

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^①

胡霞^{1,2}, 李宗超^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 孙贞婷^{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:以青海湖流域的高寒草甸土壤为研究对象, 对该高寒草甸的坡上、坡中和坡下土壤分别取原状土柱进行 CT 扫描, 利用 Fiji 软件分析土壤大孔隙结构特征的差异。结果表明: 坡位对土壤的大孔隙结构有较大影响, 坡上土壤的大孔隙数量、大孔隙度和大孔隙等效直径均大于坡中土壤, 坡中土壤的大孔隙参数大于坡下土壤, 坡上土壤的平均大孔隙度是坡中和坡下土壤的 15.5 和 46.5 倍。坡上土壤的大孔隙主要分布在 150~400 mm 土层深度, 而坡中土壤的大孔隙主要分布在 0~150 mm 深度, 坡下土壤的大孔隙主要在 0~200 mm 深度分布。坡上和坡中土壤的大孔隙形成主要是在土壤团聚体的作用下形成, 植物根系在坡下土壤的大孔隙形成中占主导作用。

关键词:高寒草甸; 坡位; 大孔隙; 青海湖; 根系

中图分类号:S157.1

青海湖流域位于青藏高原东北部, 是我国西北干旱区、西南高寒区和东部季风区的交汇区, 青海湖流域受气候变化和人类活动的影响, 青海湖流域生态恶化, 出现草场退化、土地沙漠化面积扩大、水土流失严重、生物多样性减少等一系列生态问题^[1]。青海湖流域的土地退化面积超过 $6.9 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 以每年 3% 的速度退化^[1]。土地退化会影响土壤结构特征的变化^[2-3], 其中, 孔隙结构是描述土壤结构特征的重要参数^[4]。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等动物活动、植物根系生长等生物过程的作用下, 土体内形成的使水分和溶质优先迁移的物理孔隙^[5-6]。大孔隙的存在可形成大孔隙流或优势流, 使浅层土壤中的水分快速渗入土壤深处或地下水中, 加快了地下水响应速度, 增加土壤通气性, 提高降雨的入渗率, 改变了坡地径流的形成过程和不同径流成分的比例^[7-10]。

坡面水土流失是导致土壤质量退化及坡面生产力下降的重要原因^[11-12], 并造成不同坡位土壤性质变异^[13]。研究坡面土壤特征, 探讨坡面土壤质量退化原因, 对其进行植被恢复, 将有助于控制土壤退化, 提高土地生产力, 减缓水土流失, 加速退化生态系统

的恢复与重建, 改善生态环境。目前关于坡面土壤方面的研究主要集中在坡地养分流失规律和形态^[14-15]、退耕地土壤性质变化^[16]、植被恢复^[17]、土壤水文效应^[18]等。但是有关不同坡位对土壤结构的影响研究相对较少。本研究选择青海湖流域高寒草甸的坡上、坡中和坡下土壤, 通过 CT 扫描分析高寒地区不同坡位土壤的大孔隙三维结构特征、孔隙数量、孔隙度特征, 研究了青海湖流域高寒草甸不同坡位土壤的大孔隙类型和特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青藏高原东北部, 流域面积 29 661 km², 海拔 3 194~5 174 m(图 1)。由于处在中国东部季风区、西北部干旱区和西南部青藏高原高寒区的交汇地带, 再加上自身的湖泊效应, 青海湖流域形成了明显的高寒、少雨、多风、太阳辐射强烈、气温日较差大的地区气候特点。流域内的自然植被包括高寒灌丛、河谷灌丛、沙生灌丛、干旱草甸、高寒草原、温性草原等。

1.2 样品采集

选择青海湖流域的高寒草甸作为研究样地, 样地

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。

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

位于沙柳河中游,地理位置 100.035°E , 37.575°N (图 1)。分别在高寒草甸的坡上、坡中和坡下采集原状土柱,采样设置 3 个重复。坡上采样点的经纬度分别是 100.011°E , 37.596°N , 其主要植被是小嵩草、金露梅、珠芽蓼、灯芯草、黑褐苔草、冷地早熟禾等;坡中采样点的经纬度分别是 100.0074°E , 37.595°N , 其主要植被是金露梅、高山嵩草、青藏苔草、钉柱委陵菜、珠芽蓼、重齿风毛菊、美丽风毛菊等;坡下采样点的经纬度分别是 100.0051°E ,

