

青海湖流域土壤大孔隙特征与理化性质的相关性研究^①

李宗超^{1,2}, 胡霞^{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: 土壤大孔隙是土壤水分、空气和化学物质运移优先流的主要途径。本文以青海湖流域土壤为研究对象, 在青海湖沙柳河流域取原状土柱, 利用 CT 扫描与 Fiji 软件相结合的方法, 实现了土壤大孔隙结构的三维可视化, 以及断层横截面土壤大孔隙度、大孔隙数量和大孔隙等效直径等的量化; 并探讨了样地土壤大孔隙特征与理化性质的相关性。结果表明: 青海湖流域土壤大孔隙主要分布在土壤表层 0 ~ 100 mm, 100 mm 以下大孔隙较少; 土壤全磷含量分别与土壤大孔隙数量、大孔隙等效直径有显著相关性; 土壤全氮、有机质含量分别与土壤大孔隙平均等效直径有显著相关性; 土壤体积质量与大孔隙度、大孔隙平均等效直径等有显著相关性; 土壤中 $0.002 \leq \phi < 0.02$ mm 的颗粒含量与大孔隙的分布特征相关性较大。

关键词: CT 扫描; 大孔隙; 理化性质; 相关性

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A

土壤大孔隙是土壤中空气、水和化学物质优先运移的主要途径, 并且随着人们对生态环境问题的重视, 大孔隙研究越来越受到关注^[1-3]。土壤大孔隙的大小、连续性等会直接影响土壤的水文过程^[4]。随着成像技术的发展, X 射线断层扫描(CT)法已经成为国内外学者研究土壤孔隙结构的新方法^[5-8]。土壤大孔隙的形成主要受到植物根系的穿插或腐烂作用、土壤动物的挖掘作用、循环交替冻融和干湿交替过程、砾石的存在以及土壤理化性质等多种因素的影响^[9], 而土壤结构的发育程度^[10-11]、黏粒含量、有机质含量^[12]等土壤理化性质对非饱和流的发生与运移均有重要影响。目前已有学者结合 CT 扫描方法, 在植物根系^[13]、土地利用^[14]和冻融^[15]等因素对土壤大孔隙形成的影响方面进行了研究。但是, 土壤理化性质与大孔隙结构的相关性研究相对缺乏。因此, 利用 CT 扫描法分析土壤大孔隙特征, 并探究土壤理化性质与大孔隙的相关性具有一定的研究价值。

青海湖流域的生态问题及其位于青藏高原和亚洲半干旱气候敏感带的地位, 使其成为我国乃至国际科学界研究的热点地区之一^[16]。目前在青海湖流域已经开展的水文土壤方面的研究主要有: 具鳞水柏枝水分利用研究^[17], 树干茎流的模拟^[18], 灌丛覆盖地

区的能量交换和蒸散发^[19], 以及芨芨草水分利用来源变化^[20]等。也有学者利用传统方法对青海湖西部的土壤入渗规律及其影响因素进行了研究, 结果表明, 土壤大孔隙对水文过程有重要影响^[21]。然而, 对高寒地区的高寒草甸及灌丛的土壤大孔隙研究较少, 因此对青海湖流域的土壤大孔隙特征的研究具有重要意义。

本研究通过 CT 扫描法分析土壤大孔隙特征, 试图观察与分析青海湖流域土壤大孔隙的结构特征, 探讨土壤理化性质对土壤大孔隙形成的影响, 以为青海湖流域的生态水文过程研究提供理论基础和指导依据。

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部边缘, 地理位置 $36^{\circ}15' \sim 38^{\circ}20' \text{ N}$, $97^{\circ}50' \sim 101^{\circ}20' \text{ E}$, 海拔 3 194 ~ 5 174 m。流域内山地面积大, 约占流域面积的 68.6%, 山势陡峻、沟谷密布, 河谷和湖积平原所占面积较小, 约占流域面积的 31.4%。在湖边及低洼地带有沼泽分布, 在沙柳河口发育着河漫滩、三角洲及河流堆积阶地, 在山麓与平原交替地带形成洪积扇。流域地貌复

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: 李宗超(1988—), 男, 山东莱芜人, 博士研究生, 主要从事土壤水文学研究。E-mail: 201531480027@mail.bnu.edu.cn

杂,植被多样,气温、降水空间变化显著,使得土壤分布具有多样性和垂直地带性^[22]。土壤的主要成土母质因地形地貌的不同而有所差异。流域内地带性土壤类型为栗钙土^[23],由于自然条件的差异,各区域土壤类型不尽相同,沙柳河流域主要为高山草甸土,湖东地区多为风沙土。草甸是区域内分布最广的植被类型,分布在海拔 3 200~4 100 m;流域内典型灌丛有金露梅灌丛及水柏枝灌丛。青海湖流域年径流深一般在 50~175 mm,分布特点有由西北向东南递减、由山区向湖滨递减的规律,北部山区降雨量较大。流

