

森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义

石 辉^{1, 2}, 刘世荣²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘 要: 由于研究方法和目的的不同, 土壤大孔隙的标准并不统一, 一般认为土壤大孔隙的孔径在 0.03~ 3 mm; > 3 mm 的孔隙相对于土壤结构而言非常巨大, 水流在这些孔隙中的运动完全不同于土壤中的运动方式, 因此一般土壤大孔隙研究中不包含这种成因的巨大孔隙。对于森林土壤而言, 动物活动和根系作用是孔隙形成的主要原因。研究土壤大孔隙经常采用的方法有染色法、CT 扫描技术和入渗方法; 由于土壤大孔隙的高度不规则性, 常采用分形理论研究孔隙的特征。水分在大孔隙中的快速运动是大孔隙流的主要特征, 因此模拟大孔隙流时经常采用可将土壤分为快速运动区域和运动较慢区域两个部分的两区模型。壤中流是森林涵养水源和调节径流的主要方式, 土壤大孔隙对壤中流的产生具有重要的影响。研究森林土壤大孔隙, 可深化森林涵养水源机理的认识, 不仅在理论上可加深理解森林调节水文的过程; 在实践上用于预测土地利用变化对水资源和水环境的影响, 为退耕还林、天然林保护工程的植被恢复重建提供理论与决策依据。

关键词: 土壤大孔隙; 两区模型; 生态水文学意义

中图分类号: P349, S714

文献标识码: A

土壤的胀缩、土壤动物的活动和植物根系死亡后形成大孔隙是森林土壤中存在的普遍现象。由于大孔隙的存在, 水分在运动过程中不能与土体发生充分的相互作用, 而是直接快速地进入土壤深层, 成为土壤深层水分可能来源的唯一通道^[1]。从而对林地地表径流的产生、深层土壤水分的贮蓄产生巨大的影响。研究森林土壤的大孔隙结构特征及时空变异规律, 模拟存在大孔隙时的水分运动过程, 了解大孔隙对坡面径流形成的影响, 对于进一步认识森林植被与水关系的问题有重要的意义。

1 土壤大孔隙的特征

1.1 土壤大孔隙的定义与标准

早在 100 a 前, Laws 等人就发现了土壤中大孔隙流问题, 随后 Horton 认为土壤裂隙、虫孔和

根孔能显著地增加土壤入渗, 提高深层土壤含水量。到了上世纪 70 年代, 由于农用化学物质的大量使用, 部分农药和化肥进入地下水引起地下水污染, 导致了严重的环境问题^[2], 而根据传统的土壤物理理论并不能揭示深层地下水污染的问题, 从而促进了土壤大孔隙流的研究。

什么样的孔隙是大孔隙? 由于对大孔隙的理解和定义不同, 不同的研究者对大孔隙范围的划分存在分歧。Skopp^[3]根据孔隙传导水的能力大小, 将土壤孔隙划分为两类, 一类是基质孔隙, 一类是大孔隙。它们的差别在于大孔隙中水流和溶质的流动速率很快, 从而大孔隙和基质孔隙间的水流和溶质的传导交换受到限制; 而基质孔隙中, 由于其流动速度较低, 水和溶质可以在各种孔隙中充分混合。Beven 和 Germann^[4-6]从水流动力学角度认为大孔隙具有非毛管性质, 连续大孔隙中的水分运动主要

收稿日期 (Received date): 2005- 02- 15; 改回日期 (Accepted): 2005- 05- 13。

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB11504) 和国家杰出青年基金项目 (30125036) 和国家基金项目 (40471078) 资助 [Supported by the National Key Basic Research Project (No. 2002CB11504) and National Natural Sciences Foundation (No. 30125036 and No. 40471078)]

作者简介 (Biography): 石辉 (1968-), 男, 陕西眉县人, 教授, 主要从事环境生态学方面的教学和研究工作。[Shi Hui (1968-), professor, the major fields are environmental ecology. Email: h-shi@sohu.com]

受重力势的支配,而与毛管势和基质势的关系不大,因而凡能传导非平衡管道水流的孔隙均可认为是大孔隙。在孔隙大小的具体指标上, Marshall^[7]和 Bouma^[8]认为当量孔径 $> 0.1\text{ mm}$ 的孔隙为大孔隙; Hall^[9]将当量孔径 $> 0.06\text{ mm}$ 的孔隙称为大孔隙;而 Warner^[10]采用 x 射线研究和 Luxmoore^[11]通过模拟研究均认为大孔隙的孔径应当 $> 1\text{ mm}$; Beven 和 Germann 给出孔径为 $0.03 \sim 3\text{ mm}$; Singh^[12]认为孔径应当 $> 1.6\text{ mm}$,而 Vermeul^[13]认为孔径 $> 0.085\text{ mm}$ 的孔隙即为大孔隙。一些研究者仅将动物形成的孔隙^[14]、较大的根孔^[15]和裂隙^[16]认为是大孔隙,这样的孔隙尺度远远大于上述标准。为什么会存在大孔隙的不同孔径标准,因为根据毛管势的大小、孔隙功能、水动力学特征和图像处理的精度划分大孔隙的标准不同^[17]。