37.596°N , 其主要植被是高山嵩草、青藏苔草、灯芯草、肾形子黄耆、美丽风毛菊、珠芽蓼、扁囊苔草等。土样采集用内径 100 mm、管壁厚度 4 mm、长度 500 mm 的圆柱状 PVC 管,将 PVC 管的一端打磨成刀口,沿着事先挖好的剖面轻轻敲入土壤中,采样深度 0~500 mm,将其压入采集地的土壤中,然后整个取出,用海绵包裹。所得 PVC 管内的原状土称作土芯。表 1 是坡上、坡中和坡下的海拔、植被类型和土壤的基本理化性质。

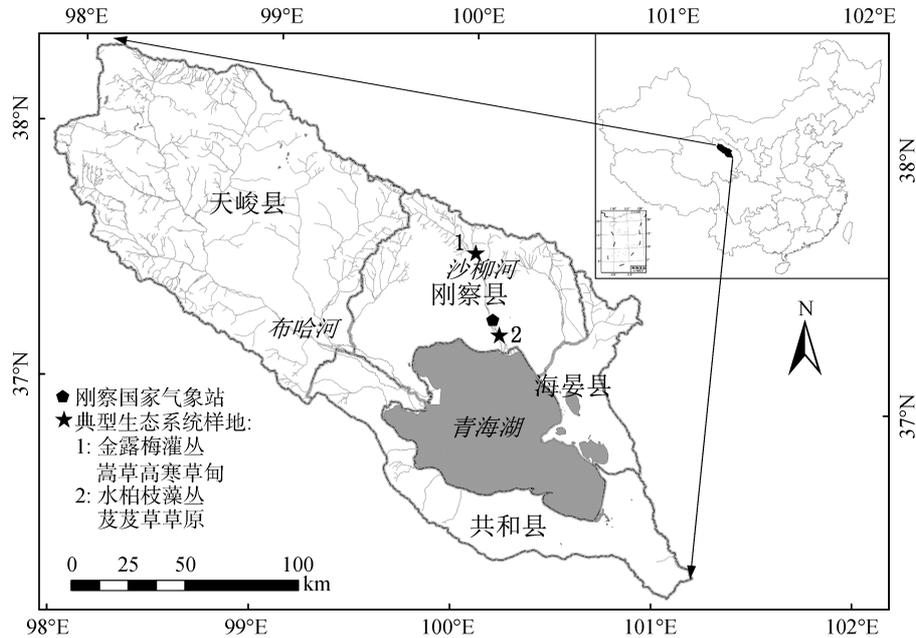


图 1 研究区域

Fig. 1 Location of the experimental sites

表 1 不同坡位土壤的基本理化性质
Table 1 Soil properties of different slope sites

坡位	采样深度 (mm)	有机质 (g/kg)	海拔	主要植被	机械组成(g/kg)				
					$0.25\text{mm} \leq \Phi < 2.00\text{mm}$	$0.05\text{mm} \leq \Phi < 0.25\text{mm}$	$0.02\text{mm} \leq \Phi < 0.05\text{mm}$	$0.002\text{mm} \leq \Phi < 0.02\text{mm}$	$\Phi \leq 0.002\text{mm}$
坡上	0~50	75.40	3 633 m	小嵩草、金露梅等	229.5	175.7	208.0	336.0	46.8
坡中	0~50	180.28	3 582 m	金露梅、嵩草等	278.1	99.9	131.3	368.6	122.0
坡下	0~50	193.60	3 563 m	嵩草、苔草等	288.9	144.7	130.0	350.0	86.4

