

DOI: 10.11766/trxb202505110213

CSTR: 32215.14.trxb202505110213

先巴吉, 鄂崇毅, 孙满平, 张晶, 张帅旗, 张兆康, 李珂嘉. 三江源地区高山草甸土成土年龄与发育模式研究[J]. 土壤学报, 2026, XIANBA Ji, E Chongyi, SUN Manping, ZHANG Jing, ZHANG Shuaiqi, ZHANG Zhaokang, LI Kejia. Chronology and Development Patterns of Alpine Meadow Soils in the Three-Rivers Headwater Region, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

三江源地区高山草甸土成土年龄与发育模式研究*

先巴吉^{1,2}, 鄂崇毅^{1,2,3†}, 孙满平⁴, 张晶^{1,2}, 张帅旗^{1,2,5}, 张兆康^{1,2}, 李珂嘉^{1,2}

(1. 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, 西宁 810008; 2. 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, 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, 西宁 810008; 4. 西华师范大学历史文化学院(考古文博学院) 四川南充 637000; 5. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001)

摘要: 三江源地区高山草甸土(Alpine Meadow Soil)形成时代与发育模式对理解青藏高原高山草甸土成土过程机制具有重要意义。本研究选取三江源地区 21 个高山草甸土剖面, 利用光释光(OSL)测年技术对草毡层和母质层进行测年, 并结合土壤粒度特征, 分析其成土过程。结果表明: 三江源地区高山草甸土剖面草毡层形成时间在 1 ka 以内。母质发育多数集中在末次冰消期以来, 少数在末次冰期间冰阶。母质粒度曲线多呈现三峰模式, 40~60 μm 粉砂为主峰, 含量最高, 粒度频率曲线与典型黄土物质相似, 指示风尘物质是草甸土发育的重要母质来源。末次冰消期至全新世阶段, 气候因素主导风尘输入速率与成土强度, 母质年代多集中于晚全新世, 表明晚全新世干冷气候条件下, 风尘释放增强, 为草甸土提供了关键的成土物质, 揭示三江源高山草甸土发育模式为“混合母质-风尘加积型”发育模式。

关键词: 三江源地区; 高山草甸土; 光释光年代; 粒度分布; 土壤发育

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

Chronology and Development Patterns of Alpine Meadow Soils in the Three-Rivers Headwater Region, Qinghai-Tibetan Plateau

XIANBA Ji^{1,2}, E Chongyi^{1,2,3†}, SUN Manping⁴, ZHANG Jing^{1,2}, ZHANG Shuaiqi^{1,2,5}, ZHANG Zhaokang^{1,2}, LI Kejia^{1,2}

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, China; 4. School of History and Culture (School of Archaeology and Museology), China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000, China; 5. Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001, China)

Abstract: 【Objective】The chronology and development history of Alpine Meadow Soils in the Three-Rivers Headwater Region remain poorly constraint, limiting understanding of their pedogenic mechanisms on the Qinghai-Tibetan Plateau.

* 国家自然科学基金项目资助(42171011) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42171011)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: echongyi@163.com

作者简介: 先巴吉(1993-), 女, 青海贵南人, 博士研究生, 主要从事全球变化与高原环境研究。E-mail: xianbaji2021@163.com

收稿日期: 2025-05-11; 收到修改稿日期: 2026-07-09; 网络首发日期(www.cnki.net):

Thus, this study aimed to determine the formation ages, parent material sources, and dominant climatic controls of the Alpine Meadow soils, in order to elucidate their developmental patterns. 【Method】 In this study, 21 alpine meadow soil profiles from the Three-River Headwaters Region were selected. Optically stimulated luminescence (OSL) dating was applied to both the turf layer and the parent material layer, combined with grain-size analysis to investigate soil formation processes.

【Result】 The results show that the formation ages of the turf layer are generally within 1 ka. The parent material was mainly formed since the last deglaciation, with a few samples dating back to interstadials of the last glacial period. Grain-size distributions of the parent materials commonly exhibited a trimodal pattern, with a dominant peak at 40–60 μm (silt fraction). The grain-size frequency curves were similar to those of typical loess, indicating that aeolian dust is an important source of parent material for alpine meadow soil development. During the period from the last deglaciation to the Holocene, climate played a dominant role in controlling both aeolian dust input and pedogenic intensity. The concentration of parent material ages in the late Holocene suggests enhanced dust availability under relatively cold and dry climatic conditions, which provided essential materials for soil formation. 【Conclusion】 These findings indicate that alpine meadow soils in the Three-River Headwaters Region follow a development pattern characterized as a “mixed parent material-aeolian accretion model.”

Key words: Three Rivers Headwater Region; Alpine meadow soil; OSL dating; Grain-size distribution; Soil development

土壤年代学作为揭示土壤形成与演化过程的基础性科学问题,在青藏高原高寒土壤研究中尤为关键^[1]。然而,由于长期缺乏可靠的年代测定手段,青藏高原高山草甸土的形成时代、发育时间及其与气候环境变化的响应规律认识不足。特别是在高寒草甸生态系统广泛的三江源地区^[2],现有研究多侧重于土壤理化性质与生态过程^[3],而目前草甸土的形成年代证据仍有限,使得关于其发育模式、母质来源以及气候驱动机制的讨论缺乏年代学支撑,阻碍了对高寒土壤演化过程的深入理解。

传统土壤年代测定多依赖放射性碳同位素 ^{14}C 方法^[4],但由于表层土壤持续接受新鲜碳输入,测年结果往往偏年轻^[5–6]。近年来,光释光 (Optically Stimulated Luminescence, OSL) 测年技术的发展为高寒土壤年代学研究提供了新的手段^[7]。通过测定土壤中石英和长石等矿物颗粒的埋藏时间,相关研究已在青海湖流域及黄河上游地区获得较为可靠的草甸土发育年代^[8–11],并指出风尘输入在土壤形成过程中的重要作用^[12–14]。然而,现有 OSL 研究对高山草甸土发育过程的认识不够深入,具体表现为:①缺乏基于土壤发生层的分层 OSL 年代分析,难以区分母质堆积期与成土发育期,也无法定量评估土壤加积速率;②对风尘、残积、坡积等多源母质混合条件下土壤发育的阶段认识仍有待深化。这些不足限制了对高寒草甸土形成机制的深入理解。

三江源地区是青藏高原高山草甸土典型且分布广泛的区域之一。尽管 OSL 测年已在青海湖流域及黄河上游取得进展,但该区域高山草甸土尚缺乏基于土壤发生层的 OSL 分层年代学约束,多层位发育过程及其对气候变化的响应机制仍不明确。为此,本研究采用 OSL 年代学方法,按土壤发生层 (重点聚焦草毡表层和母质层) 系统测定典型剖面的埋藏年代,并结合粒度与地球化学指标,旨在建立高山草甸土的 OSL 年龄序列,确定其初始形成时代与加积速率,区分风成与残积等物源贡献,揭示多源母质条件下的土壤发育阶段,探讨上述发育过程与晚第四纪气候变化的耦合关系,为高寒地区土壤演化研究提供年代学约束。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江源地区(31°39′–36°16′N, 89°24′–102°23′E)位于青藏高原腹地,平均海拔 4 461 m 以上。整个区域内地形起伏度大,尤其东部和东南部山体坡度大,地形多峡谷、悬崖。西部、北部和中部地区高程值虽然高,属高原山地地形,但是地形在纵向变化较小,整体较平坦,保持了青藏高原多山地的地貌特征。气候属于典型的高原大陆性气候。长江、黄河和澜沧江降水量年平均值依次为^[2] 337.0 mm、450 mm 和 508.2 mm,由于是三大江河的发源地,支流与湖泊众多。植被类型包括高寒森林、

