

藏北高原安多地区高山草甸土的母质成因 及其成土模式

林永崇^{1 2 3} 冯金良^{1 2*} 张继峰^{1 2 3} 鞠建廷^{1 2} 胡兆国⁴ 高少鹏^{1 2}

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 山东 济南 250101)

摘 要: 基于对藏北高原安多地区高山草甸土的粒度组成及理化性质的研究, 探讨了该地区高山草甸土的母质成因及成土模式。分析结果表明, 安多地区高山草甸土的粒度分布以 20 μm 为界线呈双峰态分布。主峰峰值粒径在 90 μm 左右, 较细峰呈宽阔细尾分布, 峰值粒径在 3 ~ 6 μm 之间。高山草甸土的各粒级组成(< 2 μm 、2 ~ 20 μm 、20 ~ 300 μm 、300 ~ 2 000 μm) 沿剖面变化很小。高山草甸土主要由极细砂组成(50 ~ 125 μm), 平均粒径集中在 60 ~ 90 μm , 明显比黄土高原黄土、川西黄土、成都粘土的粗。高山草甸土粒度分布特征与土壤底部的薄层粗骨性残留古风化层相比存在显著差别, 而与该区域河谷沉积、风尘沉积具有相似的特征。总之, 各实验数据指示, 安多地区高山草甸土具有土层厚、质地均匀、无砾石和层理不发育的特点, 与基岩原地风化形成的高山草甸土存在明显差别, 其成土母质来源于风尘沉积。该区高山草甸土成土过程符合风尘“加积型”土壤发育模式, 而风尘沉积在高山草甸土的形成和发育过程中发挥了重要的作用。

关键词: 藏北高原; 高山草甸土; 粒度组成; 风尘沉积; 土壤发育

中图分类号: S155.2⁺92

文献标识码: A

高山草甸土, 又称草毡土、高寒草甸土等, 它是高原和高山低温、中湿及高寒草甸植被下发育的土壤类型^[1]。在青藏高原, 高山草甸土是主要的土壤类型之一^[2], 其大都分布在海拔 4 400 ~ 5 500 m 的范围内, 发育于高原亚寒带半湿润气候条件下^[3]。青藏高原高山草甸土可分为: 原始高山草甸土、高山草甸土、碳酸盐高山草甸土、潜育化高山草甸土 4 个亚类^[1]。该类型土壤成土母质变化很大, 主要为冰碛物、冰水沉积物、冲积物、坡积残积物等, 土壤普遍具有薄层性(30 ~ 60 cm) 和粗骨性特点^[3]。土壤中砂、砾石含量较多, 并随深度增加而显著增加^[4-6]。

此外, 高山草甸土的土壤发育程度较低, 土壤剖面大都呈 As - A1 - C/D 结构, B 层发育不明显^[1]。成土过程以强烈的生草化为主, 表层 10 ~ 25 cm 为草毡层(As), 根系交织得极为紧密, 容重较小。

野外调查发现, 藏北安多地区高山草甸土土层较厚(60 ~ 120 cm), 表层 15 ~ 25 cm 为根系交织的草毡层, 土壤底部大都存在一个明显的残留古风化层^[7]; 整个土壤剖面质地十分均匀, 且较为疏松, 与其他高山草甸土中整个土壤剖面富含砾石的现象存在较大差异^[1 3]; 因此, 对于安多地区高山草甸土的成土母质的来源及其成土过程值得特别关注。

收稿日期(Received date): 2011 - 12 - 26; 改回日期(Accepted): 2012 - 03 - 19。

基金项目(Foundation item): 1. 国家自然科学基金(项目编号: 41171008) 2. 中国科学院战略性先导科技专项“农田土壤人为固碳过程与建模研究”(项目编号: XDA05050507) 资助。[Supported by 1. National Nature Science Foundation of China. Grant no. 41171008; 2. “Strategic Priority Research Program - Climate Change: Carbon Budget and Related Issues” of the Chinese Academy of Sciences, Grant no. XDA05050507.]

作者简介(Biography): 林永崇(1983 -), 男(汉族), 硕士研究生。主要研究方向: 地貌过程与沉积。[Lin Yongchong (1983 -), male, master candidate. Research interest: geomorphological processes and sedimentation.] Tel: 15210645881, E-mail: yongchong@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 冯金良(1964 -), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 地貌过程与沉积。[Feng Jinliang (1964 -), male, Ph.D. professor. Research interest: geomorphological processes and sedimentation.] E-mail: fengjl@itpcas.ac.cn

物质来源对土壤的形成发育具有重要的影响,特别是在高原寒冷、以物理风化为主的地区,仅仅靠基岩原地风化的成土母质,土壤发育十分缓慢。而一旦有外来物质的加入,尤其是风蚀粉尘的加入,将极大地促进土壤的形成和发育^[8-9]。对成土物质来源的认识不仅有利于了解高山草甸及草甸土对可能的风尘的截获、固定及风尘传输过程的影响^[10],而且也可作为土壤保护、土壤管理战略的制定奠定基础^[11]。目前,对于高原安多地区高山草甸土成因尚未被广泛关注过,尤其是其土壤物质来源以及物源如何影响该区高山草甸土的形成发育这些问题,还未开展过较为系统而深入的研究。

沉积物粒度组成是判别沉积环境的重要手段,是一种有效提取沉积环境信息的代用指标^[12-15]。本研究基于对高原安多地区高山草甸土的粒度组成和土壤理化性质特征的研究,试图揭示该区高山草甸土的母质成因以及土壤发育过程和程度。从而为认知青藏高原土壤系统的生物地球化学循环(碳、氮循环)及未来变化情景提供基础性科学支撑。

1 研究区概况

研究区位于青藏高原腹地,念青唐古拉山脉以南的西藏那曲地区安多县城周边地区(32°N~32°25'N, 91°25'E~92°05'E)。该区域属于青藏高原高寒气候区,年平均气温-3℃左右,年平均降水量410 mm左右,降水主要集中在夏季(表1)^[16-17]。

该区域地势较高,海拔4 600~5 100 m,河流切割弱,山体为低山丘陵状,其间山谷湖盆开阔,以波状起伏的高原面为其主要地貌特征(图1)。区内广泛发育高山草甸土。土壤发育程度较低,草毡层下为质地均匀的粉、细砂,基本无发育淀积层;植被长势良好,覆盖度在85%以上;植被类型主要以小嵩草为主,另外还伴生着紫花针茅、粉花雪灵芝、弱小

火绒草、茅亭蒲公英等。区域上,安多断陷谷地处于青藏高原中部的拉萨地块北缘,北侧紧邻班公湖-怒江缝合带。由于该区域存在多次较为强烈的地质构造运动,导致区域岩性复杂多样,分布着红色砂岩、花岗岩、硅质岩、角砾岩、安山岩等。

2 样品采集及实验分析

在野外调查过程中,共计采集了8个土壤剖面(分别为AS2、AS3、AS4、AS5、AS6、AS7、AS9、AS10剖面)。一般地貌部位或地形条件的差异,对于土壤成因的研究具有重要的影响。为了避免流水、滑坡、冻融蠕移等因素的干扰,本研究采样点都选择在安多断陷谷地两侧平缓的山丘顶部。土壤剖面大部分以5 cm为间隔连续采样,直到土壤底部的残留古风化层(部分土壤底层根据实际情况加大采样间隔);并在土壤剖面典型部位采集了容重样品。另外,我们还在积雪中(FC1)、109国道边(FC2)和错那湖边山坡上(FC3)分别采集了现代风尘沉积物样品。其中FC1是通过采集表层积雪,再由静水沉降的方法获得。此外,在安多断陷谷地还采集了2个经过风力改造的河流沉积物的样品(AS1、AS8)。采样点分布位置如图1所示。