目前没有一个绝对的标准将土壤大孔隙和其他孔隙分开的方法,因此土壤大孔隙可以从不同的方面去定义^[18]: 1. 大孔隙的空间尺度(孔径 $0.03 \sim 3\text{ mm}$), 2. 排空大孔隙内全部水量时所需施加的压力 (5 kPa), 2. 土壤导水率大小 ($1 \sim 10\text{ mm/h}$)。不过这样定义的大孔隙还与土壤的基质势有密切的关系。大孔隙水流的一个重要特点是不同于传统的 Darcy 水流过程,因此以水分动力学的观点划分大孔隙是相对科学的方法^[19, 20]。

1.2 森林土壤大孔隙的成因

生物因素是成土过程中最重要的因素之一,对土壤的性质有重要影响,也是形成土壤大孔隙的一个重要原因。土壤动物的活动,是土壤粗大孔隙的成因。一般情况下,蚯蚓可形成孔径为 $2 \sim 11\text{ mm}$ 的大孔隙,其深度可达到 $60 \sim 70\text{ cm}$ ^[21];而蚂蚁产生的孔隙相对较小,直径为 $2 \sim 50\text{ mm}$,但其深度可超过 1 m ^[22]。在免耕土壤上,由于地表植物残体较多,有利于土壤动物的生存、生活,同时外力扰动和耕作破坏较少,可以保持更多的土壤大孔隙,一般是耕地的 2 倍以上^[23]。在森林土壤中,特别是在原始森林中,这个比例更高。

植物根孔是植物根系在生长过程中以及根系死亡后土壤中形成的孔道,由于根系的垂直生长,会形成以垂直根孔为主的大孔隙,对于降水入渗会产生更大的影响;因此植物根孔也是形成土壤大孔隙的重要原因^[24]。Gish 和 Jury^[25]研究了小麦种植前和种植收获以后 Cl^- 离子的穿透曲线,发现种植作物后溶质的运移程度最高,其主要原因是由于小麦

根系腐烂后形成植物根孔而产生的优势流效应^[26]。Bicki 等^[27]在细沙土上发现, 2 a 生的高羊茅根系可使土壤的饱和导水率增加 5 倍; Ellsworth^[28]研究了植物根孔对 Cl^- , NO_3^- 等离子在土壤中运移过程的影响,发现在未受扰动的土壤中,由于根孔的存在,使得这些离子的运移深度大于对照土壤, Gish 等^[29]认为植物根孔是形成优势流的主要机制。对于森林土壤,每年植物根系的腐烂会形成具有快速水流的连续开放通道,这即为森林根系所形成的大孔隙^[30]。由于树皮的腐烂比木质部需要更长的时间,这样腐烂的木质部就会形成管状的大孔隙;但这种孔隙常会被自己腐烂的树根和凋落物的松散有机物质填充,研究表明这种大孔隙至少占到森林土壤体积的 35%,并随深度增加而减少。大孔隙的结构与植物种类和生长情况有关^[31]。一般情况下,腐烂的树根每年可产生相当数量的连续大孔隙而成为水分运动的快速通道^[32]。Gaiser 曾经在 1 hm^2 的林地上发现超过 4 000 个的垂直根孔^[33]。

在一些原始森林中,一些动物和树木死亡的根系可形成孔径达十几至几十厘米的孔隙。但由于这些孔隙相对于土壤结构而言非常巨大,水流在这些孔隙中的运动完全不同于土壤中的运动方式,因此一般土壤大孔隙研究中不包含这种成因的巨大孔隙。

在森林中,在不受人为干扰的情况下,土壤中的大孔隙可以保持很长时间,由树根形成的大孔隙在含有 30% 粘粒的土壤中可保持 $50 \sim 100\text{ a}$ ^[34],而一些动物如蚂蚁、鼯鼠所形成的可保持几百年^[35]。Hagedorn 和 Bundt^[36]根据大孔隙通道中沉积的放射性同位素计算了大孔隙的年龄,发现采样地点的大孔隙形成在 50 a 以上,并且有可能长久地保存下去。

2 土壤大孔隙的研究方法

2.1 染色法

染色法是直接观测土壤大孔隙的研究方法,主要采用固结物质和染料灌入土壤来描绘土壤剖面大孔隙的形态,测量、计算大孔隙的数量和大小^[35]。Sollins 和 Radulovich^[37]运用罗丹明染料研究了植物根孔中的优先水流和溶质运移, Natano^[38]应用亚甲基蓝染色对大孔隙的形态进行了观测, Ghodrait 和 Jury^[39]利用一种阴离子含氮的染料 Azo