灌丛、草甸、草原、荒漠等各类生态系统,其中高寒草甸和高寒草原是三江源区主要的植被类型^[2]。区域内土壤呈现明显的垂直和水平地带性趋势特点,表现出粗骨性、土层薄、黏性低、多砾质粗砂、成土时间短等特征,土壤化学与生物风化作用弱而物理作用强,以砂质壤土为主。主要类型有高山寒漠土(Alpine Desert Soil)、高山草甸土(Alpine Meadow Soil)、高山草原土(Alpine Grassland Soil)、沼泽土(Swamp Soil)和栗钙土(Phaeozem)等。

1.2 采样设计

对三江源区的气候、地貌、植被等进行系统的野外考察,按照“典型性、代表性、一致性”原则布设样点。选择在海拔 3 600 m 以上,莎草科嵩草属植被覆盖下的典型高山草甸土剖面,剖面分布的地貌以山地,冲-洪积扇、河流阶地为主。共采集了 21 个高山草甸土剖面,采自黄河流域的玛沁、甘德、达日、玛多,长江流域的通天河、称多、清水河、歇武,澜沧江流域的囊谦等地区(图 1)。对剖面不同发生层进行系统采样,其中 OSL 样 57 个,环境指标样 160 个。选取的剖面植被覆盖度约为 95%,以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)和矮生嵩草(*Kobresia humilis*)为优势种,杂草为珠芽蓼(*Polygonum perfoliatum*)、针茅(*Stipa capillata*)、马先蒿(*Artemisia maritima*)、蕨麻(*Lycopus lucidus*)、圆穗蓼(*Polygonum lapathifolium*)等。剖面均在每个不同的土壤发育层采集一个 OSL 样,以 10 cm 间隔采取环境指标样,剖面图及详细信息见图 2。部分剖面中草毡层有机根系极为发达,细粒矿物含量较低,不利于获得足量且纯净的 63~90 μm 石英颗粒,同时,部分母质层砾石含量高、结构松散,细粒组分比例较低,难以分离出满足 OSL 测试要求的矿物颗粒。在此情况下,为保证测年材料的可靠性与代表性,选择在草毡层底部或母质层顶部的过渡层采集样品进行测定。

