

长江源典型地区高寒草地退化对土壤分离影响研究

孙宝洋^{1,2,3}, 任斐鹏^{1,2,3*}, 邵逸文^{1,2,3}, 刘纪根^{1,2,3}, 李昊^{1,2,3}, 师哲^{1,2,3}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 水利部长江江源区水生态系统野外科学观测研究站, 玉树 815300; 3. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘要: 长江源高寒草地存在不同程度的退化, 导致局部水土流失仍呈增加的趋势。为研究高寒草地退化对土壤分离速率的影响, 本文开展不同植被退化程度坡面径流冲刷试验。结果表明, 植被完全退化坡面的高山草甸土平均分离速率 ($0.54 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$) 显著大于重度和中度退化坡面 (0.34 和 $0.12 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$), 并远大于轻度退化的坡面 ($0.03 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$); 完全退化坡面的淡寒钙土平均分离速率 ($4.29 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$) 是寒钙土、草甸沼泽土和高山草甸土的 3.25、7.27 和 7.94 倍。不同退化程度的土壤分离速率随水流剪切力、径流功率与过水断面单位能量的增加, 均呈较好地线性或幂函数关系, 但与水流功率的拟合效果最好。在相同水流功率条件下, 长江源土壤分离速率大于西南及黄土高原地区。本研究可为长江源区土壤侵蚀机理的研究和水土保持措施优化配置提供参考。

关键词: 长江源; 土壤; 土壤侵蚀; 高寒草地; 植被退化; 土壤分离速率

中图分类号: S157.1

文献标志码: A



1

Effects of alpine grassland degradation on soil detachment in typical regions of Changjiang River source

SUN Bao-yang, REN Fei-peng^{*}, SHAO Yi-wen, LIU Ji-gen, LI Hao, SHI Zhe

(1. Changjiang Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Field Scientific Observation and Research Station of Water Ecosystem in Changjiang River Source Regions, Ministry of Water Resources, Yushu 815300, China; 3. Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: The alpine grassland in the source of the Changjiang River degraded to different degrees, resulting in an increasing trend of local soil erosion. In order to study the effect of alpine grassland degradation on soil detachment rate, slope runoff scour experiments with different vegetation degradation degrees were carried out. The results showed that the average detachment rate of alpine meadow soil on fully degraded slopes ($0.54 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$) was significantly higher than that on severely and moderately degraded slopes (0.34 and $0.12 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$), and significantly higher than that on lightly degraded slopes ($0.03 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$). The average detachment rate ($4.29 \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{ min})$) was 3.25, 7.27 and 7.94 times of that of the lightly calcareous soil, meadow swamp soil and alpine meadow soil on completely degraded slopes. The soil detachment rates of different degradation degrees have a good linear or power function relationship with the increase of shear force of water flow, runoff power and unit energy of water cross section, but they have the best fitting effect with water flow power. Under the same flow power condition, the soil detachment rate in the Source region of the

收稿日期: 2022-4 修订日期:

基金项目: 国家自然科学基金 (42107352 和 U2240226); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费 (CKSF2021485/TB 和 CKSF2019292/TB)

作者简介: 孙宝洋 (1990—), 男, 山东枣庄, 高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: sunbx@mail.crsri.cn

*通信作者: 任斐鹏 (1982—), 男, 山西晋城, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事植被生态与水土保持研究。Email: feipengren2006@mail.bnu.edu.cn

Changjiang River was higher than that in the southwest and loess Plateau. This study can provide reference for the study of soil erosion mechanism and the optimal allocation of soil and water conservation measures in the source region of the Changjiang River.

Keywords: Changjiang River source; Soil; Soil erosion; Alpine grassland; Vegetation degradation; Soil detachment rate

1 研究背景

土壤分离是侵蚀的初始阶段，是在降雨击溅或径流冲刷作用下，土壤颗粒脱离土体、发生位移的过程，一般是由水动力因素和土壤自身属性共同决定^[1]。水深、流速、水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量等作为表征水流强度的指标，常用来建立或修改与土壤分离速率的函数关系，来定量描述土壤分离^[2]。在实际应用中，一般模拟土壤分离过程的最优参数受研究区土壤性状影响^[3]。Li 等^[4]发现青藏高原地区的土壤分离速率与水流功率呈显著线性相关关系，并远大于其他地区，这与土壤性状有关。

