

张楚, 杨金玲, 杨飞, 叶明亮, 谷俊, 陈雅敏, 张甘霖. 青藏高原色季拉山土壤元素地球化学特征及化学风化强度研究[J]. 土壤学报, 2025.

ZHANG Chu, YANG Jinling, YANG Fei, YE Mingliang, GU Jun, CHEN Yamin, ZHANG Ganlin, . Elemental Geochemical Characteristics and Chemical Weathering Intensity of Soils in the Shergyla Mountain, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025.

青藏高原色季拉山土壤元素地球化学特征及化学风化强度研究*

张楚^{1,2}, 杨金玲^{1,2}, 杨飞^{1,2}, 叶明亮^{1,2}, 谷俊^{1,2}, 陈雅敏³,
张甘霖^{1,2,4†}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040; 4. 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)

摘要: 为揭示青藏高原南部山地土壤的风化强度和元素地球化学特征, 选择位于林芝地区的色季拉山作为研究区, 在不同景观-海拔选取 15 个典型土壤剖面, 分析了土壤元素地球化学特征并估算了不同土层的风化强度。结果表明: 色季拉山土壤受高寒气候影响, 总体而言发育程度较弱, 土壤类型以寒冻锥形土为主; 土壤矿物以原生矿物为主, 次生矿物含量很低; 化学蚀变指数(CIA)介于 47~62 之间, 绝大部分土壤处于弱风化状态, 降水量、海拔、坡度、母质等成土因素对土壤化学风化影响的差异不明显, 揭示寒性土壤温度状况是本区域土壤化学风化和土壤发育的限制性因子。土壤剖面的风化强度指标(CIA、风化淋溶系数 ba、帕克风化指数 WIP)自表层向下具有不同的分布模式, 主要受风力、重力、径流等外营力引起的搬运、堆积作用影响, 化学风化对成土作用影响较小。高山环境控制着土壤的整体发育, 从而削弱了其他成土因素产生的差异。本研究结果可为理解青藏高原土壤发生演变以及土壤制图提供理论依据, 为高原山地生态系统管理提供土壤学的依据。

关键词: 色季拉山; 元素地球化学; 矿物风化; 成土因素; 土壤类型; 土壤发生

中图分类号: S151.1 文献标志码: A

Elemental Geochemical Characteristics and Chemical Weathering Intensity of Soils in the Shergyla Mountain, Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Chu^{1,2}, YANG Jinling^{1,2}, YANG Fei^{1,2}, YE Mingliang^{1,2}, GU Jun^{1,2}, CHEN Yamin³, ZHANG Ganlin^{1,2,4†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing

* 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0306)和国家科技基础资源调查专项(2022FY100202)资助 Supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No. 2019QZKK0306) and the Science & Technology Fundamental Resources Investigation Program (No. 2022FY100202)

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

作者简介: 张楚(1993-), 男, 云南泸西人, 博士研究生, 主要从事土壤发生与地球化学研究。E-mail: czhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2025-03-13; 收到修改稿日期: 年-月-日; 网络首发日期(www.cnki.net):

211135, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 4. State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to unravel the weathering intensity and elemental geochemical characteristics of soils in the southern mountainous regions of the Tibetan Plateau. 【Method】 Shergyla Mountain in Linzhi City was selected as the study area. Fifteen typical soil profiles were sampled across different landscapes and altitudes, and the geochemical characteristics of soil elements were analyzed, with weathering intensity estimated for different soil horizons. 【Result】 The results indicate that the soils of Shergyla Mountain, influenced by the alpine climate, are weakly developed, with the soil types dominated by Gelic Cambosols. For the studied soils, primary minerals were predominant in soil minerals while secondary minerals were present in low abundance. The Chemical Index of Alteration (CIA) ranged from 47 to 62, suggesting that most soils were in a state of weak weathering. The low temperatures at high altitudes restricted chemical weathering of soil minerals, resulting in insignificant impacts of precipitation, temperature, altitude, slope, and parent material on soil chemical weathering. The weathering intensity indicators (CIA, weathering leaching coefficient ba , Weathering Index of Parker WIP) across soil profiles exhibited different distribution patterns from the surface layer downwards, primarily influenced by transportation and deposition processes driven by external forces such as wind, gravity, and runoff. Nevertheless, the results indicate that chemical weathering had a relatively small impact on soil formation. 【Conclusion】 The alpine environment controls overall soil development thus weakening the difference between other soil forming factors. The findings of this study provide theoretical support for the evolution of pedogenesis and soil classification on the Tibetan Plateau and offer pedological insights into the rational utilization of land resources.

Key words: Shergyla Mountain; Elemental geochemistry; Mineral weathering; Soil forming factors; Soil types; Soil genesis

土壤的元素地球化学特征主要指元素在地球表面的空间分布、迁移转化规律以及与风化成土作用的关系,有助于揭示土壤的物质组成、演化历史及成土过程,还为土壤资源调查、环境评价及灾害预测提供科学依据,对于保障人类生存环境、理解气候变化对地球系统的影响具有重要意义^[1-5]。土壤风化强度作为评估土壤和生态系统稳定性的关键指标,与土壤侵蚀、重金属释放等环境问题紧密相关^[6-9],其变化反映了气候、植被等环境因素的变迁,对研究现代和古气候、古环境及地质历史具有重要意义^[10-11]。合理评估土壤风化强度,有助于制定科学的土壤分类体系和土地利用规划,保护土壤资源,促进农业、林业等产业的可持续发展,应对全球气候变化^[12-14]。

青藏高原被誉为“世界屋脊”和“亚洲水塔”,平均海拔超过 4 000 m,是众多河流的发源地,更是全球气候变化的关键区域^[15]。在全球气候变暖的背景下,青藏高原的生态系统极易受到影响^[16],研究热点主要集中在青藏高原的植被、水文、冰川等方面^[17-20],而对土壤的关注相对较少。近年来,一些研究开始关注青藏高原土壤的基本特征及空间分异^[21-23]。例如整个青藏高原土壤风化速率与温度、降水和植被类型的关系^[24-25]。高原土壤中的矿物组成和元素迁移过程对风化强度的影响^[26],土壤冻融过程在空间上的显著变异^[27],整个青藏高原土壤类型分布特征等^[28]。但这些研究成果多是着眼于大尺度区域,以典型山地等小尺度区域作为研究区,探讨土壤元素地球化学特征、风化强度随景观、海拔、坡度等因素而分异的相关研究目前很少报道,山地土壤的风化机制和主控因素尚不清晰。

藏南雅江流域地势西高东低,由高山、极高山和河谷盆地构成。其中,河谷盆地海拔由西向东逐渐降低,宽谷与峡谷相间分布^[29]。雅江流域除当地基岩风化形成的母质外,还

有较多风成黄土沉积物^[30-31]。已有研究表明,该区域的成土母质复杂,多存在母质不连续性^[32]。目前对该区域土壤风化和发育的空间分布特征研究较少,不同成土母质对土壤风化程度的影响仍不明确。因此,本研究采用按照地形序列采样的方法,研究雅江流域不同母质来源土壤的元素地球化学特征和风化强度随景观-海拔梯度的变化,对于深入理解该区域土壤风化机制,黄土沉积对成土过程的影响,预测土壤质量变化以及指导土地资源的合理利用具有重要意义。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区林芝市的色季拉山(29°21'-30°50'N, 94°28'-94°51'E),是雅江流域的典型山地,属于念青唐古拉山脉的一部分,其地形复杂多样,是尼洋河流域与帕隆藏布江的分水岭。地势较高,山脚海拔约3 000 m,山口海拔达4 728 m。色季拉山干湿季分明,降水集中在7—9月,受印度洋水汽影响,降水丰富^[33]。气温和降水量均呈现显著的垂直分布特征^[34],从山脚至山顶,气温逐渐降低,降水量逐渐增加。整体上年均温约5°C,年均降水量约900 mm^[35]。春季和秋季的气温则介于冬夏之间,昼夜温差较大。色季拉山植被受人为活动影响小,基本处于原始状态,物种多样性极为丰富,海拔由高到低大致可以划分为高山寒漠、草甸、灌丛、针叶林、针阔混交林等垂直带谱^[36]。色季拉山主体以花岗岩为主,原位的成土母质主要为花岗岩风化物,但色季拉山所处的雅鲁藏布江流域有广泛的风成沉积,因此常出现上部为风成沉积,下部为花岗岩风化物的二元母质特征。此外,受重力、流水等搬运作用影响,甚至出现更为复杂的母质特征^[32]。

