

基于 CT 扫描研究灌丛根系对土壤大孔隙的影响

高 宙^{1,2}, 胡 霞^{1,2}

(1.北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2.北京师范大学 地理科学学部自然资源学院, 北京 100875)

摘 要:为研究灌丛根系对土壤大孔隙形成的影响,选取青海湖流域的金露梅灌丛和内蒙古的小叶锦鸡儿灌丛作为研究对象,利用 CT 扫描和 Avizo 软件解译,实现两种灌丛的根系和土壤大孔隙的三维可视化和量化。结果表明:金露梅灌丛根系和土壤大孔隙主要分布在 0—25 cm 土层,土壤中存在较多随机分布的独立大孔隙,大孔隙和根系的相似程度低于小叶锦鸡儿灌丛;小叶锦鸡儿灌丛根系和大孔隙则是在 0—50 cm 的范围内均有分布,土壤表层大孔隙集中且杂乱,表层以下大孔隙连通性较好,大孔隙和根系结构有较高相似性。内蒙古小叶锦鸡儿灌丛根系对土壤大孔隙的形成影响较大,而青海湖流域的金露梅灌丛根系对土壤大孔隙形成的影响则相对较小,因此,在不同海拔环境中灌丛根系对大孔隙的形成会因环境差异表现出不同的影响程度。

关键词:灌丛; 根系; 土壤大孔隙; CT 扫描

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0315-05

Influence of Shrub Roots on Soil Macropores Using X-Ray Computed Tomography

GAO Zhou^{1,2}, HU Xia^{1,2}

(1.Key Laboratory of Earth Surface and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract:To study the influence of shrub roots on soil macropores, undisturbed soil columns under shrub canopies were sampled (*Potentilla fruticose* shrub from Qinghai Lake Basin and *Caragana microphylla* shrub from Inner Mongolia) and scanned with X-ray computed tomography. Then 3 D soil macropores and root architecture were visualized and quantitated with Avizo software. The results showed that roots and macropores under *Potentilla fruticose* shrub mainly distributed in the 0—25 cm soil layer. In addition, independent macropores were found much more prevalent, which resulted in a less similarity with the roots compared with *Caragana microphylla* shrub. By contrast, roots and macropores under *Caragana microphylla* shrub distributed in the 0—50 cm soil layer. Macropores in the surface layer were concentrated and disorderly, while macropores in subsoil had a good connectivity and high similarity with the root architecture. The roots of *Caragana microphylla* shrub in Inner Mongolia had a greater influence on the formation of soil macropores, while the roots of *Potentilla fruticose* shrub in Qinghai Lake Basin had a relatively smaller impact on soil macropores. Therefore, the influence of shrub roots on macropores varies in different environments.

Keywords:shrub; root; soil macropores; CT

土壤大孔隙是水分和溶质优先迁移的通道,是土壤结构的关键参数之一^[1],对于生态水文过程有着重要意义。由于大孔隙内可形成优势流加快污染物进入深层土壤甚至地下水^[2],因此近年来大孔隙的研究也随着人们对生态环境的重视而愈受关注。大孔隙的研究方法包括染色法、切片法和 CT 扫描法,其中

CT 扫描作为新兴的无损检测技术,具有传统方法无法比拟的优点,如可以迅速、动态并无损伤量化土壤大孔隙结构,从而迅速应用于大孔隙的相关研究^[3-4]。

灌丛是指以灌木占优势的植被类型,由于其种类繁多、生活型多样且适应力强而成为干旱半干旱区的优势种,在群落的演替和区域生态环境保护方面均起

收稿日期:2019-08-05

修回日期:2019-08-25

资助项目:国家自然科学基金重点项目“青海湖流域关键带碳水过程及其生态功能变化”(41730854);国家自然科学基金“根系对灌丛化草地土壤大孔隙形成及水分运移的影响”(41471018)

第一作者:高宙(1996—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事土壤物理结构研究。E-mail:201821051113@mail.bnu.edu.cn

