

DOI: 10.5846/stxb201301220126

高朝侠 徐学选 赵婀娜 赵传普 张少妮. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势. 生态学报 2014, 34(11): 2801–2811.

Gao Z X, Xu X X, Zhao J N, Zhao C P, Zhang S N. Review on macropore flow in soil. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(11): 2801–2811.

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势

高朝侠¹ 徐学选^{1,2,*} 赵婀娜³ 赵传普¹ 张少妮²

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 襄禹水利勘测设计有限公司, 邢台 054000)

摘要: 大孔隙流方面的研究是土壤水运动机理由均质走向非均质领域的标志而成为土壤物理学学目前的研究热点, 研究成果对评估土壤污染物风险、确定灌溉、施肥、以及种植作物方案等提供理论依据。围绕大孔隙的分类标准、大孔隙流的影响因素、土壤大孔隙流量化方法 3 个方面综合介绍了土壤大孔隙流的研究现状, 指出目前研究中存在的不足以及今后的发展趋势。旨在为深入研究大孔隙流提供新的思路及参考。

关键词: 大孔隙流; 影响因素; 量化方法; 发展趋势

Review on macropore flow in soil

GAO Zhaoxia¹, XU Xuexuan^{1,2,*}, ZHAO Jiaona³, ZHAO Chuanpu¹, ZHANG Shaoni²

1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Xiangyu Water Conservancy Survey and Design Limited Company, Xingtai 054000, China

Abstract: Macropore flow is a natural and ubiquitous phenomenon in soil environment. Research on macropore flow involves studying mechanisms of soil water movement from homogeneous to heterogeneous fields, so it has become research focus in soil physical science. Understanding of mechanisms on macropore flow would provide useful information for irrigation, fertilization, crops planting and pollution tendency simulating. This paper introduces present research situation of macropore flow from classification standards, the influencing factors and quantitative methods, the deficiency of present research and research directions are discussed. The purpose of this paper is to provide some new ideas for deeply studying macropore flow.

Key Words: macropore flow; influencing factors; quantification methods; prognosis

土壤是天然的过滤器及净化器, 其性质往往决定了土壤持水数量以及地下水的数量。人们通常认为, 土壤生态系统具有较强的自净能力, 进入土壤中的污染物, 通过土壤本身吸附、分解、迁移、转化等自然作用, 可以使污染物浓度降低甚至消失。然而, 大量的研究表明^[1-2], 即使进入土壤中的污染物没有超过土壤的自净能力, 也会对深部土壤和地下水造成

污染。甚至还有学者认为, 即使是一些迁移性小、降解周期短、残留量低的农业化学物质仍然能在地下水中监测到^[3-4]。因此可推断, 必然存在另外一种机制, 驱使着水及溶质向土壤深部快速运移, 这便是优先流。早在 1989 年 Monte Verita 研讨会上, 参会的 17 名科学家已经达成共识^[5]: 优先流是普遍存在的, 研究优先流意义重大。随后引起了诸多学者的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171421)

收稿日期: 2013-01-22; 网络出版日期: 2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

关注,大量的田间试验以及室内模拟试验从此展开。

大孔隙流是优先流的一种,土壤大孔隙中的水流可以绕过周围大部分土壤基质并且短时间内到达土壤深层,产生大孔隙流,此时的非均质流不再符合达西定律,土壤水分的流速和流量远大于达西定律描述下的运动特性^[6]。大孔隙的存在具有两面性,一方面,大孔隙加快了地下水的响应速度,减少了地表径流,另外大孔隙增加了土壤的通气性,促进了根系生长,提高了作物产量,同时,透气性增强了土壤中微生物的活动,有利于植物残渣、农药以及污染物的分解^[7];另一方面,地表垃圾渗滤液、污染物等可通过大孔隙快速到达深层土壤及地下水中,危害人类健康,对于农业生产中施放到土壤表面的营养物质或化学物质来讲,则来不及被土壤基质吸附和被植物利用,造成了肥料利用率降低以及地下水的污染^[8]。本文将着重介绍土壤大孔隙流的研究现状,存在问题及发展趋势,旨在为深入研究大孔隙流提供一定的参考。

1 大孔隙分类

土壤中大孔隙的存在,导致水分入渗时湿润锋动力学的不稳定性从而产生大孔隙流^[9]。对土壤孔隙的分类研究及定量观测有利于大孔隙流运移机制的理解。目前,人们普遍接受的大孔隙分类标准有两种:一是基于大孔隙成因,二是基于大孔隙形态。

1.1 基于大孔隙成因分类

根据大孔隙成因,大孔隙一般分为生物性孔隙和非生物性孔隙。生物孔隙又可细分为根孔及土壤动物孔隙,非生物孔隙包括裂隙、团聚体间的孔隙等^[9]。

1.1.1 生物性孔隙

Hursh 等^[10]指出在森林土壤中每年植物根系的腐烂都会形成较多的连续性开放孔道,其间具有快速的水流,这就是植物根孔。植物根孔在森林土壤中大约可以占到土壤孔隙 35%,并随深度增加而下降。由植物根系形成错综复杂的孔隙网络通道,显著影响水分及溶质在土壤中的运动,是形成大孔隙流的重要机制。Li 等^[11]人工栽培玉米及紫花苜蓿形成自然植物根孔,通过 NO_3^- 的穿透试验发现根系对 NO_3^- 的迁移有重要影响。Noguchi 等^[12]利用白色涂料研究热带森林土壤大孔隙的水流模式,发现植

物根系区亦是染料集中区。荐圣淇等^[13]同样指出染色等级高以及染色面积大的区域一般出现在根系密度较大的地方,因此可推断根系为染料提供了优先迁移的通道。根孔包含活体植物根系在生长过程中与土壤之间形成的孔隙(活孔)以及植物根系死亡腐败后在土壤中形成的孔道(死孔)^[14]。其中死孔对水分传导及溶质运移具有重要地位^[15-18]。Mitchell 等^[19]研究了膨胀土的孔隙分布及对土壤下渗速率的影响,结果表明,示踪剂经活根可以下渗 16 cm,而经死根却能下渗 55 cm。也有学者认为活根本身不具备水分传导的功能,之所以能进行水分传导原因在于根系穿插过程土壤收缩而形成了裂缝^[13,15,19]。