在径流冲刷过程中，植被通过枯落物覆盖和根系固结，增加抗侵蚀能力，同时根系的分泌物和植物残体会增加土壤有机质，改良土体结构，进而影响土壤侵蚀过程^[5-6]。Gyssels 等^[7]研究表明，草本植物能够使土壤剥离能力较无植被土壤降低 50% 以上。相对于无植被的裸土，退耕土壤的侵蚀量可减少 23.2 至 55.3 倍，草地在一定程度上改善了土壤力学和理化性质^[8]。李建明等^[9]从侵蚀动力角度，发现植被通过调控坡面水动力过程有效减少侵蚀，水流功率可用于较好地刻画坡面侵蚀动态过程。

长江源地处青藏高原腹地，海拔在 3500 m 以上，土壤和植被类型具有明显的空间变异性，多种侵蚀类型并存^[10]。高寒草地是长江源最重要的草原生态系统之一，约占区域总面积的 73.41%，是该区最主要的土地利用类型，在水源涵养方面具有极其重要的生态地位^[11]。生态建设工程实施以来，草地持续退化趋势得到初步遏制，然而，由于该区恶劣的高寒生态环境，植被根系土层及其理化性状的恢复极为缓慢，草地的恶化趋势并未获得根本性扭转，局部地区土壤侵蚀仍呈增加的趋势^[12-13]。有研究表明，青海省高寒草地重度与极度退化总面积占草地总面积的 37.1%，影响土壤退化强度的因素因地域而异^[14]。因此，开展长江源不同退化程度高寒草地土壤分离过程模拟试验，研究该区土壤侵蚀影响机制，对长江源区土壤侵蚀过程机

理的研究，以及水土保持措施优化配置和开展长江大保护具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

长江源区大致范围介于北纬 32°30'~35°35'N 与东经 90°43'~97°13'E 之间，控制流域面积约 13.78×10⁴ km²，平均海拔约 4760 m^[15]。长江源区位于青藏高原腹地，以高山地貌为主，属于典型的高原大陆性气候，干燥寒冷、太阳辐射强，无霜期短，冷热两季交替，干湿两季分明，年均气温-5.3℃~3.3℃，年均降水量 284~511mm。长江源区水系可划分为正源沱沱河水系，北源楚玛尔河水系，南源当曲水系，以及干流通天河水系^[16]。

长江源土壤类型主要包括高山草甸土、草甸沼泽土、寒钙土和淡寒钙土，具有明显的空间变异性(图 1)。高山草甸土主要分布在通天河流域，占长江源总面积 60% 以上，成土母质以残积物、坡积物、冲积物等为主；草甸沼泽土主要分布在当曲流域，该区植被较好，湿地广布，土壤发育时间短，土层薄；寒钙土主要分布在沱沱河流域，该区气候干旱，降水量少，植被稀疏，土壤冻结期长，成土母质以冲积物、洪积物和坡积物为主，质地较粗。淡寒钙土主要分布在楚玛尔河流域，相对于寒钙土，该区生态条件和土壤肥力更差，土壤冻结期 5 个月以上，土层薄、质地差。根据国际制土壤质地分类标准，高山草甸土属于粉砂质粘壤土，草甸沼泽土属于壤土，寒钙土属于粉砂质壤土，淡寒钙土属于砂质壤土(表 1)^[10]。

长江源区属于半湿润—半干旱寒冷高原生态系统的青南羌塘草原、荒漠生态区，植被类型较为简单，从东南到西北，依次分布着高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原等。通天河流域植被类型以高寒草甸为主，受自然条件和当地放牧影响，草地呈不同程度退化趋势，在植被重度和中度退化的坡面，持水性较差，优势建群种为莎草科矮生嵩草(*Kobresia humilis*)，物种单一稀少，高度在 4~18 cm；轻度退化坡面，持水性较强，是以矮生嵩草为优势建群种的多种物种混合生长的草地，主要植物种为矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、短穗

