

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.012

王忠良, 范春梅, 段继琪, 等. 滇中亚高山草甸土理化性质和崩解特性关系[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 170-180.

WANG Zhongliang, FAN Chunmei, DUAN Jiqi, et al. Relationship between physicochemical properties and disintegration characteristics of subalpine meadow soils in Central Yunnan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 170-180.

滇中亚高山草甸土理化性质和崩解特性关系

王忠良¹, 范春梅², 段继琪¹, 陈正发², 李建兴³, 段青松²

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要: [目的] 工程扰动加剧亚高山草甸水土流失和植被破坏。研究滇中亚高山草甸土理化性质和崩解特性关系, 为亚高山草甸水土流失防控和植被保护提供参考。[方法] 通过 X 射线衍射、电镜扫描和静水崩解试验等, 测定滇中亚高山草甸土矿物成分、微观结构等理化性质和崩解特性, 分析土壤崩解特性与理化性质的相关性, 探讨滇中亚高山草甸土崩解原因。[结果] (1) 滇中亚高山草甸土遇水易崩解, 同一土层不同母质抗崩解特性表现为砂岩 > 石灰岩 ≈ 玄武岩, 同一母质不同土层表现为淋溶层 > 淀积层 > 母质层。(2) 相关性分析表明, 土壤平均崩解速率与有机质 ($r = -0.84$)、全氮 ($r = -0.83$) 呈极显著负相关, 与黏粒 ($r = 0.88$) 呈极显著正相关, 与蒙脱石 ($r = 0.68$)、四氧化三铁 ($r = 0.77$) 呈显著正相关。(3) 生物作用和蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物的膨胀作用是影响滇中亚高山草甸土崩解特性的主要原因。[结论] 滇中亚高山草甸土不同母质抗崩解特性为砂岩 > 石灰岩 ≈ 玄武岩, 不同土层抗崩解特性为淋溶层 > 淀积层 > 母质层; 滇中亚高山草甸土遇水易崩解, 生物作用和蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物的膨胀作用是影响滇中亚高山草甸土崩解性的主要原因。

关键词: 滇中; 亚高山草甸土; 理化性质; 崩解特性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0170-11

Relationship Between Physicochemical Properties and Disintegration Characteristics of Subalpine Meadow Soils in Central Yunnan

WANG Zhongliang¹, FAN Chunmei², DUAN Jiqi¹, CHEN Zhengfa², LI Jianxing³, DUAN Qingsong²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. College of Water Resource, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

3. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China)

Abstract: [Objective] The engineering disturbances have triggered soil erosion events in subalpine meadows, intensify regional soil erosion and vegetation destruction. The relationship between physical and chemical properties and disintegration characteristics of subalpine meadow soils in central Yunnan was studied to provide reference for soil and water conservation and control and vegetation protection in sub-alpine meadow ecosystems. [Methods] By X-ray diffraction, electron microscopy scanning, and static water disintegration experiments were conducted to determine the physico-chemical properties, mineral composition, microscopic structure, and disintegration characteristics of subalpine meadow soils in central Yunnan. The correlation between soil disintegration and physico-chemical properties was analyzed to explore the reason of soil disintegration in sub-alpine meadows of central Yunnan. [Results] (1) The subalpine meadow soils in central Yunnan exhibited a high susceptibility to disintegration when encountering water. The resistance to disintegration of different parent materials in the same soil layer were as follows sandstone > limestone ≈ basalt. The characteristics of different soil layers in the same parent material were as follows leaching

收稿日期: 2024-01-06

修回日期: 2024-02-20

录用日期: 2024-03-01

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-13

资助项目: 云南省水利科技重大专项 (2023BG204001); 国家自然科学基金项目 (42167046)

第一作者: 王忠良 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与土壤侵蚀防控研究。E-mail: 3154534715@qq.com

通信作者: 段青松 (1971—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持及土地生态整治研究。E-mail: 258437886@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

horizon>deposition layer>parent material layer. (2) Correlation analysis showed that the average soil disintegration rate was significantly negative correlated with organic matter ($r=-0.84$) and total nitrogen ($r=-0.83$), positively correlated with clay content ($r=0.88$), and positively correlated with montmorillonite ($r=0.68$) and hematite ($r=0.77$). (3) The main factors affecting the disintegration of subalpine meadow soils in central Yunnan were biological processes and swelling of hydrophilic clay minerals such as montmorillonite and illite. [Conclusion] The resistance to disintegration of subalpine meadow soils in central Yunnan was ranked as follows: Sandstone>limestone $\approx$ basalt for different parent materials, and leaching horizon>deposition layer>parent material layer for different soil layers. The subalpine meadow soil in central Yunnan was easy to disintegrate when exposed to water, the main factors affecting the disintegration of subalpine meadow soils in central Yunnan were biological processes and swelling of hydrophilic clay minerals such as montmorillonite and illite.

Keywords: central Yunnan; subalpine meadow soils; physicochemical properties; disintegration characteristics

Received: 2024-01-06

Revised: 2024-02-20

Accepted: 2024-03-01

Online(www.cnki.net): 2024-05-13

亚高山草甸作为高寒草甸的一种,海拔 3 000~4 000 m,主要分布于我国青藏高原东部、四川省西部,以及滇西北、滇东北和滇中地区^[1]。亚高山草甸是优良的天然牧场、重要的旅游资源和生态屏障,同时其风能、光能资源丰富,是风力、光伏能源开发的理想区域,但其抗干扰能力弱^[2],植被破坏后,恢复困难缓慢。野外调查发现,在风力、光伏等新能源项目建设中,施工道路的开挖、基础平台开挖与平整、生产生活区的建设等导致亚高山草甸土被大量揭露,沿线易发生滑坡、崩塌事故,这给亚高山草甸的生态功能保持构成严峻挑战,也为新能源项目的可持续开发带来生态风险,因此对工程扰动后亚高山草甸土的水土流失防控和植被保护研究具有重要的现实意义。

土壤崩解是指土壤在静水中发生分散、碎裂、塌落和解体的现象^[3],可用来反映土壤抗蚀性,是水土流失防控的一个重要指标。土壤在静水中被分散、碎裂、崩落得越快,即土壤抗蚀性越小,产生土壤侵蚀的几率越高^[4]。崩解是土壤侵蚀发生的前提条件,为进一步侵蚀提供物质基础,同时土壤崩解造成养分的流失,威胁草甸植被生长^[5]。近年来,国内外学者对不同土壤的崩解性进行一些研究,段青松等^[6]研究澜沧江黄登水电站库周典型土壤崩解特性指出,土壤崩解性由强到弱依次为红壤、黄棕壤、淤积土、紫色土;王一峰等^[7]研究表明,长江中上游地区土壤崩解速率由快至慢依次为砂质红壤、砂质黄壤、褐土、壤质黄壤、石灰土、紫色土、棕壤和壤质红壤;ZHANG 等^[8]研究俄罗斯联邦莫斯科地区采集的黏壤土的崩解特性。关于不同深度土壤崩解特征,周红艺等^[9]研究指出,崩壁土体随着土层变深土壤崩解速度变快;刘湘玥

