

DOI: 10.11766/trxb201801090021

## 青海湖流域草甸土光释光年代学研究\*

鄂崇毅<sup>1</sup> 张晶<sup>1</sup> 吴成永<sup>1</sup> 孙永娟<sup>1, 2</sup> 孙满平<sup>1</sup> 闫文亭<sup>1</sup> 李萍<sup>1</sup>  
吕顺昌<sup>1</sup> 杨龙<sup>1</sup>

(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 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

**摘要** 高山草甸土是青藏高原的主要土壤类型, 其特征为土层薄、土壤发育微弱, 但由于土壤具体的发育时代尚不明晰, 限制了对草甸土成土过程和气候背景的理解。选取青海湖流域西南部的橡皮山顶草甸土两个剖面 (XPSD1、XPSD2) 和东南部的日月山垭口两个剖面 (RYS1、RYS2) 进行了光释光 (Optically Stimulated Luminescence, OSL) 年代学研究, 系统分析草甸土中颗粒 (38~63 μm) 石英单片再生法测年的可靠性, 探讨了草甸土发育的气候背景。结果表明: (1) OSL 测年方法可有效运用于高山草甸土的测年中, 释光自检验表明该测年结果可靠。(2) 四个剖面的年代结果显示, 现存的草甸土主要是晚全新世 (4~0 ka) 形成的, 可能是相对干冷气候下的产物, 其成土发育过程以风尘加积为主。(3) 橡皮山顶 2 号剖面底部的黄土母质年代为  $16.2 \pm 1.8$  ka, 与上部土壤呈假整合接触, 存在约 14 ka 的沉积间断。

**关键词** 青海湖; 高山草甸土; 光释光测年; 土壤年代学

**中图分类号** 153.6 **文献标识码** A

土壤是一系列成土因素 (母岩、活的和死的有机体、气候、陆地年龄与地形) 综合作用形成的历史自然体<sup>[1]</sup>, 当母质、生物、地形和气候四因素相同或相近条件下, 土壤性质的变化就成为随时间变化的函数<sup>[2]</sup>。因此, 土壤年代学是土壤科学研究的重要基础性科学问题。

青藏高原作为世界“第三极”, 对全球变暖异常敏感, 生态环境极其脆弱。草甸土 (又称草毡土、高寒草甸土等) 是青藏高原的主要土壤类型, 面积约  $1.2 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>, 占高原总面积的 35%<sup>[3]</sup>。第四纪晚期、末次冰消期 (距今 1.6 万年左右) 以后, 高原上的广大山地才从冰川覆盖下裸露出来, 因此, 土壤的绝对形成年龄应该比较短暂。此外,

高山草甸土因地处高寒环境, 在低温控制下, 生物与化学风化过程的强度小, 矿物风化速率低, 物质释放少、迁移弱, 土壤普遍表现为薄层性、粗骨性, B 层发育不明显, 其相对年龄也较轻<sup>[4-6]</sup>。以往由于测年手段有限, 有关青藏高原草甸土形成发育时代的报道较少, 草甸土形成发育的气候背景也不清晰。

传统的土壤测年主要是利用 <sup>14</sup>C 测年方法对土壤中的有机质进行测年, 然而由于土壤有机质在土体中随时间表现为持续的输入和分解状态, 加之草甸土土层较薄、植被根系发达, 下层土壤有机质的来源混合了过去土壤和现代植被的有机质, 采用传统的 <sup>14</sup>C 测年方法定年很可能导致土壤年代偏轻。

\* 国家自然科学基金项目 (41761042, 41361047) 和青海省自然科学基金项目 (2017-ZJ-901) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41761042, 41361047) and the Natural Science Foundation of Qinghai Province (No. 2017-ZJ-901)

作者简介: 鄂崇毅 (1979—), 男, 青海民和人, 博士, 教授, 主要从事第四纪沉积物年代学研究。E-mail: echongyi@163.com

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-03-29; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-06-01

而光释光 (Optically Stimulated Luminescence, OSL) 测年法的材料主要是构成土壤骨架的石英、长石等矿物颗粒, 一般采用 $38\ \mu\text{m}$ 以上的矿物颗粒进行测年, 避免了淋溶淀积作用的影响, 加之草甸土的发育模式以风尘加积型为主<sup>[7]</sup>, 风尘中的石英颗粒在传输过程中极易晒退, 因此保证了OSL测年的可靠性。对构成草甸土土壤骨架不同层位的石英进行OSL测年, 辅以有机质含量、化学风化指数等土壤发育指标即可限定出草甸土土壤发育的年代框架。目前OSL方法已经广泛应用于青藏高原第四纪沉积物测年当中, 青海湖流域风成沉积物利用OSL测年获得了可靠的年代结果<sup>[8-11]</sup>。已开展的大量风成沉积物OSL测年工作<sup>[12-17]</sup>, 多以风沙土、栗钙土为研究对象, 其侧重点在于区域环境演变重建<sup>[9, 18]</sup>, 但对广泛分布于高寒山地的草甸土OSL年代学研究甚少。因此, 本文在青海湖流域橡皮山和日月山共选取四个草甸土剖面进行系统的OSL年代学研究, 获取土壤发育的年代, 结合剖面土壤粒度组成、有机质含量等变化特征, 探讨草甸土的成土过程和气候背景。

## 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北缘, 东至日月山、西至阿木尼尼库山、北至大通山、南至青海南山, 土地总面积为 $2.97 \times 10^4\ \text{km}^2$ 。流域属高原亚寒带半湿润气候, 土壤类型有高山寒漠土、高山草甸

土、高山草原土和栗钙土等<sup>[19]</sup>, 大部分分布在高海拔或高山地区, 地形多为缓山坡、浑圆山顶、古冰碛平台等类型<sup>[20]</sup>, 该区冻融地貌较为发育。

### 1.2 土壤剖面与样品采集

选取位于青海湖西南部的橡皮山顶草甸土两个剖面XPSD1、XPSD2和东南部的日月山垭口草甸土两个剖面RYS1、RYS2为研究对象 (图1)。周围景观为高寒草甸, 占该流域总面积的20%~25%, 植被为线叶嵩草、小嵩草和矮嵩草, 盖度70%~90%<sup>[19]</sup>。橡皮山顶剖面周围广泛发育冻胀草丘、冻融滑塌等典型的冻融地貌。

