤大孔隙混交度均为 0.75,3 种土地利用类型的土壤大孔隙空间结构复杂程度虽然均相对较高,但 3 者之间的复杂程度也有所差异,表现为农地的复杂程度最高,果园次之,最低的为果园,复杂程度越高反映了大孔隙构成的优先路径空间网络结构越错综复杂,这就导致入渗水流不能快速通过这些路径,不宜发生水流快速运移现象,即优先流程度较低。

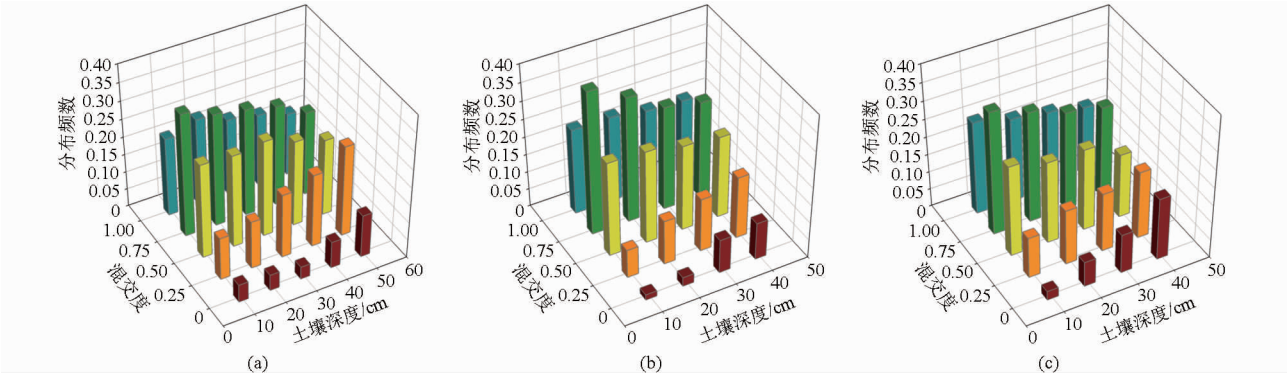

图 6 不同土壤深度土壤大孔隙混交度分布频数图

Fig. 6 Distribution frequency images of soil macropores mingling at different depths

(a) 草地 (b) 农地 (c) 果园

混交度不仅表征了土壤大孔隙的空间复杂程度,而且从侧面也揭示了土壤大孔隙的空间分布格局,其值越小,说明土壤大孔隙混交度低,多为相同范围或相同孔径的大孔隙,整个空间孔径组成、结构单一,在空间上多呈聚集分布状态,这有利于同一孔径范围土壤大孔隙形成优先路径[22,26]。图 6 显示,随着土壤深度的增加,混交度 M 为 0.50 ~ 1.00 对应的分布频数呈下降趋势,相反,混交度 M 为 0(零度混交状态)和 0.25(弱度混交状态)的分布频数呈上升趋势,说明土壤深层的大孔隙较上一层土壤分布更聚集,组成逐渐单一。通过对所有样地的土壤大孔隙混交度的分布频数沿土壤深度的变化程度,即变异系数进行统计分析(表 5),得出同一土地利用类型下,不同混交度对应的分布频数的变异系数之间差异显著(P < 0.05),总体表现为零度和弱度混交与中度、强度以及极强度混交之间差异显著,M 为 0、0.25 的变异系数均大于 M 为 0.50、0.75 和 1.00 的变异系数,这符合混交状态之间存在差异的基本规律;而不同土地利用类型下,同一混交度对应的分布频数的变异系数之间也差异显著(P < 0.05),沿土壤深度方向,草地的 M 为 0.00、0.25 的变异系数均大于农地和果园,变化程度分别是农地和果园的 1.50、1.19 倍和 1.42、1.09 倍,说明草地较农地和果园沿土壤深度大孔隙的组成趋于单一、空间分布趋于聚集状态,较农地和果园易于形成优先路径,间接表征所形成的土壤优先路径的发育程度由大到小为:草地、果园、农地。这与上文对大孔隙分布密度特征以及土壤大孔隙角尺度的分析,所得的 3 种土地利用类型优先路径发育程度和大孔隙随土壤深度的增加呈聚集分布趋势的结果相一致,也进一步解释了优先流发育程度和发生这种分布状态的原因。

