

土壤优势流的植物根系效应

董宾芳, 傅瓦利 (西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要 综述了土壤优势流的基本特征, 对环境的影响, 特别是对水分和农用化学物利用效果的影响。阐述了根系对优势流的影响, 并讨论了根系的动态变化对土壤优势流的影响。介绍了根系及优势流的一般研究方法, 以及有关根系和优势流关系的研究中的一些问题。

关键词 根系; 土壤优势流; 生态功能

中图分类号 S153 文献标识码 A 文章编号 0517 - 6611(2006) 23 - 6249 - 03

Effect of the Plant Root System on Preferential Flow in Soil

DONG Bin-fang et al (College of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract The preferential flow is the universal phenomenon of water flow in soil. In this paper, the basic property of preferential flow, the impact of preferential flow on environment, especially on water and agri-chemicals, in soil were reviewed. The impact of root on preferential flow was described, furthermore the dynamic change of root affecting soil preferential flow was thought. The general research method were reviewed. Some problems in research on the root system and preferential flow were presented.

Key words Root system; Preferential flow; Eco-function

1 土壤优势流特征

1.1 土壤优势流 土壤优势流 (Preferential flow) 是指土壤在整个入流边界上接受补给, 但水分和溶质绕过土壤基质, 只通过少部分土壤体的快速运移^[1]。它在土壤水分入渗过程中起主导作用, 是一种受重力影响不受土壤毛管力控制的现象。根据优势流的成因, 土壤优势流中有 3 种类型: 大孔隙流、指流和漏斗流。

土壤优势流在土壤中的运动以非平衡流为主, 与平衡流比较, 优势流对各种溶质在土壤中运移存在以下特征^[2]: 优势流存在时, 水流沿土壤大孔隙形成的非平衡流迅速穿透土体, 此时毛管流对水流穿透的影响很小; 优势流侧向入渗可以使溶质快速地分布于土体的各个层次; 优势流的特征还表现为水流与土体的作用较弱, 相对平衡流而言, 水流与土体间分子扩散相对较小, 水流所携带的溶质与土壤发生很小的相互作用, 快速穿透土体向下移动; 穿透曲线不对称和拖尾现象。

1.2 土壤优势流对环境的影响 优势流是土壤中水分和溶质运动的普遍现象, 许多学者对其进行了研究。冯杰等^[3]对水和溶质在土壤中的运移进行了田间试验, 发现受扰动的回填土深层土含水率随时间的变化接近直线, 不反映降水信息, 而未被破坏的原状土含水率随时间的变化比较敏感, 明显受降水变化的影响, 这是由于原状土大孔隙的存在产生了优势流。石辉等^[4]研究了森林土壤水分的运动特征, 表明大孔隙对水流运动的阻力小, 对流速的影响很大, 特别是半径大于 1.4 mm 的孔隙数量对水分运动有着重要的影响。Sukhija 等^[5]指出在花岗岩地区优势流对地下水的补给占 75%。

优势流的上述特征对农业生产和生态环境产生了深刻的影响, 因此也成为相关研究人员关注的焦点。它使土壤中的溶质以较快的速率向土壤下层移动, 其结果是施于农田表层的农业化学物质的利用效率降低且污染地下水。Milone 等^[6]对农业杀虫剂受优势流的影响进行了研究, 发现大多数

杀虫剂在强降雨后约 1 d 的时间内被淋失掉, 被优势流运移到 2.4 m 深处, 只有少数对土壤吸附性强的杀虫剂受其影响较小。Fortin 等^[7]对土壤表面使用溴化物和除草剂进行试验, 结果在地下排水系统中有部分溴化物和除草剂被检测到。Elliott 等^[8]研究了灌溉洗盐对杀虫剂的渗漏的影响, 结果表明, 由于优势流的存在, 在 2 m 深处排水中杀虫剂的浓度高于 1.5 和 1.8 m 处水样的浓度, 并认为大约有 1.6% 的杀虫剂进入了地下水。而 Kladvko 等^[9]研究表明, 施用杀虫剂后, 如果首次降雨量大于 25 mm, 那么有超过 50% 的杀虫剂因为优势流而流失。章明奎^[10]研究了污染土壤中重金属的优势流迁移, 结果表明优势流使重金属能够迁移到深层土壤并主要以胶体形式迁移。