XPSD1 ( $36^\circ 45' 3.55''\ \text{N}$ ,  $99^\circ 36' 34.05''\ \text{E}$ , 海拔3 830 m) 位于橡皮山顶垭口的南坡上, 坡度较缓约 $10^\circ$ , 剖面土层薄约0.45 m, 分层不明显, 表层20 cm为暗色草毡层且草根根系发达。分别在10 cm、30 cm处采集OSL样。

XPSD2 ( $36^\circ 45' 6.81''\ \text{N}$ ,  $99^\circ 36' 23.02''\ \text{E}$ , 海拔3 820 m) 位于橡皮山顶垭口G109公路南侧, 剖面约1.3 m, 土壤分层明显, 0~90 cm土样较松散, 110~125 cm夹有大量砾石, 砾石磨圆极差, 为尖棱状冰川角砾。分别在10 cm、30 cm、50 cm、70 cm、90 cm、110 cm处采集OSL样。

RYS1 ( $36^\circ 26' 1.88''\ \text{N}$ ,  $101^\circ 6' 38.29''\ \text{E}$ , 海拔3 455 m) 位于日月山垭口东侧, 剖面约1.3 m, 土壤分层明显, 表层20 cm为草毡层, 草根根系发达, 有白色假菌丝状, 质地为壤土, 20~60 cm土层为褐色, 质地为砂粉土, 60~130 cm土壤呈粒状结构, 稍紧实。分别在10 cm、20 cm、60

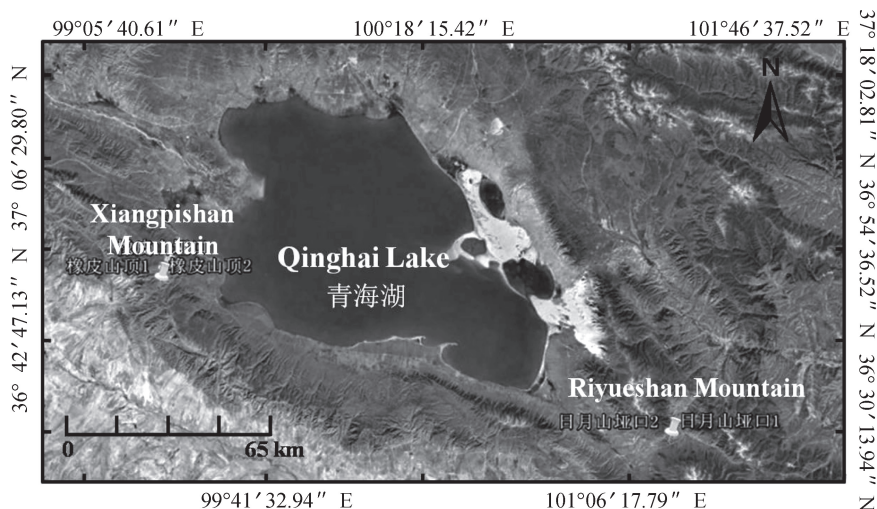


图1 橡皮山顶1、2剖面 and 日月山1、2剖面在青海湖流域的位置

Fig. 1 Geographic locations of Soil Profile XPSD1, XPSD2, RYS1 and RYS2 in the Qinghai Lake Valley

cm、130 cm处采集OSL样。

RYS2 (36° 25' 55.17" N, 101° 6' 44.30" E, 海拔3 429 m) 位于日月山垭口G109公路北侧, 整体深度为0.7 m, 颜色较为均一呈棕色, 分层不明显, 表层30 cm存在植被根系, 30~70 cm土样较松散, 70 cm以下含砾石。分别在10 cm、20 cm、40 cm、70 cm处采集OSL样。

四个剖面共采集16个OSL样品。此外, 为分析土壤理化特征, 自上而下以5 cm为间隔采集了58个土壤散样。

### 1.3 土壤理化分析

土壤理化分析主要基于土壤散样的粒度机械组成和有机质含量特征进行分析, 其中用粒度表征土壤质地, 有机质含量评价土壤发育强度。粒度和有机质均在青海省自然地理与环境过程重点实验室完成。粒度前处理采用鹿化煜和安芷生<sup>[21]</sup>的方法, 分别用10%双氧水、10%稀盐酸去除土样的有机质和碳酸盐, 再加分散剂后使用英国马尔文公司制造的Mastersizer2000仪器进行粒度测试, 该粒度仪测量范围为0.02~2 000  $\mu\text{m}$ , 最终分析其颗粒组成特征。土壤有机质含量采用重铬酸钾-硫酸消化法进行测定。

### 1.4 样品OSL测年

OSL测年在青海省自然地理与环境过程重点实验室-释光年代学室进行。鉴于土壤样品粒度组分以粉砂为主, 等效剂量 ( $D_e$ ) 获取采用中颗粒 (38~63  $\mu\text{m}$ ) 和粗颗粒 (63~90  $\mu\text{m}$ ) 石英单片再生法<sup>[22]</sup> (single-aliquot-regenerative-dose protocol, SAR), 石英提纯采用氟硅酸浸泡。测试仪器为Risø TL/OSL-DA-20-C/D型热/光释光仪, 该仪器辐照源为人工 $\beta$ 源 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , 每秒辐照剂量率为 $0.129 \pm 0.002$  Gy。

环境剂量率根据铀、钍、钾的含量进行计算, 铀、钍、钾的含量采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 获取, 再根据Guérin等<sup>[23]</sup>在2012年发表的转换参数计算干剂量率, 中颗粒石英 $\alpha$ 效率采用0.35<sup>[24]</sup>, 宇宙射线对剂量率的贡献根据Prescott和Hutton<sup>[25]</sup>给出的公式计算。鉴于橡皮山和日月山海拔较高, 降水量较大, 蒸发量相对较少, 冻土发育, 最终计算年代含水量采用 $15\% \pm 7\%$ 。

