

青海湖北部近 30 年不变草地与不变耕地 土壤粒度差异及其指示意义

袁杰^{1,2}, 曹广超^{1,2}, 虞敏^{1,2}, 袁有靖³, 杨龙^{1,2}, 赵亚娟^{1,2}

(1. 青海师范大学 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008;

2. 青海师范大学 生命与地理科学学院, 西宁 810008; 3. 青海省环境地质勘查局, 西宁 810008)

摘要:在前期对青海湖流域 1987 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年 5 期遥感图像解译基础上,对受人类活动影响严重和沙漠化趋势加剧的环青海湖北部区域近 30 年不变草地和不变耕地土壤粒度进行了分析。结果表明:研究区不变草地和不变耕地粒度组成上都属于砂黏壤级,但各组分之间存在明显差异,其中不变草地粉砂和黏粒大于不变耕地,而砂含量小于不变耕地;不变草地和不变耕地粒度参数特征表明不变草地平均粒径较小,分选更好,粒度曲线更为近对称分布,峰度中等,而不变耕地则平均粒径偏大,分选较差,粒度曲线偏正偏;不变草地和不变耕地剖面上表现为土壤粒度以地层深度 30—35 cm 为界存在异同,其中不变草地和不变耕地在 30 cm 以上地层范围内土壤粒度差异非常显著,30 cm 以下范围内土壤粒度差异很小。

关键词:青海湖北部; 人为活动; 土壤粒度

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0199-06

Difference of Soil Particle Size Between Unchanged Perennial Farmland and Permanent Grassland and Its Implications During Nearly 30 Years on the North of Qinghai Lake

YUAN Jie^{1,2}, CAO Guangchao^{1,2}, YU Min^{1,2}, YUAN Youjing³, YANG Long^{1,2}, ZHAO Yajuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Qinghai Province Physical Geography and Environmental Processes in Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xi'ning 810008, China; 2. College of Life and Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xi'ning 810008, China; 3. Environmental Geological Prospecting Bureau of Qinghai Province, Xi'ning 810008, China)

Abstract: Based on the interpretation of the remote sensing images of 1987, 1995, 2000, 2005 and 2010 years in Qinghai Lake basin, we investigated the difference of soil particle size between unchanged perennial farmland and permanent grassland during nearly 30 years on the north of Qinghai Lake, which has been severely affected by human activities and the desertification has been intensified. The results showed that composition of soil particle size in the unchanged grassland and farmland belonged was dominated by sand clay, but the compositions of soil sand, silt and clay sizes were significantly different, the contents of soil silt and clay on the grassland were greater than those in the farmland; the content of soil sand on the grassland was less than that in the farmland, indicating that the soil average particle size on the grassland was smaller; degree of sorting was better; soil particle size followed the normal distribution as well as peak value was moderate. For the farmland, soil average particle size and degree of sorting were converse, soil particle size more deviated positive values. In the soil profile, the difference of soil particle size between the unchanged grassland and farmland existed in the 30—35 cm depth, the difference was significant above 30 cm depth, but it was weak below 30 cm depth.

Keywords: north of Qinghai Lake; human activities; soil particle size

收稿日期:2015-10-22

修回日期:2015-11-19

资助项目:青海省重点实验室发展专项资金(2014-Z-Y24);青海省自然科学基金资助项目(2013-Z-913)

第一作者:袁杰(1989—),男,青海西宁人,博士研究生,研究方向为地表环境过程。E-mail:yuanjie8903@126.com

通信作者:曹广超(1971—),男,山东苍山人,教授,博士生导师,主要从事 GIS 应用、地表环境过程研究。E-mail:caoguangchao@qhnu.edu.cn

