

基于 CT 的青海湖流域芨芨草草地土壤大孔隙特征分析^①

刘勇^{1,2}, 胡霞^{1,2*}, 李宗超^{1,2}, 孙贞婷^{1,2}, 程亚倩^{1,2}, 吕艳丽^{1,2}

(1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 为探究青海湖流域芨芨草草地的土壤大孔隙特征, 以青海湖流域芨芨草草地为研究对象, 在研究区芨芨草斑块处和芨芨草斑块间分别采集原状土柱, 每块样地选取 3 个重复样品, 通过对样品进行 CT 扫描并利用 Fiji 软件解译的方法分析土壤孔隙的结构特征差异。结果表明: 芨芨草斑块土壤平均大孔隙数量、不同深度大孔隙数量、平均大孔隙度以及不同深度大孔隙度均大于芨芨草斑块间土壤。芨芨草斑块土壤大孔隙平均数量是芨芨草斑块之间的 2.8 倍, 平均大孔隙度是芨芨草斑块间的 12.1 倍, 芨芨草斑块的土壤大孔隙度随土壤深度增加呈先增加后减少的趋势, 斑块间的大孔隙度呈递减趋势。

关键词: 青海湖流域; 芨芨草; CT; 土壤大孔隙

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A

青海湖是我国面积最大的内陆咸水湖泊, 湖泊面积 4 318 km²(2008 年), 流域总面积 29 661 km², 其流域地形复杂, 加上湖泊河流等水文因素作用, 因此该地区土壤植被类型繁多^[1]。

芨芨草属禾本科芨芨草属植物^[2], 广泛分布于青海湖盆地、共和盆地以及柴达木盆地等青海东部地区^[3], 具有耐寒、耐旱、耐盐、适应性强等特点^[4], 是重要的牧草、纤维植物和水土保持植物^[5]。陈桂琛和彭敏^[3]对青海地区芨芨草群落的特征及分布规律进行研究后发现, 该地区分布的芨芨草群落特征和生境条件具有草原植被特征和地带性意义。水分是限制芨芨草草原生态系统发育的关键因子, 小降水事件 (<5 mm) 是该生态系统水分补给的重要来源, 而且能被该草原生态系统高效利用, 避免干旱胁迫^[6]。草地退化能够导致土壤孔隙度减少并间接导致 0 ~ 5 cm 土壤容积含水量极显著升高, 20 cm 以下显著降低^[7]。一些研究发现芨芨草能显著提高草原土壤速效养分含量以及土壤的阳离子代换量^[8], 土壤理化性状的改变会影响到生态系统功能和效益的发挥^[9]。到目前为止, 国内对芨芨草的研究主要集中在芨芨草草原生态系统的空间分布格局、物种多样性以及生态功能等方面^[10-11], 对于芨芨草地土壤结构的研究, 尤其是土壤孔隙特征的研究相对较少。

土壤大孔隙是土壤结构特征的重要组成部分。大孔隙是在土壤涨缩、可溶性物质溶解、冻融循环交替、耕种等物理过程及蚯蚓动物活动、植物根系生长等生物过程的作用下, 土体内形成使水分和溶质优先迁移的物理孔隙^[12]。研究表明, 很多因素会对土壤大孔隙特征产生影响, 冻融循环能够显著降低 40 ~ 80 cm 土层范围内的平均大孔隙面积以及 Feret 直径^[13], 小叶锦鸡儿灌丛化对土壤的孔隙结构有较大影响^[14], 坡位能够导致土壤大孔隙结构特征产生差异^[15]。土壤大孔隙直接影响土壤中水分的运移方式和途径^[16], 形成孔隙流或优势流, 加快浅层土壤中水分渗入土壤深处速率, 提高土壤通透性和降水入渗率, 改变土壤径流形成过程和比例^[17]。为评价大孔隙对水流及溶质运移特性的影响, 需确定土壤中大孔隙的大小、数目、分布和连通性^[18]。目前对大孔隙研究的方法主要有染色法、切片法、CT 扫描法^[19], 其中 CT 扫描技术操作简单、迅速, 可以保持土壤样品原状结构, 通过三维技术对土壤孔隙网络结构定量分析, 是无损检测土壤结构的有效手段。

本文选择青海湖流域的芨芨草草地为研究样地, 通过 CT 扫描技术确定芨芨草草地土壤的孔隙结构、孔隙数量以及垂直分布规律, 对比分析芨芨草斑块和芨芨草斑块间土壤孔隙特征, 从而揭示芨芨草对土壤

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471018)和国家自然科学基金重点项目(41130640)资助。