## 2 结 果

### 2.1 样品释光特征

以橡皮山顶样品XPSD2-2为例系统分析草甸土OSL信号衰减曲线 (图2a)、生长曲线 (图2b) 和预热坪 (图2c) 发现: 释光信号较强且在前2 s快速衰减到背景值, 呈现出典型的石英快组分信号特征。XPSD2-2样品进行预热温度坪实验, 发现预热温度在180~260  $^{\circ}\text{C}$ 时 $D_e$ 值较一致, 有一个明显的坪区; 且循环比在0.9~1.1之间, 基本接近于1; 而零剂量恢复在 $\pm 4\%$ , 稳定于0%~2% (图2c)。鉴于预热温度在240  $^{\circ}\text{C}$ 时, 等效剂量误差较小、循环比稳定在0.9~1.1之间、零剂量恢复误差也较小, 所以最终选择该温度为预热温度, 对所有样品采用该预热条件获取等效剂量 $D_e$ 值。为了检验预热条件对所有样品适用性, 对获得的所有样品在240  $^{\circ}\text{C}$ 预热条件下 $D_e$ 值进行了等效剂量恢复实验, 发现测得的 $D_e$ 值和给定的 $D_e$ 值比值介于0.9~1.1之间, 说明选取的预热条件是合适的, 该预热条件下获得的 $D_e$ 值是稳定可靠的。剂量率结果 (表1、表2) 表明: 土壤中的U、Th、K元素含量在剖面内变化较小, 介于 $3.13 \pm 0.13 \sim 3.61 \pm 0.38$   $\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ 之间, 说明其物质来源较为稳定均一, 环境剂量率较为稳定。

### 2.2 草甸土OSL年代结果

土壤剖面不同发生层年代结果通过等效剂量除以环境剂量率获取, 最终年代结果见表1、表2。RYS1、RYS2和XPSD1均表现为上新下老的地层层序。土层较厚的XPSD2剖面从表层至70 cm处年代依次为 $2.6 \pm 0.1$  ka、 $1.1 \pm 0.2$  ka、 $0.7 \pm 0.1$  ka、 $0.6 \pm 0.1$  ka, 发生了倒置, 沉积序列上老下新, 90 cm之后土层沉积序列正常, 90 cm处 $2.5 \pm 0.3$  ka, 底部110 cm处突变为 $16.2 \pm 1.8$  ka, 指示了将近14 ka的沉积间断, 造成这种现象可能与遭受侵蚀有关。底部110 cm样品位于黄土母质层, 其下部为冰川角砾混杂堆积物, 该年代与青藏高原现有的风成沉积物底界年龄一致<sup>[9, 26-27]</sup>, 为末次冰消期沉积物, 末次冰消期和全新世早期是青藏高原重要的风沙活动期和风尘快速堆积期<sup>[28-29]</sup>, 这些风尘物质的沉积为土壤发育提供了重要母质。这些母质在不同气候条件下, 随不同植被的作用, 在不同地形位

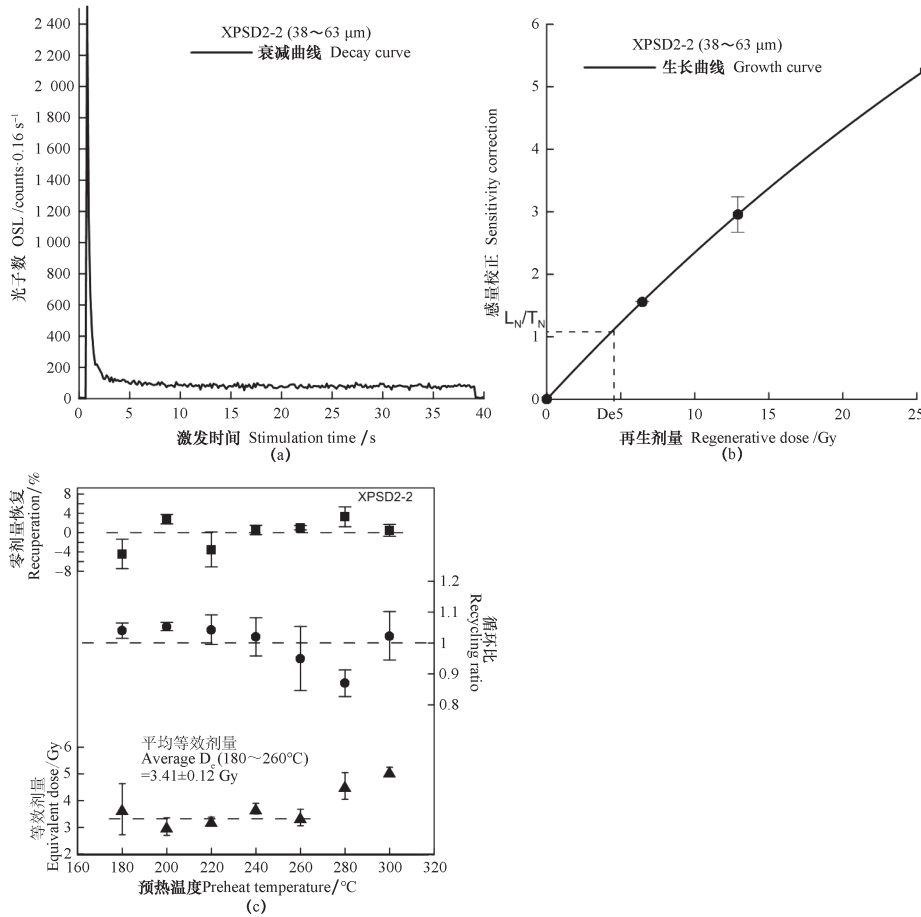


图2 XPSD2-2的衰减曲线(a)、生长曲线(b)和预热坪实验(c)

Fig. 2 Decay (a) /growth curves of the sample (b) and Preheat plateau of the sample (c) from Profile XPSD2-2

置形成不同的土壤类型。鉴于草甸土典型特征是强烈的生草化过程和有机质累积过程，草甸土剖面表层形成草毡层，草毡层下部随时间差异形成不同厚度的腐殖质层，腐殖质层一般直接披覆在不同母质甚至母岩之上，缺乏淋溶淀积层。因此，不同剖面草甸土的发育时代，以剖面中腐殖质层下部OSL年代或腐殖质层与母质层交界处的OSL年代来指示，