3.2.4 土壤大孔隙大小比数

不同土壤大孔隙的分化程度可以用其大小比数来描述,大小比数越小,说明对应孔径的土壤大孔隙优势程度(发育程度)越高。本研究以土壤大孔隙的孔径作为比较指标,分析 3 种土地利用类型的不同土壤深度下不同孔径范围的土壤大孔隙的平均大

表 5　土壤大孔隙混交度变异系数

Tab. 5　Coefficient of variation of soil macropores with different soil depths

类型	混交度				
	0	0.25	0.50	0.75	1.00
草地	0.667 ± 0.036^{Aa}	0.290 ± 0.050^{Ab}	0.127 ± 0.028^{Ac}	0.129 ± 0.038^{Ac}	0.121 ± 0.025^{Ac}
农地	0.446 ± 0.036^{Ba}	0.204 ± 0.023^{Bb}	0.071 ± 0.018^{Bc}	0.163 ± 0.053^{Bb}	0.064 ± 0.015^{Bbc}
果园	0.561 ± 0.050^{Ca}	0.265 ± 0.035^{Cb}	0.089 ± 0.012^{Bc}	0.118 ± 0.035^{Cd}	0.064 ± 0.015^{Bcd}

小比数，其分析结果如图 7 所示，在同一孔径范围下，草地、农地和果园的平均大小比数沿土壤深度方向呈锯齿状变化，虽无一定规律性，但总体趋于增大，说明深层土壤空间的不同大孔隙优势程度降低，组成趋于孔径范围一致性，且呈聚集分布状态；同一土壤深度下，不同孔径范围的大孔隙平均大小比数之间总体上差异显著（$P < 0.05$），说明不同孔径范围的大孔隙之间存在显著差异，通过比较发现，草地的不同孔径范围的土壤大孔隙平均大小比数由大到小为：(0，1.0 mm)、[1.0 mm，2.5 mm)、[2.5 mm，5.0 mm)、[5.0 mm，∞)，农地和果园的不同孔径范围的土壤大孔隙平均大小比数由大到小为：[5.0 mm，∞)、(0，1.0 mm)、[2.5 mm，5.0 mm)、[1.0 mm，2.5 mm)，以上结果表明，土壤深层空间大孔隙组成多样性降低，土壤大孔隙的优势程度总体上随土壤深度的增加而降低，其大孔隙所形成的优先路径的发育程度和连通性也逐渐降低，可以解释土壤优先流发育程度随土壤深度的增加而降低这一现象[24,27]。