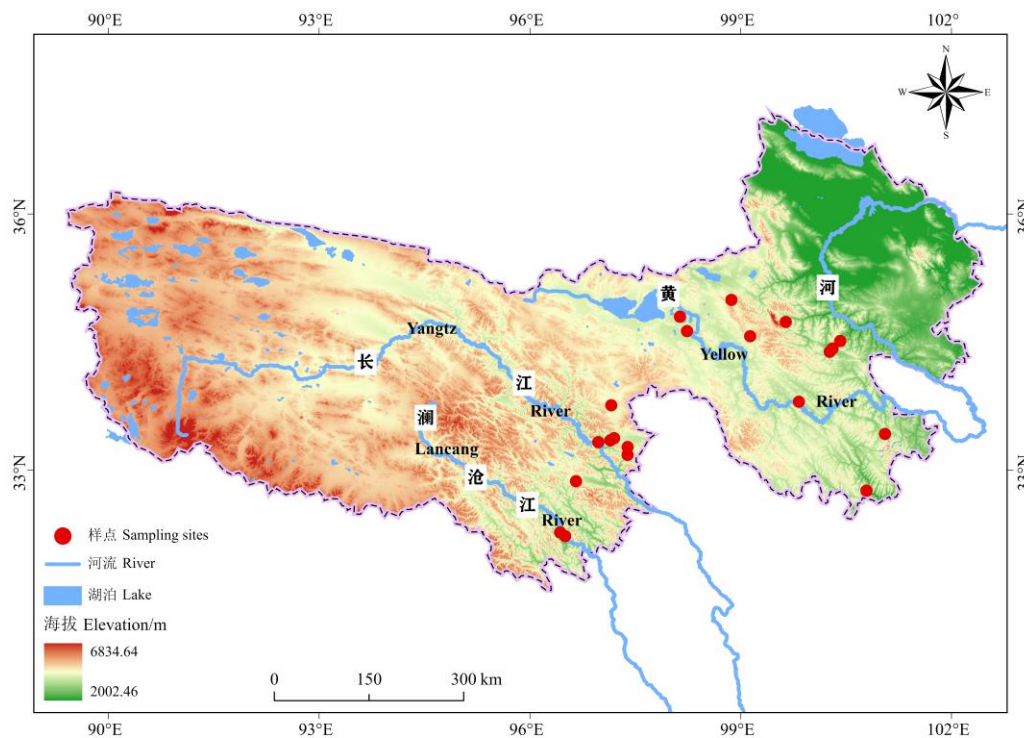


图 1 样点分布图

Fig. 1 Distribution of sample points

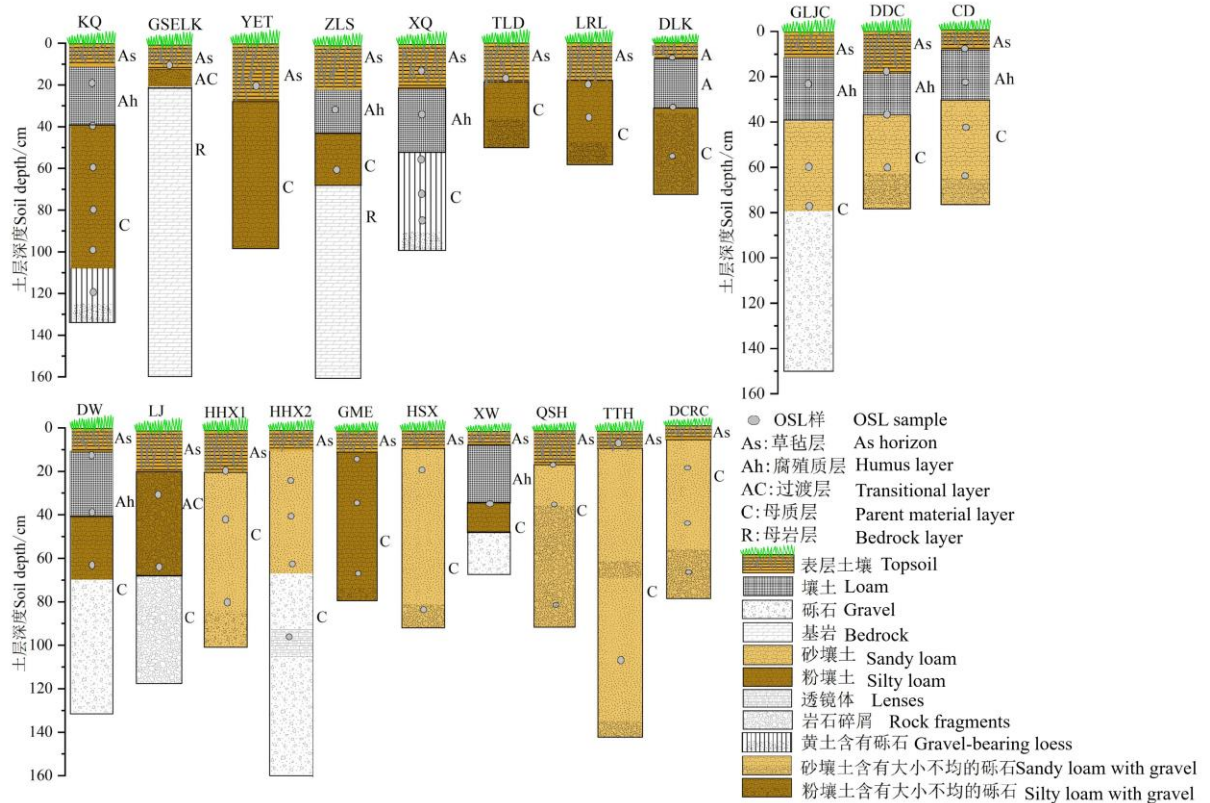
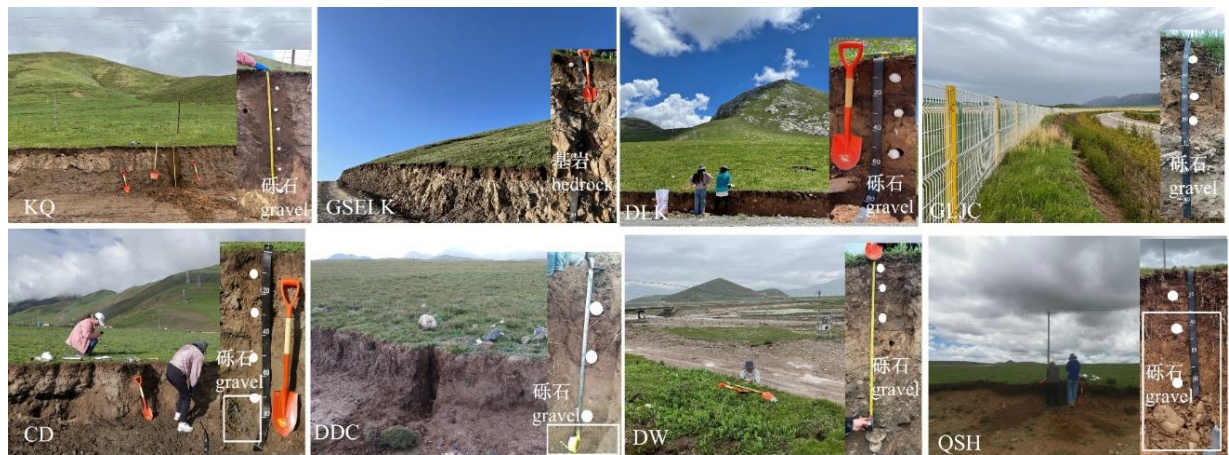


图2 三江源典型地貌及高山草甸土剖面发生层、OSL 样品

Fig. 2 Typical geomorphology of the Three-Rivers Headwater Region and alpine meadow soil profile horizons with OSL sampling

1.3 光释光年代测定

光释光 (OSL) 测年是对沉积物最后一次曝光事件年代的测定, 是由测定光晒退的沉积物发展而来。测定年代是计算土壤中石英矿物最后一次暴露后埋藏的时间。在实验室中, 通过对年代样品进行定量的人工辐照, 建立生长曲线 (图 6), 获得矿物埋藏时间积累的辐射总量, 为等效剂量 (Equivalent Dose, D_e)。环境剂量率 (Dose rate, D_r) 是单位时间内矿物所累积的能量, 也受经纬度、海拔高度、含水量、采样深度等因素影响。计算公式如下:

$$\text{Age (ka)} = D_e \text{ (Gy)} / D_r \text{ (Gy/ka)} \quad (1)$$

式中, Age 表示年代; D_e 表示等效剂量; D_r 表示环境剂量率。

本文 57 个 OSL 样品预处理及等效剂量测试工作在青海省自然地理与环境过程重点实验室(暗室弱红光, 中心波长约为 $655 \pm 30 \text{ nm}$) 进行。等效剂量测量所用仪器为 Risø TL/OSL-AD-20-C/D 型热/光释光仪, 辐照源为人工 β 源 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, 每秒辐照剂量率为 $(0.11 \pm 0.002) \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其方法采用石英单片再生剂量法^[15](single-aliquot-regenerative-dose protocol, SAR)。环境剂量铀、钍、钾含量的测试在西安地质调查中心完成。本研究选取 $63 \sim 90 \mu\text{m}$ 粒级石英颗粒作为 OSL 测年对象。环境剂量率计算中统一采用含水量 $10\% \pm 5\%$ 。该取值参考区域既有 OSL 研究成果, 并结合研究区高寒半干旱环境条件进行估算。考虑到高寒地区含水量可能存在季节性波动, 采用 $\pm 5\%$ 的不确定范围进行修正。在该区间内, 含水量变化对最终 OSL 年龄的影响处于统计误差范围之内。

1.4 土壤样品测定

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和安芷生^[16]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 $0.02 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 。文中 Zr、Nb、Ti 等土壤元素含量的测定在西安地质调查中心完成, 样品采用氢氟酸、硝酸、高氯酸分解, 并去除体系中的残余高氯酸, 避免蒸至完全干燥, 用王水溶解后移至聚乙烯试管中, 定容摇匀后使用美国热电公司 iCAP RQ 型电感耦合等离子体质谱仪测定, TiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 等土壤氧化物含量采用荷兰帕纳科 Axios 型波长色散 X 荧光光谱仪测定。

2 结果

2.1 高山草甸土粒度分布特征

粒度分布是识别物质搬运的主要途径和方法, 也是评估沉积物分布情况的重要手段^[13]。根据粒径划分分析(图 3a), 三江源地区不同母质类型的高山草甸土均呈现以砂和粉砂为主的粗质结构, 但具体粒级特征存在显著差异: 风积母质和洪积母质高山草甸土分布在砂质粉砂~粉砂, 粉粒含量偏高, 最大值为 80%。冲积母质高山草甸土粒径集中在砂质粉砂~砂, 砂粒含量偏高, 最大值达到 90%。整体三江源高山草甸土砂粒含量为 40%~70%, 粉粒含量为 20%~50%, 黏粒为 5%~15%。反映出三江源高山草甸土物源和母质发育的复杂性。粒度频率曲线显示, 三江源高山草甸土剖面以三峰态模式分布(图 3b), 剖面在 $1 \sim 16 \mu\text{m}$ 、 $20 \sim 200 \mu\text{m}$ 、 $200 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 间各有一小峰, 主峰集中在约 $60 \mu\text{m}$, 对应含量较高、分选较好的粗粒组分, 次峰峰值分别为 $8 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ 。各剖面平均粒径介于 $12 \sim 71 \mu\text{m}$ 间, 中值粒径介于 $11 \sim 58 \mu\text{m}$ 间。