样品首先室温风干,再过2 mm筛子。<2 mm的组分用于土壤有机碳、pH值及粒度等的测试。土壤总有机碳(TOC)和无机碳(IC)在由岛津公司出产的TOC-VCPII仪器上完成测试。测量过程中分别先测定每个样品的总碳含量(TC)和无机碳含量(IC),然后采用差减法获得样品的总有机碳含量(TOC);TOC和IC的测定误差分别小于2%和3%。土壤容重、pH值(土:水比=1:2.5)、含水量等的实验测试按照常规方法进行^[18]。粒度组成在由Malvern公司生产的Mastersizer 2000粒度仪上完成测试,粒径测试范围为0.02~2 000 μm,重复测试误差

表1 安多气象数据(据1971—2000年资料统计)

Table 1 Meteorological data of Amdo region (1971—2000)

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均温度/℃	-15	-12	-7.1	-2.6	2.2	6.3	7.8	7.3	4.3	-2	-9.4	-14
平均降水量/mm	2.7	2.8	2.6	8.6	27.6	87.2	110	101	70.9	18.1	2.7	2.3
降水天数/d	3.9	4.2	3.8	7.1	11.5	18.1	19.8	18.9	17.9	7.9	2.8	2.7
平均风速/(m/s)	4.8	5.5	6	5	4.4	4	3.4	3.2	3.1	3.8	4.2	4.3

注:数据来自中国气象局,网址: <http://cdc.cma.gov.cn/>

Note: Data comes from China Meteorological Administration by <http://cdc.cma.gov.cn/>

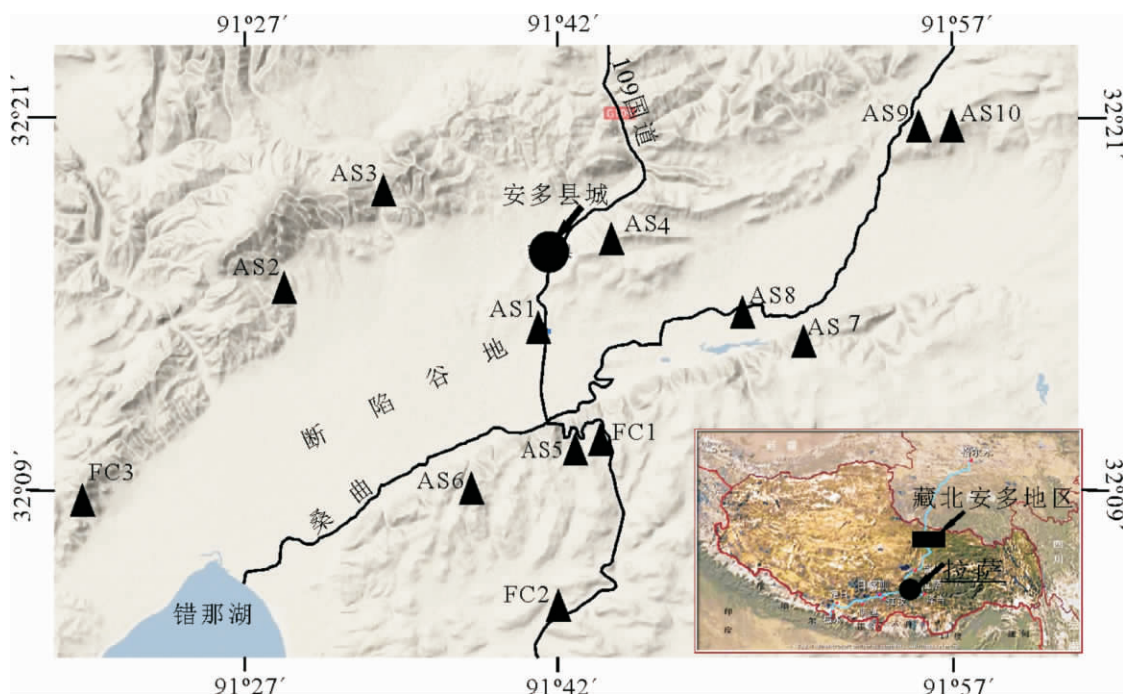


图1 研究区概况及采样点位置

Fig.1 Topographic sketch map of the study area and sampling sites

在5%之内;实验前处理过程主要以鹿化煜的处理方法^[19]为基础,并依据实际情况作略微改变。样品的平均粒径和分选系数由GRADISTAT粒度分析软件矩值法计算所得^[20]。

3 分析结果

3.1 草甸土剖面基本理化性质

以AS6剖面为例,安多高山草甸土的基本理化性质陈述如下(图2):湿状土壤I层呈棕灰色(Munsell颜色为7.5YR 3/4),II层为深棕灰色(Munsell颜色为7.5YR 2.5/3),土壤底部为黑云母花岗岩风化的残留古风化壳,呈棕红色(Munsell颜色为5YR 4/6)。土壤为砂质土,整个剖面质地均匀,碎块状结构容重为 $0.94 \sim 1.11 \text{ g/cm}^3$ (Mean = 1.01 g/cm^3 , Stdev = 0.084),含水量在15.6% ~ 26%之间(Mean = 19.9%, Stdev = 5.4),可塑性差,底部残留古风化壳含大量砾石(40% ~ 64%)。表层(20 cm)为根系交织的草毡层,容重明显较小。I层土壤中TOC含量变化不大(1.8% ~ 2.7%),而II层TOC含量有所增加(土壤I、II层:Mean = 2.62%, Stdev = 0.75),在残留古风化层TOC含量却迅速减少。II层土壤容重也明显有下降的趋势,含水量增加(总体判断,II层可能是一个古土壤层)。

土壤IC含量在剖面上的分布趋势类似于TOC(土壤层IC: Mean = 0.716%, Stdev = 0.171),土壤层较为一致,而底部古风化层迅速减少。土壤呈碱性状态($\text{pH} = 7.9 \sim 8.2$) (其中Mean = 8.05, Stdev = 0.18)。总之,AS6剖面土壤层基本理化性质相似,但与底部残留古风化层差异较大。

3.2 粒度分布特征

粒度组成测试结果表明,高山草甸土以双峰态分布为特征,所有样品均具有明显的宽阔细尾分布,而粗尾分布仅见于部分样品(图3)。以 $20 \mu\text{m}$ 为分界线,高山草甸土的粒度分布主要分成两个峰态,主峰峰值粒径在 $90 \mu\text{m}$ 左右,为含量较高、分选较好的粗粒组分。细尾分布由峰度较低而平缓、粒径变化范围较大的细粒组分构成,该峰峰值粒径 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 。另外,土壤层底部残留古风化层的粒度分布特征明显区别于上覆土壤,并且不同的剖面的古风化壳间没有明显一致的分布规律。而积雪中提取的粉尘(FC1)峰值粒径($5 \sim 8 \mu\text{m}$)与土壤中较细峰的峰值粒径十分接近。109国道边的现代风尘沉积物(FC2)呈单峰分布,峰值粒径在 $200 \mu\text{m}$ 。河谷沉积物(AS1、AS8)也呈单峰状态,并具有宽阔平缓的细尾现象,峰值粒径($200 \mu\text{m}$ 左右)比研究区高山草甸土的粗。错那湖湖边山坡上的风尘沉积(FC3)存在双峰态现象,峰态位置与FC2、AS1、AS8基本一

致。

如图 4 所示,高山草甸土各土壤层分选性十分一致(分选系数: 2.2 ~ 2.5)。虽然平均粒径在不同剖面间显示出略微的差异,但在散点图中分布得十分集中,显示出土壤层质地均匀,并与底部残留古风化层的粒度组成存在差异。在研究区域内,土壤剖面底部的残留古风化层的分选性和平均粒径在不同