* 通讯作者(huxia@bnu.edu.cn)

作者简介: 刘勇(1990—), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理及其生态功能研究。E-mail: esc1909@163.com

大孔隙特征的影响,为合理解释土壤大孔隙对水分运移以及优势物种芨芨草对水分利用的机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域选在青海湖流域沙柳河下游地区(图 1),该地区气候属高原大陆性气候,常年低温、干旱少雨,太阳辐射强烈,气温日较差大,年平均降水量为 291~571 mm,年蒸发量为 1 200~2 000 mm。沙柳河下游地区土壤为栗钙土,主要植被类型为芨芨草、河谷灌木具鳞水柏枝以及农作物(燕麦、青稞等)^[20]。

1.2 样品采集

选择芨芨草原作为研究样地,分别在芨芨草斑块和芨芨草斑块间用 PVC 管采集原状土样,并设置 3 个重复。PVC 管直径为 10 cm,壁厚为 4 mm,长度为 50 cm,将 PVC 管一端套住铁帽,将其缓慢压

入采样点土壤中,然后挖开旁边土壤,将 PVC 管连同管内土壤整个取出,空隙部分用海绵填充包裹,避免土壤散开,管内土壤则为原状土样。通过室内分析测定得到土壤基本理化性质如表 1 所示。

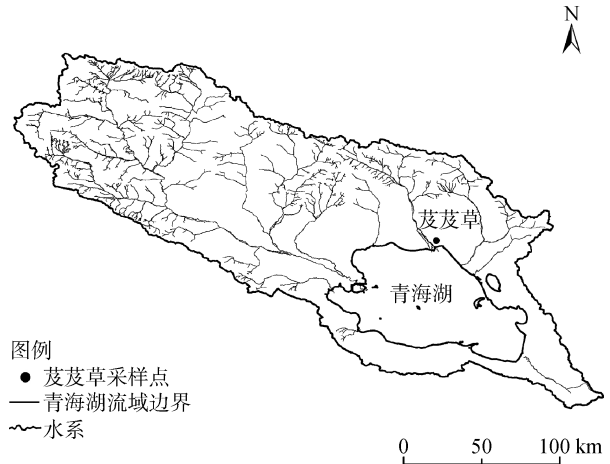


图 1 青海湖流域样地
Fig. 1 Location of sample plots of Qinghai Lake valley

表 1 芨芨草草地土壤基本理化性质
Table 1 Soil properties within *Achnatherum splendens* patch

土层 (cm)	有机质 (g/kg)	电导率 (S/m)	机械组成(g/kg)					
			<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~2.00 mm	≥2.00 mm
10	86.8	0.243	9.88	20.00	24.00	42.09	4.03	0.00
20	28.7	0.289	17.88	26.00	24.00	29.11	1.01	0.00
40	21.4	0.263	25.88	28.00	26.00	18.82	1.30	0.00
60	14.7	0.280	31.88	34.00	18.00	15.09	1.03	0.00
100	12.1	0.289	33.88	34.00	16.00	13.58	2.54	0.00

1.3 CT 扫描与图像处理

原状土样采用 Light Speed VCT(64 排多层螺旋 CT 扫描仪)扫描,该 CT 应用在医学领域,为保证扫描土壤样品图像的质量和精度,需重新设定扫描参数。经调整 峰值电压为 130 kV,检测电流为 200 mA,螺距为 0.948:1。扫描图像矩阵为 512 × 512,扫描层厚为 0.625 mm/层,体素大小 0.33 mm × 0.33 mm × 0.625 mm。

扫描图像为 tif 格式,导入 Fiji 软件,为了将土壤部分与 PVC 管壁分开,因此需要利用圆形工具对图片进行切割。经多次对比分析确定合适阈值,对图像进行二值化处理,黑色代表孔隙,白色部分代表土壤或者其他介质(图 2)。根据二值化图像提取大孔隙轮廓,然后对所有图片进行堆栈得到孔隙三维图像,对二值化图像进行分析可以计算出孔隙面积、周长等特征参数。



图 2 图像处理过程
Fig. 2 Image processing course

2 结果与分析

2.1 土壤孔隙三维形态特征

图 3 是青海湖流域芨芨草草地土壤大孔隙的三维图。从图中可以看出,芨芨草斑块土壤的大孔隙明显高于芨芨草斑块之间土壤。而且,芨芨草斑块土壤的大孔隙在整个土层都有分布,斑块之间土壤的大孔隙主要分布在土层上部。