1.2 样品采集与处理

本研究采样点布设于色季拉山西坡,即尼洋河流域一侧。按海拔、地形的差异挖掘了15个土壤剖面(图1),并记录采样点的环境信息(表1)。每个剖面按发生层采样,根据石质接触面出现的深度,采至B层或C层,共采集土壤样品64个。其中剖面P01-P09采集于山顶的一个小流域,自上而下依次为剖面P01-P09(图2)。剖面P09地势低洼,地表有较多积水,植被为草甸。剖面P10-P15采集于山顶小流域以下的不同海拔和部位。基于黄土在土壤中的占比,将成土母质划分为黄土母质、花岗岩风化物母质以及两者占比接近的混合母质^[32]。

采集的土壤经过风干和研磨,筛分至2 mm,作为进行理化分析所需的细土样品。以碳酸锂-硼酸熔融土壤制备待测液,用电感耦合等离子体质谱仪(Inductively coupled plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS)测定土壤中Si、Fe、Al、Mn、Ti、Ca、Mg、K、Na、P等元素含量。土壤矿物类型通过X射线衍射仪(XRD)测定,土壤颗粒组成采用激光粒度仪测定^[37]。土壤类型按照《中国土壤系统分类检索(第三版)》鉴定^[38]。

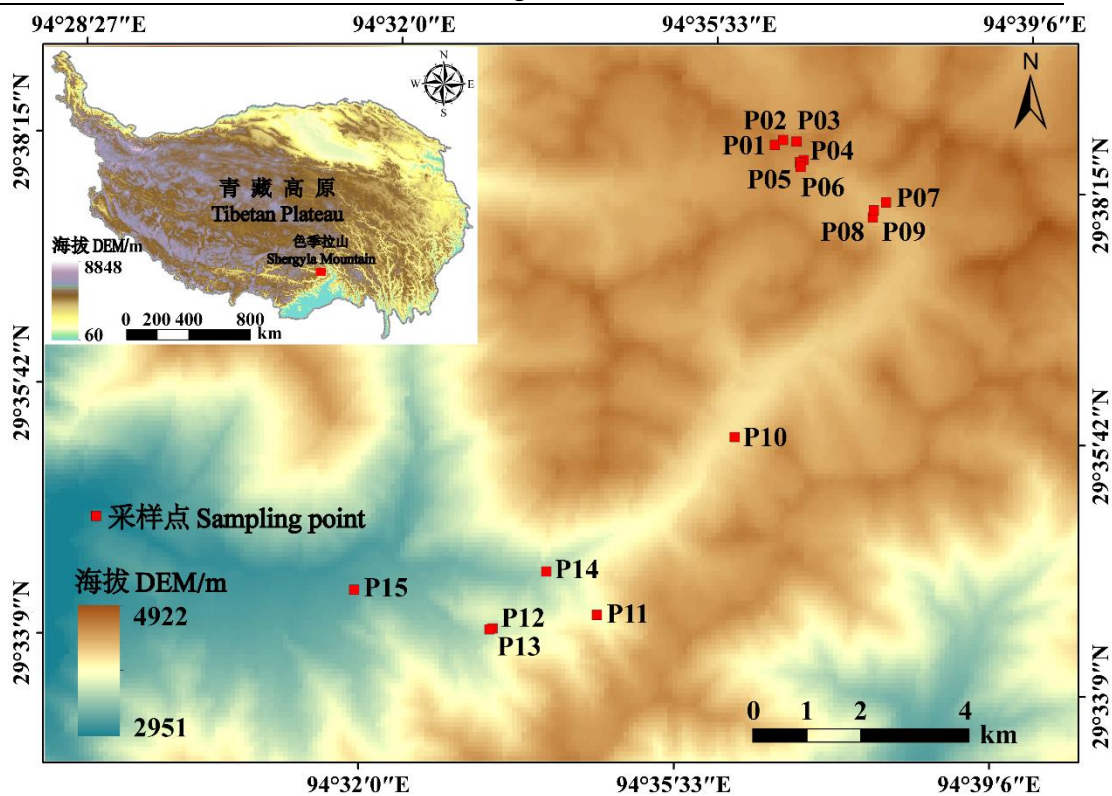


图 1 色季拉山位置及样点分布图

Fig. 1 Location and sample distribution of Shergyla Mountain

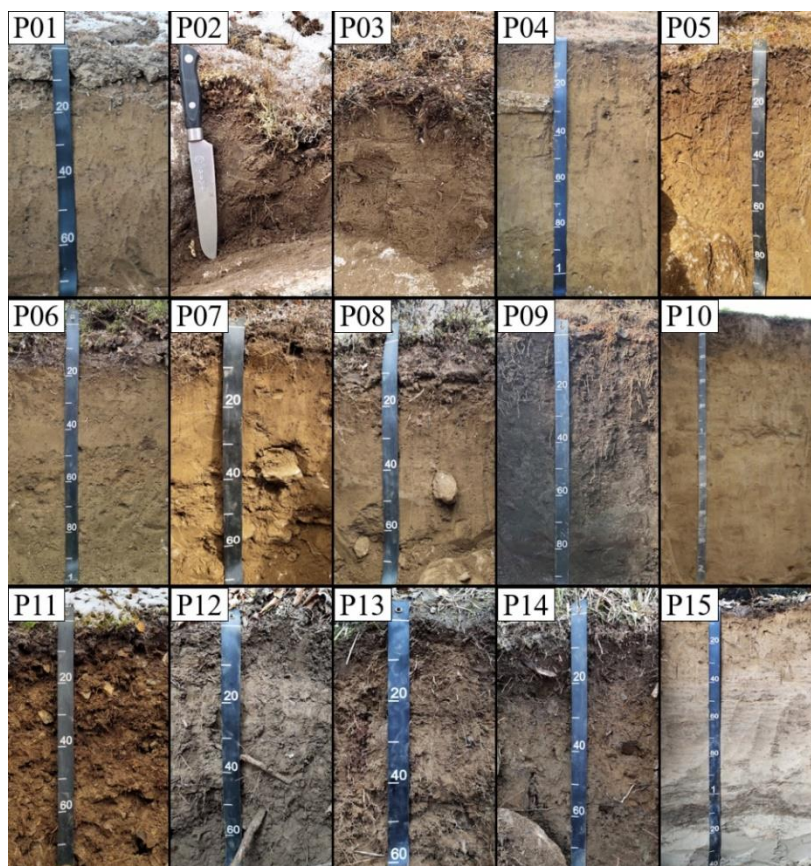


图 2 采样剖面的形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of sampling profiles

表 1 土壤剖面的成土环境

Table 1 Soil formation environments of soil profiles

剖面号 Profile	海拔 Altitude /m	坡度 Slope	坡向 Slope direction	年均温 Annual mean temperature /°C	4—10月 降水量 Precipitation from Apr. to Oct. /mm	景观植被 Landscape vegetation	母质来源 Source of parental material
P01	4575	10°	E109°	-1.5	1 061	草甸+苔藓	黄土
P02	4574	10°	SE151°	-1.4	1 060	草甸+苔藓	10 cm 以上为黄土, 以下为混合母质
P03	4551	10°	S198°	-1.3	1 057	草甸+苔藓	10 cm 以上为混合母质, 以下为黄土
P04	4462	25°	S189°	-0.7	1 042	草甸	15 cm 以上为黄土, 以下为混合母质, 58 cm 以下为黄土
P05	4460	30°	SE139°	-0.6	1 041	灌木+草甸	5 cm 以上为黄土, 以下为混合母质, 65 cm 以下为花岗岩风化物
P06	4459	25°	N18°	-0.6	1 041	灌木	48 cm 以上为黄土, 以下为花岗岩风化物
P07	4347	40°	SW214°	0.2	1 022	灌木+草甸	黄土
P08	4322	35°	NE27°	0.3	1 018	灌木	黄土
P09	4309	2°	SE131°	0.4	1 016	草甸	混合母质
P10	4113	2°	NE31°	1.4	787	草甸	黄土
P11	3845	40°	NW334°	3.3	741	针阔混交林	42 cm 以上为花岗岩风化物, 以下为混合母质
P12	3614	10°	S174°	5.1	635	针阔混交林 阔混交林	黄土
P13	3590	60°	SW215°	5.3	631	竹林	6 cm 以上为混合母质, 以下为黄土, 22 cm 以下为花岗岩风化物
P14	3512	45°	NW299°	5.8	618	竹林	黄土
P15	3189	2°	NW297°	8.1	563	阔叶林	黄土

注: 年均温及 4—10 月降水量据 2013—2018 年监测数据^[35]计算得到。母质类型来源于文献^[32], 其中混合母质指黄土和花岗岩风化物两种母质占比接近并且相互混合。当地年均土壤温度低于气温约 2~3 °C^[39]。Note: The annual average temperature and precipitation from April to October were calculated based on monitoring data from 2013 to 2018^[35]. The type of parent material comes from literature ^[32], where mixed parent material refers to two types of parent materials, loess, and weathered rock, with similar proportions and mixed. The average annual soil temperature in the local area is about 2-3 °C lower than the air temperature^[39].

