

DOI: 10.11766/trxb202602110093

CSTR: 32215.14.trxb202602110093

黄越, 杨飞, 谷俊, 陈奕蓓, 张甘霖. 粒度分布特征揭示祁连山土壤的风成起源和传输路径[J]. 土壤学报, 2026,

HUANG Yue, YANG Fei, GU Jun, CHEN Yibei, ZHANG Ganlin. Grain-size Distribution Characteristics Reveal the Aeolian Origin and Transport Pathways of Soils in the Qilian Mountains[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

粒度分布特征揭示祁连山土壤的风成起源和传输路径*

黄越^{1,2,4}, 杨飞^{3†}, 谷俊³, 陈奕蓓^{2,3,4}, 张甘霖^{1,2,3}

(1. 湖泊与流域水安全全国重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 211135; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 4. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 高山区土壤形成受控于独特的气候与地貌条件。近年研究证实, 风积粉尘是许多高山区表土层的主要物质来源, 但关于青藏高原东北缘祁连山高海拔土壤细粒物质的具体来源与传输机制, 仍缺乏系统定量研究。本研究在祁连山前缘采集了6个弱发育的黄土剖面, 并在高海拔区采集了81个代表性高山土壤剖面。通过粒度分布特征与端元模型分析(EMMA), 揭示了祁连山土壤的风成起源与传输路径。结果表明, 无论是山麓黄土还是高海拔表土, 其粒径分布曲线均在约37 μm处呈现一致主峰, 证明风积粉尘对土壤母质组成具有主导贡献。端元分析识别出5个具有环境指示意义的粒度端元(EM1-EM5), 揭示了西风环流(细粒组分)与冬季风(粗粉砂组分)对研究区物质输入的差异性控制。本研究不仅证实了精细粒度数据在识别土壤风成组分中的重要价值, 还指出风成物质输入在祁连山形成广泛岩性不连续特征, 这种独特的土体构型显著改变了高山土壤的理化性质与生态功能, 对维持高山生态系统的生产力和稳定性具有重要的生态学意义。

关键词: 粒度分布; 端元模型分析; 大气降尘; 高山土壤; 土壤发生

中图分类号: P931.2

文献标志码: A

Grain-size Distribution Characteristics Reveal the Aeolian Origin and Transport Pathways of Soils in the Qilian Mountains

HUANG Yue^{1,2,4}, YANG Fei^{3†}, GU Jun³, CHEN Yibei^{2,3,4}, ZHANG Ganlin^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences Nanjing, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】Aeolian dust deposition constitutes a major source of fine particles in many high-mountain surface soils worldwide. However, systematic quantitative research on the specific sources and transport mechanisms of fine-grained matter in high-altitude soils of the Qilian Mountains along the northeastern edge of the Tibetan Plateau remains limited. This study combines grain-size distribution characteristics with end-member modelling analyses (EMMA) to reveal the eolian origin and transport pathways of soils in the Qilian Mountains. 【Method】This study collected 6 weakly developed loess-like soil

* 国家自然科学基金项目(42007001)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42007001)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fyang@issas.ac.cn

作者简介: 黄越(2001-), 女, 广西钦州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤地理。E-mail: huangyue@niglas.ac.cn

收稿日期: 2026-02-11; 收到修改稿日期: ; 网络首发日期(www.cnki.net):

profiles at the mountain front and 81 representative alpine soil profiles from high-elevation zones across the Qilian Mountains. Grain-size distributions of all samples were measured using a laser particle-size analyzer. EMMA was applied to unmix grain-size distribution curves and extract statistically robust sedimentary components. By integrating the spatial distribution patterns of each end-member with the influence of environmental factors, sediment sources and transport processes were analyzed.

【Result】 The measured grain-size distributions of both loess and alpine surface soils exhibited remarkably similar patterns and shared a consistent dominant peak at approximately 37 μm . This similarity indicated common sediment sources. C horizons and even coarse, polymodal 2C layers retained this distinctive component, indicating pervasive penetration of aeolian dust throughout soil profiles. EMMA resolved five environmentally meaningful end-members (EM1-EM5), representing distinct transport and depositional processes. EM3 (~33 μm) dominated and was predominantly distributed on the northwestern side, showing significant negative correlations with elevation, precipitation, and vegetation cover. EM2 was widely distributed throughout the study area and showed a significant positive correlation with precipitation. EM1 was predominantly distributed in the southwest region, showing a positive correlation with elevation, precipitation, and vegetation cover. **【Conclusion】** Fine-grained alpine soils in the Qilian Mountains are predominantly derived from aeolian dust. Fine fractions (EM1, EM2) are associated with long-range transport under the prevailing westerlies, whereas coarser silt components (EM3) correspond to stronger winter monsoon activity and shorter-distance transport. Continuous aeolian deposition forms distinctive lithologic discontinuities that substantially modify soil physical and chemical properties, thereby influencing nutrient dynamics, ecosystem productivity, and long-term stability of alpine pastoral systems. These findings highlight the fundamental ecological and geomorphological importance of dust deposition in shaping high-elevation soils on the northeastern Tibetan Plateau.

Key words: Grain-size distribution; End-member modeling analyses; Aeolian dust deposition; Alpine soils; Soil genesis

大气降尘作为一种全球尺度的地表过程，在地球系统的物质循环与环境演变中扮演着关键角色^[1-3]。当大量的粉尘沉降于稳定的地表环境，且其沉积速率远超地表侵蚀速率时，在干旱或半干旱地区往往能堆积形成深厚的黄土^[4]；而在湿润或半湿润环境中，粉尘沉积通量相对较低，并经历较强的风化作用，成为土壤基质的一部分^[5-6]。

在高山环境中，土壤的形成往往受到极端气候与地形的强烈制约^[7]。但已有研究表明，全球范围内许多高山地区的表层土壤均表现出富含粉粒（2~63 μm ）的质地特征^[8-10]。随着地球化学、沉积学及矿物学等多学科证据的不断积累，学界倾向于认为这些覆盖于基岩或粗骨物质之上的细粒土壤，其中相当一部分具有明确的风成起源^[11-13]。祁连山作为青藏高原东北缘的巨大屏障，其特殊的地理位置使其成为研究亚洲内陆干旱化与风尘循环的关键区域。野外调查发现，祁连山区域的表层通常覆盖着粉质土壤，且全新世黄土在祁连山脉北麓及山间盆地分布极为广泛^[14-16]。Yang 等^[13,17]在祁连山葫芦沟小流域和央隆小流域的研究发现，土壤中普遍存在三个主要的特征粒径峰值（16 μm 、35 μm 和 80 μm ），这些组分分别代表了三种不同动力机制与输送系统控制下的风成沉积物。Nottebaum 等^[18]在青藏高原东北缘进行的端元分析结果同样显示，区域内的黄土剖面 and 表层土壤主要由主峰粒径为 9 μm 、33 μm 和 63 μm 的端元构成，指示了来自不同源区的风成搬运过程的叠加。此外，基于稀土元素（REE）等地球化学指标的物源示踪研究表明，青藏高原东北缘（如门源盆地）的黄土主要来源于以柴达木盆地沙漠为主的干旱中亚地区，粉尘物质主要通过西风环流进行长距离运输并在此沉降^[19]。这一系列研究均表明，祁连山土壤中细粒组分的积累很大程度上源于风成沉积物的持续输入。