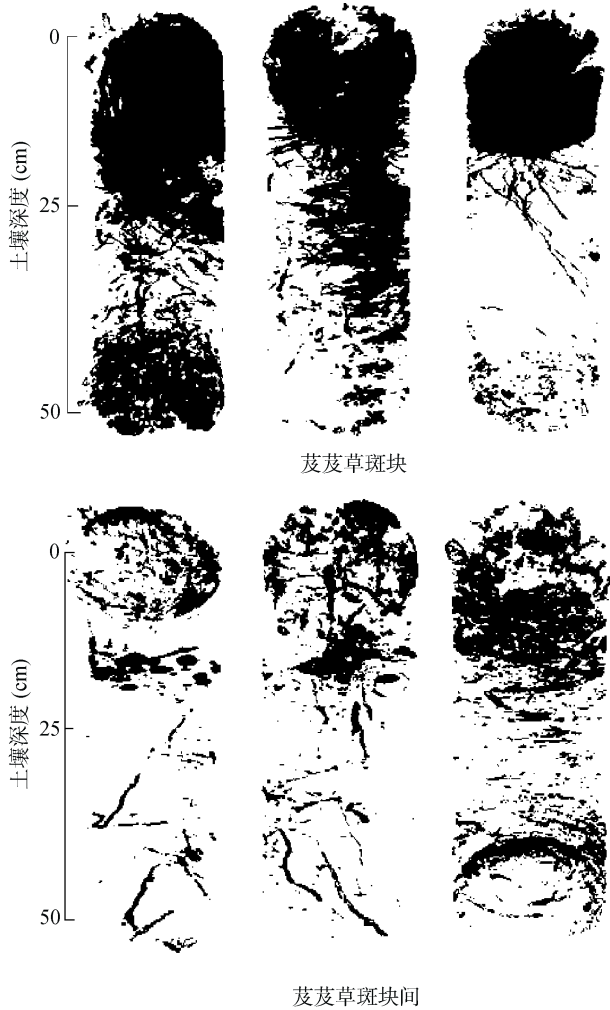


图 3 芨芨草斑块和斑块间土壤孔隙三维可视化图
Fig. 3 3D visualization of soil macropores within (up) and outside (down) *Achnatherum splendens* patch

芨芨草斑块土壤的大孔隙在形态特征上都较连续;而芨芨草斑块之间的土壤大孔隙在形态上较分散、不连续。一般情况下,蚯蚓等生物形成大孔隙且相对连续、呈管状;而由根系形成的孔隙也相对比较连续、圆形,且随深度增加大孔隙呈减小趋势^[21],观察芨芨草斑块下土壤剖面 and 周边环境,均未发现大量土壤动物活动,从土壤剖面观测到芨芨草的主根主要分布在 15~25 cm 土层,三维图中大孔隙分布呈向下扩散状且连续性较好,因此可以判断该地土壤孔隙的形成主要是根系作用。从芨芨草斑块间土壤孔隙三维图可以看出,大孔隙在表层 0~10 cm 土壤分布较为密集,在 20~30 cm 深度处也有部分孔隙存在。

2.2 大孔隙数量

Warner 等^[22]在 X 射线摄影技术研究大孔隙特征的应用中,将直径比团聚体间缝隙大的且孔径大于 1 mm 的孔隙称作大孔隙;Luxmoore 等^[23]以毛管模型为依据,推算出大孔隙当量孔径大于 1 mm。因此本文选择孔径大于 1 mm 的孔隙作为土壤大孔隙,利用 Fiji 软件,在二值化图像中提取等效直径大于 1 mm 的孔隙,可以计算出大孔隙数量。

表 2 是芨芨草斑块和斑块之间的土壤平均大孔隙数量及不同深度土壤大孔隙平均数量。从表 2 可以看出,芨芨草斑块的土壤大孔隙数量明显大于芨芨草斑块之间土壤,芨芨草斑块下的大孔隙平均数量是芨芨草斑块之间的 2.8 倍,其数值分别是 31 和 11 个。芨芨草斑块下土壤大孔隙主要分布在 0~20 cm 土层,尤其在 0~10 cm 深度土层大孔隙数量最多,占总大孔隙数量的 41.17%,且随土壤深度的增加大孔隙数量逐渐减少;芨芨草斑块间土壤大孔隙数量在土壤表层最多,占总大孔隙数量的 47.30%,在 20~30 cm 土层大孔隙数量要多于 10~20 cm 和 30~40 cm 土层,因此,芨芨草斑块间的土壤大孔隙数量在土层中呈现先增加后减少的现象。

表 2 芨芨草斑块和芨芨草斑块间土壤的大孔隙数量
Table 2 Numbers of soil macropores within and outside *Achnatherum splendens* patch