等^[10]研究表明,红壤崩解速率大体表现为随土层深度的增加而降低;SHIT 等^[11]研究了印度不同风化剖面(表层、红土层、砂土层和碎屑层)内土壤理化性质和土壤崩解特征的关系,指出抗崩解系数随土层深度的增加而逐渐降低。这些研究表明,不同土壤崩解性变化的规律随深度变化是不同的。亚高山草甸土发育程度低、母质成分复杂^[12-14],目前对亚高山草甸土崩解特征尚不清楚。本研究以滇中高本山 3 种典型亚高山草甸土(砂岩、玄武岩、石灰岩)为研究对象,探索不同深度(淋溶层、淀积层、母质层)的亚高山草甸土的崩解特性及土壤性质对崩解的影响,并针对滇中亚高山草甸土的崩解特性提出相应的治理措施,为滇中亚高山草甸水土保持、土壤侵蚀防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市寻甸回族彝族自治县和东川区交界处的高本山(25°47'50"—25°54'26"N, 103°09'20"—103°11'59"E),海拔 3 040~3 200 m,属滇中红土高原区和滇东喀斯特高原区的接壤地带,具有典型的低纬高原亚高山草甸景观特征(图 1)。该区域夏秋多雨,冬春干旱,年平均降水量 1 020.9 mm。土壤类型为亚高山草甸土,气象灾害有霜冻、干旱和冰雹等。植物主要以羊茅(*Festuca ovina* L.)、萎陵菜(*Potentilla chinensis*)、冷箭竹(*Arundinaria faberi*)、寒温灌丛、暖温性针叶林为主。

1.2 土壤采样

依据亚高山草甸土的颜色、质地和植物根系等自上而下将剖面土壤划分为 3 个层次,分别为淋溶层(A 层)、淀积层(B 层)和母质层(C 层),从下到上逐

一进行采样。取样点基本情况见表 1。将土样运回云南农业大学水土保持实验室后自然风干,放在橡皮板上用木碾碾散,使土壤结构充分分散,同时剔除杂质,将碾散的风干土样过 2 mm 筛备用。

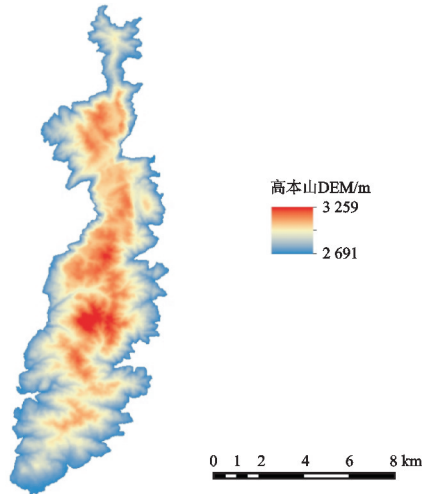


图 1 研究区域高程

Fig. 1 Elevation map of study area

表 1 取样点信息

Table 1 Information of sampling

采样点	母质类型	土层	土层深度/cm	经纬度	海拔/m
1	砂岩	A	0—20	25°46′59″N, 103°10′16″E	3 019
		B	20—55		
		C	>55		
2	玄武岩	A	22—58	25°49′34″N, 103°11′18″E	3 202
		B	58—85		
		C	>85		
3	石灰岩	A	0—25	25°51′45″N, 103°11′38″E	3 046
		B	25—55		
		C	>55		

1.3 土壤理化性质测定

土壤 pH 采用电位法(土水比 1 : 1)测定、有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法测定,全氮采用半微量凯氏定氮法测定、有效磷采用 Olsen 法测定、速效钾采用中性醋酸铵浸提—火焰光度计法^[15]测定。

采用比重法^[15]测定土壤砂粒、粉粒、黏粒的含量。

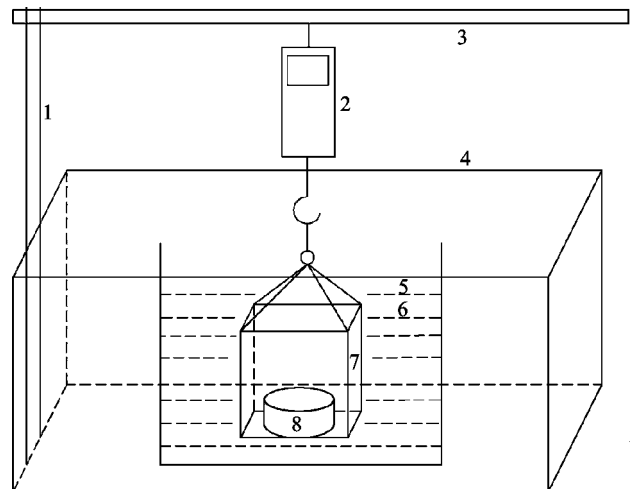
采用 X 射线衍射仪(miniflex600)对亚高山草甸土矿物成分进行鉴定,该仪器主要技术参数:广角 10°~90°,速度 5°/min。称取经碾磨过 0.25 mm 筛后试样 2 g 进行矿物分析,根据 ICDD 卡片查对,可鉴定出主要黏土矿物成分,再通过定量计算衍射峰强度和半高宽等参数,可得出矿物组合及相对含量。

采用电镜扫描(德国蔡司 Sigma 500)对亚高山草甸土进行微观结构(SEM)分析。

1.4 崩解试验

采用环刀压样器制作高度为 2 cm、直径为 6.18 cm 的试样,试样干密度为 1.30 g/cm³,含水率为

30%(与取样时土壤的干密度、含水量相当),每个处理 5 次重复。试验装置见图 2。将崩解装置安装调至合适的位置,悬挂拉力计并打开电源,将崩解架挂在拉力计上读数(水中)置零,待测。试验开始时,将土样放置在崩解架上,然后将崩解架悬挂在数显拉力计上,利用升降旋钮将崩解架缓慢放入崩解容器中,直至土样的上表面与水面处于同一水平后开始记录读数。试验过程中前 3 min 每 15 s 记录 1 次读数,后每 1 min 记录 1 次读数,直至土壤完全崩解。



