

荒漠绿洲土壤优先流研究进展

张勇勇¹, 富利², 赵文智¹, 闫加亮³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域研究站/内陆流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619)

摘要: 荒漠绿洲土壤受干湿交替、冻融作用和土壤特性等非生物因素和动物洞穴、植物根系生物因素影响, 存在大孔隙。水分和溶质优先沿着相互连通的大孔隙快速补充到土壤深层或浅层地下水, 引起绿洲农田水分、养分损失; 大孔隙存在, 增强了土壤通气性, 促进农田地力提升。荒漠绿洲土壤优先流的发生, 减少地表径流及其侵蚀, 促进水分入渗, 影响着干旱区植被恢复和地下水补给。重点分析影响荒漠绿洲土壤优先流的非生物和生物因素, 综述优先流对该区土壤性质和水文要素的影响。未来该区研究应重视以下几个方面: (1) 加强大孔隙三维空间构型的研究, 分析大孔隙结构与土壤优先流发生的内在机制; (2) 开展不同景观类型土壤优先流的野外监测, 认识土壤优先流的运动规律, 揭示荒漠绿洲土壤优先流与植被互馈机制; (3) 发展并构建荒漠绿洲土壤优先流运动的动力学模型。

关键词: 荒漠绿洲; 优先流; 大孔隙; 土壤水分运动

文章编号: 1000-694X(2017)06-1189-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2017.00083

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

0 引言

荒漠绿洲区干湿交替作用产生裂隙、冻融的循环交替、蚯蚓等土壤动物的活动、植物根系和人类长期耕作开垦等活动, 使得土壤中存在大孔隙。优先流(preferential flow)指水分和溶质优先沿着相互连通的大孔隙、裂隙、虫穴洞以及作物根孔等通道, 绕过大部分土壤基质快速到达土壤深层或浅层地下水^[1-5]。干旱区水资源紧缺, 优先流引起绿洲农田水分、养分的损失, 降低了资源利用效率, 增加了地下水污染的风险。荒漠区优先流减少了地表径流及其产生的侵蚀, 促进水分入渗, 影响着土壤水分分布格局和地下水补给。优先流促进土壤水分和养分在植被根部累积, 有利于干旱区植被恢复。在干旱荒漠绿洲区, 室内和野外试验均证实优先流是土壤水分运动过程中的普遍现象^[6-8]。因此, 研究干旱区土壤优先流, 有利于明确土壤水分运动, 理解植被分布特征和维持绿洲生态系统稳定。

荒漠绿洲区是由绿洲农田、草地、林地和沙地镶嵌组成的景观格局, 景观类型多样^[9-10]。该区降雨量少、蒸散量大, 风沙活动强烈, 包气带土壤含水量小^[11-12]; 土壤层薄且多呈砂性, 土壤类型主要是绿

洲灌淤土, 部分土壤为自然荒漠土壤(灰棕漠土和风砂土)开垦后形成的灌漠土; 水分入渗是该区地下水资源补给的重要来源之一^[13], 干旱区的降雨/灌溉水在包气带中的运动主要有3种去向, 一是通过下渗补给地下水, 二是通过径流汇集在低洼地段再在局地补给地下水, 三是存贮在土壤中^[14-16]。以往荒漠绿洲区土壤水分运动的研究多关注活塞流^[17-18], 而对土壤水运动过程中优先流现象的野外观测重视不够, 土壤优先流的运动规律及其影响机制研究尚且不足, 从而导致量化灌溉入渗补给量和补给系数存在偏差, 增加了水量平衡估算难度和不确定性^[3]。优先流的存在使得土壤水分运动时空变异性增强, 准确描述干旱区土壤优先流的运动机制仍存在挑战。本文归纳总结了荒漠绿洲土壤优先流的成因以及优先流对该区土壤特性和水文要素的影响, 并展望了未来干旱区土壤优先流的研究重点。以期明确土壤优先流发生机制, 拓展非均匀性流土壤水分运动在干旱区的理论研究, 揭示绿洲地表水与地下水转换规律, 维持绿洲生态系统的健康稳定。

