

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.015.

安富博, 郭树江, 赵赫然, 等. 石羊河尾间青土湖表层土壤粒度空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 46-54.

An Fubo, Guo Shuijiang, Zhao Heran, et al. Characteristics of Spatial Distribution of Surface Soil Particle Size in Qingtu Lake at the End of Shiyang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 46-54.

石羊河尾间青土湖表层土壤粒度空间分布特征

安富博¹, 郭树江^{1,3}, 赵赫然¹, 赵艳丽¹, 王飞^{1,2}, 李雪娇¹, 宋德伟¹

(1. 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070; 2. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室(培育基地), 甘肃 武威 733000;
3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300)

摘要: [目的]揭示石羊河尾间青土湖土壤粒度空间分布特征, 为该区域生态恢复提供理论依据。[方法]以湖区为中心分别在西北、正东、东南方向上布设样线并采集 0—20 cm 深度土壤样品, 对比分析了青土湖周边不同区域沙物质粒配组成、粒配曲线等参数特征。[结果](1) 青土湖表层土壤粒度组成以细砂为主(26.26%~84.97%), 其中西北方向上表层土壤粒度以细砂为主(26.26%~66.62%), 其次是粉粒(4.23%~46.35%); 正东、东南方向上表层土壤粒度组成以细砂为主(43.41%~86.30%), 其次是极细砂(1.86%~29.60%)。不同样线同粒级间含量存在差异。(2) 研究区表层土壤颗粒总体较粗, 分选较差, 偏度为正偏度, 峰度属尖窄。粒度参数的空间分布表现为: 西北方向表层土壤平均粒径较其他方向偏细, 分选性较差, 偏度也更为正偏, 峰值小于正东方向。正东、东南方向表层土壤平均粒径较为一致, 明显偏粗, 分选性分别属中等、较好, 均为近于对称, 峰度为尖窄、中等。(3) 西北方向土壤粒度频率平均值分布曲线表现为双峰型, 正东、东南方向为单峰型。粒度累计分布曲线反映出, 东南方向风沙活动较正东、西北方向频繁、强烈。(4) 通过沉积环境判别得出西北方向主要是湖相沉积, 正东、东南主要是风成沉积。[结论]成土过程和干旱多风的环境条件影响青土湖土壤的基本特性, 而通过生态输水形成水面改善了该区的土壤环境。

关键词: 土壤粒度; 粒度参数; 粒配曲线; 青土湖

中图分类号: S152.3; P512.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0046-09

Characteristics of Spatial Distribution of Surface Soil Particle Size in Qingtu Lake at the End of Shiyang River

An Fubo¹, Guo Shuijiang^{1,3}, Zhao Heran¹, Zhao Yanli¹, Wang Fei^{1,2}, Li Xuejiao¹, Song Dewei¹

(1. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory
Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei, Gansu 733000, China;
3. Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin, Gansu 733300, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the characteristics of spatial distribution of soil grain size in Qingtu Lake at the end of Shiyang River, and to provide theoretical basis for ecological restoration in this region. [Methods] Sampling lines were set up in the northwest, east and southeast directions of the lake area. Soil samples at a depth of 0—20 cm were collected to compare and analyze the parameter characteristics of particle composition and particle size distribution curves in different areas around Qingtu Lake. [Results] (1) The particle size composition of the surface soil of Qingtu Lake is mainly composed of fine sand (26.26%~84.97%), with fine sand being the main particle size in the northwest direction (26.26%~66.62%), followed by silt (4.23%~46.35%). The particle size composition of the surface soil in the east and southeast directions is mainly composed of fine sand (43.41%~86.30%), followed by extremely fine sand (1.86%~29.60%). There are differences in contents between different

收稿日期: 2023-12-05

修回日期: 2024-01-08

资助项目: 国家自然科学基金(32060371); “西部之光”人才计划项目(22JR9KA028)

第一作者: 安富博(1972—), 男, 甘肃镇原人, 学士, 研究员, 主要从事荒漠生态研究。E-mail: anfb_gs@126.com

通信作者: 郭树江(1984—), 男, 甘肃永昌人, 硕士, 研究员, 主要从事荒漠生态研究。E-mail: shujiao@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

sample lines and the same particle size. (2) The surface soil particles in the research area are generally coarse and poorly sorted, with a positive skewness and a sharp and narrow kurtosis. The spatial distribution of particle size parameters shows that the average particle size of the surface soil in the northwest direction is finer than that in other directions, with poor sorting ability and more positive skewness, with a peak value smaller than that in the east direction. The average particle size of the surface soil in the east and southeast directions is relatively consistent, significantly coarser, with medium and good sorting properties, both of which are nearly symmetrical, and the kurtosis is narrow and medium. (3) The average distribution curve of soil grain size frequency shows a bimodal pattern in northwest direction, and a unimodal pattern in due east and southeast direction. The cumulative distribution curve of particle size reflects that the wind and sand activities in the southeast direction is more frequent and intense than those in the due east and northwest directions. (4) Through sedimentary environment discrimination, it can be concluded that the northwest direction is mainly lacustrine sedimentation, while the due east and southeast are mainly eolian sedimentation. [Conclusion] The soil formation process and arid and windy environmental conditions affect the basic characteristics of the soil in Qingtu Lake. The soil environment in this area is improved by ecological water transport to form water surface.