通信作者:胡霞(1978—),女,江苏淮安人,教授,主要从事土壤物理及其生态功能研究。E-mail:huxia@bnu.edu.cn

着重要作用^[5]。我国是世界上灌丛分布面积最广泛的国家之一,灌丛的生态水文作用也成为研究热点,研究表明灌丛的地上冠层部分可防止雨滴溅蚀、截留雨水导致水分输入的异质性并最终影响土壤水分的时空分布^[6-7],地下根系部分可影响土壤结构、地下流和养分积累^[8-9],地上部分和地下部分共同作用使得灌丛成为水分和养分相对集中的“肥岛”^[10]。灌丛可显著提高大孔隙度,已有研究证实灌丛斑块的大孔隙度是邻近草地斑块的数倍^[11],Hu 等^[12]进一步发现灌丛根系和大孔隙表现极显著正相关,认为灌丛下的众多大孔隙的形成是由于根系的发展。在全球变暖的背景下灌丛具有扩张的趋势^[13],但是在不同生态系统中灌丛根系如何影响土壤大孔隙的形成尚不明确,不同海拔和不同环境中灌丛在土壤大孔隙形成中的作用仍有待研究。因此探究不同生态系统中灌丛根系对大孔隙的影响对于从地下角度理解生物地球化学循环及灌丛对气候变化的响应具有重要意义。

本研究选择青海湖流域的金露梅灌丛和内蒙古的小叶锦鸡儿灌丛作为研究对象,通过 CT 扫描和 Avizo 软件解译分析灌丛根系结构特征和大孔隙结构特征,并分析不同生态系统中灌丛根系对土壤大孔隙形成的影响。

1 试验材料与方法

1.1 样品采集与理化性质测定

选择青海湖流域的金露梅(*Potentilla fruticose*)灌丛和内蒙古太仆寺旗的小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛作为采样点,海拔分别为 3 530 m 和 1 400 m,土壤类型分别为亚高山草甸土和栗钙土。选择各自平均长势的灌丛作为研究对象,并选择三株长势基本相同的灌丛作为重复,在每株灌丛的中

心位置采取原状土柱。土柱采集使用内径 10 cm、长度 50 cm 的圆柱状 PVC 管,将 PVC 管一端套住铁帽,将其缓慢压入土壤中,然后整个取出,用海绵填充两端再用堵头固定以防晃动影响大孔隙结构。

以 10 cm 为单位对土壤进行分层采样并在室内测定理化性质,采样点土壤的理化性质见表 1,其中有机质含量采用重铬酸钾—硫酸消化法测定,全氮含量采用半微量开氏法测定,全磷含量采用硫酸—高氯酸消煮法测定,有效磷含量采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法测定,机械组成利用马尔文激光粒度仪测定,由表 1 可知金露梅灌丛采样点的全氮和有机质含量明显高于小叶锦鸡儿灌丛采样点,金露梅灌丛采样点的肥力水平更高。

1.2 CT 扫描与图像解译

采用北京市世纪坛医院的 Philip Brilliant ICT (256 排多层螺旋 CT 扫描仪)扫描原状土柱。扫描模式设置为脊柱(spine)模式,峰值电压设定为 140 kV,电流为 200 mA,扫描层厚为 0.312 mm,得到体素为 0.146 mm×0.146 mm×0.312 mm,像素 1 024×1 024 的图像。

图像解译在 Avizo Fire 9.0 中完成。根系的解译采用阈值法结合区域生长法,流程包括:对原图切割得到感兴趣区域(ROI),选取作为生长法的种子阈值范围,利用魔棒模块捕捉所有相邻的根系体素点,对所得图像膨胀和侵蚀,利用体渲染实现根系的三维空间结构可视化,利用计算模块得到根系体积密度(根系总体积/ROI 体积);大孔隙的解译流程包括:对原图切割得到感兴趣区域(ROI),利用交互阈值法将选取的大孔隙阈值应用于 ROI 得到二值化数据,利用体渲染实现大孔隙三维空间结构可视化,利用计算模块得到大孔隙度(大孔隙总体积/ROI 体积)。