注:1 为伸缩支架;2 为电子拉力计;3 为横梁;4 为挡风外罩;5 为崩解溶液(水);6 为崩解容器;7 为崩解架;8 为土样。

图 2 试验装置示意

Fig. 2 Diagram of test equipment

1.5 计算方法

崩解率计算公式^[16]为:

$$H = \frac{F_0 - F_t}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

崩解速率计算公式^[16]为:

$$V = \frac{H}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: H 为试样的崩解率(%),表征土体的崩解强度; F_0 为试样充分吸水后拉力计的峰值读数(N); F_t 为试样在 t 时刻的拉力计读数(N); V 为试样的平均崩解速率(%/min),表征土体的崩解快慢,该值越大产生崩解的机率越大; T 为崩解时间(min)。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

土壤化学性质是反映土壤质量和养分供给能力的重要指标。由表 2 可知,滇中亚高山草甸土 pH 为 5.47~5.87,属于酸性土壤。表层土壤 pH 比下层低,这是因为表层土壤中动物、微生物活动比较频繁,产生代谢物,同时表层枯枝落叶在分解时产生有机酸等酸性物质,导致表层土壤的 pH 低。同一母质不同土层土壤有机质和全氮含量表现为 A 层>B 层>C 层,

同一土层不同母质土壤有机质和全氮含量表现为砂岩>石灰岩>玄武岩。土壤有机质主要来源于土壤表层的微生物、动植物及其残体,全氮主要来源于植物根系的固氮作用,土壤生物活动、植物根系固氮作用随着土层的加深而下降^[17],导致土壤有机质、全氮含量随土层加深而下降。此外,砂岩有机质和全氮含量分别为 111~233,4.16~5.17 g/kg,达到丰富级别,其养分供给能力远大于石灰岩和玄武岩。

土壤机械组成可以表征土壤颗粒的级配特征。

由表 3 可知,滇中亚高山草甸土砂粒含量为30.16%~63.06%,粉粒含量为 29.75%~51.75%,两者含量为 72.32%~92.81%,可见滇中亚高山草甸土以砂粒和粉粒为主。黏粒含量仅为 7.19%~27.68%,并且随着土层变深其含量增加。植物根系能够分泌大量胶结物^[18],促进黏粒向砂粒和粉粒转化,根区土壤黏粒含量明显小于非根区^[19]。随着土层变深草甸植被根系减少,因此黏粒含量增加。根据卡钦斯基制土壤质地分类法,滇中亚高山草甸土均属于壤土。

表 2 土壤化学性质

Table 2 Soil chemical property

土壤母质类型	土层	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
砂岩	A 层	5.53	233	9.83	0.6	113
	B 层	5.59	127	5.79	0.4	33
	C 层	5.73	111	4.16	0.7	31
玄武岩	A 层	5.47	98.2	4.08	0.8	25
	B 层	5.60	32.7	1.77	0.2	14
	C 层	5.64	8.77	0.66	0.3	27
石灰岩	A 层	5.22	113	5.12	3.1	94
	B 层	5.87	36.8	1.68	0.4	27
	C 层	5.57	18.3	0.45	0.1	40

表 3 土壤机械组成

Table 3 Soil mechanical composition

土壤母质类型	土层	砂粒	粉粒	黏粒	土壤质地
		(0.05~1 mm)/%	(0.001~0.05 mm)/%	(<0.001 mm)/%	
砂岩	A 层	63.06	29.75	7.19	砂壤土
	B 层	58.85	33.23	7.92	砂壤土
	C 层	43.16	44.69	12.15	中壤土
玄武岩	A 层	44.67	41.82	13.51	中壤土
	B 层	33.75	51.75	14.50	重壤土
	C 层	48.98	32.57	17.46	重壤土
石灰岩	A 层	59.17	30.25	10.58	轻壤土
	B 层	32.77	51.69	15.54	重壤土
	C 层	30.16	42.16	27.68	重壤土

土壤的矿物成分是影响土壤物质结构性质的主要因素。由图 3 和表 4 可知,滇中亚高山草甸土原生矿物包括石英、云母、长石,其含量为 28.0%~47.4%;黏土矿物包括蒙脱石、伊利石、高岭石以及少量的氧化铁和四氧化三铁,以蒙脱石含量最高,为 20.3%~33.6%。黏土矿物将土壤颗粒黏结在一起,形成具有一定强度的稳定结构。其中,蒙脱石、伊利石为 3 层晶胞结构,晶胞之间黏结力较弱,水分子容易进入晶胞之间,使晶胞间的间距增大而发生膨胀,从而导致亚高山草甸土的胶结力急剧变弱。而高岭石为 2 层晶胞结构,亲水性弱^[20]。滇中亚高山草甸土富含蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物,胀缩性较强。