1.3 化学风化强度估算

本研究选取了化学蚀变指数 (CIA)、风化淋溶系数 (ba) 和帕克风化指数 (WIP) 作为评估化学风化强度的指标^[40-44]。

CIA 为长石向黏土矿物转化程度的量度^[40], 是衡量土壤化学风化程度的重要指标, 已被广泛用于揭示风化强度, 同时应用于古气候和古环境重建中。一般认为, CIA 小于 50 表示沉积物未受化学风化, 介于 50~65 表示受弱度化学风化; 介于 65~85 表示受中度化学风化; 介于 85~100 表示受强烈化学风化。CIA 可以用 A-CN-K, 即 $Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$ 三角图来表示, 能够直观地反映碎屑沉积物的化学风化趋势以及化学风化过程中的化学成分和矿物变化^[41]。

ba 为土壤中盐基元素氧化物 (Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO) 与氧化铝 (Al_2O_3) 的摩尔比值, 是反映土壤化学风化程度和盐基元素淋溶情况的重要指标之一^[42]。ba 值越小, 表示盐基元素的淋溶作用越明显, 化学风化越强。

WIP 是由 Parker^[43]首次提出, 用于评价硅酸盐矿物的风化程度的一个指标。其原理是

计算盐基元素 (K、Na、Ca、Mg) 在风化产物中的比例, 以反映土壤的风化状态和对进一步风化的敏感程度。WIP 越小代表易迁移的盐基元素淋失较多, 因此化学风化越强。

在 3 种化学风化强度指标的计算公式中 (表 2), 各氧化物均以摩尔分数表示。CaO*指硅酸盐中的 CaO, 通常采用 McLennan^[44]提出的方法进行校正, 若 $n(\text{CaO}) < n(\text{Na}_2\text{O})$, 则采用 $n(\text{CaO})$ 作为样品 CaO*, 相反则采用 $n(\text{Na}_2\text{O})$ 作为 CaO*。本研究中所有样品 $n(\text{CaO}) < n(\text{Na}_2\text{O})$, 因此采用 $n(\text{CaO})$ 参与计算。

表 2 化学风化指标的计算公式

Table 2 Calculation formulas for chemical weathering indexes

指标 Indexes	计算公式 Calculation formulas	参考文献 (References) References
化学蚀变指数 CIA	$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$	Nesbitt & Young ^[40]
风化淋溶系数 ba	$\text{ba} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$	Jenny ^[42]
帕克风化指数 WIP	$\text{WIP} = (2\text{Na}_2\text{O} / 0.35 + \text{MgO} / 0.9 + 2\text{K}_2\text{O} / 0.25 + \text{CaO}^* / 0.7) \times 100$	Parker ^[43]

注: 式中各氧化物均以摩尔分数表示。CaO*指硅酸盐中的 CaO, 本研究所有样品 $n(\text{CaO}) < n(\text{Na}_2\text{O})$, 采用 $n(\text{CaO})$ 作为样品 CaO*参与计算^[44]。All oxides in the formulas are expressed in mole fractions. CaO* refers to CaO in silicates, and all the samples in this study are $n(\text{CaO}) < n(\text{Na}_2\text{O})$, so $n(\text{CaO})$ is used as the sample CaO* in the calculation^[44].

2 结果

2.1 土壤类型

根据 15 个剖面野外观测的形态特征 (图 2), 参照《中国土壤系统分类检索 (第三版)》检索诊断层和诊断特性, 进而划分土壤类型 (表 3)^[38]。结果表明, 除剖面 P09 较为特殊, 具备有机表层和半腐有机土壤物质, 归属于有机土土纲外, 其他剖面的 B 层只具有雏形层, 因此均属雏形土土纲。受高寒气候影响, 土壤均为寒性土壤温度状况, 因此亚纲均为寒冻雏形土。P01、P02 和 P03 具有草毡表层, 为草毡寒冻雏形土; P10 具有暗瘠表层, 为暗瘠寒冻雏形土; 其他剖面均属筒育寒冻雏形土。依据剖面中是否存在漂白层、氧化还原特征、石灰性等区分具体的亚类。最后根据土壤颗粒组成、矿物类型和酸碱性等土壤性质^[32]划分土族。因此, 本研究区土壤类型分为 2 个土纲、2 个亚纲、4 个土类、6 个亚类和 11 个土族。

表 3 土壤剖面的诊断层、诊断特性及系统分类

Table 3 Diagnostic horizons, diagnostic characteristics, and Chinese soil taxonomy of soil profile

剖面号 Profile	诊断层 Diagnostic horizons	诊断特性 Diagnostic characteristics	中国土壤系统分类 (土族) Chinese soil taxonomy (soil family)
P01	草毡表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 石质接触面, 湿润土壤水分状况, 寒冻土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石混合型-酸性草毡寒冻雏形土
P02	草毡表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 石质接触面, 湿润土壤水分状况, 寒冻土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石混合型-酸性草毡寒冻雏形土
P03	草毡表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 石质接触面, 湿润土壤水分状况, 寒冻土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石混合型-酸性草毡寒冻雏形土
P04	淡薄表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒冻土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石混合型酸性-普通筒育寒冻雏形土
P05	淡薄表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒冻土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石型酸性-普通筒育寒冻雏形土
P06	淡薄表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 氧化还原特征, 寒冻土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石型非酸性-斑纹筒育寒冻雏形土
P07	淡薄表层 雏形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况	壤质盖粗骨壤质长石混合型非酸性-普通筒育寒冻雏形土

P08	淡薄表层 锥形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石混合型酸性-普通筒育寒冻锥形土
P09	有机表层	半腐有机土壤物质, 潮湿土壤水分状况, 寒性土壤温度状况, 冻融特征	壤质长石混合型弱酸性亚寒性-矿底半腐正常有机土
P10	暗瘠表层 锥形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况	壤质长石混合型酸性-普通暗瘠寒冻锥形土
P11	淡薄表层 锥形层	湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况	粗骨壤质长石混合型非酸性-普通筒育寒冻锥形土
P12	淡薄表层 漂白层 锥形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况	壤质长石混合型酸性-漂白筒育寒冻锥形土
P13	淡薄表层 锥形层	黄土状沉积物岩性特征, 石质接触面, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况	壤质长石混合型酸性-普通筒育寒冻锥形土
P14	淡薄表层 锥形层	黄土状沉积物岩性特征, 石质接触面, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况, 氧化还原特征	壤质长石混合型非酸性-斑纹筒育寒冻锥形土
P15	淡薄表层 锥形层	黄土状沉积物岩性特征, 湿润土壤水分状况, 寒性土壤温度状况	壤质长石混合型非酸性-普通筒育寒冻锥形土

注: 土壤颗粒组成见文献[32]。Note: The particle composition of soil can be found in reference [32].