Keywords: soil particle size; particle size parameters; particle distribution curve; Qingtu Lake

青土湖是河西走廊三大内陆河之一石羊河的尾间湖,20世纪五六十年代,青土湖完全干涸^[1-2],水干风起,流沙肆虐,形成了长达13 km的风沙线,成为民勤绿洲北部最大的风沙口,巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠在青土湖呈合围之势。根据《石羊河流域重点治理规划》,2010年首次注入生态用水,截至2022年底,青土湖季节性水域面积达到26.70 km²,形成旱区湿地106 km²,地下水位由2007年的4.02 m上升至2022年的2.87 m,使干涸半个多世纪的青土湖重现碧波,青土湖区域沙化得到有效治理。随着青土湖湖面的形成,土壤环境因子发生了变化,准确把握该区土壤因子相关特征,可为该区土壤恢复及生态恢复提供科学参考。

土壤粒度特征有效反映了土壤中不同径级颗粒的配比及其分布情况,其参数变化(平均粒径、标准偏差、偏度、峰值)受到沉积物来源、搬运介质与方式、沉积环境和气候等因素的影响,能够解释土壤颗粒的运移情况,进一步判断风沙活动环境、沙漠化程度及沉积环境演变过程,在荒漠化研究中备受关注^[3-4]。目前有关石羊河尾间青土湖的研究主要集中在生态输水后生态环境变化^[5-6]、植被群落变化^[7-9]、生态输水量-湖水面积关系^[10]、地下水变化^[11]、地表输沙量等^[12]方面,对土壤特征的研究主要集中在土壤养分空间特征^[13-14]、盐渍化^[15-16]、地下水变化^[17],但是关于青土湖土壤粒度特征及空间异质性的研究相对较少。本研究以青土湖北部湖区中心为圆心,分别沿西北、正东、东南3个方向布设固定样线,对表层土壤粒

度进行测定及对比分析,探讨其空间分布特征,为该区的生态恢复提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省武威市民勤县境内,地理位置39°05'N,103°31'E,海拔高度为1 291~1 310 m。年平均气温为7.8℃,年平均降水量89.8 mm,且集中于7—9月,蒸发量达2 600 mm以上,全年盛行西北风,年均风速4.1 m/s,地下水位埋深为2.87 m(2022年),较2007年回升1.15 m。土壤以湖相沉积物为母质的砂土及壤质砂土为主,植被类型为典型的荒漠植被,主要包括芦苇群落、白刺群落与梭梭群落,伴生灌木植物有盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*);草本植物有驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago*)、戟叶鹅绒藤(*Cynanchum sibiricum*)、骆驼蒿(*Peganum nigellastrum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 试验设计与方法

在研究区的民左公路北侧水域(北部湖区)中心为圆心,分别沿西北、正东、东南3个方向布设固定样线。在每条样线上设置大小为20 m×20 m大样方,其中起点样方设在湖面边缘,末点样方设在地下水位相当于补水前湖心的平均水位处,即可视为生态注水前的环境状况,间距为50~100 m,每条样线上分别为8个大样方。同时,在民左公路南侧水域(南部湖区)的外围

选择不受任何注水干扰的区域(即无任何人为因素存在)作为对照样地,参照上述标准设置对照样方用于对照调查和研究。在大样方沿样线方向的对角线上采集土壤,土层深度为 20 cm,3 个重复。土壤粒径组成采用马尔文激光粒度仪 Malvern Mastersizer 2000 进行测定,土壤粒径分级采用美国制^[18]输出。

1.3 数据分析

参照 Krumbein 提出的对数转化公式,将粒度真值转化为 Φ 值^[19]。土壤的平均粒径 M_z 、标准偏差 σ 、偏度 S_{K1} 、峰值 K_G 由 GRADISTAT 软件计算所得。采用 Excel 2010, SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析与作图,采用单因素方差分析法对研究区不同样线、样方土壤粒度组成与粒度参数进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤粒度组成特征

由表 1 可知,研究区表层(0—20 cm)土壤粒度以细砂为主(26.26%~84.97%)。西北方向上,土壤粒度以细砂为主(26.26%~66.62%),其次是粉粒(4.23%~46.35%),不同样地土壤黏粒、粉粒、细砂含量差异极显著($p < 0.01$),而极细砂、中砂、粗砂、极粗砂含量差异不显著($p > 0.05$)。正东方向上,土壤粒度以细砂为主(54.54%~83.54%),其次是极细砂(2.20%~24.02%),不同样地土壤黏粒、粉粒、极细砂、细砂、中砂、极粗砂含量差异极显著($p < 0.01$),粗砂含量差异显著($p < 0.05$)。东南方向上,土壤粒度以细砂为主(43.41%~86.30%),其次是极细砂(1.86%~29.60%),不同样地土壤黏粒、粉粒、极细砂、细砂、中砂含量差异极显著($p < 0.01$),而粗砂和极粗砂含量差异不显著($p > 0.05$)。

黏粒、粉粒含量在 0—20 cm 土层表现为西北方向>正东方向>东南方向,差异极显著($p < 0.01$),其中西北方向显著($p < 0.05$)高于其他两个方向,正东和东南方向差异不显著($p > 0.05$),黏粒、粉粒含量之和表现为西北方向(31.90%)>正东方向(4.30%)>东南方向(2.77%),从湖心向外辐射 2 个粒级含量呈先增加后降低的趋势。极细砂含量表现为西北方向>东南方向>正东方向,差异显著($p < 0.05$),其中西北方向显著($p < 0.05$)高于其他两个方向,正东和东南方向差异不显著($p > 0.05$);细砂含量表现为东南方向>正东方向>西北方向,差异极显著($p < 0.01$),其中东南、正东方向显著($p < 0.05$)高于西北方向,东南、正东方向差异不显著($p > 0.05$);中砂含量表现为正东方向>东南方向>西北方向,差异极显著($p < 0.01$),其中正东方向显著($p < 0.05$)高于其他两个方

向,东南、西北方向差异不显著($p > 0.05$);粗砂与极粗砂含量差异不显著($p > 0.05$)。

2.2 土壤粒度参数特征

由图 1 可知,青土湖表层土壤平均粒径介于 2.276~4.467 Φ ,均值为 2.967 Φ ,细砂粒级;标准偏差为 0.429~2.008,均值为 1.049,分选较差;偏度为 -0.197~0.500,均值为 0.144,属正偏度;峰值 0.763~2.160,均值为 1.167,属尖窄。以上说明研究区表层土壤颗粒总体较粗,分选较差,偏度为正偏度,峰度属尖窄。