域的水资源比较丰富,约为 24.06 亿 m³。

1.2 土壤样品采集

选择青海湖地区沙柳河流域作为研究样地,如图 1 所示,1~8 号样地主要包括金露梅灌丛、高寒草甸、油菜地等植被,9 和 10 号样地为沙地。表 1 是所选样地的地理位置及植被、地形情况。原状土采集使用内径 100 mm、管壁厚度 2 mm、长度 300 mm 的圆柱状 PVC 管,将 PVC 管缓缓压入土壤,然后整个取出,带回 CT 实验室;在原状土采集点取表层 0~100 mm 的土样 1 kg,带回实验室风干备用。

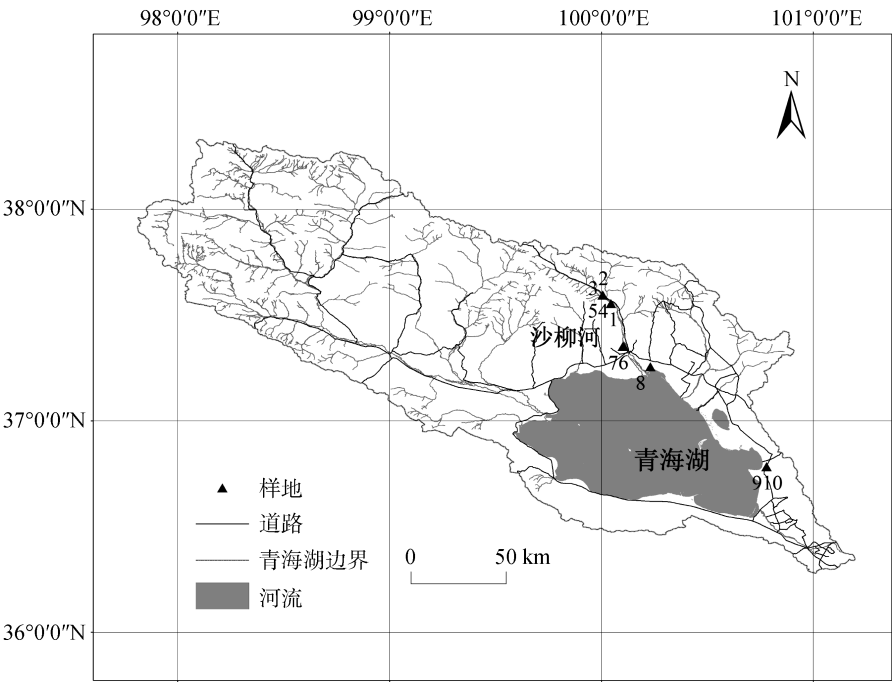


图 1 研究区样地位置
Fig. 1 Location of experimental sites in study area

表 1 研究区采样点的地理位置、植被和地形部位
Table 1 Locations, vegetation types and topographic positions of sampling sites

样地编号	地理位置	海拔(m)	植被	地形部位
1	100.035°E, 37.575°N	3 530	金露梅、高山嵩草	沙柳河流域坡下
2	100.006°E, 37.594°N	3 553	高山嵩草	沙柳河流域坡中
3	100.007°E, 37.595°N	3 610	金露梅、高山嵩草	沙柳河流域坡上
4	100.006°E, 37.595°N	3 582	金露梅、高山嵩草	沙柳河流域坡中
5	100.006°E, 37.596°N	3 563	高山嵩草	沙柳河流域坡下
6	100.106°E, 37.352°N	3 365	高山嵩草	三角城羊场阴坡
7	100.101°E, 37.351°N	3 367	金露梅、高山嵩草	三角城羊场阳坡
8	100.231°E, 37.256°N	3 221	油菜	三角种羊场西侧
9	100.780°E, 36.783°N	3 224	无	青海湖东侧沙地
10	100.780°E, 36.783°N	3 224	斜茎黄芪	青海湖东侧沙地

1.3 土壤 CT 扫描与理化性质分析

利用医学 Light Spread VCT(64 排多层螺旋 CT 扫描仪)扫描原状土柱。将土柱放置在操作台中心位置, 设定 CT 设备电压为 140 kV, 电流为 200 mA, 扫描速度为 2.5 r/s, 扫描层厚为 0.625 mm。通过图像重建, 得到体素为 0.625 mm × 0.33 mm × 0.33 mm, 像素 512 × 512 的 8 位图, 同时将其转为 Bmp 格式

图片。

土壤样品经过风干处理后测定土壤的理化性质。土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤全氮采用凯氏定氮法测定; 土壤全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定; 土壤体积质量采用烘干法测定; 土壤的机械组成采用吸管法测定。测得的土壤理化性质如表 2 所示。