土壤剖面发生层的详细划分及其年代结果见图3。剖面结果指示：XPSD1草甸土是0.9 ka以来形成的，XPSD2是2.5 ka以来形成的，RYS1是3.2 ka以来形成的，RYS2是3.7 ka以来形成的。土壤厚度不同其发育时代也不同，厚层土壤其发育时代相对较久。综合四个剖面数据，青海湖流域草甸土主要是在全新世晚期（4~0 ka）发育的。

表1 橡皮山顶剖面的样品信息、环境剂量率及年代结果

Table 1 Sample information, environmental dosage and OSL dating of Profile XPSD

样品 Sample	深度 Depth/m	U /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Th /(mg·kg <sup>-1</sup> )	K/%	年剂量率 Dose rate/(Gy·ka <sup>-1</sup> )	测片 Discs	等效剂量 Equivalent dose/Gy	年代 Age/ka
XPSD1-1	0.1	2.05 ± 0.4	11.48 ± 0.7	1.76 ± 0.04	3.13 ± 0.13	18	0.98 ± 0.10	0.3 ± 0.1
XPSD1-2	0.3	1.84 ± 0.3	12.08 ± 0.7	1.90 ± 0.04	3.21 ± 0.50	17	2.76 ± 0.20	0.9 ± 0.2
XPSD2-1	0.1	2.10 ± 0.4	11.63 ± 0.7	1.90 ± 0.04	3.27 ± 0.13	15	8.62 ± 0.76	2.6 ± 0.1
XPSD2-2	0.3	2.39 ± 0.4	12.01 ± 0.7	1.91 ± 0.04	3.38 ± 0.51	18	3.80 ± 0.15	1.1 ± 0.2
XPSD2-3	0.5	2.42 ± 0.4	11.72 ± 0.7	1.93 ± 0.04	3.37 ± 0.40	18	2.52 ± 0.11	0.7 ± 0.1
XPSD2-4	0.7	2.97 ± 0.4	13.53 ± 0.7	1.92 ± 0.04	3.61 ± 0.38	18	2.28 ± 0.09	0.6 ± 0.1
XPSD2-5	0.9	2.34 ± 0.4	13.16 ± 0.7	2.00 ± 0.04	3.49 ± 0.36	18	8.54 ± 0.39	2.5 ± 0.3
XPSD2-6	1.1	2.37 ± 0.4	12.62 ± 0.7	1.98 ± 0.04	3.43 ± 0.34	18	55.36 ± 2.83	16.2 ± 1.8

表2 日月山垭口剖面的样品信息、环境剂量率及年代结果

Table 2 Sample information, environmental dosage and OSL dating of Profile RYS

样品 Sample	深度 Depth/m	U /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Th /(mg·kg <sup>-1</sup> )	K/%	年剂量率 Dose rate/(Gy·ka <sup>-1</sup> )	测片 Discs	等效剂量 Equivalent dose/Gy	年代 Age/ka
RYS1-1	0.1	2.49 ± 0.4	14.92 ± 0.7	1.66 ± 0.04	3.26 ± 0.13	14	0.85 ± 0.07	0.26 ± 0.02
RYS1-2	0.2	2.27 ± 0.4	11.72 ± 0.7	2.01 ± 0.04	3.29 ± 0.13	14	2.80 ± 0.27	0.85 ± 0.09
RYS1-3	0.6	2.41 ± 0.4	10.78 ± 0.7	2.01 ± 0.04	3.18 ± 0.13	15	6.01 ± 0.27	1.89 ± 0.12
RYS1-4	1.3	2.45 ± 0.4	13.15 ± 0.7	2.00 ± 0.04	3.29 ± 0.14	15	10.61 ± 0.46	3.23 ± 0.20
RYS2-1	0.1	2.38 ± 0.4	15.33 ± 0.7	1.89 ± 0.04	3.30 ± 0.13	15	1.98 ± 0.12	0.60 ± 0.05
RYS2-2	0.2	2.42 ± 0.4	12.86 ± 0.7	2.00 ± 0.04	3.37 ± 0.14	15	3.20 ± 0.43	0.95 ± 0.13
RYS2-3	0.4	2.09 ± 0.4	9.39 ± 0.6	1.93 ± 0.04	2.99 ± 0.12	15	5.77 ± 0.12	1.93 ± 0.10
RYS2-4	0.7	2.38 ± 0.4	15.10 ± 0.7	2.01 ± 0.04	3.43 ± 0.14	14	12.66 ± 0.48	3.69 ± 0.22

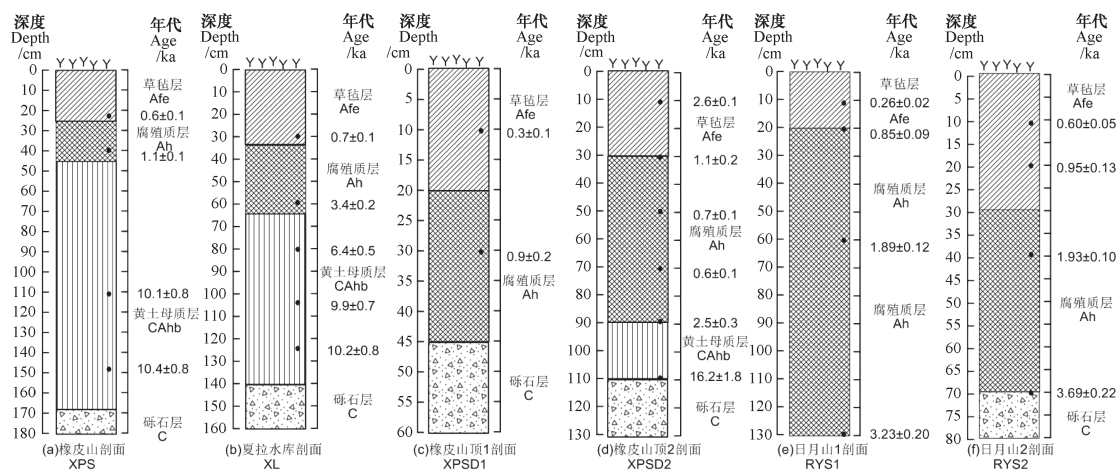


图3 XPS (a) [16]、XL (b) [16]、XPSD1 (c)、XPSD2 (d)、RYS1 (e)、RYS2 (f) 剖面土壤发生层划分与年代  
 Fig. 3 Delineation of soil genetic layers and OSL dating of Profile XPS (a) [16], XL (b) [16], XPSD1 (c), XPSD2 (d), RYS1 (e) and RYS2 (f)