平均粒径 M_z 反映土壤粒度分布的平均情况^[20]。青土湖西北、正东、东南方向上表层土壤平均粒径变化范围分别是 2.722~4.467 Φ , 2.276~3.004 Φ , 2.308~3.004 Φ ,均值分别为 3.786 Φ , 2.532 Φ , 2.583 Φ ,分别属极细砂、细砂、细砂,表层土壤平均粒径由细到粗依次为西北方向、东南方向、正东方向。经方差分析,西北方向上表层土壤平均粒径显著高于其他方向同层土壤($p < 0.05$),正东、东南方向表层土壤差异不显著($p > 0.05$)。由图 1 可知,从湖区向外辐射,随着离湖区距离的增加,3 条样线上表层土壤平均粒径均呈先增加后降低的趋势。

标准偏差(分选性) σ 表征土壤粒度分布的分散程度^[19]。青土湖西北、正东、东南方向上表层土壤标准偏差变化范围分别是 0.771~2.008, 0.470~1.394, 0.429~1.766,均值分别为 1.655, 0.828, 0.665,分选性分别属较差、中等、较好,表层土壤颗粒的标准偏差 σ 由好到差依次为东南方向、正东方向、西北方向。经方差分析,西北方向上表层土壤标准偏差显著高于其他方向同层土壤($p < 0.05$),正东、东南方向差异不显著($p > 0.05$)。由图 1 可知,东南方向上样方 1 属分选中等,样方 2 属分选较差,样方 3, 4, 5 属分选较好,样方 6, 7, 8, 9 属分选好;正东方向上样方 1, 2, 4 均属分选较差,样方 5 属分选中等,样方 3, 6, 7 属分选较好,样方 8, 9 属分选好;西北方向上样方 1, 9 属分选中等,样方 2—7 均属分选较差,样方 8 属分选差。由此可知,随着离湖区距离的增加,3 条样线上表层土壤颗粒分布大致呈由比较分散向比较集中趋势变化。

偏度 S_{K1} 反映土壤颗粒粗细分布的对称性^[19]。青土湖西北、正东、东南方向上表层土壤偏度变化范围分别是 0.096~0.500, -0.197~0.447, 0.008~0.311,均值分别为 0.338, 0.044, 0.049,分别属极正偏度、近于对称、近于对称,偏度由小到大依次为正东方向、东南方向、西北方向,其中西北方向上表层土壤偏度显著高于其他方向同层土壤($p < 0.05$),正东、东南方向表层土壤差异不显著($p > 0.05$)。西北方向上 1—8 样方均属正偏度/极正偏度,样方 9 属近于对

称;正东方向上样方 1,3 属近于对称,样方 2 属负偏度,样方 4 属极正偏度,样方 5 属正偏度,样方 6,7, 8,9 属近于对称;东南方向上除样方 2(0.31)属极正偏度,其他样方均属近于对称。

表 1 青土湖表层土壤粒度组成
Table 1 Grain-size composition of surface soil in Qingtu Lake

方向	样点	黏粒/% 0~2 μm	粉粒/% 2~50 μm	砂粒/%				
				极细砂 50~100 μm	细砂 100~250 μm	中砂 250~500 μm	粗砂 500~1000 μm	极粗砂 1000~2000 μm
西北方向	1	0.70±0.04b	7.01±0.91c	23.61±0.71a	63.55±0.92a	5.14±0.69a	0.00a	0.00a
	2	2.55±0.10a	33.43±1.38ab	21.20±1.05a	37.21±1.09bc	5.19±1.01a	0.26±0.06a	0.17±0.08a
	3	3.54±0.77a	46.35±9.58a	19.18±2.61a	27.18±7.66c	3.11±0.49a	0.44±0.25a	0.20±0.19a
	4	3.02±0.79a	34.35±9.91ab	17.95±2.16a	38.05±8.43bc	5.33±1.07a	0.76±0.77a	0.55±0.14a
	5	3.75±0.43a	45.21±4.27a	20.32±0.98a	26.26±2.73c	3.79±0.86a	0.49±0.19a	0.17±0.03a
	6	2.28±0.19a	35.81±3.35ab	19.88±0.46a	37.60±3.09bc	4.43±0.22a	0.00a	0.00a
	7	2.31±0.34a	24.94±2.80b	25.49±1.14a	43.47±1.81b	3.47±0.46a	0.18±0.09a	0.13±0.05a
	8	3.28±0.61a	34.03±4.59ab	17.75±1.97a	39.91±2.60bc	5.03±0.50a	0.00a	0.00a
	9	0.34±0.19b	4.23±2.24c	20.57±6.47a	66.62±7.58a	6.72±2.62a	0.96±0.26a	0.56±0.15a
	平均	2.42±1.19A	29.48±14.98A	20.66±2.53A	42.21±14.15B	4.69±1.11B	0.34±0.20A	0.20±0.22A
正东方向	1	0.97±0.02b	6.86±1.13b	18.74±3.51a	57.49±1.83e	8.72±1.79c	3.27±0.85ab	3.96±0.43a
	2	0.31±0.16c	3.91±0.11bc	22.58±0.40a	57.28±0.86e	7.22±0.49c	4.23±0.19a	4.47±0.09a
	3	0.00c	0.00c	8.91±0.85b	74.22±3.72c	15.07±1.50ab	0.86±0.35bc	0.94±0.45b
	4	1.85±0.24a	14.05±1.32a	18.39±1.15a	56.47±1.17e	8.83±1.11c	0.16±0.07c	0.25±0.05b
	5	0.30±0.17c	6.80±3.22b	11.44±2.67b	61.24±1.43de	17.07±4.02a	2.28±0.97abc	0.86±0.37b
	6	0.02±0.01c	3.63±0.30bc	9.94±0.58b	66.73±3.25d	18.30±2.35a	1.26±1.07abc	0.11±0.09b
	7	0.00c	0.00c	13.11±0.54b	75.65±0.22bc	11.25±0.33bc	0.00c	0.00b
	8	0.00c	0.00c	8.49±1.37b	82.26±0.64a	9.25±0.85c	0.00c	0.00b
	9	0.00c	0.00c	2.66±0.26c	80.15±0.27ab	17.18±0.43a	0.00c	0.00b
	平均	0.38±0.64B	3.92±4.75B	12.70±6.21B	67.94±10.33A	12.54±4.34A	1.34±1.57A	1.18±1.76A
东南方向	1	0.06±0.04b	4.12±0.61b	12.89±0.19c	70.40±6.65bc	8.84±2.15b	1.86±0.85a	1.84±0.82a
	2	1.62±0.46a	17.27±4.99a	19.57±2.53b	47.69±3.08d	5.13±0.79c	3.97±1.97a	4.76±2.35a
	3	0.05±0.02b	1.82±0.86b	28.92±0.54a	68.10±0.29c	1.11±0.21d	0.00a	0.00a
	4	0.00b	0.00b	19.52±0.65b	76.59±0.37ab	3.89±0.28cd	0.00a	0.00a
	5	0.00b	0.00b	17.63±0.91b	78.01±0.53ab	4.36±0.38c	0.00a	0.00a
	6	0.00b	0.00b	7.11±0.63d	81.83±1.25a	11.06±0.63ab	0.00a	0.00a
	7	0.00b	0.00b	6.00±1.58de	81.11±0.50a	12.89±1.09a	0.00a	0.00a
	8	0.00b	0.00b	2.93±0.12ef	83.95±0.72a	13.12±0.60a	0.00a	0.00a
	9	0.00b	0.00b	2.08±0.16f	84.97±1.05a	12.95±0.91a	0.00a	0.00a
	平均	0.19±0.54B	2.58±5.67B	12.96±9.12B	74.74±11.67A	8.15±4.61B	0.65±1.39A	0.73±1.63A