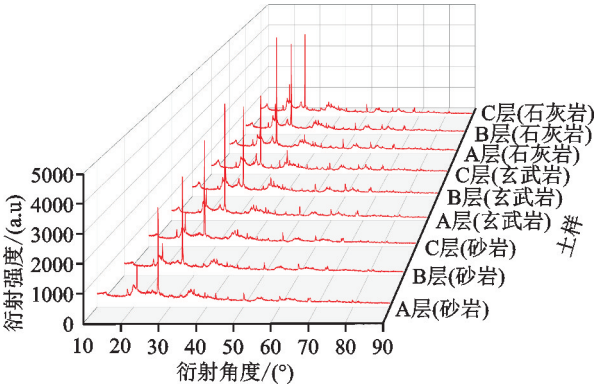


图 3 土壤衍射图

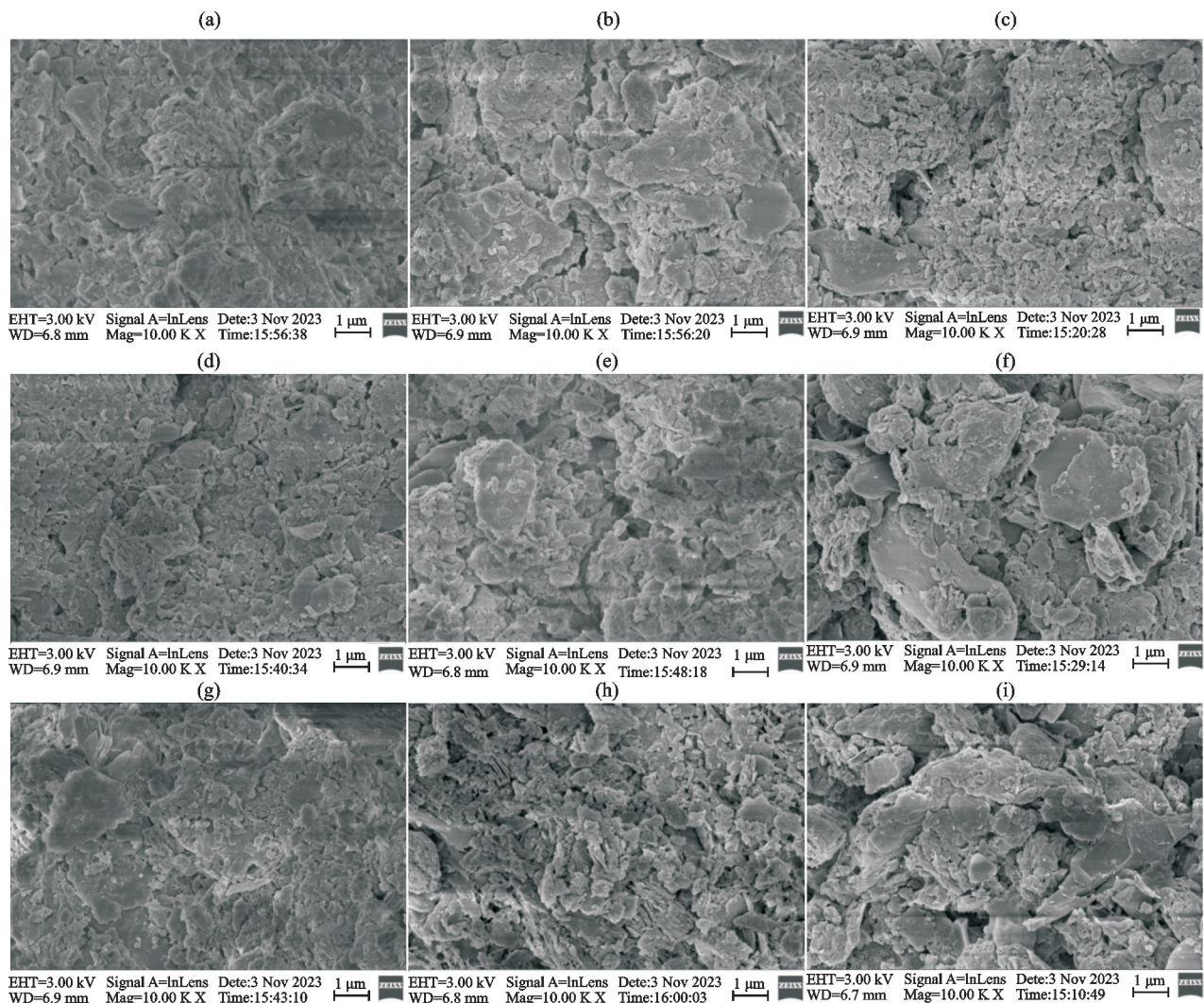
Fig. 3 Diffraction map of soil

表 4 亚高山草甸土矿物成分
Table 4 Mineral composition of subalpine meadow soil

土壤母质类型	土层	石英	云母	长石	蒙脱石	伊利石	高岭石	氧化铁	四氧化三铁
砂岩	A 层	23.8	11.1	7.3	28.6	12.9	10.9	2.0	1.6
	B 层	23.7	11.4	5.2	28.0	13.7	10.0	1.8	2.3
	C 层	21.7	13.5	1.7	26.9	24.6	8.5	1.4	1.6
玄武岩	A 层	30.8	11.0	5.6	20.3	14.0	12.7	2.2	1.5
	B 层	26.1	0.4	1.5	30.5	24.5	13.2	2.0	2.0
	C 层	19.0	7.0	7.3	31.9	12.7	17.3	2.0	2.8
石灰岩	A 层	26.3	9.0	4.8	28.8	15.4	14.6	1.6	1.4
	B 层	26.2	7.2	5.5	31.2	15.6	10.6	1.8	1.9
	C 层	21.9	10.1	2.4	33.6	15.4	12.4	1.8	2.2

土壤微观结构能够表征土壤颗粒形态及颗粒间的孔隙形态及大小等。从图 4 可以看出,滇中亚高山草甸土颗粒结构呈片状、块状、粒状、条状,以片状和块状为主,颗粒分层叠加,生长零乱,粒径大小不一。颗粒间存在大量孔隙,边界明显,水分容易通过孔隙进入土体,但不同土样之间孔隙大小有所差异,图

4a、图 4d、图 4g 中土壤孔隙较小,而图 4e、图 4f、图 4h、图 4i 中土壤孔隙较大。总体来看,同一土层石灰岩和玄武岩孔隙比砂岩明显,同一母质土层变深孔隙越明显。此外,亚高山草甸土颗粒间存在一定裂缝(图 4b)。所以亚高山草甸土孔隙较为发育,结构疏松,这些孔隙加强土壤的崩解性。



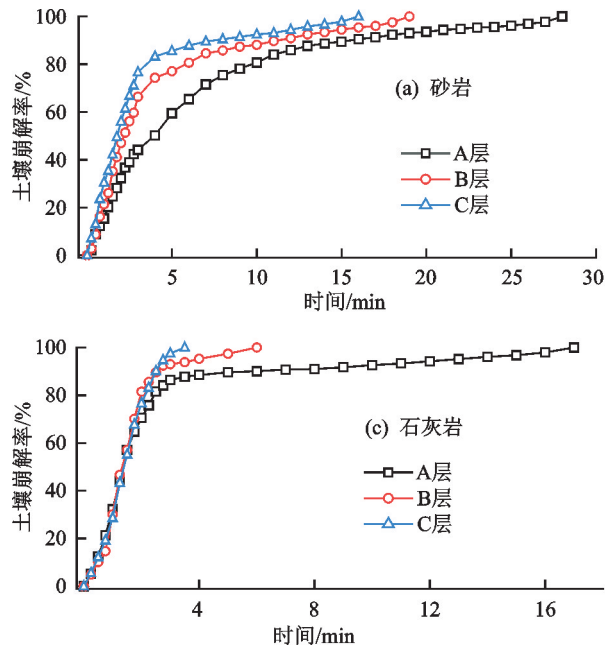
注:a、b、c 分别为砂岩 A 层、B 层、C 层;d、e、f 分别为玄武岩 A 层、B 层、C 层;g、h、i 分别为石灰岩 A 层、B 层、C 层。

图 4 亚高山草甸土放大 10 000 倍的微观结构(SEM)

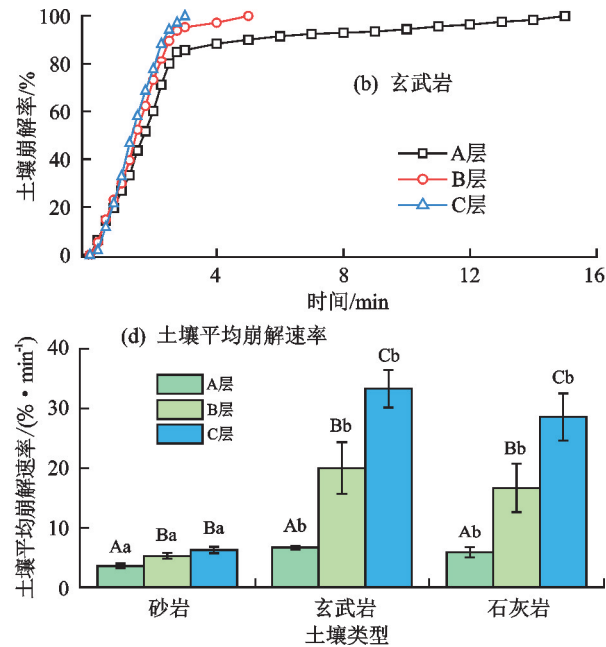
Fig. 4 Microscopic structure (SEM) of subalpine meadow soil at magnification of 10 000

