

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220522.002.

章志鑫, 陈同德, 王颢霖, 等. 拉萨河流域不同植被类型坡面砾石形态与分布特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 256-263.

ZHANG Zhixin, CHEN Tongde, WANG Haolin, et al. Morphology and Distribution Characteristics of Gravel on Slopes of Different Vegetation Types in Lhasa River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 256-263.

# 拉萨河流域不同植被类型坡面砾石形态与分布特征

章志鑫<sup>1</sup>, 陈同德<sup>1</sup>, 王颢霖<sup>1</sup>, 焦菊英<sup>1,2</sup>, 李建军<sup>1</sup>,

张子琦<sup>1</sup>, 陈玉兰<sup>2</sup>, 林红<sup>1</sup>, 徐倩<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**坡面砾石的分布特征显著影响着地表土壤侵蚀及水文过程,而目前针对高寒区坡面砾石形态与分布特征的研究较为薄弱。为此,在西藏拉萨河流域选择9个典型坡面的山坡及其下堆积坡,将其按山坡—堆积坡的植被类型分为草—草坡面(A)、灌草—草坡面(B)和灌草—灌草坡面(C)3类,并对各坡面样点进行拍照采样,利用ImageJ软件获取砾石粒径、圆度、形状比率以及覆盖度,分析不同类型坡面砾石的粒度组成、形态特征以及覆盖度,研究坡面砾石的形态与分布特征。结果表明:(1)A类坡面山坡砾石平均粒径显著大于堆积坡,B类坡面山坡和堆积坡砾石平均粒径无显著性差异,C类坡面山坡砾石平均粒径显著小于堆积坡;同一类坡面之间的砾石粒度组成存在差异。(2)整体上A,B,C这3类坡面的山坡和堆积坡砾石圆度和形状比率无显著性差异。(3)A类坡面山坡砾石覆盖度大于堆积坡,B类坡面山坡和堆积坡砾石覆盖度相差不大,C类坡面山坡砾石覆盖度小于堆积坡;同一类坡面之间的砾石覆盖度大小存在差异。(4)同一坡面山坡和堆积坡砾石平均粒径及覆盖度主要受坡度的影响,而同一类坡面之间的砾石粒度组成及覆盖度大小因受植被、气候、岩性、海拔等的影响也存在差异。研究结果可为研究青藏高原土壤侵蚀与水文过程提供理论依据,为该区域水土流失治理工作提供科学支撑。

**关键词:**土壤侵蚀;高寒区;ImageJ软件;粒度组成;砾石覆盖度

**中图分类号:**S157

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2023)01-0256-08

## Morphology and Distribution Characteristics of Gravel on Slopes of Different Vegetation Types in Lhasa River Basin

ZHANG Zhixin<sup>1</sup>, CHEN Tongde<sup>1</sup>, WANG Haolin<sup>1</sup>, JIAO Juying<sup>1,2</sup>, LI Jianjun<sup>1</sup>,

ZHANG Ziqi<sup>1</sup>, CHEN Yulan<sup>2</sup>, LIN Hong<sup>1</sup>, XU Qian<sup>1</sup>

(1.State key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The distribution characteristics of gravel on slope have a significant impact on soil erosion and hydrological processes. However, the research on the morphology and distribution characteristics of gravel on slope in alpine region is little known. Nine typical slopes (including hillslope and accumulating slope) in Lhasa River Basin in Tibet were taken as examples. The slopes were divided into three types according to the vegetation types of hillslopes-accumulation slopes: grass-grass slope (A), shrub-grass slope (B) and shrub-grass slope (C). The sample sites of each slope were photographed and sampled on site, and the grain size, roundness, aspect ratio and coverage of gravel were obtained by ImageJ software, and the grain size distribution, morphological characteristics and coverage of gravel on slopes of different types were analyzed, mor-

收稿日期:2022-02-09

修回日期:2022-05-05

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策”(XDA20040202);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0603)

第一作者:章志鑫(1990—),男,甘肃省张掖市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:zzx51377@163.com

通信作者:焦菊英(1965—),女,陕西省宝鸡市人,研究员,博士生导师,主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail:jyjiao@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

phology and distribution characteristics of gravel on slopes were studied. The results are as follows. (1) The mean grain size of gravel on hillslope A is significantly larger than that on accumulation slope, but there is no significant difference between hillslope B and accumulation slope, and the average particle size of gravel on hillslope C is significantly smaller than that on accumulation slope. There are differences in gravel grain size distribution between the same types of slopes. (2) On the whole, there is no significant difference in the roundness and aspect ratio of the gravels on A, B and C. (3) The gravel coverage of hillslope A is larger than that of the accumulation slope, while the gravel coverage of hillslope B slope is similar to that of accumulation slope, while that of hillslope C is smaller than that of accumulation slope. There are differences in gravel coverage between the same types of slopes. (4) The mean grain size and coverage of gravel on the hillslope and accumulation slope of A, B and C are mainly affected by the slope gradient, while the grain size distribution and coverage of gravel on the same types of slopes are also different due to the influence of vegetation, climate, lithology and altitude. The research results can provide a theoretical basis for the study of soil erosion and hydrological process in the Qinghai-Tibet Plateau, and provide scientific support for the control of soil and water loss in this region.