样地	大孔隙平均数量	不同深度土壤大孔隙数量			
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
芨芨草斑块	31	51 ± 68	37 ± 3	22 ± 8	13.87 ± 7
芨芨草斑块之间	11	20 ± 3	5 ± 1	12 ± 8	5.82 ± 3

注:表中数据为平均值 ± 标准差。下表同。

2.3 大孔隙度特征

芨芨草斑块各个土层的土壤大孔隙度均大于斑块间土壤大孔隙度,且平均大孔隙度是芨芨草斑块间的 12.1 倍,其中芨芨草斑块在 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层的大孔隙度分别是斑块间的 28.1、6.67、1.1、2.1 倍。在土壤 0~10 cm 深度,芨芨草斑块和芨芨草斑块之间的大孔隙度存在显著性差异,且芨芨草斑块的土壤大孔隙度明显大于芨芨草斑块间;在土壤 10~20、20~30 和 30~40 cm 深度,

芨芨草斑块和芨芨草斑块之间的大孔隙度没有显著性差异,但是前者的大孔隙度明显大于后者。

图 4 是土壤大孔隙度随土壤深度变化图,从图中可以看出,芨芨草斑块 3 个重复的土壤大孔隙度随土壤深度变化的趋势相同,随着土壤深度的增加大孔隙度先增加后减少,重复 2 和重复 3 大孔隙度的峰值出现在 3 cm 处,重复 1 的峰值出现在 8.8 cm 处,重复 2 和重复 3 的大孔隙度下降,在深度 10 cm 处以下趋于平缓,重复 1 的大孔隙度在土深 20 cm 处趋于平缓。

表 3 芨芨草斑块和芨芨草斑块间土壤大孔隙度(%)

Table 3 Mean macroporosity and macroporosities in different depths within and outside *Achnatherum splendens* patch

样地	平均大孔隙度	不同深度土壤大孔隙度			
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
芨芨草斑块	9.32	30.29 ± 6.70	5.07 ± 4.00	0.70 ± 0.38	1.20 ± 1.00
芨芨草斑块之间	0.77	1.08 ± 0.35	0.76 ± 0.33	0.64 ± 0.02	0.59 ± 0.03

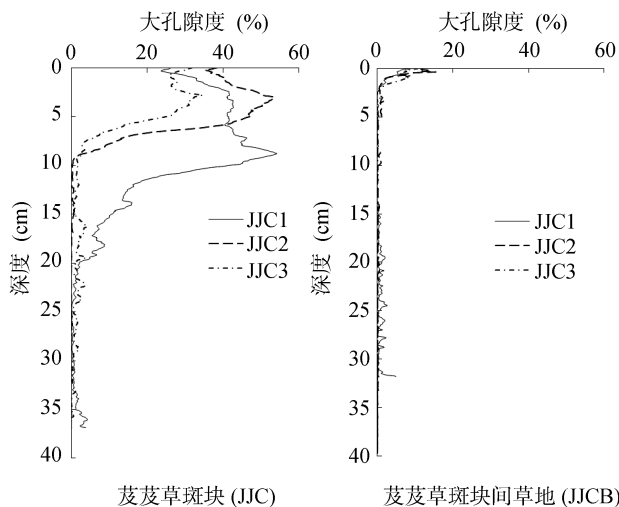


图 4 芨芨草斑块和芨芨草斑块间土壤的土壤大孔隙度随土壤深度变化特征

Fig. 4 Macroporosity distributions in soil profiles within (left) and outside (right) *Achnatherum splendens* patches

芨芨草斑块间的 3 个重复的土壤大孔隙度随土壤深度的变化一致,随土壤深度增加大孔隙度呈减少趋势,3 个重复在 0~2.5 cm 的范围内大孔隙度随深度的增加迅速递减,重复 1 在 16~32 cm 范围内的大孔隙度增加并出现波动。对比芨芨草斑块和斑块间的大孔隙度随土壤深度变化图,能够明显看出芨芨草斑块下的大孔隙度较大且随土壤深度变化呈先增加后减少的趋势;而芨芨草斑块间的土壤大孔隙度较小且随土壤深度变化呈先递减后平稳的趋势。从芨芨草斑块与芨芨草斑块间土壤大孔隙度特征的差别来看,主要原因可能是植被的根系作用。

