

# 基于光释光测年法的三江源地区高山草甸土形成年代与成因研究

先巴吉<sup>1,2</sup>, 鄂崇毅<sup>1,2,3</sup>, 孙满平<sup>1,2</sup>, 张晶<sup>1,2</sup>, 张帅旗<sup>1,2</sup>, 谢丽倩<sup>1,2</sup>

(1.青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室,

青海 西宁 810001; 2.青海师范大学 地理科学学院 青海省自然地理与环境过程重点实验室,

青海 西宁 810008; 3.青海省人民政府—北京师范大学, 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

**摘要:** [目的] 分析三江源区高山草甸土壤的年代及发生发育过程, 为维系该区土壤安全和生态安全提供指导。[方法] 采用粗颗粒石英与钾长石光释光(OSL)测年法, 对三江源区4个高山草甸土剖面夏琼(X<sub>Q</sub>)、歇武(X<sub>W</sub>)、桐勒栋(T<sub>LD</sub>)、斗地村(D<sub>DC</sub>)土壤的形成发育时间进行研究, 结合土壤粒度、元素地球化学特征分析该区土壤形成过程。[结果] 三江源区高山草甸土在末次冰消期至早全新世(13—8 ka)和晚全新世(3—0 ka)均有发育; 4个土壤剖面分别在坡积母质和风积母质上发育而成, 但其不同土壤发生层的元素地球化学特征与该区典型风成黄土一致。[结论] 高山草甸土的发育集中在全新世期间, 土壤的母质以坡积物和风积物的混合母质为主, 风尘输入对于三江源地区的土壤形成意义重大, 也是该区坡积物的原始物源, 全新世气候相对于早期的风尘释放对草甸土的形成意义重大。

**关键词:** 高山草甸土; 光释光测年法; 全新世; 三江源地区; 元素地球化学

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0158-08

中图分类号: S153.6, P95

**文献参数:** 先巴吉, 鄂崇毅, 孙满平, 等. 基于光释光测年法的三江源地区高山草甸土形成年代与成因研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 158-165. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.022; Xianbaji, E Chongyi, Sun Manping, et al. Formation age and causes of alpine meadow soil in Three River headwater region based on optically stimulated luminescence dating [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 158-165.

## Formation Age and Causes of Alpine Meadow Soil in Three River Headwater Region Based on Optically Stimulated Luminescence Dating

Xianbaji<sup>1,2</sup>, E Chongyi<sup>1,2,3</sup>, Sun Manping<sup>1,2</sup>, Zhang Jing<sup>1,2</sup>, Zhang Shuaiqi<sup>1,2</sup>, Xie Liqian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological

Conservation, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810001, China;

2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical

Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining, Qinghai 810008, China)

**Abstract:** [Objective] The age, occurrence, and development of alpine meadow soil in the Three River headwater region were analyzed to provide guidance for maintaining soil and ecological security in the region. [Methods] The formation and development time of the soil profiles from Xiaqiong, Xiewu, Tongledong, and Doudicun in the Three River headwater region were determined using the optically stimulated luminescence (OSL) dating method of coarse-grained quartz and potassium feldspar (K-feldspar). [Results] The development time of alpine meadow soil in this area was Early Holocene (13—8 ka) and Late Holocene (3—0 ka). The four soil profiles were developed on slope and eolian parent material, respectively. The elemental geochemical characteristics of different soil layers were consistent with the typical aeolian loess in this area. [Conclusion] The development of alpine meadow soil was concentrated in the Holocene period. The parent material of soil was mainly the mixed parent material of slope deposits and aeolian deposits. The input of aeolian dust is of

收稿日期: 2021-07-23

修回日期: 2021-10-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“青海湖流域土壤年代学及其气候背景分析”(41761042); 青海省科技厅自然科学基金“青海共和沙地末次盛冰期以来特征时段空间格局重建”(2021-ZJ-918)

第一作者: 先巴吉(1993—), 女(藏族), 青海省贵南县人, 硕士研究生, 研究方向为全球变化与高原环境。Email: xianbaji2021@163.com。

通讯作者: 鄂崇毅(1979—), 男(土族), 青海省民和县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事第四纪地质与全球变化研究。Email: echongyi@163.com。

great significance to soil formation in the Three River headwater region, and is also the original material source of slope deposits in this area. The release of aeolian dust during the relatively arid period of Holocene is of great significance to the formation of meadow soil.

**Keywords:** alpine meadow soil; optically stimulated luminescence dating; Holocene; Three River headwater region; elemental geochemistry

青藏高原高寒草甸分布区域广阔,覆盖面积占 50.9%,其主体生态系统为高寒草地生态系统<sup>[1-2]</sup>,是维系周边地区和国家生态安全的重要屏障<sup>[3-4]</sup>。草甸土是高寒草地生态系统的重要组成部分和维持生态系统功能的物质基础。青藏高原草甸土的生物地球化学循环、水文过程等是当前研究的热点<sup>[5-6]</sup>,但对于草甸土的形成演变过程研究相对薄弱。三江源地区草甸土形成发育时间是理解高山草甸土成土过程的重要基础,基于年代结果结合区域古气候环境演变背景是理解土壤发生发育的重要途径。