2.2 主要矿物组成

土壤中的主要矿物包括长石、石英、闪石、绿泥石、水云母、蛭石、高岭石 7 种。根据研究区的物质来源解析和母质不连续性判断, 本区域主要以黄土母质和花岗岩风化物母质发育土壤为主, 某些土层存在黄土和基岩混合母质发育的土壤^[32]。总体上看, 黄土母质发育土壤的原生矿物为: 石英>长石>闪石; 花岗岩风化物母质发育土壤的原生矿物为: 长石>石英>闪石 (表 4), 而且这 2 种母质发育土壤中的闪石含量均很低。可见, 长石和石英是色季拉山土壤中最为丰富的矿物。对于次生矿物, 黄土母质发育土壤为绿泥石>水云母>蛭石>高岭石; 花岗岩风化物母质发育土壤为水云母>蛭石>绿泥石>高岭石 (表 4)。可见, 次生矿物中高岭石的含量最少。混合母质的土壤中矿物含量居于二者之间。所有土壤中原生矿物含量均大于次生矿物, 而且次生矿物中风化较强的高岭石含量很少 (1%~12%) (表 4), 说明黄土母质和基岩母质发育土壤的化学风化强度均很弱。

黄土母质发育土壤相对于花岗岩风化物发育土壤具有更多的高岭石和绿泥石。花岗岩风化物发育的土壤相对于黄土母质土壤则具有更多的蛭石和水云母。混合母质的土壤矿物含量多介于黄土和花岗岩风化物两种母质之间。可见, 黄土和花岗岩风化物发育土壤具有相同的原生矿物和次生矿物, 但是黄土发育土壤原生矿物以石英为主, 而基岩发育土壤原生矿物以长石为主。黄土母质发育土壤的次生矿物中绿泥石和高岭石略高于基岩发育土壤。

表 4 土壤中主要矿物组成

Table 4 Main mineral composition in soil

母质类型 Parent material type	数值类型 Number type	长石 Feldspar %	石英 Quartz %	闪石 Amphibo le %	绿泥石 Chlorite %	水云母 Hydromi ca %	蛭石 Vermiculi te %	高岭石 Kaolinite %
全部土样 All soil samples (n=64)	最大值	54	43	4	21	25	19	12
	最小值	18	13	1	6	7	4	1
	平均值	30	28	2	13	12	9	6
	标准差	8	8	1	4	4	4	2
黄土 Loess (n=43)	最大值	39	43	3	19	15	16	12
	最小值	20	23	1	6	7	4	3
	平均值	30	30	2	13	11	8	6
	标准差	6	6	1	3	2	3	2
花岗岩风化物	最大值	54	32	4	14	21	14	6

Weathering material from granite (n=7)	最小值	18	13	1	7	15	6	1
	平均值	36	20	2	10	17	10	3
	标准差	16	9	1	3	3	4	2
混合母质 Mixed parent material (n=14)	最大值	39	34	2	21	25	19	9
	最小值	19	13	1	6	7	4	4
	平均值	29	25	1	14	12	12	6
	标准差	7	9	1	6	5	5	2

2.3 土壤元素地球化学特征

对采集的 64 个土样分析表明, 色季拉山土壤元素含量为 $Si > Al > Fe > K > Na > Ca > Mg > Ti > P > Mn$ (表 5)。43 个来自黄土母质的土样元素含量与全部土样的结果接近且含量排序一致, 这表明本区域黄土母质占据主导地位。7 个花岗岩风化物发育土壤的元素含量大小的排序与黄土接近, 但 Ca、Mg、K、Na 等盐基元素含量均高于黄土, 尤其黄土 Ca、Mg 含量显著低于花岗岩风化物, 说明黄土母质本身的盐基元素含量较花岗岩风化物更低或黄土较花岗岩更易于风化, 导致释放和淋溶更多的 Ca、Mg 元素。14 个混合母质发育的土壤元素含量排序与黄土一致, 但 Si、Fe、Mn 含量低于黄土和花岗岩风化物, 尤其 Si 在黄土和混合母质间存在显著性差异, 因为混合母质发育的土壤中包含有机土剖面 P09, 其有机质占比过大导致 Si、Fe、Mn 等主要矿质元素含量下降。

将各元素含量除以上陆壳 (UCC) 平均值^[45], 做出元素 UCC 标准化图 (图 3), 能够直观地反映元素相对于上陆壳的富集或亏损程度。结果表明研究区土壤 Ti 和 P 均相对于上陆壳有所富集, Ca、Mg 和 Na 明显亏损, 而 K 亏损不明显。表明在色季拉山土壤的化学风化和元素淋溶过程中, 以 Ca、Mg 和 Na 的流失为主, 含钾矿物风化较弱, 而 Ti、P 为稳定元素。图 3 表明黄土母质发育土壤的 Ca、Mg 和 Na 亏损均大于花岗岩母质发育土壤, 这可能是由于黄土较花岗岩风化物更易风化造成的。

表 5 色季拉山土壤元素含量

Table 5 Element contents of soils in Shergyla Mountain

母质类型 Parent material type	Si	Fe	Al	Mn	Ti
黄土 ^①	280.62±19.13a	30.16±2.88a	65.32±4.38a	0.65±0.33a	3.54±0.19a
花岗岩风化物 ^②	273.15±28.66ab	28.39±4.1a	68.49±10.49a	0.5±0.08a	3.3±0.33a
混合母质 ^③	257.81±31.4b	27.3±8.17a	65.73±11.94a	0.55±0.44a	3.3±0.42a
母质类型 Parent material type	Ca	Mg	K	Na	P
黄土 ^①	8.11±1.49b	6.41±0.98b	27.8±4.15a	16.75±2.36a	0.85±0.22a
花岗岩风化物 ^②	12.29±4.49a	7.6±1.33a	29.18±3.95a	20.22±6.99a	0.98±0.3a
混合母质 ^③	9.15±2.67ab	6.39±1.64b	26.24±4.41a	17.75±4.88a	0.87±0.19a

①Loess, ②Weathering material from granite, ③Mixed parent material 注: 同列不同字母表示母质差异显著 ($P \leq 0.05$)。Note: Different letters in the same column indicate significant differences in parent material ($P \leq 0.05$).

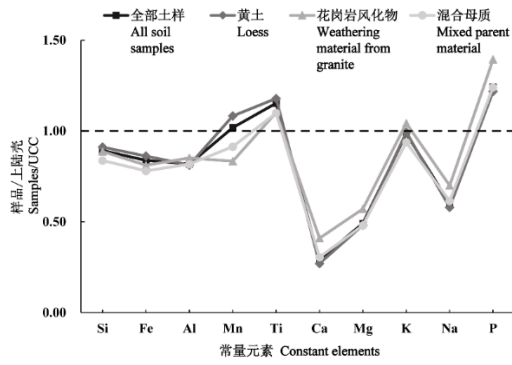


图3 色季拉山土壤样品常量元素 UCC 标准化图

Fig. 3 UCC normalized diagram of major elements in soil samples from Shergyla Mountain

2.4 土壤化学风化强度

根据化学蚀变指数的计算公式，获得研究区土壤的 CIA 范围为 47~62，平均值为 56 ± 3 。其中 P06 剖面底层土壤样品 CIA 低于 50，几乎未受化学风化的影响，其他样品的 CIA 均位于弱度化学风化范围（50~65）（表 6，图 4）。从平均值上看，黄土的 CIA (57 ± 3) > 混合母质 (56 ± 2) > 花岗岩风化物 (54 ± 4)。研究区土壤中 ba 范围为 0.81~1.31，平均值为 1.00 ± 0.11 。从平均值上看，花岗岩风化物的 ba (1.13 ± 0.15) > 混合母质 (0.99 ± 0.09) > 黄土 (0.98 ± 0.09)（表 6）。研究区土壤中 WIP 范围为 35~82，平均值为 56 ± 9 。从平均值上看，花岗岩风化物的 WIP (63 ± 13) > 黄土 (55 ± 8) \approx 混合母质 (55 ± 11)（表 6）。CIA 越大说明土壤矿物风化越强，ba 和 WIP 越小说明土壤盐基淋溶越强。本研究结果表明，CIA、ba 与 WIP 3 个指标对土壤的风化和淋溶强度指示出同样的结果，黄土的风化强度略大于花岗岩风化物，而且花岗岩风化物的 ba 显著大于黄土，说明黄土母质本身的化学风化强度显著高于花岗岩风化物，或来自黄土母质土壤的盐基元素受到的淋溶作用显著强于花岗岩风化物。

色季拉山土壤的化学风化趋势线大致平行于 A-CN 轴，位于斜长石-钾长石连线以上，且靠近斜长石一侧（图 4），表明土壤相对于广泛的上陆壳，化学风化过程中斜长石遭受一定的风化分解，易溶元素 Ca、Na 开始流失，形成少量含 Al 的次生黏土矿物^[46]。因此，除两个底部基岩发育的土壤几乎未受化学风化，色季拉山大部分土壤仍处于早期的斜长石风化阶段。

表 6 色季拉山土壤化学风化强度

Table 6 Soil chemical weathering intensity in Shergyla Mountain

母质类型 Parent material type	化学蚀变 指数 CIA	风化淋溶 系数 ba	帕克风 化指数 WIP
黄土 Loess	$57 \pm 3a$	$0.98 \pm 0.09b$	$55 \pm 8a$
花岗岩风化物 Weathering material from granite	$54 \pm 4a$	$1.13 \pm 0.15a$	$63 \pm 13a$
混合母质 Mixed parent material	$56 \pm 2a$	$0.99 \pm 0.09b$	$55 \pm 11a$

注：同列不同字母表示母质差异显著 ($P \leq 0.05$)。Note: Different letters in the same column indicate significant differences in parent material ($P \leq 0.05$).