**Keywords:** soil erosion; alpine region; ImageJ software; grain size composition; gravel coverage

砾石是指土壤中直径大于 2 mm 的矿物颗粒,其广泛存在于多种类型的土壤中,含砾石的土壤在世界范围内有广泛分布,并且砾石含量各有不同<sup>[1]</sup>,比如在地中海地区土壤砾石含量高达 60%<sup>[2]</sup>,在北京山区荒草地粗骨褐土壤中砾石含量高达 22%<sup>[3]</sup>,三峡库区典型山地紫色土中砾石含量达到 40%<sup>[4]</sup>,南方丘陵区红壤中的砾石含量高达 24%~43%<sup>[5]</sup>,在黄土高原水蚀风蚀交错带表层土壤中砾石含量在 3%~50% 的范围内<sup>[6-8]</sup>。砾石对土壤侵蚀的影响表现在两个方面,一是保护表层土壤免受雨滴溅蚀减弱径流冲刷,直接影响土壤侵蚀;二是由于影响土壤物理性质(如容重、孔隙度与紧实度)和水文过程(如降雨分配、入渗、地表径流以及水动力特性等),间接地影响着土壤侵蚀过程<sup>[9-15]</sup>。同时,坡面砾石分布特征也反映着以往土壤侵蚀情况<sup>[14]</sup>。因此,研究坡面砾石的分布对土壤侵蚀、水文过程的影响有着十分重要的意义,认识和掌握坡面砾石的分布特征,是土壤侵蚀、水文过程等相关研究的基础。

目前,有不少学者对砾石的分布特征进行了研究,发现砾石的分布特征与坡度、坡位等因素有关。在美国亚利桑那半干旱草地的研究发现,砾石含量与坡度存在一种对数关系,砾石覆盖度随着坡度呈现对数式增加<sup>[16-17]</sup>。在地中海地区研究发现,不同粒径的砾石覆盖度受坡度的影响存在差异:对于粒径>5 mm 的砾石而言,砾石覆盖度和粒径随坡度的增加,分别表现出凸型的曲线增加和线性增加<sup>[18]</sup>;粒径 5~20 mm 的砾石含量由坡顶到坡底呈现增加趋势,而粒径>250 mm 的砾石含量呈现减小趋势<sup>[19]</sup>。在黄土高原水蚀风蚀交错带,砾石集中分布在山顶、山脊、路边、山谷边缘等部位,海拔、植被盖度及坡度与砾石空间分布关联性较强<sup>[20]</sup>;砾石粒径沿坡面(坡顶→坡底)有总体降低的趋势,砾石粒径随

坡度增加而降低且砾石覆盖度较大区域出现在坡面中部<sup>[8]</sup>。在我国西南半湿润岩溶山区,坡形在一定程度上主导砾石分布特征与坡度之间的关系,砾石含量从坡上到坡下逐渐减少<sup>[21]</sup>。在三峡库区紫色土的较陡坡面上,砾石含量和平均粒径从坡顶至坡脚逐渐增加,而在缓坡坡面上,含量从坡顶至坡脚逐渐减少<sup>[22]</sup>。在太行山南麓,整个坡面上小砾石(5~20 mm)、中砾石(20~75 mm)、大砾石(>75 mm)和总砾石含量均呈现从坡顶到坡脚逐渐减小的趋势<sup>[10]</sup>。综合以上研究,砾石的分布特征在不同区域表现不同,而在青藏高原地区的相关研究目前鲜见报道。

青藏高原被称为“亚洲水塔”,是我国及周边区域生态安全的重要保障<sup>[23]</sup>。全球变暖过程中,土壤退化、冰川融化、洪水和土壤侵蚀等现象不断加剧<sup>[24-26]</sup>。青藏高原被认为是板块构造隆升的产物,经过长期的气候变化,如第四纪气候变化,冰期与间冰期的交替,导致该区域形成了巨厚岩石层。该区域山体高耸,坡面陡峭,存在大量长坡面,加之温度上升之后的积雪、冰川融化,以及集中 6—10 月的降雨均为水蚀的发生提供了良好的客观条件,不同的地表条件,水蚀过程会呈现差异化。在复杂的内营力和外营力(风力、冻融、水力)作用下,岩石被破坏、搬运和沉积,使得砾石广泛分布在地表及土壤中<sup>[27-29]</sup>。因此,研究地表砾石的形态与分布特征,有利于掌握水文及土壤侵蚀过程和砾石分布的相互关系,为研究青藏高原土壤侵蚀过程的研究提供科学依据。为此,本研究利用数码图像处理技术,在拉萨河流域选取典型坡面样点进行砾石分布调查,分析不同坡面位置的砾石形态与分布特征,以期从地表砾石分布的视角为该区域后续土壤侵蚀研究提供参考依据。

# 1 研究区概况

本试验研究区位于青藏高原拉萨河流域(29°20′—31°15′N, 90°05′—93°20′E), 该流域海拔 3 550~7 162 m, 面积约 33 221 km<sup>2</sup>。年平均降水量为 340~700 mm, 年内降水分配极不均匀, 主要集中在每年的 6—10 月, 占全年降水量的 90% 左右, 该流域属于高原温带—寒温带半干旱季风气候, 年平均气温为 -1.5~7.8℃。流域年土壤侵蚀量为 10 006.2 万 t/a, 平均土壤侵蚀模数为 3 076.6 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[30]</sup>。该流域土壤类型主要为灌丛草原土, 还有荒漠土、高山草甸土、寒漠土等, 土壤中均含有较多的石砾, 且透水性较好。植被类型以山地稀疏森林、山地灌丛草原、寒冷半湿润高山草甸以及灌丛为主<sup>[31]</sup>。该区域生态环境脆弱, 受到自然因素和人为因素的双重作用, 致使流域内土壤侵蚀严重和自然灾害频频发生, 尤其在人类活动越频繁的地区土壤侵蚀程度越为严重, 趋势愈为明显<sup>[32]</sup>。

# 2 研究方法

## 2.1 样点布设与采样方法

野外考察过程中, 考虑到安全性和可达性, 选取 9 个不同的典型坡面, 主要分布在堆龙德庆、墨竹工卡、林周、当雄县(区) 范围内(图 1)。为进一步描述坡面不同位置砾石的形态与分布特征的差异, 在各典型坡面的山坡和其下堆积坡分别布设 2~3 个 2 m×2 m