表 1 采样点土壤的基本理化性质

灌丛	土壤 类型	土层 深度/cm	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	0.25≤Φ <2.00 mm/%	0.05≤Φ <0.25 mm/%	0.02≤Φ <0.05 mm/%	0.002≤Φ <0.02 mm/%	Φ<0.002 mm/%
金露梅	亚高山草甸土	0—10	6.950	0.939	148.00	21.10	38.90	21.40	10.00	25.00	4.70
		10—20	7.220	1.010	164.00	23.90	18.57	16.73	30.00	25.00	9.70
		20—30	5.140	0.711	122.00	17.90	12.43	12.87	35.00	30.00	9.70
		30—40	2.540	0.312	67.40	19.20	4.44	15.86	20.00	35.00	24.70
		40—50	2.000	0.257	55.50	17.00	5.31	19.99	15.00	35.00	24.70
小叶锦鸡儿	栗钙土	0—10	0.190	0.020	33.03	18.93	7.74	53.18	11.70	10.50	16.88
		10—20	0.251	0.025	41.83	17.83	5.30	40.82	18.00	16.00	19.88
		20—30	0.159	0.015	26.69	5.11	8.83	39.29	10.00	14.00	17.88
		30—40	0.121	0.012	19.31	5.48	41.29	33.83	5.00	8.00	11.88
		40—50	0.118	0.013	21.53	2.17	33.83	44.29	3.00	4.00	14.88

1.3 数据处理与绘图

根系和大孔隙的三维空间结构图在 Avizo Fire 9.0

软件中得出;数据的绘图工作在 Origin 中完成,根系体积密度和大孔隙度的线性拟合也一并在 Origin 中完成。

2 结果与分析

2.1 灌丛根系三维形态特征

图1是金露梅灌丛和小叶锦鸡儿灌丛的根系三维结构特征。由图1可知,较粗的金露梅灌丛主根主要分布在0—25 cm土层,根系随土层深度的增加而逐渐减少,并且在主根周围有一部分形状不规则根系,而在25 cm以下根系较少。

小叶锦鸡儿灌丛根系在0—50 cm范围内都有分布,表层均为细根,多数呈垂直分布,在20—30 cm土层内分布着直径较粗的根系,绝大部分呈横向生长,部分侧根向四周呈散射状分布,在30 cm处,根系分布出现明显的断层现象,而在35—50 cm的土层,有个别粗根沿一定倾角向下延伸,横向细根也呈一定倾角向下延伸。

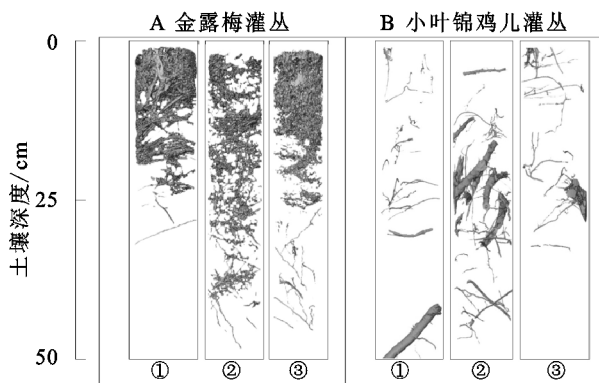


图1 灌丛根系的三维结构

2.2 土壤大孔隙三维形态特征

图2是金露梅灌丛和小叶锦鸡儿灌丛的大孔隙三维结构特征。由图2可以看出,金露梅灌丛的大孔隙主要分布在0—25 cm土层,其中既有连续性大孔隙,也存在随机分布的独立的大孔隙并且其数量较多。