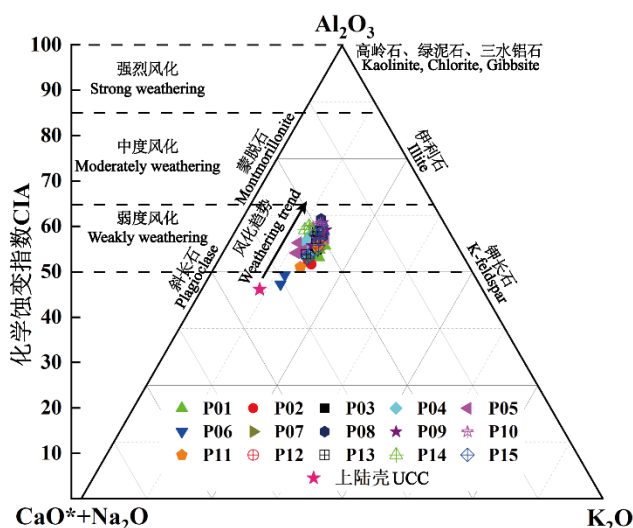


图 4 土壤剖面化学风化趋势三角图 (A-CN-K)

Fig. 4 A-CN-K diagram of soil profiles

CIA 在剖面分布上的分布模式可分为 3 种。第一种分布模式是 CIA 值从表层向下有逐渐增加的趋势, 说明表层相对于下层土壤风化程度更低, 这种发育模式的剖面有 P01、P07、P08、P11、P12、P13 (图 5)。第二种分布模式是 CIA 值在整个剖面的变化不大, 说明整个剖面的风化程度变化不明显, 这种发育模式的剖面有 P02、P10、P14。第三种分布模式是 CIA 值从表层向下有逐渐降低的趋势, 风化程度显示出常见的风化程度上层高于下层, 这种发育模式的剖面有 P03、P04、P05、P06、P09、P15。

ba 在剖面上的分布模式与 CIA 完全相反, 也分为 3 种。即 CIA 从表层向下逐渐增加的, ba 从表层向下逐渐减少, 对应剖面为 P01、P07、P08、P11、P12、P13。CIA 从表层向下逐渐减少的, ba 从表层向下逐渐增加, 对应剖面为 P03、P04、P05、P06、P09、P15。从表层向下变化趋势不明显的剖面也与 CIA 相同, 为 P02、P10、P14。其原因在于, CIA 的计算是 Al_2O_3 除以 Al_2O_3 和 K、Na、Ca 3 种盐基元素氧化物之和, 而 ba 是 K、Na、Ca、Mg 四种盐基元素氧化物之和除以 Al_2O_3 , 二者略有差异 (CIA 不考虑 MgO), 而本研究区的 MgO 含量不高, 因此 CIA 与 ba 明显成反比。

WIP 在剖面上的分布特点与 CIA 和 ba 略有不同, 仅有 2 种模式。第一种分布模式为 WIP 从表层向下逐渐增加, 包括剖面 P02、P03、P04、P05、P06、P09、P10、P11、P13、P15。这些剖面的 WIP 自上而下的增加似乎体现了这些剖面表层相对于下层土壤风化淋溶强烈, 与常规的成土过程和剖面发育一致, 但从表 1 的母质来源看, 实际上多是上为黄土下为花岗岩的二元母质。因此, WIP 在剖面上的差异可能是母质来源不同造成的。第二种分布模式为 WIP 从表层向下变化趋势不明显, 包括剖面 P01、P07、P08、P12、P14, 这些剖面均为黄土母质来源, 这说明黄土发育的土壤表层并没有较下层经历更强的风化淋溶过程, 黄土沉积在剖面后进一步风化的潜力较弱。这也进一步说明第一种分布模式是由二元母质造成的, 非原位的风化淋溶的结果。

3 种化学风化强度指标在剖面上均具有多种分布模式, 这可能受母质的不连续性和物质来源复杂性的影响, 说明色季拉山土壤的成土过程复杂。

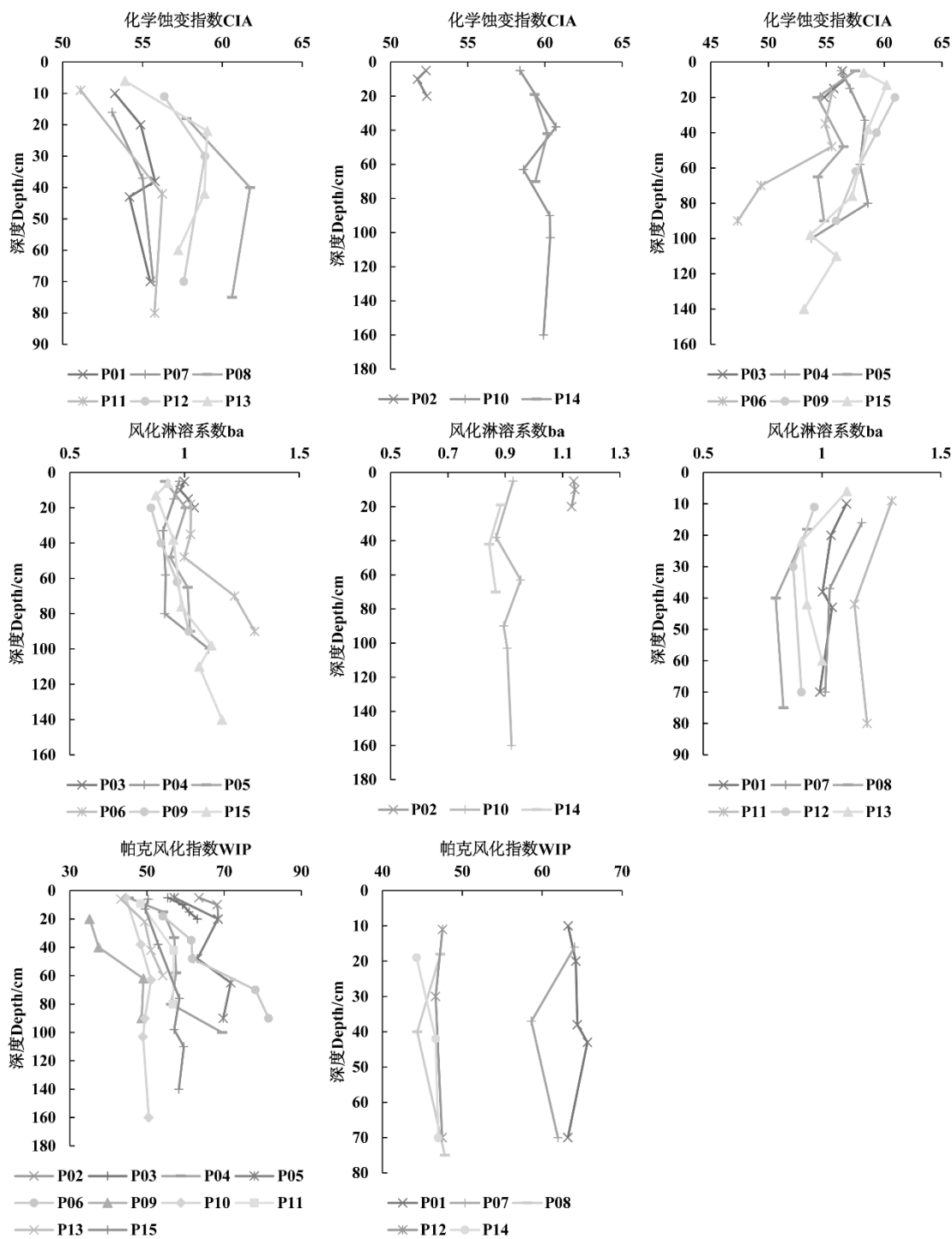


图5 剖面中化学蚀变指数、风化淋溶系数和帕克风化指数的分布

Fig. 5 Distributions of CIA, ba, and WIP in the profiles

3 讨论

3.1 色季拉山土壤化学风化与其他区域的比较

色季拉山是印度洋水汽进入高原面的入口，水热条件相对于高原内部更好^[47-48]，理论上色季拉山土壤风化强度的最高值应是藏南高原面风化强度的上限，而最低值接近山顶基