1 荒漠绿洲土壤优先流影响因素

土壤水分入渗过程是地下水-土壤-植被-大气

收稿日期: 2017-07-14; 改回日期: 2017-09-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41401036, 41630861); 中国博士后科学基金项目(2014M560818, 2015T81070); 国家留学基金项目

作者简介: 张勇勇(1986—), 男, 陕西旬邑人, 副研究员, 博士, 主要从事荒漠绿洲土壤物理与水文过程研究。E-mail: zhangxy23@126.com

连续系统(GSPAC)水循环过程中重要组成部分^[19],包气带土壤水入渗主要以活塞流和快速非平衡的优先流两种运动形式发生^[20-22]。优先流也称非均匀流,是与土壤活塞流相对应的概念,描述土壤复杂环境下发生的非平衡流过程^[8,23],具有环绕特征、非平衡特性,运动快且会产生侧向入渗过程^[21,23]。荒漠绿洲土壤优先流的产生及其特征主要受到土壤质地和结构、裂隙、土壤水分等非生物因素和动物洞穴、植被根系生物因素的综合影响^[24-25]。明确荒漠绿洲优先流产生的关键影响因素,有助于揭示不同景观类型优先流运动过程及其与植被互馈机制。

1.1 土壤质地与结构

黏土矿物的种类、含量是绿洲灌淤土大孔隙产生的基础;土壤的膨胀和收缩能力随着黏粒含量的增加呈增加趋势^[26-28],主要与膨胀性黏土矿物种类、数量有关。研究表明,当黏粒含量高于8%时,土壤容易发生大孔隙流^[29-30];因为土壤粘粒含量超过8%时,形成比较稳定的土壤团聚体,建立有利于根系和土壤动物生存的土壤环境,从而促进大孔隙的形成。不同质地结构的土壤,其持水能力和水分状况不同,影响着优先流发生的表现形态,优先流现象通常在粉沙和粘质土壤中出现^[31]。绿洲农田土壤的大孔隙主要分布在0~20 cm耕作层,犁底层大孔隙分布少;结构良好的土壤中,具有相互连通的大孔隙结构,更容易诱发优先流现象。发育成熟的老绿洲灌淤土具有相对多且连续的土壤大孔隙,土壤优先流现象更容易激发^[32]。随着开垦年限延长,绿洲农田灌溉携带淤泥增加了土壤粘粉粒含量,施用有机肥料促使土壤有机质增加,稳定的土壤团聚体增多导致土壤大孔隙数量、孔隙度、表面积和体积均增大,大孔隙的三维立体结构分布愈明显。

1.2 土壤裂隙

由于灌溉和冻融作用,绿洲农田土壤经常处于干湿交替的水分状况,而干湿交替的次数、强度等因素均会影响土壤裂隙的产生及其特征。绿洲农田生长季干湿交替频繁,河水灌溉携带的淤泥易在土壤表层累积形成粘土层,干旱时缺水产生龟裂^[33]。土壤结构随绿洲开垦年限分层现象明显,形成上覆土壤质地较细。受到耕作和非生长季冻融作用的影响,土壤在干燥脱水的过程中易收缩产生裂隙。即使土壤表层湿润,裂隙发生后闭合仍可作为优先流

的通道^[34]。随着土壤水分的变化,干湿交替过程不断持续,土壤收缩能力呈下降趋势,而裂隙的数量呈增长趋势,增加了土壤孔隙度,改变了土壤的孔隙分布特征^[35]。干旱区绿洲农田的地下水埋深浅,干湿交替或冻融作用形成的裂隙很容易作为土壤优先流路径,增加了灌溉深层渗漏和地下水污染的风险。

1.3 土壤水分

干旱荒漠绿洲区年降水量100 mm左右,年蒸发量2 000 mm以上^[36],蒸散量较大,包气带土壤含水量小,土壤水分是导致该区优先流发生的重要因素之一。结构良好的土壤中,初始土壤含水量对优先流的影响较显著。初始含水量主要对土壤优先流的形态特征、最大入渗深度和运移速率有重要影响作用^[37]。土壤含水量较低时,裂隙发育得较好,优先流现象明显,且水分入渗深度远^[37]。土壤颗粒干燥存在斥水性,阻碍了水分均匀入渗,形成不稳地、不规则的湿润锋,易形成指流或不稳定流。绿洲农田平均灌溉量120 mm时,优先流的最大入渗深度为 $(43.1 \pm 5.9) \text{ cm}$ ^[38],随着灌溉量的增加,土壤中的水分不仅以优先流的形式入渗到土壤深层,而且沿优先流路径向土壤基质扩散的程度增加;优先流路径参数均匀染色深度和最大染色深度均随着灌溉量的增加呈增大的趋势^[38]。