的剖面间变化较大,并未呈现出明显的相似特征。

高山草甸土 8 个土壤剖面的粒度组成特征表现出较好的一致性(图 5)。首先,300 ~ 2 000 μm 粒级平均值变化范围在 0 ~ 3.5 %;其次,土壤层绝大部分样品以 20 ~ 300 μm 粒级占优势,其含量的值变化范围在 55% ~ 83%。而 2 ~ 20 μm 的粉砂粒级含量在 11% ~ 25%;粘粒 (<2 μm) 含量平均值变化范

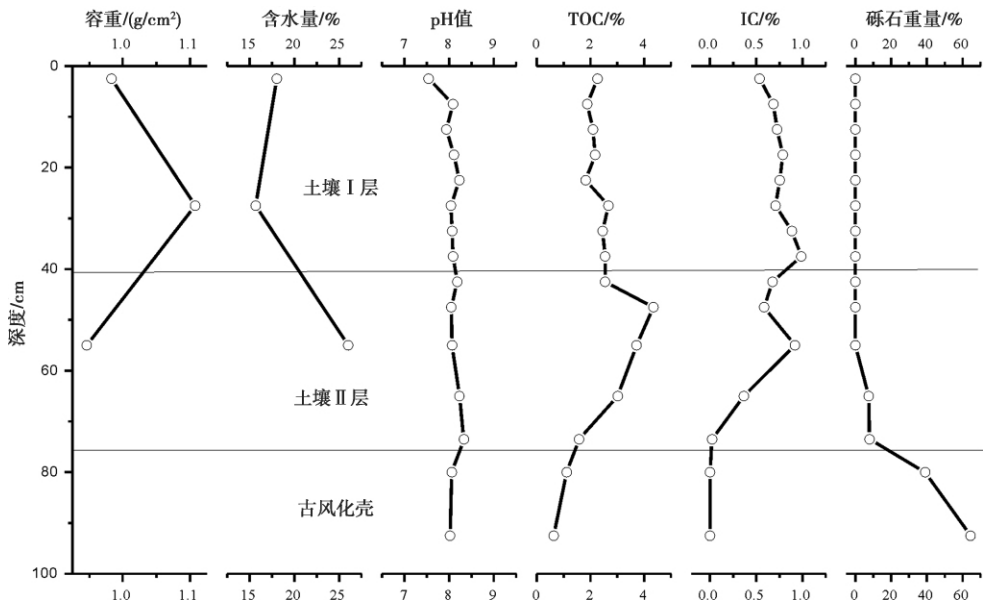


图 2 安多地区典型高山草甸土剖面(AS6)基本理化性质

Fig. 2 Physico-chemical properties for representative alpine meadow soil profile (AS6) in Amdo region

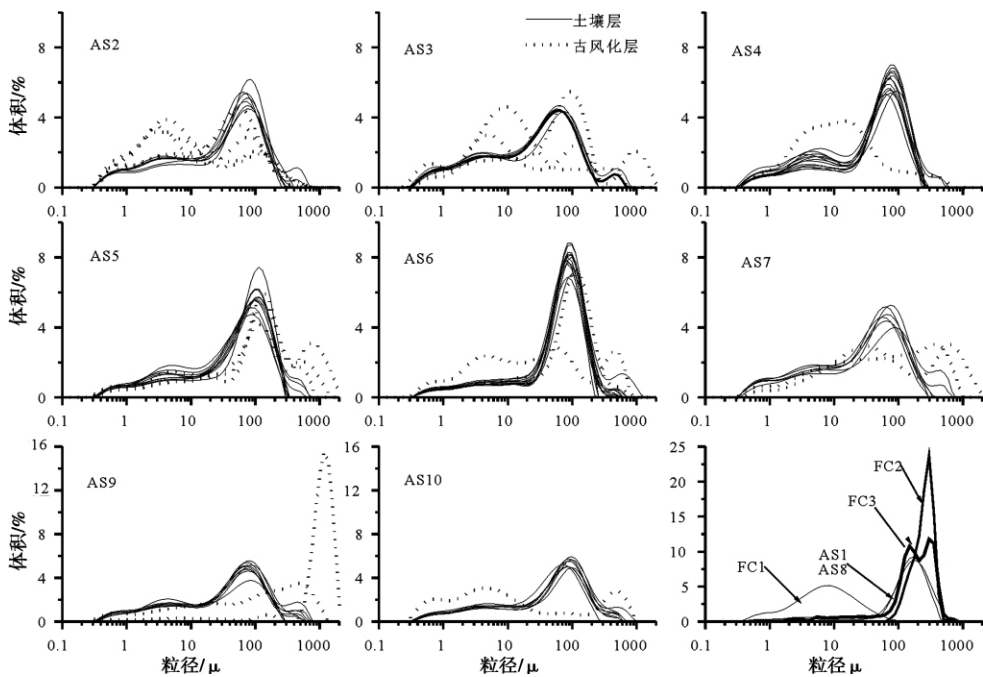


图 3 安多地区高山草甸土和各种风尘沉积物粒度分布

Fig. 3 Grain size distribution of alpine meadow soils and relative aeolian deposits in Amdo region

围在 5% ~ 15%。不同粒级部分在同一个土壤层变化相对较小,呈均匀分布状态。土壤底部大都存在一个残留古风化层,大部分古风化层各粒级含量与上覆土壤存在显著的差别: 300 ~ 2 000 μm 粒级部分明显增加(10% ~ 88%), 20 ~ 300 μm 粒级部分相对减少; 部分土壤底部残留古风化层存在粘粒富集现象(如 AS6、AS10), 而有些剖面含量明显较少(如 AS7、AS9)。另外, 土壤剖面中颗粒粒径基本 < 1 mm, 无发现 > 2 mm 砾石; 而土壤底部残留古风化层却出现大量的砾石(图 2)。总之, 从土壤剖面各粒级的含量来看, 安多地区高山草甸土质地均匀, 特征十分相似; 而土壤层与下覆残留古风化层存在明显的差异。

4 讨论

4.1 草甸土母质成因

沉积物粒度组成作为判别沉积相和沉积动力环境的重要参数, 对探讨沉积环境、沉积过程、土壤风化特征等具有重要意义^[21-23]。如在黄土研究中, 粒度作为冬季风代用指标, 在揭示季风演化和古环境

变迁等方面起着重要作用^[15]。图 3 ~ 图 5 共同表明安多地区高山草甸土具有十分一致的粒度分布特征, 其物质来源可能具有同源性特征。图 4 显示安多高山草甸土以细砂为主, 主峰峰值粒径为 90 μm , 其平均粒径明显大于川西高原甘孜黄土、黄土高原陵辉黄土、秦岭山地凤州黄土以及北京降尘, 与典型黄土的粒度分布特征存在较大的区别(图 6)^[24-25]。安多高山草甸土各粒级含量沿土壤剖面均匀分布(以 AS6 为例: < 2 μm = 4% ~ 6%, 2 ~ 20 μm = 11% ~ 16%, 20 ~ 300 μm = 72% ~ 82%, 300 ~ 2 000 μm = 0 ~ 3%)(图 5)。而土壤底部残留古风化层发生了显著的变化, 出现了大量的砾石, 粒度分布特征不存在一致的分布规律(图 2 ~ 图 5)。另外, 通过野外实地考察也发现各土壤剖面都质地均匀, 粘性差, 层理不发育, 不含砾石, 并且无流水作用痕迹出现。一般岩石在风化成土过程中, 会出现许多岩石碎屑。发育程度较弱的土壤总是首先形成颗粒粗细十分不均匀的现象^[26], 特别是在各种以物理风化为主要的高寒地区更是如此^[27]。但是, 安多地区高山草甸土虽然发育程度较弱, 整个土层质地却十分均匀, 土壤层中颗粒最大粒径为 1 mm 左右, 我们很