植物根系、枯枝落叶、土壤中的有机质通常是土壤动物食物的来源,因此由土壤动物形成的大孔隙经常与植物根孔相互交错并且可连通到土壤表面。土壤动物的活动(如地鼠、蚯蚓、蚂蚁等)形成的孔隙基本是管状的,大小在 1—50 mm 之间,主要集中于土壤表层^[20]。在潮湿地区,蚯蚓活动可产生大量的虫孔,尤其是 anecic 蚯蚓物种中的 *Lumbricus terrestris* 蚯蚓,每平方米可以产生几百个管状孔隙,直径在 2—12 mm 之间,扭曲度在 1.1—1.2 之间,并且可以不顾中间层的抵抗,直接从表面连通到心土层^[21]。而表层中的蚯蚓物种,往往产生的是临时性的虫孔,方向随机,扭曲度大并且多分枝^[22]。Cey 等^[23]指出在加拿大西南部 Ontario 区部分饱和土壤中,蚯蚓孔隙占到总孔隙的 85%,最大深度可达 1.2—1.4 m。蚂蚁活动产生的大孔隙,直径一般在 2—50 mm,深度至少 1 m^[24]。

植物的生长、土壤动物觅食与排泄处于不断的运动之中,从而使土壤大孔隙的研究更为复杂。Meek^[15]等发现紫花苜蓿在生长过程中,下渗速率呈现先下降再上升的特点。原因在于植物在生长过程中,根系的穿插堵塞了原有的孔隙,破坏了孔隙的连通性,从而使下渗速率降低,但随着根系的腐烂,死孔数量明显增加,下渗速率升高。Mitchell^[19]等应用亮蓝染色,发现有些孔隙边壁上未被染色,孔隙中间的团聚体呈现蓝色,推测该孔隙是蚯蚓在染色过程中形成的新的孔隙,之间蓝色团聚体为蚯蚓的排泄物。

1.1.2 非生物性孔隙

非生物性孔隙是指土壤在水力等外力作用下产

生的孔隙。如冻融、干湿交替产生的裂隙、化学风化溶解而产生的空洞、亚表层流的侵蚀产生的土壤管道、耕作形成的暗洞以及产生于破碎心土层的孔隙^[25]。其中以裂隙的研究较多。区自清等^[26]认为冻融交替和干湿交替均可使土壤产生大孔隙和优先水流,并且冻融交替的影响更显著。裂隙也受成土过程的影响,土壤越熟化,有机质含量越高,裂隙的密度越小。刘目兴^[27]等发现三峡库区低山针叶林土壤剖面的下渗深度最大,主要原因在于该区土壤存在母岩裂隙。裂隙随着土壤含水量的升高,表层孔隙数量会明显降低,连通性亦会随之降低^[28]。

1.2 基于大孔隙形态分类

基于大孔隙形态划分,基本上可以划分为3类^[29]:由洞穴动物和腐烂植物根系形成的管状孔隙;由干湿、冻融等物理过程形成的裂缝;由耕作和动物产生的团聚体间的不规则孔隙。

1.2.1 管状孔隙

管状孔隙近似圆柱状孔隙,包含无分支、有分支的以及网络状的孔隙。植物根孔和土壤动物形成的土壤孔隙基本上都是管状的,并且内壁通常光滑,植物的腐烂或动物的吞食排泄使得孔隙壁上的土壤有机质含量往往高于土壤基质^[30]。

1.2.2 裂缝

裂隙常不连续,而是由被一些斜裂隙所分割的长形片段所组成。李德成^[31]等发现土壤总孔隙中直径较大的部分主要由裂隙构成,直径较小的部分则由其它类型孔隙和裂隙共同构成,土体中其它类型的孔隙直径分布曲线类似对数正态分布,而裂隙直径分布曲线是不规则的。Cherkov等^[32]研究发现膨胀土裂隙的扭曲度在1.5—2.2之间,连通性随着深度的增加而减小。

1.2.3 不规则孔隙

不规则孔隙其形状和大小无规律可循,形态各异,孔隙壁呈棱角形亦或平缓弯曲形、粗糙亦或平滑。主要是由于土壤的团聚作用形成的,通常植物根孔、虫孔等富含丰富的有机物为土壤发生团聚作用奠定一定的基础。另外,土壤动物觅食与排泄、化学风化溶解、亚表层流的侵蚀、耕作等也会形成不规则孔隙。

2 大孔隙流的影响因素

2.1 土壤性质

土壤性质如土壤质地、土壤结构、土壤容重、孔隙率、饱和导水率、有机质含量等均会影响到大孔隙流^[33]。相对于粗质土壤而言,细质土壤水流运动的非均匀程度更高,优先流特征更明显^[34-35]。Flury^[36-37]发现结构性好的土壤的染色深度远大于结构性差的土壤。陈效民等^[38]研究了太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素,发现大孔隙的含量与土壤容重、孔隙度、饱和导水率、有机质含量呈极显著相关。

2.2 生物因素

土壤根孔与虫孔、裂隙等其它的孔道联系起来,形成广泛的复杂的优势流网状通道,对土壤中水分及溶质运移产生重要影响。赵娇娜^[39]认为在有限补给情况下,林地大孔隙流运移深度最深,其次是草地,农地相对较小。Mitchell等^[19]发现种植紫花苜蓿的土壤稳定入渗率、染色深度均大于种植小麦的土壤。土壤动物亦是形成大孔隙的重要因素。外界自然环境、动物的种类、区系、生境等均会影响大孔隙流的整个过程。免耕土壤利于土壤动物的生存,大孔隙数量丰富,易于产生连通性的孔隙,对水分分布产生重要影响。例如Bodhinayake等^[40]研究发现天然草地的大孔隙数量、饱和导水率、输水孔隙度等均显著大于人工草地。然而,土壤动物的觅食与排泄在产生新的孔隙的同时也破坏原有的孔隙,有可能降低孔隙的连通性。因此,土壤动物产生的孔隙随机性更强。