传统土壤测年主要利用放射性碳同位素<sup>14</sup>C 进行测定<sup>[7-8]</sup>,但由于土壤是一个开放系统,伴随新鲜碳不断输入土壤中,致使测定的土壤年代偏年轻<sup>[9-12]</sup>。近年来,光释光(optically stimulated luminescence, OSL)测年法逐步引入土壤年代学研究,通过对构成土壤骨架的石英、长石等矿物颗粒进行直接测年<sup>[11-13]</sup>,晒退性较好的风尘颗粒是 OSL 测年的理想材料,以往多在高原第四纪沉积物测年中应用<sup>[14-18]</sup>。青藏高原安多地区、青海湖流域、黄河上游地区土壤的年代分析中采用释光测年,获得了较为可靠的年代,草甸土 OSL 年代多集中在晚全新世(约 4 ka)。同时基于土壤粒度特征的分析表明,风尘沉积对青藏高原高山草甸土发育具有重要贡献<sup>[11-13,19-20]</sup>,但更加直接的元素地球化学证据相对缺乏<sup>[12]</sup>。青藏高原运积母质多样,既有风积物,还有大量的坡积物、冲积物、冰积物等多营力作用下形成的各类母质,特别是三江源地区地形起伏变化大<sup>[21]</sup>,降水较高,流水作用较强,坡积物、冲积物分布广泛,草甸土广泛分布于此类沉积物之上,但其发育年代与发育模式尚不清晰。准确获取该区草甸土的年代,分析其发育背景,对完善青藏高原高山草甸土的发生学机制具有重要理论意义,对维系该区土壤安全和生态安全具有现实指导意义。

本文采用 OSL 测年法对三江源区夏琼(XQ),歇武(XW),桐勒栋(TLD)和斗地村(DDC)4 个高山草甸土剖面的 10 个释光样品进行测年,获得该区高山草甸土形成发育的时间。基于土壤粒度<sup>[22]</sup>和元素地球化学分析成土母质来源<sup>[23]</sup>探讨其成土模式。

## 1 取样地点及样品的采取

研究区位于玉树藏族自治州称多县和果洛藏族

自治州玛多县,属于三江源区,地理位置为 89°24′—102°23′E,31°39′—36°16′N。夏琼(X<sub>Q</sub>)、歇武(X<sub>W</sub>)和桐勒栋(T<sub>LD</sub>)剖面位于长江源区,斗地村(D<sub>DC</sub>)剖面位于黄河源区。剖面分布位置见图 1。采集样品时间为 2018 年 8 月。

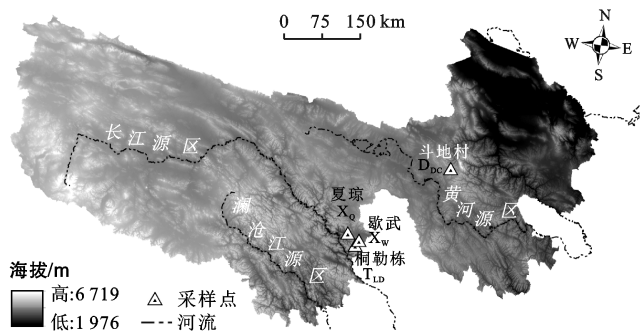


图 1 三江源区采样点分布

根据土壤发生学理论对采集的土壤剖面进行土壤发生层的划分,主要分为草毡层、腐殖质层、过渡层和母质层(图 2)。夏琼(XQ)剖面共采取了 5 个 OSL 样,斗地村(DDC)剖面采取 3 个 OSL 样,歇武(XW)剖面在坡积物母质层取 1 个 OSL 样。桐勒栋(TLD)剖面在草毡层采 1 个 OSL 样。选取的 4 个剖面植被覆盖度约为 80%~95%,以高山嵩草和矮生嵩草为优势种,杂草为珠芽蓼、针茅、马先蒿、金露梅等。4 个剖面土壤理化分析样品按 5 cm 间隔采集,详细信息见表 1。



图 2 夏琼(XQ)剖面土壤发生层划分

表 1 三江源区各采样点基本信息

样品号	经纬度	海拔/m	深度/cm	坡度/(°)	土壤散样个数	地貌类型	土壤类型
XQ	33°22'N,97°11'E	4 156	100	-9	18	陡坡	高山草甸土
XW	33°10'N,97°23'E	3 957	70	-5	10	缓坡	高山草甸土
TLD	33°16'N,97°27'E	4 244	45	-4	9	山麓缓坡	高山草甸土
DDC	34°42'N,99°5'E	4 487	75	-7	14	缓坡	高山草甸土

## 2 试验方法

### 2.1 土壤理化分析

粒度试验在青海省自然地理与环境过程重点实验室完成,土壤粒度前处理采用鹿化煜等<sup>[24]</sup>的方法,测量所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,其测量范围为 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ 。土壤元素含量的测定在西安地质调查中心完成,采用美国热电公司 iCAP RQ 型电感耦合等离子体质谱仪测定;土壤氧化物含量的测定采用荷兰帕纳科 Axios 型波长色散 X 荧光光谱仪进行分析。