1.4 土壤动物

荒漠绿洲区土壤动物以节肢动物、线虫、蚯蚓和蚂蚁为主,有相当的多度和丰富度,不同植被类型之间土壤动物的个体数量和物种丰富度存在显著差异^[39-40]。土壤动物能够通过疏松土壤增加孔隙度,其洞穴本身就是土壤大孔隙的重要来源。动物洞穴产生的大孔隙一般具有连续性,相对比较长,呈管状。土壤动物通过挖掘洞穴,建立了地表和地下水分和养分联系,激发了优先流现象,影响着土壤水分的运动过程。蚯蚓洞穴对绿洲农田地表水及杀虫剂向浅层地下水的运移有重要贡献。蚯蚓洞穴的深度达100 cm时,不仅作为水流的快速通道,还可以和裂隙发生连通,促使土壤溶质快速向土壤深层渗透^[41]。免耕农田比耕作农田的蚯蚓丰富度和生物量大,导致土壤大孔隙增多,所以免耕农田灌溉入渗量是耕作农田的1.4~2.0倍,地表径流量减少^[42]。蚂蚁洞穴增加了土壤优先流最大入渗深度的不确定性,绿洲农田受到蚂蚁洞穴的影响,灌溉量55 mm时,优先流的最大入渗深度可达 $(68.3 \pm 7.6) \text{ cm}$,比

灌溉量 145 mm 样方的最大入渗深度((59.2±5.6) cm)大^[38]。动物洞穴对荒漠绿洲水分运动过程有重要的影响,改变了土壤中养分迁移转化过程。

1.5 植被根孔

植物根孔是影响土壤大孔隙产生的重要因素。植被根系贡献的土壤大孔隙占土壤总大孔隙的比例非常高,有森林土壤的比例大于 35%。根系在土壤内形成根孔网络通道结构,因而对土壤优先流的发生有积极的影响。干旱区的草本植被有更深的根系,显著区别于灌丛和乔木的根系特征;不同植被类型根系特征不同,可能导致优先流产生及其特征存在差异^[43-45]。荒漠植被垂直根系发达,水分沿着根系优先运动成为补充土壤水分的主要方式^[2]。虽然根系对土壤优先流有重要的影响作用,但并非所有的根系都会对优先流的产生具有贡献。对于死根而言,细根较粗根分解速率快,更容易产生大孔隙,为土壤优先流提供通道;而对于活根,除了根系路径外,有可能根系微生物排泄出能够诱发及保持优先流路径的斥水性物质,产生土壤优先流^[38]。在干旱荒漠地区,降雨以脉冲形式输入,地表植被特征主要影响着土壤优先流的发生^[46-47];而根系通道是影响土壤优先流的发展和加快土壤水分入渗的主要因素。在绿洲农田中,仅细根与优先流显著性相关,粗根与优先流相关性不显著,因此植物根系中的细根(≤ 2 mm)对优先流的产生有重要的影响作用。由根系引起的大孔隙一般具有连续性、圆形,随着深度的增加大孔隙度呈下降趋势;而由团聚体形成(冻融交替或干湿交替)的大孔隙一般小,分散分布,连续性较差^[48-49]。绿洲农田土壤大孔隙分布复杂,大孔隙分布与作物根系分布一致,连续、相对长且呈管状大孔隙,这与作物根系以及根系残体分解密切相关。