Geranine2G 研究了孔隙形态和水流通道, 而 Fury 等^[40]和 Forre^[41]利用亮蓝对 14 种土壤中的大孔隙流进行观测, Gish 等^[25]同样利用亮蓝研究了免耕条件下水流运动的通道及其影响因素, Corey^[42]等对不同性质的染料进行了比较。上述研究所采用的染料主要针对有机质含量低的土壤有效, 当有机质含量高时, 土壤的颜色变黑, 染料与土壤的颜色对比变小, 因此不能用于高有机质含量的森林土壤染色研究, 为了解决这一问题, Noguchi 等^[43]提出利用丙烯酸纤维树脂乳剂这种白色染料的方法, 并认为其结果具有良好的精度。还有一些研究并非直接在野外染色, 而通过土壤固结、荧光染色以后, 制成切片, 利用显微镜、图像分析以来研究土壤大孔隙的形状、数量^[44-46]。染色法可描述孔隙的大小及其分布情况, 但不能给出优势流与孔隙综合特征之间的关系。

2.2 CT 扫描技术

随着新技术的发展, CT 技术也被用于土壤大孔隙的研究^[47]。由于 CT 技术是一种非破坏性的测量技术, 并且可反映土壤孔隙的三维结构, 现已成为测定土壤结构的一种新型手段。Anderson^[48]对直径为 76.2 mm 的森林和耕地原状土样进行了研究, 得到孔隙随深度分布的扫描图像; Peyton^[49]进行了同样的研究, 发现森林原状土壤的大孔隙直径多在 0.5~1 mm 之间, 耕地土壤中的大孔隙直径反而大于森林土壤, 但森林土壤中超过 2 mm 孔径的孔隙比耕地多 50% 以上。CT 技术虽有直观、可研究孔隙的三维结构、非破坏性测量的优点, 但在描述土壤孔隙连通性方面存在一定困难, 且测定成本昂贵, 限制了该方法的广泛应用。

2.3 入渗方法

大孔隙对土壤性质与物质循环的影响最直接地表现在土壤水分入渗, 因此入渗成为研究土壤大孔隙孔径、分布和水流运动的一种重要方法。入渗方法主要是达到稳定水流后, 利用 Poiseuille 方程计算大孔隙的数量和孔径。Watson 等^[50]利用张力入渗仪控制水分入渗, 得到不同水头梯度下土壤大孔隙的导水率, 由于不同的水头对应着不同的毛管孔径, 这样利用 Poiseuille 方程得到不同孔径孔隙的数量, 并且以孔径 > 0.5 mm 的孔隙作为大孔隙, 计算了森林土壤大孔隙的状况, 发现占总孔隙数量很少的大孔隙决定着森林土壤的入渗速率。Radulovich 等^[51]认为土壤的大孔隙主要是田间持

水量到饱和含水量之间的孔隙, 将处于田间含水量的土壤在定水头下制作水分穿透曲线, 根据出流速率采用 Poiseuille 方程计算土壤大孔隙含量。本文作者曾利用 Radulovich 的水分穿透曲线法初步研究了岷江上游不同森林植被下的土壤大孔隙, 发现土壤大孔隙的半径主要集中于 0.3~2.4 mm, 每平方米上大孔隙的数量在 106~955 个, 半径 > 1.4 mm 的孔隙对土壤的导水率有重要的影响。溶解于水中的化学物质可随水流一体运动, 因而受到大孔隙流的影响, 因此各种化学物质在土壤中的入渗、运移过程也是研究大孔隙的重要方法。

2.4 分形理论

土壤作为一种复杂的多孔介质, 孔隙的大小、形状难以用简单的方法描述, 但由于它们具有自相似性, 可用分形理论进行研究。Natano 等^[38]将分形理论引入这方面的研究, 发现孔隙分维数与溶质运移的 Brenner 数有密切的关系。Peyton^[52]采用盒维数的方法对森林土壤 CT 扫描图像进行了分析, 计算了孔隙的分维数; Zeng 和 Gantzer^[53]进一步研究发现, 分形维数可描述土壤大孔隙空间非规则变化, 但由于两种不同结构的土壤可能具有相同的分维数, 因此有必要引入分形非均匀性指标描述大孔隙的变化。Rasiah 等^[54]用 CT 扫描技术分析了干湿两种土壤, 研究其孔隙结构的变化和大孔隙分布于表面分维数之间的关系。我国学者在土壤剖面染色的基础上, 利用分维数研究了不同土壤对优势流的敏感性^[55]。现在, 分形理论已经成为建立土壤大孔隙参数与水流运动之间关系的重要桥梁^[56]。但作为一种大孔隙的研究方法, 分形理论依赖于染色、入渗、扫描等方法的结果, 仅是提取土壤大孔隙特征的一种手段。