### 2.2 光释光年代测定

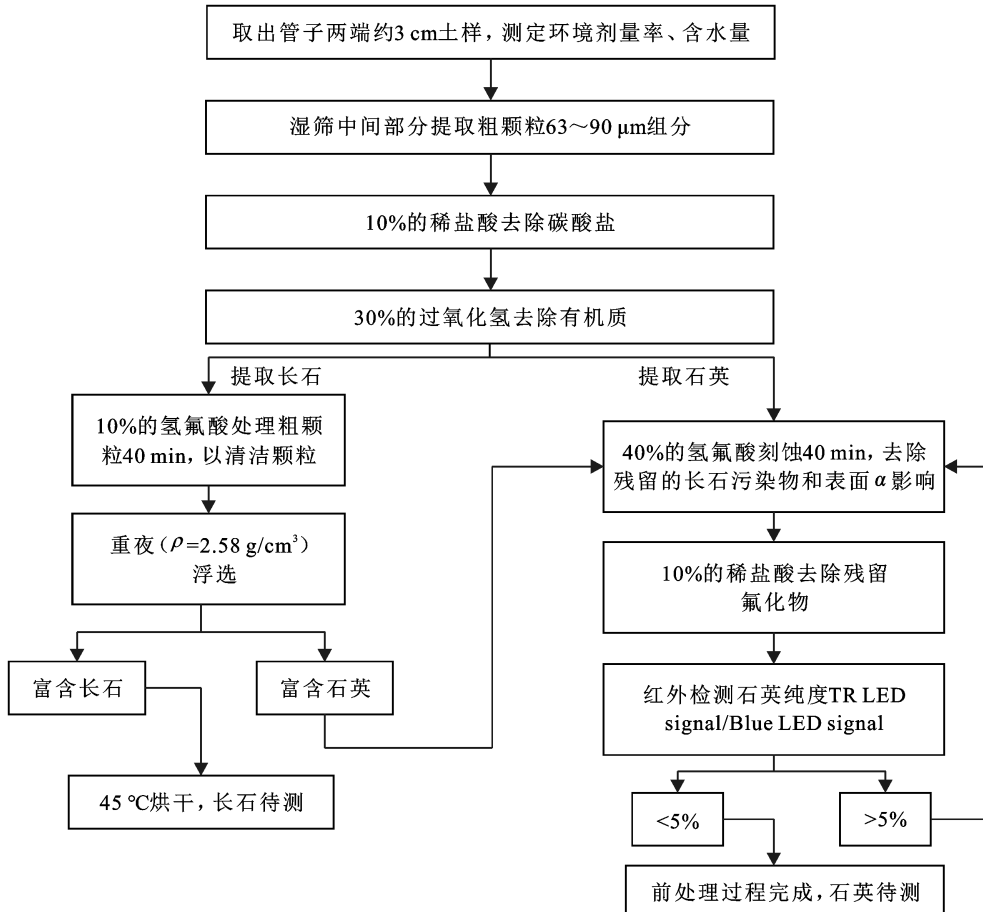
光释光样品预处理及测试工作在青海省自然地理与环境过程重点实验室进行。光释光年代学方法测定的是土壤中石英、长石等矿物最后一次曝光后埋

藏的时间,矿物自埋藏以来所接受并累积的总辐射能和环境剂量铀、钍、钾含量计算得到年代结果。其优势为对矿物进行直接测年,测年年限范围较大。计算公式如下:

$$\text{Age(ka)} = \text{Dose}/\text{Dose Rate}$$

式中:Dose 表示等效剂量(Gy); Dose Rate 表示环境剂量率(Gy/ka)。

如图 3 所示,等效剂量(Dose)的测量在 Risø TL/OSL-AD-20-C/D 型热/光释光仪上进行测量,辐照源为人工  $\beta$  源<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y,每秒辐照剂量率为(0.108 $\pm$ 0.002)/Gy。环境剂量率(dose rate)的计算通过电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)获取铀、钍、钾含量<sup>[25]</sup>。等效剂量的测定采用粗颗粒(63~90  $\mu\text{m}$ )石英,石英单片再生剂量法<sup>[26]</sup>(single-aliquot-regenerative-dose protocol, SAR)。

图 3 粗颗粒(63~90  $\mu\text{m}$ )石英、长石提取流程

另外对 XQ 和 DDC 剖面粗颗粒( $63\sim 90\ \mu\text{m}$ )钾长石采用红外后红外激发 pIRIR170 测年,采用流程与之前的阿尼玛卿黄土测年程序一致<sup>[27]</sup>。

所有样品的石英 OSL 信号均表现为快组分特征,自然信号在前 2 s 内快速晒褪到背景值,预热温度坪试验发现在  $180\sim 260\ ^\circ\text{C}$  时样品的等效剂量值基本

一致,选用  $240\ ^\circ\text{C}$  作为预热温度,剂量恢复试验表明:给定剂量和测定的剂量值比值在  $0.9\sim 1.1$  之间(图 4),说明  $D_e$  值测量结果可靠。考虑坡积物经历流水作用,有可能导致晒褪不充分,对 XQ 和 DDC 剖面的样品提取了粗颗粒( $63\sim 90\ \mu\text{m}$ )钾长石进行钾长石 pIRIR<sub>170</sub> 进行验证。