表 2 研究区样地土壤的理化性质
Table 2 Soil physical-chemical proprieties of sampling sites

样地编号	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有机质 (g/kg)	CaCO ₃ (g/kg)	机械组成(g/kg)				体积质量 (g/cm ³)
					$\phi < 0.002\text{ mm}$	$0.002 \leq \phi < 0.02\text{ mm}$	$0.02 \leq \phi < 0.25\text{ mm}$	$0.25 \leq \phi < 2.00\text{ mm}$	
1	11.80	1.04	203.7	0	97	200	201	501	0.46
2	10.70	1.03	173.9	0	47	200	224	528	0.69
3	5.48	0.77	115.5	0	38	280	345	336	0.83
4	11.00	0.95	215.4	0	97	300	215	387	0.67
5	7.44	0.76	172.1	0	97	250	280	374	0.72
6	7.45	0.82	156.1	0	97	200	481	222	0.73
7	7.29	0.66	137.1	106.0	197	150	250	404	0.69
8	3.03	0.86	41.7	68.5	158	390	415	36	1.18
9	0.09	0.22	1.1	30.8	18	40	57	884	1.63
10	0.16	0.24	2.1	32.3	18	10	225	746	1.55

1.4 图像处理与数据分析

利用 Fiji 软件处理图像的步骤如下: 通过中值滤波法消除噪音, 增强图像质量; 利用圆形工具将 PVC 管内侧附近扰动土壤切除, 获得感兴趣区域(region of interest, ROI), 有效深度为 300 mm; 利用全局阈值法, 选取阈值并将图像二值化, 从而获取轮廓图。由于 Fiji 软件为开源软件, 通过编程对图像批量分析, 获得土柱每一个断层横截面的土壤大孔隙面积及周长。Fiji 软件 3D 查看器可以通过体渲染实现土壤大孔隙的三维可视化。

Matlab 软件可以实现每个断层横截面土壤大孔隙数据分析, 得到断层横截面的总面积、大孔隙总面积、大孔隙度和大孔隙数量等数据。对整个土层(0 ~ 100 mm)土壤大孔隙特征数据的分析, 取断层横截面的大孔隙度、大孔隙数量和大孔隙等效直径平均值。最后利用软件 SPSS 13.0 分析土壤理化性质与土壤大孔隙数量、大孔隙度和平均等效直径的 Pearson 相关系数, 置信水平 $P=0.05$, 即 $P<0.05$ 为显著相关, $P<0.01$ 为极显著相关; 用线性回归方法分析具有显著相关的各因素之间的关系。

2 结果与讨论

2.1 土壤大孔隙三维特征

图 2 是 10 个样地 0 ~ 300 mm 土层土壤大孔隙的

可视化三维图, 其中黑色部分表示土壤大孔隙。从图 2 中可以看出, 不同样地土壤大孔隙分布差异较大, 各样地土壤大孔隙结构的复杂程度不一, 但存在相似 的分布趋势, 即土壤大孔隙随土壤深度的增加而减少。Aubertin^[24]研究表明, 地表植物种类和土壤环境都会影响孔隙的形成, 大孔隙的结构与植物种类和生长情况有关^[25]。1 ~ 7 号样地植被优势种为高山嵩草, 在 0 ~ 100 mm 土层土壤大孔隙明显较多, 这与李宗超和胡霞^[26]报道的内蒙古沙质草地土壤大孔隙分布特征相一致; 另外在 0 ~ 100 mm 土层主要为较细的土壤大孔隙, 且大孔隙连通性较好; 1、4 和 6 号样地为金露梅灌丛斑块之间的草甸, 优势种为高山嵩草, 土壤较深层受较粗的金露梅根系的影响, 土壤大孔隙直径较大, 且呈管状, 但连续性较差。Bharati 等^[27]和 Seobi 等^[28]研究发现牧场草地比中耕作物会有更多的大孔隙。如图 2 所示, 8 号样地(油菜地)的土壤大孔隙明显少于 1 ~ 7 号样地, 且 8 号样地的土壤大孔隙主要集中在表层 0 ~ 50 mm, 主要受油菜根系的影响。9 号样地为沙地, 几乎不存在大孔隙。10 号样地为沙地中的灌丛斑块, 土壤大孔隙呈管状分布, 且主要分布在表层 0 ~ 100 mm 灌丛根系较发达的区域。