小叶锦鸡儿的大孔隙在0—50 cm的采样深度中均有分布,这与李宗超等的研究结果一致^[14],其中表层0—10 cm的土壤大孔隙集中且杂乱,20—30 cm范围内分布的大孔隙结构形态和根系结构形态有高度相似性,连续性较好。

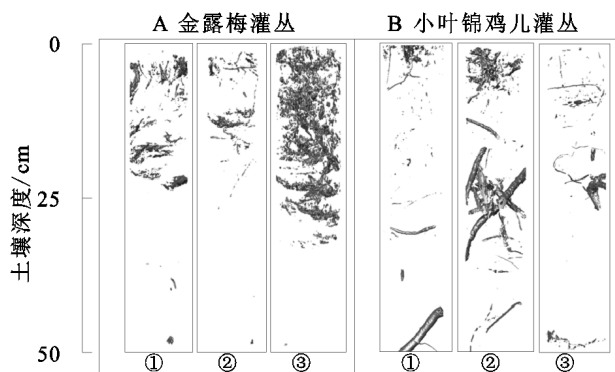


图2 灌丛下土壤的大孔隙三维结构

2.3 灌丛根系对土壤大孔隙的影响

图3是金露梅灌丛和小叶锦鸡儿灌丛的根系体积密度与大孔隙度随土层深度的变化,由此可分析根系与大孔隙在垂向分布方面的异同。金露梅灌丛根系和大孔隙都主要分布在0—25 cm土层,小叶锦鸡儿灌丛根系和大孔隙则都是0—50 cm的范围内都有分布,从整体来看根系和大孔隙的波动非常相似,波峰和波谷出现的深度大致相同,但两者并不表现完全的一致性,如小叶锦鸡儿灌丛表层根系体积密度较低却有较高的大孔隙度。

由图1和图2可对比两种灌丛根系和大孔隙在三维形态方面的相似性和差异。小叶锦鸡儿根系和大孔隙有更高的结构相似性,而金露梅根系和大孔隙的一致性则较差,此外两种灌丛的根系和大孔隙在某些特定深度上差异较大,如金露梅灌丛②和③在25 cm以下有细根存在却无大孔隙,小叶锦鸡儿灌丛②表层基本无根系但却有较多大孔隙。

由此可见根系和大孔隙在垂向分布和三维形态上均存在较高相似性,根系是大孔隙形成的主要原因,但两者又不完全相同,并不是所有根系均可形成大孔隙,所有的大孔隙也并不都是由根系形成。

图4是金露梅灌丛和小叶锦鸡儿灌丛的根系体积密度与大孔隙度的相关性。两种灌丛的根系体积密度和大孔隙度都在极显著水平上表现为正相关,再次说明灌丛根系对大孔隙具有重要影响,但拟合程度不同,金露梅灌丛根系体积密度和大孔隙度的可决系数(R^2)分别为0.539 2,0.608 4,0.339 3,平均为0.495 6;小叶锦鸡儿灌丛则为0.615 8,0.600 1,0.608 0,平均为0.608 0,高于金露梅灌丛,说明灌丛根系对大孔隙的形成虽有重要作用但会因灌丛物种差异和环境差异表现出不同的影响程度。

3 讨论

灌丛常镶嵌生长于草本植物之间或是裸露的土壤基质之上,相比于邻近的草本斑块或是裸地斑块,灌丛斑块的大孔隙度更高且深层土壤的大孔隙更多^[15],从而可形成优势流有利于水分进入深层土壤,这都与灌丛根系有关。两种灌丛的根系体积密度和大孔隙度均呈极显著正相关关系,证明根系对大孔隙的形成具有重要作用,两者相互作用进一步影响着水分运移和保持^[16-17],Kuka^[18]等进一步通过根系和大孔隙的三维结构参数之间的相关性验证了这一结论。有学者在剖面观察中发现根系更倾向于生长在土壤大孔隙周围^[12],说明根系和大孔隙的关系是交互式的,根系的发展有利于大孔隙的形成,大孔隙又有利于根系的增殖,因此通过根系生长情况可大致推断大孔隙结构。