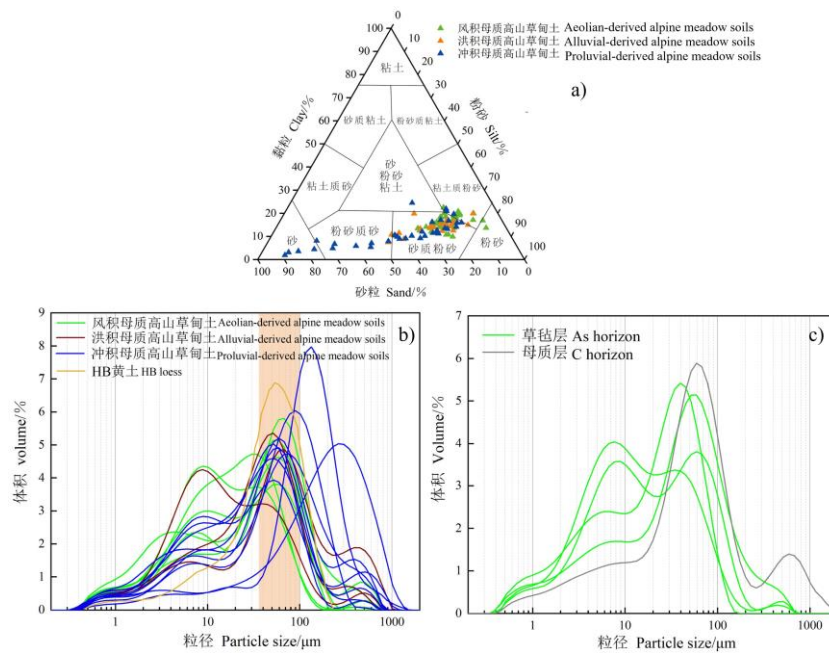


图 3 (a) 不同类型高山草甸土的土壤质地类型; (b) 不同母质的高山草甸土和 HB 黄土的粒径分布曲线; (c) 草毡层与母质层的粒度曲线

Fi. 3 (a) Soil texture classes of different types of alpine meadow soils; (b) Grain-size distribution curves of alpine meadow soils developed on different parent materials and HB loess; (c) Grain-size distribution curves of the turf layer and the parent material layer

2.2 地球化学元素比值特征

图 4 显示了三江源地区高山草甸土、HB 黄土^[17] (Loess) 与 YS 红土 (采自治多县东南部军永唐, 地势平坦, 剖面深度 70 cm, 土壤松散, 颜色偏红)。在多个元素比值 (如 K_2O/Al_2O_3 、 TiO_2/Al_2O_3 、 Zr/Nb) 上的差异。元素比值对比能够反映不同沉积体系的物质来源特征及其混合程度, 是识别母质组成差异的重要手段^[18-19]。已有研究表明, 黄土沉积物在空间与时间尺度上具有多源混合特征^[18], 即便整体地球化学组成相对接近, 其来源组成仍可能存在差异。因此, 通过与区域典型风成沉积 (HB 黄土) 及不同成因类型沉积物 (YS 红土) 的对比, 有助于判识研究区母质的组成特征。高山草甸土与 HB 黄土的 K_2O/Al_2O_3 比值集中在 0.19~0.23 之间, 分布区间高度重叠, 表明二者在物质组成上具有一定相似性, 可能反映风尘物质的参与。相比之下, YS 红土在部分元素比值上呈现差异分布, 尤其在 Zr/Nb 比值上与草甸土和 HB 黄土存在明显区分, 指示研究区母质并非单一来源, 而是在风成物质输入背景下叠加了其他沉积过程的影响。整体分析, 元素比值分布特征支持研究区母质具有混合性质, 而风尘输入在其中发挥了重要作用。

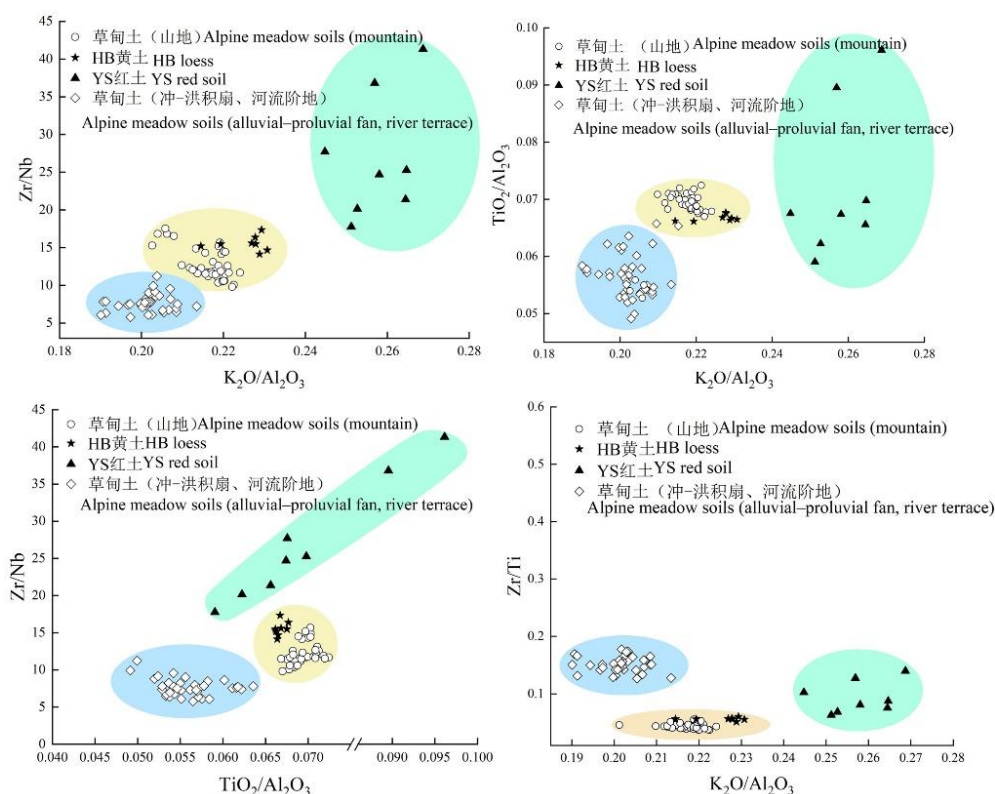


图4 三江源地区高山草甸土、黄土、红土的 K_2O/Al_2O_3 -Zr/Nb、 K_2O/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3 、 TiO_2/Al_2O_3 -Zr/Nb、 K_2O/Al_2O_3 -Zr/Ti 图解