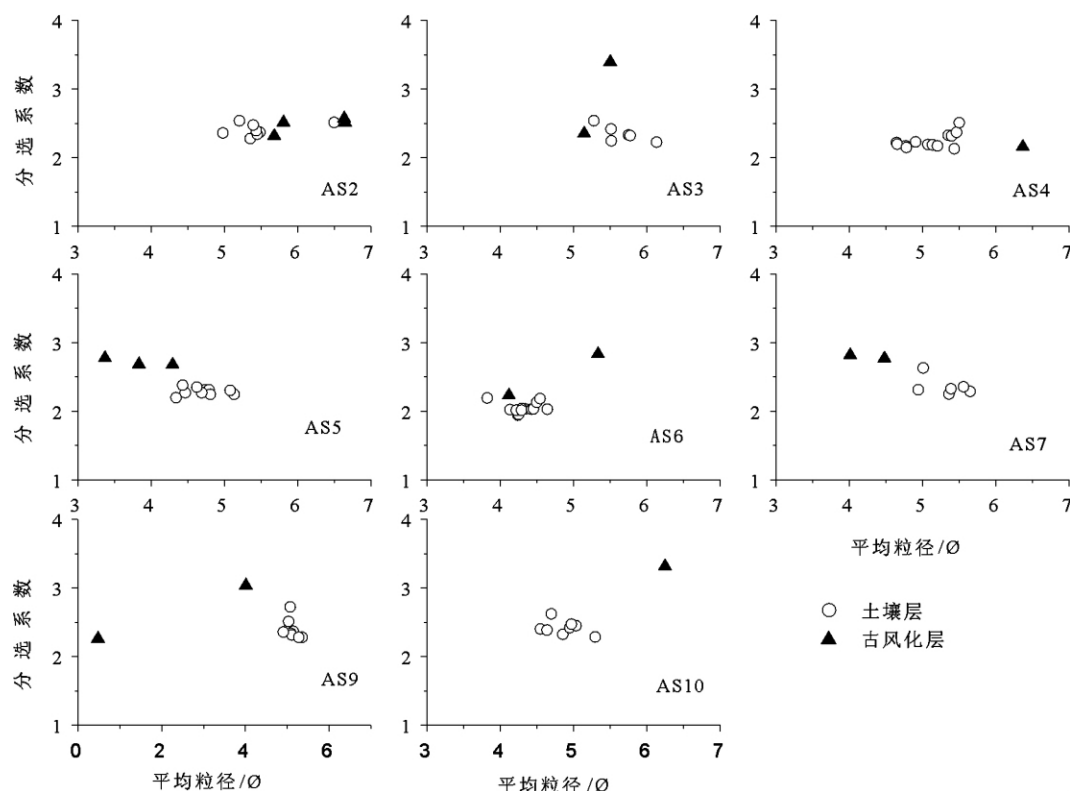


图 4 安多地区高山草甸土粒度参数散点图

Fig. 4 Mean grain size (Φ) is plotted vs. sorting parameter for alpine meadow soils in Amdo region

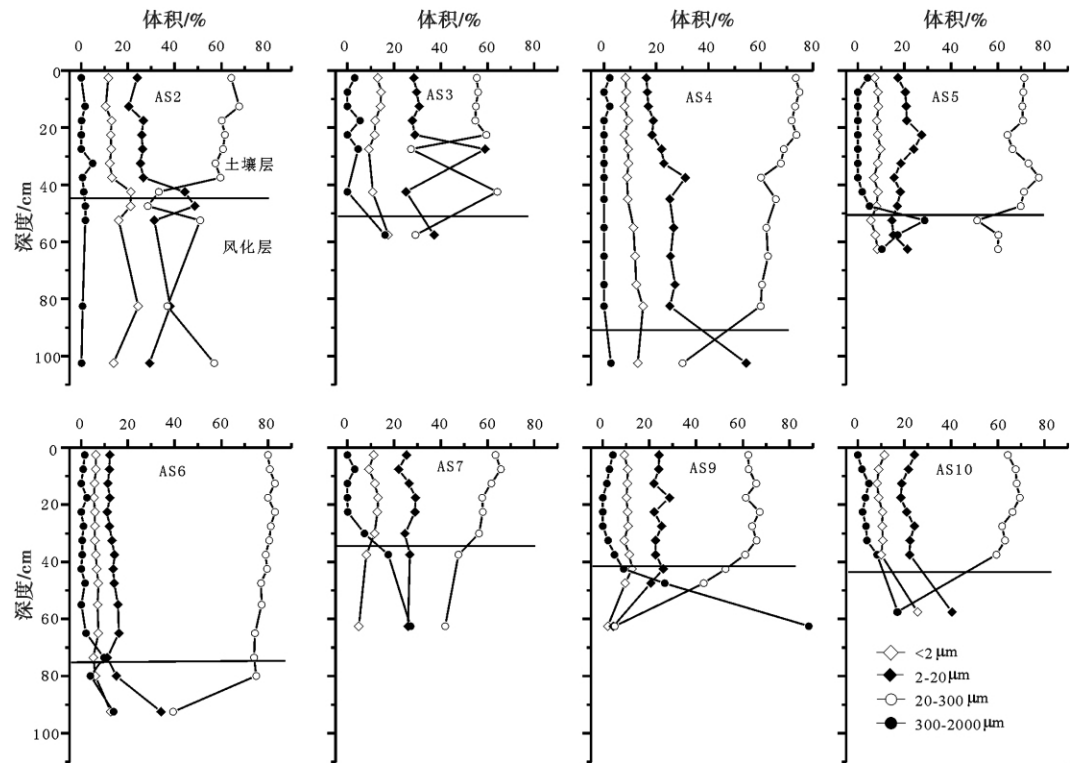


图5 安多地区高山草甸土的粒度组成在剖面上的变化

Fig. 5 Variation of granulometric composition with depth for alpine meadow soils in Amdo region

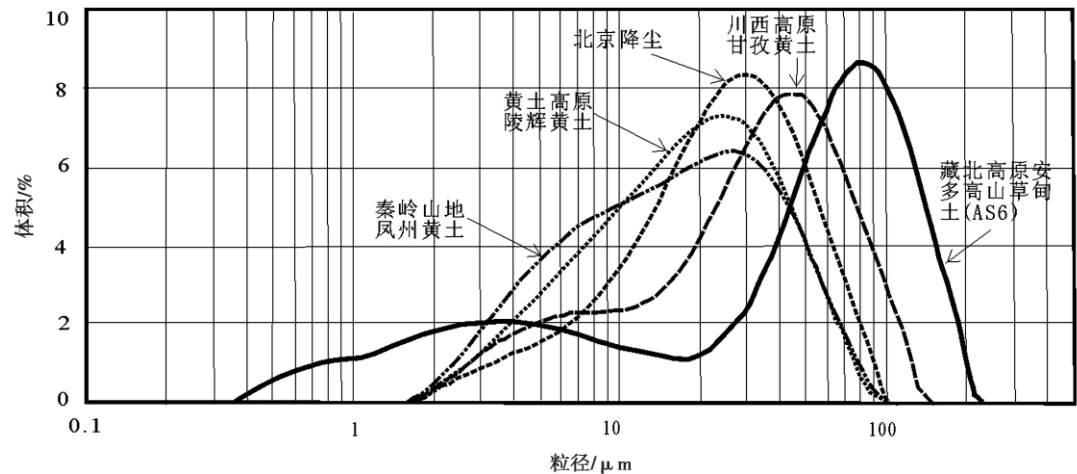


图6 安多地区高山草甸土与黄土、现代降尘的粒度分布比较(黄土数据引自[24],现代降尘数据引自[25])

Fig. 6 Comparison of grain size distribution between alpine meadow soils in Amdo region with loess and contemporary dust fall
(Data of loess and dust fall after [24-25])