1.3 CT 扫描

采用 GE 公司生产的 LightSpeed VCT(64 排螺旋 CT 扫描仪)扫描原状土柱,扫描电压为 140 kV,电流为 200 mA,扫描厚度为 0.625 mm,分辨率为 0.3 mm,图像矩阵为 512×512 。扫描前对原状土柱进行定位,确保土芯在螺旋射线管的中心。

1.4 数据处理

首先通过人工制作大孔隙的方法获得阈值。选取

一根内径为 10 mm 的 PVC 管垂直放在内径 100 mm 的 PVC 管中中央,其周围装满回填土,做成回填土柱。用 CT 扫描仪扫描土柱,扫描完的图片在 Fiji 软件中处理人工制作的大孔隙。设置一个阈值,计算人工大孔隙的大小,与实际的大孔隙大小相比较,如果计算的数值与实际的大小相差较大,再重新设置一个阈值计算人工孔隙大小,直到它们的差值不超过 1%,得到图像分割的阈值(图 2)。

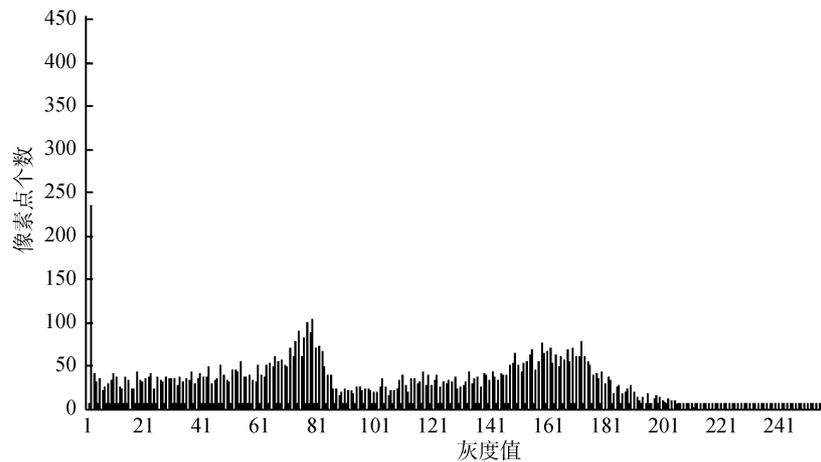


图 2 人工大孔隙的灰度直方图
Fig. 2 Gray histogram of artificial macroporosity

将提取的 jpg 格式图像导入 Fiji 软件,用圆形工具提取感兴趣区域(直径为 49.11 mm),避免切入缝隙。用中值滤波法消除图像噪音,并根据所得到的分割阈值利用全局阈值法处理图像,得到二值图像。利用 Fiji 软件对二维图像的二值图分析得到孔隙面积、周长以及孔隙图,利用 Fiji 软件编写脚本程序,对所有图像进行批量处理。对图像去背景处理后,通过 3D viewer 查看器通过体积渲染得到三维大孔隙图,从而更好地观察孔隙的宏观结构。

2 结果

2.1 青海湖流域不同坡位土壤大孔隙的三维形态特征

图 3 是青海湖流域不同坡位(坡上、坡中和坡下)土壤大孔隙的三维图。从图 3 中可以看出,不同坡位土壤的大孔隙有很大差异。随着坡位的下降,土壤的大孔隙数量呈现下降趋势,即坡上土壤的大孔隙明显高于坡中土壤,坡中土壤的大孔隙明显高于坡下土壤。而且,坡上土壤的大孔隙主要位于土层中部,坡中和坡下土壤的大孔隙主要分布在土层上部。

Katuwal 等^[19]研究表明,生物孔隙(蚯蚓洞穴和根系管道)一般呈管状,有方向性;Luo 等^[20]发现由蚯蚓引起的大孔隙一般具有连续性、相对比较大、呈管状;由根系引起的大孔隙一般具有连续性、圆形,随着深度的增加孔隙的大小呈下降趋势;而由团聚体形成(冻融交替或干湿交替)的大孔隙一般很小、分散分布、连续性较差。本研究中的高寒草甸的坡上、坡中土壤的大孔隙在形态特征上都较分散、不连续;而坡下土壤的大孔隙在形态上较细,相对较连通。因此,坡上和坡中土壤的大孔隙主要是在土壤团聚体