Fig. 4 K_2O/Al_2O_3 -Zr/Nb, K_2O/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3 , TiO_2/Al_2O_3 -Zr/Nb, and K_2O/Al_2O_3 -Zr/Ti discrimination diagrams of alpine meadow soils, loess, and red clay in the Three-Rivers Headwater region

2.3 OSL 测年结果

2.3.1 释光特征 通过对样品的衰退曲线、生长曲线分析 (图 5a, 图 5b, 图 5c): 不同母质的高山草甸土样品均显示 OSL 信号晒退较好, 在前 2 s 快速晒退至背景值, 石英信号均以快组分为主, 表明样品 OSL 信号较强, 埋藏前晒退充分, 所有样品的生长曲线均能很好地用线性加指数的方程进行拟合。指示所采集的样品适合于光释光测年。在测量 D_e 值之前对样品进行了预热温度坪实验, 预热温度在 180~260°C 时样品的等效剂量值较一致, 误差小, 并且测定的剂量和给定的剂量值比值在 0.9~1.1 之间 (图 5d), 几乎接近于 1, 恢复剂量与已知剂量具有很好的一致性, 因此本项工作中等效剂量的测量是可靠的。

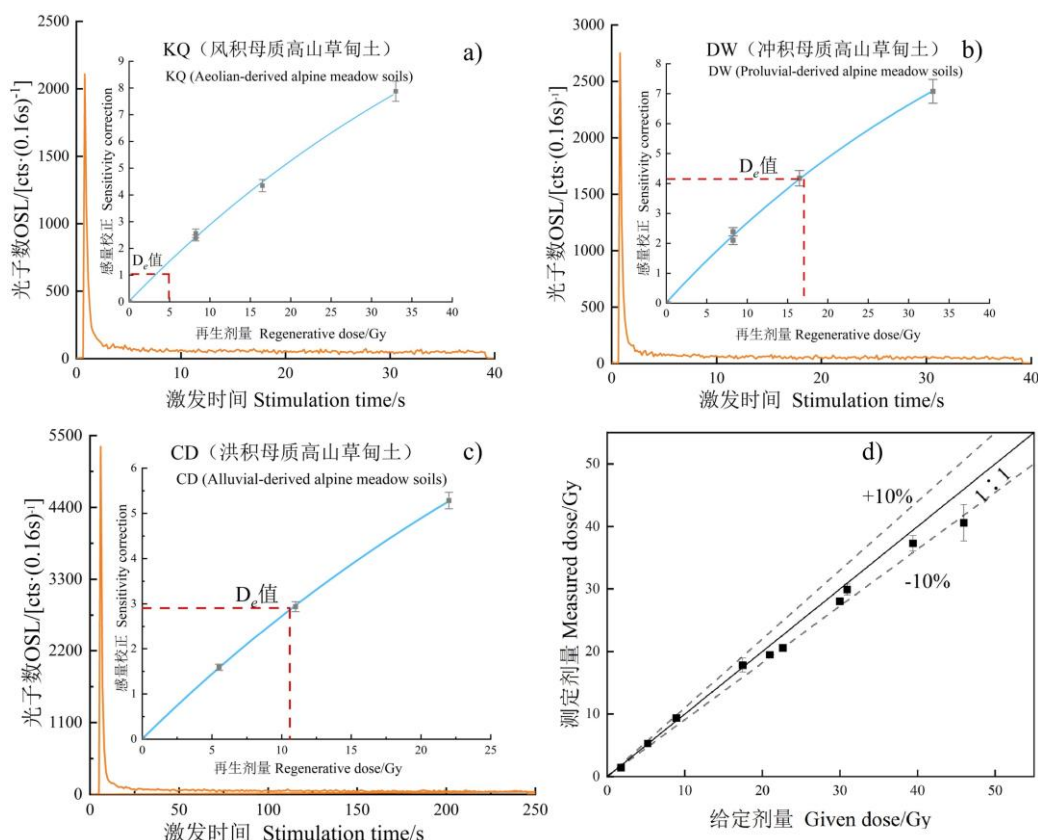


图5 典型剖面的衰退曲线、生长曲线 (a,b,c) 和剂量恢复试验 (d)

Fig. 5 Growth and decay curves of the sample (a,b,c) and dose recovery test(d) of typical profiles

2.3.2 释光年代 本研究共采集 OSL 样品 57 个, 涵盖草毡层 (12 个) 与母质层 (45 个), 采样剖面位置及厚度见图 2。草毡层厚度 10~30 cm, 测年结果显示其发育时间集中于晚全新世。风积母质剖面草毡层年代为 1.5~0.6 ka, 洪积母质为 0.9~0.4 ka, 冲积母质为 1.1~0.2 ka。整体草毡层形成年代主要集中在 0.9~0.2 ka, 频率峰值约 0.4 ka, 次级峰值约 1~0.9 ka (图 6), 表明三江源地区草毡层的主要形成期为全新世晚期 1.5 ka 以来。

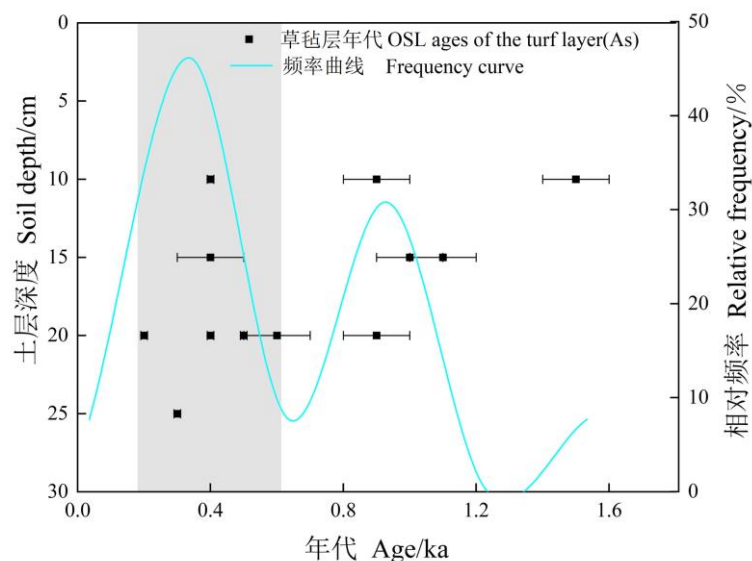


图6 高山草甸土剖面草毡层年代分布与频率曲线

Fig. 6 Age distribution and frequency curve of turf layer in alpine meadow soil profiles

母质层 OSL 样品采集自 18 个剖面。其中, 风积母质层 (KQ、ZLS、XQ、GME、LRL 剖面) 11 个样品的年代为 13.5~0.7 ka; 洪积母质层 (DLK、GLJC、DDC、CD、LJ、HSX、QSH、TTH、DCRC 剖面) 16 个样品的年代为 43.7~0.6 ka; 冲积母质层 (DW、HHX1、HHX2、XW 剖面) 8 个样品年代为 24.9~0.1 ka。需说明的是, XW 和 LJ 剖面因草毡层或母质层细粒矿物不足, 采用过渡层样品替代测年^[8]。整体上, 三江源高山草甸土母质层的形成时间涵盖了末次冰期至全新世 (43~0.1 ka) (图 7a, 图 7b), 年代频率分布显示其集中于末次冰消期至早全新世和晚全新世, 末次冰期间冰段亦有少量分布。