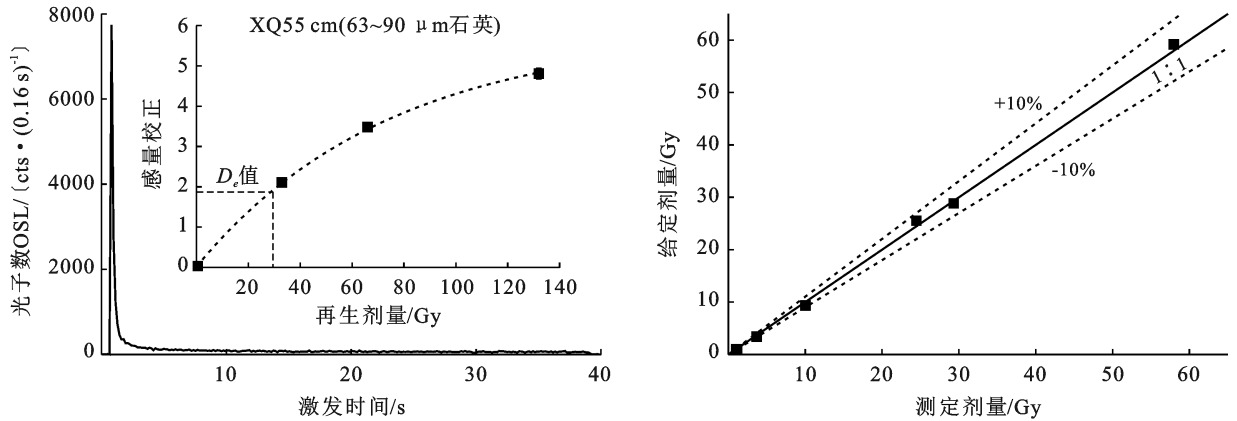


图 4 X<sub>Q</sub> 剖面石英衰退曲线、生长曲线,剂量恢复试验

## 3 结果与讨论

### 3.1 样品粒度分析

三江源地区土壤粒径分布曲线结果如图 5 所示。4 个剖面土壤粒度特征曲线基本相似,主要集中在  $40\ \mu\text{m}$ ,在  $500\ \mu\text{m}$  和  $8\ \mu\text{m}$  各有一小峰,表明物质来源复杂。将阿尼玛卿附近的风成黄土河北(HB)剖面与三江源区黄土进行对比。前人研究 HB 剖面黄土粒度变化<sup>[27-28]</sup>,反映其对气候冷暖事件的响应,揭示青藏高原黄土记录对气候快速变冷的响应比暖事件的响应更加敏感。HB 剖面黄土粒度频率曲线呈不对称双峰模式,近似正态分布,峰值集中在  $40\sim 60\ \mu\text{m}$  之间,平均粒径在  $34\sim 46\ \mu\text{m}$  之间。

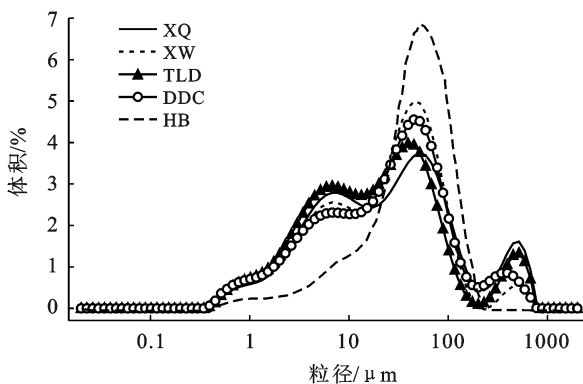


图 5 XQ, TLD, DDC, XW, HB 剖面土壤粒径分布特征

由图 5 可知,HB 剖面与 4 个草甸土剖面差异较大。说明由于上述 4 个土壤剖面主要分布于该区坡积地貌,一般会经历片流等流水的侵蚀、搬运和堆积作用。XW 剖面平均粒径介于  $17\sim 71\ \mu\text{m}$ ,XQ 和 TLD 剖面  $500\ \mu\text{m}$  峰值相较 XW 和 DDC 剖面更加明显,说明 XQ 和 TLD 剖面可能经历的流水改造作用更加强烈,水动力更强,通常只有粒径相对较粗的颗粒才容易保留下来,坡地水动力与坡度关系最为密切,XQ 和 TLD 剖面的坡度较陡恰好解释了这一现象。

### 3.2 元素地球化学与物源分析

用于风尘堆积物源示踪<sup>[29]</sup>的常量元素地球化学指标为  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  值等,微量元素 Zr 和 Nb, Ti 的地球化学特征表现为惰性,迁移弱,也常用于风尘堆积的源区示踪。通过系统对比分析剖面 XQ, DDC 高山草甸土全样和小于  $70\ \mu\text{m}$  的高山草甸土,HB 黄土、玉树(YS)红土剖面(采自治多县东南部军永唐,地势平坦,剖面深度  $70\ \text{cm}$ ,土壤松散,颜色偏红, $0\sim 40\ \text{cm}$  草根密集)。样品的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , Zr/Nb 等物源指标(图 6)显示,无论 XQ 和 DDC 草甸土全样样品还是  $< 70\ \mu\text{m}$  样品的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Zr/Nb,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Zr/Nb,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Zr/Ti 比值与 HB 风成黄土相关元素比值在同一集合内。其中  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值相对集中,Zr/Ti 和 Zr/Nb 比值也比较集中,与 HB 风成黄土元素比值非常接近。 $< 70\ \mu\text{m}$  高山草甸土组分物源相关元素比值与 HB

黄土更加接近,表明风力搬运的 $<70\ \mu\text{m}$ 组分与 HB 剖面黄土物源几乎一致,也进一步说明风尘输入组分对该区土壤的形成具有重要贡献,而该区土壤剖面下覆的并经常出露的红土元素比值分布范围广、分散,与 XQ, DDC, HB 剖面均存在较大的差异,说明下覆的第三系红黏土对该区高山草甸土的形成贡献微弱。

结合坡积母质粒度变化特征(图 5)和元素地球化学分析特征(图 6),坡积母质物源应为坡面上部侵蚀区风尘物质遭受片流侵蚀后形成坡积物,前人在祁连山也发现了类似的土壤发育过程<sup>[20]</sup>。总体上,与安多地区、青海湖流域和黄河源区的土壤发育类似<sup>[11,22,30]</sup>。风尘输入对青藏高原土壤的形成发育具有重要贡献。