注:不同大写字母表示不同样线土壤粒度组成差异显著($p<0.05$);不同的小写字母表示不同样方之间差异显著($p<0.05$)。下同。

峰值 K_G 表示土壤粒度分布的集中程度^[19]。青土湖西北、正东、东南方向上表层土壤峰值变化范围分别是 0.763~1.735,0.934~2.160,0.945~1.368,均值分别为 1.126,1.332,1.044,分别属尖窄、尖窄、中等,峰值由小到大依次为东南方向、西北方向、正东方向,3 条样线表层土壤峰值差异不显著($p>0.05$)。东南方向上,样方 1,2 属尖窄,其他样方均属中等;西北方向上,样方 1 属很尖窄,样方 2,3,5,8 属中等,样方 4,7,9 属尖窄,样方 6 属宽平;正东方向上,样方 1,2,4 属很尖窄,样方 3 属中等,样方 5 属尖窄,样方

6—9 属中等。

2.3 土壤粒配曲线

2.3.1 土壤粒度频率分布曲线 西北方向上土壤粒度频率分布曲线表现为双峰曲线,各样方峰值出现处基本一致,分别在 5.87 Φ 和 2.87 Φ 附近出现波峰,峰值分别为 0.32%~2.54% 和 4.29%~10.64%,以细砂为主,在 4.81 Φ 出现了波谷。波谷左侧曲线能够代表土壤表层细粒组分(包括黏粒、粉粒),右侧可代表粗粒组分(砂粒),由图 2 可知,在西北方向上,由湖心向外辐射表层土壤细粒组分呈先增加后降低

趋势,而粗粒组分呈相反趋势,其中样方 9 对照样方细粒组分含量最低,粗粒组分含量最高。正东方向上,土壤粒度频率分布曲线表现为多种形态,其中 1, 2 样方为多峰曲线,4,5,6 样方为双峰曲线,3,7,8,9 样方为单峰曲线,样品的主峰均在 $2.87 \sim 2.35 \Phi$,以细砂为主,峰值为 $8.61\% \sim 14.44\%$,第 1 个次峰在 0Φ 附近,第 2 个次峰在 6Φ 附近。东南方向上,土壤粒度频率分布曲线表现为多峰、单峰 2 种形态,其

中 1,2 样方为多峰曲线,其他样方均为单峰曲线,样品的主峰均在 $2.87 \sim 2.35 \Phi$,以细砂为主,峰值为 $7.45\% \sim 15.83\%$,第 1 个次峰在 0Φ 附近,第 2 个次峰在 6Φ 附近。正东、东南方向上,由湖心向外辐射表层土壤砂粒含量呈增加趋势。由图 2 可知,西北方向上土壤粒度频率平均值分布曲线为双峰型,分别在 5.87Φ 和 2.87Φ 出现波峰;正东、东南方向为单峰型,在 2.52Φ 出现波峰。