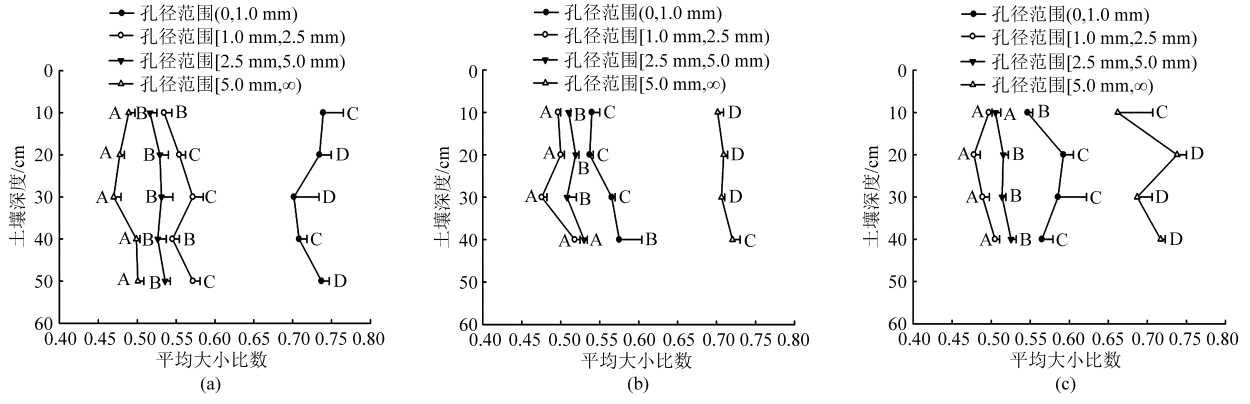

图 7　不同土壤深度土壤大孔隙平均大小比数

Fig. 7　Mean dominance of soil macropores at different depths

(a) 草地　(b) 农地　(c) 果园

4　讨论

4.1　方法准确性分析

林分空间结构分析方法是利用生态学的方法分析土壤大孔隙的空间结构特征，因此，从生物活动影响大孔隙的空间结构角度可以在一定程度上解释本研究所得的结果。通过现场调查发现，草地未受任何扰动，而农地和果园均有人为管理活动的存在，且农地的人为管理活动要多于果园。大量研究发现[11,17,28]，耕作等人为活动在一定程度上破坏了原有土壤的大孔隙及其所形成的优先路径，因此，在相同区域内同一土地利用类型下，未受扰动的土壤大孔隙数量要大于扰动土壤的大孔隙数量，且未受扰动的土壤大孔隙形成的优先路径空间网络复杂度低、连通程度高。虽然人为管理活动破坏了一部分大孔隙，但表层土壤孔隙数量仍然大于深层土壤[28]，这就表现为土壤大孔隙数量随土壤深度的增加而降低的现象。同时，在有地表植被的条件下，土壤生物活动（根系和土壤动物）显著影响土壤大孔隙的空间分布[29-31]。本研究中，通过调查发现，3 种土地利用类型中草地地表植被覆盖最多达 95%，其次为农地，最后为果园，且草地根长密度也最大，为 5.23 mm/cm^3，草地的生物活动平均最深达 47 cm，而农地和果园分别为 35 cm 和 40 cm。3 种土地利用类型土壤生物主要以蚯蚓为主，孔洞连通性高，草地蚯蚓洞最多且为 15 ~ 30 个/m^2，其次为果园和农地，3 种土地利用类型土壤中的蚯蚓孔洞贯穿深度均接近染色最大深度，且研究表明土壤动物活动多以集群聚集状态分布[29,31]，同时在实验过程中发现，样地植被根系多垂直向下，上部细小的旁侧根系相对较多，呈分散生长，而下部分支较少，根系多呈局促状生长，因此在有根系、土壤生物活动较多的土壤中，沿土壤深度方向土壤生物活动形成的大孔隙空间分布状况多以聚集状态形式。通过以上分

析,可以对本研究所得结果进行解释,同时说明林分空间结构分析方法可以准确地从生态学角度分析出土壤大孔隙的空间结构特征。

同时,林分空间结构分析方法与本文采用的土壤大孔隙的位置密度分布、大孔隙变异度和复杂度研究指标相比,所得结果具有一致性,不仅可以详细地分析大孔隙空间结构特征,还具有解释作用的优点,对土壤大孔隙的位置密度图、大孔隙变异度和复杂度所得结果进行了分析解释。同时,林分空间结构分析方法的 3 个指标之间也进行了一定的互补与解释。角尺度不仅能描述单一孔径的大孔隙空间分布状态,也可以描述不同土壤深度全部大孔隙的空间分布格局,但存在对土壤大孔隙空间结构的复杂性和连通性描述不足的缺点,混交度可以弥补角尺度分析指标这一缺点,详细地描述所有大孔隙个体在整个空间上的结构状况,但对单一孔径或某孔径范围的大孔隙沿土壤深度方向上连通情况描述不足。土壤大小比数分析指标可以由整体到局部,进一步细化描述某一孔径或孔径范围下的大孔隙在土壤空间里的连通情况以及发育程度,补充了角尺度和混交度从整体上分析大孔隙结构特征的不足。通过大小比数所得结果不仅说明了某一孔径大孔隙在土壤空间上的优势度,也反映了其形成的优先路径具有的较高发育程度和快速导水性能。大小比数在一定程度上也解释了植物根系和土壤动物活动显著影响大孔隙的分布和孔隙连通性这一现象[29-31]。