2.2 土壤大孔隙数量、孔隙度和等效直径

表 3 是 10 个样地 0 ~ 100 mm 土层土壤的平均大孔隙数量、大孔隙度和等效直径统计数据。由表 3

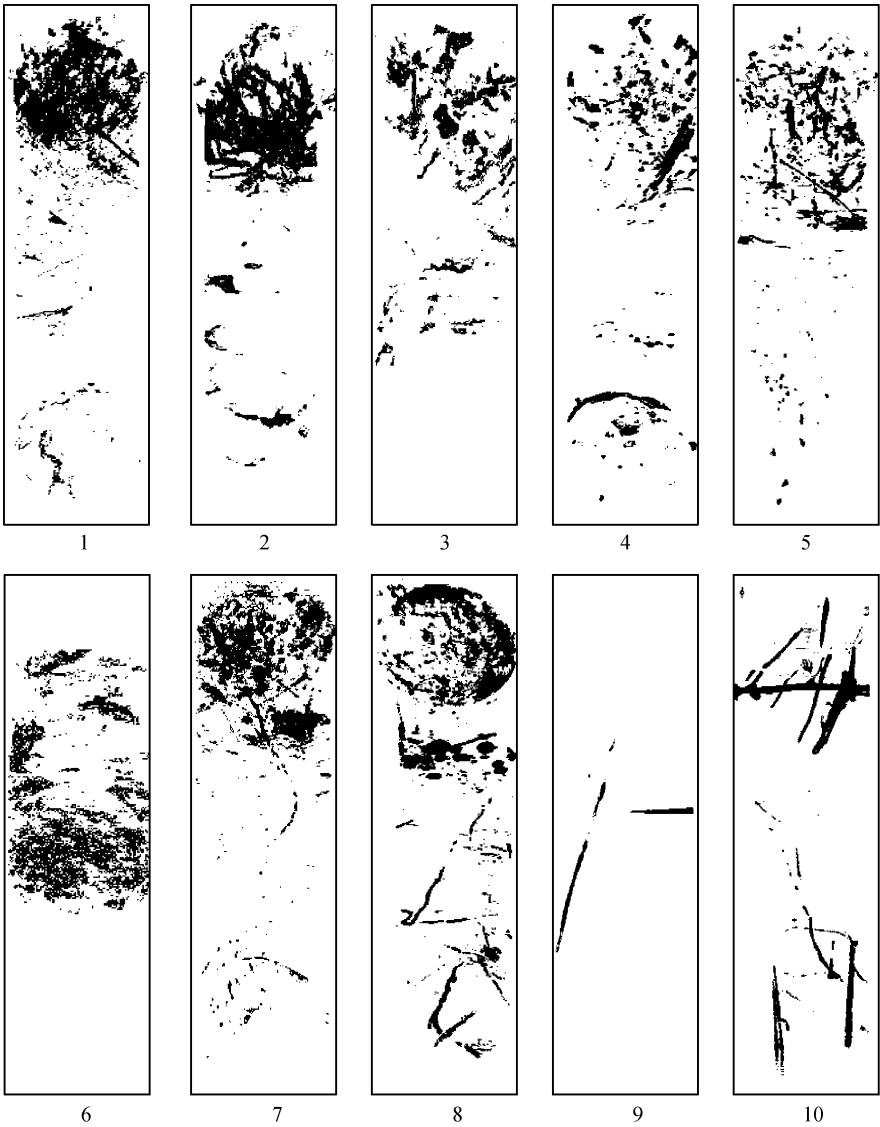


图 2 研究区样地土壤大孔隙三维图
Fig. 2 3D visualization of soil macropores of sampling sites

表 3 研究区样地 0 ~ 100 mm 土层土壤平均大孔隙数量、大孔隙度和等效直径

Table 3 CT-measured soil macropores, macroporosities and mean macropore sizes at soil depth of 0 ~ 100 mm of sampling sites

样地编号	平均数量	平均大孔隙度(%)	平均等效直径(mm)
1	18	2.95	2.32
2	27	4.49	1.70
3	9	0.55	1.64
4	9	0.25	1.83
5	5	0.91	1.39
6	9	0.91	1.82
7	11	0.25	1.99
8	11	0.11	1.39
9	1	0.10	0.40
10	6	0.70	1.58

数据可知，10 个样地在土壤表层 0 ~ 100 mm 土壤大孔隙特征差异较大。2 号样地地表植被为金露梅灌丛，平均大孔隙数量为 27，平均大孔隙度为 4.49%，两项指标均高于其他样地，但平均等效直径为 1.70 mm，小于 1 号样地。9 号样地为沙地，平均土壤大孔隙度仅为 0.1%，平均大孔隙数量仅为 1，平均等效直径也最小。2 号样地土壤大孔隙数量最多，大孔隙度也最大，这与其在图 2 中三维可视化图的分布特征相一致。植被覆盖的土壤其大孔隙平均等效直径在 1.3 ~ 2.4 mm，沙地没有植被覆盖，其大孔隙平均等效直径仅为 0.4 mm。