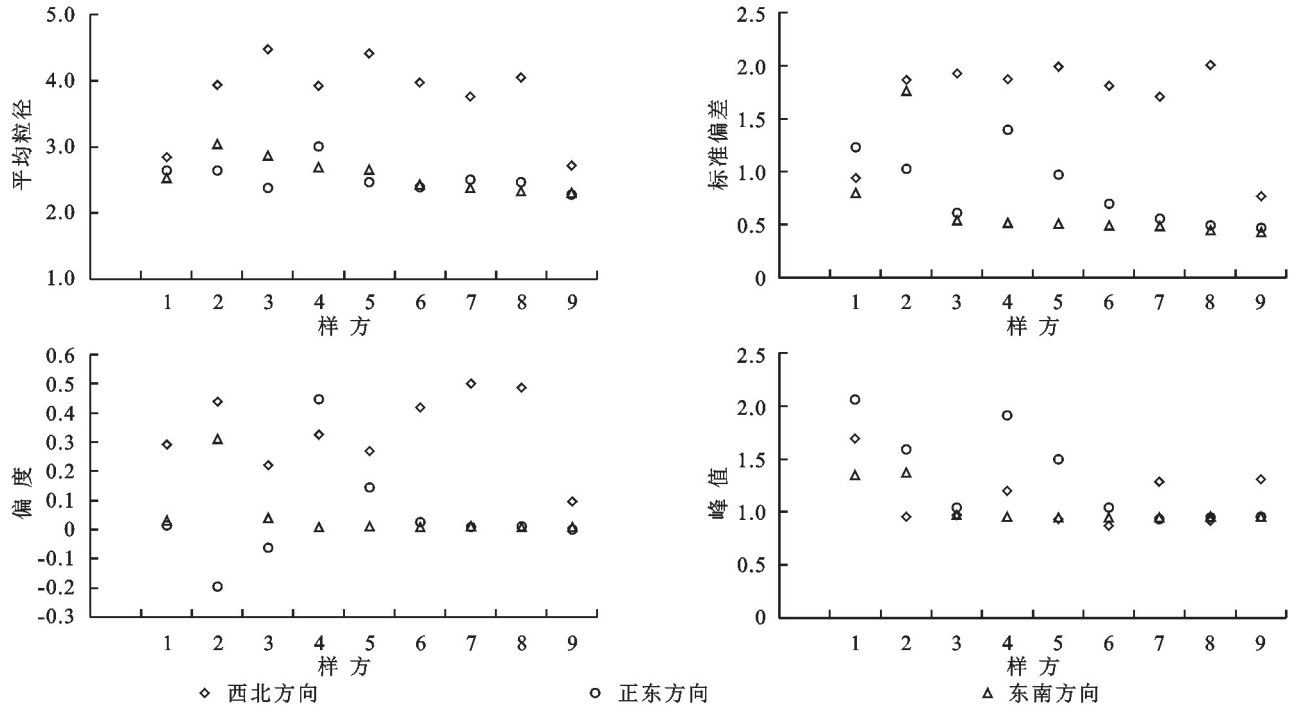


图 1 青土湖表层土壤粒度参数

Fig. 1 Surface soil particle size parameters of Qingtu Lake

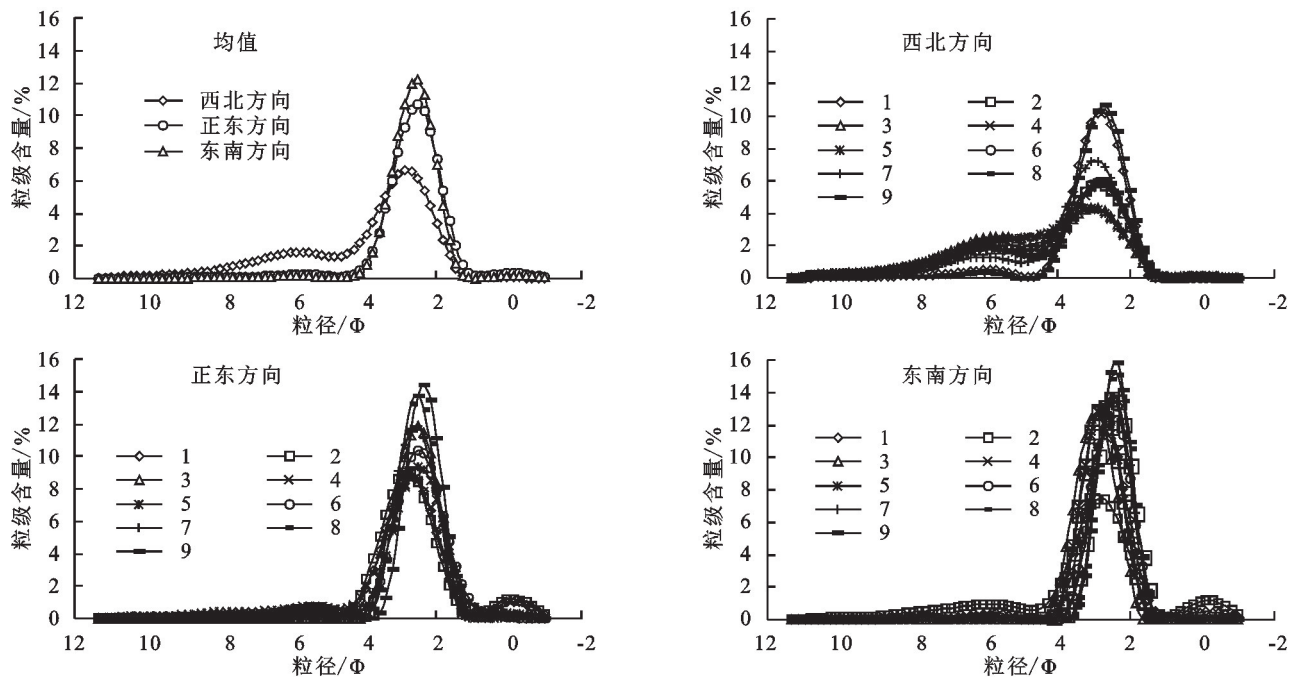


图 2 土壤粒度频率分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of soil particle size frequency

2.3.2 土壤粒度累积频率分布曲线 土壤粒度累积频率分布曲线一般划分为三段式,细粒段代表的悬移质、中粒段代表的跃移质和粗粒段代表的蠕移质^[21]。由图3可知,西北方向上细截点为3.84~6.77 Φ ,粗截点为1.07~1.96 Φ ,均值跃移质组分粒径区间为7.52~1.94 Φ ,悬移质、跃移质、蠕移质组分所占比重分别为6.20%,88.68%,5.12%。正东方向上细截点为3.22~3.92 Φ ,粗截点为1.34~2.01 Φ ,均值跃移质组分粒径区间为3.49~1.84 Φ ,悬移质、跃移质、蠕移质

组分所占比重分别为10.23%,74.94%,14.83%。东南方向上细截点为3.13~3.87 Φ ,粗截点为1.84~2.19 Φ ,均值跃移质组分粒径区间为3.47~1.95 Φ ,悬移质、跃移质、蠕移质组分所占比重分别为8.45%,82.23%,9.32%。根据曲线的陡直情况^[22]可知,东南方向曲线坡度最陡,其次为正东方向,西北方向坡度最小,反映出青土湖东南方向上层土壤颗粒分选性最好、正东方向次之、西北方向较差,东南方向风沙活动较正东、西北方向频繁、强烈。