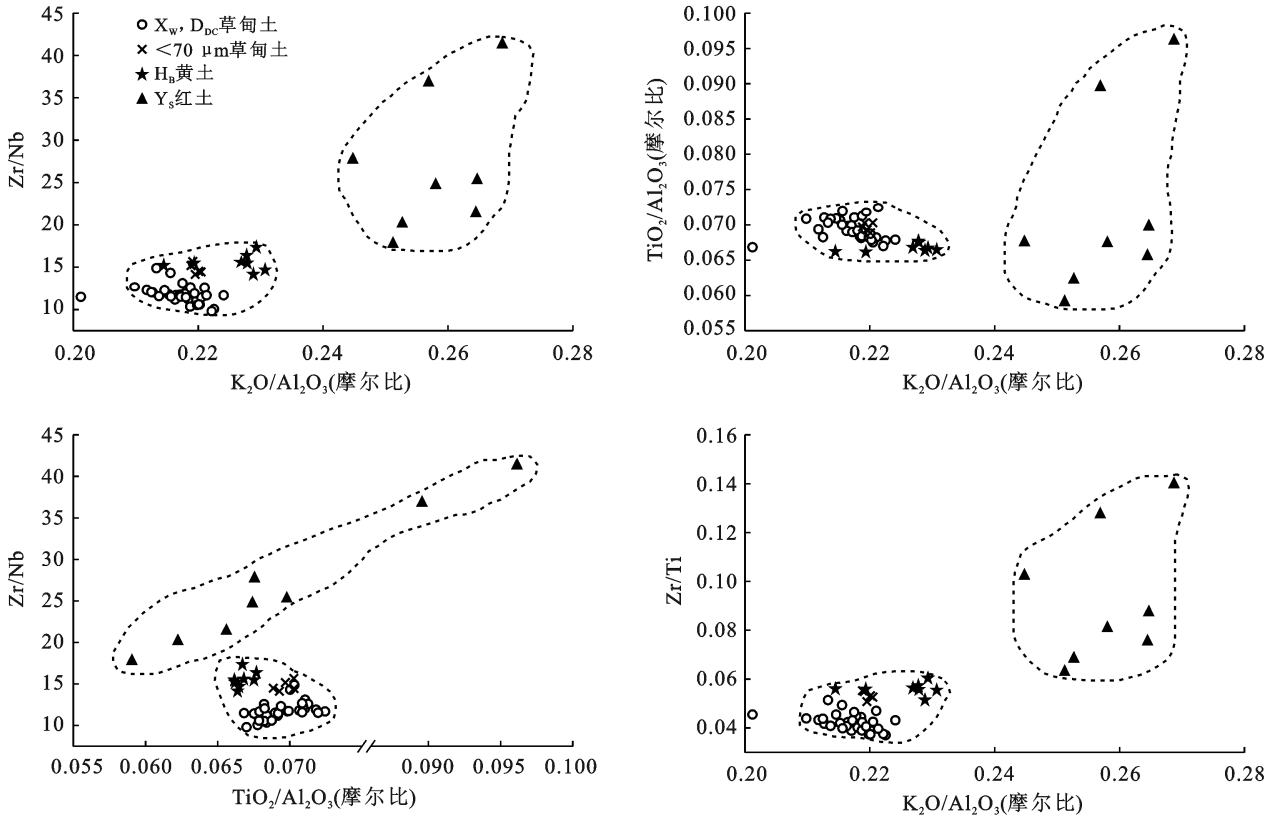


图 6  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Zr}/\text{Nb}$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Zr}/\text{Nb}$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Zr}/\text{Ti}$  物源关系图解

### 3.3 草甸土石英和长石年代的可靠性

各剖面石英样品的 OSL 年代与地层序列一致,表现为上新下老,未出现地层倒置现象(表 2—3)。

DDC 土壤石英年代结果与长石年代结果基本一致,说明 DDC 剖面晒褪良好,年代结果可靠,与其土壤层的沉积特点也相符合(图 7)。

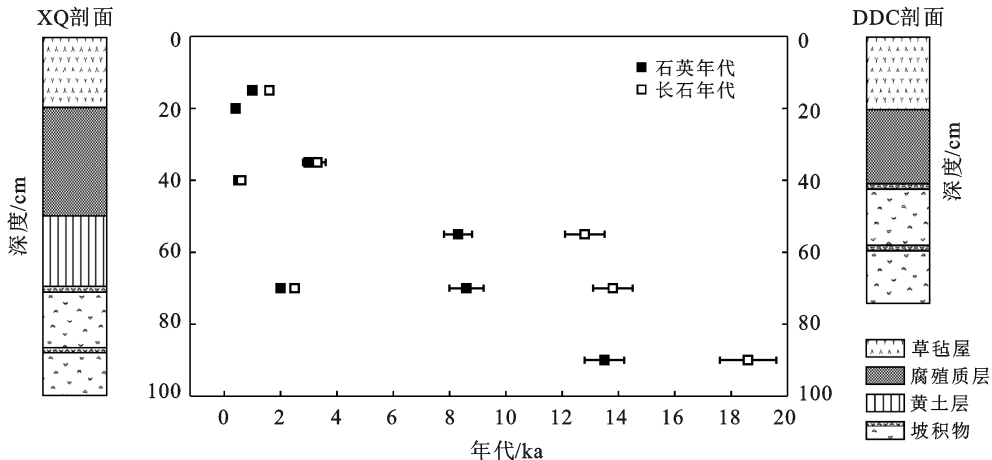


图 7 夏琼(XQ)、斗地村(DDC)剖面地层与年代

XQ 剖面上部 1 号和 2 号样品石英年代结果与长石基本一致,而下部水平层理较为明显的坡积物长石年代结果明显偏老。根据在该区河北(HB)剖面黄土所做的晒褪试验表明:在模拟太阳光下晒褪 30 s 就可以将石英中累积信号晒褪至 5% 水平,而长石的 pIRIR<sub>170</sub> 信号则只能到 65%<sup>[27]</sup>。因此,石英和长石年代一致通常说明样品经历了充分的晒褪,而不一致,特别是长石比石英偏老说明样品曝光不充分,很可能