岩的风化强度。因此,色季拉山的土壤风化强度分布可以代表藏南雅江流域的风化强度范围。色季拉山海拔 3 000~4 728 m,本研究最低位置采样点位于 3 100 m,最高 4 600 m,可以代表色季拉山的海拔范围。土壤 CIA 为 47~62,均属于弱风化强度,低于目前大部分已有的山地区域土壤风化强度。以与色季拉山处于相同纬度的黄山为例,其不同海拔梯度下土壤 CIA 为 64~86,377m 剖面 CIA 最高(84~86),处于中等风化和强烈风化的分界处;1 377 m 剖面 CIA 最低(64~67),处于弱风化与中等风化的分界处^[49]。黄山位于亚热带的北缘,CIA 与海拔梯度之间显著负相关^[49],较低海拔处土壤风化较强,但是海拔大于 1000 m 以上的 CIA 值急剧下降,与本研究的 CIA 接近。说明低海拔地区的黄山海拔高度变化对土壤风化影响较大,而高山地区大于 3 000 m 以上的海拔变化对土壤风化的影响不显著。

本研究区域黄土母质发育土壤的 CIA 为 52~62,大于马兰黄土和洛川黄土的 CIA (分别为 38 和 37),这说明本研究的黄土经历了风化和淋溶过程,具有一定的发育。位于我国中部川西山地高海拔区域的甘孜(3 430 m)、金川(2 480 m)和理县(2 066 m)黄土发育剖面的 CIA 均值分别为 67、69 和 60,略大于本研究区^[50]。这可能是由于川西研究点的海拔(2 066~3 430 m)总体低于本研究区。

本研究区的主要土壤类型(土类)从上至下为草毡寒冻锥形土、筒育/暗瘠寒冻锥形土,土壤在土类这一级别具有弱的垂直地带性分布。已有研究表明,阿尔泰山 600~3 000 m 从高到低依次出现草毡寒冻锥形土、暗沃冷凉淋溶土、钙积干润均腐土、钙积正常干旱土 4 个土类,垂直地带性较为明显^[51]。这可能是因为阿尔泰山所研究的海拔变异范围较大,而且涵盖较低的海拔,导致了土壤类型较大的变异,而本研究区属于 3 000 m 以上的高海拔。

综上所述,在较低海拔范围内,较高级别的土壤类型和化学风化强度随海拔变变更为明显,但超过一定海拔后土壤化学风化和海拔的关系则逐渐减弱。因此,本研究的高海拔区较高级别的土壤类型和化学风化强度随海拔变化不明显。

3.2 土壤化学风化强度影响因素

3.2.1 气候和地形因素

气候和地形是非常重要的成土因素^[52]。矿物风化和元素的淋溶随着温度的升高和降水量的增加而增强^[53]。本研究区降水量随着海拔升高而增加,但温度随着海拔的升高而下降(表 1)。水量、温度、海拔和坡度与剖面 CIA 回归分析(图 6),结果发现均未达到显著相关性。这可能是由于本研究区海拔过高,均大于 3 000 m,属于高寒气候。寒性土壤温度状况限制了土壤的化学风化,使土壤发育受到限制,即使高海拔处具有较高的降水量,最高超过 1 000 mm,但缺少化学风化对元素的释放,淋溶作用不强。土壤矿物以原生矿物为主,风化较强的高岭石含量很低。剖面中没有因黏粒迁移和淀积而形成的黏化层,土壤类型以寒冻锥形土为主。因此,气候和地形虽然与土壤的性质和风化强度没有显著相关性,但却是本区域土壤发育最主要的限制因子,低温是主控因素。Riebe 等^[54]研究也表明,土壤化学风化随海拔、温度变化影响强烈,但当海拔超过一定高度,温度降低超过一定限度,化学风化已经很微弱,物理风化逐渐占据主导,土壤化学风化对地形、气候因素的响应随之减缓。这正如木桶原理(短板效应),由于低温的限制,降水量、海拔、地形的影响较弱。

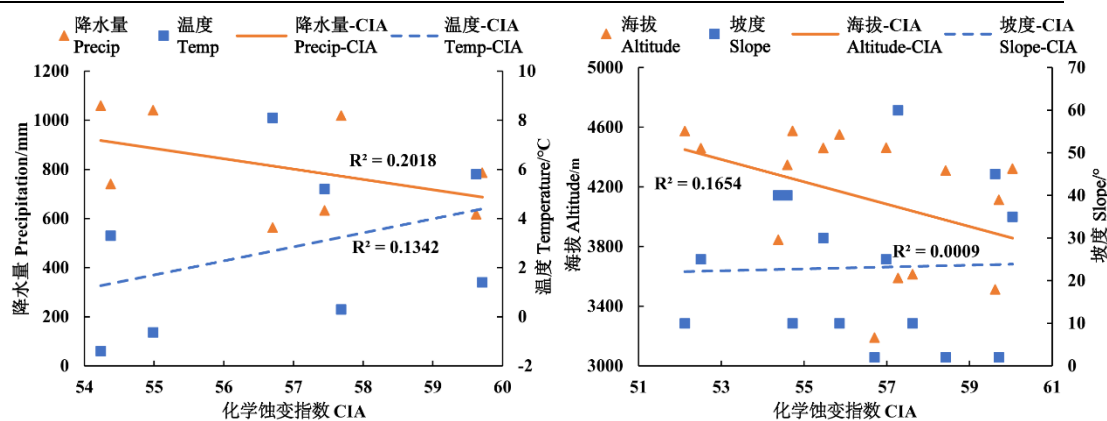


图6 降水量、温度、海拔、坡度与化学蚀变指数的关系

Fig. 6 The relationships between precipitation, temperature, altitude, slope, and CIA

3.2.2 母质因素

母质是重要的成土因素之一^[52]，母质不仅决定土壤的矿物类型，而且直接决定风化的速度和产物^[55]。本研究区土壤具有不同的母质来源，在野外调查和采样的过程中，发现土壤剖面由于不同的母质来源，在土壤形态学上具有明显的差异。基岩发育土壤的砾石含量很高，黄土和花岗岩风化物在直观上成因和粒度等差异较大（图2）。已有的异源母质剖面研究也表明，不同母质来源发育的土壤在物理、化学等各种性质上差异明显^[56-57]。因此在野外调查阶段，初步假设黄土沉积土壤的化学风化强度可能会大于基岩发育土壤。从化学风化指标平均值来看，黄土的CIA（ 57 ± 3 ）>混合母质（ 56 ± 2 ）>花岗岩风化物

（ 54 ± 4 ），花岗岩风化物的ba（ 1.13 ± 0.15 ）>混合母质（ 0.99 ± 0.09 ）>黄土（ 0.98 ± 0.09 ），花岗岩风化物的WIP（ 63 ± 13 ）>黄土（ 55 ± 8 ）≈混合母质（ 55 ± 11 ），说明黄土中的盐基元素相对于花岗岩风化物显著受到更强的淋溶作用，或黄土本身盐基含量小于花岗岩风化物。P01、P07、P08、P12、P14这5个黄土母质发育剖面的WIP自上而下波动较小，说明黄土在剖面上部并未较下部经历更强的风化淋溶。进一步针对下部为花岗岩风化物发育，上部为黄土发育的二元母质剖面（P05、P06、P13）（表1）进行具体分析，发现剖面P05、P06其下部花岗岩风化物发育土壤化学风化强度低于上部黄土发育土壤（图5），但剖面P13花岗岩风化和黄土母质发育土壤在化学风化强度上无明显差异（图5）。说明P13剖面还具有更加复杂的母质混合过程。