2.2 土壤崩解特征

在本试验中,土壤崩解先快后慢,崩解曲线基本呈现倒“L”形曲线,崩解过程依次分为 3 个阶段:吸水排气阶段(0~0.25 min)、快速崩解阶段(0.25~3 min)和崩解完成阶段(3 min 至崩解完成)。土样放入崩解箱后首先产生气泡,然后从外到里层状脱落,过程类似“剥洋葱”,崩解箱中的水明显变浑。进入崩解完成阶段,残余土体保留一定堆积角并在一定时间内稳定,最终完成崩解。



从图 5 可以看出,所有土样均完成崩解,同一母质崩解完成时间表现为淋溶层>淀积层>母质层,平均崩解速率表现为母质层>淀积层>淋溶层;同一土层崩解完成时间表现为砂岩>石灰岩≈玄武岩,平均崩解速率表现为玄武岩≈石灰岩>砂岩。所以,同一母质不同土层的滇中亚高山草甸土,抗崩解特性表现为淋溶层>淀积层>母质层;同一土层不同母质的滇中亚高山草甸土,抗崩解特性表现为砂岩>石灰岩≈玄武岩。



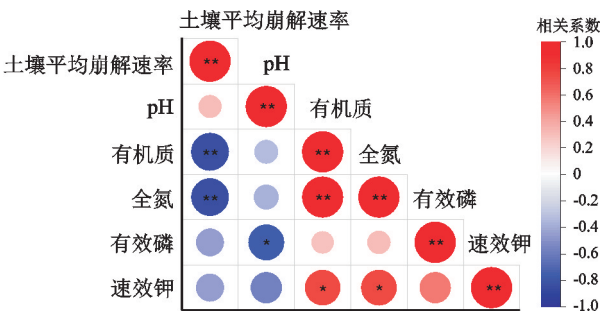
注:图柱上方不同大写字母表示不同土层之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示不同母质之间差异显著($p<0.05$)。

图 5 亚高山草甸土壤崩解曲线与指标

Fig. 5 Subalpine meadow soil disintegration curve and index

2.3 土壤理化性质与崩解特性相关分析

由图 6 可知,土壤平均崩解速率与土壤 pH、有效磷、速效钾相关性不显著,与有机质($r=-0.84$)、全氮($r=-0.83$)之间存在极显著负相关,说明随着土壤有机质、全氮含量的升高,土壤抗崩解特性也增强。由表 5 可知,土壤平均崩解速率与黏粒存在极显著正相关,与砂粒、粉粒相关性不显著,表明黏粒含量越低,土壤越不容易崩解。



注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。下同。

图 6 土壤平均崩解速率与化学性质相关性

Fig. 6 Correlation between average soil disintegration rate and soil chemical property

表 5 土壤平均崩解速率与机械组成相关性

Table 5 Correlation between average soil disintegration rate and mechanical composition

指标	土壤平均崩解速率	砂粒	粉粒	黏粒
土壤平均崩解速率	1.00 **	-0.56	0.24	0.88 **
砂粒		1.00 **	-0.81 **	-0.78 *
粉粒			1.00 **	0.38
黏粒				1.00 **

注: * 表示 $p\leq 0.05$; ** 表示 $p\leq 0.01$ 。

由图 7 可知,石英、云母、长石、高岭石、伊利石、氧化铁含量与土壤平均崩解速率相关性不显著,而蒙脱石($r=0.68$)、四氧化三铁($r=0.77$)与土壤平均崩解呈显著正相关,说明蒙脱石、四氧化三铁含量越低,土壤抗崩解性越好。

以上分析说明土壤化学性质、机械组成、矿物成分与土壤崩解速率密切相关,3 项土壤理化性质综合作用于土壤崩解。通过主成分分析这 3 项土壤理化性质对土壤崩解特性的影响^[21]。由表 6 可知,第 1

因子贡献率为 26.679%，第 2 因子贡献率为 19.065%，第 3 因子贡献率为 17.742%，第 4 因子贡献率为 15.734%，第 5 因子贡献率为 11.621%，累计贡献率为 90.840%。由各项因子的因子负荷量可知，对主成分 F_1 贡献最大的是有机质、全氮、黏粒，对主成分 F_2 贡献最大的是伊利石，对主成分 F_3 贡献最大的是 pH，对主成分 F_4 贡献最大的是石英、蒙脱石，对主成分 F_5 贡献最大的是云母。由于主成分 F_1 贡献率为 26.679%，说明以有机质、全氮、黏粒等指标能够反映土壤崩解性，即有机质、全氮含量越高，黏粒含量越低，草甸土抗崩解特性越好。

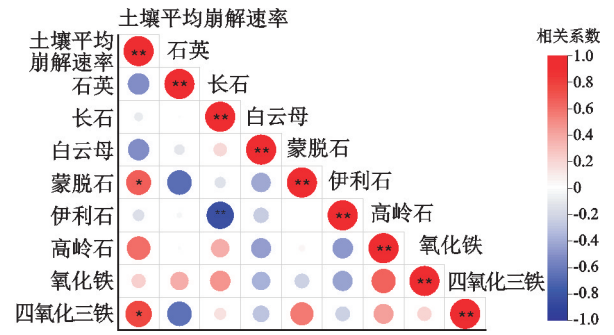


图 7 土壤平均崩解速率与矿物成分相关性

Fig. 7 Correlation between average soil disintegration rate and mineral composition