2.3 初始含水量

初始含水量也是影响水和溶质迁移的另一重要因素。然而,学者们却得出不一致的观点。一些学者认为,初始含水量低的土壤由于其疏水性质而使更多地水分从表层孔隙向深层流动。Edward等^[41]发现高强度的暴雨加上干燥的土壤可以产生更多的优先流。Shipitalo等^[42]研究得出杀虫剂在干燥的土壤中的渗漏量远远高于预处理中润湿的土壤。Hardie等^[43]发现 texture-contrast 型土壤中干土中染色剂的入渗深度是湿土的近3倍,入渗率是湿土的近10倍。Merdun等^[44]设置了3个初始含水量水平研究土壤水分的三维分布特征,发现干土对优先流响应最为明显。

另一些学者认为,湿土一定程度上限制了水和

溶质的侧渗,因此湿土比干土更容易产生优先水流。Flury^[37]应用亮蓝染色发现,染色深度中湿土较干土深,并且湿土对 Cl^- 、 Br^- 以及3种农药的迁移深度也比干土深。Quisenberry等^[45]发现当土壤含水量低于田间持水量,水和溶质的迁移深度不超过90 cm,而当初始含水量大于田间持水量时,大部分的水和溶质迁移深度都超过了90 cm。盛丰等^[34]认为初始含水量高的土壤中土壤水的入渗深度较大,但土壤含水率对染色面积的分布模式无显著影响。

另外,还有一些学者认为,初始含水量对水和溶质运移没有显著影响。如 Tallon 等^[46]认为,土壤初始含水量的显著差异并没有引起细菌及氯离子运移的差异。

2.4 降雨强度及灌溉方式

大孔隙流始于降雨或灌溉速率超过土壤入渗率或出现饱和流的时候,降雨强度及灌溉方式影响穿透时间及水流通量。程金花等^[47]研究了长江三峡花岗岩区天然降雨对优先流的影响,发现该区优先流产流的日降雨量在26 mm以上。Stone等^[4]通过二元径流分割计算出某2次降雨中小雨强长历时和大雨强短历时优先流的贡献率分别为11%和51%。Flury等^[36]发现传统的灌溉方式染色深度是喷灌的2倍。盛丰^[34]等认为入渗水量的增加将提高实际入渗的均匀程度,然而过多的增加初始水头高度对入渗的均匀性增长的影响是有限的。

2.5 耕作方式

多数研究结果表明:保护性耕作中,由于对土壤表层干扰较少,有利于土壤动物的生存,易在垂直方向上形成连通到地表的大孔隙,从而使导水率大大提高。McGarry等^[48]认为免耕可以增加土壤持水量、稳定入渗率以及总入渗量;李文凤等^[49]研究不同耕作方式下黑土的渗透性能和优先流特征,表明免耕土壤的稳定入渗率是秋翻土壤的1.35倍,累积渗透量是秋翻土壤的1.44倍,并且免耕土壤的染色深度(43 cm)明显大于秋翻土壤(27 cm)。

然而,也有少量研究表明,保护性耕作对土壤水分传导性质的改变不如传统耕作,Daraghmeh等^[50]比较了冬小麦生长过程中传统耕地(CT)和少耕(RT)两种耕作方式下砂壤土饱和导水率的变化特征,得出从耕种10月到翌年6月CT和RT方式下表层土壤饱和导水率变化范围分别为65—5 mm/h,

52—8 mm/h。Lipiec等^[51]认为相对于免耕或者少耕,传统耕作可以增加土壤入渗以及持水量。Hangen等^[52]应用亮蓝染色研究Luvisol和Podzolluvisol两种土壤类型下传统耕作和保护性耕作对大孔隙分布的影响,结果表明,Luvisol型土壤中,保护性耕作由于孔隙的连通性,最大染色深度为120 cm,而传统耕作仅为50 cm,而Podzolluvisol型土壤中,保护性耕作由于表面植物残体对水分的截留,而是染色深度仅仅为5 cm,而传统耕作达到了20 cm。

3 土壤大孔隙流量化方法

3.1 染色示踪法

染色示踪法应用最为广泛,主要用于大孔隙分布的研究。染色水流经过的区域,土壤被染色剂染成明显不同于土壤基底的颜色,从而将水流经过的区域和没有经过的区域划分开来^[53]。常用的染色剂有亮蓝、罗丹明B、荧光素、亚甲基蓝、碘离子等。Wang等^[54]挖取不同的土壤纵剖面,用亮蓝和淀粉-碘化钾两种染色剂分别示踪土壤大孔隙及大孔隙水流;李文凤等^[47]运用亚甲基蓝染料研究不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征;Wang等^[55]应用碳酸铵外加PH指示剂研究水分的运移通道。Morris等^[56]应用亮蓝染色示踪剂和图像分析技术,同时结合TDR观测剖面和穿透曲线作对比研究了大孔隙的物理形态特征以及优先流的发生机制。

除染料外,还有 Cl^- 、 Br^- 、 NO^- 等非吸附性无机离子、大肠杆菌和 ^3H 、 ^{36}Cl 、 ^{15}N 等放射性同位素等可用作示踪分析。在有些仅需利用示踪物反映水分运移路径的试验,可用与周围土壤颜色明显区别的红墨水或黑墨汁来示踪^[57]。Bouma和Anderson^[58]利用直接钻孔的办法制造5 mm内径的人造大孔隙,研究水及氯离子在大孔隙中的运移机理。Gazis等^[59]应用 ^{18}O 稳定同位素在降雨和土壤剖面水流中的不同组成,研究了混合流和优先流流路路径。另外,也有学者综合使用多种示踪剂。例如Allaire等应用亮蓝、罗丹明以及溴化钾3种示踪剂研究不同扭曲性及连通性孔隙对不同吸附性溶质运移的影响^[60-61]。倪余文等^[62]采用直径159 mm,高600 mm的填充土柱,利用玻璃棒在直径为100 mm的PVC土柱中制造一直径6 mm的连通大孔隙,进行了非吸附性离子

Br⁻ 和 NO₃⁻ 侧向入渗试验的研究; Flury 等研究壤土和砂土在不同水湿条件下 Br⁻、Cl⁻、亮蓝以及 3 种不同吸附性能的杀虫剂的运移情况^[37]。