2 优先流对荒漠绿洲土壤特性的影响

优先流的产生,改善了土壤的孔隙结构。大孔隙普遍存在于自然界的土壤中,占土壤体积的 0.1%~5%^[50-51]。不断开垦耕作和灌溉改变了土壤大孔隙结构,绿洲农田土壤大孔隙分布较外围沙地明显,是沙地的 8.7~18.9 倍^[32]。基于 CT 扫描技术对荒漠绿洲区土壤大孔隙研究表明,大孔隙度老绿洲农田土壤(1.70%)>新开垦沙地农田土壤(0.73%)>绿洲外围沙地土壤(0.09%);随开垦年限延长,大孔隙度增加;大孔隙度增加与土壤有机质显著相关($r^2=0.67, P<0.01$)^[32]。大孔隙的存在,

增加了绿洲灌淤土的通气性,改善了土壤团聚体结构,促进土壤中养分循环,提升了新垦绿洲农田地力条件,有利于作物根系生长;同时土壤的透气性增强,提供良好的微生物生活环境,促进土壤微生物的活动,加速了作物根系残体和农药的分解^[52]。

土壤中优先流的快速运动,对土壤的化学循环过程亦有重要的影响。绿洲农田优先流的运动过程携带着大量土壤溶质养分,因此优先流路径较土壤基质富含有更多的养分;优先流路径中的土壤有机碳和全氮含量比土壤基质高 15%~70%^[53]。土壤优先流路径改变了土壤碳氮含量和交换性阳离子含量^[54]。优先流路径较土壤基质更有利于土壤微生物生存的环境条件,所以优先流路径成为土壤生物活动的“热点”区域。土壤微生物代谢分泌物强化了土壤颗粒的斥水性,有利于土壤优先流的产生^[55-56];同时,优先流路径为土壤微生物提供良好的生存环境,这样形成了一个良性的互馈机制。

3 优先流对荒漠绿洲水文要素影响

3.1 土壤水分

土壤水分是荒漠绿洲植被生长发育的主要限制因素,其分布状况直接决定了植被的组成与结构^[57]。水分优先沿着相互连通的大孔隙运动,影响着土壤水分时空分布格局,使土壤水分的变异性增强。在干旱区,植被根系生长过程中通过“生物钻孔(biological drilling)”方式使土壤变得松散,提高土壤孔隙率,增强了土壤导水能力,易发生优先流^[58-59];腐烂根系和枯枝落叶产生的有机质,有助于土壤团聚体和孔隙形成,改善了土壤结构和水分传导能力^[60-61],加快了土壤水分运动过程。Devitt 等^[62]通过染色剂和溴化物示踪试验发现年降雨量约为 100 mm 的莫哈韦沙漠(Mojave Desert)存在优先流,影响着沙漠地带的土壤水分时空分布特征,进而对斑块状植被分布格局产生影响。

在干旱荒漠地区,优先流的产生有利于植被根部土壤水分的累积。灌木植被的冠层对降雨过程进行重分配,截留形成的茎流产生土壤优先流。灌丛植被冠层的漏斗效应,使降雨汇集于灌丛基部并通过根部优先到达土壤深层^[63-64],此过程成为干旱区植物土壤水分和养分的重要来源。荒漠灌丛由于冠层茎流形成的土壤沃岛^[65-66],导致固沙植物冠幅下土壤水分和养分均较高,有利于干旱区种子的萌发和生存,影响着荒漠植被分布和组成。植被根系作

用产生优先通道,水分容易到达土壤深层或补充到地下水,影响着干旱区地下水补给过程,因此在植被对干旱区水资源利用评价方面,需考虑土壤优先流产生,其潜在增强了土壤水分深层入渗和对地下水补给的作用。

3.2 地下水

土壤优先流影响包气带对地下水的补给过程。优先流发生,降水产生的地表径流量减少,土壤侵蚀能力降低,而土壤入渗能力增强,入渗量增多,深层渗漏以补充到地下水。研究表明70%~85%的土壤水分运动过程与优先流有关^[67-68]。优先流伴随活塞流发生,其运移速率远超过活塞流,不同研究区的优先流在土壤水分入渗中所占比例高达75%^[69-71]。