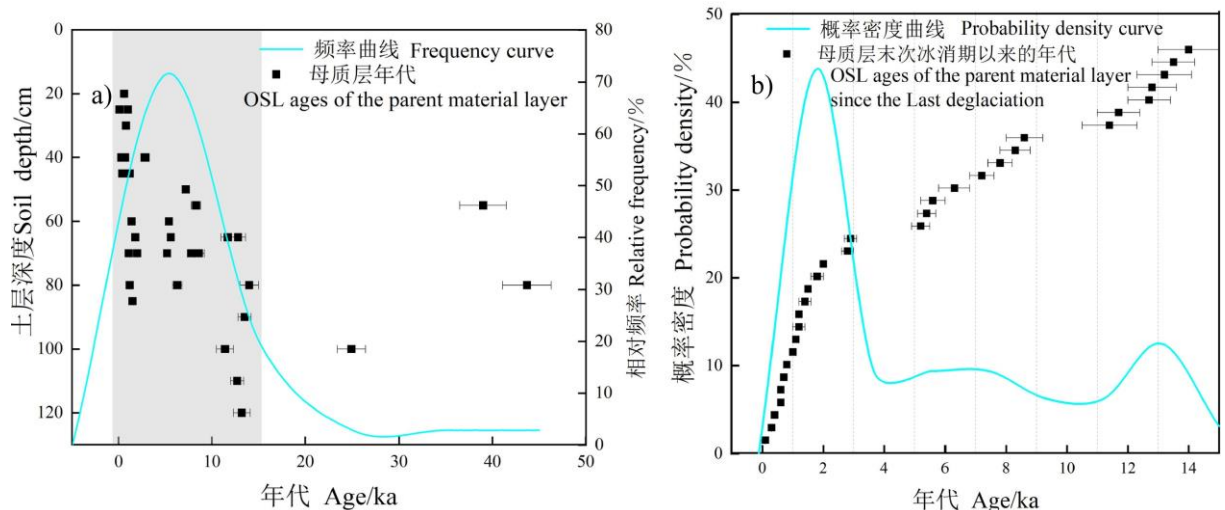


图 7 高山草甸土剖面母质层年代分布与频率曲线 (a)、概率密度图 (b)

Fig. 7 Age distribution and frequency curve of parent material layers in alpine meadow soil profiles(a), probability density(b)

3 讨论

3.1 高山草甸土的物源指示: 风尘输入的粒度与地球化学证据

三峰态粒度分布可解释为悬移 (1~16 μm)、近源风成跃移 (20~200 μm) 以及高能水动力搬运 (200~1000 μm) 三类输入方式共同作用的结果, 这一特征与风成-水成复合沉积在强动力环境中的粒度结构认识相吻合^[12,20]。前人研究认为^[21], 一般<20 μm 的粉尘能长时间悬浮并被风力远距离输送。本研究区草甸土约 8 μm 的细粒组分可能为远源搬运的粉尘。约 60 μm 主峰与 HB 黄土主峰位置一致^[17], 指示该粒级组分可能主要来自区域尺度的尘暴或近源风成沉积; 该主峰在不同母质类型剖面中均较为稳定, 说明风尘输入对三江源高山草甸土的发育具有基础性和持续性贡献。

冲积母质中约 500 μm 组分主要为流水作用的产物, 反映了河流或洪水在高能量环境下对砂砾物质的搬运与堆积。在构造运动或气候变化驱动下, 河谷-冲洪积扇体系发生下切与堆积调整, 形成阶地或河漫滩等地貌单元, 其沉积物表现为典型的“上细下粗”的二元结构: 剖面底部保留高能流水环境下堆积的砂砾层, 向上逐渐过渡为粉砂-细砂为主的泛滥层和漫滩沉积。图 3b 中砂、粉砂含量沿剖面自下而上的变化清晰展现了这一趋势: 底部层位砂粒含量高、粉砂含量相对较低, 向上砂粒逐渐减少、粉砂和细砂显著富集, 上部则演化为以 40~60 μm 粉砂为主、分选较好的风积母质段。这种从粗到细的垂向序列记录了水动力逐步减弱的过程, 也为后期风尘加积提供了稳定的沉积接受面, 有利于在冲积基底之上叠加形成风成母质层和草毡层^[22]。

元素地球化学分析进一步支持风尘输入的物源贡献。高山草甸土与 HB 黄土的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值高度重叠, 表明二者在物质组成上具有相似性, 指示风尘物质的参与。YS 红土在 Zr/Nb 等比值上与草

甸土和 HB 黄土存在明显差异,结合粒度特征,表明研究区母质并非单一来源,而是在风成物质输入背景下叠加了其他沉积过程(如冲洪积、残积)的影响。类似的现象在青海湖布哈河流域^[23]和祁连山地区^[14,24]也有报道,进一步证实草甸土的母质中风尘物质的贡献显著,且与下伏基岩无继承性关系^[25]。

3.2 草毡层的形成时代与风尘加积速率

三江源高山草甸土草毡层在不同母质上的发育时间均集中于晚全新世(1.5 ka 以来)。这一时期区域风沙活动相对频繁,风力能够将风尘物质广泛搬运和堆积至不同地貌部位,为草甸土发育提供了持续的细粒母质来源。这一年代框架与青藏高原东北部其他地区草毡层的 OSL 和 ¹⁴C 年代结果一致^[8-9,25-26],均指示晚全新世以来风尘加积显著增强,是草毡层形成的主控过程。

草毡层的 OSL 年龄可视为表层草甸土形成与稳定的时间序列,即草甸土发育的上限年龄^[22],该年龄记录了风尘物质最终埋藏与固定的时间。不同母质类型的草毡层年代略有差异:风积母质剖面整体偏老(1.5~0.6 ka),洪积与冲积母质剖面相对年轻(1.1~0.2 ka)。12 个草毡层年代的频率峰值出现在约 0.4 ka,对应于小冰期气候寒冷阶段,指示区域风力条件增强、风尘输入显著增加;次级峰值约 1~0.9 ka,对应于气候由暖湿向偏冷干调整的时期,与区域风尘重新活跃的阶段相吻合^[27]。基于年代结果和草毡层容重,采用以下公式计算风尘输入通量:通量=容重×草毡层厚度/沉积时间。计算所得通量介于 77~1150 g·m⁻²·a⁻¹ 之间,与现代风尘输入处于相近数量级^[22],表明晚全新世以来三江源地区草毡层的形成同样依赖持续较强的风尘加积过程。地势较高的剖面(如 HHX1、LRL 等)风尘通量偏高,表明其处于风向上的物质捕获位置。总体而言,风尘不仅是草毡层发育的关键外源物质来源,也是维持高山草甸生态系统土壤形成过程的重要驱动力。