青海湖作为青藏高原的重要组成部分,因其海拔高、昼夜温差大、植被覆盖度较低成为全球变化的敏感区和生态系统脆弱区^[1],与此同时该区的生态系统担负着青藏高原东北部乃至内陆的生态安全,是控制西部荒漠化向东蔓延的天然屏障^[2]。然而近 30 年湖区土地沙漠化作为一个严重的生态环境问题,已引起人们的广泛关注^[3]。从现有研究来看,对于环湖区沙漠化的主要原因或驱动力,仍存在着争论,部分研究认为是由于气候变化特别是严重的干旱条件导致植被退化、风蚀加快,引起荒漠化或沙漠的扩张,且这种现象在青藏高原第四纪地质历史中频繁出现;另一部分研究则认为主要是由于人类对高寒地区草地不合理利用导致的,例如开垦草地和过度放牧。对于前者,古气候古环境学者通过大量的古环境载体特别是青藏高原上风成沉积物的研究获取了不同地质历史时期高原地区土地景观变化、沙漠扩张退缩历史及其与不同时间尺度气候变化的关系^[4-5]。但是对潜在风蚀区人类活动对土壤的研究较少,科学家更多的关注典型荒漠化地区已沙化土壤的监测、模拟、生态恢复等工作,从而局限了对不同人类活动方式下高寒地区土壤演替规律的理解^[6-9]。

土壤粒度是研究土壤环境以及整个生态系统特征的基础,其颗粒粗细与土壤的物理、化学和生物性质密切相关^[10]。同时土壤粒度组分的变化决定着土壤养分和水分的变化,土壤组分中细颗粒组分的丢失直接影响土壤结构从而导致荒漠化发生^[11]。了解青海湖地区土壤粒度对于研究本地区乃至青藏高原地区土壤荒漠化过程及其形成原因进而评价该区域的环境质量具有一定的参考价值。而在受人为活动干扰严重的环湖区确定一段时期内未变化的土地类型进而分析其土壤粒度就变的尤为重要。所以针对实际情况,在前期对该区 1987—2010 年 5 期遥感解译的基础上,选取土地利用频繁和易受风蚀的青海湖北部刚察县周围未变草地和未变耕地为研究对象,研究土壤粒度组成在剖面上的变化规律,进而预估不同人类活动方式下土壤演替规律,为区域土壤资源可持续利用与生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

刚察县隶属于青海省海北藏族自治州,位于海北州州境西部,该县与青海湖北岸相接,总面积近 8 138 km²,地理位置为 36°58′06″—38°04′04″N,90°20′44″—100°37′24″E。海拔高度为 3 200~3 800 m^[12],东隔哈尔盖河与海晏县为邻,西与海西蒙古族藏族自治州天峻县毗邻,南隔布哈河与海南州共和县相望,北隔大通河与祁连县接壤^[13]。境内山脉走向北西,北部高山连绵,南部低缓,自北西向南倾斜,绝大部分地区

海拔在 3 300~3 800 m 以上。最高点桑斯扎山峰海拔 4 775 m,最低点位于青海湖滨湖地带的沙柳河(伊克乌兰河)、巴哈乌兰河(乌哈阿兰河)、哈尔盖河、布哈河入湖处,海拔 3 195 m,最高点和最低点之间海拔相对高差 1 580 m。境内高山、丘陵、平原大致呈北、中、南排列。北部为大通山地段,中部丘陵,南部为平原地带。大通山横贯县境北部,以桑斯扎山与赞宝化秀山脊将全县东西向分成两大区域:北部是黄河流域的湟水水系外流区;南部是青海湖环湖内陆水系的内流区。

2 试验方法

2.1 土壤样地的选择

通过前期环湖区 1987—2010 年 5 期遥感解译图像,并且对 5 期遥感图像进行叠加,选取近 30 年青海湖北部不变草地和不变耕地为研究样地,其中不变草地坐标点为 37°16′43.29″N,100°17′37.12″E,不变耕地坐标点为 37°16′42.79″N,100°17′28.62″E。

2.2 土壤样品采集方法

于 2014 年 10 月在选定好的土壤采集区域(常年不变耕地和常年不变草地)采集土壤样品。其中采样间距为 30 m×30 m,两类不同土地利用方式下分别选取 5 个采样点,每个采样点用直径为 5 cm 的土钻钻取 0—60 cm 深度(采样间隔为 5 cm)的 12 个土壤样品。两类土地利用方式下共选取了 10 个采样点,120 个土壤样品,其中草地和耕地分别记为 GCC, GCG。采集的所有土壤样品带回实验室后自然风干、除杂,研磨后过 200 目筛,排号收集待用。