表 6 土壤理化性质因子对土壤崩解影响分析

Table 6 Effects of soil physical and chemical properties on soil disintegration

土壤理化性质	指标	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	公因子方差
土壤化学性质	pH	-0.161	-0.188	-0.877	0.214	-0.073	0.881
	有机质	0.896	0.083	0.128	-0.207	-0.300	0.960
	全氮	0.921	0.116	0.149	-0.199	-0.223	0.974
	有效磷	0.203	-0.098	0.907	-0.166	-0.071	0.906
	速效钾	0.629	0.174	0.571	0.115	-0.158	0.790
土壤机械组成	砂粒	0.779	0.397	0.387	0.072	-0.133	0.938
	粉粒	-0.469	-0.587	-0.508	-0.291	0.217	0.955
	黏粒	-0.895	0.002	-0.058	0.239	-0.053	0.864
土壤矿物组分	石英	0.036	-0.040	0.138	-0.937	0.177	0.932
	云母	0.243	0.168	0.055	-0.075	-0.943	0.986
	长石	0.346	0.862	0.028	0.016	0.018	0.864
	蒙脱石	-0.254	-0.122	-0.026	-0.837	0.230	0.831
	伊利石	-0.061	-0.919	-0.149	-0.032	0.176	0.933
	高岭石	-0.378	0.490	0.461	0.205	0.544	0.903
	氧化铁	-0.068	0.657	-0.256	-0.388	0.511	0.912
	四氧化三铁	-0.361	0.387	-0.383	0.650	0.234	0.904
	特征值	4.269	3.050	2.839	2.517	1.859	
	贡献率/%	26.679	19.065	17.742	15.734	11.621	
累积贡献率/%		26.679	45.744	63.486	79.220	90.840	

3 讨论

3.1 亚高山草甸土崩解特性

在本试验中，滇中亚高山草甸土在 3~28 min 均完成崩解，同等条件下比三峡库区黄棕壤^[22]和紫色土^[23]更易崩解。三峡库区黄棕壤^[22]在 1.2 g/cm³ 的干密度、15% 的含水率下，7 min 后崩解稳定，崩解率为 53%；三峡库区紫色土^[23]在 1.3 g/cm³ 的干密度、14% 的含水率下，崩解主要发生在 0~4 min，15 min 时崩解率为 98%。随着土层的变深滇中亚高山草甸土各层的抗崩解性逐渐减弱，这与周红艺等^[9]、SHIT 等^[11]的研究结果一致。表层土壤有机质含量丰富，土壤颗粒较细，而土壤抗崩常数与较细的土壤颗粒、有机质呈正相关^[11]。已有研究^[24]表明，森林表层土壤相对较薄，具有弱至中等颗粒结构；而草原表层土壤较厚，具有中至强度的颗粒结构，这可能是与刘湘

玥等^[10]研究结果不一致的原因。滇中亚高山草甸土被开挖后，抗崩解性差的母质层和淀积层遇水最先发生崩解，土壤滑移到底部，而抗崩解性较强的淋溶层在自身和植物根系的共同作用下，可以暂时抵挡雨水带来的侵蚀而发生轻微形变，但是随着母质层和淀积层崩解的进行，底部不断被掏空，最终发生溜滑。若不及时防护，将会按照降雨崩解掏挖→形成悬空土体→崩塌→继续崩解掏挖→…这样的循环过程不断进行，形成严重的水土流失和植被破坏。所以，在滇中亚高山进行项目建设时应该尽量减少开挖深度，一旦抗崩解性差的底土被揭露，极易发生“崩解—掏蚀”现象。开挖坡面时应该布置排水沟，将上方来水排出坡面，减少坡面侵蚀；在坡度较缓的坡面，还应该积极恢复植被，发挥草甸植被根系土壤骨架的作用；在坡度较陡的坡面，应修建挡墙或者通过削坡放缓边坡。

3.2 土壤理化性质对亚高山草甸土崩解的影响

有机质是形成稳定土壤结构的重要条件。本研究发现,土壤有机质、全氮与土壤平均崩解速率存在极显著负相关,有机质、全氮含量越高土壤抗崩解性越好,这与段青松等^[6]、XIA 等^[25]的研究结果一致。微团聚体降低土壤稳定性,而有机质作为一种土壤胶结物,促进微团聚体形成大团聚体^[26],提高土壤团聚体的稳定性^[27]。全氮通过促进有机质的形成^[28]而间接影响土壤崩解性。所以,有机质、全氮含量越高,土壤间的胶结作用越强,稳定性越好。

土壤机械组成影响着土壤崩解特性。在本研究中,黏粒含量与土壤平均崩解速率呈极显著正相关,这与朱龙祥等^[29]对沈阳地区棕壤崩解性的研究结果一致。土壤黏粒含量越高,比表面积越大,表面电荷数量越多^[30]。黏粒表面具有较高的亲水性,内部电荷能够吸附并形成水膜及反离子层,最终在土颗粒表面形成双电层。电荷数量越多,对双电层内电子吸附能力增强,双电层电子活动能力减弱,土壤对自由水的控制能力减弱,从而导致土壤稳定性下降^[29]。但这与王念秦等^[31]的研究结果不一致。王念秦等^[31]研究了陕西关中地区黄土崩解指出,土壤砂粒含量越高,团聚作用就越弱,越容易形成大孔隙,黏粒含量越高,土壤团聚作用越强,形成的土壤孔隙越小,孔隙度越大的架空结构土壤水稳性差,遇水容易崩解,而孔隙度小、结构密实的土壤不易崩解。这与土壤黏土矿物有关。如前文所述,亚高山草甸土黏土矿物以蒙脱石和伊利石为主,表现出较强的膨胀性,黏土矿物越多土壤崩解性越强^[32],而黏土矿物主要来自于黏粒^[20]。所以,在本研究中黏粒含量越多,土壤越容易发生崩解。

土壤微观结构、黏土矿物与崩解特性密切相关^[33]。滇中亚高山草甸土胀缩性强,且具有一定裂缝和孔隙。当水分进入这些贯通的裂缝和孔隙,溶解颗粒间的胶结物,破坏颗粒间的连结,同时产生强烈的膨胀作用,在土样薄弱处产生应力作用,加速土壤崩解^[3,34-35]。水分进入裂缝和孔隙时,将原有气体排出,因此在崩解初期有气泡产生。当裂缝被水分贯通时,土壤快速崩解,层状、块状脱落。崩解后期,土样中蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物吸水膨胀减弱,土样产生一定堆积角并维持一段时间。在本研究中,蒙脱石含量与土壤平均崩解速率呈显著正相关,蒙脱石含量越高,其膨胀作用越强土壤越容易崩解。此外,发现四氧化三铁含量与土壤平均崩解速率呈显著正相关。已有研究^[36]表明,铁氧化物在土体中形成包膜结构,通过桥状胶结结构连接使得土粒多以胶结