### 3 讨论

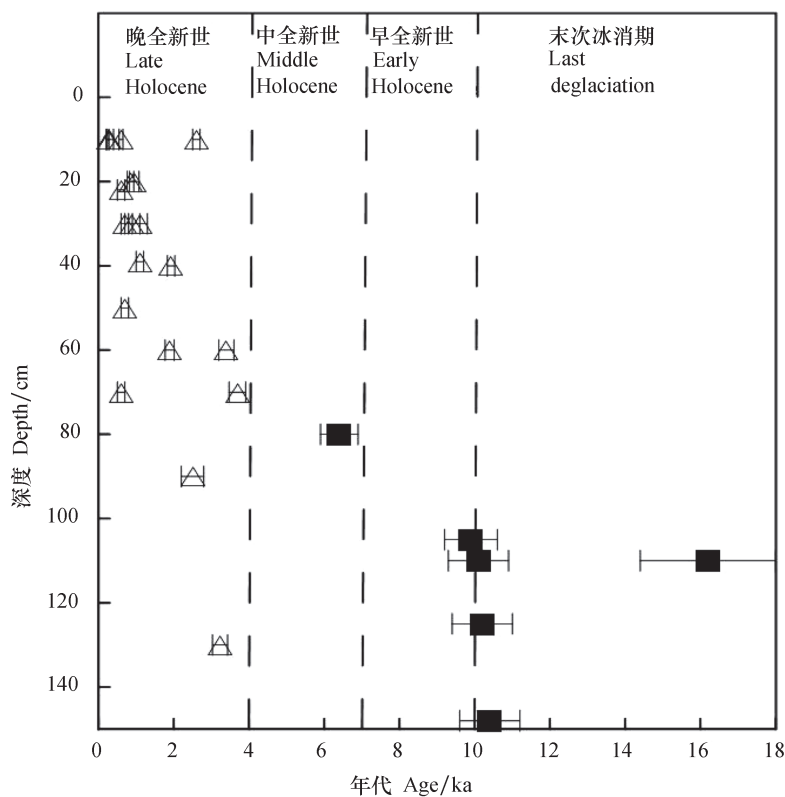
#### 3.1 青海湖草甸土成土年代及其气候背景

依据前人对青海南山橡皮山 (XPS) 和夏拉水库 (XL) 草甸土剖面的年代结果和本文结果 (图3), 发现青海湖草甸土主要是晚全新世 (约 4 ka) 以来发育的。草甸土发育的气候背景可通过该区环境演变记录获取。根据青海湖钻孔 [30] 的记录, 青海湖气候在早全新世暖干, 青海湖水位较现在水位 (2016年约达 3 194 m) 低约 8 m, 风沙活动强烈, 青海湖水温较现代水温 (2016年约达 13.3 °C) 高出 0.3 ~ 0.5 °C; 中全新世 7 ~ 5 ka 左右达到最适宜期, 青海湖水位高出现代水位 17 ~ 18 m, 温度较现代高出 1.8 °C; 到晚全新世逐渐变冷

变干, 水温与现代接近, 且变率较小仅为 0.2 °C 左右, 水位逐渐波动降低至现今水位。该区现存高寒草甸土年代集中在晚全新世以来 (图4), 结合上述气候变化特征, 草甸土可能是在全新世晚期相对干冷气候下形成。这可能是由于干冷气候背景下山地周缘相对低海拔的盆地区域风尘大量释放, 高海拔山地气候相对较冷但由于地形效应降雨量高于周围盆地, 有效湿度较高, 山地上低矮的草甸植被扮演了风尘“捕获器”的角色, 风尘堆积速率增强, 土壤边发育边接受风尘堆积, 以典型的风尘加积型发育模式为主。XPSD1、XPSD2、RYS1和RYS2剖面土壤粒度频率曲线呈双峰态分布, 主峰峰值粒径分布在 40 ~ 50 μm 的粗粉砂范围, 次峰峰值为 4 ~ 16 μm 的细粉砂范围 (图5a), 可能指示青海

湖风尘输入以近源输入为主、远源输入为辅。四个剖面所有样品的粒度组成三角图(图5b),均以粉砂为主,体积含量占50%~75%;砂粒次之,为10%~40%;黏粒最少,约占10%~20%,根据中

国土壤质地分类标准,可划归为砂粉土。类似的风尘加积下草甸土发育模式在西藏安多地区也有发现<sup>[7]</sup>,但高原草甸土主体是否均为此类发育模式,还需在更多流域更多剖面进行系统研究。



△, 腐殖质层及草毡层的年代Age of the humus layer and grass felty layer; ■, 黄土母质层的年代Age of the layer between humus layer and gravels layer