的样方, 又把 2 m×2 m 样方分为 4 个 1 m×1 m 的小样方。考察过程中, 记录样方内植被覆盖度、植被类型以及坡度, 然后采用数码相机对小样方进行拍照采样, 为避免照片发生畸形改变以获取清晰的砾石形态, 本研究使用标准镜头和小光圈进行拍摄。在拍摄过程中, 对应放置清晰可见的毫米刻度标尺, 其次根据地表砾石大小不同, 保持相机距地面 1~1.5 m 的高度垂直拍摄, 以保证数码图像涵盖足够的区域大小和砾石, 确保获取样点的数码图像在一定误差范围内。最后获取样点的数码图像, 以 1 m×1 m 的小样方为依据, 截取面积为 1 m×1 m 的图像作为处理所用图像。根据 9 个典型坡面的山坡和其下堆积坡的植被类型, 将其按山坡—堆积坡分为草—草坡面(A)、灌草—草坡面(B) 和灌草—灌草坡面(C) 3 类。9 个典型坡面的基本情况见表 1。

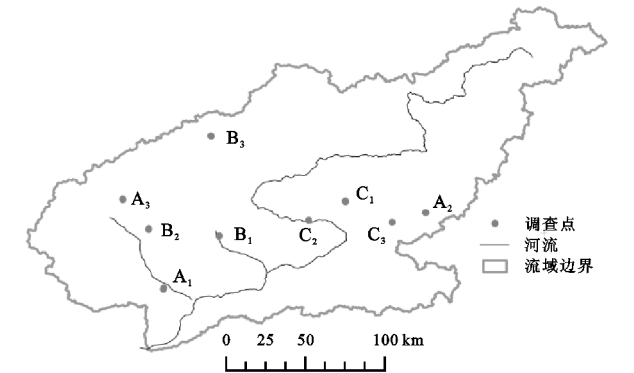


图 1 拉萨河流域及调查样点分布

表 1 调查坡面的基本情况

坡面类型	编号	坡位	经度	纬度	海拔/ m	坡度/ (°)	植被 类型	植被 盖度/%	坡长/m	基岩 硬度	地貌 分区
A	A <sub>1</sub>	山坡	90°50′48″E	29°40′51″N	3995	15	草本	47	73	5 级	YV
		堆积坡	90°50′57″E	29°41′17″N	3981	22	草本	41	308		
	A <sub>2</sub>	山坡	92°19′58″E	30°06′54″N	4472	13	草本	36	95	4 级	NV
		堆积坡	92°19′53″E	30°06′55″N	4432	21	草本	31	331		
	A <sub>3</sub>	山坡	90°37′02″E	30°11′15″N	4602	12	草本	28	117	2 级	NB
		堆积坡	90°36′49″E	30°11′31″N	4564	18	草本	23	371		
B	B <sub>1</sub>	山坡	91°09′48″E	29°59′01″N	4185	28	灌草	23	75	3 级	YV
		堆积坡	91°09′47″E	29°58′57″N	4162	26	草本	15	208		
	B <sub>2</sub>	山坡	92°46′27″E	30°01′23″N	4205	25	灌草	22	80	2 级	YV
		堆积坡	90°45′48″E	30°01′10″N	4183	22	草本	18	236		
	B <sub>3</sub>	山坡	91°06′56″E	30°32′55″N	4455	24	灌草	21	70	2 级	NB
		堆积坡	91°07′02″E	30°32′50″N	4433	22	草本	16	220		
C	C <sub>1</sub>	山坡	91°49′50″E	30°11′41″N	4038	26	灌草	34	168	3 级	NV
		堆积坡	91°49′57″E	30°11′38″N	4010	13	灌草	39	234		
	C <sub>2</sub>	山坡	91°40′11″E	30°04′19″N	4049	32	灌草	34	133	1 级	NV
		堆积坡	91°40′10″E	30°04′18″N	4024	17	灌草	35	198		
	C <sub>3</sub>	山坡	92°08′31″E	30°03′36″N	4308	27	灌草	25	153	2 级	NV
		堆积坡	92°08′36″E	30°03′35″N	4260	16	灌草	30	210		

注: (1) 基岩硬度分为 1~5 级, 硬度由低到高依次为极软(第四系松散物质)、软(古生代层状酸性侵入岩、碎屑岩)、中(新生代层状片岩侵入岩、碎屑岩)、硬(新生代和中生代层状酸性侵入岩)和极硬(新生代和中生代层状基性和中性侵入岩)。(2) YV 为雅鲁藏布高山峡谷区, NV 为念青唐古拉高山峡谷区, NB 为念青唐古拉高山盆地区<sup>[33]</sup>。

2.2 数据获取方法

野外所获得的数码图像,利用开源软件 ImageJ 进行处理。ImageJ 可以自动计算得到砾石的直径、面积、圆度和形状比率<sup>[8,34]</sup>。样方内每个砾石形状不规则,难以完全包括每个砾石的整体形态,因此在计算砾石覆盖度时,将位于样方边缘的砾石进行裁切,

样方内的部分计入砾石覆盖度;同样,样方内砾石会存在相互重叠,因此重叠的砾石也不计入砾石覆盖度统计。本研究选取的砾石颗粒测量参数和计算方法见表 2,对所获得的 216 张有效数码图像进行处理,共获取 27 396 颗砾石的形态参数。