3 土壤大孔隙流模拟

大孔隙存在的结果是水分快速地穿过土壤而进入地下, 产生了优势流 (preferential flow)。这样, 在供水强度较大的情况下, 土壤中贮水很少。且大孔隙存在时, 溶质与水分在一部分孔隙内快速运动, 而在另一部分孔隙内基本不动, 这样在两个部分之间就存在物质交换。建模时, 一般将这两部分孔隙分开考虑, 统称为两区模型 (two region model), 但在具体模型中又有不同的名称。Coats 和 Smith^[57]提出了可动水体与不可动水体模型 (mo-

mobile-immobile model), 该模型认为水与溶质的运动主要在可动水体中进行, 不可动水体与可动水体之间通过浓度梯度进行物质交换而参与可动水体的运动。Van Genuchten^[58]将这个模型应用于土壤溶质运移研究, 在优势流研究中得到了广泛应用^[59, 60]。Skopp^[61]在此基础上, 提出了一种两流模型 (two-flow domain), 该模型将土壤孔隙分为大孔隙和土壤基质影响的微孔隙, 大孔隙中水流运动快, 小孔隙中水流运动慢, 但最终小孔隙中的水分和溶质还要运动进入大孔隙。这两种模型概念清晰, 但由于需要多个参数, 且这些参数难以独立、方便的测定, 成为模型研究急需解决的问题。

German 和 Beven^[6]对两区模型进行了发展, 认为在小孔隙的基质内, 水流运动主要受基质势的影响, 因此可用 Darcy 定律描述; 在大孔隙中, 水流主要受重力的影响, 可用运动波模型模拟水流运动。German^[62]曾利用边界层流理论, Chen 和 Wagent^[63]利用 Chezy-Manning 公式, Workman 和 Skaggs^[64]利用 Poiseuille 公式, Chen 和 Wagent^[65]还利用虑波理论简化水分运动的 Richard 方程和对流弥散方程。Jarvis^[66]在两区模型的基础上提出了包括大孔隙对水分及溶质运动模拟的 MACRO 模型及程序, 该模型已经得到了一些验证^[67]; 但对模型参数的确定还存在一定问题^[68]。

由于土壤大孔隙流的复杂性, 目前流行的各种模型均是一些非线性模型, 由此导致模型参数难以求取; 同时大孔隙在土壤中随机分布, 各种模型的模拟结果仅能在某一方面与实验值相符, 这些使模型的应用受到限制。为了解决这些问题, 一些数值模拟模型被提出^[69, 70]。

4 森林土壤大孔隙特征的生态水文学意义

水流的快速运动是大孔隙的一个重要特征, 这样大孔隙对森林土壤的入渗产生重要的影响, 从而影响到坡面产流和深层蓄水。Cameira 等^[71]在葡萄牙的研究发现, 大孔隙的存在使土壤的饱和导水率增加了几倍, 大孔隙尽管数量较少, 但对总入渗量贡献率为 85%。Beasley^[72]发现在森林坡地上, 降水 20 min 后出现壤中流, 而此时土壤上层剖面并没有达到饱和; Mosley^[73]计算之后, 发现 40% 的

降水沿着大孔隙迅速入渗; Harr^[74]发现在一些陡坡流域上, 壤中流提供了暴雨径流的 70%。传统的土壤物理学认为, 非饱和流的运动特别慢, 除非下部土壤达到饱和, 否则壤中流不可能成为当次降水的主要径流来源^[75]。De Vries 和 Chow^[76]研究后认为, 在相同的水力导度下, 大孔隙产生的优势流可比基质势引起的水分运动更快, 入渗深度更深, 大孔隙是壤中流快速出现的主要原因。Wilson 等^[77]在森林坡地上研究表明, 坡地大孔隙是壤中流的主要机制, 特别那些直径大于 1mm 的孔隙, 虽然数量很少, 但对传导水流有着重要的因素; Noguchi 等^[78]的研究同样证实了这一点; Luxmoore^[79]发现大中孔隙的不同组合有着不同的导水速率。Allaire 等^[80, 81]对大孔隙的数量、尺度、形状、连续度及弯曲度进行研究, 发现大孔隙的连通性对产生优势流的作用最为强烈。