图4 青海湖流域草甸土发生层年代

Fig. 4 Dating of the genetic layer of the meadow soil in the Qinghai Lake basin

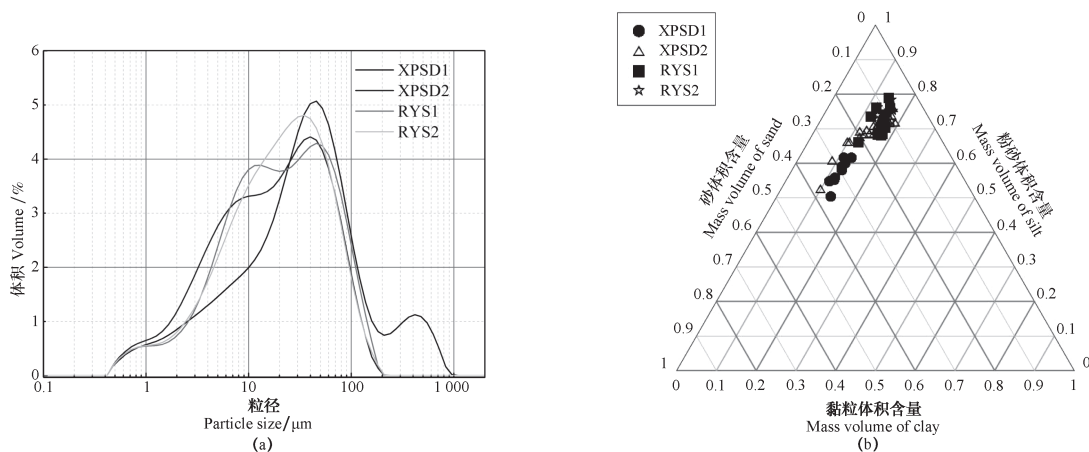


图5 XPSD1、XPSD2、RYS1和RYS2剖面草甸土的粒径分布(a)与土壤机械组成(b)

Fig. 5 Particle size distribution (a) and soil mechanical composition of the meadow soils (b) in Profile XPSD1, XPSD2, RYS1 and RYS2

### 3.2 XPSD2土壤年代倒置与风尘母质间断

本研究中处在山丘顶部的XPSD1、RYS1、RYS2剖面地层年代遵循上新下老的地层层序，但处在垭口处的XPSD2剖面地层年代出现了倒置现象。XPSD2表层10 cm处土壤的年代 ( $2.6 \pm 0.1$  ka) 较下部70 cm处 ( $0.6 \pm 0.1$  ka) 老2.0 ka，且自表层至下部年代逐渐变轻，这可能与局部冻融侵蚀有关。据研究区附近刚察、共和两个气象站统计，该区极端温差可达35℃，土壤常年处于冻融交替状态<sup>[31]</sup>。随着冻土层上部解冻，融水使主要由细粒土组成的表层物质达到饱和或过饱和状态，进而上层土壤具有一定的可塑性且表土变得松散，而下层冻土形成一个相对的不透层，当上下两层间的滑动力大于摩擦力时，土体沿着融冻界面向下蠕动，发生冻融滑塌、冻融泥流等侵蚀过程<sup>[32]</sup>。而草甸土表层由10~20 cm厚、根系密集的草毡层组成，不易被彻底破坏，往往呈鳞片状破碎，草毡层在冻融作用下被搬运至就近相对低洼或平坦的地方沉积，多次冻融和搬运作用下，有可能出现上老下新的现象。XPSD2剖面附近分布的鳞片状土块相互叠加覆压，也证明在冻融侵蚀区出现地层年代倒置是有可能的。此外，该剖面有机质含量也间接证实OSL年代的可靠性。通常，青藏高原土壤的有机质含量最高值一般出现在5~20 cm深度，这与该区有机质来源主要依赖地下根系有关<sup>[33]</sup>。XPSD1和RYS1、RYS2剖面的有机质高值均出现在5~10 cm，与区域土壤有机质深度分布规律一致。而XPSD2的有机质最大值出现在65 cm处，为 $139 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，呈现异常（图6）。以本文地层OSL年代结果为序，对XPSD2剖面地层进行重新排序，发现最年轻地层对应的有机质含量也达到剖面的最高值，完全符合区域有机质分布规律。这说明了OSL测年方法的可靠性，也表明该方法在检测土壤地层异常（滑塌、侵蚀等）方面具有潜力。

此外，XPSD2剖面底部的年代从90 cm处  $2.5 \pm 0.3$  ka跳跃至110 cm深度的  $16.2 \pm 1.8$  ka，指示了非常明显的间断。而类似间断在常秋芳等<sup>[16]</sup>研究的橡皮山剖面 ( $36^{\circ} 46' 33.32'' \text{ N}$ ,  $100^{\circ} 41' 57.38'' \text{ E}$ , 3361 m) 中也有发现（图3a）。XPS草甸土下覆的黄土母质层集中在10 ka左右，而其上部土壤层为近1 ka发育形成。这可能

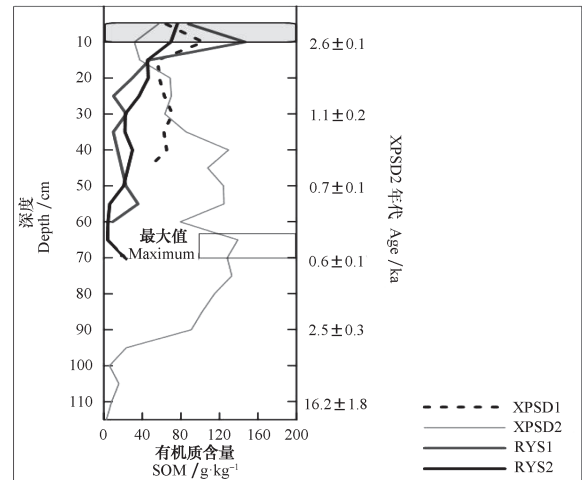


图6 XPSD1、XPSD2、RYS1和RYS2剖面有机质含量随深度变化曲线

Fig. 6 Variation of soil organic matter content with depth in Profile XPSD1, XPSD2, RYS1 and RYS2

是由于草甸土作为山地土壤，所处海拔较高，位于明显的正地形当中，易受外力侵蚀。在地质历史时期，风尘沉积、风蚀与冻融侵蚀频繁交替，故导致部分处在坡地的土壤更容易遭受侵蚀。

## 4 结论

通过土壤发生学理论，对所研究的青海湖流域草甸土剖面进行了土壤发生层划分，主要为：草毡层（Afe）、腐殖质层（Ah）、黄土母质层（CAhb）和砾石层（C）。系统的OSL测年与自检表明：OSL方法可以准确获取高山草甸土不同土壤发生层的年代。以腐殖质层底界或其与黄土母质层交接处OSL年代作为草甸土形成的起讫时间，发现草甸土的年代均为晚全新世4 ka以来。结合青海湖钻孔重建的气候环境演变记录，发现草甸土可能是在相对干冷的气候背景下发育的。XPSD2剖面上部草甸土与下部黄土母质呈明显的平行不整合接触，地层年代呈现突变，记录了约14 ka的缺失，说明该区草甸土很可能存在广泛的沉积间断。XPSD2的表层与70 cm之间土壤年代倒置，冻融侵蚀可能是其诱因，青海湖流域高海拔草甸土是否广泛存在类似的侵蚀，有待更多剖面的验证。