土壤优势流不仅影响地表杀虫剂和化肥的使用效率, 而且影响土壤水分的时空分布, 并间接地影响作物的生长和产量。Gosh 等^[11]研究了干旱年份土壤优势流对玉米产量的影响, 发现随着离优势流路径水平距离的增加, 土壤的水分随之降低, 玉米的产量也下降。

总之, 优势流的存在使得降水或灌溉以及所施养分迅速向根区下层流动, 而没有和土壤充分接触, 从而降低了对植物的有效性, 同时随水流进入土壤中的污染物如农药、有机化学品、重金属等以较高的浓度快速进入地下水。因此土壤水分和溶质的时空变化规律是优势流研究的主要趋势。

2 植物根系的特征

2.1 植物根系与根孔 植物根通过伸长、分支、加粗及不定根的形成, 在土壤中构成庞大的地下系统——根系^[12], 它是植物固定、吸收和运输水分、养分最重要的器官, 也是物质形成和新陈代谢的重要器官。

植物在生长过程中, 根系的伸长、穿插和加粗对土壤进行分离和挤压形成孔道, 即根孔, 而传统的植物根孔主要是指植物根系死亡腐烂后在土壤中形成的孔道, 前者是后者的拓展。植物根孔是土壤大孔隙的一个重要类型, 土壤大孔隙是指土壤中有一定直径和连续性的孔隙, 其间有快速的水流。大孔隙一般分生物性和非生物性的孔隙^[13], 包括: 土壤的自然孔道、裂隙以及收缩形成的孔隙; 由土壤侵蚀造成的土壤孔隙; 土壤动物活动形成的孔隙如虫洞、蚁洞; 植物根孔即由植物生长及死亡遗留的孔道。研究认为植物根孔在

基金项目 国家自然科学基金项目(40471078); 陕西省教育厅专项项目(05JK241)。

作者简介 董宾芳(1971-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向: 水土保持。

收稿日期 2006-09-07

土壤孔隙中占较大的比例,同时存在着空间变异,不同的植被其根系数量、生物量不同,形成根孔空间特征也不同。

2.2 根系及根孔的生态功能 早在18世纪,人们就已经开始对根进行形态学的观察,自Hiles(1727)应用挖掘技术以来,人们不断更新方法对其进行研究^[14],多年来,对植物根系的研究成果日趋增多。随着现代新技术的应用,人们对植物根系及根孔生态功能的认识也日益深入。

湿地植物根孔被认为是该生态系统中特殊传输的不为人见的“高速公路”,系统中部分水分和养分通过垂直和侧向的根系或根孔系统传输到其他部分,根孔作为植物根系与土壤之间的一个重要的“界面”^[15],在根际微生态系统中扮演着重要的作用。所谓根际微生态系统,指植物根系发生紧密相互作用的土壤微域环境,是植物在其生长、吸收、分泌过程中形成的物理、化学、生物学性质不同于土体的复杂的动态的微型生态系统^[16]。根系分泌物通过根孔进入土壤影响土壤中微生物的数量及群落组成,群落特征也随着根系分泌物的类型而变化。同时根孔也是大气—水分—土壤相互作用的“多介质界面”,在物质、能量和信息交流方面发挥重要作用。

大气降水除地表植物截留、形成地表径流以后有相当一部分渗入地下转化为地下水。水分入渗过程是一个复杂的水文过程,它受多种因素的影响^[17],植物根系及其根孔对水分入渗产生重要的影响。当土壤充分湿润达到田间持水量后,包括植物根孔的大孔隙对大气降水的入渗显得特别重要,由于根孔的导水作用加大了土壤入渗能力,进一步影响到产流、土壤水分补给和土壤侵蚀,因此在水土保持、土壤水分和地下水的研究中占重要地位。也有人认为^[15]根孔的存在也影响着江河湖泊防洪堤岸的安全,一方面具有合理根孔结构的堤岸在退洪时能够很快地将水由根孔系统导流,保障防洪堤岸的稳固;另一方面堤岸根孔结构不合理与蚁穴、鼠洞相连就有可能造成堤岸的崩溃。合理的植被结构会形成良好的地下根孔导流系统,因此,加强根系和根孔的研究在防护林工程建设中亦具有重要的意义。