兔儿草(*Lagotis breviflora*)、早熟禾(*Poa annua* L)等^[10]。

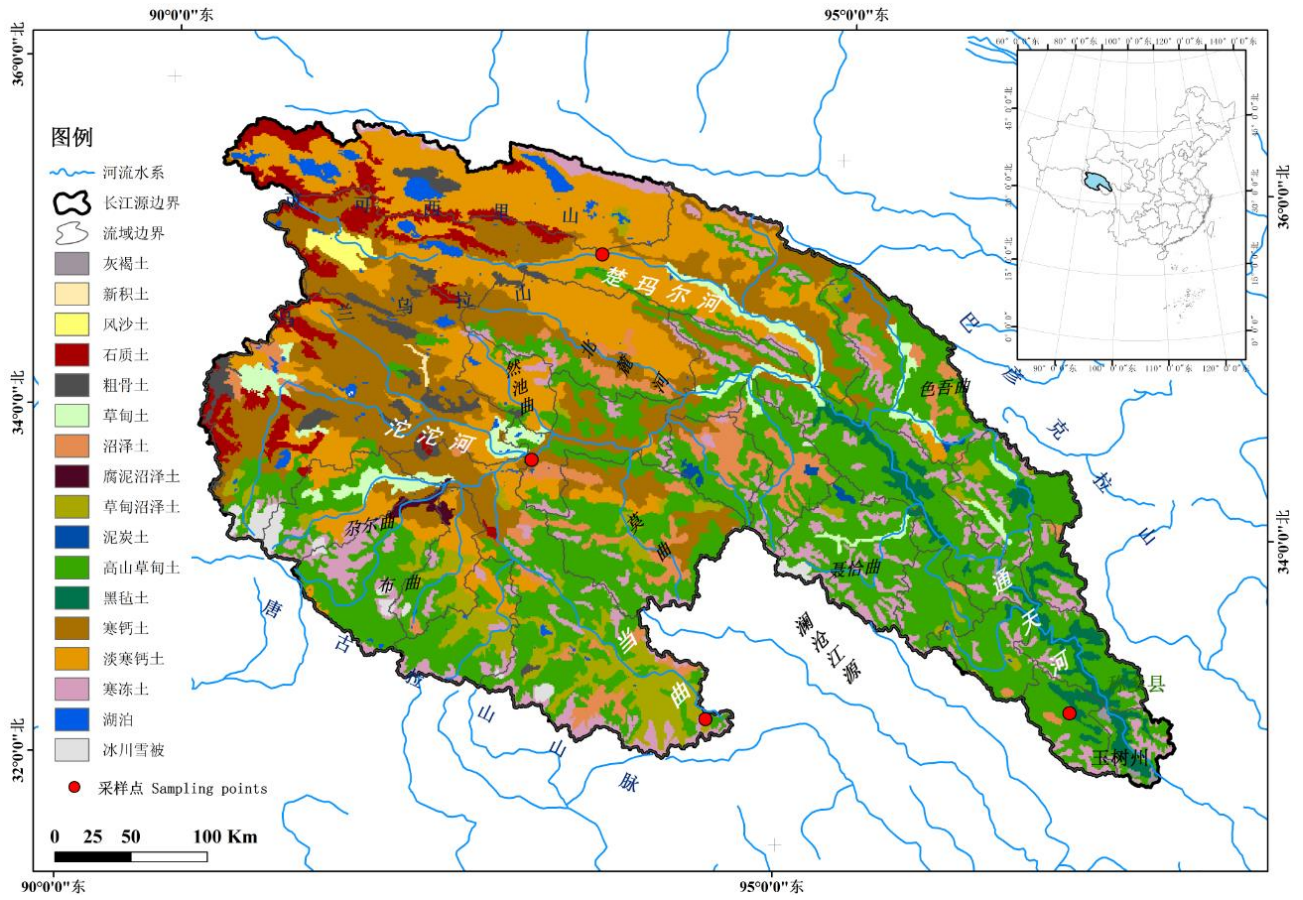


图 1 长江源土壤类型及采样点分布图

Fig.1 Distribution of soil types and sampling sites in the Source region of Changjiang River

注：数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。

表 1 试验土壤类型及采样位置

Table 1 Test soil types and sampling locations

| 采样源区 | 地理坐标 | 行政区位置 | 海拔/m | 土壤类型 | 下垫面 | 土壤质地 | | |
|--------|------------------------|---------|------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | | | | | | 粘粒% | 粉粒% | 砂粒% |
| 楚玛尔河流域 | 35°18'15"N, 93°17'56"E | 玉树州治多县 | 4532 | 淡寒钙土 | | 6.62 | 9.84 | 83.54 |
| 沱沱河流域 | 34°07'45"N, 93°00'56"E | 海西州沱沱河镇 | 4447 | 寒钙土 | 地表裸露 | 15.27 | 34.27 | 50.46 |
| 当曲流域 | 32°43'42"N, 94°21'11"E | 玉树州治多县 | 4786 | 草甸沼泽土 | | 11.74 | 41.45 | 46.81 |
| | 32°55'19"N, 97°00'00"E | | 4391 | | 地表裸露 | 20.14 | 46.39 | 33.48 |
| 通天河流域 | 32°55'13"N, 96°59'54"E | 玉树州结古镇 | 4260 | 高山草甸土 | 植被盖度约 30% | 21.70 | 46.74 | 31.56 |
| | 32°55'21"N, 97°00'03"E | | 4441 | | 植被盖度约 60% | 30.01 | 39.68 | 30.31 |
| | 32°55'12"N, 96°59'54"E | | 4272 | | 植被盖度约 80% | 24.43 | 43.30 | 32.27 |