2.3 土壤大孔隙特征与理化性质的相关性

土壤的各理化性质受成土母岩和植被等的共同影响，土壤理化性质间也存在协同和促进作用^[29-30]。

1~6 号样地主要为高山嵩草覆盖的土壤，表层根系较多，有机质含量较高，体积质量介于 0.55~0.83 g/cm³，这与杨成德等^[31]对高寒草甸土壤体积质量的研究结果一致；8 号样地为农地，9、10 样地为沙地，土壤

体积质量相对较高。对 10 个样地土壤大孔隙平均数量、大孔隙度、等效直径和相应的全氮、全磷、有机质、CaCO₃、密度、体积质量、土壤机械组成进行 Pearson 相关分析，得到的相关性结果如表 4 所示。

表 4 土壤理化性质之间的 Pearson 相关系数
Table 4 Pearson correlation coefficients between soil physical-chemical proprieties

	全氮	全磷	有机质	CaCO ₃	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5	体积质量	含水量	大孔隙数量	大孔隙度
全磷	0.88**												
有机质	0.98**	0.83**											
CaCO ₃	-0.38	-0.31	-0.43										
Φ1	-0.33	-0.65*	-0.36	-0.10									
Φ2	-0.18	0.09	-0.16	0.43	-0.67*								
Φ3	0.34	0.53	0.40	-0.427	-0.67*	0.22							
Φ4	0.44	0.76*	0.45	-0.10	-0.87**	0.34	0.57						
Φ5	0.31	0.41	0.31	0.63*	-0.66*	0.54	0.08	0.48					
体积质量	-0.94**	-0.87**	-0.95**	0.28	0.50	0.02	-0.49	-0.52	-0.45				
含水量	0.85**	0.70*	0.91**	-0.41	-0.33	-0.24	0.43	0.44	0.24	-0.91**			
大孔隙数量	0.49	0.71*	0.32	0.03	-0.39	0.20	0.15	0.45	0.27	-0.42	0.13		
大孔隙度	0.09	0.47	-0.05	0.13	-0.47	0.42	0.08	0.52	0.27	-0.56	-0.21	0.83**	
大孔隙等效直径	0.72*	0.66*	0.69*	-0.07	-0.41	0.25	0.31	0.29	0.42	-0.78**	0.61	0.45	0.09

注：Φ1、Φ2、Φ3、Φ4 和 Φ5 分别表示土壤粒级 0.25 ≤ Φ<2.00 mm、0.05 ≤ Φ<0.25 mm、0.02 ≤ Φ<0.05 mm、0.002 ≤ Φ<0.02 mm 和 Φ<0.002 mm；* 表示在 P<0.05 水平上显著相关；** 在 P<0.01 水平上极显著相关。

由表 4 可知，土壤大孔隙数量与全磷含量的相关系数为 0.71，在 P<0.05 水平上呈显著正相关。0.002 ≤ Φ<0.02 mm 粒级的土壤颗粒含量和体积质量与土壤大孔隙数量的相关性也较大：0.002 ≤ Φ<0.02 mm 粒级的土壤颗粒含量与大孔隙数量呈正相关，相关系数为 0.45；体积质量与土壤大孔隙数量呈负相关，相关系数为 -0.42。

土壤大孔隙度与 0.002 ≤ Φ<0.02 mm 粒级的土壤颗粒含量、土壤体积质量、全磷含量之间的相关性较大，但并不显著。0.002 ≤ Φ<0.02 mm 粒级的土壤颗粒含量与土壤大孔隙度之间呈正相关关系，相关系数为 0.52；土壤全磷含量与大孔隙度之间呈正相关关系，相关系数为 0.47；土壤体积质量与大孔隙度之间呈负相关关系，相关系数为 -0.56。

土壤大孔隙等效直径与全氮、全磷、有机质含量之间呈显著正相关，相关系数分别为 0.72、0.66 和 0.69。土壤大孔隙等效直径与土壤体积质量呈极显著相关，相关系数为 -0.78。

土壤孔隙是土壤中土粒或团聚体之间的空隙^[32]，因此土壤颗粒含量是土壤大孔隙形成的一个重要影响因素。在表 4 中，虽然土壤颗粒组成与大孔隙特征相关性不显著，但表现出一定规律。粒级 Φ1(0.25 ≤

Φ<2.00 mm)土壤颗粒含量与大孔隙度、大孔隙数量以及大孔隙平均等效直径均呈负相关；粒级为 Φ2(0.05 ≤ Φ<0.25 mm)、Φ3(0.02 ≤ Φ<0.05 mm)、Φ4(0.002 ≤ Φ<0.02 mm)和 Φ5(Φ<0.002 mm)的土壤颗粒含量与大孔隙度、大孔隙数量以及大孔隙平均等效直径均呈正相关。说明土壤中粒级 Φ<0.25 mm 的土壤颗粒有利于土壤大孔隙的形成，而粒级 Φ>0.25 mm 的土壤颗粒的增加会减少土壤中的大孔隙。