森林植被涵养水源的生态功能一直是社会关注的重大问题, 也是当今生态科学研究的前沿。根土作用层是形成森林植被水文功能的核心地带, 理解其水文过程是了解森林水文功能形成机制的关键^[82]。壤中流的产生是森林涵养水源和调节径流的主要方式, 大孔隙在其中起着重要的作用。Shipitalo^[83]在坡地上的研究发现, 大孔隙可明显地增加入渗, 减少地表径流; Weiler 等^[84]发现, 表层土壤大孔隙的分布控制着壤中流的产生, 尤其是暴雨径流中大孔隙所造成的快速入渗、壤中流和回归流对森林的水文功能影响更大^[85]。

在半干旱半湿润地区, 由于土壤大孔隙具有较高的入渗能力, 使得地表径流的产生相对较少, 可有效地防止水土流失的发生; 同时, 大孔隙入渗进入深层的水分, 有利于土壤干层的水分恢复, 满足植物生长的水分需求。

从上述分析可知, 大孔隙和由此产生的优势流, 对于水分的入渗、化学物质的迁移和地表径流的产生有重要的影响。出于保护地下水资源的需要, 国外有关大孔隙和优势流的研究主要集中于农地, 但随着生态环境问题的突出, 已开始将大孔隙和优势流研究的方法和理论应用于森林水文方面, 特别在坡地壤中流的产生方面。在我国, 有关大孔隙的研究已经开始, 但有关林地方面的研究报道较少。关于森林土壤物理性质和森林水文的研究, 仍然是对不同植被下的土壤简单地划分为毛管孔隙和非毛管孔隙进行对比, 缺少对土壤大孔隙特征和由

此产生优势流的进一步研究, 大孔隙的数量、在对于壤中流形成的作用以及退化生态系统功能的恢复有何意义尚不清楚。针对存在这些问题, 开展森林土壤大孔隙研究, 可深化森林涵养水源机理的认识, 不仅在理论上可加深理解森林调节水文的过程; 在实践上用于预测土地利用变化对水资源和水环境的影响, 为退耕还林、天然林保护工程的植被恢复重建提供理论与决策依据。

参考文献 (References):