粒度作为土壤和沉积物最基本的物理属性之一，记录了沉积物类型、沉积动力条件及搬运过程等环境信息，是追溯物质来源、推断沉积历史及重建古气候环境的有力替代指标^[20-21]。近年来，随着激光粒度分析仪在土壤科学中的普及应用，获取高分辨率的连续粒度分布数据成为可能。已有研究表明，对土壤粒径分布进行精细化分析，能为解读土壤母质来源提供关键线索，尤其有助于从复杂的土壤混合物中识别出风成物质的信号^[13,22]。为了提高对沉积记录中相关动力过程的解释能力，

以及对其驱动因素（如不同的大气环流系统）进行准确的识别与归因，研究者们引入了数学方法。目前，端元模型分析（End-Member Modeling Analyses, EMMA）已成为一种主流的分析手段，该方法能够将多成因混合的粒度分布频率数据集分解为若干个具有明确沉积学与动力学意义的端元组分，从而实现复杂沉积过程的解构^[23]。

通常情况下，经过单一风力分选过程的风成沉积物，其粒度分布曲线会呈现出特定的单峰特征，并具有稳定的主峰粒径。这一特征粒径能为其沉积学起源提供极佳的指纹信息^[20,24-25]。更为重要的是，即使当风成物质与其他沉积物（如坡积物、冲积物）或原位风化的土壤母质发生混合时，其特征主峰粒径在大多数情况下仍能保持相对稳定，不易受混合作用的掩盖^[26-27]。这一特性为利用粒度分布曲线及端元分析技术，在复杂的祁连山高山土壤系统中追溯风成沉积物的贡献提供了重要的理论依据与切入点。

通过采集山前黄土与高海拔高山土壤样品，对比分析其粒度分布特征，并运用稳健的端元分析模型，旨在回答以下关键问题：（1）祁连山高山土壤的细粒物质是否与山麓黄土同源，且具有风成属性？（2）控制该区域风成物质传输与沉降的主要大气动力过程是什么？在上述问题的基础上，进一步探讨风成物质输入对高山土壤发生过程及其生态功能的影响。

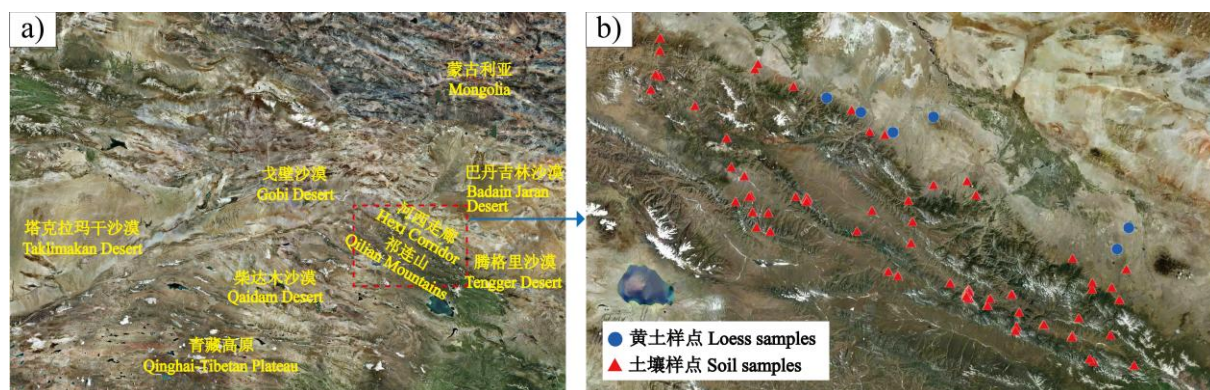
1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域主要涵盖祁连山黑河流域上游地区。祁连山脉呈西北—东南走向，绵延约 1 000 km，构成了青藏高原东北边缘的重要地形骨架。该山脉平均海拔超过 3 000 m，最高峰海拔约 5 500 m，与其北侧广阔的河西走廊之间形成了 2 000~3 000 m 的巨大海拔落差，这种宏大的地形反差对区域气流的运行产生了显著的阻挡与抬升作用（图 1）。

由于深居内陆，远离海洋水汽调节，研究区表现出典型的大陆性气候特征：冬季受蒙古—西伯利亚高压控制，寒冷干燥；夏季受热低压影响^[28]，相对炎热，昼夜温差显著。区域降水主要集中于 6 月至 9 月，这主要得益于东亚夏季风带来的暖湿气流。巨大的海拔落差在山体上形成了显著的水分梯度效应：年均降水量从山顶地区的 700 mm 以上，向北递减至河西走廊的 200 mm 以下；与此同时，年均气温与潜在蒸发量则呈现反向变化趋势。受水热条件垂直分异的控制，整个山脉的植被垂直带谱明显，以高山草甸和灌木为主，北坡阴湿生境下零星分布着云杉等针叶林。

从宏观地貌格局来看，祁连山四周被广袤的干旱荒漠区所环绕：西临塔克拉玛干沙漠，东接巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠，北靠戈壁沙漠，南邻柴达木盆地沙漠（图 1）。这些广阔的干旱地区拥有丰富的松散沉积物，是潜在的巨大尘源区，极有可能成为祁连山土壤风成沉积的物源。尽管区分具体的单一尘源并非本研究的重点，但这种地貌格局暗示了风成过程在区域土壤形成中的潜在重要性。Küster 等^[14]的研究指出，全新世黄土是沿祁连山前缘 500 km 范围内普遍存在的一种区域性地质现象。



注：(a) 影像底图显示研究区域（红色虚线框）被广袤的干旱沙漠所环绕；(b) 山麓带黄土采样点和祁连山脉高海拔土壤采样点分布。Note: (a) The image map shows the study area (red dashed box) surrounded by vast arid desert; (b) distributions of loess sample points in the foothills and high-altitude soil sample points in the Qilian Mountains.