作用下形成;而坡下土壤的大孔隙主要是根系作用下形成。

2.2 不同坡位土壤大孔隙的数量、孔隙度及孔隙直径特征

表 2 是不同坡位土壤大孔隙数量、平均直径、大孔隙度以及大孔隙度在不同土层的分布。表 2 数据显示,青海湖流域高寒草甸坡上土壤的平均大孔隙数量是 14,坡中和坡下的大孔隙数量分别是 3 和 2,而且,坡上、坡中和坡下土壤的平均大孔隙数量之间都没有显著差异。坡上土壤的大孔隙数量是坡中和坡下土壤的大孔隙数量的 4.6 和 7 倍。

表 2 数据还显示,坡上土壤的平均大孔隙度是 4.65%,坡中和坡下分别是 0.30% 和 0.10%,坡上土壤的大孔隙度是坡中和坡下土壤的大孔隙度的 15.5 和 46.5 倍。而且,坡上、坡中和坡下土壤的平均大孔隙度之间都没有显著差异。坡上土壤在 0~100、100~200、200~300、300~400、400~500 mm 土层深度,土壤的大孔隙度分别是 0.54%、3.56%、17.44%、6.44% 和 0.24%;坡中土壤的大孔隙度分别是 1.02%、0.21%、0.01%、0.01% 和 0.01%;坡下土壤的大孔隙度分别是 0.25%、0.17%、0.01%、0.01% 和无。而且,在同一土层深度,坡上、坡中和坡下土壤的大孔隙度没有明显差异。

图 4 是不同坡位土壤的大孔隙度随着深度的变化。可见,坡上土壤的大孔隙度明显大于坡中土壤的大孔隙度,坡中土壤的大孔隙度大于坡下土壤的大孔隙度。坡上土壤的大孔隙度在 0~150 mm 深度呈现缓慢下降的趋势,在 150~400 mm 深度,土壤的大孔隙度呈现急剧上升的趋势;对于坡中土壤,在土层深度 0~150 mm,大孔隙度呈现缓慢下降的趋势,