## 参考文献

- [1] 陈怀满. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2010

- Chen H M. Environmental soil science (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [ 2 ] Jenny H. The soil resource: Origin and behavior. New York: Springer-Verlag, 1984: 102
- [ 3 ] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 ( 2 ) : 237—243
- [ 4 ] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化. 北京: 科学出版社, 2009: 1—40  
Zhao X Q. Ecological of alpine meadow ecosystem and the global change (In Chinese). Beijing: Science Press, 2009: 1—40
- [ 5 ] Kaiser K, Schoch W H, Mische G. Holocene paleosols and colluvial sediments in Northeast Tibet ( Qinghai Province, China ) : Properties, dating and paleoenvironmental implications. *Catena*, 2007, 69 ( 2 ) : 91—102
- [ 6 ] 严振英, 李浩. 试论高山草甸土及其与草畜的关系. 甘肃农业科技, 1994, ( 12 ) : 29—30  
Yan Z Y, Li H. The research of alpine meadow soil and its relation with grass-livestock (In Chinese). *Agricultural Science and Technology of Gansu*, 1994, ( 12 ) : 29—30
- [ 7 ] 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. *山地学报*, 2012, 30 ( 6 ) : 709—720  
Lin Y C, Feng J L, Zhang J F, et al. Origin of parent materials and pedogenesis of alpine meadow soils in Amdo, Northern Tibetan Plateau (In Chinese). *Journal of Mountain science*, 2012, 30 ( 6 ) : 709—720
- [ 8 ] Lu H Y, Zhao C F, Joseph M, et al. Holocene climatic changes revealed by aeolian deposits from the Qinghai Lake area ( northeastern Qinghai-Tibetan Plateau ) and possible forcing mechanisms. *Holocene*, 2011, 21 ( 2 ) : 297—304
- [ 9 ] Liu X J, Lai Z P, Yu L P, et al. Luminescence chronology of aeolian deposits from the Qinghai Lake area in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoenvironmental implications. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 37—43
- [ 10 ] Lu R J, Jia F F, Gao S Y, et al. Holocene aeolian activity and climatic change in Qinghai Lake basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 430: 1—10
- [ 11 ] E C Y, Lai Z P, Hou G L, et al. Age determination for a Neolithic site in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau using a combined luminescence and radiocarbon dating. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 411—415
- [ 12 ] 鹿化煜, 马海州, 谭红兵, 等. 西宁黄土堆积记录的最近13万年高原季风气候变化. *第四纪研究*, 2001, 21 ( 5 ) : 416—426  
Lu H Y, Ma H Z, Tan H B, et al. Plateau Monsoon variations during the past 0. 13 Ma indicated by loess deposit at Xining, Northeast Qinghai, China (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2001, 21 ( 5 ) : 416—426
- [ 13 ] Liu X J, Xiao G Q, E C Y, et al. Accumulation and erosion of aeolian sediments in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and implications for provenance to the Chinese Loess Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 166—174
- [ 14 ] Liu X J, Lai Z P, Fan Q S, et al. Timing for high lake levels of Qinghai Lake in the Qinghai-Tibetan Plateau since the Last Interglaciation based on quartz OSL dating. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5 ( 2/3 ) : 218—222
- [ 15 ] Sun Y J, E C Y, Lai Z P, et al. Luminescence dating of prehistoric hearths in Northeast Qinghai Lake and its paleoclimatic implication. *Archaeological & Anthropological Sciences*, 2017, DOI: 10. 1007/s12520-017-0472-y
- [ 16 ] 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. *盐湖研究*, 2016, 24 ( 2 ) : 54—61  
Chang Q F, Lu B L, Lai Z P, et al. The optically stimulated luminescence study of aeolian deposits in Qinghai South Mountain (In Chinese). *Journal of Salt Lake Research*, 2016, 24 ( 2 ) : 54—61
- [ 17 ] 王玉伟. 青海湖地区黄土光释光测年及其环境意义. 北京: 中国科学院研究生院, 2011  
Ma Y W. Optically Stimulated Luminescence chronology for the loess in the Qinghai Lake and its palaeoenvironmental implications (In Chinese). Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011
- [ 18 ] 赵存法, 鹿化煜, 周亚利, 等. 青海湖地区冰消期以来气候变化的黄土记录. *高校地质学报*, 2009, 15 ( 1 ) : 135—140  
Zhao C F, Lu H Y, Zhou Y L, et al. Palaeoclimate changes recorded by loess deposit around Qinghai Lake (Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau) since last deglaciation (In Chinese). *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15 ( 1 ) : 135—140