经历了短时搬运后再堆积。石英长石年代对比结果表明 XQ 下部土壤层应为片流沉积,也与野外观测到的层理特征相符。鉴于石英样品能在非常短的时间内晒褪,因而石英结果更加可靠或更接近土壤发育的实际年代。而下部片流作用为主的坡积物年代由于晒褪不充分,其实际年代应比测得的 OSL 年代结果年轻,而风尘加积地层的年代结果相对更加可靠。因此,本研究中采用石英 OSL 年代为土壤形成发育年代<sup>[12]</sup>。

表 2 高山草甸土剖面石英年代

样品号	深度/ cm	U/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Th/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	K/ %	含水量/ %	年剂量率/ (Gy · ka <sup>-1</sup> )	等效剂量/ Gy	测片/个	年代/ ka
XQ <sub>1</sub>	15	2.2±0.3	12.8±0.7	1.9±0.0	10±5	3.5±0.1	3.1±0.1	12	1.0±0.1
XQ <sub>2</sub>	35	2.2±0.3	13.5±0.8	2.2±0.3	10±5	3.7±0.3	9.3±0.3	12	3.0±0.2
XQ <sub>3</sub>	55	2.1±0.3	11.9±0.7	1.7±0.0	10±5	3.1±0.1	25.6±1.1	12	8.3±0.5
XQ <sub>4</sub>	70	2.4±0.3	12.5±0.7	1.9±0.0	10±5	3.3±0.1	28.8±1.5	12	8.6±0.6
XQ <sub>5</sub>	90	3.1±0.4	15.2±0.8	2.7±0.0	10±5	4.4±0.2	59.2±1.4	12	13.5±0.7
DDC <sub>1</sub>	20	2.2±0.3	10.9±0.7	1.6±0.0	10±5	3.0±0.1	1.1±0.1	12	0.4±0.0
DDC <sub>2</sub>	40	2.3±0.3	11.9±0.7	1.8±0.0	10±5	3.3±0.1	1.5±0.1	12	0.5±0.0
DDC <sub>3</sub>	70	2.2±0.3	13.1±0.8	2.0±0.0	10±5	3.5±0.2	6.9±0.2	12	2.0±0.1
TLD	20	3.0±0.4	15.0±0.8	2.3±0.1	10±5	4.0±0.2	3.5±0.2	12	0.9±0.1
XW	40	3.0±0.4	11.0±0.7	1.5±0.0	10±5	3.0±0.1	1.7±0.2	12	0.6±0.1

表 3 高山草甸土剖面长石年代

样品号	深度/ cm	U/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Th/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	K/ %	含水量/ %	年剂量率/ (Gy · ka <sup>-1</sup> )	等效剂量/ Gy	测片/个	年代/ ka
XQ <sub>1</sub>	15	2.2±0.3	12.8±0.7	1.9±0.0	10±5	3.9±0.2	6.0±0.3	3	1.6±0.1
XQ <sub>2</sub>	35	2.2±0.3	13.5±0.8	2.2±0.3	10±5	4.1±0.3	14.3±0.4	3	3.3±0.3
XQ <sub>3</sub>	55	2.1±0.3	11.9±0.7	1.7±0.1	10±5	3.5±0.1	44.3±1.2	6	12.8±0.7
XQ <sub>4</sub>	70	2.4±0.3	12.5±0.7	1.9±0.1	10±5	3.8±0.2	51.5±0.8	6	13.8±0.7
XQ <sub>5</sub>	90	3.1±0.4	15.2±0.8	2.8±0.1	10±5	4.4±0.2	81.9±2.6	6	18.6±1.0
DDC <sub>2</sub>	40	2.3±0.3	11.9±0.7	1.8±0.1	10±5	3.7±0.2	2.5±0.2	9	0.6±0.1
DDC <sub>3</sub>	70	2.2±0.3	13.1±0.8	2.0±0.1	10±5	3.9±0.2	9.5±0.1	9	2.5±0.1

### 3.4 草甸土形成气候背景

土壤石英年代结果主要集中在晚全新世 3 ka 以来,剩余 3 个年代集中在早全新世,这与前人在青海湖流域的结果基本一致<sup>[11-12,30]</sup>,即现存的三江源草甸土主要是在全新世形成的,或在全新世堆积母质上发育的。此外,XQ 剖面年代从 35 cm 处 3.0±0.2 ka 跳跃至 55 cm 深度的 8.3±0.5 ka,具有明显的间断,类似间断在青藏高原普遍存在<sup>[11,31-32]</sup>。

该结果与前人对青藏高原黄土的年代结果一致,黄土主要是末次冰消期以来沉积的<sup>[33-34]</sup>,说明高原土壤的形成发育与气候变化密切相关。从长时间尺度来看全新世或末次间冰期气候整体暖湿,有利于土壤的发育。而在干冷的末次冰期,由于高原气候过于寒冷干燥,土壤发育微弱。即便是在全新世,多数土壤剖面淋溶淀积层几乎不发育,仅见有机质层和母质