3.3 母质层的年代与气候驱动

根据 OSL 测年原理,所测年龄反映矿物颗粒最后一次曝光后的埋藏时间^[15]。在风尘持续加积背景下,母质层顶部的年龄更接近成土过程的上限,底部年龄则反映母质堆积的早期阶段。本研究,过渡层样品(XW、LJ 剖面)的年龄介于草毡层形成与母质沉积结束之间,其年龄解释具有一定的不确定性,本文将其视为近似上限或阶段性参考年龄,整体年代框架基于多剖面、多样品的统计分布特征进行综合判断。

从年代分布来看,三江源高山草甸土母质层形成时间跨越末次冰期至全新世(43~0.1 ka),主要集中在末次冰消期至早全新世和晚全新世。在冰期-间冰期尺度上,高原腹地土壤发育的主控因子是气候,其中温度尤为关键^[28]。末次冰期盛冰期及深海氧同位素 4 阶段(MIS 4),气温较现今低约 7~8℃,高寒草甸生态系统可能退化为高寒荒漠,植被盖度和生物生产力显著降低,同时风速较大,风尘捕获能力较弱,土壤呈零星片状发育^[29]。进入 MIS 3 阶段后,气候逐渐转暖,温度升高,植被逐步恢复,风速减弱,风尘捕获能力增强,土壤开始由零散向连续发育转变^[30-31]。前人研究亦表明,青藏高原不同类型沉积记录(如黄土-古土壤序列及湖泊沉积等)中,土壤发育主要发生在间冰期及冰期内部相对温暖湿润阶段,这一规律与本研究母质层年代分布及其与气候变化的对比结果(图 8)具有良好的一致性。

末次冰消期至全新世早期(约 15~8 ka),冰芯记录显示温度显著升高^[32],湖泊沉积表明青海湖及周边地区水位上升、沉积环境趋于稳定^[33],孢粉记录亦指示植被覆盖增加、湿生植物扩展^[34-35],共同表明该时期相对温暖湿润,为土壤发育提供了有利条件。中全新世(约 8~4 ka)气候相对暖湿,植被覆盖度进一步提高,有利于成土作用的加强及土壤性质的进一步演化^[36]。晚全新世(约 4 ka 以来)气候总体呈相对偏干或波动增强特征,风尘活动较为强烈,成为重要的粉尘输入期与母质形成阶段(图 7b)。因此,尽管末次冰消期至全新世整体气候有利于土壤发育,但成壤强度在不同阶段存在明显差异。

与此同时,区域冲洪积等地貌过程受到气候与构造的双重控制,尤其在气候转型期,河流下切与堆积过程频繁交替,为土壤形成提供了大量冲洪积母质。不同母质类型的年代跨度差异也反映了

其形成过程与地貌位置的差异：洪积母质出现最老年龄（43.7 ka），可能与其长期接收山前洪积扇堆积有关；风积母质年龄集中于晚更新世晚期至全新世（13.5~0.7 ka），反映风尘堆积的持续过程；冲积母质年龄（24.9~0.1 ka）则与河谷阶地发育及河流改道历史相关。

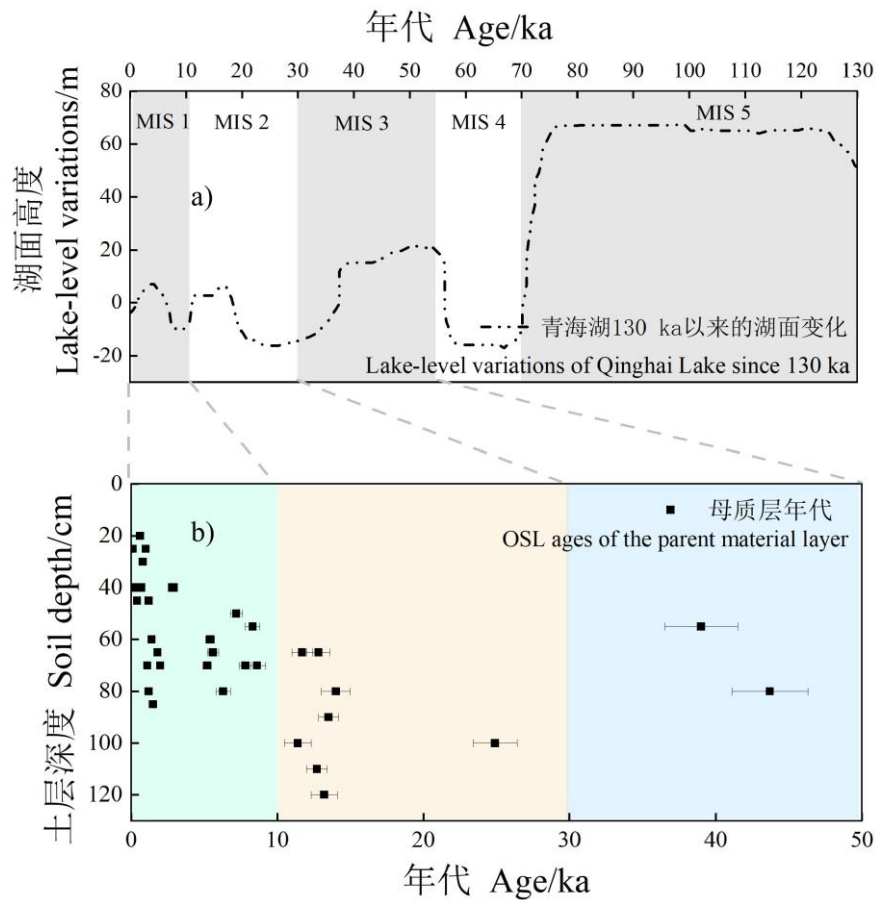


图8 青海湖湖面变化^[31] (a) 与母质层 OSL 年代 (b) 对比图

Fig. 8 Comparison between lake-level variations of Qinghai Lake^[31] (a) and OSL ages of the parent materials layer(b)

3.4 三江源高山草甸土的多源多阶段发育模式

综合上述分析，三江源高山草甸土的形成可概括为以下多源、多阶段复合发育模式。在成土演化初期，构造运动与气候变化驱动的冲洪积过程为土壤发育提供了基础母质（砂砾层）。随着水动力减弱，沉积表面趋于稳定，植被逐步发育，增强了地表对风尘的捕获能力。风尘捕获与风尘堆积共同促进了草甸土向上“加积式”发育，在同一剖面中表现为下部发育粗颗粒的冲积或洪积母质，上部被更为均一、分选较好的风积粉砂所覆盖。三种母质类型草甸土的草毡层粒度多集中在粉砂粒级且主峰相近，也证实了其不同阶段的母质差异。

在气候驱动方面，温度转暖为土壤发育提供基本环境，风尘输入与植被变化在不同阶段对母质形成与成壤强度起到重要调节作用。晚全新世以来，特别是小冰期前后，风尘输入显著增强，草毡层广泛发育。最终，三江源高山草甸土形成了以冲-洪积沉积为基础、叠加风尘输入并持续加积的多源、多阶段复合发育模式，这一特征在青海湖流域及安多地区亦有类似报道^[12,23]。