表 2 砾石颗粒形态参数

形态参数	计算方法	单位	备注
颗粒面积(A)	软件自动统计所选颗粒包含的像素面积并转换为实际面积	mm <sup>2</sup>	$M_{\max}$ 和 $M_{\min}$ 分别为最大和最小粒径。Wentworth <sup>[35]</sup> 粒度分级标准,粒径分为极细砾(2~4 mm)、细砾(4~8 mm)、中砾(8~16 mm)、粗砾(16~32 mm)、极粗砾(32~64 mm)、卵石(64~256 mm)、巨砾(>256 mm)
颗粒粒径( $D_F$ )	$D_F = \sqrt{M_{\max}^2 + M_{\min}^2}$	mm	
颗粒周长(P)	软件自动统计所选颗粒边缘像素长度并转换为实际长度	mm	
形状比率(AR)	$AR = \frac{l_{\max}}{l_{\min}}$		颗粒长轴( $l_{\max}$ )与短轴( $l_{\min}$ )之比
圆度(C)	$C = \frac{4\pi \times A}{P^2}$		正圆为 1.0,A 和 P 分别为颗粒面积(mm <sup>2</sup> )和颗粒周长(mm)
砾石覆盖度(G)	$G = \frac{A_P}{A_T} \times 100\%$	%	所有粒径>2 mm 的颗粒面积之和( $A_P$ )与量算区域总面积( $A_T$ )之比 <sup>[36]</sup>

3 结果与分析

3.1 粒度组成

对于 A 类坡面,A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>和 A<sub>3</sub>山坡砾石平均粒径均大于堆积坡;且 3 个坡面的山坡和堆积坡砾石的平均粒径大小排序均为 A<sub>1</sub>>A<sub>2</sub>>A<sub>3</sub>(表 3)。A<sub>1</sub>山坡砾石平均粒径为(51.36±2.54) mm,优势粒级为中砾和粗砾,数量占比为 51.67%,堆积坡砾石平均粒径为(28.73±1.69) mm,优势粒级为细砾和中砾,数量占比为 46.63%;A<sub>2</sub>山坡和堆积坡砾石平均粒径分别为(37.26±3.90) mm 和(27.91±7.11) mm,优势粒级均为中砾和粗砾,数量占比分别为 69.15%和 81.97%;A<sub>3</sub>山坡和堆积坡砾石平均粒径分别为(9.42±0.26) mm 和(8.24±0.15) mm,优势粒级均为细砾和中砾,数量占比分别为 73.06%和 86.71%。

对于 B 类坡面,B<sub>1</sub>,B<sub>2</sub>和 B<sub>3</sub>山坡和堆积坡之间砾石的平均粒径无显著性差异;且山坡之间和堆积坡之间砾石平均粒径均无显著性差异(表 3)。B<sub>1</sub>山坡和堆积砾石平均粒径分别为(17.23±2.04) mm 和(15.20±0.71) mm,优势粒级均为细砾和中砾,数量占比分别为 68.63%和 66.86%;B<sub>2</sub>山坡和堆积坡砾石平均粒径分别为(17.03±0.43) mm 和(19.87±0.26) mm,优势粒级均为细砾和中砾,数量占比分别为 71.45%和 68.62%;B<sub>3</sub>山坡和堆积坡砾石平均粒径分别为(15.32±0.35) mm 和(19.27±0.22) mm,优势粒级均为细砾和中砾,数量占比分别为 57.67%和 59.76%。

对于 C 类坡面,C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>和 C<sub>3</sub>山坡砾石平均粒径均小于堆积坡;且 3 个坡面的山坡和堆积坡砾石平均粒径大小排序为 C<sub>1</sub>>C<sub>2</sub>>C<sub>3</sub>(表 3)。C<sub>1</sub>山坡和堆积坡砾石平均粒径分别为(26.90±1.79) mm 和(43.99±8.75) mm,优势粒级均为中砾和粗砾,数量占比分别为 72.11%和 75.86%;C<sub>2</sub>山坡砾石平均粒径为(7.89±0.27) mm,优势粒级为细砾和中砾,数量占比为 74.64%,堆积坡砾石平均粒径(23.96±0.89) mm,优势粒级为粗砾和极粗砾,数量占比 71.20%;C<sub>3</sub>山坡和堆积坡砾石平均粒径分别为(4.08±0.04) mm 和(5.45±0.05) mm,优势粒级均为极细砾和细砾,数量占比分别为 95.12%和 87.13%。

3.2 砾石形态特征

A 类坡面,A<sub>2</sub>和 A<sub>3</sub>山坡和堆积坡之间砾石圆度和形状比率无显著性差异( $p>0.05$ ),A<sub>1</sub>山坡砾石圆度显著小于堆积坡,山坡砾石形状比率显著大于堆积坡( $p<0.01$ );A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>和 A<sub>3</sub>山坡之间、堆积坡之间砾石圆度和形状比率均无显著性差异( $p>0.05$ )。山坡和堆积坡砾石圆度分别介于 0.65~0.71,0.69~0.71,形状比率分别介于 1.56~1.67,1.56~1.58(图 2)。

B 类坡面,B<sub>1</sub>,B<sub>2</sub>和 B<sub>3</sub>山坡和堆积坡之间砾石圆度和形状比率无显著性差异( $p>0.05$ );B<sub>1</sub>,B<sub>2</sub>和 B<sub>3</sub>山坡之间、堆积坡之间砾石圆度和形状比率也均无显著性差异( $p>0.05$ )。山坡和堆积坡砾石平均圆度分别介于 0.68~0.71,0.68~0.72,形状比率分别介于 1.53~1.62,1.63~1.66。