最常见的图片处理方法是染色区与未染色区采用黑白两色区分进而分析大孔隙流染色特征, 即就是二元分类法。常见的特征指标有染色百分比、染色面积分数曲线、最大染色深度、50% 染色深度^[63]、最大染色深度/50% 染色深度^[63]、平均路径条数、染色路径宽度 (SPW) 等^[64]。最大染色深度/50% 染色深度是一个无量纲的数值, 是描述优先流的快速运动特征的一项指标, 其值越大, 表明优先流现象在较深土壤层越明显。SPW 首次由 Weiler 和 Hanes 提出, 他们以 SPW < 20 mm, 20—200 mm, > 200 mm 为标准, 统计各自所占的百分比例, 最终将水流运动模式分为五种类型^[64]。为了从染色图像中获取更多地信息, 对染色区进行蓝色等级再划分的多元分类图像处理技术也被提出, 旨在分析土壤剖面染色剂浓度分布情况^[64-65]。

染色方法的缺点是对土样的挖取具破坏性, 试验结果不能在同一地点重复获得; 有的染色剂可以被土壤基质吸附, 研究水分运移具有一定的迟滞性, 可用来研究相同吸附性能污染物的运移状况。染色示踪法常常与其他方法(穿透曲线法、水分特征曲线法、入渗仪法、切片法) 相结合对优势流与孔隙综合特征之间的关系予以补充。例如王伟等^[66]采用环刀对染色区和未染色区分层采样, 利用土壤水分穿透曲线量化大孔隙数量与分布特征。吴华山等^[67]将染色区分为 10 个等级, 并且与土壤水分特征曲线的结果予以对照, 结果表明白土和黄泥土 > 1 mm 的大孔隙含量与蓝色最深的两个等级之和的百分相当, 而乌栅土与蓝色最深的 3 个等级百分数之和相当。李文凤等^[49]将染色示踪和双环法相结合, 对连续 6 年的免耕与秋耕黑土进行水分入渗与优先流的对比研究。李德成^[68]等通过对原状土壤加入树脂、固化剂和荧光染料, 在紫外光下拍照并进行数字图像处理, 进而评价土壤孔隙变异度和复杂度。

3.2 CT 扫描法

CT 技术是一种无损的 3D 成像技术, 土样经过 CT 扫描仪扫描后, 扫描物体不同密度区就可以在图像中以不同亮度表示, 土壤大孔隙就可以清晰地显示出来^[69]。Peyton 等利用 X 射线 CT 扫描的方法对

大孔隙的结构进行了分析, 计算了孔隙的分形维数^[70]。Luo^[71-73]等应用 X 射线扫描并通过图像三维提取得出大孔隙的大孔隙度、密度、平均扭曲度, 节点密度、水力半径、网络密度、倾斜角度、路径条数等指标。冯杰^[74]等对含有各种大孔隙的原状土柱和已知直径大孔隙的填充土柱进行 CT 扫描, 得到大孔隙数目、大小、形状和连通性的分布情况。赵世伟^[75]等利用 CT 扫描, 得出土壤孔隙数、孔隙度、孔隙成圆率和分形维数等孔隙参数。

与其它一些观测方法相比, CT 扫描测定快速方便, 不会破坏土壤的原有结构, 而且精确地揭示大孔隙的数目、大小、形状以及连通性指标, 具有优越的发展前景。然而, CT 扫描费用较高, 并且目前普遍使用的是医用扫描仪, 土壤孔隙扫描以及图片处理对分辨率有一定的要求, 因此研发专门供土壤孔隙研究的 CT 扫描仪成为目前要解决的一大技术难题。

3.3 穿透曲线法

土壤溶质穿透曲线是人们认识和研究土壤孔隙特性和溶质迁移机制的一个重要手段。穿透曲线实验多在室内进行, 室内实验是从实验地取原状土柱或在填充土柱中人为设置大孔隙。各种土柱准备好以后, 在土柱表面施用染色剂或示踪剂, 然后人工模拟降雨或施入一定深度水量, 观察初时出流的时间, 计算滞后时间及在一定时间内流出水量, 分析其中的示踪剂含量, 得出示踪剂穿透曲线。出流完成以后, 可以将土柱不同部位切开, 观察染色剂染色情况, 计算大孔隙度^[76]。

穿透曲线的较早初始穿透、拖尾和双峰现象以及曲线的不对称性可清晰地表示出大孔隙的作用^[77]。Radulovich^[78]利用基本流量方程和 Poiseuille 方程计算大孔隙半径, 这里的大孔隙半径代表每次收集出流溶液阶段(4—5s) 内导水大孔隙的平均半径, 然后计算从开始排水到饱和稳定流阶段大孔隙的大小分布。吕刚^[79]等同样用水分穿透法研究了辽西半干旱区 8 种植被类型下土壤大孔隙的半径范围、个数及分布情况。Li 等^[80]研究了含有人工制造大孔隙的 3 种土质的穿透曲线, 发现在给定通量的前提下, 与粗质结构土壤相比, 优先流更易发生在细质结构中; 郭会荣等^[81]通过室内土柱试验, 人工制造大孔隙的方法, 模拟了优先流条件下的穿透曲线, 得出了大孔隙越发育, 优先流对穿透曲线的贡献量

越大的结论。

3.4 渗透仪法

利用渗透仪控制入渗液水头梯度,测得的不同张力条件下的孔隙渗透速度来计算土壤大孔隙分布。根据毛管上升公式和 Poiseulle 公式,可对大孔隙进行分级,计算单位面积大孔隙数量和大孔隙度,从而可以得到大孔隙的分布。Clothier 等^[82]最早介绍如何使用圆盘式渗透仪确定低张力条件下土壤孔隙水的入渗速度;Wilson 等^[83]使用张力渗透仪估计了森林流域大孔隙度。Cey 等^[23]将染色示踪与张力入渗仪结合起来,发现-3 cm 进水压力是产生大孔隙流的临界水头。Holden^[84]等应用张力入渗仪研究不同覆被条件下大孔隙特征,表明在 0—20cm 土壤层中,半径小于 0.25 mm 的土壤孔隙仅能解释 22% 的水流通量。Carey 等^[85]通过入渗实验以及图像分析研究亚北极地区有机土壤不同等级孔隙对水的传导作用,发现输水总孔隙度(内径大于 1 mm,具有传导水分功能的孔隙)为 1.1×10^{-4} ,虽然仅占总孔隙度 0.01%,却能够解释约 65% 的水流通量。相比于张力计,Hood 入渗仪可减小因地表扰动,引起的水力参数的变化,省时省力^[86]。Bucako 等应用 Hood 入渗仪研究耕作方式对水力参数及大孔隙度的影响^[87]。