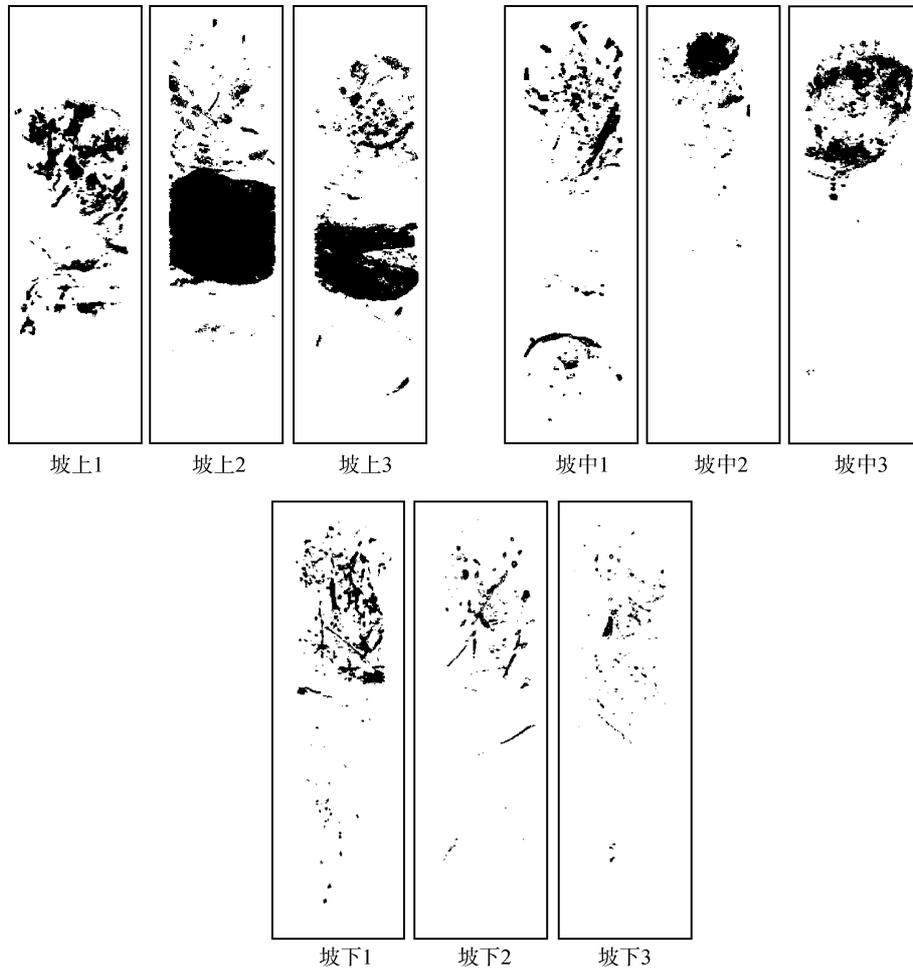


图 3 不同坡位土壤大孔隙的三维图

Fig. 3 3D visualization of soil macropore networks in soil columns in different slope sites

表 2 不同坡位土壤的大孔隙特征

Table 2 Numbers, diameters and porosities of CT-measured macropores at different soil depths and slope sites

坡位	大孔隙数量	大孔隙平均直径 (mm)	大孔隙度 (%)	大孔隙度 (%)				
				0 ~ 100 mm	100 ~ 200 mm	200 ~ 300 mm	300 ~ 400mm	400 ~ 500mm
坡上	14 ± 4	1.63 ± 0.03	4.65 ± 2.85	0.54 ± 0.11	3.56 ± 2.51	17.44 ± 9.12	6.64 ± 6.51	0.24 ± 0.23
坡中	3 ± 1	0.76 ± 0.34	0.30 ± 0.06	1.02 ± 0.11	0.21 ± 0.10	0.01 ± 0.001	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
坡下	2 ± 1	0.40 ± 0.34	0.10 ± 0.04	0.25 ± 0.09	0.17 ± 0.12	0.01 ± 0.003	0.01 ± 0.005	

注: 表中数据为平均值±标准差。

在 150 ~ 400 mm 深度, 土壤的大孔隙度保持稳定; 坡下土壤的大孔隙度随着土壤深度的变化趋势与坡中土壤的变化趋势类似, 在 0 ~ 200 mm 深度, 土壤的大孔隙度呈现缓慢下降的趋势。

从表 2 中可以看出, 坡上土壤的平均大孔隙直径是 1.63 mm, 坡中和坡下土壤的大孔隙直径是 0.76 mm 和 0.40 mm, 且坡上、坡中和坡下土壤的大孔隙平均直径没有显著差异。图 5 是坡上、坡中和坡下土壤不同直径大孔隙所占比例。从图 5 中可以看出, 3 个大孔隙直径 ($0 < D < 1$ mm, $1 < D < 2$ mm 和 $2 < D < 3$ mm) 在所有大孔隙直径中占有所有大孔隙的 85% 以上, 本研究结果与前人的

研究结果一致, 土壤中大孔隙直径主要是 2 mm 和 3 mm 直径, 这两个直径大孔隙占有所有大孔隙的 50% 以上^[21]。

坡上土壤的大孔隙度在 0 ~ 150 mm 深度较小, 在 150 ~ 400 mm 孔隙度急剧增加, 说明坡上土壤在表面主要以坡面径流为主, 水分入渗后主要以大孔隙流的形式向下运移。坡中和坡下部分的大孔隙度主要集中在土壤表层(0 ~ 200 mm), 说明坡中和坡下表层土壤入渗能力较强, 水分主要以大孔隙流的形式向下运移, 土壤入渗后可形成壤中流。而较深层(200 ~ 450 mm) 土壤孔隙度较低, 说明水分在较深层土壤运移主要以基流的形式进行, 流速较慢。