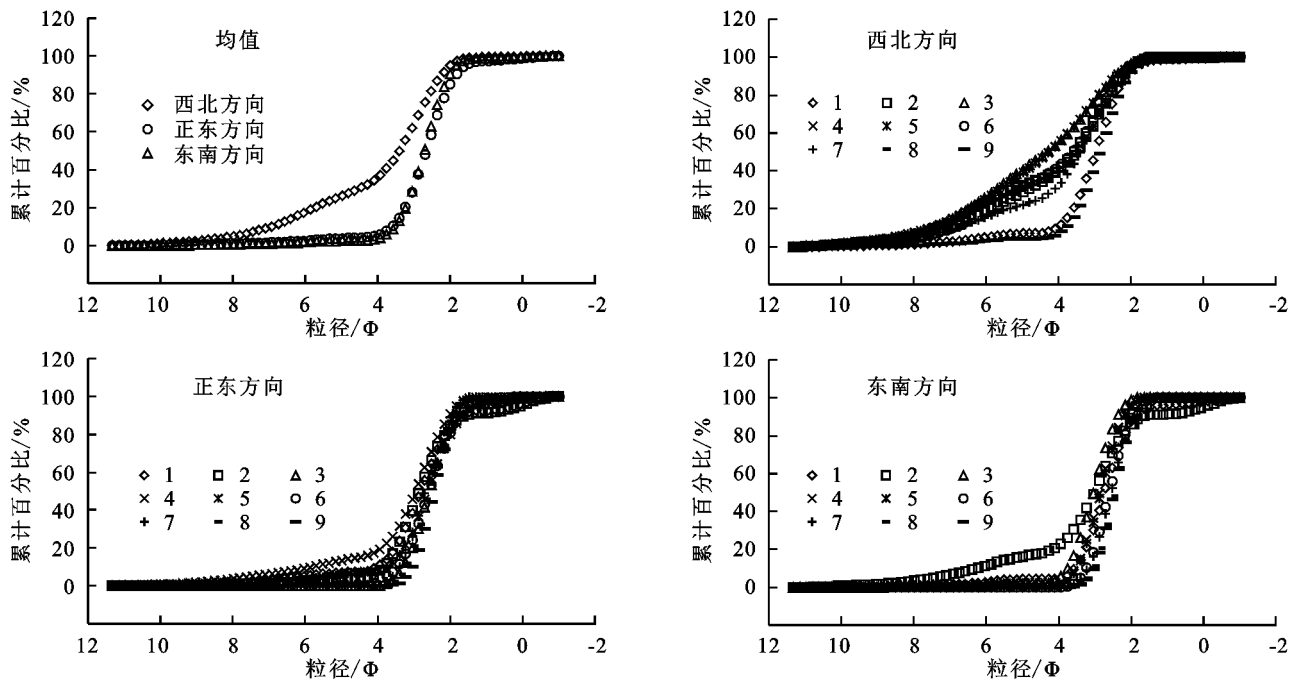


图3 土壤粒度累积频率分布曲线

Fig. 3 Cumulative frequency distribution curve of soil particle size

2.4 沉积物环境判别

采用 Sahu^[23] 判别式对青土湖表层沉积环境进行判别,西北方向上,除样方9为风成沉积,其他样方均为河流沉积;正东方向上,样方1,2,4为河流沉积,其他样方为风成沉积;东南方向上,样方1,2为河流沉积,其他样方为风成沉积。由于 Sahu 判别式缺少湖相沉积环境判别式,采用张娅璐等^[24] 判别公式,公式如下:

$$y_1 = 1.163M_z - 6.549\sigma - 1.633S_{K1} + 12.065K_G - 6.576 \quad (1)$$

$$y_2 = 3.045M_z - 6.560\sigma - 2.446S_{K1} + 12.707K_G - 14.044 \quad (2)$$

当 $y_1 > y_2$ 时,为风沙沉积物,若 $y_1 < y_2$,为湖相沉积物。经计算,西北方向上,除样方9为风成沉积,其他样方均为湖相沉积;正东、东南方向上,各样方均为风成沉积。2种判别方式均表明,西北方向主要是河流沉积或湖相沉积,正东、东南主要是风成沉积。研究区民勤盆地地处沙漠边缘,曾经是石羊河古终端湖泊所

在,在演化过程中,风沙活动相当频繁,风的搬运沉积作用是湖泊沉积物的一个重要来源,土壤以湖相沉积物为母质的砂土及壤质砂土为主,因此可以判断西北方向主要是湖相沉积,正东、东南主要是风成沉积。

3 讨论

3.1 物源对土壤颗粒组成的影响

土壤粒径分布曲线能够反映沉积物的物质来源情况。本研究中,青土湖3条样线表层土壤粒度频率曲线、累积频率分布曲线特征与乌兰布和沙漠、浑善达克沙地^[24] 以及其他沙漠、沙地^[25-27] 风沙和湖相沉积物的粒度曲线特征相似。正东、东南方向土壤粒度频率曲线几乎对称分布、峰型尖窄,分选良好,主峰2.87~2.35 Φ ,细颗粒部分有尾部,体现了风沙沉积物的粒度特征;其粒度累积频率曲线表现为陡直的一段式加两段式,动力机制单一,是风沙跃移质和悬移质的特征。西北方向土壤粒度频率曲线呈正偏态,双

峰明显,峰型宽矮,细颗粒物较风沙沉积物高,主峰 2.87Φ ,符合湖相沉积物粒度特征,其粒度累积频率曲线表现为跃移质占主要部分,呈现二段式,这要是由于同源沙受到不同作用力的影响,即沉积物既保存了原本水动力影响留下的痕迹,同时又受到局地风力作用的改变。结合 Sahu^[23] 与张娅璐等^[24] 判别式,可以判断西北方向主要是湖相沉积,正东、东南主要是风成沉积,说明区域沉积物来源相对复杂,与前人^[28] 的研究结果相同。本研究中,西北样线表层土壤颗粒组成、粒度参数及粒配曲线存在差异,这种差异与物源的复杂性、沉积环境形成机制以及沙物质迁移密切相关。