土壤体积质量反映了土壤的质地、结构等性质^[33]。一般认为，土壤体积质量越小，非毛管孔隙度和总孔隙度越大^[34-35]。如由表 4 可知，土壤大孔隙平均等效直径与体积质量之间呈极显著负相关，土壤体积质量决定了土壤大孔隙平均等效直径的 61%(图 3a)。土壤体积质量与大孔隙度的相关系数为 -0.56，说明土壤体积质量与大孔隙度负相关，这与已有研究相一致^[36]。另外，土壤体积质量与全氮、全磷和有机质含量呈极显著负相关关系，相关系数分别为-0.94、-0.87 和 -0.95。土壤大孔隙度是土芯横截面中所有孔隙面积与横截面总面积的比值，土壤大孔隙度与土壤大孔隙数量呈极显著正相关，相关系数为 0.83(表 4)。如图 3b，土壤大孔隙数量决定了土壤大孔隙度的 69%，说明土壤表层大孔隙越多，土壤大孔隙度越大。

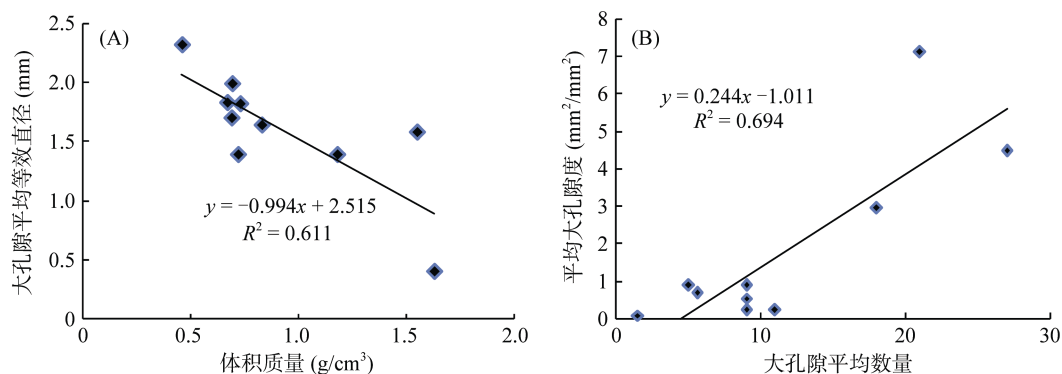


图 3 土壤体积质量与大孔隙平均等效直径及大孔隙数量与大孔隙度的线性回归分析

Fig. 3 Linear regression analysis between soil bulk density and mean equivalent diameter of macropores, mean quantity of macropores and macroporosity

从表 4 还可知,全磷含量分别与土壤大孔隙数量、平均等效直径呈显著正相关。这是因为在高寒草甸地区,植物活根不断吸收土壤中的磷素养分,供应自身生长的需求^[37],土壤大孔隙形成主要受植物根系影响^[38]。另外,样地所在区域磷素的主要来源为腐殖质^[39],大孔隙的存在有利于磷素的运移。如图 4 所示,全磷含量分别决定了土壤大孔隙数量的 51% 和大孔隙平均等效直径的 44%,即土壤全磷含量越多,土壤大孔隙数量大、平均等效直径也越大,说明

全磷含量是影响土壤表层大孔隙分布特征的最主要因素。

土壤有机质是影响土壤结构的重要因素^[40],而全氮含量取决于有机质的分解,存在一定比例关系^[41]。如表 4,土壤大孔隙平均等效直径与全氮和有机质含量显著相关。如图 5,土壤全氮和有机质含量分别决定土壤大孔隙平均等效直径的 53% 和 48%,土壤中全氮含量越高,有机质含量相应会就越高,土壤大孔隙的平均等效直径就越大。

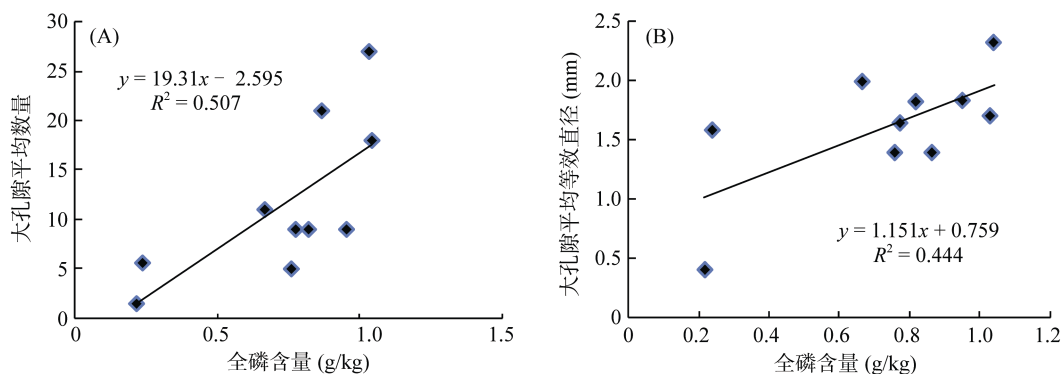


图 4 土壤全磷含量与土壤大孔隙数量、平均等效直径的线性回归分析

Fig. 4 Linear regression analysis between soil total phosphorus and mean quantity, mean equivalent diameter of macropores