植物根系可为土壤提供大量的有机质,提高土壤团聚体的数量,改善土壤的理化性质,这不仅有助于土壤保水保肥和植物的生长,而且根死亡留下的孔道为新的植物根系穿插提供了低阻力的通道,这对生长在紧实黏土层植物吸取深层水分和营养具有重要的意义^[18]。

3 根系对土壤优势流的影响

许多研究表明,植物根系是土壤优势流的主要影响因素之一。Espeby^[19]研究了森林坡地雪冰融化时的水文情况,发现森林老根形成的大孔隙通道能使雪水快速通过不饱和的冻结的土壤基质,并没有影响土壤中被束缚的冰水。Devitt等^[20]以莫哈韦沙漠生态系统作为对象,研究了植物根孔对土壤中水分入渗的影响,结果表明灌木植物的根系为水分向土壤深层渗透充当优势流路径,且灌木越大(即根系的尺寸越大)水分穿透的越深。Brankey等^[21]在洪泛平原将桉树对洪水的导水性同其附近的荒地进行了比较,发现桉树周围的渗透性比荒地快2~17倍,且由于洪水的淋滤根区盐分明显减少。Kim等^[22]对不同质地和结构的土壤通

过染色显踪研究,发现根系明显产生优势流,且孔隙结构良好的土壤使示踪剂运移最深。

在农业生产中,水分和农业化学物质的利用效率直接影响到作物的产量,因此根系对优势流的影响在农业耕作管理中得到关注。Gsh等^[23]对耕耘过和没耕耘的土地进行染色比较,发现染色区根系很丰富,说明根系是水分入渗的主要因素,它影响了水分在土壤中的再分配。Rachnan等^[24]将作为田边隔离物的硬茎植物柳枝稷对土壤的渗透性影响作了研究,并同田中土壤进行了比较,发现它们的田间饱和导水率分别为130和18 mm/h;对生长多年的柳枝稷下的土壤挖掘表明:这是由于在20 cm深处有浓密的根系,形成了较高的连续性大孔隙,而田中由于耕作导致孔隙连续性降低的缘故。

植物根系及根孔的动态研究也是研究根孔功能的一个方面。植物根系在生长过程中必然引起土壤中死根和活根的消长,产生不同的效果。Mek等^[25]发现种过紫花苜蓿的棉花地比没有种过苜蓿的棉花地水分渗透快,认为这是由于苜蓿主根系腐烂后产生了广泛的优势流路径导致了较高的渗透率。一些学者^[26]对作物下土壤的渗透性进行了研究,认为玉米和大豆在生长季节后期或收获期土壤渗透性明显增加。Mitchell等^[27]等研究发现示踪剂经活根能下渗16 cm,而经死根却能下渗55 cm。可见尽管它们都形成了优势流,但效果不同,而且产生的机理也不同。有学者认为^[28],活根形成优势流是由于在根的表层存在饱和的水膜和根的收缩,而死根形成优势流是由于其残余物形成了孔道壁加强了水的运输效率,活根孔同死根孔相比其水流受到限制。所以根系的变化使水分及溶质在土壤的再分配发生了变化。

根系及其根孔对优势流的影响还受其他条件的制约。研究表明,不同的耕作制度下,根系对优势流产生的效果也不同。在常规耕作地中,由于植物根系和土壤动物形成的大孔隙受到破坏,优势流通道的连通性低,则易在地表集水,形成径流和土壤侵蚀^[29];农业化学物质的性质不同,被优势流运移的量也不同,Elliot等^[30]研究认为这取决于化学物质的溶解性和对土壤的吸附系数,对土壤吸附性强的化学物其运移到深层的总量也少,而溶解性高的物质运移较多。此外它还受土壤水分含量,降雨强度,土壤本身的理化性质等制约。

总之,根系的数量形态特征影响着地下根孔纵向和横向分布态势。林地、草地、农用地、荒地由于扰动程度不同,溶质运移的深度不同,活根和死根根孔对优势流产生的影响亦存在很大不同,土壤中不同径级根孔会导致导水、持水功能差异,这些都会对优势流、水分和溶质运移及环境污染物有很大影响。

4 根系系统与土壤优势流的研究方法

根系系统目前的研究方法主要有^[14]:挖掘法、土钻法、玻璃壁法、剖面法及容器法,其特点见表1。对优势流的研究方法有:染色法。可直接观测土壤优势流路径,主要采用固结物质和染料灌入土壤来描述土壤剖面大孔隙。染色法可描述孔隙的大小及其分布,但不能给出优势流与孔隙综合特征之间的关系^[31]。CT扫描技术。CT技术有直