3.5 数学模型法

以上大孔隙和大孔隙流的实验研究方法大都需要耗费巨大的人力物力,多数只能进行定性和形态学的研究,不能作出定量的判断。因而发展了许多有关大孔隙流的数学模型。目前研究中主要的数学模型有:可动-不可动模型、双重孔隙度型、多域模型、数值模型、两阶段模型、多尺度平均模型、随机模型等^[76]。Weiler^[88]应用染色示踪剂喷洒试验与双渗透率模型研究方法,结合土壤大孔隙的变动性,研究了 IN³M 入渗模型。Gärdenäs 等^[8]应用可动-不可动、双重孔隙度、双重渗透性等模型模拟污水和农药在土壤中的渗滤过程,结果表明双重渗透性模型可以更好的描述优先排泄流。Stump 等^[89]分别采用 numerical transient model (Hydrus1D) 和 lumped dispersion model (DM) 来模拟天然降雨条件下含大孔隙土柱的水分运移,得出优先流对出流通量的贡献率分别为 0.85 mm/周和 0.42 mm/周。吴继强^[90]等应用双重渗透率模型并结合 Hydrus2D 软件模拟不

同深度大孔隙土壤水分运移情况,结果表明效果良好。

4 大孔隙流研究存在问题及发展趋势

大量的田间试验及室内试验使人们对大孔隙流有了更加深刻的认识,然而,仍然有许多问题有待于深入的研究。

4.1 缺乏统一标准

由于大孔隙几何形状的多样性、空间分布的复杂性和形成的多因素性,大孔隙的定义至今未达成共识。张家明等从定性和定量两个角度综述目前大孔隙的定义,发现无论是定性还是定量,大孔隙的定义都存在很大的差异,有的甚至互相矛盾。测量方法的不同以及孔隙时效稳定性是导致结果差异性的主要原因^[91]。例如穿透法、渗透仪法实质上测定的是孔隙“瓶颈”大小,实际结果偏小。而染色法中并不是所有的染色区域都是孔隙,量化结果往往偏大^[2],因此有必要建立一种标准化孔隙量化方法,促进不同方法之间的比较。另外,目前研究大孔隙流的室内外试验设备都是根据自己的试验要求组装而成,如室内试验中的土柱,室外试验中入渗仪、染色试验布置,其在大小、形状、监测装置等都缺乏统一的标准。

对大孔隙进行准确的定义,建立标准化量化方法,研发标准实验设备,形成统一的判断标准,才能够使众多研究学者有标可寻,同时促进研究结果的一致性和对比性分析。

4.2 建模的局限性

定量描述大孔隙流已成为学术界亟待解决的难题,然而在数学模型的研究中,需要确定很多的模型参数,通常情况下这些参数是通过实验获得,还不能通过理论推导出来,同时,模型研究大都有假设条件,与真正的大孔隙流水分运移存在一定的差距,加上时空尺度效应,各种描述大孔隙流的数学模型均有不足之处。目前,最关键的问题是解决大孔隙流和土壤水分运动参数之间的关系,即就是大孔隙与土壤水分特征曲线、导水率之间的关系。土壤水分特征曲线是土壤水基质势与土壤含水量之间的关系,土壤导水率是基质势的函数。土壤水分特征曲线影响因素复杂,至今上没有从理论上建立土壤含水量与土壤水基质势之间的关系,通常用经验公式

描述,常用的有 Brooks-Corey 模型和 Van Genuchten 模型,都存在自身的局限性。深入研究土壤水基质势、含水量及导水率的关系,解决基础理论是完善模型、准确预测的基础。

4.3 运移机理尚不明确

目前,在模拟非饱和土壤大孔隙流时,通常认为当土壤基质的水利传导度低于降雨强度或接近表面的土壤是饱和时,大孔隙流即会产生。但 Nimmo^[92]等列举出大量的实例证明大孔隙流在土壤表层未达到饱和甚至干燥土壤也会产生大孔隙流。他指出可能存在两点原因:(1) 孔隙连通性(2) 土壤斥水性。斥水性使土壤不能或很难被水湿润,斥水性的临界土壤含水量是多少? 斥水性、土壤含水量、大孔隙流三者之间的关系如何? 以及土壤含水量对孔隙连通性的响应等方面的研究可促进对大孔隙流运移机理的理解。

土壤本身性质(质地、结构、孔隙度、含水量、有机质含量、导水率、土壤微生物等)和外界环境(降雨、气候类型、植被类型、动物生境、枯枝落叶、耕作方式等)共同影响着土壤中孔隙流,各因素对孔隙流影响机制及影响程度大小、大孔隙流产生的影响因子临界值、影响因素之间的协同、交互、拮抗作用等方面的研究仍不是十分透彻。

单独大孔隙内、大孔隙与大孔隙间,大孔隙域与基质域间水分运移机理,水分界面与土壤界面之间物理机制等微观方面研究目前难度系数仍较大,需要研发高精度的仪器设备作为依托。

4.4 尺度效应

在空间尺度上,大孔隙流的研究主要围绕四种尺度展开:孔隙尺度、剖面尺度、试验田尺度和流域尺度。目前的研究主要基于孔隙尺度及剖面尺度,而试验田尺度及流域尺度研究较少。土壤的空间变异决定了小尺度的研究与实际状况之间必存在难以调和的差距,实验结果往往误差较大,难以反映真实的状况。在时间尺度上,基于染色、CT 扫描、穿透试验等方法研究大孔隙流均是某一瞬时时间的孔隙状况,而孔隙的生长与消亡是处于不断的运动之中的,这样势必会影响实验结果的代表性。

大尺度、长时间序列研究是探索大孔隙流规律必不可少。目前已有学者利用先进的水分连续监测仪器如 TDR^[93],多传感电容探针^[94]获取长时间序列

水分运移数据,分析湿润锋运移速率,优先流深度以及各影响因子对优先流的影响。另外,将同位素技术应用到大孔隙流的研究中,可获取较长时间序列及较大空间范围的数据,一定程度上促进了大孔隙流的发展。如 Vogel 等利用 $\delta^{18}\text{O}$ 研究了优先流在坡地产流中的运移路径及贡献量^[95]。