图 1 研究区及样点分布（以彩图发表）

Fig. 1 Study area and sample points distributions

1.2 土壤调查采样与实验室分析

为了系统揭示祁连山土壤的分布规律与属性特征，在研究区内开展了大规模野外土壤调查与采样工作。在地形相对平缓区域共挖掘并采集了 81 个具有代表性的高山土壤剖面，在祁连山前缘采集了 6 个典型的黄土状土壤剖面。其中，选取 3 个典型剖面（剖面 1-3）代表研究区主要的土壤剖面特征，剖面 1 位于祁连山北麓的河西走廊；剖面 2 与剖面 3 分别位于祁连山葫芦沟小流域的阳坡与阴坡。依据标准土壤调查规范，野外条件下对土壤剖面发生层次、土壤结构、颜色及根系分布等形态特征进行了详细描述。随后按成土发生层进行采样，样品密封后带回实验室开展理化属性分析。

研究区内多数相对稳定的台地及缓坡，土壤往往富含粉粒物质，并伴随发育有根系缠结的草毡层；部分剖面上下土层质地较为均一，但更多土壤剖面结构呈现出明显的母质不连续特征：粉质表土层覆盖于碎屑质基质层。从土壤分类学角度看，祁连山地区较平坦地形下土壤类型以锥形土为主，在坡度较大或常年受冲积作用影响的地带，以新成土为主；而在部分水分条件良好的凹坡区域，分布有均腐土或有机土^[29]。

祁连山前缘采集的 6 个黄土状土壤（极弱风化黄土）剖面（图 1）作为对比基准。每个黄土剖面的采样深度均达到 1.2 m，自下而上分 4 个层位进行采集。这些土壤剖面自上而下质地与颜色相当均匀，表明其受到的成土风化作用较弱，较好地保留了原始沉积特征。这些采样点的地理位置与 Küster 等^[14]所划定的黄土带分布范围高度吻合，具有良好的代表性。

所有采集的土壤样品在实验室经自然风干后，通过 2 mm 标准筛，并手工挑除细根与石砾。粒径分布的测定采用美国 Beckman Coulter 公司生产的 LS230 型激光衍射粒度分析仪，测量范围为 0.4~2000 μm ，拟合方式为通用模式。为确保测定结果反映矿物颗粒的真实粒度，测定前对样品进行前处理：加入过量盐酸（HCl）以去除碳酸盐，加入过氧化氢（ H_2O_2 ）并加热以充分去除有机质。用 0.5 mol·L⁻¹ 六偏磷酸钠（ $(\text{NaPO}_3)_6$ ）作为分散剂，静置过夜，并配合超声波震荡 15 min，使土样颗粒在溶液中充分分散^[30]。

1.3 粒度端元分析模型

粒度数据的解混分析通过 R 语言环境下的 EMMAgeo (0.9.8) 软件包中的稳健型 EMMA 算法进行运算。EMMAgeo 是一款专门用于沉积物粒度分布数据非参数端元建模分析的工具^[23]。与其他现有的端元建模算法相比，EMMAgeo 在正确解混端元分布形状和估算混合比例方面的性能相当出色，且它是目前唯一可用的包含不确定性估计的开源粒度解混方法，这使得分析结果更具统计学上的可靠性^[23]。在端元建模过程中，结合模型参数以及前人研究经验选择合理的端元粒径范围及数量，通

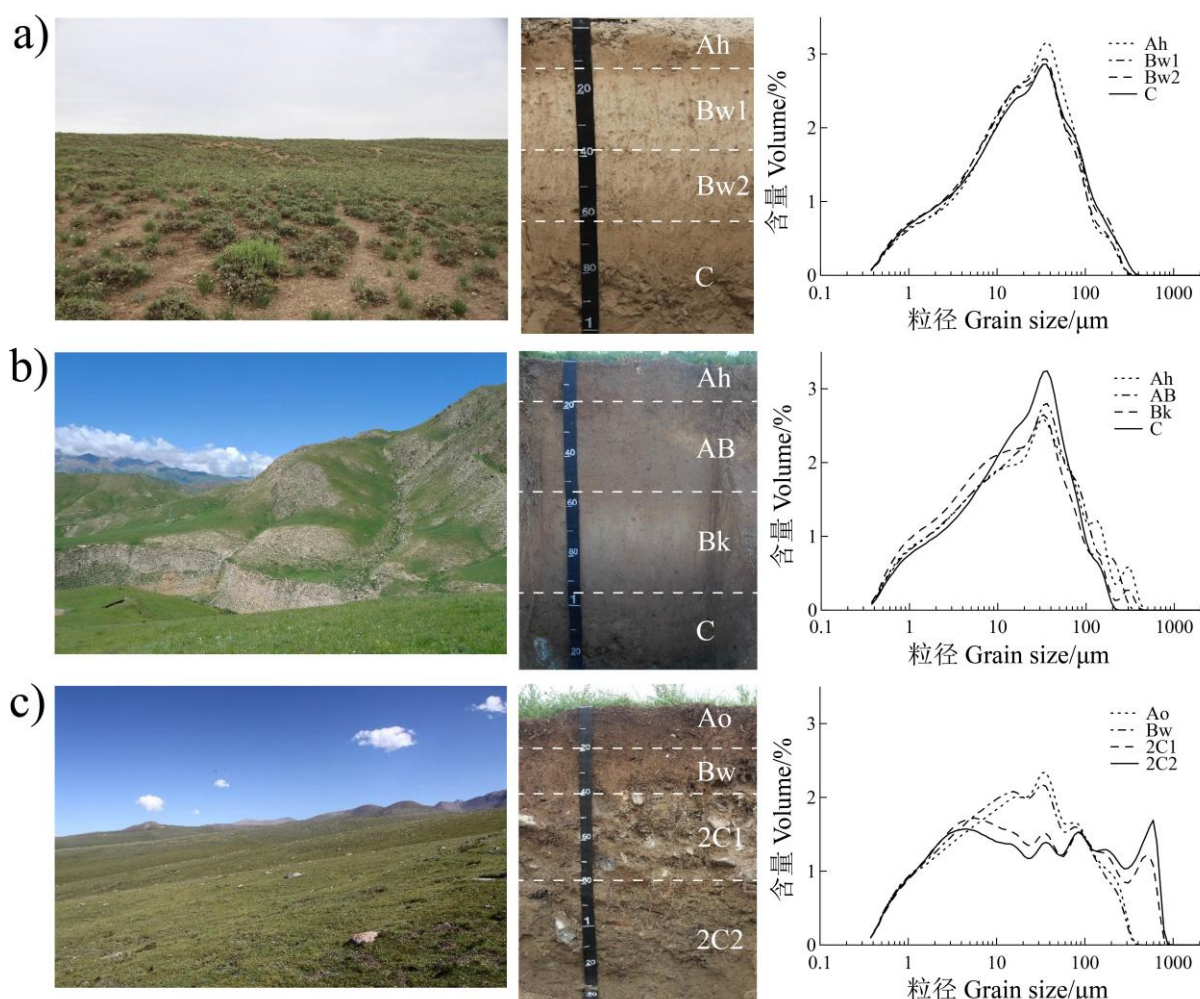
过逐步增加端元数量进行模型拟合效果对比。在保证模型拟合较好的同时,遵循简约性原则,优先选择端元数量较少的最优解。模型性能通过样本与粒级尺度的解释方差、均方根误差、各端元解释贡献率及端元间重叠程度等多指标综合评价。