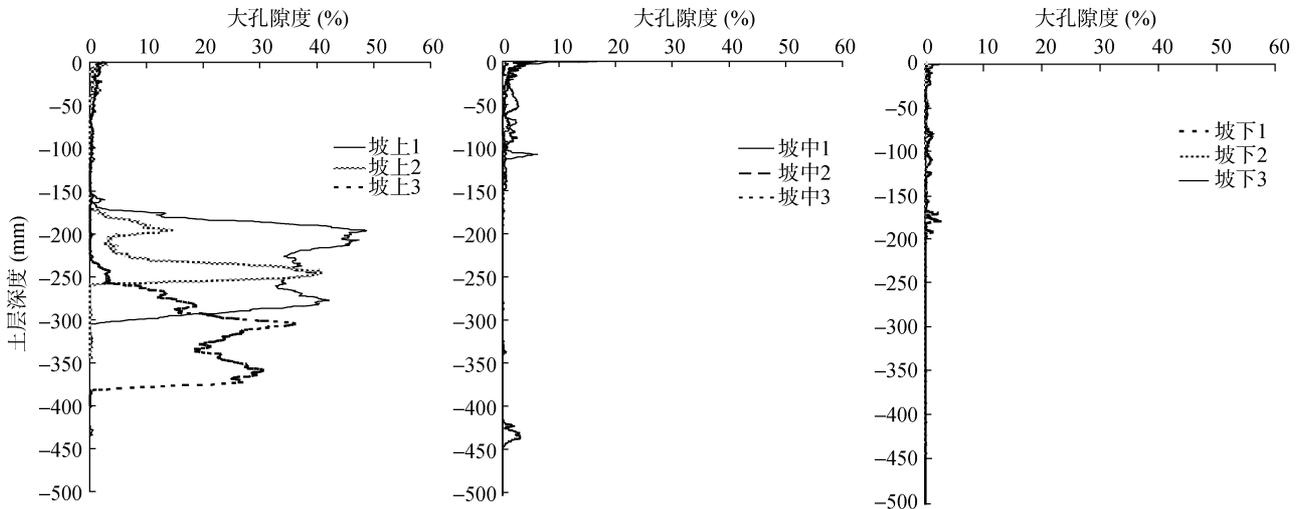


图 4 不同坡位土壤大孔隙度随着深度的变化

Fig. 4 Macroporosity distribution along soil column depth in different slope sites

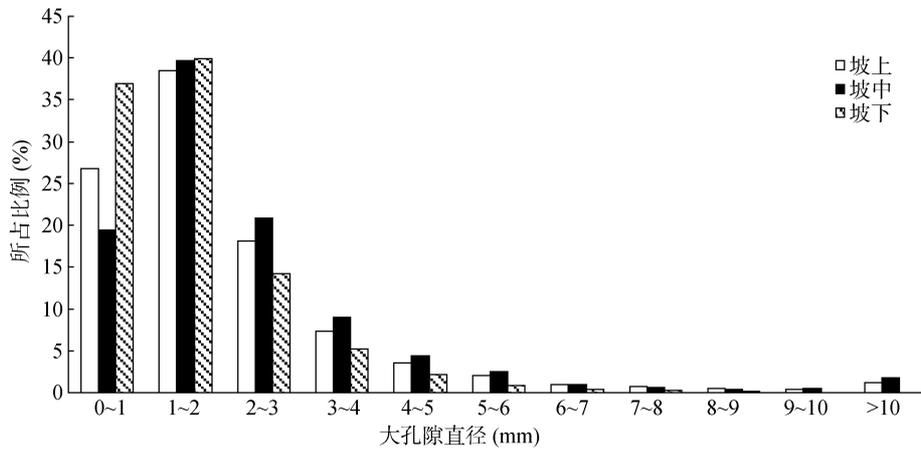


图 5 不同坡位土壤大孔隙的直径分布

Fig. 5 Diameter distribution of macropores in different slope sites

3 结论

青海湖流域高寒草甸坡位对土壤大孔隙的影响较大,坡上土壤的大孔隙度明显大于坡中和坡下土壤的大孔隙度,坡中土壤的大孔隙度大于坡下土壤的大孔隙度。坡上土壤的大孔隙主要位于 150 ~ 400 mm 深度土层,坡中土壤的大孔隙主要位于 0 ~ 150 mm 深度土层,坡下土壤的大孔隙在深度 0 ~ 200 mm 深土层度分布较多。坡上土壤的平均大孔隙直径明显大于坡中和坡下土壤。青海湖流域高寒草甸坡上和坡中土壤的大孔隙主要是在土壤团聚体的作用下形成,植物的根系在坡下土壤的大孔隙形成中占主要作用。