C 类坡面,C<sub>2</sub>和 C<sub>3</sub>山坡和堆积坡之间砾石圆度



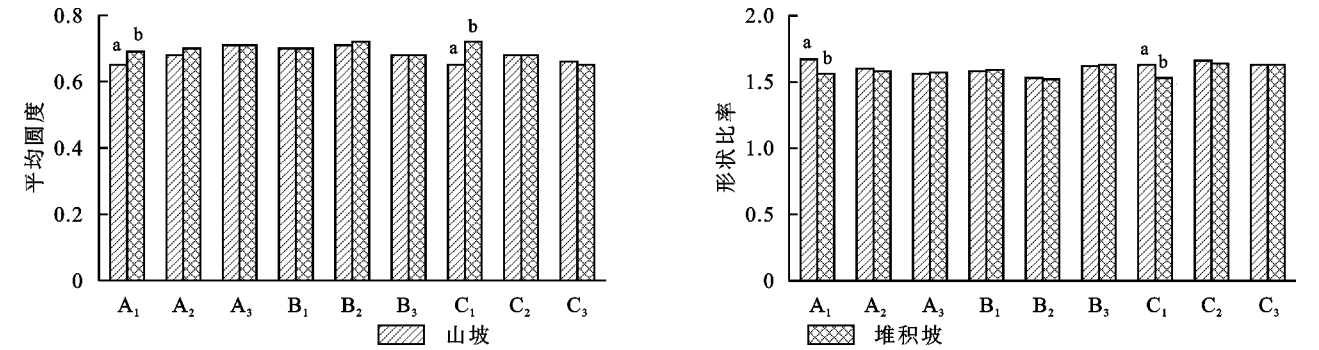
和形状比率无显著性差异( $p>0.05$ ), $C_1$ 山坡砾石圆度显著小于堆积坡,形状比率表现为山坡显著大于堆积坡( $p<0.01$ ); $C_1$ 、 $C_2$ 和  $C_3$ 山坡之间、堆积坡之间砾

石圆度和形状比率无显著性差异( $p>0.05$ )。山坡和堆积坡砾石平均圆度分别介于 0.66~0.68,0.65~0.72,形状比率分别介于 1.63~1.66,1.53~1.64。

表 3 各坡面砾石平均粒径及不同粒级砾石数量占比

坡面类型	编号	坡位	平均粒径/mm	不同粒级砾石数量占比/%						
				极细砾	细砾	中砾	粗砾	极粗砾	卵石	巨砾
				(2~4 mm)	(4~8 mm)	(8~16 mm)	(16~32 mm)	(32~64 mm)	(64~256 mm)	(>256 mm)
A	$A_1$	山坡	$51.36\pm2.54aX$	0.46	7.45	25.53	26.14	14.44	24.47	1.52
		堆积坡	$28.73\pm1.69bX$	13.46	20.64	25.99	17.89	9.17	12.54	0.31
	$A_2$	山坡	$37.26\pm3.90aY$	0.00	1.06	23.40	45.74	15.96	13.83	0.00
		堆积坡	$27.91\pm7.11bY$	0.00	3.28	34.43	47.54	13.11	0.00	1.64
	$A_3$	山坡	$9.42\pm0.26aZ$	9.89	58.56	14.45	17.11	0.00	0.00	0.00
		堆积坡	$8.24\pm0.15bZ$	6.53	58.11	28.60	6.20	0.56	0.00	0.00
B	$B_1$	山坡	$17.23\pm2.04aX$	9.02	38.04	30.59	12.55	3.92	5.10	0.78
		堆积坡	$15.20\pm0.71aX$	9.09	31.42	35.44	14.73	7.02	2.30	0.00
	$B_2$	山坡	$17.03\pm0.43aX$	2.51	29.37	42.08	16.69	6.41	2.70	0.25
		堆积坡	$19.87\pm0.26aX$	1.15	18.05	50.57	16.44	11.49	2.30	0.00
	$B_3$	山坡	$15.32\pm0.35aX$	15.94	28.75	28.92	14.99	8.59	2.81	0.00
		堆积坡	$19.27\pm0.22aX$	1.88	21.66	38.10	24.19	10.32	3.83	0.01
C	$C_1$	山坡	$26.90\pm1.79aX$	0.14	11.02	37.38	34.73	10.60	5.30	0.84
		堆积坡	$43.99\pm8.75bX$	0.00	3.45	44.83	31.03	8.05	9.20	3.45
	$C_2$	山坡	$7.89\pm0.27aY$	19.63	46.83	27.81	4.70	1.02	0.00	0.00
		堆积坡	$23.96\pm0.89bY$	0.54	8.70	19.02	47.83	23.37	0.54	0.00
	$C_3$	山坡	$4.08\pm0.04aZ$	62.72	32.40	4.36	0.52	0.00	0.00	0.00
		堆积坡	$5.45\pm0.05bZ$	35.24	51.89	11.76	1.02	0.09	0.00	0.00

注:(1) 字母 a,b 表示同一坡面山坡和堆积坡砾石粒径是否存在显著性差异(独立样本 t 检验, $p<0.01$ )。(2) X,Y,Z 表示同一类坡面山坡之间、堆积坡之间的砾石粒径是否存在显著性差异(独立样本 t 检验, $p<0.01$ )。



注:字母 a,b 表示同一坡面山坡和堆积坡砾石圆度和形状比率是否存在显著性差异(独立样本 t 检验, $p<0.01$ )。

图 2 各坡面砾石平均圆度和形状比率

3.3 砾石覆盖度

A 类坡面砾石覆盖度介于 0.27%~14.63%, $A_1$ 、 $A_2$ 和  $A_3$ 山坡砾石覆盖度均大于堆积坡;且 3 个坡面的山坡和堆积坡砾石覆盖度大小排序均为  $A_1>A_2>A_3$ (表 4)。 $A_1$ 山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 14.63%和 5.72%,其中 $>32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 96.92%和 94.76%; $A_2$ 山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 2.67%和 2.78%,其中 $>32$  mm 砾石的覆盖度分别占总覆盖度的 88.39%和 95.09%; $A_3$ 山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 0.27%和 2.68%,其中 $\leq 32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的

100%和 70.15%。

B 类坡面砾石覆盖度介于 23.55%~24.22%, $B_1$ 、 $B_2$ 和  $B_3$ 坡面的山坡和堆积坡之间砾石覆盖度相差不大;且山坡之间、堆积坡之间砾石覆盖度也相差不大(表 4)。 $B_1$ 山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 24.14%和 23.70%,其中 $>32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 91.55%和 80.08%; $B_2$ 山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 24.08%和 23.55%,其中 $>32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 83.34%和 68.41%; $B_3$ 山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 24.22%和 23.87%,其中 $>32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 77.58%和 75.53%。