难想象在主要以寒冻风化等冰川冰缘活动为主的安多地区基岩原地风化能够形成这样的土壤。而土壤底部残留古风化层存在大量的砾石,显示出与土壤层巨大差异。上述特征表明,安多地区高山草甸土与土壤底部残留古风化层不具有同源性特征。

研究区域中间是一个宽阔的安多断陷谷地,沉积了厚层的河流沉积物。在干旱季节及低湖面时

期,错那湖干涸的湖滩广泛出露。这些沉积物可为风成粉尘提供充足的物质来源。

风是塑造地貌形态的基本营力之一^[28],特别是在沙漠干旱气候条件下,它是决定地表形态的主要动力^[29]。风要达到一定的速度才能扬起风尘,一般沙尘暴的起沙风速是 5 m/s^[30];沙尘暴的发生不仅需要有大风,还要有疏松裸露的沙土质地表以及不

稳定的气流^[31]。安多地区位于青藏高原念青唐古拉山南麓,属高原亚寒带半湿润季风气候区。该区气温低,空气稀薄,昼夜温差大^[32-33]。降水主要集中在夏季(夏季降水占全年降水的70%左右,夏秋降水占90%左右),其他季节较为干燥(见表1)。年蒸发量在1770 mm^[16,33],是降水量的4.3倍。研究区域天气变化复杂,气候条件恶劣,常年多大风,年平均风速4 m/s^[16];干旱季节风速较湿季节的大1倍左右^[32],一年中出现8级(风速17.2~20.7 m/s)以上的大风天数超过170 d^[34],最大风速>40 m/s。由此可以看出,研究区存在风力扬尘、风尘搬运和迁移所需的风动力条件。此外,安多地区现代风沙地貌的存在也进一步证实了这一设想^[35]。在研究区域野外调查期间,本文作者发现风尘堆积入侵109国道的现象;在错那湖边的山坡上也存在许多现代风成粉尘沉积。安多地区宽阔的断陷谷地中具有厚层的河流沉积物,其粒度分布特征类似于研究区的土壤样品,只是峰值粒径相对较粗一些(见图3)。而粒度的变化可能是风尘的搬运距离差异所造成。错那湖边及断陷谷地的现代风尘沉积来源于附近的湖滩沉积和河流沉积,其搬运距离相对较小,从而导致其粒度组成偏粗。总之,现代风沙沉积的发育及其粒度空间上的变化,也进一步说明了安多地区高山草甸土的成土物质来源于风尘沉积的可能性。另外,由于采样点都是选择在研究区平缓的山丘顶部,从而排除了由于坡面流水、滑坡、冻融蠕移等的干扰;因此,安多地区高山草甸土中可能的外源组分的加入唯有可能是风力搬运所造成。

另外,安多地区高山草甸植被长势良好,覆盖度在85%以上,这也为风尘捕获和固定创造了十分有利的条件。在野外实地考察中发现,安多地区质地均匀的砂质高山草甸土覆盖于一切地貌单元之上,这种现象只能是风成粉尘搬运、堆积的结果。总之,上述分析表明安多地区存在粉尘沉积所需的物源、风力搬运和粉尘沉积的条件。

从沉积学上说,粒度概率累积曲线上折线斜率及转折点位置都与沉积作用机制有关^[36]。粒度模拟研究也表明,多峰及过渡型的粒度分布是由两个或更多粒度“端元组分”(End member distributions)混合而成^[37]。一般<20 μm粒级的粉尘能够较长时间地滞留于空中而被风力远距离传输,而>20 μm的粉尘大气传输距离十分有限^[38-39],如30 μm以上的颗粒则很难搬运到100 km以外的地点^[40]。

安多高山草甸土土壤层粒度分布曲线都以20 μm为界线分成2个峰态(部分样品存在粗尾现象),2个峰在概率累积曲线上对应于2条折线(图7),转折点都出现在30~40 μm的位置,反映了它们可能都经受两种主要搬运营力的作用,而这种现象没有土壤底部古风化层中一致地显示出来。中国北方黄土的概率分布曲线也基本上存在2条折线的现象^[41],转折点出现在10~30 μm之间,孙东怀认为这2条折线是分别由东亚冬季风以及高空西风气流两种营力作用的结果^[42]。黄土高原黄土峰值粒径在15~30 μm,大部分颗粒粒径不超过63 μm^[43],而安多高山草甸土峰值粒径在90 μm左右,明显比之大。风洞实验研究也表明,>63 μm的砂粒组分每次只能上升到几厘米到几米的高度并在水平方向上跃移同量级的距离^[44],即使是在尘暴空中滞留的时间也很短,而不可能进行长距离传输^[45],大体可作为当地物源组分的标识^[40,46]。由此可以推断,安多地区高山草甸土中主峰部分的粉细砂组分搬运距离也不可能很远,应该属于风成粉尘近源堆积的结果。

安多积雪中的粉尘沉积(FC1)粒度分布曲线与土壤中较细的峰(<20 μm)位置十分接近图3,却没有出现土壤中主峰(>20 μm)的峰态。安多地区109国道上的风尘沉积(FC2)也呈单峰分布,却没有出现类似于土壤中的较细的峰(见图3)。上述或许表明安多地区高山草甸土风尘沉积存在两种主要的风力搬运过程(至于是哪两种具体的风力搬运,可能与研究区域季节性的大气环流状况有关,但需要进一步研究证实),甚至可能存在两个不同的物质来源。

4.2 安多高山草甸土的发育程度及成土模式

土壤在发育过程中会表现出一系列的成土特征,随着发育程度的加深,会依次分化出腐殖质层、有机层、淋溶层、淀积层、母质层等土层^[26,47]。并且各个土层还会随时间进一步分化。野外实地考察发现,安多高山草甸土除了根系交织的草毡层(As),剖面中虽然存在菌丝状碳酸钙淀积现象,土壤剖面上并没有出现明显的淋溶、淀积层,而只是质地均匀的砂质土,这表明其土壤发育程度并不高。而土壤中粘粒(<2 μm)含量也没有随着土壤剖面发生较大的变化(虽然不同剖面粘土含量存在一定的差异)(见图5)。这些现象完全区别于原位风化土壤形成发育过程中物质分异现象^[26]。因此,本文作者