2 结果

2.1 典型剖面土壤粒度特征

野外观测表明,研究区土壤主要发育为三种典型形态。结合剖面形态特征与粒度数据,对比分析后,本文选取了三个具有代表性的剖面进行阐述(图2)。

剖面1(1849 m)位于祁连山北麓,发育于较干旱环境,为典型的类黄土剖面。剖面上下层在形态上差异较小,成土作用整体较弱。其粒度分布表现出极高的均一性,粒度曲线主峰始终稳定在约37 μm 。全剖面粒度特征的一致性表明,其母质层与上覆土层在沉积过程上具有连续性。剖面2(3129 m)代表了高山区母质均一型土壤,由于所处环境水分条件较好,在有机质积累、碳酸钙淋洗等成土作用下表现出明显土壤发生层分异,剖面发生层序为 Ah-AB-Bk-C^[29]。尽管成土作用较剖面1强烈,不同层位的粒度分布曲线仍保持高度相似,主峰同样集中在约37 μm ,显示出物质来源的连续性。剖面3(3008 m)则展示了研究区广泛分布的成土-母质不连续型剖面结构,具有 Ao-Bw-2C1-2C2 的发生层序列^[29]。表层为富含细颗粒、植物根系和有机质的草毡层,覆盖于较粗的岩石碎屑等粗质母质上。剖面3表土层与下部母质层在形态及粒度分布上均存在显著差异。然而,上层土壤的主峰(约37 μm)在下部母质中以次峰形式清晰出现。这种跨越剖面类型与岩性界面的约37 μm 组分在研究区普遍存在,指示其具有共同的风成起源。外来细粒物质不仅构成了表层土壤的主体,还渗入下部粗骨架孔隙中,系统性地改变了母质层的物理性质。



注：(a)，(b) 和 (c) 分别为剖面 1、剖面 2 和剖面 3；Ah 为腐殖质层，Ao 为草毡表层，AB 为过渡层，Bw 为雏形层，Bk 为钙积层，C 为母质层，2C 为二元母质层。Note: (a), (b), and (c) represent the Profile 1, Profile 2, and Profile 3, respectively; Ah refers to the humus horizon, Ao to the mattic epipedon, AB to the transitional horizon, Bw to the cambic horizon, Bk to the calcic horizon, C to the parent material horizon, and 2C to the C horizon developed in a contrasting parent material (lithologic discontinuity).

图 2 不同类型剖面及其粒度特征 (以彩图发表)

Fig. 2 Different types of profiles and their grain-size characteristics

2.2 区域土壤粒度特征

区域尺度的统计分析进一步证实了上述认识 (图 3)。6 个黄土状土壤剖面 (图 3a) 在所有层位中表现出显著的粒度特征：粒度曲线呈单峰分布，主峰粒径集中于 33~38 μm 。高山区域表层土壤 (图 3b) 的粒度分布与黄土相似，其最显著特征为约 37 μm 处的突出主峰，并伴随 1~3 μm 和 10~20 μm 的低含量次峰，而粗颗粒区间 (>100 μm) 峰值极低。这种统计学上的高度一致性，有力证明了山麓黄土与高山表层土壤之间存在同源关系。

相比之下，表层土壤粒度曲线受植被覆盖、生物扰动等局地因素影响而表现出一定复杂性，但约 37 μm 的峰值粒径在所有样品中均稳定存在。C 层 (图 3c) 的主峰 (30~40 μm) 与表土高度重合，表明细粒物质在剖面垂直方向上具有良好的连续性。即便在以粗碎屑为主、粒度曲线呈多峰特征的 2C 层 (图 3d) 中，30~40 μm 处的特征峰值仍清晰可辨。这一现象进一步佐证了该粉尘组分的普遍性与强渗透性，反映出风成输入对剖面整体物质组成的深刻影响。