2.3 土壤粒度测定

所有样品待其自然风干后,过 2 mm 筛后准确称取 0.4 g 土样置于 50 ml 烧杯中,然后按照以下步骤对样品进行处理:(1) 加入 10 ml 10% 双氧水,加热煮沸到反应平静以去除土壤有机质和易氧化盐类;(2) 待烧杯冷却后,加入 10 ml 10% 的盐酸后摇匀并且煮沸使其充分反应,以去除碳酸盐;(3) 向这些样品中加入蒸馏水后静置 12 h 以上;(4) 加入 10% 的六偏磷酸钠 10 ml 并且置于超声波震荡器中待测,其中粒度分析所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,测量时待遮光度分布在 17%~20%,重复测量 3 次,取其平均值为最后结果。

另外通过测试出的土壤粒度结果计算出土壤粒度参数,粒度参数广泛应用于各种沉积环境分析中^[14-16],是沉积物基本性质之一,其中粒度参数计算公式如下:

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (1)$$

$$S_K = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (3)$$

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

式中: M_z 为平均粒径; S_K 为偏度; σ 为分选系数(标准偏差); K_G 为峰度; Φ_x 表示粒度累计到 $x\%$ 所对应的粒径^[17]。

3 结果与分析

3.1 草地、耕地土壤粒度组成分析

通过对草地和耕地粒度组成分析可以看出(表 1),GCC 砂含量为 5.62%~12.64%,平均值为 8.98%,而 GCG 砂含量为 9.81%~21.64%,平均值为 15.25%,可以看出 GCG 砂含量比 GCC 砂含量多 6.27%,近 1 倍之多;GCC 粉砂含量为 66.42%~73.18%,平均值为 70.8%,而 GCG 粉砂含量为 60.45%~71.48%,平均值为 66.65%,两者之间粉砂含量相差 4.15%;GCC 黏粒含量为 17.92%~21.99%,平均值为 20.22%,而 GCG 黏粒含量为 16.2%~19.82%,平均值为 18.1%,两者之间相差 2.12%。此外,通过 GCC 和 GCG 的“砂粒组—粉砂组—黏粒组”三因分类法三角图解(图 1),可以直观看出草地和耕地都属于砂黏壤级,综上可以得出:GCC 和 GCG 都属于砂黏壤级,其中 GCC 粉砂和黏粒含量大于 GCG,而砂含量 GCC 小于 GCG。

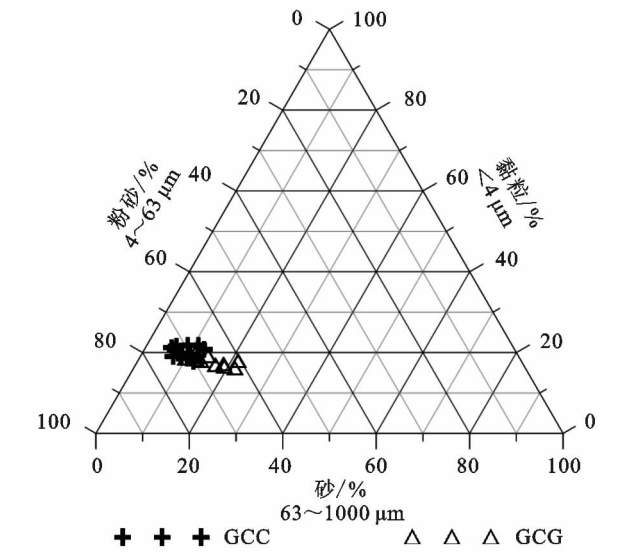


图 1 草地和耕地级分布三角图

3.2 草地、耕地土壤剖面粒度组成差异性分析

通过对草地和耕地土壤纵向深度粒度变化特征可以看出,GCC 和 GCG 砂、粉砂、黏土含量随剖面深度变化而发生变化(图 2)。其中 GCG 在整个剖面深度内砂含量整体上大于 GCC,在 0—20 cm 段,GCG 砂含量达

到了最大值,20—35 cm 段砂含量减小,而 35—60 cm 以下又开始增加;从图 2 可以看出,GCC 在整个剖面深度内粉砂含量整体上大于 GCG,以 0—30 cm 段为界,界上两者之间差异性最大,而界下两者之间差异不明显;同样从黏粒含量变化图中可以看出,GCC 在整个剖面深度内黏粒含量也整体上大于 GCG,同样以 0—30 cm 段为界,界上两者之间差异性最大,而界下两者之间差异不明显。