2.2 试验土壤

本研究中试验土样为参加长江科学院2020年科学考察,在不同源区采集(表1)。在通天河流域高山草甸坡面,按照“S”型布设植被样方,利用直径为10cm,高5cm的环刀,采集植被重度、中度和轻度退化的原状土样(图2abcd)^[17]。在长江源楚玛尔河、沱沱河、当曲和通天河流域完全退化样地,去除地表碎石和杂物后取原状土样,用于模拟冲刷试验,同时用加厚自封袋取土样约1000g用于室内理化性质测试(图2defg)。

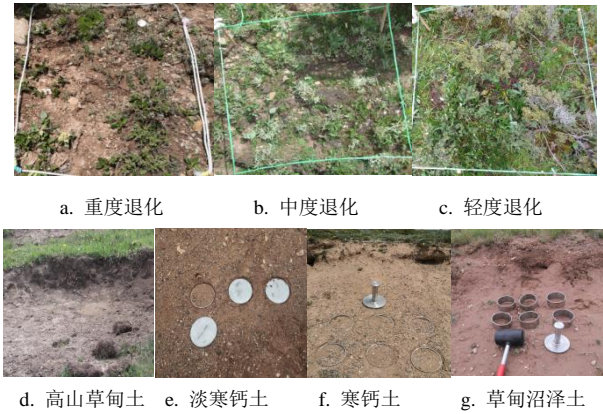


图2 采样点现状

Fig.2 Status of sampling points

2.3 试验方法

(1) 土壤理化性质测试

原状土样的容重采用环刀烘干法测量,土壤机械组成采用马尔文激光粒度仪法,土壤水稳性团聚体含量采用湿筛法,土壤有机碳测定采用重铬酸钾外加热法,土壤碳酸钙采用气量法,土壤氮、磷采用传统消煮定容的方法。将原位取回不同植被盖度原状土样置于0.5mm的尼龙网筛内,采用无压水流进行反复冲洗,直至洗出所有根系,然后将根系烘干称重,可得根系干重^[18]。以上土壤理化性状的测试均依据相关标准和规范,每个指标重复测试3组。

(2) 冲刷试验

土壤分离过程的研究采用变坡水槽冲刷试验的方法^[19],试验在位于长江源玉树州杂多县的“水利部长长江源区水生态系统野外科学观测研究站”进行(图3)。径流冲刷变坡水槽主要由供水、稳流、冲刷和收集4部分组成,坡度在0~30°范围内可调。供水部分由水泵提供的动力将清水通过软管和流量计引入冲刷装置的稳流槽中。稳流槽(长×宽×深:20×15×20cm)位于冲刷槽的顶端,主要用于调节冲刷水流稳定性,使水流

进入冲刷槽中初始速度为0m/s。冲刷槽(长×宽×高:400×15×8cm)为PVC材料,底部粘有与试验土壤相同的土壤颗粒,使试验水槽表面糙度与野外最大可能相似,冲刷槽的试验段为内径10cm,深5cm的柱形凹槽,可刚好放置取样环刀,位于冲刷槽中轴线且距冲刷槽尾端30cm处。试验收集部分位于冲刷装置的尾部,设计为椎体,用于收集试验过程中的泥沙。

在放水冲刷前,调节冲刷槽坡度和流量,根据研究区坡度分布特征和近30a的降雨资料,坡度设计为:10°和15°;流量设计为:12、18、24L/min。水流稳定后利用染色法测定流速,测量区间位于冲刷槽试验段上部,长度为2m,根据试验水流动态选择相应流速修正系数计算平均流速。冲刷开始后,土样被冲刷2cm深度时停止试验,记录所用时间。自产流开始用径流桶收集水流泥沙试样,直至冲刷结束。冲刷结束后,将径流桶静置澄清12h,泥沙沉淀完全后倒掉上层清液,将剩余泥沙样转移至铝制料缸内,在烘箱中105°C烘干后称量泥沙质量。每组试验重复3次,共计试验126场。



图3 长江源野外科学站径流冲刷模拟试验

Fig.3 Runoff scour simulation tests in field scientific station of Changjiang River Sources

2.4 数据处理与分析

土壤分离速率是单位时间单位面积上的土壤侵蚀量,计算如下:

$$D_c = \frac{W}{AT} \quad (1)$$

式中, D_c 为土壤分离速率, $g/(cm^2 \min)$; W 为试验冲刷输移土样质量, g ; A 为土样面积, cm^2 ; T 为冲刷时间, \min 。