观,可研究土壤优势流通道的三维结构,非破坏性测量的优点,但在描述通道的连通性方面存在一定困难且测量成本昂贵,限制了该方法的广泛应用^[31]。室内土柱模拟法。一般采用原状土模拟田间土壤水分及溶质的运动规律,通过试验分析从理论上认识优势流的影响因素,然而由于田间优势流通道的广泛性和影响因素的复杂性,小块土柱还不能全面反映田间的这一特点^[32]。化学物质示踪法。示踪法是研究土壤优势流对农业化学物质影响的常用方法^[33]。其中有利用Br⁻作为示踪剂研究溶质在土壤中的时空分布规律,或利用¹⁵N NO₃研究农业生产中优势流对化肥的淋失状况,还有直接以杀虫剂或除草剂为对象,研究农业化学物质因受优势流的影响对地下水的污染情况。该方法是认识农业化学物质利用效率及对地下水污染情况的较好方法。

表1 根系生态研究方法

	挖掘法	土钻法	玻璃壁法	剖面法	容器法
优点	可提供植物完整根系的清晰图像	不会大面积损害研究植株	可连续准确地测定根系生长习性	提供最优景观,便于研究不同径级根系的分布	较田间种植植株易于处理、研究和管理
缺点	消耗体力和时间	须增加重复的次数,否则难以获得根系的真实分布	观察面有限,且试验处理的可重复次数少	消耗时间	非天然条件,限制了根系的正常伸展和分布

5 研究展望

对优势流的研究已发展到土壤优势流产生的机理、优势流和基质流的关系、数学模拟和对环境的影响等方面^[34]。由于土壤大孔隙结构复杂很难界定各类孔隙,以往对优势流的研究经常是将各种类型的土壤大孔隙同时研究,没有将根系形成的根孔区别开来。因此基于根系及根孔的特点,根系与土壤优势流关系的研究应注意以下几点:

(1) 根系动态变化对优势流的影响研究。植物的生长受季节及地域的影响,具有明显的季节变化规律,其根系的生长也是如此。根系的变化导致根孔的动态变化必然影响到土壤优势流的运动特征及水分和溶质在土壤中的分布,特别是农用化学物质在土壤中的运动及分布。

(2) 不同植被类型根系对土壤优势流影响的研究。主根型和须根型植物,深根型和浅根型植物,乔木、灌木和禾草,它们的根系各不相同,对优势流的影响也不同。加强这方面的研究有助于加深不同植被对地表、地下水文过程影响的深入认识,这对干旱、半干旱地区及水土流失严重的地区生态环境建设具有重要的意义。

(3) 各种根系参数(根长、根径和根体积)与优势流关系的模型研究。长期以来,许多学者对土壤水分及溶质的运动进行了深入的研究,建立了各种模型,加深了土壤优势流机理的认识,对预测土壤水分和地下水化学物质的变化发挥了积极的作用。建立根系与优势流关系的模型有助于土壤水分及溶质运动机理的深入研究。

(4) 根孔与其他孔隙对优势流影响的比较研究。根孔是植物根系生长过程中或死亡后形成的孔道,由于根系及其死亡残余物的存在对优势流的影响机理也不同于其他大孔隙,因此通过研究可以更深入认识优势流的产生机理。