- [1] German P., W. M. Edwards, L. M. Owens. Profiles of bromide and increased soil moisture infiltration into soils with macropore [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, **48**: 237~ 244.
- [2] Shi Hui, Shao Ming' an. Agro- chemicals transport in soils [J]. *World Sci- Tech Research and Development*. 1999, (3): 63~ 68 [石辉, 邵明安. 土壤中农用化学物质的迁移 [J]. 世界科技研究与发展. 1999, (3): 63~ 68.]
- [3] Skopp, J. Comment on "micro, meso, and macroposity of soil" [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 1246.
- [4] Germann P., and K. Beven. Water flow in soil macropores. I. An experimental approach [J]. *J. Soil Sci.* 1981, **32** (1): 1~ 14.
- [5] K. Beven, and Germann P. Water flow in soil macropores. II. A Combined flow model [J]. *J. Soil Sci.* 1981, **32** (1): 15~ 30.
- [6] Germann P., and K. Beven. Water flow in soil macropores. III. A statistical approach [J]. *J. Soil Sci.* 1981, **32** (1): 31~ 40.
- [7] Marshall T. J. Relationship between water and soil. Technical Commun. [R] No. 50. Commonwealth Bureau of Soils. Harpenden, UK, 1959.
- [8] Bouma J., Jongerius, O. Boersma, A. Jager, and D. Schoonderbeek. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977, **41**: 945~ 950.
- [9] Hall D. G. M., Reeve M.J., Thomasson A.J. Water retention, porosity and density of field soils [R]. No. 9. Harpenden, Soil Surv. Tech. Monogr.
- [10] Warner G. S., Nieber J. L., Moore I. D. Characterizing macropores in soil by computed tomography [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 653~ 660.
- [11] Lumoore R.J. Micro, meso, and macroposity of soil [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 671~ 672.
- [12] Singh P., K. S. Rameshwar, M. L. Thompson. Measurement and characterization of macropores by autocad and automatic image analysis [J]. *J. Environ. Quality*. 1991, **20**: 289~ 294.
- [13] Vermeul V. R., J. D. Istok, A. L. Flint, and J. L. Pikul. An improved method for quantifying soil macroporosity [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**: 809~ 816.
- [14] Ehler W. Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil [J]. *Soil Sci.* 1975, **119**: 242~ 249.
- [15] Aubertin G. M. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement [R]. USDA Forest Service Res. Paper NE- 192. Northeast Forest Exp. Stn. Upper Darby, Penn. 1971.
- [16] Lew is D. T. Subgroup designation of three Udolls in southeastern Nebraska [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977, **41**: 940~ 945.
- [17] Liu Wei, Ou Ziqing, Ying Peifeng. Soil macropore and its studying methodology [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2001, **12** (6): 465~ 468 [刘伟, 区自清, 应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法 [J]. 应用生态学报. 2001, **12** (6): 465~ 468.]
- [18] Qin Yaodong, Ren Li, Wang Ji. Review on study of macropore flow in soils [J]. *Advance in Water Science*. 2001, **11** (2): 203~ 205 [秦耀东, 任理, 王济. 土壤中大孔隙流研究进展 [J]. 水科学进展. 2001, **11** (2): 203~ 205.]
- [19] Bouma J. Comment on "micro-, meso-, and macroporosity of soil" [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 1244~ 1245.
- [20] Beven K. Micro, meso, and macroporosity and channeling flow phenomena in soils [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 1245.
- [21] Murphy CP, Banfield CF. Pore space variability in a subsurface horizon of tow soils [J]. *J. Soil Sci.* 1978, **29**: 156~ 166.
- [22] Green RD, and Askew GP. Observation on the biological development of macropores in Soils of Tomney Marsh [J]. *J. Soil Sci.* 1965, **16** (2): 342~ 349.
- [23] Omoti U, Wild A. Use of fluorescent dyes to mark the pathways of solute movement through soils under leaching conditions. II. Field experiments [J]. *Soil Sci.* 1979, **128** (2): 98~ 104.
- [24] Wang Dali, Yin Chengqing. Function of the root channels in the soil system [J]. *J. Ecology*. 2000, **20** (5): 869~ 874 [王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能 [J]. 生态学报. 2000, **20** (5): 869~ 874.]
- [25] Gish, T. J., and W. A. Jury. Estimatin g solute travel times through a crop root zone [J]. *Soil Sciencæ*. 1982, **133** (2): 124~ 130.
- [26] Gish, T. J., and W. A. Jury. Effect of plant roots and root channels on solute transport [J]. *Transactions of the ASAE*. 1983, **29**: 440~ 444.
- [27] Bicki, T. J., T. E. Fenton, H. D. Luce, and T. A. Dewitt. Comparison of percolationtest results and estimated hydraulic conductivities for Mollisols and Alfisols [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, **52**: 1708~ 1714.
- [28] Ellsworth, T. R., W. A. Jury, F. R. Ernst, and P. J. Shouse A three- dimensional field study of solute transport through unsaturatd, layered, porous media. I. Methodology, mass recovery and mean transport [J]. *Water Resour. Res.* 1991, **27**: 951~ 965.
- [29] Gish, T. J., D. Gimenez, and W. J. Rawls. Impact of rots on ground water quality [J]. *Plant and Soil*. 1998, **200**: 47~ 54.
- [30] Hursh H. Soil profile characteristics pertinent to hydrology study in the Southern Appalachian as attalachians [J]. *Soil Sci. Soc. Proc.* 1941, **6**: 414~ 422.
- [31] Mosley M.P. Stream flow generation in a forested watershed, New Zealand [J] *Water Resour. Res.* 1979, **15** (4): 795~ 806.
- [32] Mosley M.P. Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand [J]. *J. Hydrol.* 1982, **35**: 65~ 92.
- [33] Gaiser R. N. Root channels and root in forest soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* 1952, **17**: 62~ 65.
- [34] Bouma, J. Wosten JHM. Characterizing ponded infiltration in a dry cracked soil [J]. *J. Hydrol.* 1984, **69**: 297~ 304.
- [35] Bouma, J. Soil morphology annd prefeential flow along macropores [J]. *Agri. Water Management* 1981, **3**: 235~ 250.
- [36] Hagedorn F. and Maya Bundt. The age of preferential flow paths. [J]. *Geoderma*. 2002, **113** (1~ 2): 119~ 132.