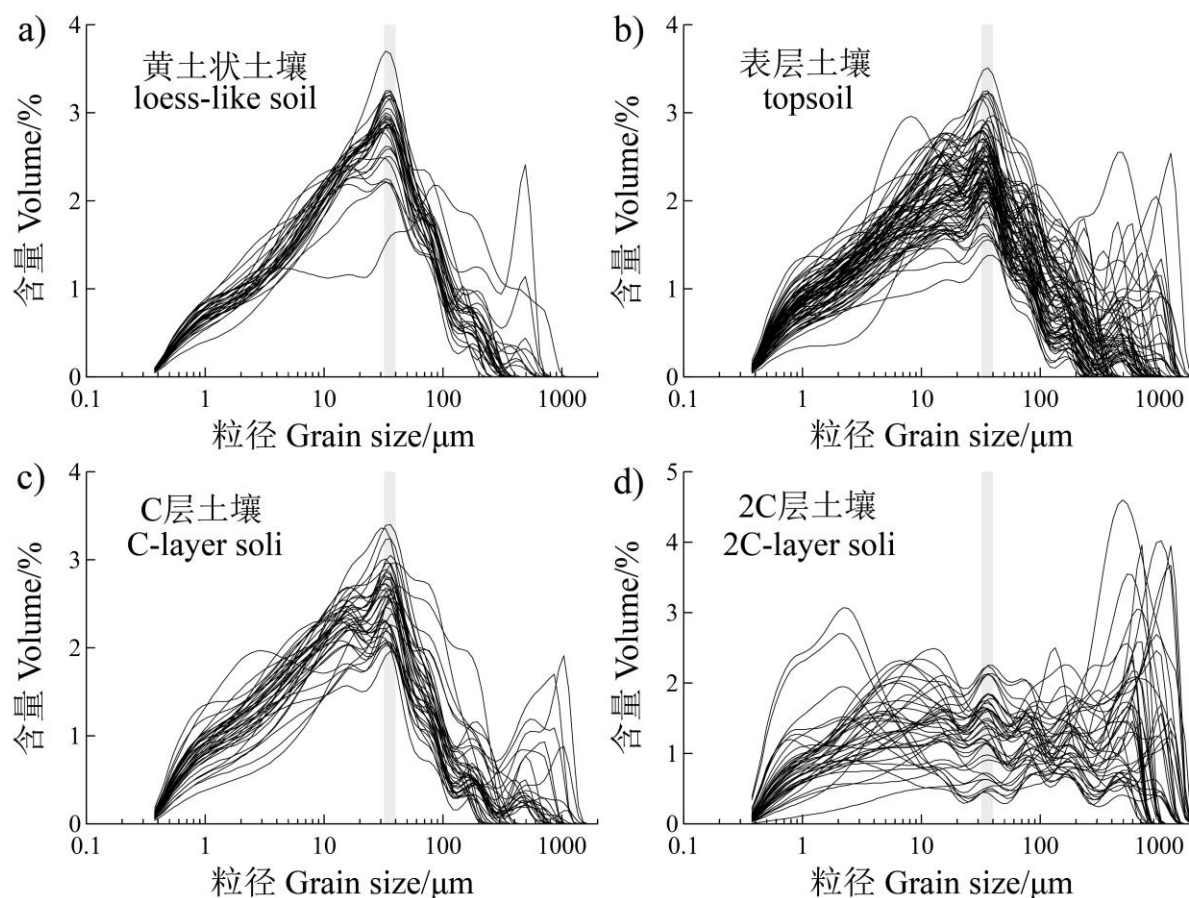


图 3 不同样品的粒径分布曲线

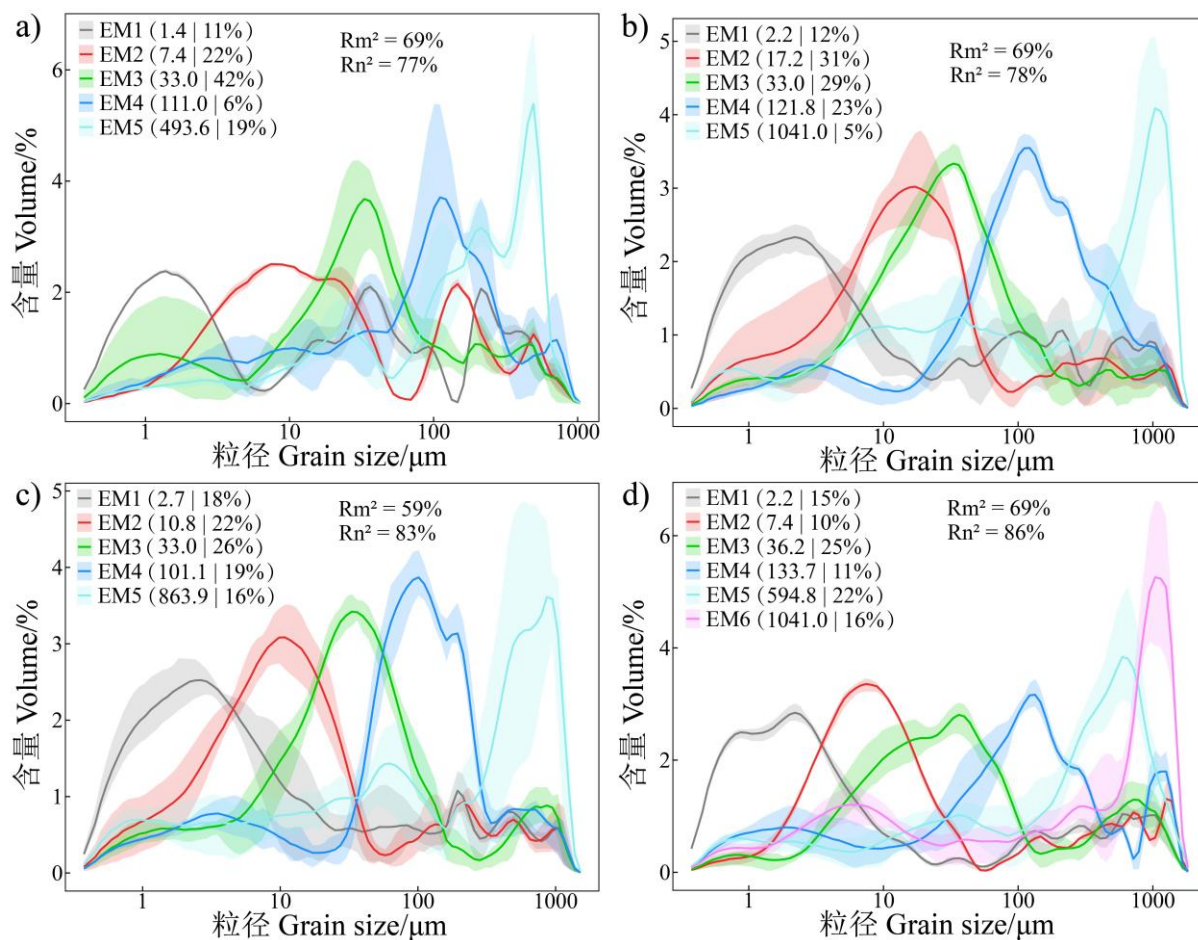
Fig. 3 Grain-size distribution curves for different samples

2.3 粒度端元分析结果

采用 EMMAgeo 模型对粒度数据集进行解混分析, 在综合考虑模型拟合优度及端元稳定性的基础上, 最终确定黄土状土壤包含 5 个粒度端元 (EM1-EM5, 图 4a)。其中, EM3 (众数粒径为 33.0 μm , 下同) 占据绝对主导地位, 对粒度变异的解释作用最为显著 (42%), 进一步验证了 33~38 μm 粒级在黄土物质中的核心地位。EM2 (7.4 μm) 和 EM5 (493.6 μm) 贡献次之, 而 EM1 和 EM4 对整体变异的解释程度较低。该模型对粒级方差的总体解释率为 77%。

祁连山表层土壤同样解析出 5 个粒度端元 (图 4b)。其中, EM2 (17.2 μm) 和 EM3 (33.0 μm) 对粒度数据整体变异性的贡献最大, 是控制粒度分布变化的主要端元。EM4 (121.8 μm) 的解释作用次之, 代表相对较粗的颗粒组分; 极细粒的 EM1 (2.2 μm) 和极粗粒的 EM5 (1041.0 μm) 对总体变异的解释程度相对较低。该模型对粒级方差的总体解释率为 78%。

C 层与 2C 层的端元分析结果 (图 4c、图 4d) 显示, EM3 (33.0~36.2 μm) 依然是控制粒度数据集变化的主导端元。即便在粒度组成极为复杂、以粗骨母质为主的 2C 层中, EM3 的解释方差在所有端元中最大, 表明风成细粒物质在粗碎屑母质中同样具有不可忽视的重要贡献。



注：(a)，(b)，(c) 和 (d) 分别为黄土状土壤、表层土壤、C 层土壤和 2C 层土壤的端元分布；EM 代表端元 (end-member)； R_m^2 代表样本级方差； R_n^2 代表粒级方差；图例括号里为各端元的峰值和解释方差。Note: Figures (a), (b), (c), and (d) show the end-member distributions for loess-like soil, topsoil, C-layer soil, and 2C-layer soil, respectively; EM denotes end-member; R_m^2 represents sample data variance; R_n^2 denotes grain-size class data variance; the mode position and explained variance for each end-member are indicated in parentheses in the legend.