3.2.3 风力、重力、径流等外营力因素

通常情况下土壤表层受大气水热作用影响最显著，越向深层元素含量和化学风化强度越接近基岩，剖面呈现自上而下风化程度逐渐减弱的趋势。然而，色季拉山土壤的风化和淋溶强度指标在剖面分布不符合这一规律，出现了2~3种分布模式，且不同层次间差异较大（图5）。这主要是母质不连续的原因造成的，因为黄土母质和花岗岩母质发育土壤的矿物风化强度指标不同（表6）。但是从同一黄土母质来源的P01、P07、P08、P10、P12、P14和P15剖面，CIA、ba、WIP均未表现出表层的风化强度大于下层（图5），这是完全不同于常规土壤发育的特殊情况。从海拔尺度看，理论上高海拔处土壤的化学风化强度应低于低海拔处，但色季拉山土壤的化学风化强度并未随海拔上升呈现明显减小的趋势（图6），波动较大。这一方面可能是由于低温限制化学风化，另一方面是由于色季拉山属于大风频发的区域^[58]，也是地质作用最为剧烈的地区之一^[59]，大块的花岗岩刚风化出小块岩石碎屑和少量细土便容易被径流和重力搬运至山麓沉积形成洪坡积物，而后一部分细土停留在山麓，一部分被河流运往下游，还有一部分细土又被山谷风分选、搬运至山坡上沉积。同时，风从远源和近源搬运来黄土，沉积在山坡，可以被径流和重力搬运至山麓或河谷，进一步被山谷风分选、搬运至山坡上沉积，这一过程循环往复，导致剖面中普遍出现复杂

的岩性不连续性^[32],而且无法保持表层的进一步发育。同时,坡度较陡的部位,土壤受水力和重力等侵蚀的影响,土壤始终处于“年轻化”状态(rejuvenated),坡度较缓的部位,虽然风成黄土沉积较厚,但其进一步风化的潜力较弱,也使得土壤保持年轻状态。

4 结论

(1) 色季拉山土壤受高寒气候影响,土壤总体发育程度较弱,在高海拔的3 000~4 600 m范围内,均以寒冻锥形土为主,说明土壤的发育很弱。土壤矿物以原生矿物为主,次生矿物含量很低,CIA、ba和WIP表明土壤均处于弱风化和淋溶状态,黄土发育土壤的CIA略大于花岗岩风化物,而花岗岩风化物的ba和WIP大于黄土风化物,说明本区域的黄土风化程度可能大于花岗岩风化物,当然也可能是母质本身的差异,二者的区分需要进一步研究。(2) 高海拔的低温限制了土壤矿物的化学风化,导致降水量、气温、海拔、坡度、母质等对土壤化学风化影响不明显。因此,低温是本区域土壤化学风化和土壤发育的限制因子,导致了高海拔变化和母质对土壤化学风化指数的不敏感性。(3) 色季拉山土壤剖面上的风化强度自表层向下具有不同的分布模式,不符合表层向下逐渐减弱的统一规律,且不同层次间风化程度差异较大。这是因为本区域土壤剖面的形成受成土作用的影响较小,主要受风力、重力、径流等外营力引起的搬运、堆积作用影响较大,土壤普遍存在不停地循环搬运沉积的年轻化趋势。

参考文献 (References)

- [1] Wang P, Ning K, Shi Y C, et al. Geochemical characteristics of major elements of Holocene soil from Wuqi, Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1261-1268. [王攀, 宁凯, 石迎春, 等. 吴起全新世土壤剖面常量元素地球化学特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1261-1268.]
- [2] Duan X C. Distribution characteristics and source analysis of geochemical elements in soil environment of suburbs in Beijing[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021. [段续川. 北京市城郊土壤环境元素地球化学分布特征及源解析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.]
- [3] Sun A, Duan B H, Wang F, et al. Geochemical distribution of soil elements and its influencing factors in Xianfeng area, western Hubei Province [J]. Soils, 2022, 54(3): 637-645. [孙奥, 段碧辉, 王芳, 等. 鄂西咸丰地区土壤元素地球化学分布及其影响因素[J]. 土壤, 2022, 54(3): 637-645.]
- [4] Liao Q L, Huang S S, Xu W W, et al. Geochemical characteristics and genesis mechanism of selenium-rich soil elements in Lixiahe Area, Jiangsu Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(4): 1114-1124. [廖启林, 黄顺生, 许伟伟, 等. 江苏省里下河地区富硒土壤元素地球化学特征及其成因机制[J]. 物探与化探, 2024, 48(4): 1114-1124.]
- [5] Zhang J L, Luo Q, Hu P, et al. Application of soil element geochemical survey in Uranium-polymetallic Ore exploration in Zhangling area [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(3): 531-539. [张家乐, 罗强, 胡鹏, 等. 土壤元素地球化学测量在樟岭地段铀-多金属矿勘查中的应用[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(3): 531-539.]
- [6] Hao R, Deng Y S, Na H Y, et al. Soil weathering characteristics of granite collapsing gully section in Southeast Hubei Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 1-8. [郝芮, 邓羽松, 娜荷芽, 等. 鄂东南花岗岩崩岗剖面土体风化特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 1-8.]
- [7] Deng L Z, Zhang L P, Chen R Z, et al. Characteristics of soil development on the erosive weathered granite slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 64-70, 77. [邓龙洲, 张丽萍, 陈儒章, 等. 侵蚀性风化花岗岩坡地土壤发育特性[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 64-70, 77.]

- [8] Chen R Z, Zhang L P, Wu Y H, et al. Soil profile weathering feature of eroded weathering granite slope at different sections[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1380-1388. [陈儒章, 张丽萍, 邬燕虹, 等. 侵蚀性花岗岩坡地不同地貌部位土壤剖面风化特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1380-1388.]
- [9] Liang K Q, Zhao W F, Liu W P, et al. Study on soil weathering rate and potential ecological effects in typical Black Shale areas [J]. *Earth and Environment*, 2024(2): 199-212. [梁孔秋, 赵万伏, 刘文浦, 等. 典型黑色页岩地区土壤风化速率及潜在生态效应研究[J]. *地球与环境*, 2024(2): 199-212.]
- [10] Chen D, Xiao Q L, Zhang Y Z, et al. Weathering and soil-forming characteristics and paleoclimate evolution of the Holocene eolian loess-paleosol sequence in the Maqu section of the Yellow River source area [J]. *Geographical Research*, 2022, 41(8): 2277-2294. [陈豆, 肖奇立, 张玉柱, 等. 黄河源玛曲段全新世风成黄土-古土壤序列风化成壤特征以及古气候演变[J]. *地理研究*, 2022, 41(8): 2277-2294.]
- [11] Liu J Y, Zha X C, Huang C C, et al. Chemical weathering characteristics and its climate significance of Holocene loess-paleosol sequence in Tianshui of Gansu Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(5): 937-945. [刘俊余, 查小春, 黄春长, 等. 甘肃天水全新世黄土-古土壤序列化学风化特征及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2018, 36(5): 937-945.]
- [12] Huang L M, Shao M A, Jia X X, et al. Progress in measurement methods and influencing factors of soil weathering rates [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 1021-1031. [黄来明, 邵明安, 贾小旭, 等. 土壤风化速率测定方法及其影响因素研究进展[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(10): 1021-1031.]
- [13] Yang J L, Zhang G L. Study on soil weathering rate and its application [J]. *Soils*, 2010, 42(6): 882-888. [杨金玲, 张甘霖. 土壤风化速率研究及其应用[J]. *土壤*, 2010, 42(6): 882-888.]
- [14] Duan L, Hao J M, Ye X M, et al. Study on soil weathering rate in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(S1): 1-7. [段雷, 郝吉明, 叶雪梅, 等. 中国土壤风化速率研究[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(S1): 1-7.]
- [15] Yao T D, Wu G J, Xu B Q, et al. Asian Water Tower Change and Its Impacts[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [16] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [17] Sun L, Li H, Wang J, et al. Impacts of climate change and human activities on NDVI in the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 587.
- [18] Sun C, Xu X D, Zhao T L, et al. Distinct impacts of vapor transport from the tropical oceans on the regional glacier retreat over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153545.
- [19] Liu Y T, Yao J M, Zhao L, et al. Surface energy processes during freeze-thaw cycle in Tanggula permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1073-1082. [刘艺闾, 姚济敏, 赵林, 等. 青藏高原唐古拉多年冻土区冻融循环过程中的能量平衡特征[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1073-1082.]
- [20] Chen J, Liu Y Z, Cao L G, et al. A review on the research of remote sensing monitoring of lake changes and quantitative estimation of lake water balance in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(4): 1203-1215. [陈军, 刘延昭, 曹立国, 等. 青藏高原湖泊变化遥感监测及水量平衡定量估算研究进展[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(4): 1203-1215.]
- [21] Du Y Y, Zhao W, Huang L M, et al. Stoichiometric ratios of soil nutrients and their influencing factors in agro-forestry-grassland in Eastern Tibet [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, DOI:10.11766/trxb202404270171. [杜媛媛, 赵雯, 黄来明, 等. 西藏东部农林草地土壤养分化学计量比及影响因素[J]. *土壤学报*, 2024, DOI:10.11766/trxb202404270171.]
- [22] Yang F, Huang L M, Li D C, et al. Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1226-1236. [杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1226-1236.]
- [23] Chen Y M, Song X D, Liu F, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of surface soil magnetic susceptibility on the Tibetan Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2): 361-371. [陈雅敏, 宋效东, 刘峰, 等. 青藏高原表土磁化率空间分布特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2024, 61(2): 361-371.]