综上所述,林分空间结构分析方法可以准确的对土壤大孔隙空间结构特征进行分析,并且在分析的过程中只有将角尺度、混交度和大小比数 3 个分析指标进行综合分析,才能更全面、更准确地描述土壤大孔隙空间结构特征。

4.2 方法适用性分析

林分空间结构分析方法最初主要用于林木的生长、空间分布和抚育管理等[19,20]研究上,本文将该方法引入到了土壤大孔隙空间结构分布的研究里,通过与土壤大孔隙的位置密度分布、大孔隙变异度和复杂度 3 个指标进行对比分析,验证了该方法所得结果的准确性,同时,将其与以往研究者对土壤大孔隙空间结构研究所用方法进行比较,在验证其准确性的基础上,进一步分析该方法的适用性及优缺性。

应用林分空间结构分析方法得到的大孔隙空间结构随土壤加深大孔隙的大小差异和离散程度均减小,且大孔隙呈聚集分布状态,均与 Hu 等[16]、冯杰等[16,32]采用 CT 扫描草地和农地的原状土柱相一致,说明该方法所得结果是合理的、可信的。相比林分空间结构分析方法,虽然 CT 扫描法可以清晰、直观地观察出全部大孔隙及其所形成的优先路径的空间结构形式,及其连通程度,分析精度较高,但缺少对全部或单一孔径大孔隙及其所形成的优先路径空间分布状态(聚集分布、随机分布和均匀分布)、复杂程度和孔隙组成的定量描述功能,以及不能对其所形成的空间分布状态原因进行分析,这就增加了后续数据处理所用的时间和复杂性,同时受扫描仪器的技术规格限制,所研究对象均为土柱,研究尺度较小,若想得到某一区域的大孔隙结构特征,需进行多次样点采集分析,且土壤样多受土柱壁的挤压,对大孔隙结构的真实性造成一定影响,且扫描处理费用较高。林分空间结构分析虽然不能直观地展现大孔隙及其所形成的优先路径的空间结构图像,且本研究基于的染色示踪实验只能在野外进行,易受野外降雨等实验条件影响,分析精度较 CT 扫描低,但通过空间大孔隙位置,计算角尺度指标可直接分析得出不同孔径的大孔隙及其形成的优先路径其空间分布状态,快速便捷,且混交度的结果随土壤空间的变化,也描述了大孔隙的空间复杂程度以及孔隙构成,大小比数也从侧面间接地解释其形成这种分布状态的原因,即孔隙组成多样性降低,优势程度降低,趋于单一集群结构,这是 CT 扫描法所不具备的。

Abou Najm 等[11]采用树脂填充法,对不同耕作处理的农地进行了大孔隙空间结构分析,所得树脂模型直观表现出受人为耕作措施影响下的土壤表层大孔隙结构较未受扰动的土壤复杂,呈海绵状分布,与本文通过混交度指标分析得出的结论相一致。虽然利用树脂填充可以直观可视土壤大孔隙及其所形成优先路径的连通状态,特别是网络复杂的样地,后期也可重复处理树脂模型,但在取样时会破坏土壤孔隙结构,树脂硬化过快导致部分孔隙不能完全填满,同时树脂溶液填充孔隙的深度和面积是有限的,这对所研究样地的大孔隙结构特征的描述会产生一定偏差。而本研究所用的林分空间结构分析方法,是在染色示踪实验的基础上,亮蓝示踪剂水溶性好、稳定性高、吸附性低、易于观察,其溶液能快速通过土壤的全部大孔隙及其形成的优先路径,可以描述所有大孔隙的特征,结果误差相对树脂填充较小。本研究虽然不能直观可视土壤大孔隙空间结构,实验过程不可重复,但通过林分空间结构分析的混交度和大小比数指标,本研究快速定量分析了土壤大孔隙的孔隙结构组成和发育程度,揭示了不同孔径大孔隙的发育程度及其所对应的优先流发生程度,这是树脂填充分析法所不具备的,且无需通过对树