除以上所述,土壤大孔隙中气体扩散机理,冻土、湿地、喀斯特区域等特殊土壤类型大孔隙运移机理、黄土干层与土壤大孔隙流之间关系等也是未来大孔隙流研究的发展方向

5 结语

大孔隙流是一种快速非平衡的土壤水分运动,开展大孔隙流的详细研究,是准确进行污染物风险评估的前提,同时对于确定灌溉、施肥、以及种植作物方案,保证生态环境向良性方向发展具有重要的现实意义。虽然大量的田间及室内实验使人们对大孔隙流有了更多地认识,然而由于土壤大孔隙时空变异性极强、影响因素繁多,仍存在不少难点问题亟待解决。因此,在当前和未来较长一段时间内,有关大孔隙流问题的研究应侧重于进行大量的田间及室内实验,改善现有研究大孔隙流的方法、技术,引进新的先进技术,从而获得足够多的数据资料,完善大孔隙流研究理论,最终提高模拟精度。

References:

- [1] Allaire S E, van Bochove E, Denault J T, Dadfar H, Thériault G, Charles A, De Jong R. Preferential pathways of phosphorus movement from agricultural land to water bodies in the Canadian Great Lakes basin: A predictive tool. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(3): 361-374.
- [2] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1): 179-204.
- [3] Lindahl A M L, Bockstaller C. An indicator of pesticide leaching risk to groundwater. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 95-108.
- [4] Stone W W, Wilson J T. Preferential flow estimates to an agricultural tile drain with implications for glyphosate transport. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(5): 1825-1835.
- [5] Clothier B E, Green S R, Deurer M. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science*, 2007, 59(1): 2-13.
- [6] Zhang H J, Cheng J H, Shi Y H, He F, Qi S L, Cheng Y. Response of preferential flow to rainfall on the forestland slope in

- the granite area of Three Gorges. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(5): 6-9.
- [7] Hao Z C, Feng J. Recent advances in water and solute movement in macro-porous soil. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(1): 67-71.
- [8] Gärdenäs A I, Šimůnek J, Jarvis N, Van Genuchten M T. Two-dimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3): 647-660.
- [9] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [10] Hursh C R, Hoover M. Soil profile characteristics pertinent to hydrologic studies in the Southern Appalachians. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 1941, 6: 414-422.
- [11] Li Y M, Ghodrati M. Preferential transport of nitrate through soil columns containing root channels. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 653-659.
- [12] Noguchi S, Rahim Nik A, Kasran B, Tani M, Sammori T, Morisada K. Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia. *Journal of Forest Research*, 1997, 2(2): 115-120.
- [13] Jian S Q, Zhao C Y, Peng H H, Fang S M, Liu Y Y. Root influence on soil macropores by dye tracing and image processing technology. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2011, 47(5): 62-66.
- [14] Wang X D, Li G B, Wang D W, Xue B M. Research on features and ecological function of plant root channel. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, 3(1): 74-78.
- [15] Meek B D, Rechel E A, Carter L M, DeTar W R. Changes in infiltration under alfalfa as influenced by time and wheel traffic. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(1): 238-241.
- [16] Gish T J, Jury W A. Effect of plant roots and root channels on solute transport. *American Society of Agricultural Engineers*, 1983, 26(2): 440-444.
- [17] Meek B D, DeTar W R, Rechel E R, Carter L M, Rolph D. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(2): 505-508.
- [18] Meek B D, Rechel E R, Carter L M, DeTar W R, Urie A L. Infiltration rate of a sandy loam soil: effects of traffic, tillage, and plant roots. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 908-913.
- [19] Mitchell A R, Ellsworth T R, Meek B D. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26(15/16): 2655-2666.
- [20] Wang D L, Yin C Q. Functions of root channels in the soil system. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 869-874.
- [21] Shipitalo M J, Butt K R. Occupancy and geometrical properties of *Lumbricus terrestris* L-burrows affecting infiltration. *Pedobiologia*, 1999, 43(6): 782-794.
- [22] Capowiez Y, Monestiez P, Belzunces L. Burrow systems made by *Aporrectodea nocturna* and *Allolobophora chlorotica* in artificial cores: morphological differences and effects of interspecific interactions. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(2): 109-120.
- [23] Cey E E, Rudolph D L. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils. *Hydrological Processes*, 2009, 23(12): 1768-1779.
- [24] Green R D, Askew G P. Observations on the biological development of macropores in soils of Romney Marsh. *Journal of Soil Science*, 1965, 16(2): 342-344.
- [25] Qin Y D, Ren L, Wang J. Review on the study of macropore flow in soil. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2): 203-207.
- [26] Qu Z Q, Jia L Q, Jin H Y, Jiang X, Zhang Q, Gao J H. Macropores and preferential flow and their effects on pollutant migration in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3): 341-347.
- [27] Liu M X, Wang W D, Zhang H L, Du W Z. Forest soil macropore of different altitudinal zones with dye tracing method in Three Gorges Reservoir area. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(2): 147-155.
- [28] Greve A, Andersen M S, Acworth R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 105-113.
- [29] Lamandé M, Labouriau R, Holmstrup M, Torp S B, Greve M H, Heckrath G, Iversen B V, De Jonge L W, Moldrup P, Jacobsen O H. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands. *Geoderma*, 2011, 162(3): 319-326.
- [30] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 523-546.
- [31] Li D C, Velde B, Zhang T L. Image comparison on structures between cracks and other types of pores. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1): 57-60.
- [32] Chertkov V Y, Ravina I. Tortuosity of crack networks in swelling clay soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1523-1530.
- [33] Merdun H. Factors affecting preferential flow. *Journal of Science and Engineering*, 2004, 7(2): 90-94.
- [34] Sheng F, Fang Y. Study on preferential soil water flow using iodine-starch staining method. *Soils*, 2012, 44(1): 144-148.
- [35] Sheng F, Fang Y, Zhang R D. The impacts of soil texture on water flow heterogeneity with dye staining methods. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1): 25-30.
- [36] Flury M, Flüthler H, Jury W A, Leuenberger J. Susceptibility of

- soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 1945–1954.
- [37] Flury M, Leuenberger J, Studer B, Flühler H. Transport of anions and herbicides in a loamy and a sandy field soil. *Water Resources Research*, 1995, 31(4): 823–835.
- [38] Chen X M, Huang D A, Wu H S. Characteristics of macropores and their affecting factors of major paddy soils in Taihu Lake region. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 509–512.
- [39] Zhao J N. Study on macropore flow in soils under different land use types in Changwu tableland. Beijing, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [40] Bodhinayake W, Cheng Si B. Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada. *Hydrological Processes*, 2004, 18(15): 2835–2850.
- [41] Edwards W M, Shipitalo M J, Owens L B, Dick W A. Factors affecting preferential flow of water and atrazine through earthworm burrows under continuous no-till corn. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(3): 453–457.
- [42] Shipitalo M J, Edwards W M. Effects of initial water content on macropore/matrix flow and transport of surface-applied chemicals. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(4): 662–670.
- [43] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, Holz G, Lisson S, Mattern K. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *Journal of Hydrology*, 2011, 398(3): 191–201.
- [44] Merdun H, Meral R, Riza Demirkiran A. Effect of the initial soil moisture content on the spatial distribution of the water retention. *Eurasian Soil Science*, 2008, 41(10): 1098–1106.
- [45] Quisenberry V L, Phillips R E. Percolation of surface-applied water in the field. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(4): 484–489.
- [46] Tallon L K, Si B C, Korber D, Guo X. Soil wetting state and preferential transport of *Escherichia coli* in clay soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 2007, 87(1): 61–72.
- [47] Cheng J H, Zhang H J, Shi Y H, He F, Qi S L, Sun Y H. Affecting factors of preferential flow in forest of Three Gorges area, Yangtze River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 28–33.
- [48] McGarry D, Bridge B J, Radford B J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(2): 105–115.
- [49] Li W F, Zhang X P, Liang A Z, Shen Y, Shi X H, Luo J M, Yang X M. Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1506–1510.
- [50] Daraghmech O A, Jensen J R, Petersen C T. Near-saturated hydraulic properties in the surface layer of a sandy loam soil under conventional and reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1728–1737.
- [51] Lipiec J, Kuś J, Słowińska-Jurkiewicz A, Nosalewicz A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(2): 210–220.
- [52] Hangen E, Buczko U, Bens O, Brunotte J, Hüttl R F. Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil and Tillage Research*, 2002, 63(3): 181–186.
- [53] Sheng F, Wang K, Zhang R D, Li E. Study on heterogeneous characteristics of soil water flow in field by dye tracing method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(1): 101–108.
- [54] Wang K, Zhang R D. Heterogeneous soil water flow and macropores described with combined tracers of dye and iodine. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(1/2): 105–117.
- [55] Wang Z, Lu J H, Wu L S, Harter T, Jury W A. Visualizing preferential flow paths using ammonium carbonate and a pH indicator. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 347–351.
- [56] Morris C, Mooney S J. A high-resolution system for the quantification of preferential flow in undisturbed soil using observations of tracers. *Geoderma*, 2004, 118(1): 133–143.
- [57] Niu J Z, Yu X X, Zhao Y T, Zhang D S, Chen L H, Zhang Z Q. Study of soil preferential flow in the dark coniferous forest of gongga mountain, China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(5): 732–742.
- [58] Bouma J, Anderson J L. Water and chloride movement through soil columns simulating pedal soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(4): 766–770.
- [59] Gaziz C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, 119(1): 97–111.
- [60] Allaire-Leung S E, Gupta S C, Moncrief J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 41(4): 283–301.
- [61] Allaire-Leung S E, Gupta S C, Moncrief J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore tortuosity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 41(3): 303–315.
- [62] Ni Y W, Qu Z Q, Ying P F. Preferential flow and its effect on solute migration in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 103–107.
- [63] Wang K, Zhang R D, Jiao X Y. Characterizing heterogeneity of water flow and solute transport in the porous media using dye tracer. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 662–667.
- [64] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137–153.

- [65] Aeby P, Stähli D, Aeby P, Flüher H. Dye tracing and image analysis for quantifying water infiltration into frozen soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 505–516.
- [66] Wang W, Zhang H J, Cheng J H, Wu Y H, Du S C, Wang R. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of Simian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1217–1223.
- [67] Wu H S, Chen X M, Qiu L, Wo F. Study on quantity of macropore in farmland soils with computer interpretation and coloration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 145–149.
- [68] Li D C, Velde B, Zhang T L. Quantitative estimation of pore variability and complexity in soils by digital image method. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 678–682.
- [69] Cao S A. Study on Preferential Flow and Their Influence on Nitrogen Migration of Paddy Soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [70] Peyton R L, Haefner B A, Anderson S H, Gantzer C J. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. *Geoderma*, 1992, 53(3): 329–340.
- [71] Luo L F, Lin H, Schmidt J. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1929–1937.
- [72] Luo L F, Lin H, Halleck P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using x-ray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1058–1069.
- [73] 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. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 53–64.
- [74] Feng J, Hao Z C. Distribution of soil macropores characterized by CT. *Advance in Water Science*, 2002, 13(5): 611–617.
- [75] Zhao S W, Zhao Y G, Wu J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 617–625.
- [76] Feng J. Study on Mechanism of Water and Solute Transport in Soil with Macropores [D]. Nanjing: Hohai University, 2001.
- [77] Feng J, Hao Z C. Advances in study of water and solute transport mechanism in macroporous soil. *Journal of Hohai University*, 2002, 30(2): 63–70.
- [78] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(2): 556–559.
- [79] Lu G, Wang H L, Huang L. A study on macropore properties of forest soil in semi-arid region of Western Liaoning province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(5): 176–181.
- [80] Li Y M, Ghodrati M. Preferential transport of solute through soil columns containing constructed macropores. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(5): 1308–1317.
- [81] Guo H R, Jin M G, Wang Y. Quantitative evaluation of preferential flow based on laboratory breakthrough experiments of soil columns. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(6): 101–106.
- [82] Clothier B E, White I. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(2): 241–245.
- [83] Wilson G V, Luxmoore R J. Infiltration, macroporosity, and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2): 329–335.
- [84] Holden J. Flow through macropores of different size classes in blanket peat. *Journal of Hydrology*, 2009, 364(3/4): 342–348.
- [85] Carey S K, Quinton W L, Goeller N T. Field and laboratory estimates of pore size properties and hydraulic characteristics for subarctic organic soils. *Hydrological Processes*, 2007, 21(19): 2560–2571.
- [86] Schwärzel K, Punzel J. Hood infiltrometer—A new type of tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1438–1447.
- [87] Buczko U, Bens O, Hüttl R F. Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(6): 1998–2007.
- [88] Weiler M. An infiltration model based on flow variability in macropores: development, sensitivity analysis and applications. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1/4): 294–315.
- [89] Stumpp C, Maloszewski P. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope d18O. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3): 407–415.
- [90] Wu J Q. Experimental study on characteristics of macropore flow and solute preferential transport in unstatuated soils. Xi'an, Xi'an University of Technology, 2010.
- [91] Zhang J M, Xu Z M, Pei Y G. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(4): 439–449.
- [92] Nimmo J R. Preferential flow occurs in unsaturated conditions. *Hydrological Processes*, 2012, 26(5): 786–789.
- [93] Merdun H. Investigation of interactive effects on water flow and solute transport in sandy loam soil using time domain reflectometry. *Sensors (Basel)*, 2012, 12(7): 9749–9772.
- [94] Hardie M, Lisson S, Doyle R, Cotching W. Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, 144(1): 66–77.
- [95] Vogel T, Sanda M, Dusek J, Dohnal M, Votrubova J. Using oxygen-18 to study the role of preferential flow in the formation of hillslope runoff. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2): 252–259.