图 4 端元粒度分布与解释方差 (以彩图发表)

Fig. 4 End-member grain-size distribution and explained variance

2.4 不同粒度端元的空间分异特征

祁连山表层土壤中各粒度端元的空间分布呈现出显著的分异规律 (图 5)。EM1 在祁连山脉西南侧高海拔样点中占比较高，并向东北方向逐渐降低。EM2 在整个研究区内普遍存在，但在部分局地流域中含量相对较低。EM3 则表现出明显的西北—东南向递减趋势，在祁连山西北侧、靠近沙漠源区的样品中占比较高。相比之下，EM4 的空间分布具有较强的局地性，其高值样点多呈斑块状聚集。

相关性分析进一步揭示了环境因子对粒度端元空间分布的控制作用 (表 1)。EM1 的含量与海拔高度、降水量及植被覆盖度均呈显著正相关；相反，EM3 的占比与上述环境因子均呈显著负相关。EM2 仅与降水量呈显著正相关，而与海拔高度和植被覆盖度之间的相关性不显著。

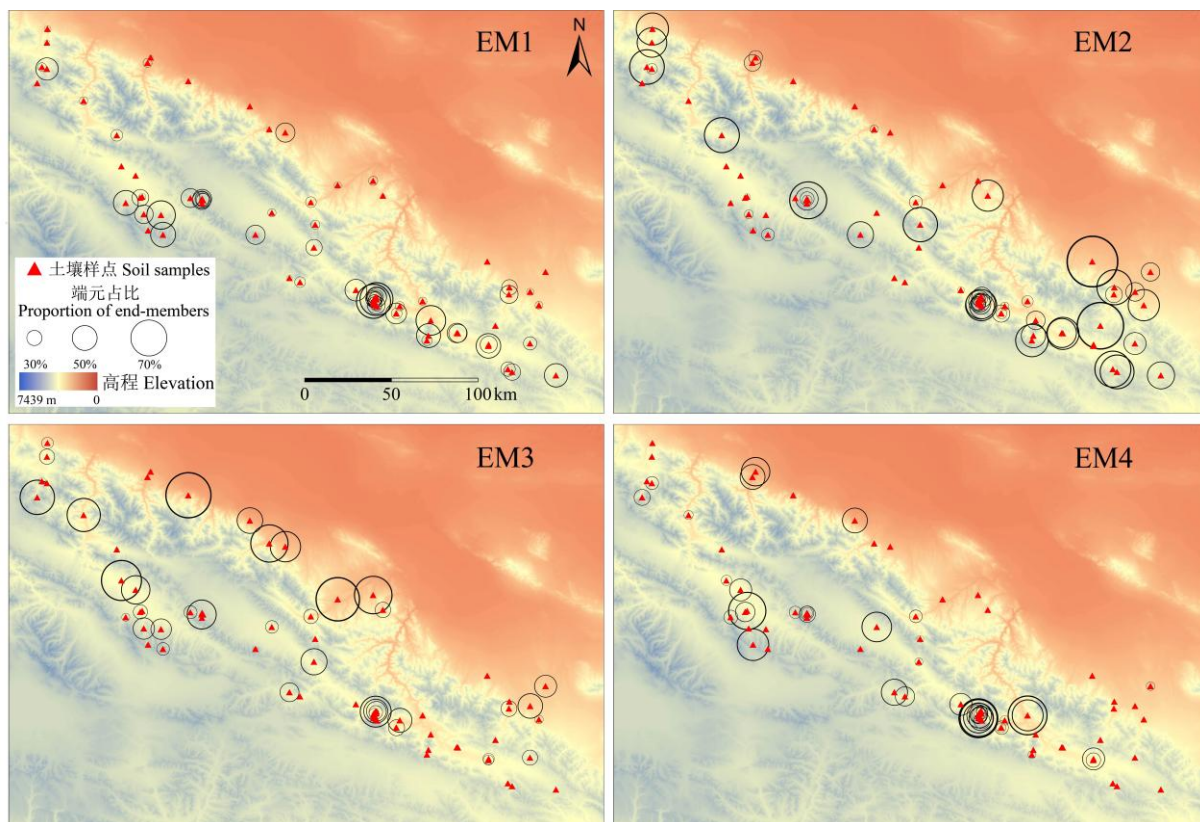


图 5 不同样点端元 EM1-EM4 占比的空间分布 (以彩图发表)

Fig. 5 Spatial distributions of EM1- EM 4 proportion at different sample points

表 1 端元 EM1- EM 4 的占比与环境变量之间的相关性

Table 1 Correlation between the proportion of EM1- EM 4 and environmental variables

端元 End-member	海拔 Altitude	降水量 Precipitation	归一化植被指数 NDVI
EM1	0.252*	0.323**	0.366***
EM2	0.067	0.318**	0.130
EM3	-0.348**	-0.563***	-0.276*
EM4	-0.019	0.040	-0.024

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$. Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$.