水流剪切力、水流功率和单位能量的计算公式分别为：

$$\tau = \rho ghS \quad (2)$$

式中 τ 为水流剪切力, Pa; ρ 为水的密度, kg/m^3 , 一般为 10^4 N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为平均水深, m; S 为坡度 θ 值。

$$\omega = \tau v \quad (3)$$

式中 ω 为水流功率, $\text{N}/(\text{m s})$, v 为水流流速, m/s 。

$$u = \frac{av^2}{2g} + h \quad (4)$$

式中 u 为过水断面单位能量, m; a 为动能校正系数, 取为 1。

试验数据利用 SPSS 22.0 进行数理统计分析, 差异显著性检验用 LSD 法 ($P < 0.05$, 双尾)。

3 结果与分析

3.1 植被退化程度对土壤分离速率的影响

基于原状土样的径流冲刷试验, 不同退化程度土壤分离速率与坡度和流量均呈正相关关系 (图 4)。在相同坡度和流量条件下, 不同退化程度高寒草甸土壤分离速率与退化程度显著正相关 ($P < 0.05$), 草地退化越严重, 土壤抗侵蚀能力越小, 分离速率越大 (图 4)。高山草甸完全退化坡面的土壤平均分离速率 ($0.54 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$) 显著大于重度退化和中度退化土壤 (0.34 和 $0.12 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$), 并远大于轻度退化土壤 ($0.03 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$), 最大可达 18 倍。

在高山草甸轻度、中度、重度和完全退化坡面, 坡度为 10° 时, 土壤平均分离速率分别为 0.02 、 0.10 、 0.26 和 $0.35 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, 坡度增加到 15° 后, 土壤分离速率增加了 2.67、1.67、1.56 和 1.67 倍, 轻度退化的增幅明显大于其他退化坡面。冲刷流量由 $12 \text{ L}/\text{min}$ 增加到 18 和 $24 \text{ L}/\text{min}$ 时, 轻度、中度、重度和完全退化土壤分离速率分别增大了 4.50 和 4.97、1.40 和 2.30、2.23 和 3.81、1.29 和 2.77 倍, 同样, 随冲刷流量的增加, 轻度退化坡面的土壤分离速率增幅最大 (图 4)。

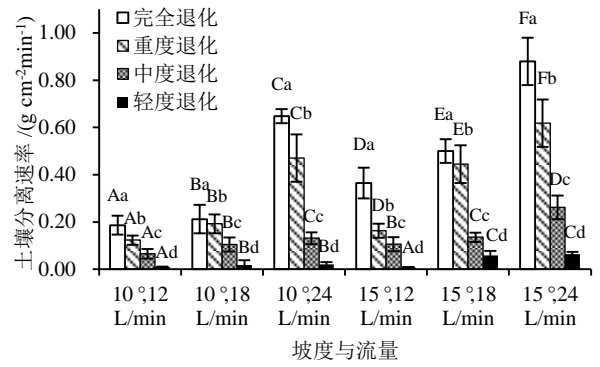


图 4 长江源不同退化程度土壤分离速率

Fig.4 Soil detachment rates of different soils in the sources of Changjiang River

3.2 完全退化坡面土壤类型对分离速率的影响

完全退后的 4 种不同土壤平均分离速率具有显著差异, 并均远大于重度以下退化程度坡面的高山草甸土分离速率 ($P < 0.05$, 图 5)。淡寒钙土的土壤平均分离速率 ($4.29 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$) 最大, 分别是寒钙土 ($1.32 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$)、草甸沼泽土 ($0.59 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$) 和高山草甸土 ($0.54 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$) 的 3.25、7.27 和 7.94 倍。

坡度为 15° 时, 不同土壤平均分离速率 ($2.17 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$) 是 10° 坡面 ($1.24 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$) 的 1.75 倍, 增加幅度小于轻度退化坡面, 而大于中度和重度退化坡面。流量为 $12 \text{ L}/\text{min}$ 时, 不同土壤平均分离速率为 $1.04 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, 当流量增加到 18 和 $24 \text{ L}/\text{min}$ 时, 土壤平均分离速率分别增加 1.61 和 2.23 倍, 增幅小于轻度、中度和重度退化坡面。

通过相关分析发现 (表 2), 完全退化后不同类型土壤分离速率与粉粒和团聚体含量呈极显著负相关关系 ($P < 0.05$), 与砂粒含量显著正相关 ($P < 0.05$)。团聚体作为土壤结构的基本单元, 其稳定性是抵抗外力作用或在外部环境变化时保持原有形态的能力, 作为土壤抗侵蚀能力的重要评价指标, 其组成及含量受土壤质地等影响。