土团的形式存在,但这种结构遇水易被破坏。因此,四氧化三铁含量越高,土壤越容易崩解。

3.3 亚高山草甸土崩解原因

滇中亚高山草甸土富含蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物,胀缩性较强,促进崩解的发生。此外,有机质与土壤平均崩解速率呈极显著负相关,而有机质受生物作用影响,所以生物作用对亚高山草甸土崩解特性也具有重要影响。土壤有机质主要来源于土壤表层的微生物、动植物及其残体,土壤生物活动随着土层的加深而下降^[17,37],导致土壤有机质含量随土层加深而下降。已有研究^[38]表明,植物根系分泌物也能够促进有机质的稳定与积累。滇中亚高山草甸土与西南紫色土、黄土高原黄土、东北黑土的黏土矿物和有机质含量不一致:(1)从黏土矿物来看,黏土矿物的含量及成分影响着土壤颗粒的胶结作用,以蒙脱石为主,则受水影响剧烈且具有膨胀性;以高岭石为主,则水稳性较好;以伊利石为主,则介于两者之间。滇中亚高山草甸土黏土矿物含量较高,以蒙脱石为主,表现出较强的膨胀性,土壤遇水易崩解;紫色土黏土矿物含量较低,以蒙脱石为主,其含量约为12.26%,膨胀性较弱^[39],遇水易崩解;黄土黏土矿物含量较低,以伊利石为主^[20],遇水易崩解;黑土黏土矿物含量丰富,以伊利石为主^[40],遇水不易崩解。(2)从有机质含量来看,有机质作为一种土壤胶结物,其含量越高土壤颗粒间胶结作用越强,土壤越不容易崩解。紫色土和黄土有机质含量较低,土壤颗粒间的胶结作用较弱,遇水易崩解;黑土有机质含量丰富,土壤颗粒间的胶结作用较强,遇水不易崩解;而滇中亚高山草甸土有机质含量较高,土壤颗粒间的胶结作用较强。所以,生物作用和蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物的膨胀作用是影响亚高山草甸土崩解特性的主要原因。

4 结论

(1)滇中亚高山草甸土遇水易崩解,同一土层不同母质抗崩解特性表现为砂岩>石灰岩≈玄武岩,同一母质不同土层表现为淋溶层>淀积层>母质层。

(2)相关性分析表明,土壤平均崩解速率与有机质($r=-0.84$)、全氮($r=-0.83$)呈极显著负相关,与黏粒($r=0.88$)呈极显著正相关,与蒙脱石($r=0.68$)、四氧化三铁($r=0.77$)呈显著正相关。

(3)生物作用和蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物的膨胀作用是影响亚高山草甸土崩解特性的主要原因。

参考文献:

- [1] 倪璐,吴静,李纯斌,等.近30年中国天然草地物候时空变化特征分析[J].草业学报,2020,29(1):1-12.

- NI L, WU J, LI C B, et al. Temporal and spatial variations in natural grassland phenology in China over the last 30 years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 1-12.
- [2] 邓远东, 郭健, 易鹏飞. 亚高山草甸土浅层溜滑侵蚀的空间分布预测模型研究[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(3): 170-178.
- DENG Y D, GUO J, YI P F. Spatial distribution prediction model of shallow slide erosion of subalpine meadow soil[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(3): 170-178.
- [3] 张晓媛, 范昊明, 杨晓珍, 等. 容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 214-218.
- ZHANG X Y, FAN H M, YANG X Z, et al. Effects of soil bulk density and water content on hydrostatic disintegration rate of sandy clay loam[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 214-218.
- [4] 李强, 张正, 孙会, 等. 土壤崩解速率的一种修正方法[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 344-348.
- LI Q, ZHANG Z, SUN H, et al. A new modified method for calculation of soil disintegration rate[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 344-348.
- [5] 张宁宁, 黄诗浩, 雷衡, 等. 基于 ^{137}Cs 示踪技术的土壤侵蚀及养分流失特征评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9274-9283.
- ZHANG N N, HUANG S H, LEI H, et al. Assessment of soil erosion and nutrient loss characteristics based on ^{137}Cs tracer technique[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9274-9283.
- [6] 段青松, 保锐琴, 黄广杰, 等. 澜沧江黄登水电站库周土壤的崩解特性[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(4): 195-202.
- DUAN Q S, BAO R Q, HUANG G J, et al. Soil disintegration characteristics around Huangdeng hydropower station reservoir on Lancang River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 195-202.
- [7] 王一峰, 牛俊. 长江中上游地区土壤崩解速率特征分析[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(3): 40-43.
- WANG Y F, NIU J. Soil disintegration rate in the upper and middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(3): 40-43.
- [8] ZHANG Z, VADIM P, SVETLANA N, et al. Disintegration characteristics of a cryolithogenic clay loam with different water content: Moscow covering loam (prQI-II), case study[J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: e105159.
- [9] 周红艺, 李辉霞. 华南活动型崩岗崩壁土体的崩解特性及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 74-79.
- ZHOU H Y, LI H X. The study on soil disintegration characteristics and its influence factors of collapsing wall in the collapsing hill erosion region of southern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 74-79.
- [10] 刘湘玥, 陈世发, 吕静, 等. 土层深度与树龄对粤北红壤丘陵区果园土壤崩解特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 118-123.
- LIU X Y, CHEN S F, LÜ J, et al. Effects of soil depth and tree age on soil disintegration characteristics of orchards in hilly area of red soil in northern Guangdong Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 118-123.
- [11] SHIT P K, ADHIKARY P P. Gully erosion studies from India and surrounding Regions: Soil disintegration characteristics on Ephemeral gully collapsing in lateritic belt of West Bengal, India[M]. Switzerland Spriger, 2020.
- [12] CONNER L G, GILL R A, HARVEY J T. Earlier snowmelt accompanied by warmer soil temperatures in mid-latitude aspen forest and subalpine meadow: Implications for soil carbon[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1): 275-285.
- [13] DREWNIAK M, MUSIELOK Ł, STOLARCZYK M, et al. Effects of exposure and vegetation type on organic matter stock in the soils of subalpine meadows in the Eastern Carpathians[J]. *Catena*, 2016, 147: 167-176.
- [14] 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[J]. *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 for alpine meadow soils in Amdo, northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(6): 709-720.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] 黎桢君, 许冲, 李贤, 等. 非饱和砂质黏性紫色土崩解特性及 MICP 加固试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 127-135.
- LI A J, XU C, LI X, et al. Experimental investigation on disintegration characteristics and MICP reinforcement of unsaturated sandy clayey purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 127-135.
- [17] 王宪伟, 孙丽, 杜宇, 等. 大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤性质与微生物呼吸活性研究[J]. *湿地科学*, 2021, 19(6): 682-690.
- WANG X W, SUN L, DU Y, et al. Soil property and microbial respiration activity of peatland in permafrost