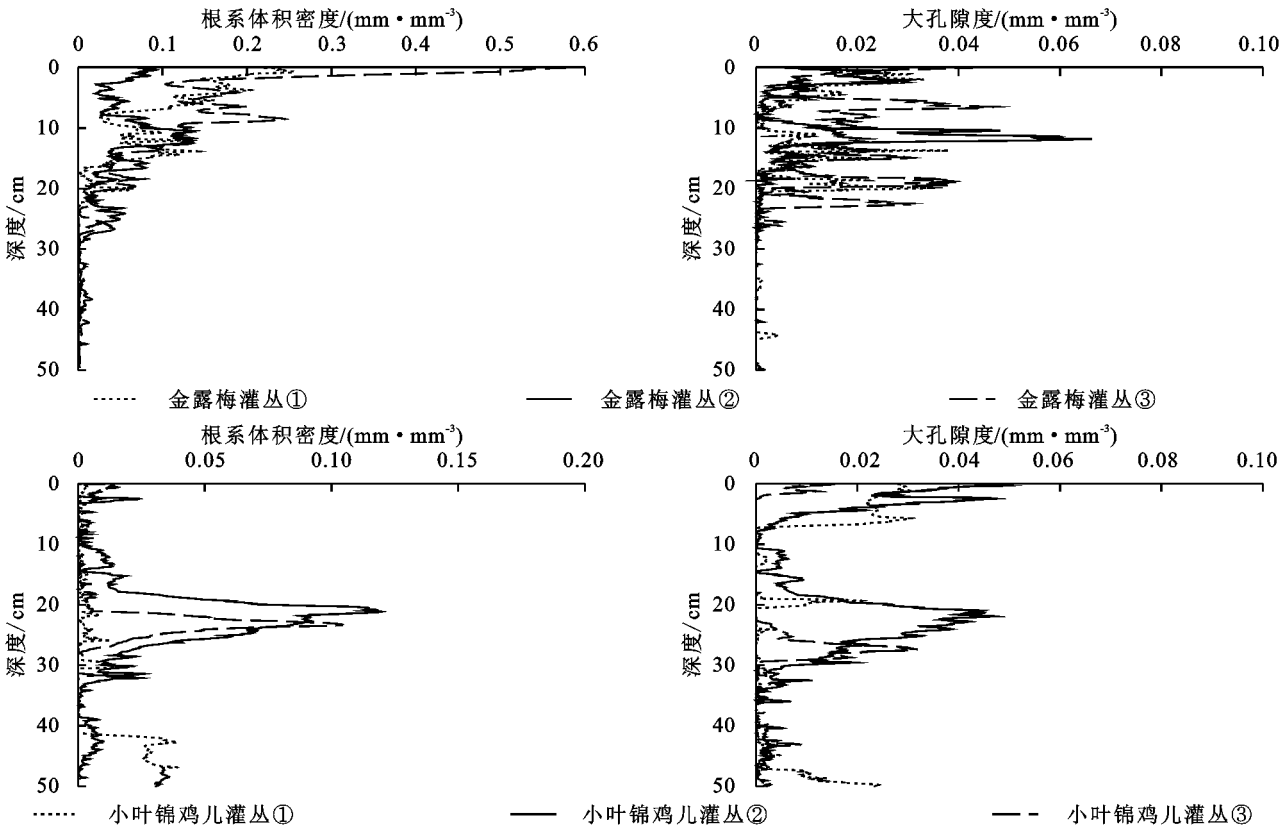


图 3 根系体积密度和大孔隙度随深度的变化

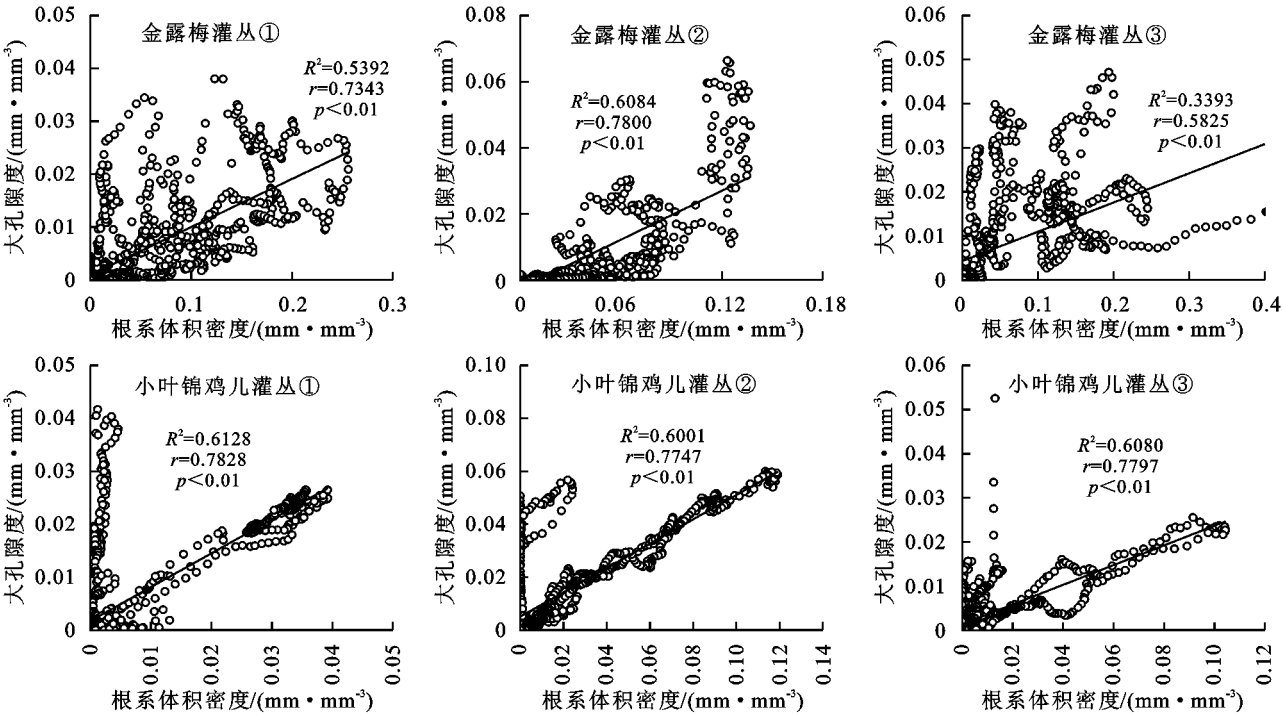


图 4 根系体积密度和大孔隙度的相关性

Jarvis^[19]根据成因将土壤大孔隙分为生物孔隙和团聚孔隙,生物孔隙是由蚯蚓活动或根系腐烂形成,其体积更大,连通性也更好;团聚孔隙是应力在含有膨胀/收缩黏土矿物的土壤体中发生或是由于干湿交替及冻融作用中形成,其体积较小,连通性也较差。由图 2 可以看出,小叶锦鸡儿灌丛的大孔隙连续性较好且结构形态和根系有较高相似性,推断灌丛根系在该地土壤大孔隙的形成过程中有重要作用;而金露梅灌丛的大孔隙较分散、连续性差且取自海拔 3 530 m,推断除根系外冻融循环也在该地大孔隙的形成过程中有重要作用,这也可解释小叶锦鸡儿灌丛的根系体积密度和大孔隙度的拟合程度优于金露梅灌丛。此外

土壤类型也影响着大孔隙的形成,金露梅灌丛采样点为亚高山草甸土,有机质含量高,已有研究表明有机质会增加200~600 μm 范围内的孔隙数量进而增大孔隙度^[20],因此相比于小叶锦鸡儿灌丛,金露梅灌丛下的土壤中存在较多的团聚孔隙。