优先流影响着地下水化学要素构成,主要体现在地下水硝态氮浓度的增加。绿洲农田施用的肥料随着入渗水流沿着连通的大孔隙很快进入土壤深处或浅层地下水,养分来不及被土壤基质吸附和植物利用,引起农田水分、养分损失,降低了养分利用率,加剧了地下水污染的风险。Yang等^[70]在黑河中游荒漠绿洲区利用71个观测井的数据对地下水水质检测发现,32.4%的井水硝态氮含量超过世界卫生组织规定的饮用水安全标准($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),源于地表的农药和化肥等污染物通过优先流和活塞流穿过土壤剖面向下迁移到浅层地下水,影响到地下水的水质和农业生活健康用水。

4 结论与展望

优先流的存在,引起绿洲农田水分、养分的损失,增加了地下水污染的风险;荒漠区优先流的发生,促进土壤水分入渗,影响着干旱区植被恢复和地下水补给过程。本文重点分析影响荒漠绿洲土壤优先流的非生物(土壤质地和结构、裂隙、土壤水分)和生物因素(土壤动物和植被根系),综述优先流对该区土壤性质和水文要素的影响。鉴于荒漠绿洲区特色,关于该区土壤优先流的认知尚存在局限性,需从大孔隙的三维空间结构特征、优先流的产生机制和数值模拟等方面进行深入研究,未来研究需强调以下几个方面。

加强大孔隙空间结构对优先流的运动过程影响研究。以往对大孔隙结构研究大多数局限于平面或二维结构研究,而对大孔隙三维空间结构研究相对较少,尤其在荒漠绿洲区。大孔隙的空间几何特征

及其参数是描述优先流的关键,如大孔隙度、面积密度、体积、长度、水力半径、数量等参数,CT扫描技术为定量分析大孔隙动态几何特征提供了最佳研究方法。

开展不同景观类型土壤优先流野外观测研究。以往研究关于优先流产生及其对水分运动和溶质迁移的影响主要利用人工装置模拟,室内实验的结果难以准确反映野外情况,因此加强荒漠绿洲不同景观类型土壤优先流的野外观测试验。综合土壤优先流的多种观测方法,如染色示踪法、同位素技术、穿透曲线法、圆盘入渗仪和土壤水分连续监测等方法,综合各种研究技术,以揭示土壤优先流产生及其对水分运移的影响机制。

研究荒漠绿洲土壤优先流的产生及其运动机制。目前缺少荒漠绿洲区不同植被类型土壤优先流效应及其特征的研究。荒漠绿洲区景观格局复杂,不同景观斑块格局造成大孔隙成因、表现特征及其影响因素存在异质性,进而对土壤水文过程的影响不同。此外土壤优先流的运动过程具有高度非平衡性、区域性特点,限制了对优先流的运动机制认识,如对优先流运动过程中溶质运移转化规律、土壤优先流与植被互馈机制等科学问题在荒漠绿洲区的研究不足,因此应加强研究。

建立荒漠绿洲土壤优先流的运动模型。大孔隙中的水流速度远大于土壤活塞流,其水流运动不符合达西定律。连续型土壤水分运动方程是描述包气带土壤水分运移的基本方程,如何真实准确地刻画干旱条件下土壤水分运移过程仍存在挑战。鉴于土壤大孔隙流的非线性、非稳定和尺度效应,需借助野外试验进行参数识别和模型验证^[71]。在模型参数确定和模型模拟应用方面值得深入研究,使所建模型适用于荒漠绿洲区。

参考文献:

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [2] Allaire S, Roulier S, Cessna A. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378: 179-204.
- [3] 吴庆华. 基于土壤水入渗补给的优先流定量研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
- [4] Gerke H H. Preferential flow descriptions for structured soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(3): 382-400.
- [5] Jarvis N J, Moeys J, Koestel J, et al. Preferential flow in a pedological perspective[M]//Lin H. *Hydropedology: Synergistic*