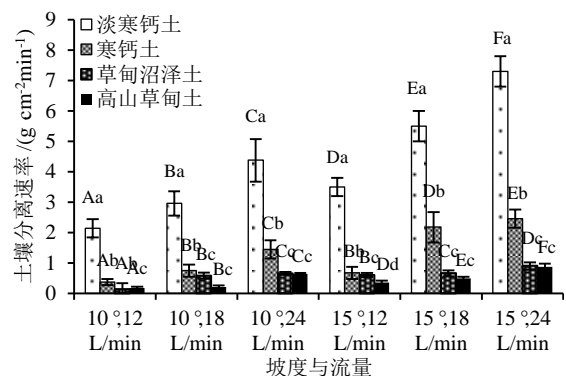


图 5 长江源不同类型土壤分离速率

Fig.5 Soil detachment rates of different soils in the sources of

Changjiang River

表 2 土壤分离速率与土壤属性相关性分析

Fig. 2 Correlation between soil detachment rate and soil properties

| 指标 | 不同退化程度 | 不同类型土壤 |
|------|---------|---------|
| 粘粒 | -0.72 | -0.81 |
| 粉粒 | 0.74 | -0.97** |
| 砂粒 | 0.54 | 0.93* |
| 有机碳 | -0.88* | -0.71 |
| 团聚体 | -0.27 | -0.95** |
| 全氮 | -0.91* | -0.9 |
| 全磷 | -0.90* | -0.58 |
| 碳酸钙 | 0.74 | 0.69 |
| 容重 | 0.82 | 0.42 |
| 抗剪强度 | -0.88* | -0.5 |
| 根系干重 | -0.92** | / |

3.3 水动力参数对土壤分离速率的影响

坡度和流量是土壤分离的驱动因子，决定了坡面径流侵蚀动力，不同土壤及退化程度土壤分离速率与水动力参数均呈正相关关系。在本研究中，水流剪切力的范围为 2.16~4.49 Pa, 水流功率的范围为 2.27~6.55 N/(m s), 单位能量的范围为 0.05~0.11 m。不同土壤分离速率与坡度流量均呈正相关，但与坡度的平均相关系数 (0.55) 明显小于流量 (0.75)，且同时小于其他水动力参数 (图 6)。不同退化程度坡面土壤分离速率与水流功率 (ω) 和过水断面单位能量 (u) 呈显著相关关系 ($P<0.05$)。完全退化坡面的不同类型土壤分离速率与水流剪切力 (τ) 和水流功率 (ω) 均呈显著相关关系 ($P<0.05$)，相关系数基本均在 0.9 以上。

图 6 土壤分离速率与水动力参数的相关关系

Fig.6 Correlation relationship between soil detachment rates and hydrodynamic parameters

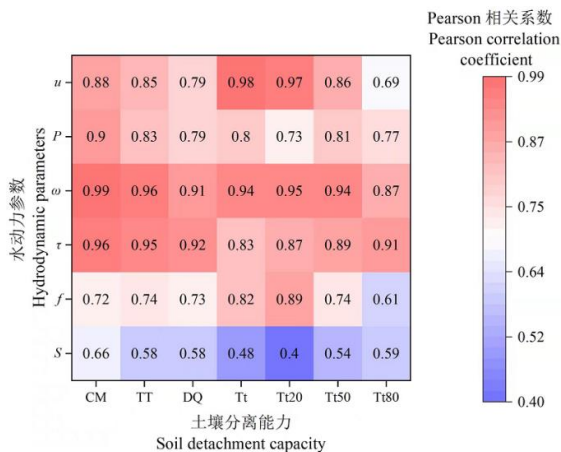
注：图中横轴 CM、TT、DQ、Tt、Tt20、Tt50 和 Tt80 分别为淡寒钙土、寒钙土、草甸沼泽土、高山草甸土，以及重度退化、中度退化和轻度退化的高山草甸土样；纵轴 S 、 f 、 τ 、 ω 、 P 和 u 分别代表坡度、流量、水流剪切力、水流功率、单位水流功率和单位能量。

土壤分离速率随不同水动力参数的增加，均呈较好地线性或幂函数关系。不同退化程度坡面的土壤分离速率与水流功率的线性拟合关系较好，且退化程度越严重，线性拟合关系相关系数越大 (表 3)。完全退化后坡面，不同土壤分离速率与水流功率的拟合效果总体优于水流剪切力和单位能量，草甸土分离速率与水流功率间的线性关系最优，而寒钙土分离速率与水流功率间的线性函数关系略小于幂函数。