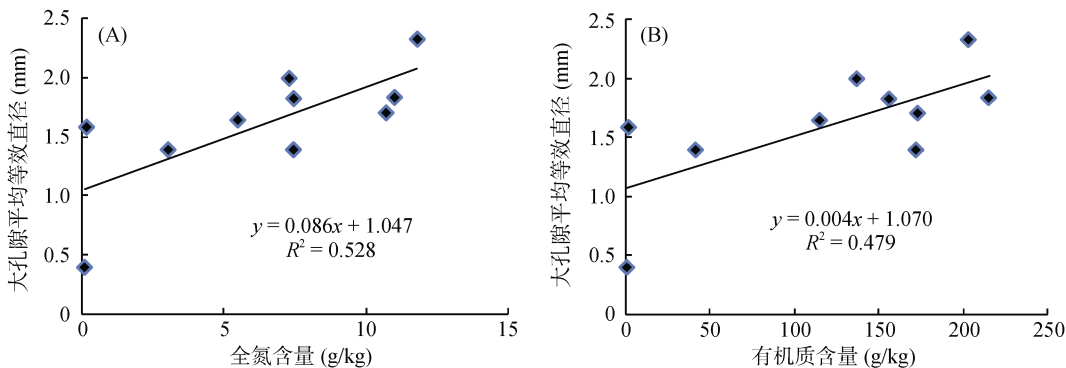


图 5 全氮、有机质含量与土壤大孔隙平均等效直径的线性回归分析

Fig. 5 Linear regression analysis between soil total nitrogen, soil organic matter and mean equivalent diameters of macropores

3 结论

1) 应用 CT 断层扫描方法, 能够在无损条件下获得每一土壤断层横截面的土壤大孔隙度、大孔隙数量和平均等效直径, 并能通过三维可视化方法观察土壤大孔隙的结构和分布特征。

2) 青海湖流域土壤大孔隙主要集中在表层 0 ~ 100 mm; 随土壤深度增加, 土壤大孔隙逐渐减少; 平均等效直径在 1.3 ~ 2.4 mm。土壤全氮、全磷和有机质含量两两之间极显著正相关; 土壤大孔隙度与土壤大孔隙数量呈极显著正相关, 土壤大孔隙越多, 土壤大孔隙度越大; 土壤大孔隙数量与全磷含量显著正相关, 与粒径 $0.002 \leq \phi < 0.02$ mm 的颗粒含量相关性较大, 其中全磷含量决定了土壤大孔隙数量的 51%; 土壤大孔隙度与多个因素有相关性, 并无显著相关性, 其中土壤体积质量和 $0.002 \leq \phi < 0.02$ mm 的土壤颗粒含量与土壤大孔隙度相关性较大; 土壤大孔隙平均等效直径与全氮、全磷和有机质含量之间分别呈显著正相关, 与体积质量显著负相关, 其中全氮、全磷和有机质含量分别决定了土壤大孔隙平均等效直径的 44%、53% 和 48%。