- Integration of Soil Science and Hydrology. New York, USA: Academic Press, Elsevier, 2012.
- [6] 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.
- [7] Nimmo J R. Preferential flow occurs in unsaturated conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(5): 786–789.
- [8] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 231–43.
- [9] Zhang Y Y, Zhao W Z. Effects of variability in land surface characteristics on the summer radiation budget across desert-oasis region in Northwestern China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 119(3/4): 771–780.
- [10] Zhang Y Y, Zhao W Z, He J H, et al. Energy exchange and evapotranspiration over irrigated seed maize agroecosystems in a desert-oasis region, northwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 223: 48–59.
- [11] 李军, 王新军, 贾宏涛, 等. 古尔班通古特沙漠南缘干季土壤水分含量空间异质性[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1628–1637.
- [12] 冯伟, 杨文斌, 唐进年, 等. 中国沙漠(地)深层渗漏量及动态特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1362–1370.
- [13] 高前兆, 仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 391–396.
- [14] Lerner D N, Issar A S, Simmers I. Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge[M]. Hannover, Germany: Heise, 1990.
- [15] Sophocleous M. Groundwater recharge estimation and regionalization: the Great Bend Prairie of central Kansas and its recharge statistics[J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 137(1): 113–140.
- [16] Favreau G, Leduc C, Marlin C, et al. Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from ^3H and ^{14}C modeling[J]. *Groundwater*, 2002, 40(2): 144–151.
- [17] Andraski B J. Soil-water movement under natural-site and waste-site conditions; a multiple-year field study in the Mojave Desert, Nevada[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(8): 1901–1916.
- [18] Ji X B, Kang E S, Zhao W Z, et al. Simulation of heat and water transfer in a surface irrigated, cropped sandy soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6): 1010–1020.
- [19] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] SKOPP J. Comment on “Micro-, meso-, and macroporosity of soil”[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(6): 1246–1246.
- [21] 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.
- [22] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils[J]. *Geoderma*, 2004, 120(1): 137–153.
- [23] 牛健植, 余新晓. 优先流问题研究及其科学意义[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 110–116.
- [24] Wang D, Lowery B, Norman J, et al. Ant burrow effects on water flow and soil hydraulic properties of Sparta sand[J]. *Soil & Tillage Research*, 1996, 37: 83–93.
- [25] Gerke H H, Kuchenbuch R O. Root effects on soil water and hydraulic properties[J]. *Biologia*, 2007, 62(5): 557–561.
- [26] Boivin P, Garnier P, Tessier D. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1145–1153.
- [27] Bayer A, Vogel H J, Roth K. Direct measurement of the soil water retention curve using X-ray absorption[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2004, 8(1): 2–7.
- [28] Gray C W, Allbrook R. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils[J]. *Geoderma*, 2002, 108(3): 287–299.
- [29] Koestel J K, Moeyes J, Jarvis N J. Meta-analysis of the effects of soil properties, site factors and experimental conditions on solute transport[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(6): 1647–1665.
- [30] Horn R, Taubner H, Wuttke M, et al. Soil physical properties related to soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 1994, 30(2): 187–216.
- [31] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477–488.
- [32] Zhang Y Y, Zhao W Z, Fu L. Soil macropore characteristics following conversion of native desert soils to irrigated croplands in a desert-oasis ecotone, Northwest China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 168: 176–186.
- [33] 张展羽, 朱文渊, 朱成立, 等. 农田土壤表面干缩裂缝的随机分布统计特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 119–124.
- [34] Greve A, Andersen M S, Acworth R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 105–113.
- [35] Zhang Z, Peng X, Wang L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 12–20.
- [36] Shen Y, Liu C, Liu M, et al. Change in pan evaporation over the past 50 years in the arid region of China[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 225–231.
- [37] 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): 191–201.
- [38] 闫加亮, 赵文智, 张勇勇. 绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1454–1460.
- [39] Mcneely J. Biodiversity in arid regions: values and perceptions[J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54: 61–70.
- [40] Liu J L, Li F R, Liu C A, et al. Influences of shrub vegetation on distribution and diversity of a ground beetle community in a Gobi desert ecosystem[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21: 2601–2619.