参考文献：

[1] 肖青宁. 青海湖环湖地区生态环境问题及建议[J]. 青海草业, 2002, 11(4): 20-23

[2] Sharma P, Aggarwal K. Soil structure under different land uses[J]. Catena, 1984, 11: 197-200

[3] 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

[4] Brewer. Fabric and mineral analysis of soils[M]. Company Huntington, NY: Krieger Publishing, 1976

[5] 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

[6] 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[J]. 河海大学学报, 2002, 30(2): 63-69

[7] Germann P, Beven K. Water flow in soil macropores. I. An experimental approach[J]. Journal of Soil Science, 1981, 32: 1-13

[8] Moidrup P, Olesen T, Scanning P, et al. Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(8): 94-100

[9] Coppola A, Kutilek M, Frind E O. Transport in preferential flow domains of the soil porous system: Measurement, interpretation, modelling, and upscaling[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 104: 1-3

- [10] 盛丰, 张利勇, 王康. 土壤大孔隙发育特征对水和溶质输移的影响[J]. 土壤, 2015, 47 (5): 1 007–1 013
- [11] 史衍玺, 唐克丽. 人为加速侵蚀下土壤质量的生物学特性变化[J]. 水土保持学报, 1998, 4 (1): 28–31
- [12] 张少良, 张兴义, 刘晓冰, 等. 典型黑土区不同坡位剖面土壤速效钾空间分布规律研究. 土壤, 2014, 46 (2): 218–224
- [13] Miller P M, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52: 1 133–1 141
- [14] Flanagan D C, Foster G R. Storm pattern effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32: 535–544
- [15] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R, et al. The transport of bio2available phosphorus in agricultural runoff[J]. Journal Environment Quality, 1992, 21: 30–351
- [16] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20 (2): 272–278
- [17] 万雪琴, 胡庭兴, 张健, 等. 坡耕地退耕还林后的植被恢复[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 191–194
- [18] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 3 (17): 339–345
- [19] 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, 237–238: 9–20
- [20] 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[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393 (1/2): 53–64
- [21] Iversen B V, Lamande M, Torp S B, et al. Macropores and macropore transport: Relating basic soil properties to macropore density and soil hydraulic properties[J]. Soil Sci, 2012, 177 (9): 535–542

Soil Macropores of Alpine *Kobresia* Meadow in Different Slope Positions in the Qinghai Lake Watershed

HU Xia^{1,2}, LI Zongchao^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, SUN Zhenting^{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: The objective of this study is to quantify macropore structures of Alpine *Kobresia* meadow soils in different slope positions in the Qinghai Lake Watershed. A total of nine soil cores (0–50 cm deep) were taken respectively at the upper-slope, mid-slope and lower-slope sites with 3 replicates in each site, and the cores were scanned with a GE HISPEED FX/I medical scanner. Numbers of macropores, macroporosities and macropore equivalent diameters were interpreted by using X-ray computed tomography. The results indicated that slope position could significantly influence soil macropores. Soils on upper-slope had greater macroporosity, deeper and longer macropores than other two sites. Macroporosity was 15.5–46.5 times greater in soils on upper-slope than other two sites, and macropores were distributed mainly in the 150–400 mm layer, but mainly in the 0–150 mm and 0–200 mm soil layer in the mid-slope and the lower-slope, respectively. The form of macropores in lower slope can be attributed to root growth and decay, while can be attributed to aggregate function in the upper and middle slopes.

Key words: Alpine *Kobresia* meadow; Slope position; Macropore; Qinghai Lake; Root