脂切片进行扫描后结合分形维数获得大孔隙的特征参数[10]，或对塑性树脂孔隙结构进行浸水量测体积处理[11]，减少了数据处理分析过程。因此，本研究所用方法所得结果准确和便捷程度均较树脂填充法高。

田香姣等[8]利用单一的染色示踪方法，通过染色面积比、染色深度等指标分析得出三峡库区草地的优先流发育程度大于农地，虽然结论与本研究相一致，但其只能描述样地整体优先流发育情况，缺少对单一大孔隙或优先路径发育程度的描述能力。虽然其还对垂直染色图像进行了优先路径提取，以分析土壤优先路径分布特征，但得出土壤剖面优先路径数为 2 ~ 65 个/m^2，小于本文研究结果，这主要因为对染色剖面的优先路径的统计是通过染色节点方式提取的，对于优先路径集中分布区无法全部提取，这势必会造成土壤优先路径数量上的不准确。吕文星等[9]在染色示踪实验的基础上，结合张力渗透仪，利用水分穿透曲线分析了三峡库区农地、荒地和果园的土壤大孔隙空间结构特征，得到农地和果园 2 种土地利用类型的优先流发育程度、大孔隙分布特征与本研究相一致的结论，如果园大孔隙数量主要集中分布在孔径 0.6 ~ 3.4 mm 的大孔隙，本研究集中分布在 0 ~ 5.0 mm 之间，具有一定的相似性，但对应的大孔隙数量，是本研究的 2.8 ~ 3.4 倍，主要原因是张力渗透仪结合土壤水分穿透曲线分析所得大孔隙数量、孔径特征参数需要采用 Poiseuille 公式进行计算，需对大孔隙进行圆形假设，且渗透水流为层流，采用毛管理论确定大孔隙孔径和数量，所得结果与实际情况存在一定出入，而本研究虽然也通过染色示踪实验，但采用形态学分水岭、降噪处理等技术，提取出的大孔隙为实际土壤中不同形状的大孔隙，不进行孔隙形状假设，相比以往研究者所得大孔隙孔径范围、数量等数据上更接近实际，误差相对较小，同时结合林分空间结构分析方法，可以快速描述大孔隙空间结构，同时还得到不同孔径优先路径对应的水分传导能力，这是张力渗透仪和土壤水分穿透曲线分析所不具备的。

本文所采用的林分空间结构分析方法，是在染色示踪的基础上，应用图像形态学处理技术，结合生态学来分析土壤大孔隙的空间结构特征，相比以上方法具有研究尺度大、操作简便、花费少、数据处理相对容易，并可以使用计算机在野外快速获得土壤大孔隙空间结构的优点，同时角尺度、混交度和大小比数 3 个分析指标可以从生态学的角度解释大孔隙结构内部分布形成原因，弥补传统的物理化学方法（CT 扫描法、张力渗透仪法、穿透曲线法、染色示踪法和树脂填充法）在孔隙结构理论分析的不足。但该方法也存在一定不足，主要表现为不能直观可视化土壤大孔隙的空间结构状况，用于野外实验，且受图像分辨率的限制，在一定程度上不能完全获取相对较小（孔径单位小于毫米）的土壤大孔隙，如不能应用到土柱等相对较小尺度的大孔隙的研究中，同时，本研究受开挖精度的限制，只能表征厘米级深度的不同土壤深度之间的土壤大孔隙结构分布状况。因此，该方法并不能取代 CT 扫描等现有的研究方法，只是对以往研究方法的对比分析与补充，是从生态学的角度，全面、详细地定量分析了土壤大孔隙的空间结构特征。建议今后研究者可以将 CT 扫描技术与该分析方法结合，通过小尺度扫描图像，从更小的微观尺度来描述土壤大孔隙空间结构特征，扩大该方法的使用范围。

综上所述，经林分空间结构分析方法所得的结论与以往研究者对草地、农地和果园的大孔隙分布特征所得研究结果相一致，进一步说明了该法的准确性，同时，与其他研究方法相比，表明该方法也适用于土壤大孔隙空间结构的研究。