因此,灌丛根系对土壤大孔隙的形成具有重要作用,但在不同环境下灌丛根系对大孔隙的影响程度不同,根系作为影响大孔隙的主要因素之一,与其他因素如土壤类型、冻融循环、干湿交替和人类活动共同作用决定着大孔隙的形成、分布和形态,当其他因素作用较强时,根系作用自然随之减弱。

4 结论

(1) 通过CT扫描和Avizo软件解译实现金露梅灌丛和小叶锦鸡儿灌丛的根系和大孔隙的三维可视化和量化。在垂向分布方面,金露梅灌丛根系和大孔隙都主要分布在0—25 cm土层,小叶锦鸡儿灌丛根系和大孔隙则在0—50 cm的范围内都有分布;在三维形态方面,小叶锦鸡儿灌丛表层大孔隙集中且杂乱,表层以下大孔隙连通性较好,和根系结构有较高相似性,金露梅灌丛存在较多随机分布的独立大孔隙,和根系的相似程度低于小叶锦鸡儿灌丛;

(2) 金露梅灌丛和小叶锦鸡儿灌丛的根系体积密度与大孔隙度的相关性都表现为极显著正相关,说明灌丛根系对大孔隙的形成具有重要作用。金露梅灌丛根系体积密度和大孔隙度的拟合程度低于小叶锦鸡儿灌丛,说明内蒙古小叶锦鸡儿灌丛根系对土壤大孔隙的形成影响较大,而青海湖流域的金露梅灌丛根系对土壤大孔隙形成影响相对较小,灌丛根系对大孔隙的形成会因环境差异表现出不同的影响程度。

参考文献:

- [1] 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: 9-20.
- [2] Isensee A R, Helling C S, Gish T J, et al. Groundwater residues of atrazine, alachlor, and cyanazine under no-tillage practices[J]. *Chemosphere*, 1988, 17(1): 165-174.
- [3] 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(3): 465-468.
- [4] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用X射线CT研究多尺度土壤结构[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1226-1230.
- [5] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. *植物生态学报*, 2006(4): 5-10.
- [6] Johnson M S, Lehmann J. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow[J]. *Ecoscience*, 2006, 13(3): 324-333.
- [7] Levia Jr D F, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 274(1/4): 1-29.
- [8] 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.
- [9] Li X Y, Zhang S Y, Peng H Y, et al. Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: results from Inner Mongolia steppe ecosystem of north China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171: 20-30.
- [10] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 干旱半干旱区草原灌丛化研究进展[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 313-322.
- [11] Li X Y, Hu X, Zhang Z H, et al. Shrub hydrogeology: preferential water availability to deep soil layer[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4), DOI: 10.2136/vzj2013.01.0006.
- [12] Hu X, Li X Y, Guo L L, et al. Influence of shrub roots on soil macropores using X-ray computed tomography in a shrub-encroached grassland in Northern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4): 1970-1980.
- [13] Elmendorf S C, Henry G H R, Hollister R D, et al. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time[J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(2): 164-175.
- [14] 李宗超, 胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 242-248.
- [15] Li Z, Hu X, Li X. Characterization of root architectures and soil macropore networks under different ecosystems using X-ray CT scanning in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 19(4): 743-757.
- [16] Gao Z, Niu F, Wang Y, et al. Root-induced changes to soil water retention in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(3): 791-803.
- [17] Pierret A, Doussan C, Capowiez Y, et al. Root functional architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(2): 269-281.
- [18] Kuka K, Illerhaus B, Fox C A, et al. X-ray computed microtomography for the study of the soil-root relationship in grassland soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4), DOI: 10.2136/vzj2013.01.0014.
- [19] 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.
- [20] Larsbo M, Koestel J, Kätterer T, et al. Preferential transport in macropores is reduced by soil organic carbon[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(9), DOI: 10.2136/vzj2016.03.0021.