- [37] Sollins, P., and Radulovich R. Effects of soil physical structure on solute transport in a weathered tropical soil [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1988, **52**: 1168~ 1173.
- [38] Hatano, R., N. Kawamura, J. Ikda, and T. Sakuma. Evaluation of the effect morphological features of flow paths on solute transport y using fractal dimensions of methylene blue staining pattern [J]. *Geoderma*. 1992, **53**: 31~ 44.
- [39] Ghodrati, M., and W. A. Jury. A field study using dyes to characterize preferential flow of water [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 1558~ 1563.
- [40] Fury, M., W. A. Jury, and J. Leuenberger. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study [J]. *Water Resour. Res.* 1994, **30**: 1945~ 195.
- [41] Forre I., A. Papritz, R. Kasteel, H. Fluhler, and D. Luca. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing [J]. *European J. Soil Sci.* 2000, **51**: 313~ 322.
- [42] Corey J. C. Evaluation of dyes for tracing water movement in acid soils [J]. *Soil Sci.* 1968, **106** (3): 182~ 187.
- [43] Noguchi S., N. A. Rahim, K. Baharuddin, T. Sammori, M. Tani, and K. Morisada. Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular, Malaysia [J]. *J. For. Res.* 1997, **2**: 115~ 120.
- [44] Robertson E. A. G., D. J. Campbell. Simple, low- cost image analysis of soil pore structure [J]. *J. Agri. Engineering Res.* 1997, **68**: 291~ 296.
- [45] Walker P. J. C., Trudgill S. T. Quantiment image analysis of soil pore geometry: comparison with tracer breakthrough curves [J]. *Earth Surface Proc. Landform.* 1983, **8**: 465~ 472.
- [46] Warner G. S., Nieber J. L., More I. D. Characterizing macropores in soil by computed tomography [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 653~ 660.
- [47] Feng Jie, Hao Zhenchun. A Summary of CT application in research of soil macropore [J]. *Irrigation and Drainage*. 2000, **19** (3): 71~ 76 [冯杰, 郝振纯. CT 在土壤中大孔隙研究中的应用评价. 灌溉排水. 2000, **19** (3): 71~ 76.]
- [48] Anderson S. H., R. L. Peyton, C. J. Gantzer. Evaluation of constructed and natural soil macropore using X- ray computed tomography [J]. *Geoderma*, 1990, **46**: 13~ 29.
- [49] Peyton R. L., S. H. Anderson, C. J. Gantzer. Applying X- ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil core [J]. *Geoderma*, 1992, **53**: 329~ 340.
- [50] Waston K. W., R. J. Luxmoore. Estimating macropority in a forest soil watershed by use a tension infitrometer [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1986, **50**: 578~ 582.
- [51] Radulovich R, Solorano E. Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1989, **53**: 556~ 559.
- [52] Peyton R. L., C. J. Gantzer, S. H. Anderson, B. A. Hae- finer, P. Pfeifer. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X- ray computed tomography [J]. *Water Res.* 1994, **30**: 691~ 700.
- [53] Zeng Y., C. J. Gantzer, R. L. Peyton, S. H. Anderson. Fractal dimension and lacunarity determined with X- ray computed tomography [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, **60**: 1718~ 1724.
- [54] Rasiah V., A. G. Aylmore. Characterizing the changes in soil porosity by computed tomography and fractal dimension [J]. *Soil Sci.* 1998, **163** (3): 203~ 211.
- [55] Cheng Zhuhua, Zhang Jiabao. Fractal application in sensitivity of preferential flow for different soils [A]. In: Xu Fu' an and Zhou Lingyun edited. *Agricultural Ecosystem Research for Plain in North He' nan Province (Series 2)* [C]. Beijing: Meteorological Press, 1999. 25~ 30. [程竹华, 张佳宝. 分形理论在不同土壤对优势流敏感性研究中的应用 [A]. 见: 徐富安, 周凌云. 豫北平原农业生态系统研究 (第 2 集) [C]. 北京: 气象出版社, 1999. 25~ 30.]
- [56] Feng Jie, Hao Zhenchun, Chen Qihui. Application and view of fractal theory in soil macropore research [J]. *Soil.* 2001, (3): 123~ 130 [冯杰, 郝振纯, 陈启慧. 分形理论在土壤大孔隙研究中应用及其展望 [J]. 土壤. 2001, (3): 123~ 130.]
- [57] Coats K. H., and B. D. Smith. Dead- end pore volume and dispersion in porous media [J]. *Soc. Petrol. Eng. J.* 1964, **4**: 73~ 84.
- [58] Van Genuchten M. Th. P. J. Wierenga. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solution [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1976, **40**: 473~ 481.
- [59] Parker J. C., and M. Th. Van Genuchten. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments [J]. *VA. Agri. Exp. Stn. Bull.* 1984, No. 84~ 3.
- [60] Toride, N., F. J. Leij, and Van Genuchten. The CXTFIT Code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments [R]. US Salinity Laboratory, US department of agriculture, Riverside, California. 1995, No. 137.
- [61] Skopp J., W. R. Gardner, E. J. Tyler. Solute movement in saturated soils: two- region model with small interaction [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1981, **45**: 837~ 842.
- [62] German P. Preferential flow and generation of runoff. I. Boundary layer flow theory [J]. *Water Resource Res.* 1990, **26**: 3055 ~ 3063.
- [63] Chen C. R. J. Wagenet. Simulation of water and chemicals in macropore soils. I. Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil water flow [J]. *J. Hydrol.* 1992, **130**: 105~ 126.
- [64] Workman S. R., Skaggs R. W. PREFLO: A water management model capable of simulating preferential flow [J]. *Trans. ASAE.* 1990, **33**: 1939~ 1948.
- [65] Chen C. R. J. Wagenet. Simulation of water and chemicals in macropore soils. II. Application of linear filter theory [J]. *J. Hydrol.* 1992, **130**: 127~ 149.
- [66] Jarvis N. The MACRO Model Technical Description [R]. SLU, Department of Soil Sciences, Uppsala. 2001.
- [67] Igor G. Dubus and Colin D. Brown. Sensitivity and First- Step Uncertainty Analyses for the Preferential Flow Model MACRO [J]. *Journal of Environmental Quality.* 2002, **31**: 227~ 240.
- [68] Logsdon. S. D. Determination of Preferential Flow Model Parameters [J]. *Soil Science Society of America Journal.* 2002, **66**: 1095~ 1103.
- [69] Creke H. H., M. Th. Van Genuchten. A dual- porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media [J]. *Water Resources Res.* 1993, **19**: 305~ 319.
- [70] Steenhuis T. S., J. Y. Parlange, M. S. Andrenini. A numerical model for preferential solute movement in structured soils [J]. *Geoderma.* 1990, **46**: 193~ 208.
- [71] Cameira M. R., Fernando R. M., Pereira L. S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam allu-