3.2 环境要素对土壤颗粒组成的影响

表层土壤颗粒组成变化主要受多种外界营力(水力、风力等)的复合侵蚀影响。研究区表层(0—20 cm)土壤粒度以细砂为主(26.26%~84.97%),与前人^[14,29] 的研究结果相似。从湖心向外辐射黏粒、粉粒、极细砂含量呈先增加后降低的趋势,这主要是因为水面形成提高了表层土壤含水量,从而影响表层土壤沙物质的沉积与组成,土壤粒径朝细化方向发展,黏粒、粉粒、极细砂含量增加,砂粒含量降低,随后受水面形成影响较小,砂粒含量增多,土壤再次向砂质化、疏松化发展。

青土湖表层土壤平均粒径介于 $2.276 \sim 4.467 \Phi$,土壤质地整体较粗,从湖区向外辐射,随着离湖区距离的增加,3 条样线上表层土壤平均粒径均呈先增加后降低的趋势,表明受水面形成的影响,土壤粒度细化,随后粒径变粗。研究区土壤粒度标准偏差为 $0.429 \sim 2.008$,介于好—差,随着离湖区距离的增加,其分选性大致呈由比较分散向比较集中趋势变化,主要是因为湖区周边土壤细颗粒物增加,土壤粒度组成细化,使土壤粒径分布范围更趋广泛。研究区土壤偏度状况多属近于对称、正偏度,峰值多属尖窄/中等,这主要是因为研究区土壤细砂和中砂含量较高,造成了土壤粒度分布的不对称、相对比较集中的现象。西北方向上表层土壤平均粒径、标准偏差、偏度显著高于其他方向同层土壤($p < 0.05$),表明西北方向细粒物质所占比重较大,但分选性相对较差,土壤粒度粗细分配不对称,分析其原因,除了受到物源的影响,生物土壤结皮发育也是其产生差异的原因之一,西北样线上生物土壤结皮较厚且坚硬,其可通过捕获大气降尘、增加空气动力学粗糙度等,改变地表物质迁移、堆积和转化等过程也能保护地表细颗粒物质免受侵蚀^[30-31]。风沙活动^[32-33] 影响土壤颗粒组成变化,本研究中,东南方向上均值跃移质组分粒径区间为 $3.47 \sim$

1.95Φ ,大于正东($3.49 \sim 1.84 \Phi$)和西北($7.52 \sim 1.94 \Phi$)方向,体现了青土湖东南方向相对高能的沉积环境。

4 结论

(1) 青土湖表层土壤粒度以细砂(26.26%~84.97%)为主,西北方向表层土壤黏粒、粉粒、极细砂含量显著高于其他 2 个方向。西北方向表层土壤平均粒径较其他方向偏细,分选性较差,偏度也更为正偏,峰值小于正东方向。正东、东南方向表层土壤平均粒径较为一致,明显偏粗,分选性分别属中等、较好,均为近于对称,峰度为尖窄、中等。

(2) 西北方向上土壤粒度频率平均值分布曲线为双峰型,分别在 5.87Φ 和 2.87Φ 出现波峰;正东、东南方向为单峰型,在 2.52Φ 出现波峰。粒度累计分布曲线反映出,东南方向风沙活动较正东、西北方向频繁、强烈。结合沉积环境判别得出西北方向主要是湖相沉积,正东、东南主要是风成沉积。成土过程和干旱多风的环境条件影响青土湖土壤的基本特性,而通过生态输水形成水面改善了该区的土壤环境。

参考文献(References):

- [1] 赵强,王乃昂,程弘毅,等.青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义[J].干旱区地理,2003,26(1):1-5.
Zhao Q, Wang N A, Cheng H Y, et al. Grain-size characteristics of Qingtu Lake sediments and its paleoenvironment explanation[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1):1-5.
- [2] 王乃昂,李吉均,曹继秀,等.青土湖近 6000 年来沉积气候记录研究:兼论四五世纪气候回暖[J].地理科学,1999,19(2):119-124.
Wang N A, Li J J, Cao J X, et al. A preliminary research on the climatic records of lacustrine deposits of Qingtu Lake in the last 6000 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(2):119-124.
- [3] 王琴,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被-土壤响应特征[J].生态学报,2017,37(4):1159-1167.
Wang Q, Meng Z J, Wang J, et al. Response of the vegetation soil under almost-natural restoration in the Xilamuren grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):1159-1167.
- [4] 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.
Li Z C, Hu X. Effects of shrub (*Caragana microphylla* Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1):242-248.
- [5] 赵强,王乃昂,李秀梅,等.青土湖地区 9500 a BP 以来的