表 1 草地和耕地粒度含量变化 %

采样点		砂	粉砂	黏粒
GCC	最大值	12.64	73.81	21.99
	最小值	5.62	66.42	17.92
	平均值	8.98	70.8	20.22
GCG	最大值	21.64	71.48	19.82
	最小值	9.81	60.45	16.2
	平均值	15.25	66.65	18.1

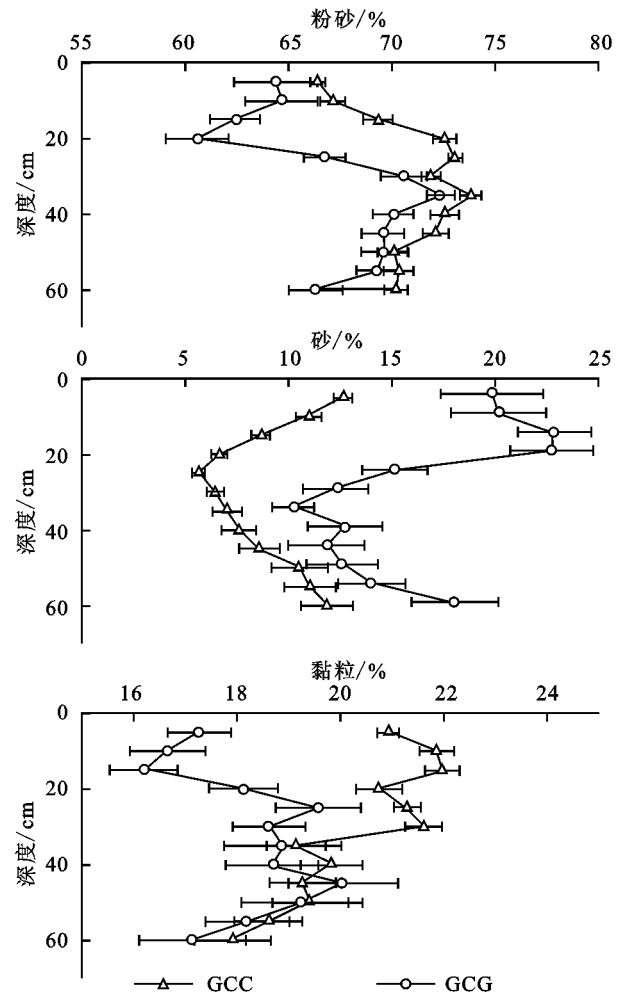


图 2 草地和耕地剖面粒径变化

综上,不难看出 GCC 和 GCG 之间沿剖面深度土壤粒度组分的差异性。除了粒度组成上有明显差异外,以 30 cm 为界砂、粉砂、黏粒含量在界上和界下的变化也是一个重要的差异性,一方面整个环湖地区中该区所受风速最大,加之 GCG 是长期(1987—

2010 年)耕作用地,所以在每年人为翻耕的时候,大风不断吹蚀土壤细颗粒组分,土壤细颗粒组分难以固结在地表而被吹蚀,另一方面由于耕种期要进行漫灌,漫灌过程中,淋溶作用将土壤细颗粒组分淋溶到 30 cm 以下;而 GCC 一方面是长期(1987—2010 年)未变草地,未受过人为扰动(唯一受到的扰动是因为牛羊的践踏),翻耕影响几乎不存在,所以受到的风蚀影响较耕地小,可以将土壤细颗粒组分通过土壤发育过程固结下来,另一方面加之草地表面长期有植被覆盖以及牛羊等动物的粪便,前者可以将大风中所携带的细颗粒组分沉积下来,而后者则增加了土壤的有机成熟过程,催化了土壤生物化学进程。总之,研究区土壤粒度组成受到人为活动(翻耕、灌溉)、土壤成土母质、地表的植被、区域局部气候,尤其是风力吹蚀的影响,进而造成 GCC 和 GCG 土壤组分上的差异性特征。