- region in greater Hinggan Mountains[J]. Wetland Science, 2021, 19(6): 682-690.
- [18] 肖海, 彭逗逗, 邵艳艳, 等. 狗牙根根系对三峡库区消落带紫色土崩解性能的作用机理分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1116-1122.
- XIAO H, PENG D D, SHAO Y Y, et al. Mechanism of soil disintegration by *Cynodon dactylon* root in the purple soil from water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(5): 1116-1122.
- [19] 邓廷飞, 刘彦, 颜秋晓, 等. 贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 209-214.
- DENG T F, LIU Y, YAN Q X, et al. Mechanical composition and soil nutrient characteristics and their relationships in typical *Lonicera cinfusa* soil of Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 209-214.
- [20] 袁亮, 谷天峰, 胡炜, 等. 不同地区黄土崩解特性的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 93-100.
- YUAN L, GU T F, HU W, et al. Experimental study on disintegration of loess in different regions[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 93-100.
- [21] 周明涛, 高家祯, 张守德, 等. 多花木蓝与狗牙根不同种植模式对三峡黄棕壤抗蚀性影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 7-11.
- ZHOU M T, GAO J Z, ZHANG S D, et al. Impact of different planting patterns of *Magnolia multiflora* and *Cynodon dactylon* on the antierodibility of yellow brown earth in Three Gorges area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 7-11.
- [22] 肖海, 朱志恩, 李紫娟, 等. 酸性条件下干湿循环对黄棕壤崩解性能的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(2): 10-16.
- XIAO H, ZHU Z E, LI Z J, et al. Effects of dry-wet cycle on the disintegration performance of yellow brown soil under acidic conditions[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(2): 10-16.
- [23] 李敬王, 陈林, 史东梅, 等. 紫色土崩解特性对容重和含水率的响应特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 68-72, 78.
- LI J W, CHEN L, SHI D M, et al. Response characteristics of purple soil disintegrating characteristics to bulk densities and water contents[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 68-72, 78.
- [24] KASMERCHAK C S, MASON J A, LIANG M Y. Laser diffraction analysis of aggregate stability and disintegration in forest and grassland soils of northern Minnesota, USA[J]. Geoderma, 2019, 338: 430-444.
- [25] XIA D, ZHAO B Q, LIU D X, et al. Effect of soil moisture on soil disintegration characteristics of different weathering profiles of collapsing gully in the hilly granitic region, South China[J]. PLoS One, 2018, 13(12): e0209427.
- [26] 潘英杰, 何志瑞, 刘玉林, 等. 黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5195-5203.
- PAN Y J, HE Z R, LIU Y L, et al. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon during secondary forest succession in the Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5195-5203.
- [27] DOU Y X, YANG Y, AN S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2020, 185: e104294.
- [28] DAI L J, GE J S, WANG L Q, et al. Influence of soil properties, topography, and land cover on soil organic carbon and total nitrogen concentration: A case study in Qinghai-Tibet Plateau based on random forest regression and structural equation modeling[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 821: e153440.
- [29] 朱龙祥, 范昊明, 马仁明. 冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 77-88.
- ZHU L X, FAN H M, MA R M. Effects of freeze-thaw cycles and soil water contents on disintegration characteristics of brown earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 77-88.
- [30] 马任甜, 胡斐南, 刘婧芳, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤表面电化性质演变特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 392-402.
- MA R T, HU F N, LIU J F, et al. Evolution of soil surface electrochemical characteristics with vegetation restoration on Loess Plateau in Ziwuling area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 392-402.
- [31] 王念秦, 魏精瑞. 陕西关中地区离石黄土崩解速率实验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 954-958.
- WANG N Q, WEI J R. Experimental study on disintegration rate of Lishi loess in Guanzhong region of Shaanxi Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 954-958.
- [32] GAUTAM T P, SHAKOOR A. Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions[J]. Engineering Geology, 2013, 166: 17-25.
- [33] ZHOU H Y, LI H X. Soil disintegration characteristics of collapsed walls and influencing factors in southern China[J]. Open Geosciences, 2018, 10(1): e62.
- [34] ZHANG Z H, LIU W, HAN L, et al. Disintegration behavior of strongly weathered purple mudstone in drawdown area of Three Gorges Reservoir, China[J]. Geomorphology, 2018, 315: 68-79.

- [35] 谷天峰,袁亮,胡炜,等.黑方台黄土崩解性试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):62-70.
GU T F, YUAN L, HU W, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44 (4): 62-70.
- [36] 翁峻择.桂东南地区压实花岗岩风化土崩解特性研究[D].广西 桂林:桂林理工大学,2023.
WEN J Z. Research on the disintegration characteristics of compacted granite weathering soils in southeast Guangxi [D]. Guangxi Guilin: Guilin University of Technology, 2023.
- [37] WU X L, WEI Y J, WANG J G, et al. Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient[J].Catena, 2017, 156: 205-215.
- [38] DIJKSTRA F A, ZHU B, CHENG W X. Root effects on soil organic carbon: A double-edged sword[J]. The New Phytologist, 2021, 230(1): 60-65.
- [39] 赵景波,贺秀斌,邵天杰.重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究[J].土壤学报,2012,49(2): 212-219.
ZHAO J B, HE X B, SHAO T J. Material composition and microstructure of purple soil and purple mudstone in Chongqing area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (2): 212-219.
- [40] 李丽华,陈轮,高盛焱,等.三江平原沼泽土微观特性试验研究[J].岩土力学,2009,30(8): 2295-2299.
LI L H, CHEN L, GAO S Y, et al. Study of micro-structure properties of swamp soil in Sanjiang Plain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2295-2299.
- (上接第 169 页)
- [20] RÜCKNAGEL J, RADEMACHER A, GÖTZE P, et al. Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage[J]. Geoderma, 2017, 286: 1-7.
- [21] 韩巍,徐晓旭,李冬,等.耕作方式对辽西褐土区土壤穿透阻力的影响及机理[J].水土保持学报,2020,34(6): 143-149.
HAN W, XU X X, LI D, et al. Effects of tillage methods on soil penetration resistance and its mechanism in the cinnamon soil area of western Liaoning Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34 (6): 143-149.
- [22] GAO L, SHAO M G. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. Catena, 2012, 95: 24-32.
- [23] 李勇,赵云泽,勾宇轩,等.黄淮海旱作区土壤压实度空间分布特征及其影响因素[J].农业工程学报,2021,37(13): 83-91.
LI Y, ZHAO Y Z, GOU Y X, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of degree of compaction in dry-farming Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 83-91.
- [24] LONGEPIERRE M, WIDMER F, KELLER T, et al. Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management[J]. ISME Communications, 2021, 1: e44.
- [25] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报, 2019, 39(4): 314-319.
ZHENG F L, ZHANG J Q, LIU G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in mollisol region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 314-319.
- [26] 高晨.基于拖拉机行走的黑土压实模拟[D].南京:中国科学院南京土壤研究所,2023.
GAO C. Black soil compaction simulation based on tractor walking[D]. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [27] 高冰可.红壤穿透阻力的影响因素与预测模型[D].武汉:华中农业大学,2014.
GAO B K. Influencing factors and prediction model on red soil penetration resistance [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.