3 讨论

3.1 高山土壤成土的粉尘来源与同源性

已有大量研究表明,外源粉尘是高山土壤中黏粒、粉粒级细土物质的重要来源,对土壤理化性质及其发育过程具有深远影响^[31-32]。Pye^[24]指出,黄土的形成依赖于稳定、大量的粉尘供给及有效的沉积保存条件。青藏高原及祁连山脉的快速构造抬升形成了显著的地形屏障;毗邻的塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠等干旱区持续产生并输出高通量风成物质;同时,在盛行的西北风和西风环流共同作用下,祁连山成为区域尺度上的天然“粉尘捕获器”^[33]。

本研究通过对比三类型土壤剖面(剖面 1-剖面 3)发现,尽管其成土环境、母质条件及剖面形

态存在显著差异,但其粒度分布的主峰高度一致,均集中在约 37 μm 。这种跨剖面类型、跨地貌单元的粒度一致性,指示这些土壤细粒物质具有相同或高度相似的来源或传输机制。尤其是在存在明显岩性不连续界面的剖面 3 中,其表层细土显然不可能由下部粗碎屑母质原位风化形成,而更符合典型的外源风成输入特征。

粒度端元分析结果进一步对上述同源关系进行了量化验证。在黄土状土壤中,以 EM3 为主导端元,构成黄土物质的“骨架”组分;而在高山表层土壤中,EM3 同样广泛分布且占主导地位。这一特征与典型 1.b.2 类型^[20]沉积黄土的粒度结构高度一致,证实了高山表层土壤与山麓黄土之间具有共同的风成来源。

此外,EM3 组分在 C 层及 2C 层中的普遍存在,表明风成细粒物质并非仅限于表层累积,而是在长期地质演化过程中,通过淋溶、重力渗入及冻融扰动等机制,沿粗碎屑母质的孔隙向下迁移,并在深层土壤中持续富集,从而在整个剖面尺度上保留了风成输入的印记^[13]。

3.2 不同端元代表的动力学过程与传输路径

基于各粒度端元的粒径特征、空间分布格局及其与环境因子的相关关系,可以进一步解析控制祁连山地区风成沉积的主要动力机制及其传输路径。

EM1 代表远源、高空背景粉尘,其极细的粒径特征对应风力输送过程中可长期悬浮的大气组分^[34]。在空间分布上,EM1 含量由祁连山西南侧向东北侧逐渐降低,并与海拔高度和降水量呈显著正相关关系。这表明该端元主要通过高空西风环流进行长距离输送,而并非受近地面局地风系控制。在高海拔地区,地形抬升效应增强了降水过程,使得这些极细颗粒更易通过湿沉降被有效捕获,并在植被覆盖度较高的区域中富集。相较之下,东北部低海拔山麓地区由于 EM3 等较粗粒端元的大量输入,使得 EM1 在相对组成中的占比受到明显稀释。

EM2 对应区域性悬浮粉尘。该粒级在青藏高原东北缘及其周边地区广泛存在,符合 Vandenberghe^[20]所定义的 1.c.1 类型黄土沉积特征。其动力学属性介于远源背景粉尘与近源跃移组分之间,代表可在大气中较长时间悬浮,并由西风带等大尺度环流驱动的尘埃输入^[13,18,33]。EM2 在研究区内分布相对均一,且与局地地形因素的相关性较弱,表明其主要受区域尺度大气输送过程控制,是一种稳定的背景输入成分。

EM3 代表近源跃移或短期悬浮粉尘,是祁连山地区黄土沉积的核心组分,对应典型的 1.b.2 类型黄土^[20]。该端元主要在沙尘暴等高能事件期间,由强劲的冬季风(以西北风为主)从邻近的沙漠和戈壁区(如巴丹吉林沙漠)输送而来。碎屑物质疏松且常年活跃的较大河谷地区及冲积扇地区,在局地强风的作用下同样可产生此粒级组分^[19-20]。其空间分布整体呈现出由西北向东南递减的显著梯度特征,与其顺风向的传输路径一致,在研究区西南部央隆河谷出现局部高值。在北部山麓地区,由于缺乏高大山体的有效阻挡,且气候干燥、植被覆盖度低,较粗颗粒物更易快速沉积,从而导致 EM3 在样品中占据极高比例。EM3 与海拔高度之间的显著负相关关系进一步表明,该组分主要在近地层气流中传输,难以跨越高海拔山脊进入高山区域。

EM4 代表局地来源的粗粒组分,对应黄土沉积类型 1.a^[20]。该端元主要来源于河流阶地、干燥分水岭或裸露地表,通过强风作用在数公里尺度内进行短距离跃移运输^[13,35]。因此,其空间分布表现出明显的斑块状聚集特征和强烈的局地性,受微地形和下垫面条件的控制作用显著。

EM5 和 EM6 则可能代表局部风化基岩碎屑与风成物质的混合产物,其形成过程更多反映了非风成的原位物质贡献,对区域尺度风成沉积过程的指示意义相对有限。

3.3 风成加积过程对高山土壤发生与生态功能的影响

研究表明,风成粉尘的持续输入是祁连山地区高山土壤形成过程中不可忽视的基本地质过程。与干旱区黄土因水分限制而成土改造较弱不同,沉积于高山环境中的风成物质在较高水分供给条件下经历了显著的成土作用,包括有机质积累、碳酸盐淋溶及结构重塑等^[36]。风成物质的持续输入还普遍导致祁连山高山土壤发育明显的岩性不连续性。细粒、富有机质的表层土壤覆盖于粗骨质

或冰碛母质之上,形成典型的“粉质盖粗骨质”二元结构。这种结构并非原位风化产物,而是长期风成加积与后期成土改造共同作用的结果^[37-39]。风成细粒物质不仅构成高山土壤的主体基质,还通过渗透与迁移过程影响整个剖面的物理结构与水分行为^[13]。

从生态功能角度看,风积形成的粉砂质表土对高山生态系统具有关键意义。细粒物质较大的比表面积显著增强了土壤的水分、养分保持能力^[40-41];同时,粉黏粒对有机质的物理保护作用使高山土壤成为重要的陆地有机碳库^[42]。然而,该土壤—生态系统对风成细粒物质具有高度依赖性,一旦草毡表层因过度放牧或气候变化遭到破坏,疏松的粉砂质土壤极易发生风蚀和水蚀,导致表土流失、土壤退化及碳库功能削弱^[43]。

因此,从土壤发生学与生态学视角看,风积粉尘不仅塑造了祁连山高山土壤的物质基础,也在维系区域生态系统稳定性中发挥着基础性作用。加强对高山草毡表层土壤的保护,是维护祁连山生态安全屏障功能的重要土壤学依据。

4 结 论

基于粒度分布特征与端元分析的综合证据,本研究明确揭示祁连山高海拔土壤细粒物质主要来源于风积粉尘,其粒度组成与山麓全新世黄土具有同源性。不同地貌单元、剖面类型及发生层位的土壤均表现出稳定的特征峰值($\sim 37\ \mu\text{m}$),对应主导端元 EM3,即使在岩性明显不连续的剖面中也普遍存在,表明高山土壤细粒物质并非原位风化产物,而是受长期风成加积控制。

端元分析进一步区分了不同尺度大气环流对祁连山风成沉积的控制机制:细粒端元(EM1、EM2)主要由高空西风系统携带,经长距离输送并在高海拔地区以湿沉降方式富集;粗粉砂端元(EM3)则主要受近地面冬季风(西北风)控制,由邻近沙漠、戈壁区及活跃冲积扇等经中短距离输送,并优先沉积于北部山麓及低海拔区域。持续的风成粉尘加积在粗骨质高山地表形成以粉砂质细土为主的表层土壤,广泛发育岩性不连续结构,显著影响高山土壤的发生过程及其水分、养分和有机碳保持功能。本研究从粒度端元角度强调了风成加积过程在塑造祁连山高山土壤结构与维系高山生态系统稳定性中的基础性作用。