5　结束语

本研究将林分空间结构分析方法引入到土壤大孔隙空间结构的量化研究上，通过对三峡库区紫色砂岩区的草地、农地和果园 3 种典型土地利用类型的土壤大孔隙角尺度、混交度和大小比数 3 个指标进行分析，与土壤大孔隙位置分布密度分布、变异度和复杂度的结果进行对比，并将该方法与以往研究者所选用的不同方法对草地、农地和果园的土壤大孔隙空间结构的研究结果进行比较分析，结果均一致，证明该方法可以应用于土壤大孔隙空间结构的研究，从生态学分析角度弥补了目前定量分析土壤大孔隙空间结构方面的不足，进一步完善了大孔隙空间结构特征的研究方法。

参　考　文　献

1　Helling C S, Gish T J. Physical and chemical processes affecting preferential flow[C]//Proceedings of the National Symposium on Preferential Flow, 1991: 77 - 86.

2　Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398(3 - 4): 191 - 201.

3　Zhang Z B, Zhou H, Zhao Q G, et al. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow[J].

Geoderma, 2014, 228(SI): 114 - 121.
4 Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1 - 2): 3 - 22.
5 Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(3): 523 - 546.
6 王贤,张洪江,吕相海,等.基于 CoupModel 的三峡库区典型农林地水量平衡模拟[J].农业机械学报, 2014, 45(6): 140 - 149.
Wang Xian, Zhang Hongjiang, Lü Xianghai, et al. Water balance models of typical forestland and farmland in three gorges reservoir area with CoupModel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 140 - 149. (in Chinese)
7 Weiler M, Fluhler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils[J]. Geoderma, 2004, 120(1): 137 - 153.
8 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)
9 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.
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. (in Chinese)
10 周明耀,余长洪,钱晓晴.基于孔隙分形维数的土壤大孔隙流水力特征参数研究[J].水科学进展,2006,17(4):466 - 470.
Zhou Mingyao, Yu Changhong, Qian Xiaoqing. Hydraulic characteristic parameters of macrospore flow based on spacing fractal dimension[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4):466 - 470. (in Chinese)
11 Abou Najm M R, Jabro J D, Iversen W M, et al. New method for the characterization of three-dimensional preferential flow paths in the field[J]. Water Resources Research, 2010, 46(2): W02503.
12 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山典型植被下土壤大孔特征[J].应用生态学报, 2007, 18(12): 2675 - 2680.
Shi Zhongjie, Wang Yanhui, Xu Lihong, et al. Soil macropore characteristics under typical vegetations in Liupan Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2675 - 2680. (in Chiense)
13 孙龙,程金花,张洪江,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): 75 - 79.
Sun Long, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, et al. Relationship between soil macropore and preferential flow in citrus garden[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 75 - 79. (in Chinese)
14 Kaestner A, Lehmann E, Stampanoni M. Imaging and image processing in porous media research[J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(9): 1174 - 1187.
15 Perret J, Prasher S O, Kantzas A, et al. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6): 1530 - 1543.
16 Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China[J]. Soil Tillage Research, 2015, 150:1 - 9.
17 Luo L F, Lin H, Li S C. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393 (1 - 2): 53 - 64.
18 Sander T, Gerke H H, Rogasik H. Assessment of chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2008, 145(3 - 4): 303 - 314.
19 惠刚盈,克劳斯·冯佳多.森林空间结构量化分析方法[M].北京:中国科学技术出版社,2003.
20 惠刚盈.基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J].北京林业大学学报,2013, 35(4): 1 - 9.
Hui Gangying. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 1 - 9. (in Chinese)
21 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.
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. (in Chinese)
22 Velde B, Moreau E, Terribile F. Pore networks in an Italian Vertisol: quantitative characterisation by two dimensional image analysis[J]. Geoderma, 1996, 72(3): 271 - 285.
23 张建丰,林性粹,王文焰.黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究[J].水土保持学报,2003,17(4):168 - 171.
Zhang Jianfeng, Lin Xingcui, Wang Wenyan. Characteristics of macropore and macropore flow in loess soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(4): 168 - 171. (in Chinese)
24 秦耀东,任理,王济.土壤中大孔隙流研究进展与现状[J].水科学进展,2000, 11(2):203 - 207.
Qin Yaodong, Ren Li, Wang Ji. Review on the study of macropore flow in soil[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(2): 203 - 207. (in Chinese)
25 李德成, Velde B,张桃林.利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度[J].土壤学报, 2003, 40(5): 678 - 682.
Li Decheng, Velde B, Zhang Taolin. Quantitative estimative of pore variability and complexity in soils by digital image method [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003,40(5):678 - 682. (in Chinese)