- 环境变化研究[J].冰川冻土,2005,27(3):352-359.
- Zhao Q, Wang N A, Li X M, et al. Environmental change around the Qingtu Lake since 9500 a BP[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 352-359.
- [6] 石万里,刘淑娟,刘世增,等.人工输水对石羊河下游青土湖区域生态环境的影响分析[J].生态学报,2017,37(18):5951-5960.
- Shi W L, Liu S J, Liu S Z, et al. Influence analysis of artificial water transfer on the regional ecological environment of Qingtu Lake in the lower reaches of the Shiyang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 5951-5960.
- [7] 任光瑞,黄峰,淳于训洲,等.生态输水后青土湖绿洲植被覆盖度时空演变规律[J].水电能源科学,2022,40(3):67-70,104.
- Ren G R, Huang F, Chunyu X Z, et al. Spatial-temporal evolution of vegetation coverage in Qingtu Lake oasis after ecological water conveyance[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 67-70, 104.
- [8] 刘淑娟,袁宏波,刘世增,等.青土湖水面形成过程的荒漠植物群落演替[J].生态科学,2017,36(4):64-72.
- Liu S J, Yuan H B, Liu S Z, et al. The desert vegetation succession at bank of Qintu Lake with water body formation[J]. Ecological Science, 2017, 36(4): 64-72.
- [9] 赵军,杨建霞,朱国锋.生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响[J].干旱区研究,2018,35(6):1251-1261.
- Zhao J, Yang J X, Zhu G F. Effect of ecological water conveyance on vegetation coverage in surrounding area of the Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1251-1261.
- [10] 郭云彤,周妍,崔亚莉,等.基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面积关系研究[J].水文地质工程地质,2022,49(5):32-41.
- Guo Y T, Zhou Y, Cui Y L, et al. A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 32-41.
- [11] 潘若云,黄峰,孙瑞瑞,等.甘肃省青土湖绿洲生态输水后地下水功能恢复调查评价[J].中国防汛抗旱,2021,31(8):36-41.
- Pan R Y, Huang F, Sun R R, et al. Investigation and evaluation of groundwater function recovery in Qingtu Lake after ecological water transporting in Gansu Province[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(8): 36-41.
- [12] 郭树江,杨自辉,王强强,等.青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J].生态学杂志,2021,40(4):1166-1176.
- Guo S J, Yang Z H, Wang Q Q, et al. The structure and grain size of wind-sand flow in the dry bottom of Qingtu Lake[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1166-1176.
- [13] 刘淑娟,袁宏波,刘世增,等.石羊河尾间(青土湖)水面形成后土壤养分的空间特征[J].土壤,2015,47(6):1068-1075.
- Liu S J, Yuan H B, Liu S Z, et al. The spatial characteristics of soil nutrients after the formation of water in the tail-streams of Shiyang River (Qintu Lake) [J]. Soils, 2015, 47(6): 1068-1075.
- [14] 郭春秀,安富博,刘虎俊,等.青土湖人工输水区白刺群落结构及土壤特性研究[J].水土保持通报,2019,39(6):44-51.
- Guo C X, An F B, Liu H J, et al. Community structure and soil characteristics of *Nitraria tangutorum* in artificial water transfer area of Qingtu Lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 44-51.
- [15] 杨建霞.青土湖及周边区域土壤盐渍化的遥感估算研究[D].兰州:西北师范大学,2020.
- Yang J X. Remote Sensing Estimation of Soil Salinization in Qingtu Lake and Surrounding Areas[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [16] 杨志辉,赵军,温媛媛.青土湖区植被与土壤盐渍化响应研究[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):231-237.
- Yang Z H, Zhao J, Wen Y Y. Study of response of vegetation coverage to salinization in Qingtu Lake[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 231-237.
- [17] 彭祥荣,赵明瑞.民勤县青土湖生态变化调查分析[J].现代农业科技,2019,(16):167,170.
- Peng X R, Zhao M R. Investigation and analysis on ecological changes of Qingtu Lake in Minqin County [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, (16): 167, 170.
- [18] 李天杰.土壤地理学[M].3版.北京:高等教育出版社,2004.
- Li T J. Pedogeography [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [19] 丁国栋.风沙物理学[M].2版.北京:中国林业出版社,2010.
- Ding G D. Aeolian Physics [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [20] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413-419.
- Yang J L, Li D C, Zhang G L, et al. Comparison of mass and volume fractal dimensions of soil particle size

- distributions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 413-419.
- [21] 陈宇轩, 张飞岳, 高广磊, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1051-1058.
Chen Y X, Zhang F Y, Gao G L, et al. Soil particle size distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Horqin Sandy Land[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(4): 1051-1058.
- [22] 李森, 夏训诚, 肖洪浪, 等. 马里萨赫勒地区风成沙特征、来源与发育时代[J]. 地理科学, 1999, 19(2): 163-170.
Li S, Xia X C, Xiao H L, et al. Characteristics, origin and development era of eolian sand in Sahelian region, Mali[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(2): 163-170.
- [23] Sahu B. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34: 73-83.
- [24] 张娅璐, 春喜, 周海军, 等. 沙漠沙地风沙与湖相沉积物粒度判别方法及环境指示意义[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 1-9.
Zhang Y L, Chun X, Zhou H J, et al. Grain size discriminant method for eolian and lacustrine sediments of deserts and its environmental indication[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 1-9.
- [25] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1357-1364.
Qian G Q, Dong Z B, Luo W Y, et al. Grain size characteristics and spatial variation of surface sediments in the Badain Jaran Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1357-1364.
- [26] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 345-353.
Yin Z Q, Qin X G, Wu J S, et al. Multimodal grain-size distribution characteristics and formation mechanism of lake sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 345-353.
- [27] 郭晓阳, 王维, 王国良, 等. 季风边缘区湖泊表层沉积物粒度组分分布特征与影响因素[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 677-691.
Guo X Y, Wang W, Wang G L, et al. Within-lake distributions of grain-size components and environmental implications based on the survey of lake surface sediment of Chinese monsoon marginal area[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 677-691.
- [28] 施祺, 王建民, 陈发虎. 石羊河古终端湖泊沉积物粒度特征与沉积环境初探[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1999, 35(1): 194-198.
Shi Q, Wang J M, Chen F H. Preliminary study on grain size characteristics of sediments and depositional environment of Palaeo-terminal lake of Shiyang River[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 1999, 35(1): 194-198.
- [29] 刘淑娟, 袁宏波, 李发明, 等. 青土湖水面形成区土壤颗粒组成与化学特性变化[J]. 草业科学, 2015, 32(12): 1953-1959.
Liu S J, Yuan H B, Li F M, et al. Changes on its chemical characteristics and soil particle composition after water formation in Qingtu Lake[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(12): 1953-1959.
- [30] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120.
Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us sandland[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 115-120.
- [31] Gao G L, Ding G D, Wu B, et al. Fractal scaling of particle size distribution and relationships with topsoil properties affected by biological soil crusts[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88559.
- [32] 周丹丹, 董建林, 高永, 等. 巴音温都尔沙漠表层土壤粒度特征及风蚀量估算[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 933-939.
Zhou D D, Dong J L, Gao Y, et al. Grain sizes analysis and soil loss of surface soil during desertification process on Bayinwenduer Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 933-939.
- [33] 闫玉春, 唐海萍, 张新时, 等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1263-1268.
Yan Y C, Tang H P, Zhang X S, et al. A probe into grassland wind erosion based on the analysis of soil particle size[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(6): 1263-1268.