- [24] Jiang H, Xu Z F, Zhao T, et al. Rock weathering rates and their control mechanisms in watersheds on the Tibetan Plateau: A case study of small watersheds with typical geological backgrounds in the Gongga Mountain Area [J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(1): 278-286. [蒋浩, 徐志方, 赵童, 等. 青藏高原流域岩石风化速率及其控制机制——以贡嘎山地区典型地质背景小流域研究为例[J]. 第四纪研究, 2018, 38(1): 278-286.]
- [25] Meng J L, Guo J Y, Wu J, et al. Seasonal variations of chemical weathering and its controlling factors of Nyang River in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(2): 190-203. [孟俊伦, 郭建阳, 吴婕, 等. 青藏高原尼洋河流域化学风化的季节变化特征和影响因素[J]. 地球环境学报, 2020, 11(2): 190-203.]
- [26] Gao Y X, Chen H Z. Salient characteristics of soil-forming processes in Xizang (Tibet)[J]. *Soil Science*, 1983, 135(1): 11-17.
- [27] Yang M X, Yao T D, He Y Q. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(5): 553-558. [杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 553-558.]
- [28] Gao M R, Shi J P, Pan K. Soil type database of Tibet: A region-wide soil dataset based on the second national soil survey[J]. *China Scientific Data*, 2017, 2(1): 85-94, 218-229. [高美荣, 施建平, 潘恺. 西藏土种志——基于全国第二次土壤普查的数据集[J]. 中国科学数据, 2017, 2(1): 85-94, 218-229.]
- [29] Zhu S. Valley geomorphology and geological environment evolution of the Yarlung Zangbo River [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012. [祝嵩. 雅鲁藏布江河谷地貌与地质环境演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.]
- [30] Ling Z Y, Jin J H, Wu D, et al. Aeolian sediments and their paleoenvironmental implication in the Yarlung Zangbo catchment(southern Tibet, China) since MIS3[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2385-2400. [凌智永, 靳建辉, 吴锋, 等. MIS 3 以来雅鲁藏布江流域风成沉积及环境意义[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2385-2400.]
- [31] Ling Z Y, Yang S L, Wang X, et al. Spatial-temporal differentiation of eolian sediments in the Yarlung Tsangpo catchment, Tibetan Plateau, and response to global climate change since the Last Glaciation[J]. *Geomorphology*, 2020, 357: 107104.
- [32] 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.
- [33] Qiao F, Wang M G, Li J, et al. Soil erodibility in vertical climatic zones of the Sejila Mountain [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 38(6): 121-126. [乔锋, 王明刚, 李晶, 等. 色季拉山垂直气候带土壤可蚀性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 121-126.]
- [34] Du J, Gao R, Ma P F, et al. Analysis of stereoscopic climate features on Mt. seqilha, Tibet[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2009, 29(1): 14-18. [杜军, 高荣, 马鹏飞, 等. 西藏色季拉山地区立体气候特征初步分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(1): 14-18.]
- [35] Luo L, Dan Z, Zhu L P, et al. Vertical gradient changes of temperature and precipitation in the Sygera Mountains, southeastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(1): 37-46. [罗伦, 旦增, 朱立平, 等. 藏东南色季拉山气温和降水垂直梯度变化[J]. 高原气象, 2021, 40(1): 37-46.]
- [36] Chai Y, Fan G S, Li X W, et al. Study on vertical distributional belts and their floristic characters of seed plants from Shegyla Mountains of Xizang (Tibet), China[J]. *Guihaia*, 2004, 24(2): 107-112, 106. [柴勇, 樊国盛, 李乡旺, 等. 西藏色季拉山种子植物垂直带谱的划分与分布特点研究[J]. 广西植物, 2004, 24(2): 107-112, 106.]
- [37] 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.]
- [38] Soil System Classification Research Group, Nanjing Soil Institute, Chinese Academy of Sciences; Collaborative Research Group on Chinese Soil System Classification. Classification and retrieval of soil systems in China[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题组研究协作组. 中国土壤系统分类检索(第三版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [39] Li B P, Pan G, Pan G Y. Analysis of microclimate change characteristics in the forest area of Sejila Mountain, Tibet in the past decade[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(27): 8632-8634. [李白萍, 潘刚, 潘贵元. 西藏色季拉山林区近10年小气候变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27): 8632-8634.]

- [40] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [41] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [42] Jenny H. The soil resources: Origin and characteristics[M]. Li X F, et al.trans. Beijing: Science Press, 1988. [詹尼 H. 土壤资源: 起源与性状[M]. 李孝芳, 等. 译. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [43] Parker A. An index of weathering for silicate rocks[J]. *Geological Magazine*, 1970, 107(6): 501-504.
- [44] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [45] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [46] Chen J, An Z S, Liu L W, et al. Changes in chemical composition of the eolian dust over the Loess Plateau in recent 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian Interior[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2001, 31(2): 136-145. [陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2001, 31(2): 136-145.]
- [47] Gao D Y, Zou H, Wang W. Influence of water vapor pass along the yarlungzangbo river on precipitation[J]. *Journal of Mountain Research*, 1985, 3(4): 239-249. [高登义, 邹捍, 王维. 雅鲁藏布江水汽通道对降水的影响[J]. *山地研究*, 1985, 3(4): 239-249.]
- [48] Yang X X, Xu B Q, Yang W, et al. Study of altitudinal lapse rates of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation/river water with seasons on the southeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(16): 2742-2750.
- [49] Wang X Y. Study on altitudinal differentiation and influencing factors of chemical weathering and element migration in the Huangshan Granite Critical Zone [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2019. [汪晓云. 黄山花岗岩关键带化学风化与元素迁移海拔分异与影响因素研究[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2019.]
- [50] Tang J M. Geochemical characteristics of elements in the Loess-Paleosol sequence in western Sichuan Plateau and their environmental significance[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023. [唐金梦. 川西高原黄土-古土壤序列元素地球化学特征及其环境意义[D]. 福州: 福建师范大学, 2023.]
- [51] Ji F, Zhao H. The weathering features of soil under cold and wet condition in the northwestern Altay Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(2): 164-168. [季方, 赵虎. 阿尔泰山西北山区寒冻湿润条件下土壤的风化特征[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(2): 164-168.]
- [52] Jenny H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1941.
- [53] Feng Z G, Ma Q, Li S P, et al. Leaching experiment for the weathering of carbonate rocks by simulating different climates[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 361-376. [冯志刚, 马强, 李石朋, 等. 模拟不同气候条件下碳酸盐岩风化作用的淋溶实验研究[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(4): 361-376.]
- [54] Riebe C S, Kirchner J W, Finkel R C. Sharp decrease in long-term chemical weathering rates along an altitudinal transect[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 218(3/4): 421-434.
- [55] Buss H L, Chapela Lara M, Moore O W, et al. Lithological influences on contemporary and long-term regolith weathering at the Luquillo Critical Zone Observatory[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 196: 224-251.
- [56] Tsai C C, Chen Z S. Lithologic discontinuities in Ultisols along a toposequence in Taiwan[J]. *Soil Science*, 2000, 165(7): 587-596.
- [57] Lorz C, Phillips J D. Pedo-ecological consequences of lithological discontinuities in soils—Examples from Central Europe[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(4): 573-581.
- [58] Ciren W M, Ouzhu C M, Chen G Y, et al. Preliminary study on the variation characteristics of gale days in Linzhi City [J]. *Science and Technology Innovation*, 2020(13): 38-39. [次仁旺姆, 欧珠措姆, 陈宫燕, 等. 林芝市大风日数变化特征初探[J]. *科学技术创新*, 2020(13): 38-39.]

- [59] Li J Z, Zheng L L, Geng Q R, et al. Geological hazards and controlling factors along the Bomi-Nyingchi zone, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2006, 26(3): 81-84, 88. [李建忠, 郑来林, 耿全如, 等. 西藏波密—林芝环境地质灾害及防治[J]. *沉积与特提斯地质*, 2006, 26(3): 81-84, 88.]

(责任编辑: 檀满枝)