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] Lin H, Bouma J, Wilding L P, et al. Advances in hydropedology[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85: 1-89
- [3] Xin H. A green fervor sweeps the qinghai-tibetan plateau[J]. Science, 2008, 321(5889): 633-635
- [4] 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
- [5] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using x-ray computed-tomography[J]. Geoderma, 1990, 46(1/2/3): 13-29
- [6] 李德成, 张桃林, B. Velde. CT 分析技术在土壤科学研究中的应用[J]. 土壤, 2002, 34(6): 328-332
- [7] 何娟, 刘建立, 吕菲, 等. 基于 CT 数字图像的土壤孔隙分形特征研究[J]. 土壤, 2008, 40(4): 662-666
- [8] 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): 159-163
- [9] Perret J, Prasher S O, Kantzas A, et al. A two-domain approach using cat scanning to model solute transport in soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(3): 995-1010
- [10] Ersahin S, Papendick R I, Smith J L, et al. Macropore transport of bromide as influenced by soil structure differences[J]. Geoderma, 2002, 108(3/4): 207-223
- [11] Vervoort R W, Radcliffe D E, West L T. Soil structure development and preferential solute flow[J]. Water Resources Research, 1999, 35(4): 913-928
- [12] Shaw J N, West L T, Radcliffe D E, et al. Preferential flow and pedotransfer functions for transport properties in sandy kandiuults[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 670-678
- [13] Clausnitzer V, Hopmans J W. Simultaneous modeling of transient 3-dimensional root-growth and soil-water flow[J]. Plant and Soil, 1994, 164(2): 299-314
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 曹军骥, 安芷生. 青海湖流域生态和环境治理技术集成与试验示范项目简介及主要进展[J]. 地球环境学报, 2010, 1(3): 158-161
- [17] 赵国琴, 李小雁, 吴华武, 等. 青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究[J]. 植物生态学报, 2013(12): 1091-1100
- [18] Zhang S Y, Li X Y, Li L, et al. The measurement and modelling of stemflow in an alpinemyricaria squamosa community[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(6): 889-899
- [19] Zhang S Y, Li X Y, Ma Y J, et al. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over the alpine riparian shrub *Myricaria squamosa* Desv. on qinghai-tibet plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 8-20
- [20] 吴华武, 李小雁, 蒋志云, 等. 基于 δd 、 $\delta^{18}o$ 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] 赵景波, 陈颖, 曹军骥, 等. 青海湖西北部土壤入渗规律研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011(3): 90-96
- [22] 赵景波, 曹军骥. 青海湖流域土壤水与土壤水库研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 3
- [23] 王予生. 青海土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 150
- [24] Aubertin G M. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement[J]. Upper Darby: [s.n.], 1971: 33
- [25] Mosley M P. Streamflow generation in a forested watershed, new-zealand[J]. Water Resources Research, 1979, 15(4): 795-806
- [26] 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
- [27] Bharati L, Lee K H, Isenhardt T M, et al. Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in midwestern USA[J]. Agroforestry Systems, 2002, 56(3): 249-257
- [28] Seobi T, Anderson S H, Udawatta R P, et al. Influence of grass and agroforestry buffer strips on soil hydraulic

- properties for an albaqualf[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 893–901
- [29] 高宏光, 杨双兰, 曾群望. 影响文山三七品质的土壤地质背景因素[J]. 云南地质, 2001(2): 195–202
- [30] 杨俊东, 陈兴福, 杨文钰, 等. 川泽泻质量与其根际土壤理化性质的相关性分析[J]. 中草药, 2012(3): 581–587
- [31] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉等. 东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征[J]. 草业学报, 2007(4): 62–68
- [32] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012(4): 988–994
- [33] 曹鹤, 薛立, 谢腾芳, 等. 华南地区八种人工林的土壤物理性质[J]. 生态学杂志, 2009(4): 620–625
- [34] 冯杰, 尚煜廷, 刘佩贵. 大孔隙土壤与均质土壤水分特征曲线比较研究[J]. 土壤通报, 2009(5): 1006–1009
- [35] 杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. 农业工程学报, 2013(23): 99–108
- [36] 路远, 张万祥, 孙榕江, 等. 天祝高寒草甸土壤容重与孔隙度时空变化研究[J]. 草原与草坪, 2009(3): 48–51
- [37] 曹广民, 张金霞, 鲍新奎, 等. 高寒草甸生态系统磷素循环[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 514–518
- [38] 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
- [39] 张法伟, 李英年, 汪诗平, 等. 青藏高原高寒草甸土壤有机质、全氮和全磷含量对不同土地利用格局的响应[J]. 中国农业气象, 2009(3): 323–326
- [40] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3–22
- [41] 邹焱, 苏以荣, 路鹏, 等. 洞庭湖区不同耕种方式下水稻土壤有机碳、全氮和全磷含量状况[J]. 土壤通报, 2006(4): 671–674

Correlations Between Soil Physical-chemical Properties and Soil Macropore Characteristics in Qinghai Lake Basin

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

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil macropores are preferential pathways for water, air and chemical substances movement in soils. Undisturbed soil columns under different vegetation types were sampled in Shaliu River Basin of the Qinghai Lake and scanned with X-ray computed tomography. And 3D soil macropore networks were visualized and macropore quantity, macroporosity and equivalent diameter were interpreted with Fiji software through reconstruction. Then the correlations between soil physical-chemical properties and macropore characteristics were studied. The results indicated that soil macropores were mainly distributed in the 0–100 mm layer of soil, soil phosphorus was significantly correlated with number and mean equivalent diameter of macropores, soil nitrogen and organic matter were significantly correlated with mean equivalent diameter of macropores, soil bulk density was significantly correlated with macroporosity and mean equivalent diameter of macropores, and soil particles of 0.002–0.02 mm was correlated highly with soil macropore characteristics.

Key words: CT; Macropores; Physical-chemical properties; Correlation