- val soil in southern Portugal [J]. *Soil and Tillage Research*. 2003, **70** (2): 131~ 140.
- [72] Beasley R. S. Contribution of surface flow from the upper slopes of forested watershed to channel flow [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1976, **40**: 193~ 208.
- [73] Mosley M. P. Surface flow velocities through selected forested soils, South Island, New Zealand [J]. *J. Hydrol.* 1982, **55**: 65 ~ 92.
- [74] Harr R. D. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope [J]. *J. Hydrol.* 1977, **33**: 37~ 58.
- [75] Weyman D. R. Measurements of the downslope flow of water in a soil [J]. *J. Hydrol.* 1973, **20**: 267~ 288.
- [76] De Vries J., T. L. Chow. Hydrological behavior of a forested mountain soil in Coastal British Columbia [J]. *Water Resources Res.* 1978, **5**: 935~ 942.
- [77] Wilson G. V., P. M. Jardine, R. J. Luxmoore, and J. R. Jones. Hydrology of a forested hillslope during storm events [J]. *Geoderma*, 1990, **46**: 119~ 138.
- [78] Noguchi S., Y. Tsuboyama, R. C. Sidle and I. Hosoda. Morphological Characteristics of Macropores and the Distribution of Preferential Flow Pathways in a Forested Slope Segment [J]. *Soil Science Society of America Journal*. 1999, **63**: 1413~ 1423.
- [79] Luxmoore R. J., P. M. Jardine, G. V. Wilson, J. R. Jones, and L. W. Zelazny. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope [J]. *Geoderma*, 1990, **46**: 138~ 154.
- [80] Allaire S. E., S. C. Gupta, J. Nieber and J. F. Moncrief. Role of macropore continuity and tortuosity on solute transport in soils 1. Effects of initial and boundary conditions [J]. *J. Contaminant Hydrology*. 2002, **58** (3~ 4): 283~ 298.
- [81] Allaire S. E., S. C. Gupta, J. Nieber and J. F. Moncrief. Role of macropore continuity and tortuosity on solute transport in soils 2. Interactions with model assumptions for macropore description [J]. *J. Contaminant Hydrology*. 2002, **58** (3~ 4): 299~ 321.
- [82] Bonell, M., Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests [J]. *J. Hydrol.*, 1993: **150**: 217~ 275.
- [83] Shpitalo M. J., W. A. Dick and W. M. Edwards. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals [J]. *Soil and Tillage Research*. 2000, **53** (3~ 4): 167~ 183.
- [84] Weiler M, Naef F. Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow [J]. *J. Hydrology*. 2003, **273** (1): 139~ 154.
- [85] Bronsterta A, and E J P. Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro catchments [J]. *J Hydro*. 1997, **198**: 177~ 195.

The Macroporosity Properties of Forest Soil and Its Eco-hydrological Significance

SHI Hui^{1,2}, LIU Shirong²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China)

Abstract: The macropore is a common phenomena to forest soil with notable influence to water transport in soil. The standard of macropore size has not been unified due to the differences among the research methodology and purposes. The macropore aperture was usually considered as 0.03~ 3 mm. The pore of aperture larger than 3mm, which was very massive comparison with soil pore structure, was not concluded in soil macropore because of water transport form in these pores being different from normal soils. The activities of animals and function of roots were main causes of macropore formation for forest soil. The methodologies of macropore research had dye tracer, CT scanning and infiltration, and the fractal theory was also used to researched macropore characters. The most characteristic of macropore was water movement rapidly, So the two-region model was used widely, which the soil pores were divided into two parts, one part water moved rapidly and the other part water moved very slowly. The surface flow was principle formation for forestry adjusting runoff and conserving water, and the soil macropore significantly affected the surface flow formed. The study about forest soil macropore could further understand the mechanism of forest conserving water and the process of forest adjusting runoff.

Key words: soil macropore, two-region models, eco-hydrology