3 结论

从大孔隙的三维形态上来看,芨芨草斑块土壤的大孔隙在形态特征上较连续,而芨芨草斑块之间的土壤大孔隙在形态上较分散、不连续。芨芨草斑块土壤大孔隙平均数量和大孔隙度明显高于芨芨草斑块间土壤,且芨芨草斑块土壤的大孔隙的连通度高于斑块间土壤。芨芨草斑块土壤大孔隙主要分布在 0~20 cm 土层,尤其在 0~10 cm 深度土层大孔隙数量最多,芨芨草斑块间土壤大孔隙数量在土壤表层最多。芨芨草斑块和芨芨草斑块之间的 10~40 cm 深度土壤没有显著性差异,但前者大孔隙度明显大于后者。芨芨草斑块土壤大孔隙度随着土壤深度的增加先增加后减少,芨芨草斑块间土壤大孔隙度随土壤深度增加呈减少趋势。

参考文献：

- [1] 刘吉峰,李世杰,秦宁生,等. 青海湖流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(3): 321-326
- [2] 刘尚武,中国科学院,西北高原生物研究所,等. 青海植物志. 第二卷[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1999
- [3] 陈桂琛,彭敏. 青海省芨芨草草原的群落特征及其分布规律[J]. 西北植物学报, 1993, 13(2): 154-162
- [4] 张雨军. 对芨芨草草场资源在鄂尔多斯市开发利用的建议[J]. 内蒙古草业, 2002, 14(2): 28-29
- [5] 卫东,王彦荣. 芨芨草种子发芽检验方法的研究[J]. 草业科学, 1998, 15(4): 29-32
- [6] Ehleringer J, Dawson T. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(9): 1073-1082
- [7] 张法伟,郭竹筠,李以康,等. 青海湖芨芨草干草原植

- 被退化对土壤温湿特征的影响[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 219–225
- [8] 王库, 于天富. 水土保持植物——芨芨草对土壤养分的影响[J]. 土壤, 2002, 34(3): 170–172
- [9] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640–1647
- [10] 周国英, 陈桂琛, 魏国良, 等. 青海湖地区芨芨草群落主要种群分布格局研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(3): 579–584
- [11] 周国英, 陈桂琛, 赵以莲, 等. 青海湖地区芨芨草群落特征及其物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 1956–1962
- [12] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 611–617
- [13] 王恩娟, 卢倩倩, 陈祥伟. 模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 490–496
- [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, 42(1): 242–248
- [15] 胡霞, 李宗超, 刘勇, 等. 基于 CT 扫描研究青海湖流域高寒草甸不同坡位土壤大孔隙结构特征[J]. 土壤, 2016, 48(1): 180–185
- [16] Dunkerley D. Assessing the influence of shrubs and their interspaces on enhancing infiltration in an arid Australian shrubland[J]. The Rangeland Journal, 2000, 22(1): 58–71
- [17] Germann P, Beven K. Water flow in soil macropores i. An experimental approach[J]. Journal of Soil Science, 1981, 32(1): 1–13
- [18] 冯杰, 郝振纯. CT 在土壤大孔隙研究中的应用评述[J]. 灌溉排水, 2000, 19(3): 71–76
- [19] 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
- [20] 吴华武, 李小雁, 蒋志云, 等. 基于 δD 和 $\delta^{18}O$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8174–8183
- [21] 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
- [22] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macropores in soil by computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(3): 653–660
- [23] Luxmoore R J, Jardine P M, Wilson G V, et al. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope[J]. Geoderma, 1990, 46(1): 139–154

Soil Macropore Characteristics of *Achnatherum splendens* Steppe in the Qinghai Lake Watershed

LIU Yong^{1,2}, HU Xia^{1,2*}, LI Zongchao^{1,2}, SUN Zhenting^{1,2}, CHENG Yaqian^{1,2}, LV Yanli^{1,2}

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil macropore characteristics of *Achnatherum splendens* Steppe in the Qinghai Lake Watershed of northeastern Qinghai-Tibet Plateau by using computed tomography (CT) was quantified. A plot within a *Achnatherum splendens* patch and a plot outside a *Achnatherum splendens* patch were selected, and 3 soil cores (0–50 cm deep) were taken as replicates from each plot and scanned with a GE HISPEED FX/I medical scanner. The results indicated that the number of macropores and the macroporosity of soil within the *Achnatherum splendens* patch were larger than those of soil outside the patch, the mean numbers of macropore and macroporosity of soil within the *Achnatherum splendens* patch were 2.8 times and 12.1 times greater than those in soil outside the patch. With the increase of soil depth, the macroporosity increased first and then decreased within the *Achnatherum splendens* patch, while it decreased continuously in soil outside the patch.

Key words: *Achnatherum splendens*; CT; Soil macropores