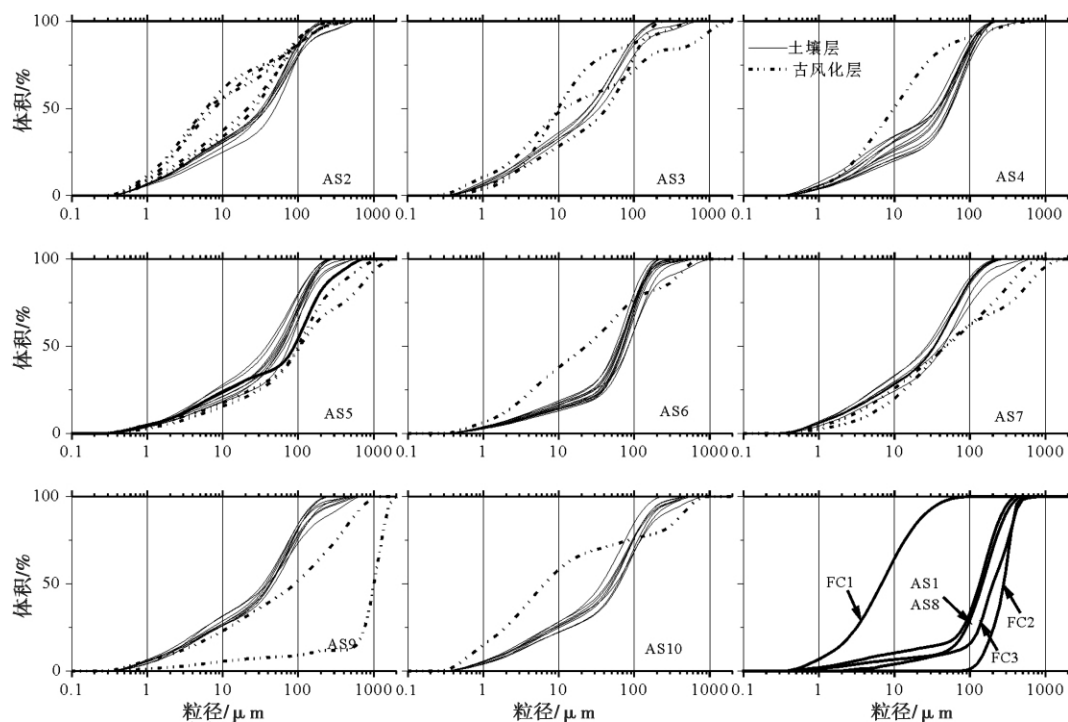


图7 安多地区高山草甸土累积频率曲线

Fig. 7 Cumulative frequency curves of alpine meadow soils in Amdo region

推测这可能是由于风成粉尘的加入,为土壤发育带来了充足的物质来源,从而促进了研究区高山草甸土的形成发育。

土壤总有机碳(TOC)是反映土壤发育的一个重要指标。以 AS6 为例(见图2),安多地区高山草甸土虽然表层土壤表现出强烈的生草过程,但并没有显示富集 TOC 的现象。土壤剖面 I 层 TOC 含量沿剖面分布十分均匀,而在土壤 II 层却略有增加的趋势。野外实地考察发现土壤 II 层一个颜色较深的层位,综合判断是一个古土壤层。而 TOC 含量在这一层略有富集、土壤容重减小、含水量明显增加的现象更证实了这一点(这也从一个侧面反映了安多地区高山草甸土存在风尘加积的现象)。古土壤层的出现表明曾经出现过较为暖湿的气候条件,更适合植被的生长发育。土壤草毡层没有表现出 TOC 富集可能是由于风尘的不断加入从而弱化了土壤 TOC 的富集,而这有别于主要由非风尘物质加入形成的高山草甸土的 TOC 在草毡层(As)富集而向土壤底部迅速减少的现象^[3 27 48-50]。另外,土壤底部古风化层存在粘土富集的现象,但 TOC 含量明显减少(0.6%~1.6%),表明其虽表现出较强的化学风化,但受成土作用影响较小,这是基岩原位风化形成

的。

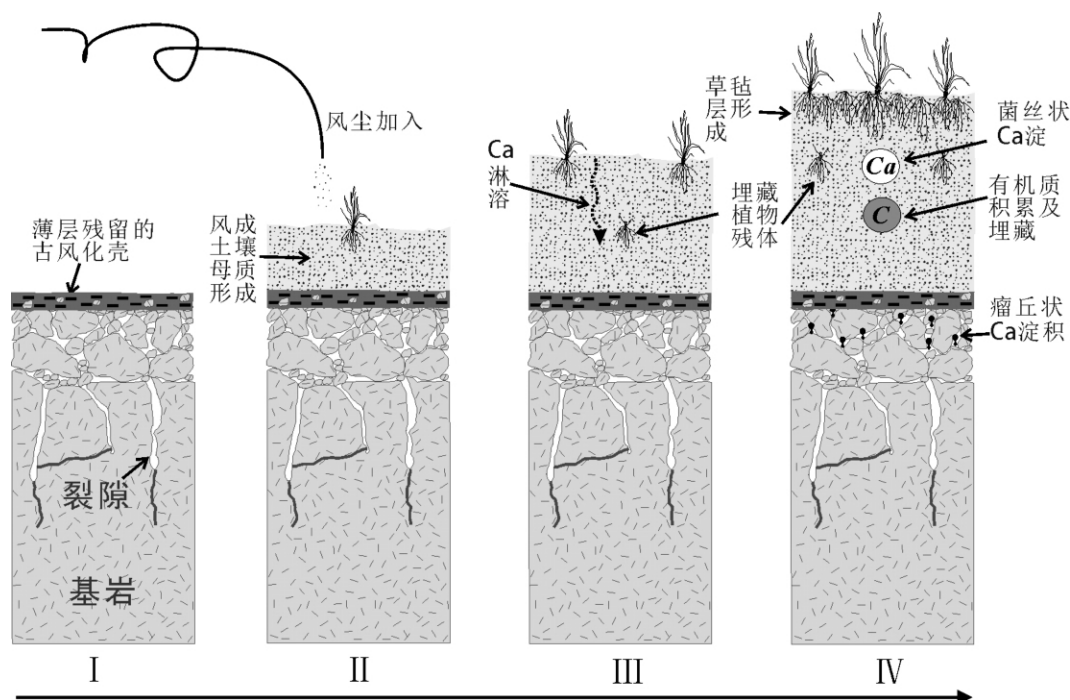
高寒地区土壤发育程度较低,可能是由于其处于高寒的气候条件下,各种化学、生物风化作用弱的原因。而在安多高山草甸土粘粒含量及 TOC 在剖面上没有富集而表现出的成土作用较弱,却是因为风成粉尘不断加积造成的,其与黄土高原的古土壤发育一样,也是一种“加积型”的土壤发育模式^[51]。土壤母质来源于风尘的不断加积过程,并对高山草甸土形成发育产生重要的影响(图8)。

5 结论

野外实地考察以及实验数据分析结果表明:

1. 安多地区高山草甸土与一般的富含砾石、分选较差特征的高山草甸土不同,其质地均匀、无层理、无流水作用痕迹等,并覆盖研究区一切地貌单元之上,表明其是风成沉积形成的。

2. 安多高山草甸土主要由细砂组成。其主峰峰值粒径($90 \mu\text{m} \pm$)明显大于川西高原甘孜黄土、黄土高原陵辉黄土、秦岭山地凤州黄土以及北京降尘的主峰峰值粒径,这都暗示着藏北安多高山草甸土主峰(粗粒)部分是风成粉尘近源堆积的结果。



- I: 原始成土过程为主;
 II: 风尘加入形成风成土壤母质, 并伴随 N、P 及盐基离子(K、Na、Ca、Mg)的沉降输入; 土壤水分及养分保持能力显著提高; 成土过程的速度大大增加;
 III: 碳酸钙的淋溶淀积; 植物残体被 粉尘加积埋藏; 微生物活动持续增加;
 IV: 土壤剖面中部形成菌丝状碳酸钙淀积, 而底部岩石表面和裂隙间形成瘤丘状碳酸钙淀积; 有机质积累并被加积的风尘埋藏; 表层植被及草毡的发育, 有利于风尘 的进一步被捕获和固定; 风尘加积型高山草甸土壤形成。

图8 藏北高原累积型高山草甸土的理想形成和发育模式

Fig.8 Pedogenic model of aeolian dust aggradation for alpine meadow soils in Amdo, northern Tibetan Plateau

3. 安多高山草甸土中以 $20\ \mu\text{m}$ 为界线分成 2 个峰态。而积雪中的粉尘沉积 (FC1) 单峰峰值在 $3\sim6\ \mu\text{m}$ 左右, 接近于土壤中较细峰的峰值粒径, 却未出现类似于草甸土中较粗的峰。安多地区现代风尘堆积 (FC2) 以及经过风力改造的河流沉积物 (AS1, AS8) 的粒度分布呈单峰分布, 类似于土壤中的主峰分布。土壤粒度分布累积概率曲线普遍存在两条折线, 折线形态相似。这些都表明安多地区高山草甸土风尘堆积很可能受到两种主要的风力搬运过程的影响。高山草甸土不同粒级部分 ($<20\ \mu\text{m}$ 以及 $>20\ \mu\text{m}$ 组分) 是否存在不同的物质来源, 有待进一步研究证实。