3.3 草地、耕地土壤剖面粒度参数和频率曲线差异性分析

3.3.1 草地、耕地土壤剖面粒度参数差异性分析 为了更进一步说明草地和耕地土壤粒度组分的差异性,分别对粒度参数(平均粒径、分选性、偏度、峰度)和粒度频率曲线进行对比分析(表 2)。可以看出,GCC 平均粒径为 6.17Φ~6.64Φ,平均值为 6.41Φ,而 GCG 平均粒径为 5.51Φ~6.27Φ,平均值为 5.96Φ,两者之间相差 0.45Φ,进一步说明 GCC 土壤粒径在 4~63 μm 范围内的比重大于 GCG;GCC 分选性介于 1.72~2.1,平均值为 1.85,GCG 分选性介于 1.84~2.39,平均值为 2.06,两者相比,GCC 分选性中等偏好,GCG 分选性差,说明 GCC 土壤颗粒细组分较稳定;GCC 偏度值为-0.07~0.08,平均值为 0.01,GCG 偏度值为 0.05~0.11,平均值为 0.08,说明 GCC 粒径曲线为近对称分布,而 GCG 由于砂级组分较多,粒径曲线更接近正偏;峰度值 GCC 和 GCG 都介于 0.94~1.07,平均值都为 1,峰型中等偏宽,进一步说明 GCC 和 GCG 不同来源的物质混合程度差不多,只不过后期受到不同人类活动的影响而发生变化,这也进一步说明研究区 GCC 和 GCG 前期土壤母质的同源性。综上,通过对 GCC 和 GCG 土壤粒度参数特征的分析可以看出:GCC 平均粒径较小,分选更好,粒径曲线更为近对称分布,峰度中等,而 GCG 则平均粒径偏大,分选较差,粒度曲线偏正偏。

各粒度参数沿剖面的变化见图 3,其中 GCC 平均粒径在整个剖面上都大于 GCG,以 30 cm 为界,界上平均粒径明显大于 GCG,界下二者平均粒径变化不大,能进一步证明界上部分 GCC 粒径变化较稳定且土壤颗粒较细;GCC 整个剖面的分选性也小于

GCG,基本上也以 30 cm 为界,界上变化较大,界下变化较小,GCG 整个剖面上分选性变幅较大,说明分选性差,粒度组分混杂;GCC 偏度整个剖面也小于 GCG,前者自表层向下偏度递减,后者自表层向下幅度变化范围大,说明 GCC 的粒度频率曲线对称性好;GCC 和 GCG 峰度以 30 cm 为界,界上 GCC 峰度较大,界下 GCC 峰度较小,两条曲线对应程度好,说明了 GCC 和 GCG 前期土壤母质的同源性,而后期 GCG 由于人为活动而显示不一致。综上,由粒度参数的分析可知,草地和耕地 30 cm 以上部分粒度参数的不一致,最主要的原因可能是草地受人为活动扰动小,而耕地受人为活动扰动大而造成的。

表 2 草地和耕地粒度参数变化

采样点		平均	分选性	偏度	峰度
		粒径(Φ)	(σ _i)	(S _K)	(K _G)
GCC	最大值	6.64	2.1	0.08	1.07
	最小值	6.17	1.72	-0.07	0.94
	均值	6.41	1.85	0.01	1
GCG	最大值	6.27	2.39	0.11	1.07
	最小值	5.51	1.84	0.05	0.94
	均值	5.96	2.06	0.08	1

3.3.2 草地、耕地土壤剖面粒度频率曲线差异性分析 上文对 GCC 和 GCG 沿剖面粒度特征进行分析后发现,GCC 与 GCG 粒度组分自地表开始至 30 cm 左右发生了变化,GCG 最为突出以 30 cm 为界,上界土壤粒度组分波动非常明显,而 GCC 虽有变化,其变化不太明显,说明 GCG 空间异质性很大,但和变化较小的 GCC 相比较两者粒度频率曲线可能还是存在着一些共性,所以以 30 cm 为界,上界定义为干扰层,下界定义为未干扰层,选取代表性的粒度频率曲线(图 4)。

从图 4A 中可以看出,GCC 扰动层内频率曲线呈双峰,峰态基本相似,主峰介于 10~100 μm,属于中粉砂粒级,次主峰介于 1~10 μm,属细黏粒级,是土壤肥力发育成熟的体现;GCG 扰动层内频率曲线呈多峰态,主峰介于 10~100 μm,次主峰介于 100~200 μm,说明在形成过程中有相当一部分近源粗粒物质的介入,因为只有小于 75 μm 的粉尘常以悬浮状态存在^[18],大于 75 μm 的粉尘很难在空中长时间悬移,只能近距离越移;第三主峰介于 2~10 μm,属细黏粒级,但体积百分比小,这可能是由于人为漫灌,土壤细颗粒受到淋溶作用淋移到下层所致。从图 4B 中可以看出,GCC 和 GCG 频率曲线形态基本相似,近乎正态分布,都只有一个主峰,介于 4~10 μm,GCC 的主峰稍高于 GCG,呈现出较均质稳定的沉积环境,沉积物很纯,以黏粒组分为主。