(下转第 194 页)

11 Provenzano G, Pietro D D, Guillermo P S. New computational fluid dynamic procedure to estimate friction and local losses in coextruded drip laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007,133(6):520 – 527.

12 石喜,吕宏兴,朱德兰,等. PVC 三通管水流阻力与流动特征分析[J]. 农业机械学报,2013,44(1):73 – 79.
Shi Xi, Lü Hongxing, Zhu Delan, et al. Flow resistance and characteristics of PVC tee pipes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):73 – 79. (in Chinese)

13 白兆亮,李琳. 有压输水管道孔板局部阻力相邻影响试验[J]. 水利水电科技进展,2015,35(2):28 – 31.
Bai Zhaoliang, Li Lin. Test on local resistance adjacent influence of pressure water pipe[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(2):28 – 31. (in Chinese)

14 贺益英,赵懿珺,孙淑卿,等. 弯管局部阻力系数的试验研究[J]. 水利学报,2003,34(11):54 – 58.
He Yiying, Zhao Yijun, Sun Shuqing, et al. Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(11):54 – 58. (in Chinese)

15 赵懿珺,贺益英. 直角 Z 形组合双弯管流动特性的研究[J]. 水利学报,2006,37(7):778 – 783.
Zhao Yijun, He Yiying. Hydraulic characteristics of Z-type pipe combination with two similar rectangular bends[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(7):778 – 783. (in Chinese)

16 陈晓,赵懿珺,贺益英,等. 90°弯管 Z 形组合局部阻力特性研究[J]. 人民黄河,2015,37(5):107 – 111.
Chen Xiao, Zhao Yijun, He Yiying, et al. Numerical simulation investigation of local resistance characteristics of Z-type combination with two 90° bends[J]. Yellow River,2015,37(5):107 – 111. (in Chinese)

17 庄茜,李绍武,祁泽鹏. 基于有限体积法的群桩绕流数值模拟[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版, 2015,48(5):447 – 454.
Zhuang Qian, Li Shaowu, Qi Zepeng. Numerical simulation for flow around pile group based on FVM[J]. Journal of Tianjin University:Science and Technology,2015,48(5):447 – 454. (in Chinese)

18 华绍曾,杨学宁,编译. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社,1985.

19 韩文霆,Nguyen Van Lanh,徐琳. 摇臂式喷头内流道流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(8):58 – 64.
Han Wenting, Nguyen Van Lanh, Xu Lin. Investigations on internal flow characteristics of impact sprinkler based on numerical simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):58 – 64. (in Chinese)

20 贺益英,赵懿珺,孙淑卿,等. 输水管线中弯管局部阻力的相邻影响[J]. 水利学报,2004,35(2):17 – 20.
He Yiying, Zhao Yijun, Sun Shuqing, et al. Interaction of local between bends in pipe line[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(2):17 – 20. (in Chinese)

21 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 1983.

(上接第 186 页)

26 Mooney S J, Morris C. Morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography[J]. Catena, 2008, 73(2): 204 – 211.

27 陈晓冰,张洪江,程金花,等. 基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 93 – 100.
Chen Xiaobing, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, et al. Quantitative evaluation of preferential flow development degree based on dyed image variability analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 93 – 100. (in Chinese)

28 Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 2015, 237 – 238: 9 – 20.

29 Tobella A B, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3342 – 3354.

30 Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability[J]. Bioscience, 2011, 61(11): 869 – 879.

31 Pagenkemper S K, Athmann M, Uteau D, et al. The effect of earthworm activity on soil bioporosity-investigated with X-ray computed tomography and endoscopy[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146(A): 79 – 88.

32 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)