参考文献 (References)

- [1] Bristow C S, Hudson-Edwards K A, Chappell A. Fertilizing the Amazon and equatorial Atlantic with west African dust[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(14): 2010GL043486.
- [2] Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, et al. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development[J]. *Nature*, 1999, 397(6719): 491-497.
- [3] Field J P, Belnap J, Breshears D D, et al. The ecology of dust[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, 8(8): 423-430.
- [4] Liu D S. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [5] Simonson R W. Airborne dust and its significance to soils[J]. *Geoderma*, 1995, 65(1/2): 1-43.
- [6] Yaalon D H, Ganor E. The influence of dust on soils during the Quaternary[J]. *Soil Science*, 1973, 116(3): 146-155.
- [7] Egli M, Poulencard J. Soils of mountainous landscapes[M/OL]//Richardson D, Castree N, Goodchild M F, et al. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. 1st ed. Chichester: Wiley, 2016: 1-10[2025-11-06]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118786352.wbieg0197>.
- [8] Dahms D E. Mineralogical evidence for eolian contribution to soils of late quaternary moraines, Wind River Mountains, Wyoming, USA[J]. *Geoderma*, 1993, 59(1/2/3/4): 175-196.
- [9] Küfmann C. Soil types and eolian dust in high-mountainous karst of the Northern Calcareous Alps (Zugspitzplatt,

- Wetterstein Mountains, Germany)[J]. *Catena*, 2003, 53(3): 211-227.
- [10] Rost K T. Late Holocene loess deposits and dust accumulation in the alpine meadow belt of the Wutai Shan, China[J]. *Quaternary International*, 2001, 76: 85-92.
- [11] Dia A, Chauvel C, Bulourde M, et al. Eolian contribution to soils on Mount Cameroon: Isotopic and trace element records[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226(3/4): 232-252.
- [12] Muhs D R, Benedict J B. 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.
- [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] Küster Y, Hetzel R, Krbetschek M, et al. Holocene loess sedimentation along the Qilian Shan (China): Significance for understanding the processes and timing of loess deposition[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 114-125.
- [15] Lehmkuhl F, Schulte P, Zhao H, et al. Timing and spatial distribution of loess and loess-like sediments in the mountain areas of the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2014, 117: 23-33.
- [16] Lehmkuhl F. The spatial distribution of loess and loess-like sediments in the mountain areas of Central and High Asia[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1997, Suppl.-Bd. 111: 97-116.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Shi Y K, Chongyi E, Peng Q, et al. Rare earth elements in aeolian loess sediments from Menyuan Basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for provenance[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1074909.
- [20] Vandenbergh J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 121: 18-30.
- [21] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3/4): 263-277.
- [22] Schaetzl R J, Luehmann M D. Coarse-textured basal zones in thin loess deposits: Products of sediment mixing and/or paleoenvironmental change [J]. *Geoderma*, 2013, 192: 277-285.
- [23] Dietze E, Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo[J]. *E&G Quaternary Science Journal*, 2019, 68(1): 29-46.
- [24] Pye K. The nature, origin and accumulation of loess[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, 14(7/8): 653-667.
- [25] Tate S E, Greene R S B, Scott K M, et al. Recognition and characterisation of the aeolian component in soils in the Girilambone Region, north western New South Wales, Australia[J]. *Catena*, 2007, 69(2): 122-133.
- [26] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Bimodal grain-size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications[J]. *Catena*, 2004, 55(3): 325-340.
- [27] Hobbs T, Schaetzl R J, Luehmann M D. Evidence for periodic, Holocene loess deposition in kettles in a sandy, interlobate landscape, Michigan, USA[J]. *Aeolian Research*, 2011, 3(2): 215-228.
- [28] Long H, Cheng L Q, Yang F, et al. Temperature regulates dust activities over the Tibetan Plateau[J]. *Innovation*, 2025, 6(4): 100840.
- [29] Zhang G L, Li D C. Soil in Heihe River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2020. [张甘霖, 李德成. 黑河流域土壤[M]. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [30] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]

- [31] Kirkpatrick J B, Green K, Bridle K L, et al. Patterns of variation in Australian alpine soils and their relationships to parent material, vegetation formation, climate and topography[J]. *Catena*, 2014, 121: 186-194.
- [32] Munroe J S, Attwood E C, O'Keefe S S, et al. Eolian deposition in the alpine zone of the Uinta Mountains, Utah, USA[J]. *Catena*, 2015, 124: 119-129.
- [33] Long H, Cai Y, Zhang J R, et al. Alternating dominance of Westerlies and East Asian winter monsoon on dust activities across the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 18.5 ka[J]. *Global and Planetary Change*, 2025, 245: 104684.
- [34] Munroe J S, Norris E D, Olson P M, et al. Quantifying the contribution of dust to alpine soils in the periglacial zone of the Uinta Mountains, Utah, USA[J]. *Geoderma*, 2020, 378: 114631.
- [35] Nottebaum V, Stauch G, Hartmann K, et al. Unmixed loess grain size populations along the northern Qilian Shan (China): Relationships between geomorphologic, sedimentologic and climatic controls[J]. *Quaternary International*, 2015, 372: 151-166.
- [36] Yang F, Huang L M, Rossiter D G, et al. Evolution of loess-derived soil along a climatic toposequence in the Qilian Mountains, NE Tibetan Plateau[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(3): 270-280.
- [37] Zhang C, Yang J L, Yang F, et al. Identification of lithological discontinuities and preliminary exploration of material sources in typical mountain soils of the southern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2025, 251: 108819.
- [38] Schaetzl R J, Anderson S. *Soils: Genesis and Geomorphology*[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [39] Phillips J D, Lorz C. Origins and implications of soil layering[J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 89(3/4): 144-155.
- [40] Yang F, Liu F, Huang L M, et al. Changing controls of soil water retention in an alpine catchment: Integrating sedimentological and pedological processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126832.
- [41] Yang F, Zhang G L, Yang J L, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3086-3093.
- [42] Gu J, Yang F, Li D X, et al. Stock and carbon sequestration potential of mineral-associated organic carbon in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geoderma*, 2025, 463: 117585.
- [43] Zhang G L, Yang F, Long H. Save the life-sustaining mattic layer on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Innovation*, 2023, 4(3): 100418.

(责任编辑: 檀满枝)