综上通过对比 GCC 和 GCG 扰动层和未扰动层粒度频率曲线分析后发现,扰动层和未扰动层粒度频率曲线形态完全不一样,扰动层 GCG 由于受到人类活动(翻耕、漫灌等)和自然环境(大风吹蚀、化学生物反应、近源粗物质的加入)的影响而丢失了许多土壤细颗粒,GCC 由于受扰动较少、地表植被的覆盖而较

GCG 表现出较均一的土壤沉积环境;未扰动层 GCG 与 GCC 受到的外界扰动较小(30 cm 以下基本未受到扰动)而表现出较均一稳定的地下土壤环境,所以两者都具有相同的粒度频率曲线(图 4B),另外两者的粒度频率曲线趋向于风成黄土特征^[19],说明研究区早期土壤成土母质为风成黄土。

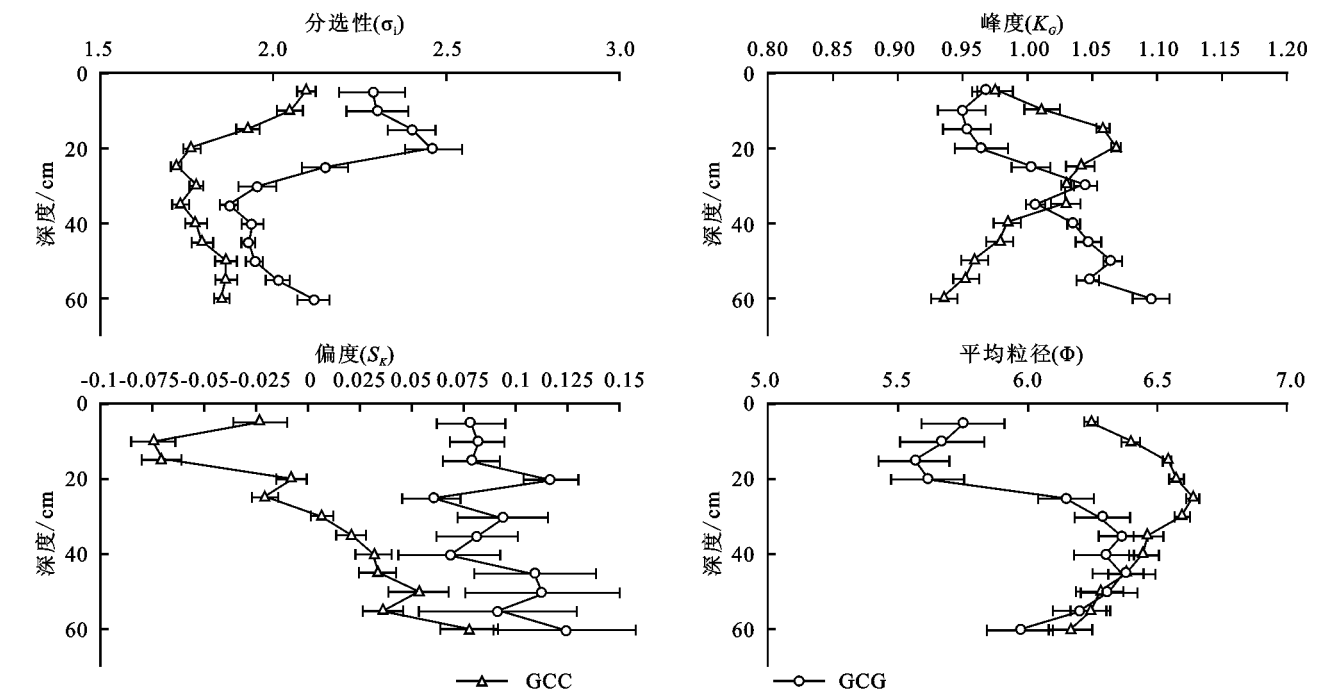


图3 草地和耕地剖面粒度参数变化

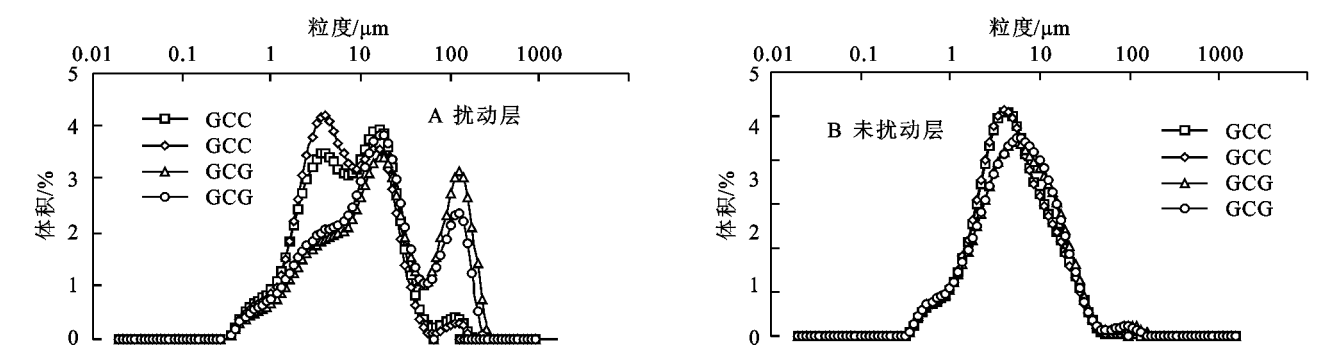


图4 草地和耕地粒度频率曲线

3.4 草地、耕地土壤剖面各粒级和各参数差异性分析

通过上文 GCC 和 GCG 土壤剖面各粒级和各参数图中可以明显看出由于受到人类活动干扰所产生的差异,但是仅仅做平均值的标准偏差有时候只能看出两者之间的含量不同,有时候会反映出一些虚假信息,但是到底是否存在显著差异,还需更进一步检验。卡方检验是一种常用的数理统计方法,在测量学、天气预报、农业生产中广泛应用^[20-21],基于此对两类土地砂、粉砂、黏粒、平均粒径、偏度、峰度及标准离差沿剖面深度自 0—60 cm 每 5 cm 进行卡方检验, $p < 0.005$,说明具有显著性水平,即有显著性差异。