表 3 不同退化程度坡面土壤分离速率与水流功率拟合关系

Table 3 Fitting relationship between soil detachment rates and flow power of different degradation degrees

| 试验土样 | 线性函数 | R ² | 幂函数 | R ² |
|----------|---------------------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| 完全退化坡面 | 淡寒钙土 $Dc=1.25$ $(\omega-0.81)$ | 0.98 | $Dc=0.76\omega^{1.19}$ | 0.98 |
| | 寒钙土 $Dc=0.55$ $(\omega-1.88)$ | 0.92 | $Dc=0.07\omega^{1.96}$ | 0.94 |
| 草甸沼泽土 | $Dc=0.15$ $(\omega-0.37)$ | 0.84 | $Dc=0.06\omega^{1.57}$ | 0.79 |
| | 高山草甸土 $Dc=0.17$ $(\omega-1.51)$ | 0.88 | $Dc=0.05\omega^{1.56}$ | 0.86 |
| 不同退化程度坡面 | 重度退化 $Dc=0.13$ $(\omega-1.67)$ | 0.90 | $Dc=0.03\omega^{1.71}$ | 0.88 |
| | 中度退化 $Dc=0.04$ $(\omega-1.11)$ | 0.89 | $Dc=0.02\omega^{1.19}$ | 0.93 |
| | 轻度退化 $Dc=0.02$ $(\omega-2.23)$ | 0.76 | $Dc=0.001\omega^{2.01}$ | 0.68 |



4 讨论

在高寒草地坡面，土体中的根系犹如乱向分布的天然纤维材料，可以起到固土抗蚀的作用^[18]。物理捆绑和生物化学吸附是根系固土抗蚀的主要作用方式，已有研究发现，土壤分离速率在植被和根系作用下降幅可达 53.6%^[7]。李光莹等^[20]在黄河源玛沁地区研究发现，根系密度是影响未退化、轻度退化和重度退化高寒草地根土复合体抗剪强度最主要因素，其次为单根抗拉强度及根系数量。在本研究中，长江源轻度退化以上的高寒草地以须根系为主，优势建群种为莎草科矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、早熟禾(*Poa annua* L)等，物种较为单一，高度在 4~18 cm，根系分布稀疏，主要分布在 0~20 cm^[10]。因此，可以推断长江源高寒草地主要靠根系数量和须根系的物理捆绑作用增加抗侵蚀能力。高山草甸根系通过缠绕、固结和串连土体等方式，与土壤形成较稳定的根土复合体，抑制土壤侵蚀过程，但随植被退化程度增加，径流冲刷作用下的土壤分离速率呈几何级数递增(图 4)。有研究表明，在相同水动力条件下，壤砂土分离速率最大，其次是粉壤土，粘壤土分离速率最小^[21]。这主要是由于粘粒和粉粒自身胶结容易形成团聚体，形成团聚体后，由于自身具有较大重量，增加了抗侵蚀的能力，而砂粒很难形成团聚体，因此更容易被分离搬运^[22]。在本研究中，长江源地区从草甸土到寒钙土，土壤质地逐渐粗化，砂粒含量显著增大(表 1)，因此，土壤分离速率呈增加的趋势。

坡面径流分离土壤需要克服土粒之间的粘结力，在土壤分离过程中，径流水动力越大，被剥离的土壤颗粒越多，土壤分离速率越大。土壤分离过程受流量和坡度两个因子的综合作用，而并非任何单一因子的影响。因此，在不同的坡度和流量组合下，作为表征径流强度的高阶参数，坡面水流剪切力、径流功率和过水断面单位能量与长江源土壤分离速率的相关性明显优于坡度和流量(图 6)^[23]。对于不同植被退化程度坡面，用于拟合土壤分离速率的最优参数有所不同，但总体上，水流功率的线性拟合效果最好，这与前人研究结果基本一致^[2,3,9]。