参考文献

- [1] 徐绍辉,张宝佳. 土壤中优势流的几个基本问题研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):85-93.
- [2] 倪余文,区自清. 土壤优先水流及污染物优先迁移的研究进展[J]. 土壤与环境,2000,9(1):60-63.
- [3] 冯杰,张佳保,郝振纯,等. 水及溶质在有孔隙的土壤中运移的研究(I):田间实验[J]. 水文地质工程地质,2004(3):20-24.
- [4] 石辉,陈凤琴,刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报,2005,25(3):507-512.
- [5] SUKHAJA B S, REDDY D V, NAGABHUSHANAMP. Recharge processes: piston flows preferential flow in semi-arid aquifers of India[J]. Hydrogeology Journal, 2003,11:387-395.
- [6] MALONE R W, SHITALO M J, VAUCHOPE R D, et al. Residual and contact herbicide transport through field lysimeters via preferential flow[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33:2141-2148.
- [7] FORIIN J, CAGNON BERTRAND E, VEZINA L. Organic compounds in the environment: preferential bromide and pesticide movement to tile drain under different cropping practice[J]. Journal of Environmental Quality, 2002,6:1940-1943.
- [8] ELLIOTT J A, CESSNA A J, BEST K B, et al. Leaching and preferential flow of dopyrid under irrigation: field observations and simulation modeling[J]. Journal of Environmental Quality, 1998,27:124-131.
- [9] KLADIVKO E J, GROCHULSKA R F, TURCO G E, et al. Pesticide and nitrate transport into subsurface tile drains of different spacings[J]. Journal of Environmental Quality, 1999,28:997-1004.
- [10] 章明奎. 污染土壤中重金属的优势流迁移[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2):192-197.
- [11] GSHT J, WALTHALL C L, DAUGHIRY C S T, et al. Using soil moisture and spatial yield patterns to identify subsurface flow pathways[J]. Journal of Environmental Quality, 2005,34:274-286.
- [12] 王力群,陈世璜. 草地植物根系类型划分原则的探讨[J]. 内蒙古农业大学学报,2003,24(3):11-13.
- [13] 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):869-873.
- [14] W 伯姆. 根系研究法[M]. 薛德榕,译. 北京:科学出版社,1985:18-95.
- [15] 李宝贵,周怀东,尹澄清. 湿地植物及其根孔在非点源污染治理中的展望[J]. 中国水利,2003(4):51-61.
- [16] 张太平,潘伟斌. 根际环境与土壤污染的植物修复研究进展[J]. 生态环境,2003,12(1):76-79.
- [17] 王经民,吴钦孝,韩冰,等. 陕北黄土区土壤入渗模型比较探讨[J]. 农业系统科学与综合研究,2004,20(4):287-290.
- [18] WILLIAMS S M, WEIHR R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68:1403-1409.
- [19] ESPEBY B. Tracing the origin of natural waters in a glacial till slope during snowmelt[J]. Journal of Hydrology, 1990,118:107-127.
- [20] DEWITT D A, SMITH S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave desert ecosystem[J]. Journal of Environmental Quality, 2002,31:99-108.
- [21] BRAMLEY H, HUISON J, TYERMAN S D. Hoodwater infiltration through root channels on a sodic clay floodplain and the influence on a local tree species Eucalyptus largiflorens[J]. Hort and Soil, 2003,253:275-286.
- [22] KIM J G, CHONG M, LEE J S. Effect of structure and texture on infiltration flow pattern during flood irrigation[J]. Environmental Geology, 2004,46:962-969.
- [23] GSHT J, GIMENEZ D, RAWLS W J. Impact of roots on ground water quality[J]. Hort and Soil, 1998,200:47-54.
- [24] RACHMAN A, ANDERSON S H, CANIZER C J, et al. Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68:2000-2006.
- [25] MEEK B D, TAR D, ROLPH D, et al. Infiltration rate as affected by an Alfalfa and No-till Cotton cropping system[J]. Soil Science American Journal, 1990,54:505-508.
- [26] MANNERING J V, JOHNSON C B. Effect of crop row spacing on erosion and infiltration[J]. Agronomy Journal, 1969,61:902-905.

(上接第6251 页)

- [27] MITCHELL A R, ELLSWORTH R, MEEK B D. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil [J]. *Commun Sci R Anal*, 1995, 26 :2 655 - 2 666.
- [28] ANGERS D A, CARON J. Hart-induced changes in soil structure: processes and feedbacks [J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42 :55 - 72.
- [29] DEXTER A R, CZYZ E A, GATE O P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79 :185 - 189.
- [30] ELLIOTT J A, CESSNA A J, NICHOLAICHUK W, et al. Leaching rates and preferential flow of selected herbicides through tilled and untilled soil [J].

Journal of Environmental Quality, 2000, 29 :1 650 - 1 656.

- [31] 石辉, 刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义 [J]. *山地学报*, 2005, 23(5) :533 - 539.
- [32] KIM Y J, DARNAULT C J G, BAILEY N O, et al. Equation for describing solute transport in field soils with preferential flow paths [J]. *Soil Science Society of America*, 2005, 69 :291 - 300.
- [33] STROCK J S, CASSEL D K. Developing and testing a system for studying unsaturated solute transport on undisturbed soil blocks [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56 :112 - 119.
- [34] 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, 21(4) : 63 - 68.