参考文献:

- [6] 张洪江,程金花,史玉虎,何凡,祁生林,程云. 三峡库区花岗岩林地坡面优先流对降雨的响应. 北京林业大学学报, 2004, 26(5): 6-9.
- [7] 郝振纯,冯杰. 水及溶质在大孔隙土壤中运移的实验研究进展. 灌溉排水, 2002, 12(1): 67-71.
- [13] 荐圣淇,赵传燕,彭焕华,方书敏,柳逸月. 利用染色示踪与图像处理术研究根系对土壤大孔隙的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 62-66.
- [14] 王学东,李贵宝,王殿武,薛宝民. 植物根孔的特性及其生态功能研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(1): 74-78.
- [20] 王大力,尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能. 生态学报, 2000, 20(5): 869-874.
- [25] 秦耀东,任理,王济. 土壤中孔隙流研究进展与现状. 水科学进展, 2000, 11(2): 203-207.
- [26] 区自清,贾良清,金海燕,姜霞,张彬,高继红. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响. 土壤学报, 1999, 36(3): 341-347.
- [27] 刘目兴,王文德,张海林,杜文正. 三峡库区不同垂直带森林土壤大孔隙染色实验. 山地学报, 2012, 30(2): 147-155.
- [31] 李德成, Velde B, 张桃林. 土壤中裂隙与其它类型孔隙结构差异的图像比较. 土壤与环境, 2002, 11(1): 57-60.
- [34] 盛丰,方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究. 土壤, 2012, 44(1): 144-148.
- [35] 盛丰,方妍,张仁铎. 运用染色示踪方法研究土壤质地对土壤水非均匀流动特征的影响. 土壤通报, 2012, 43(1): 25-30.
- [38] 陈效民,黄德安,吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究. 土壤学报, 2006, 43(3): 509-512.
- [39] 赵娇娜. 长武塬区不同土地利用类型土壤大孔隙流研究[D]. 北京, 中国科学院研究生院, 2012.
- [47] 程金花,张洪江,史玉虎,何凡,祁生林,孙艳红. 长江三峡花岗岩区林地优先流影响因子分析. 水土保持学报, 2006, 20(5): 28-33.
- [49] 李文凤,张晓平,梁爱珍,申艳,时秀焕,罗金明,杨学明. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1506-1510.
- [53] 盛丰,王康,张仁铎,李萼. 田间尺度下土壤水流非均匀运动特征的染色示踪研究. 水利学报, 2009, 40(1): 101-108.
- [57] 牛健植,余新晓,赵玉涛,张东升,陈丽华,张志强. 贡嘎山暗针叶林土壤优先流形成因素的初步研究. 植物生态学报, 2006, 30(5): 732-742.
- [62] 倪余文,区自清,应佩峰. 土壤优先水流及溶质优先迁移的研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 103-107.
- [63] 王康,张仁铎,缴锡云. 多孔介质中非均匀流动特性的染色示踪试验研究. 水科学进展, 2007, 18(5): 662-667.
- [66] 王伟,张洪江,程金花,吴煜禾,杜士才,王冉. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [67] 吴华山,陈效民,邱琳,沃飞. 染色法测定、计算机解译农田土壤中孔隙数量的研究. 水土保持学报, 2006, 20(3): 145-149.
- [68] 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. 土壤学报, 2003, 40(5): 678-682.
- [69] 曹顺爱. 稻田土壤优先流及其对氮肥运移的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [74] 冯杰,郝振纯. CT扫描确定土壤大孔隙分布. 水科学进展, 2002, 13(5): 611-617.
- [75] 赵世伟,赵勇钢,吴金水. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 223-231.
- [76] 冯杰. 水及溶质在有大孔隙的土壤中运移机制研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [77] 冯杰,郝振纯. 水及溶质在有大孔隙的土壤中运移机制研究进展. 河海大学学报, 2002, 30(2): 63-70.
- [79] 吕刚,王洪禄,黄龙. 辽西半干旱区森林土壤大孔隙特征研究. 水土保持通报, 2012, 32(5): 176-181.
- [81] 郭会荣,靳孟贵,王云. 基于室内土柱穿透实验的优先流定量评价. 地质科技情报, 2009, 28(6): 101-106.
- [90] 吴继强. 非饱和土壤中孔隙流及溶质优先迁移基本特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [91] 张家明,徐则民,裴银鸽. 植被发育斜坡非饱和带大孔隙. 山地学报, 2012, 30(4): 439-449.