4 结论

本研究通过土壤粒度组成、常量与微量元素地球化学物源示踪及按发生层开展的系统 OSL 年代约束，揭示三江源高山草甸土属于风积、洪积、冲积沉积物共同构成的混合母质成因体系，三峰式粒度分布分别记录远源高空粉尘沉降、区域近源风尘堆积与局地高能流水搬运三种沉积动力过程，

地球化学元素比值对比进一步佐证风尘物质是该区土壤发育最主要的外源母质；母质层沉积时代跨度覆盖末次冰期至全新世，成土演化整体受冰期—间冰期尺度气候波动主导，末次冰消期—早全新世与晚全新世为母质集中堆积时段，晚全新世干冷气候背景下风尘通量提升促使草毡层于 1.5 ka 之内集中加积成型；地形地貌差异造成风积母质持续连续加积、冲洪积母质呈间断性事件堆积的年代序列分异，最终确立三江源高山草甸土以冲洪积沉积物为基底、叠加晚更新世以来多期风尘输入、草毡层在晚全新世集中发育的多源多阶段复合成土模式。

参考文献 (References)

- [1] Birkeland P W. Soils and geomorphology[M]. New York: Oxford University Press, 1984.
- [2] Zhao X Q, Zhou H K. Eco-environmental degradation, vegetation regeneration and sustainable development in the Headwaters of Three Rivers on Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2005, 20(6): 471-476.
[赵新全, 周华坤. 三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(6): 471-476.]
- [3] Wang G X, Qian J, Cheng G D, et al. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication[J]. Science of the Total Environment, 2002, 291(1/2/3): 207-217.
- [4] Chichagova O A, Cherkinsky A E. Problems in radiocarbon dating of soils[J]. Radiocarbon, 1993, 35(3): 351-362.
- [5] Wang H, Hackley K C, Panno S V, et al. Pyrolysis-combustion ^{14}C dating of soil organic matter[J]. Quaternary Research, 2003, 60(3): 348-355.
- [6] Miao X D, Wang H, 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.
- [7] Zhang A M, Long H, Yang F, et al. Luminescence dating illuminates soil evolution[J]. Earth-Science Reviews, 2025, 265: 105103.
- [8] Zhang J, E C Y, Wu C Y, 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.
- [9] E C Y, Zhang J, Wu C Y, et al. Study of chronology of the meadow soil in the Qinghai Lake Basin by means of optically stimulated luminescence[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1325-1335. [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.]
- [10] Xie L Q, E C Y, Zhao X, et al. Pedogenesis process of residual parent material soil in the northeast Tibetan Plateau: Taking profile Ningxia in the north of Qinghai Lake as an example[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1146-1154.
[谢丽倩, 鄂崇毅, 赵霞, 等. 青藏高原东北部残积母质土壤发育过程研究——以青海湖北部宁夏剖面为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1146-1154.]
- [11] Li P, E C Y, Wu C Y, et al. A study on aeolian parent material chronology in source region of Yellow River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 115-121. [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.]
- [12] Lin Y C, Feng J L. Aeolian dust contribution to the formation of alpine soils at Amdo (Northern Tibetan Plateau)[J]. Geoderma, 2015, 259/260: 104-115.
- [13] Yang F, Zhang G L, Yang F, et al. Pedogenetic interpretations of particle-size distribution curves for an alpine environment[J]. Geoderma, 2016, 282: 9-15.
- [14] Yang F, Zhang G L, 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.
- [15] 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.
- [16] Lu H Y, An Z S. Experimental study on the influence of pretreatment methods on particle size measurement of loess sediments[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2535-2538. [鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2535-2538.]

- [17] Chongyi E, Sohbati 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.
- [18] Sun Y B, Tada R, Chen J, et al. Tracing the provenance of fine-grained dust deposited on the central Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): 2007GL031672.
- [19] Újvári G, Varga A, Ramos F C, et al. Evaluating the use of clay mineralogy, Sr–Nd isotopes and zircon U–Pb ages in tracking dust provenance: An example from loess of the Carpathian Basin[J]. *Chemical Geology*, 2012, 304: 83-96.
- [20] Lim J, Matsumoto E. Bimodal grain-size distribution of aeolian quartz in a maar of Cheju Island, Korea, during the last 6500 years: Its flux variation and controlling factor[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(21): 2006GL027432.
- [21] Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation[J]. *Sedimentology*, 1987, 34(1): 139-153.
- [22] Zhang J, E C Y, Yang F, et al. OSL ages and pedogenic mode of *Kobresia* mattic epipedon on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2023, 223: 106912.
- [23] Zhang S Q, Chongyi E, Ji X B, et al. Soil genesis of alluvial parent material in the Qinghai Lake Basin (NE Qinghai–Tibet Plateau) revealed using optically stimulated luminescence dating[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(9): 1066.
- [24] Nottebaum V, Lehmkuhl F, Stauch G, et al. Regional grain size variations in aeolian sediments along the transition between Tibetan Highlands and north-western Chinese deserts—the influence of geomorphological settings on aeolian transport pathways[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(14): 1960-1978.
- [25] Xian B J, E C Y, Sun M P, 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. [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.]
- [26] Kaiser K, Miehe G, Barthelmes A, et al. Turf-bearing topsoils on the central Tibetan Plateau, China: Pedology, botany, geochronology[J]. *Catena*, 2008, 73(3): 300-311.
- [27] Wang Y B, Liu X Q, Han L, et al. Late Holocene climate variation on the northern Tibetan Plateau inferred from Lake Ayakum[J]. *Catena*, 2021, 207: 105599.
- [28] Eger A, Koele N, Caspari T, et al. Quantifying the importance of soil-forming factors using multivariate soil data at landscape scale[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(8): e2021JF006198.
- [29] Wang X Y, Vandenberghe D, Yi S W, et al. Late Quaternary paleoclimatic and geomorphological evolution at the interface between the Menyuan basin and the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2013, 80(3): 534-544.
- [30] Liu X J, Cong L, Li X Z, et al. Climate conditions on the Tibetan Plateau during the Last Glacial Maximum and implications for the survival of paleolithic foragers[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 606051.
- [31] Huang C, Lai Z P, Liu X J, et al. Lake-level history of Qinghai Lake on the NE Tibetan Plateau and its implications for Asian monsoon pattern - A review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 273: 107258.
- [32] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core[J]. *Science*, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [33] Shen J, Liu X Q, Wang S M, et al. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18, 000 years[J]. *Quaternary International*, 2005, 136(1): 131-140.
- [34] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50, 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 163-178.
- [35] Chen F H, Wu D, Chen J H, et al. Holocene moisture and East Asian summer monsoon evolution in the northeastern Tibetan Plateau recorded by Lake Qinghai and its environs: A review of conflicting proxies[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 111-129.
- [36] Xu C X, Chongyi E, Shi Y K, et al. Holocene aeolian activity recorded by mountain paleosols, Gonghe Basin, northeast

Qinghai-Tibet Plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 832993.

(责任编辑: 檀满枝)