cm 剖面范围内每 5 cm 卡方检验见表 3,砂、粉砂、黏粒 p 值 (Sig. 值) 等于 0,远小于 p 值 (0.005),说明 GCC 和 GCG 砂、粉砂、黏粒组分自表层 (0 cm) 至底层 (60 cm) 都存在显著性差异;GCC 和 GCG 两类土地利用方式其粒度参数 0—60 cm 剖面范围内每 5 cm 卡方检验见表 4,平均粒径、标准离差 p 值 (Sig. 值) 等于 0,远小于 p 值 (0.005),说明 GCC 和 GCG 平均粒径、标准离差自表层 (0 cm) 至底层 (60 cm) 都存在显著性差异,峰度 p 值 (Sig. 值) 等于 0.304,说明峰度值两者没有显著性差异,造成这种结果的原因是峰度含量(图 3)以 30 cm 为界,界上 GCC 峰度明显大于 GCG,而界下 GCC 峰度明显小于 GCG,所以

GCC 和 GCG 两类土地利用方式其粒级 0—60

其差异性不显著,偏度数据中由于 GCC 内有负偏值(出现负值),所以无法进行卡方检验,但是从图 3 中可以看出,两类土地在 0—60 cm 范围内还是有明显差异。综上,两类土地粒级及粒度参数自剖面 0—60 cm 存在显著差异。

表 3 草地和耕地粒级卡方检验

项目	测试项	砂	粉砂	黏粒
GCC,GCG	Pearson X^2 值	3223	18128	5060
	自由度(df)	253	253	253
	p 值	0.000	0.000	0.000
深度	自 0—60 cm,每 5 cm 进行卡方检验			