- [41] Shipitalo M J, Nuutinen V, Butt K R. Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(3): 209–217.
- [42] Fan R, Zhang X, Yang X, et al. Effects of tillage management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(3): 312–320.
- [43] Lesturgez G, Poss R, Hartmann C, et al. Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1/2): 101–109.
- [44] Cheng J, Zhang H, Wang W, et al. Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China[J]. *Soil Science*, 2011, 176(12): 652–660.
- [45] 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.
- [46] Yan J, Zhao W. Characteristics of preferential flow during simulated rainfall events in an arid region of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7): 1–12.
- [47] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(1): 72–79.
- [48] 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.
- [49] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1): 53–64.
- [50] Germann P F, Beven K. Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(7): 990–996.
- [51] Germann P, Beven K. Water flow in soil macropores I. An experimental approach[J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(1): 1–13.
- [52] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 888–894.
- [53] Bundt M, Jäggi M, Blaser P, et al. Carbon and nitrogen dynamics in preferential flow paths and matrix of a forest soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1529–1538.
- [54] Bogner C, Borken W, Huwe B. Impact of preferential flow on soil chemistry of a podzol[J]. *Geoderma*, 2012, 175/176: 37–46.
- [55] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, et al. Preferential flow paths: biological ‘hot spots’ in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 729–738.
- [56] Doerr S, Ritsema C, Dekker L, et al. Water repellence of soils: new insights and emerging research needs[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 2223–2228.
- [57] 张帅普, 邵明安, 李丹凤. 绿洲-荒漠过渡带土壤蓄水量的空间分布及其时间稳定性[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2509–2516.
- [58] Lesturgez G, Poss R, Hartmann C, et al. Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1/2): 101–109.
- [59] Cresswell H P, Kirkegaard J A. Subsoil amelioration by plant-roots—the process and the evidence[J]. *Soil Research*, 1995, 33(2): 221–239.
- [60] Noguchi S, Nik A R, Kasran B, et al. Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia[J]. *Journal of Forest Research*, 1997, 2(2): 115–120.
- [61] Benegas L, Ilstedt U, Rouspard O, et al. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 183: 185–196.
- [62] Devitt D A, Smith S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(1): 99–108.
- [63] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, et al. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133–1144.
- [64] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(1): 72–79.
- [65] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Stemflow in two xerophytic shrubs and its significance to soil water and nutrient enrichment[J]. *Ecological Research*, 2013, 28(4): 567–579.
- [66] Pan Y X, Wang X P, Li X R, et al. The influence of *Caragana korshinskii* shrub on soil and hydrological properties in a revegetation-stabilized desert ecosystem[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(10): 1925–1934.
- [67] Watson K W, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 578–582.
- [68] Wilson G V, Luxmoore R J. Infiltration, macroporosity, and mesoporosity distributions on two forested watersheds[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2): 329–335.
- [69] Jørgensen P R, Hoffmann M, Kistrup J P, et al. Preferential flow and pesticide transport in a clay-rich till: field, laboratory, and modeling analysis[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(11): 2810–2815.
- [70] Yang R, Liu W. Nitrate contamination of groundwater in an agroecosystem in Zhangye Oasis, Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(1): 123–129.
- [71] 张勇勇, 吴普特, 赵西宁. 基于矩分析的垄沟灌入渗湿润体特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1217–1225.

A Review of Researches on Preferential Flow in Desert-oasis Region

Zhang Yongyong¹, Fu Li², Zhao Wenzhi¹, Yan Jialiang³

(1.Linze Inland River Basin Research Station/Key Laboratory of Inland River Basin Ecohydrology, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China; 3.School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Soil macropores are formed under the joint effect of abiotic factors (wetting and drying alternation, freezing and thawing processes, and soil properties, etc.) and biotic factors (soil fauna burrows, plant root channels) in desert-oasis region. As they may act as pathways for preferential flow, water and solute migrate rapidly along preferential pathways to shallow groundwater, which enhance the risks of water and nutrient loss. The presence of soil macropores also enhances soil ventilation, promotes nutrient cycling, and improves soil fertility. Preferential flow occurrence reduces surface runoff and its erosion, promotes water infiltration, and affects vegetation restoration and groundwater recharge. This paper analyzes the generated causes of preferential flow and its effect on pedologic and hydrological processes in desert-oasis ecosystems. Combined with the current research progress, the research emphases in the future are put forward as follows: (1) more efforts should be dedicated to conducting in situ field study of soil macropore networks and its effect on preferential flow; (2) Field experiments are conducted to analyze preferential flow movement in different landscapes and to reveal the interaction mechanism of preferential flow and vegetation; (3) the model is developed to simulate the movement of preferential flow in desert-oasis region.

Key words: desert-oasis region; preferential flow; soil macropores; soil water movement