C 类坡面砾石覆盖度介于 0.72%~25.82%, $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  山坡砾石覆盖度均小于堆积坡;且 3 个坡面的山坡和堆积坡砾石覆盖度大小排序均为  $C_1>C_2>C_3$  (表 4)。 $C_1$  山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 19.00% 和 25.82%, 其中  $>32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 90.79%

和 96.74%; $C_2$  山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 1.00% 和 6.16%, 其中  $\leq 32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 79.00% 和 63.90%; $C_3$  山坡和堆积坡砾石覆盖度分别为 0.72% 和 2.04%, 其中  $\leq 32$  mm 的砾石覆盖度分别占总覆盖度的 100% 和 97.55%。

表 4 各坡面砾石总覆盖度及不同粒径砾石覆盖度

坡面 类型	编号	坡位	总覆 盖度/%	不同粒径砾石覆盖度/%						
				极细砾 (2~4 mm)	细砾 (4~8 mm)	中砾 (8~16 mm)	粗砾 (16~32 mm)	极粗砾 (32~64 mm)	卵石 (64~256 mm)	巨砾 (>256 mm)
A	$A_1$	山坡	14.63	0.01	0.01	0.10	0.34	0.68	9.03	4.47
		堆积坡	5.72	0.01	0.02	0.08	0.20	0.43	4.58	0.42
	$A_2$	山坡	2.67	0.00	0.01	0.04	0.27	0.32	2.04	0.00
		堆积坡	2.78	0.00	0.55	0.04	0.16	0.19	0.00	1.84
	$A_3$	山坡	0.27	0.01	0.13	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00
		堆积坡	2.68	0.01	0.40	0.65	0.81	0.80	0.00	0.00
B	$B_1$	山坡	24.14	0.02	0.24	0.72	1.06	1.23	11.09	9.78
		堆积坡	23.70	0.03	0.44	1.70	2.54	4.83	14.15	0.00
	$B_2$	山坡	24.08	0.01	0.32	1.49	2.20	3.23	12.47	4.37
		堆积坡	23.55	2.92	1.84	1.63	1.06	6.48	9.63	0.00
	$B_3$	山坡	24.22	0.07	0.43	1.58	3.36	7.49	11.31	0.00
		堆积坡	23.87	0.01	0.29	1.67	3.88	6.49	11.26	0.28
C	$C_1$	山坡	19.00	0.01	0.04	0.44	1.27	1.48	6.13	9.64
		堆积坡	25.82	0.00	0.01	0.28	0.56	0.62	9.22	15.13
	$C_2$	山坡	1.00	0.02	0.18	0.34	0.25	0.21	0.00	0.00
		堆积坡	6.16	0.01	0.03	0.26	2.55	3.14	0.18	0.00
	$C_3$	山坡	0.72	0.20	0.30	0.16	0.06	0.00	0.00	0.00
		堆积坡	2.04	0.20	0.87	0.72	0.20	0.05	0.00	0.00

4 讨论

同一坡面山坡和堆积坡的砾石粒径以及覆盖度差异的主要原因是山坡和堆积坡坡度之间的差异。坡度越缓,砾石的分布越为稳定,砾石不易受到外营力作用(重力和径流)的影响<sup>[9,22]</sup>。如 A 类坡面,其山坡坡度小于堆积坡,山坡的砾石平均粒径以及覆盖度均大于堆积坡;B 类坡面,山坡和堆积坡坡度接近,两者的砾石平均粒径以及覆盖度差异不大;C 类坡面,其山坡坡度大于堆积坡,山坡的砾石平均粒径以及覆盖度均小于堆积坡。但同一类坡面之间的砾石粒度组成及覆盖度大小因受到植被、气候、海拔、岩性等因素的影响也存在差异。

本研究发现植被的类型及分布特征对砾石粒度组成以及覆盖度的影响较大,因植被在消减径流动能的同时,还具有拦截作用<sup>[20]</sup>。在 A 类坡面中,虽然均为草—草坡面,但  $A_1$  植被多为大籽蒿 (*Artemisia sieversiana*) 等(植株高 30~60 cm),且生长密集(盖度 40%~50%),对砾石的拦截作用最强; $A_2$  植被多为甘肃马先蒿 (*Pedicularis kansuensis*) 等(植株高

20~30 cm),且生长较密集(盖度 30%~40%),对砾石的拦截作用较强; $A_3$  植被多为水葱 (*Schoenoplectus tabernaemontani*)、鼠曲草 (*Gnaphalium affine*) 等(植株高 5~8 cm),且生长稀疏(盖度 20%~30%),对砾石的拦截作用最弱(图 3);因此砾石平均粒径以及覆盖度大小均表现为  $A_1>A_2>A_3$ 。在 C 类坡面中,虽然均为灌草—灌草坡面,但  $C_1$  植被多为砂生小檗 (*Berberis sabulicola*)、扁刺峨眉蔷薇 (*Rosa omeiensis pteracantha*) 等(植株高 100 cm 以上),为聚集性生长,对砾石的拦截作用最强; $C_2$  植被多为高山柏 (*Juniperus squamata*) 等(植株高 50~100 cm),对砾石的拦截作用次之; $C_3$  植被多为小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 等(植株高 30~50 cm),呈分散性生长,对砾石的拦截作用最弱(图 4);因此砾石平均粒径以及覆盖度大小均表现为  $C_1>C_2>C_3$ 。而在 B 类坡面中, $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  山坡植被均以砂生小檗、小叶锦鸡儿、水葱、笔直黄耆 (*Astragalus strictus*) 等为主,堆积坡植被均以水葱、笔直黄耆等为主,因此砾石粒度组成以及覆盖度差异不大。