层。XQ,DDC,XW,TLD 土壤剖面的上部草毡层年代大概在 1 ka 以来形成的,说明草毡层的形成上限为 1 ka,发育 20—40 cm 的草毡和腐殖质层所需时间应在 1 ka 之内。

从全新世内部来看,三江源土壤年代主要集中在晚全新世 3 ka 以来(图 7),青藏高原东北部在早全新世暖干,中全新世气候适宜,到晚全新世逐渐变冷变干<sup>[27,33-35]</sup>。该区草甸土的形成是在相对干冷的大背景下形成,与前人在青海湖的研究一致<sup>[11]</sup>。这主要是由于青藏高原地区气候寒冷,化学风化微弱,就地成壤作用微弱,土壤母质主要依赖于大量物理风化产生的运积母质,其中风力能够将风尘物质广泛地搬运和堆积至不同地貌位置,在有草原和草甸植被的情况下,风尘被捕获并成为土壤发育的母质。因此,晚全新世气候相对干冷、风沙活动相对较强,为土壤发育

提供了大量母质,也能够满足草甸草原植被的发育,在地形、物源、植被三者的共同作用下,三江源区土壤发育能够集中在晚全新世。此外早全新世也是重要的风尘释放期<sup>[36]</sup>,其土壤形成机制与晚全新世相似。因此,三江源区另外3个年代集中在早全新世,但由于坡地地貌为正地形,容易受到侵蚀,保存下来的早全新世土壤剖面相对较少。

## 4 结论

(1) 粒度试验结果显示,土壤粒度特征曲线主峰集中在40  $\mu\text{m}$ ,在500  $\mu\text{m}$ 和8  $\mu\text{m}$ 各有一小峰,XQ和TLD剖面主峰峰值体积含量相较XW和TLD低,三峰态更明显。三江源区母质发育较为复杂,呈现出混合母质的发育特征。

(2) 元素地球化学物源分析结果显示 $X_Q$ 和 $D_{DC}$ 高山草甸土的元素地球化学特征与该区典型的风成黄土剖面一致。因此,草甸土形成的物质来源是由全新世气候相对于旱时期的风尘释放提供的,由于地形高耸、坡度起伏较大,土壤的母质以坡积物和风积物的混合母质为主,风尘是该区坡积物的原始物源,风尘输入对于三江源的土壤形成具有重要贡献。

(3) 光释光年代测试结果得出草甸土在早全新世(13—8 ka)和晚全新世(3—0 ka)均有发育。

**致谢:**在此诚挚地感谢闫文亭和史运坤在野外采样中提供的帮助。

### [参 考 文 献]

- [1] 王建兵,张德罡,曹广民,等.青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征[J].草业学报,2013,22(2):1-10.
- [2] 任佐华,张于光,李迪强,等.三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量[J].生态学报,2011,31(11):3232-3238.
- [3] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J].地理学报,2016,71(1):3-20.
- [4] 刘璐璐,邵全琴,曹巍,等.基于生态服务价值的三江源生态工程成本效益分析[J].草地学报,2018,26(1):30-39.
- [5] 李元寿,王根绪,王军德,等.<sup>137</sup>Cs示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀[J].山地学报,2007,25(1):114-121.
- [6] 王根绪,程国栋,沈永平,等.土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响[J].科学通报,2002,47(23):1771-1777.
- [7] Chichagova O A, Cherkinsky A E. Problems in radiocarbon dating of soils[J]. Radiocarbon, 1993, 35(3): 351-362.
- [8] Perrin R M S, Willis E H, Hodge C A H. Dating of humus podzols by residual radiocarbon activity [J]. Nature, 1964, 202(4928): 165-166.
- [9] Wang Hong, Hackley K C, Panno S V, et al. Pyrolysis-combustion <sup>14</sup>C dating of soil organic matter [J]. Quaternary Research, 2003, 60(3): 348-355.
- [10] Miao Xiaodong, Wang Hong, Hanson P R, et al. A new method to constrain soil development time using both OSL and radiocarbon dating [J]. Geoderma, 2016, 261: 93-100.
- [11] 鄂崇毅,张晶,吴成永,等.青海湖流域草甸土光释光年代学研究[J].土壤学报,2018,55(6):1325-1335.
- [12] Zhang Jing, E Chongyi, Wu Chengyong, et al. An alpine meadow soil chronology based on OSL and radiocarbon dating, Qinghai Lake, Northeastern Tibetan Plateau [J]. Quaternary International, 2020, 562: 35-45.
- [13] Lin Yongchong, Feng Jinliang. Aeolian dust contribution to the formation of alpine soils at Amdo(Northern Tibetan Plateau) [J]. Geoderma, 2015, 259/260: 104-115.
- [14] 鄂崇毅,曹广超,侯光良,等.青海湖江西沟黄土记录的环境演变[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(4): 193-200.
- [15] Liu Xiangjun, Lai Zhongping, Yu Lupeng, et al. Luminescence chronology of aeolian deposits from the Qinghai Lake area in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoenvironmental implications [J]. Quaternary Geochronology, 2012, 10: 37-43.
- [16] Lu Huayu, Zhao Cunfa, Mason J, et al. Holocene climatic changes revealed by aeolian deposits from the Qinghai Lake area (Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau) and possible forcing mechanisms [J]. The Holocene, 2011, 21(2): 297-304.
- [17] 常秋芳,芦宝良,赖忠平,等.青海南山风成沉积光释光年代学研究[J].盐湖研究,2016,24(2):54-61.
- [18] Long Hao, Shen Ji, Chen Jianhui, et al. Holocene moisture variations over the arid central Asia revealed by a comprehensive sand-dune record from the central Tian Shan, NW China [J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 174: 13-32.
- [19] Yang Fei, Zhang Ganlin, Yang Fan, et al. Pedogenetic interpretations of particle-size distribution curves for an alpine environment [J]. Geoderma, 2016, 282: 9-15.
- [20] Yang Fei, Zhang Ganlin, Sauer D, et al. The geomorphology-sediment distribution-soil formation nexus on the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for landscape evolution [J]. Geomorphology, 2020, 354: 107040.
- [21] 武丹.三江源地区地形异质性对气候的影响分析[J].南方农业,2019,13(23):138-140,145.
- [22] 林永崇,冯金良,张继峰,等.藏北高原安多地区高山草