4. 粒度分析表明, 安多高山草甸土属于砂质土, 发育程度较低。粘粒含量基本不随剖面变化, 即使在强烈生草化作用的草毡层也没有增加。这不仅是由于其处于高寒的环境中, 土壤发育缓慢, 更重要的是由于风尘粉尘的加入, 形成一种“加积型”的土壤发育模式, 而这也加速了该区土壤的形成发育。

致谢: 感谢中国地质科学院地质力学研究所王

书兵博士及刘焱老师在粒度测试过程中提供的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Xinquan. Ecological of alpine meadow ecosystem and the global change [M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-40 [赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-40]
- [2] Yan Zhenying. Alpine meadow soil and the relation with stockbreeding [J]. 1993, (2): 10-13 [严振英. 试论高山草甸土及其与草畜的关系 [J]. 青海畜牧业, 1993, (2): 10-13]
- [3] Gao Yixin, Chen Hongzhao, Wu Zhihong, et al. Soils of Xizang (Tibet) [M]. Science Press, 1985: 15-31, 65-82 [高以信, 陈鸿昭, 吴志东等. 西藏土壤 [M]. 科学出版社, 1985: 15-31, 65-82]
- [4] Liu Gengnian, Song Changqing, Xiong Heigang. The pedogenic processes and evolution of the soils on Moraines in Alpine Periglacial environment [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(3): 205-212 [刘耕年, 宋长青, 熊黑钢. 高山冰缘环境中冰碛母质土壤的发生与演化 [J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 205-212]
- [5] Wang Changke, Li Xianguo, Cai Zucong, et al. Methane Oxidation in the meadow soil and peat soil in Zoige Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(4): 584-588 [王长科, 吕宪国, 蔡祖聪等. 若尔盖高原草甸土与泥炭土氧化 CH_4 研究 [J]. 冰

- 川冻土 2007 29(4):584-588]
- [6] Wang Yibo, Wang Genxu, Zhang Chunmin, et al. Response of soil physico-chemical properties to the changes of the vegetation ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2007 29(6):927-922 [王一博, 王根绪, 张春敏, 等. 高寒植被生态系统变化对土壤物理化学性状的影响 [J]. *冰川冻土*, 2007 29(6):927-922]
- [7] Feng Jin-Liang, Zhu Li-Ping. Origin of terra rossa on Amdo North Mountain on the Tibetan plateau, China: Evidence from quartz [J]. *Soil Science and Plant Nutrition* 2009 55(3):407-420
- [8] Muhs D R, J B Benedict. Eolian additions to late Quaternary alpine soils, Indian Peaks Wilderness Area, Colorado Front Range [J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 2006 38(1):120-130
- [9] Simonson, Roy W. Airborne dust and its significance to soils [J]. *Geoderma* 1995 65(1-2):1-43
- [10] Bockheim J G, D Koerner. Pedogenesis in alpine ecosystems of the eastern Uinta Mountains, Utah, USA [J]. *Arctic and Alpine Research* 1997 29(2):164-172
- [11] Munroe J S, Farrugia G, Ryan P C. Parent material and chemical weathering in alpine soils on Mt. Mansfield, Vermont, USA [J]. *Catena* 2007 70:39-48
- [12] Xiong Shangfa, Ding Zhongli, Liu Dongsheng. Comparisons of grain size characteristics of red earth from southern China with that of loess and dune sand from Beijing region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999 44(18):1690-1693 [熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 赣北红土与北京邻区黄土及沙漠砂的粒度特征对比 [J]. *科学通报*, 1999 44(18):1690-1693]
- [13] Feng Zhigang, Wang Shijie, Liu Xiuming, et al. The inhomogeneity of the base-mant carbonate rock developing weathering crust: the evidence from grain-size analysis [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2003 30(6):635-643 [冯志刚, 王世杰, 刘秀明, 等. 碳酸盐岩风化壳母岩的不均一性: 来自粒度分析的证据 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版* 2003 30(6):635-643]
- [14] Ye Wei. Comparison of textural features of loess and reworked loess in Yili area [J]. *Arid Land Geography*, 2000 23(4):310-314 [叶玮. 新疆伊犁地区黄土与黄土状土粒度对比 [J]. *干旱区地理* 2000 23(4):310-314]
- [15] Liu Dongsheng. Loess and environment [M]. Beijing: Science Press, 1985: 116-28, 91-400 [刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 28-116, 91-400]
- [16] Shen Yongping, Xun Daoming. Fluctuation of lakes and their environments since Last Glaciation in Amdo area, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(2):174-179 [沈永平, 徐道明. 西藏安多的湖泊变化与环境 [J]. *冰川冻土*, 1994, 16(2):174-179]
- [17] Ye Caijuan. The application of slope ecology protective technology in Amdo station, Tibet [J]. *Subgrade Engineering*, 2009, 4(4):183-184 [叶彩娟. 青藏铁路安多车站生态边坡防护技术的应用 [J]. *路基工程* 2009 4(4):183-184]
- [18] Lao Jiacheng, et al. Analysis manual of soil agriculture chemistry [M]. Beijing: Agriculture Press, 1988: 1-227 [劳家桢, 等. 土壤农化分析手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1988: 1-227]
- [19] Lu Huayu, An Zhisheng. Pretreated methods on loess-palaeosol samples granulometry [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(23):2535-2538 [鹿化煌, 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]
- [20] Blott Simon J, Kenneth Pye. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 2001 26(11):1237-1248
- [21] Chen Jingan, Wang Guojian, Zhang Feng. Environmental record of lake sediment in various time scale-as exemplified by Particle distribution [J]. *Science in Chinese* 2003 33(6):563-568 [陈敬安, 万国江, 张峰. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例 [J]. *中国科学* 2003 33(6):563-568]
- [22] Zhu Lidong, Jiang Yongjian, Ye Wei, et al. Comparative study of red earth grain size from different parent materials in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang Normal University: Nat. Sci.*, 2008, 31(4):362-366 [朱丽东, 姜永见, 叶玮, 等. 浙江省内不同成土母质红土粒度特征比较 [J]. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2008 31(4):362-366]
- [23] Feng Zhigang, Wang Shijie, Sun Chenxin, et al. Particle distribution of red weathering crust and its genetic implication-as exemplified by Pingba county of Guizhou, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002 22(3):243-248 [冯志刚, 王世杰, 孙承兴, 等. 岩溶地区缺失原岩残余结构红色风化壳的粒度分布特征及成因指示——以贵州平坝为例 [J]. *矿物学报* 2002 22(3):243-248]
- [24] Hu Zhaoguo. The preliminary study on origin and provenance of Chengdu Clay [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences 2010 [胡兆国. 成都粘土成因及其物源的初步研究 [D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所 2010]
- [25] Feng Jinliang, Zhu Liping, Ju Jianting, et al. Heavy dust fall in Beijing on April 16-17 2006: Geochemical properties and indications of the dust provenance [J]. *Geo-chemical Journal* 2008 42(4):221-236
- [26] Розанов Б Г. Soil morphology science [M]. Science Press, 1988: 1-101 [Б Г 罗扎诺夫. 土壤形态学 [M]. 科学出版社, 1988: 1-101]
- [27] Wang Liqiang. Research on the geomorphological characteristics and soil genesis of Nam Co Basin, Tibetan plateau [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences. 2009 [王利强. 青藏高原纳木错流域地貌特征与土壤发育的研究 [D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所 2009]
- [28] Skidmore E L. Soil erosion by wind. In: El-Baz F, Hassan M H A. *Physics of Desertification* [M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986: 261-273
- [29] Zhu Zhenda. Desert, desertification in China and its management strategy [M]. China Environmental Science Press, 1999: 113-115 [朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理对策 [M]. 北京: 中国环境出版社, 1999: 113-115]
- [30] Zhang Li, Ren Guoyu. Change in dust storm frequency and climatic controls in northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* 2003 61(6):744-750 [张莉, 任国玉. 中国北方沙尘暴频数演化及其