表 4 草地和耕地粒度参数卡方检验

项目	测试项	平均粒径	偏度	峰度	标准离差
GCC,GCG	Pearson X^2 值	1628	无效值	264	528
	自由度(df)	253	无效值	253	253
	p 值	0.000	无效值	0.304	0.000
深度	自 0—60 cm,每 5 cm 进行卡方检验				

4 结论

(1) GCC 和 GCG 粒度组成上都属于砂黏壤级,其中 GCC 粉砂和黏粒大于 GCG,而砂含量小于 GCG;经粒度参数分析后发现,GCC 平均粒径较小,分选更好,粒径曲线更为近对称分布,峰度中等,而 GCG 平均粒径偏大,分选较差,粒度曲线偏正偏;

(2) GCC 和 GCG 在 30 cm 左右为界存在差异,30 cm 以上两种土地利用方式差异性大,30 cm 以下差异性小,说明草地作为“自然土地”在人类不干扰或活动强度较小的情况下土壤演化将趋于同质性,耕地作为“扰动土地”在人类活动强度大的情况下,粒径粗化,所以在受人类活动影响大和荒漠化程度逐渐严重的环湖区,耕地会加剧土地荒漠化,草地为更加理想和合理的土地利用倾向。

参考文献:

[1] Xu J, Grumbine R E. Building ecosystem resilience for climate change adaptation in the Asian highlands[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change,2014, 5(6):709-718.

[2] 陈克龙,李双成,周巧富,等.近 25 年来青海湖流域景观结构动态变化及其对生态系统服务功能的影响[J].资源科学,2008,30(2):274-280.

[3] Wischnewski J, Herzschuh U, Rühland K M, et al. Recent ecological responses to climate variability and human impacts in the Nianbaoyeze Mountains (eastern Tibetan Plateau) inferred from pollen, diatom and tree-ring data[J]. Journal of Paleolimnology,2014,51(2):287-302.

[4] Lehmkuhl F, Schulte P, Zhao H, et al. Timing and spatial distribution of loess and loess-like sediments in the mountain areas of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Catena,2014,117(497):23-33.

[5] Diekmann B, Jin H, Lehmkuhl F, et al. Lake-System Response to Late Quaternary Environmental Dynamics on the Northeastern Tibetan Plateau[C]// AGU Fall Meeting Abstracts,2008.

[6] 李霞,李法云,荣湘民,等.城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析[J].水土保持学报,2013,27(4):93-97.

[7] 毛思慧,谢应忠,许冬梅.宁夏盐池县草地沙化对植被与土壤特征的影响[J].水土保持通报,2014,34(1):34-39.

[8] 刘朔,陈天文,蔡凡隆,等.川西北高寒草地沙化进程中土壤物理性质的变化:以理塘县为例[J].四川林业科技,2013,34(2):43-47.

[9] 党晓宏,虞毅,高永,等. PLA 沙障对沙丘土壤粒径的影响分析[J].水土保持研究,2014,21(3):16-19.

[10] 新疆维吾尔自治区农业厅,新疆维吾尔自治区土壤普查办公室.新疆土壤[M].北京:科学出版社,1996.

[11] 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.

[12] 魏永林,许存平,张盛魁,等.气候变化对青海海北地区天然草地生物量及生态环境的响应[J].草业科学,2008,25(3):12-17.

[13] 谢其锋,周立发,刘羽.青海刚察大寺地区花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质通报,2014,33(9):1379-1390.

[14] 张慧超,沙占江,张婷婷,等.20 年来环青海湖区沙漠化土地的空间变化及其驱动力分析[J].干旱区资源与环境,2011,25(3):59-64.

[15] 殷志强,秦小光,吴金水,等.中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J].沉积学报,2009,27(2):343-351.

[16] 张正偲,董治宝.土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):86-89.

[17] 赵澄林,朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,1982.

[18] 秦小光,吴金水,蔡炳贵,等.全新世时期北京—张家口地区与黄土高原地区风成系统的差异[J].第四纪研究,2004,24(4):430-436.

[19] 袁杰,曹广超,鄂崇毅,等.环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J].水土保持研究,2015,22(3):150-154.

[20] 卫超.卡方检验在华北强震前的应用[J].山西地震,2004(4):23-25.

[21] 王宗皓,李麦村.天气预报中的概率统计方法[M].北京:科学出版社,1974.