- 甸土的母质成因及其成土模式[J].山地学报,2012,30(6):709-720.
- [23] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986,92(2):181-193.
- [24] 鹿化煜,安芷生.前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的试验研究[J].科学通报,1997,42(23):2535-2538.
- [25] Guérin G, Mercier N, Nathan R, et al. On the use of the infinite matrix assumption and associated concepts: A critical review [J]. *Radiation Measurements*, 2012, 47(9):778-785.
- [26] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Radiation Measurements*, 2000,32(1):57-73.
- [27] E Chongyi, Sohbat R, Murray A S, et al. Hebei loess section in the Anyemaqen Mountains, Northeast Tibetan Plateau: A high-resolution luminescence chronology [J]. *Boreas*, 2018,47(4):1170-1183.
- [28] 杨龙.黄河源区河北(HB)黄土剖面高密度光释光年代学及其环境意义[D].青海 西宁:青海师范大学,2017.
- [29] Hao Qingzhen, Guo Zhengtang, Qiao Yansong, et al. Geochemical evidence for the provenance of Middle Pleistocene loess deposits in Southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010,29(23/24):3317-3326.
- [30] 李萍,鄂崇毅,吴成永,等.黄河源区土壤风成母质年代学研究[J].水土保持通报,2018,38(5):115-121.
- [31] 闫文亭,鄂崇毅,姜莹莹,等.基于光释光测年的共和盆地风沙活动历史研究[J].盐湖研究,2019,27(1):28-38.
- [32] 张晶,鄂崇毅,赵亚娟.青海湖黑马河黄土的高密度光释光测年[J].地球环境学报,2018,9(6):557-568.
- [33] Stauch G, Lai Zhongping, Lehmkuhl F, et al. Environmental changes during the Late Pleistocene and the Holocene in the Gonghe Basin, North-eastern Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018,509:144-155.
- [34] Chen Fahu, Zhang Jifeng, Liu Jianbao, et al. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A comprehensive review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020,243:106444.
- [35] Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Qian Guimin, et al. The study of paleoclimatic parameter of Qinghai Lake since Holocene [J]. *Quaternary Sciences*, 1994,14(3):225-238.
- [36] Qiang Mingrui, Chen Fahu, Song Lei, et al. Late Quaternary aeolian activity in Gonghe Basin, Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Quaternary Research*, 2013,79(3):403-412.

(上接第 157 页)

- [15] 高芸,齐学斌,李平,等.黄河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J].灌溉排水学报,2021,40(6):113-118.
- [16] 李文静,许文强,包安明,等.阿姆河流域耕地变化及水土匹配特征分析[J].水资源保护,2021,37(3):80-86,107.
- [17] 李慧,周维博,庄妍,等.延安市农业水土资源匹配及承载力[J].农业工程学报,2016,32(5):156-162.
- [18] 孙侦,贾绍凤,严家宝,等.中国水土资源本底匹配状况研究[J].自然资源学报,2018,33(12):2057-2066.
- [19] 文倩,孟天醒,邸雨旱.河南省农业水土资源时空分异与匹配格局[J].水土保持研究,2017,24(5):233-239.
- [20] Nelson E, Sander H, Hawthorne P, et al. Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models [J]. *PLoS One*, 2010,5(12):e14327. DOI:10.1371/journal.pone.0014327.
- [21] Shen Yanjun, Zhang Yucui, Bridget R S, et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013,181:133-142.
- [22] 黄克威,袁鹏,刘刚.基于 DEA 的四川省水土资源匹配研究[J].中国农村水利水电,2015(10):58-61,65.
- [23] 徐娜,张军,张仁陟,等.基于 DEA 的农业水土资源匹配特征研究:以甘肃省 5 流域为例[J].中国农业资源与区划,2020,41(6):277-285.
- [24] 王亚迪,左其亭,刘欢,等.河南省水土资源匹配特征及均衡性分析[J].人民黄河,2018,40(4):55-59,64.
- [25] 李天霄,付强,孟凡香.黑龙江省农业水土资源时空匹配格局研究[J].东北农业大学学报,2017,48(6):51-58.
- [26] 姜宁,付强.基于基尼系数的黑龙江省水资源空间匹配分析[J].东北农业大学学报,2010,41(5):56-60.
- [27] 刘彦随,甘红,张富刚.中国东北地区农业水土资源匹配格局[J].地理学报,2006,61(8):847-854.
- [28] 杜捷.农业水土资源利用评价与均衡优化调控研究:以宁夏为例[D].北京:北京林业大学,2020.
- [29] 张莹,雷国平,张弘强,等.三江平原典型流域耕地利用水土资源匹配时空演变:以挠力河流域为例[J/OL].中国农业资源与区划:1-11(2021-08-03)[2021-09-22].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210802.1710.021.html.