海拔和气候对砾石粒度组成的影响均表现为对

温差的影响。如在 A 类坡面中,  $A_3$  在念青唐古拉高山盆地区, 海拔最高, 温差最大, 气候寒冷干燥, 基岩受到冰川的磨蚀作用和寒冻风化作用强烈, 更易形成大量小粒径的岩屑<sup>[37]</sup>; 而  $A_1$  在雅鲁藏布高山峡谷区, 相比念青唐古拉高山峡谷区, 海拔较低, 温差较小, 基岩受到冰川的磨蚀作用和寒冻风化作用较弱, 因此砾石的粒径相对较大;  $A_2$  在念青唐古拉高山峡谷区, 海拔、气候在  $A_1$  和  $A_3$  之间, 因此砾石平均粒径大小表现为  $A_1 > A_2 > A_3$ 。

不同类型的岩石其风化速度不同, 抵抗风化作用的能力也不同<sup>[9]</sup>。以 A 类坡面为例,  $A_1$  基岩硬度为极硬(新生代和中生代层状基性和中性侵入岩), 抗风化能力最强, 基岩被风化形成大粒径的砾石;  $A_2$  基岩硬度为硬(新生代和中生代层状中酸性侵入岩), 抗风化能力较强, 基岩被风化形成较大粒径的砾石;  $A_3$  基岩硬度为软(古生代层状中酸性侵入岩、碎屑岩), 抗风化能力最弱, 基岩易被风化成细颗粒砾石, 因此砾石平均粒径表现为  $A_1 > A_2 > A_3$ 。

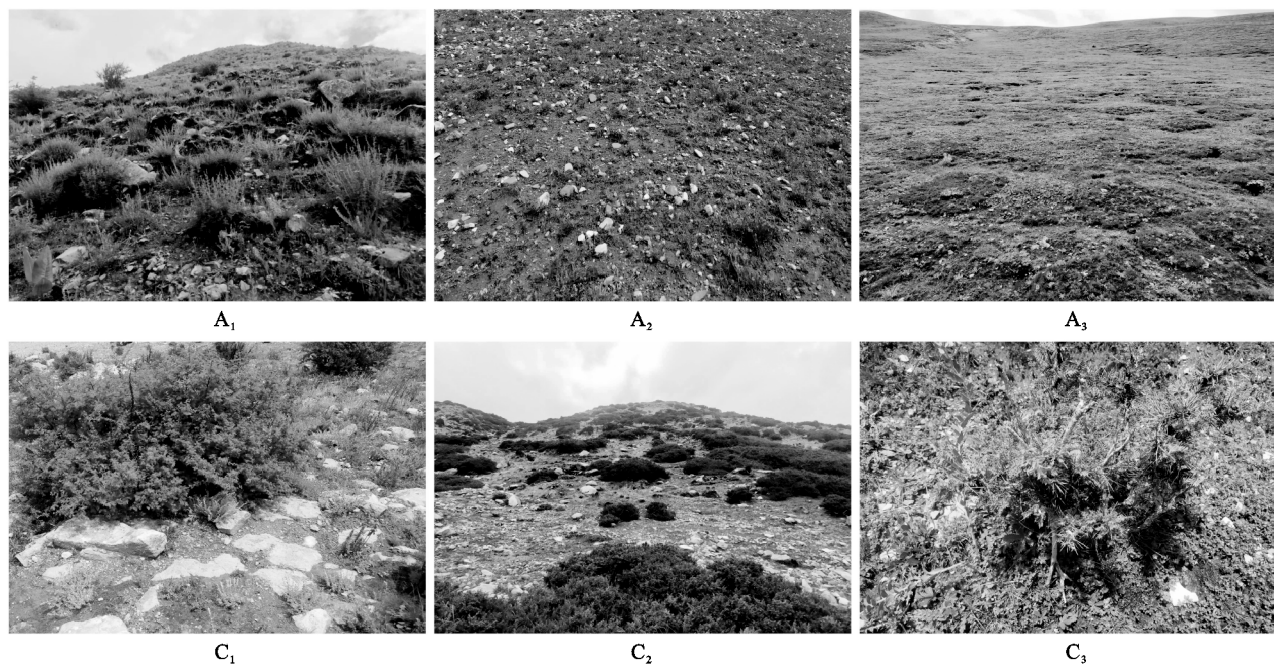


图3 A类和C类坡面植被的类型及分布特征

同一类坡面之间砾石圆度和形状比率均无显著性差异, 原因是坡面原始分布的岩石受到风化作用、冻融作用、冰川的磨蚀作用等多种外营力, 形成的砾石形状具有随机性; 且由于受到坡度、坡长、植被、径流等因素的影响, 砾石的分布也具有随机性, 因此同一类坡面之间砾石圆度和形状比率无显著差异。而山坡和堆积坡砾石圆度和形状比率差异的主要原因是坡面的砾石是否受到季节性洪水的作用。季节性洪水, 其对砾石的搬运能力较强, 砾石之间容易发生摩擦碰撞, 因此圆度较大<sup>[34]</sup>。如  $A_1$  和  $C_1$  坡面的堆积坡样方均处在季节性洪水沟坡内, 受到径流的搬运作用后, 砾石之间会发生摩擦碰撞, 而位于堆积坡上方的山坡样方受到径流搬运作用较弱, 砾石之间发生摩擦碰撞的几率较小, 因此  $A_1$  和  $C_1$  堆积坡砾石的圆度显著大于山坡(图2)。

## 5 结论

本研究在拉萨河流域选取 9 个不同的典型坡面, 将其按山坡—堆积坡的植被类型分为草—草、灌草—

草和灌草—灌草 3 类坡面, 分析了坡面山坡及其下堆积坡砾石的粒度组成、形态特征以及覆盖度的差异, 结论如下:

(1) 同一坡面山坡和堆积坡砾石平均粒径和覆盖度存在差异的主要原因是山坡和堆积坡之间坡度的差异。砾石平均粒径和覆盖度在草—草坡面表现为山坡大于堆积坡, 在灌草—草坡面表现为山坡和堆积坡差异不大, 在灌草—灌草坡面表现为山坡小于堆积坡。

(2) 同一类坡面之间的砾石粒度组成和覆盖度大小因受到植被、气候、海拔、岩性等因素的影响也存在差异。在草—草和灌草—灌草坡面均表现为粒度组成中较大粒径占比越大其覆盖度越大, 在灌草—草坡面砾石粒度组成差异不大, 其覆盖度也差异不大。 $>32$  mm 的砾石粒级是影响砾石覆盖度大小的主要粒级。

(3) 同一类坡面之间的砾石圆度和形状比率均无显著性差异, 但受季节性洪水作用的坡面, 砾石受到径流冲刷与搬运的作用强, 表现为山坡砾石圆度显著小于堆积坡, 山坡砾石形状比率显著大于堆积坡。



## 参考文献:

- [1] 王小燕,李朝霞,徐勤学,等.砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2011,9(1):115-120.
- [2] Poesen J W, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. Catena, 1994,23(1-2):1-28.
- [3] 符素华,段淑怀,刘宝元.密云石匣小流域土地利用对土壤粗化的影响[J].地理研究,2001,20(6):697-702.
- [4] 徐金鑫.砾石分布对红壤坡面侵蚀产沙的影响机理[D].武汉:长江科学院,2019.
- [5] 郑姗姗,陶长铸,吴鹏飞,等.长汀红壤侵蚀区土壤砂砾化对土表温湿度及种子萌发的影响[J].福建农林大学学报:自然科学版,2021,50(5):661-668.
- [6] 符素华.土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J].水土保持学报,2005,19(1):171-175.
- [7] 刘东生.黄河中游黄土结构[M].北京:科学出版社,1966.
- [8] 朱元骏,邵明安.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J].中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(3):375-383.
- [9] 李燕,高明,魏朝富,等.土壤砾石的分布及其对水文过程的影响[J].中国农学通报,2006,22(5):271-276.
- [10] 冯雪瑾,张志华,杨喜田,等.砾石在太行山南麓土壤中的分布特征[J].河南农业大学学报,2019,53(4):608-615.
- [11] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: Effects on infiltration[J]. Catena, 1994,23(1/2):99-110.
- [12] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J]. Catena, 2003,53(2):97-114.
- [13] Li X Y, Shi P J, Liu L Y, et al. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch[J]. Journal of Hydrology, 2005,312(1/4):70-78.
- [14] Poesen J W, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. Catena, 1994,23(1/2):1-28.
- [15] 马晨雷,戴翠婷,刘窑军,等.砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):150-155,161.
- [16] Simanton J R, Renard K G, Christiansen C M, et al. Spatial distribution of surface rock fragments along catenas in Semiarid Arizona and Nevada, USA[J]. Catena, 1994,23(1/2):29-42.
- [17] Simanton J R, Toy T J. The relation between surface rock-fragment cover and semiarid hillslope profile morphology[J]. Catena, 1994,23(3/4):213-225.
- [18] Poesen J W, Wesemael B V, Bunte K, et al. Variation of rock fragment cover and size along semiarid hillslopes: A case-study from southeast Spain[J]. Geomorphology, 1998,23(2/3/4):323-335.
- [19] Li X Y, Contreras S, Solé-Benet A. Spatial distribution of rock fragments in dolines: A case study in a semiarid mediterranean mountain-range(Sierra Gádor, SE Spain)[J]. Catena, 2007,70(3):366-374.
- [20] Gongtao T, Zhua Y, Shaoa M. Spatial distribution of caliche nodules in surface soil and their influencing factors in the Liudaogou catchment of the northern Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2018,329:11-19.
- [21] Chen H, Liu J, Wang K, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J]. Catena, 2011,84(1/2):21-28.
- [22] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.三峡库区紫色土的碎石分布特征[J].土壤学报,2015,52(2):293-302.
- [23] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等.从青藏高原到第三极和泛第三极[J].中国科学院院刊,2017,32(9):924-931.
- [24] 牛富俊,程国栋,赖远明,等.青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J].岩土工程学报,2004,26(3):402-406.
- [25] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. International Journal of Climatology, 2015,20(14):1729-1742.
- [26] 冯君园,蔡强国,李朝霞,等.高海拔寒区融水侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2015,22(3):331-335.
- [27] 刘淑珍,张建国,辜世贤.西藏自治区土壤侵蚀类型研究[J].山地学报,2006,24(5):592-596.
- [28] 张建国,文安邦,柴宗新,等.西藏自治区土壤侵蚀特点及现状[J].山地学报,2003,21(S<sub>1</sub>):148-152.
- [29] 陈同德,焦菊英,王颖霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
- [30] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.
- [31] 中国科学院青藏高原综合科学考察队.西藏地貌[M].北京:科学出版社,1983.
- [32] 赵健,李蓉.雅鲁藏布江流域土壤侵蚀区域特征初步研究[J].长江科学院院报,2008,25(3):42-45.
- [33] Chen T D, Jiao J Y, Zhang Z Q, et al. Soil quality evaluation of the alluvial fan in the Lhasa River Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Catena, 2022,209(1):105829.
- [34] 钱广强,董治宝,罗万银,等.基于数字图像的中国西北地区戈壁表面砾石形貌特征研究[J].中国沙漠,2014,34(3):625-633.
- [35] Wentworth, Chester K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. Jour. Geol., 1922,30(5):377-392.
- [36] 王训明,郎丽丽,花婷,等.戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系实验研究[J].中国沙漠,33(2):313-319.
- [37] Hallet, B. Glacial Abrasion and Sliding: Their Dependence on the Debris Concentration In Basal Ice[J]. Annals of Glaciology, 1981,2(1):23-28.