- [19] 青海省地方志编纂委员会. 青海省志: 青海湖志. 西宁: 青海人民出版社, 1998: 41—44  
Editorial Board of Local Chronicles of Qinghai Province. Qinghai Province Local Chronicles-Qinghai Lake records (In Chinese). xining: Qinghai People's Publishing House, 1998: 41—44
- [20] 左克成, 乐炎舟. 青海高山草甸土的形成及其肥力评价. 土壤学报, 1980, 17(4): 308—318  
Zuo K C, Le Y Z. Formation and fertility of the alpine meadow soil in Qinghai Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1980, 17(4): 308—318
- [21] 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. 科学通报, 1997, 42(23): 2535—2538  
Lu H Y, An Z S. Experimental study of pretreatment methods on the measurement of grain size distribution of loess sediment (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2535—2538
- [22] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. Radiation Measurements, 2000, 32(1): 57—73
- [23] Guérin G, Mercier N, Nathan R, et al. On the use of the infinite matrix assumption and associated concepts: A critical review. Radiation Measurements, 2012, 47(9): 778—785
- [24] Lai Z P, Zöller L, Fuchs M, et al. Alpha efficiency determination for OSL of quartz extracted from Chinese loess. Radiation Measurements, 2008, 43(2/6): 767—770
- [25] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations. Radiation Measurements, 1994, 23(2/3): 497—500
- [26] 鄂崇毅, 曹广超, 候光良, 等. 青海湖江西沟黄土记录的环境演变. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 193—200  
E C Y, Cao G C, Hou G L, et al. The environmental change recorded in Jiangxigou Loess sections in Qinghai Lake region (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(4): 193—200
- [27] Stauch G. Multi-decadal periods of enhanced aeolian activity on the north-eastern Tibet Plateau during the last 2ka. Quaternary Science Reviews, 2016, 149: 91—101
- [28] Stauch G. Geomorphological and palaeoclimate dynamics recorded by the formation of aeolian archives on the Tibetan Plateau. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 393—408
- [29] 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. Quaternary Science Reviews, 2016, 154: 111—129
- [30] 张彭熹, 张保珍, 钱桂敏, 等. 青海湖全新世以来古环境参数的研究. 第四纪研究, 1994, 14(3): 225—238  
Zhang P X, Zhang B Z, Qian G M, et al. The study of paleoclimatic parameter of Qinghai Lake since Holocene (In Chinese). Quaternary Sciences, 1994, 14(3): 225—238
- [31] 董瑞琨, 许兆义, 杨成永. 青藏高原的冻融侵蚀问题. 人民长江, 2000, 31(9): 39—41  
Dong R K, Xu Z Y, Yang C Y. Freeze-thaw erosion problems on the Qinghai-Tibet Plateau (In Chinese). Yangtze River, 2000, 31(9): 39—41
- [32] 范昊明, 李贵圆, 周丽丽, 等. 冻融作用对草甸土物理力学性质的影响. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(1): 114—117  
Fan H M, Li G Y, Zhou L L, et al. Effect of Freeze-Thaw on Physical and Mechanical Properties of Meadow Soil (In Chinese). Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(1): 114—117
- [33] 青海省农业资源区划办公室编. 青海土壤. 北京: 中国农业出版社, 1997: 68—69  
Office of Agricultural Resources and Regional Planning in Qinghai Province. The soil of Qinghai (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1997: 68—69

## Study of Chronology of the Meadow Soil in the Qinghai Lake Basin by Means of Optically Stimulated Luminescence

E Chongyi<sup>1</sup> ZHANG Jing<sup>1</sup> WU Chengyong<sup>1</sup> SUN Yongjuan<sup>1,2</sup> SUN Manping<sup>1</sup> YAN Wenting<sup>1</sup>  
LI Ping<sup>1</sup> LÜ Shunchang<sup>1</sup> YANG Long<sup>1</sup>

(*1 School of Geographical Science, Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes of Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xining 810008, China*)

(*2 Qinghai Salt Lake Institution, Chinese Academic Science, Xining 810008, China*)

**Abstract** 【Objective】 Soil chronology is of great pedogenetic significance, for it is closely related to the forming and developing processes of a soil. In this paper, the Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating method was employed to determine age of the alpine meadow soil in the Qinghai Lake basin on the northeast fringe of the Qingzang Plateau. Four alpine meadow soil profiles (XPSD1, XPSD2, RYS1 and RYS2) were prepared for dating. Adaptability and reliability of the OSL dating method for alpine meadow soils in the Qinghai Lake basin was evaluated. Pedogenic process and its climatic background were also discussed. 【Method】 The silt-sized (38 ~ 63  $\mu\text{m}$ ) quartz OSL single-aliquot regenerative (SAR) dose protocol was used to acquire equivalent dose ( $D_e$ ). OSL signals of all the samples decayed very quickly, displaying characteristics of the signals of the typical fast quartz fraction. The preheating test set 240  $^{\circ}\text{C}$  as preheating temperature. All  $D_e$  distributed quite concentratively, showing a Gaussian distribution curve, which demonstrates that the quartz particles in the profile of Xiangpishan were well bleached before deposition. Environmental dose rates were determined using the inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Eventually age of the meadow soil of the profile was determined. In addition, development of the soil was characterized through analysis of particle size and organic matter content of the soil. 【Result】 According to the theory of pedogenesis, the genetic horizon of the meadow soil could be divided into grass felty layer (Afe), humus layer (Ah), parent material layer overlapped with a humus layer (CAhb) and parent rock layer (C). The bottom of XPSD1, XPSD2, RYS1 and RYS2 dated back  $0.9 \pm 0.1$  ka,  $16.2 \pm 1.8$  ka,  $3.2 \pm 0.2$  ka and  $3.7 \pm 0.2$  ka, respectively. The parent materials of the alpine meadow soil in the Qinghai Lake basin was mainly of aeolian loess deposit, with 50% ~ 75% of silt, 10% ~ 40% of sand and 10% ~ 20% of clay, so the soil is sorted as sandy silt. The aeolian dust plays an important role in the pedogenetic process of the alpine meadow soil in the Qinghai Lake basin. Considering the alpine meadow soil features strong grass and humus accumulation, the OSL of the bottom of the Ah layer or the interface between the Ah and CAhb layers is used as indicator for dating of the alpine meadow soil. The OSL dating results demonstrate that the meadow soil in the Qinghai Lake basin developed mainly during late Holocene (4 ~ 0 ka). The phenomenon of an inverted chronosequence of old upper layer ( $2.6 \pm 0.1$  ka) and new bottom layer (70 cm depth,  $0.6 \pm 0.1$  ka) was discovered at Profile XPSD2, which could probably be attributed to the effect of freezing and thawing erosion. 【Conclusion】 The OSL dating method is validated to be adaptable and reliable for dating alpine meadow soils. The alpine meadow soil in the Qinghai Lake basin is derived from aeolian deposits, and follows the mode of aeolian dust aggradation in soil development. The alpine meadow soil in the Qinghai Lake basin formed mainly during the late Holocene (4 ~ 0 ka) and is

might be a product of dry and cold climate, taking into account the environmental records of the region. In profile XPSD2, the bottom loess parent material layer goes in parallel unconformable contact with the upper soil layer, showing a deposition hiatus of ~ 14 ka.

**Key words** Qinghai Lake; Alpine meadow soils; OSL dating; Soil Chronology

(责任编辑：卢 萍)