- 气候成因分析[J]. 气象学报 2003 61(6): 744 – 750]
- [31] Chen Zhiqing, Zhu Zhenda. Significance of eco-environmental protection in development of western regions in connection with sandstorms[J]. Progress in Geography 2000, 19(3): 259 – 265 [陈志清, 朱震达. 从沙尘暴看西部大开发中生态环境保护的重要性[J]. 地理科学进展 2000, 19(3): 259 – 265]
- [32] Zuo Hongcho, Hu Yunqiao, Lü Shihua. Seasonal transition and its boundary layer characteristics in Anduo area of Tibetan Plateau[J]. Progress in Natural Science 2004, 14(5): 535 – 54 [左洪超, 胡隐樵, 吕世华, 等. 青藏高原安多地区干、湿季的转换及其边界层特征[J]. 自然科学进展 2004, 14(5): 535 – 540]
- [33] Zhang Xujiao, Cheng Weitao, Cheng Zhen. Analysis on the formation and the cause of the present man-land relationship in amdo, Tibet[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, 25(2): 138 – 142 [张绪教, 陈伟涛, 陈震. 西藏安多县当代人地关系的形成及原因分析[J]. 东华理工学院学报: 社会科学版, 2006 25(2): 138 – 142]
- [34] Gong Weijie. Record the progress of installing railway equipment in Amdo, Qinghai – Tibet[J]. Modern Material Handling & Logistics, 2005 7(7): 12 – 13 [公维洁. 八千里路云和月——记青藏铁路安多铺架设备运输项目[J]. 现代物流 2005 7(7): 12 – 13]
- [35] Lin Quanlin. Formation mechanism of wind and dust around Cuonahu Lake along Qinghai – Tibet Railway[J]. Railway investigation and surveying 2007 3(3): 74 – 75 [蔺全林. 青藏线错那湖沿岸风沙的形成机制及治理措施[J]. 铁道勘察 2007 3(3): 74 – 75]
- [36] Friedman Gerald M, Sanders John Essington. Principles of sedimentology[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978: 1 – 792
- [37] Syvitski J P M. Factor analysis of size frequency distributions. In: Syvitski J P M, ed. Principle, Methods and Application of Particle Size Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 249 – 263
- [38] [Pye K. Aeolian dust and dust deposits[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 19 – 37 [肯尼斯·派伊. 风蚀粉尘及粉尘沉积物[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 19 – 37]
- [39] Tsoar H, K Pye. Dust transport and the question of desert loess formation[J]. Sedimentology, 1987 34(1): 139 – 153
- [40] Xiong Shangfa, Ding Zhongli, Liu Dongsheng. Comparisons of grain size characteristics of red earth from southern China with that of loess and dune sand from Beijing region[J]. Chinese Science bulletin, 1999 44(4): 1216 – 1219 [熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 赣北红土与北京郊区黄土及沙漠砂的粒度特征对比[J]. 科学通报, 1999 44(4): 1216 – 1219]
- [41] Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu, et al. The grain-size features of quaternary aeolian dust deposition sequence and its significance[J]. Marine Geology Quaternary Geology, 1997, 17(4): 74 – 81 [李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 等. 皖南第四纪风尘堆积序列粒度特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 74 – 81]
- [42] Sun Donghuai, Lu Huayu, David Rea. Bimode grain-size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate Implication[J]. Acta Sedimentologica Sinica 2000, 18(3): 327 – 335 [孙东怀, 鹿化煜, David Rea. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 327 – 335]
- [43] Qiao Yansong, Guo Zhengtang, Hao Qingzhen. Grain size characteristics and its indicated significance on miocene Loess/Paleosol Sections[J]. Science in China Series D: Earth Sciences 2006 36(7): 646 – 653 [乔彦松, 郭正堂, 郝青振, 等. 中新世黄土 – 古土壤序列的粒度特征及其对成因的指示意义[J]. 中国科学[D 辑], 2006 36(7): 646 – 653]
- [44] Pye K, Tsoar H. The mechanics and geological implications of dust transport and deposition in desert, with particular reference to loess formation and dune sand diagenesis in the northern Negev, Israel. Desert sediments ancient and modern[M]. Blackwell, Oxford (in press), 1987: 139 – 156
- [45] Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. Science in China Series D – Earth Sciences, 1999, 42(2): 146 – 152 [丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠 – 黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学: D 辑, 1999 29(1): 82 – 87]
- [46] Fang Xiaomin, Han Yongxiang, Ma Jinhui, et al. Dust storms and loess accumulation on the Tibetan Plateau: a case study of dust event on 4 March 2003 in Lhasa[J]. Chinese science bulletin 2004 49(9): 953 – 960 [方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以 2003 – 03 – 04 拉萨沙尘天气过程为例[J]. 科学通报 2004 49(22): 1084 – 1090]
- [47] Huang Changyong, Xun Jianmin. Soil science[M]. Beijing: Agriculture Press 2000: 1 – 311 [黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 中国农业出版社 2000: 1 – 311]
- [48] Wang Genxu, Chen Guodong, Shen Yongping, et al. Influence of land cover changes on the physical and chemical properties of alpine meadow soil[J]. Chinese Science bulletin 2003 47(23): 1771 – 1777 [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]
- [49] Tao Zhen, Shen Chengde, Gao Quanzhou, et al. Soil organic Carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica 2006 61(7): 720 – 728 [陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. 地理学报 2006 61(7): 720 – 728]
- [50] Wu Yaqiong, Liu Guohua, Fu Bojie, et al. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2008 28(2): 362 – 367 [吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J]. 环境科学学报 2008 28(2): 362 – 367]
- [51] Liu Jinfeng, Guo Zhengtang, Qiao Yansong, et al. Quartz grain morphology grain-size distribution of Qinan Miocene Loess-paleosol Sequence[J]. Chinese Science Bulletin 2005 50(24): 2806 – 2808 [刘进峰, 郭正堂, 乔彦松, 等. 秦安中新世黄土 – 古土壤序列石英颗粒形态特征、粒度分布及其对成因的指示意义[J]. 科学通报 2005 50(24): 2806 – 2808]

Origin of Parent Materials and Pedogenesis for Alpine Meadow Soils in Amdo Northern Tibetan Plateau

LIN Yongchong^{1 2 3} FENG Jinliang^{1 2} ZHANG Jifeng^{1 2 3} JU Jianting^{1 2} HU Zhaoguo⁴ GAO Shaopeng^{1 2}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Shandong Zhengyuan Institute of Geological Exploration Affiliated to China Central Bureau of Metallurgy and Geology, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to understand the pedogenesis process of alpine meadow soil in Amdo area, northern Tibetan Plateau, we investigated the granulometric composition and physico-chemical properties of alpine meadow soils from eight soil profiles. The results indicate that alpine meadow soils show bimodal distribution patterns with dividing point as about 20 μm . The main peak values are 90 μm , while the second peaks exhibit broad tail with the peak values 3–6 μm . The compositions of various grain size fractions (<2 μm , 2–20 μm , 20–300 μm , 300–2 000 μm) change a little with depth at the soil profiles. The alpine meadow soils mainly consist of very fine sand with mean grain size 60–90 μm . Compared to the loess from Chinese Loess Plateau and eastern Tibetan Plateau, and the Chengdu Clay in the Sichuan Basin, the alpine meadow soils are coarser. Generally, alpine meadow soils in the present study presented a thick layer, homogeneous structure, without gravels, a complete lack of visible bedding, and a clear transition with underlying relics of paleo-weathering crust. Therefore, we propose that the parent materials of alpine meadow soils in Amdo region are aeolian deposits. The aeolian dust aggradation plays an important role in the pedogenesis process of the alpine meadow soils.

Key words: northern Tibetan Plateau; alpine meadow soil; granulometric composition; aeolian deposits; pedogenesis