5 结论

本研究通过原位采样和径流冲刷试验，分析长江

将长江源不同类型土壤分离速率随水流功率的变化趋势与其他学者在西藏^[4]、黄土高原^[1,24]、西南^[3,25]等地区的对比，发现虽然坡度和流量设置不同，但土壤分离速率与水流功率均呈较好线性相关关系($R^2 \geq 0.70$ ，表 3 和图 7)。在土壤分离速率与水流功率的线性拟合关系中，斜率为土壤分离速率随水流功率变化的幅度，用于表征土壤易蚀程度。在相同水流功率下，西藏地区重塑后的土壤分离速率^[6]远大于其他地区重塑土和原状土，斜率为 4.61，说明该研究中土壤最易被侵蚀；楚玛尔河流域淡寒钙土的原状土样与重塑的西南地区紫色土^[3]分离速率变化趋势及大小相似，斜率在 1.11 至 1.25 之间；重塑西南地区黄壤^[25]的分离速率大小与淡寒钙土相近，斜率与沱沱河流域的寒钙土相近，在 0.55 至 0.72 之间；当曲及通天河的草甸土分离速率与黄土高原地区重塑的黄绵土相似^[24]，斜率在 0.15 至 0.17 之间，但远大于原状黄绵土(斜率为 0.06)^[1]。Zhang 等^[1]研究发现原状土样分离速率是重塑土的 1 至 23 倍。据此可推断，相同水动力条件下，长江源区的土壤分离速率应该与 Li 等^[4]研究的同属青藏高原的西藏地区土壤相似，都属于发育时间较短的土壤，并且远大于其他地区，这是由土壤属性决定的，因此长江源区的侵蚀风险远大于其他地区。

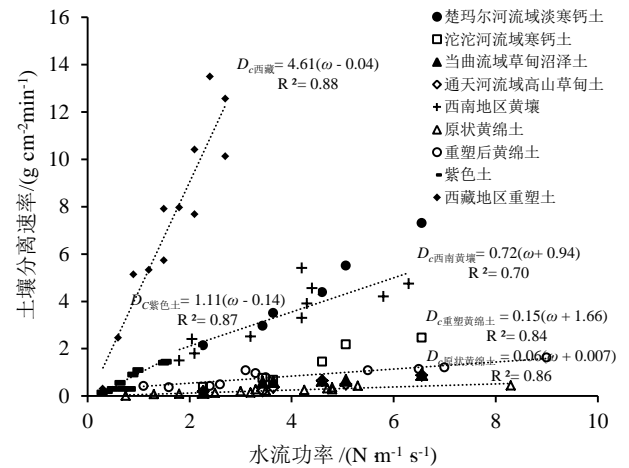


图 7 不同地区土壤分离速率与水流功率关系对比

Fig.7 Comparison of the relationship between soil detachment rate and stream power of different regions

源草地退化和水动力参数对土壤分离速率影响，得到以下主要结论：

(1) 长江源不同退化程度及完全退化后的草地，

土壤分离速率具有明显空间变异性。高山草甸裸土平均分离速率显著大于重度和中度退化草地，并远大于轻度退化草地，最大可达 18 倍。对于不同退化程度的草地，根系干重是决定土壤分离速率的关键因素。

(2) 草地完全退化后的淡寒钙土平均分离速率是寒钙土、草甸沼泽土和高山草甸土的 3.25、7.27 和 7.94 倍。土壤质地和团聚体含量是影响不同类型裸土分离速率的重要因子。

(3) 不同草地退化程度坡面的土壤分离速率与水流功率的线性拟合关系最好。相同水流功率下，长江源地区原状土分离速率与西南及黄土高原地区重塑土相近，但侵蚀风险远大于其他地区。

由于本研究为坡面尺度，试验样品数量有限，在说明长江源不同源区或土壤类型的侵蚀现状时具有局限性，还需通过增加采样的密度和数量，并结合流域和区域尺度的分析进一步验证。

参考文献:

- [1] Zhang G H , Liu B Y , Liu G B , et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3):713-719.
- [2] 张冠华, 胡甲均. 径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 144-154.
- [3] 丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J]. *泥沙研究*, 2010, 35(6): 16-22.
- [4] Li Mingyi, Xiao Hai, Huan Hong, et al. Modelling soil detachment by overland flow for the soil in the Tibet Plateau of China[J]. *Scientific reports*, 2019, 9: 8063-8073.
- [5] Burylo M, Rey F, Mathys N, et al. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2012, 37(14): 1463-1470.
- [6] Ye Chao, Guo Zhonglu, Li Zhaoxia, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China[J]. *Geomorphology*, 2017, 285: 82-93.
- [7] Gysels G, Poesen J, Liu G, et al. Effects of cereal roots on detachment rates of single- and double-drilled topsoils during concentrated flow[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 381-391.
- [8] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2014, 116: 51-59.
- [9] 李建明, 张长伟, 王志刚, 等. 不同植被类型对堆积体坡面径流特性的影响[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(10): 60-68.
- [10] 吴志广, 徐平, 赵良元, 等. 长江源区综合科学考察报告 2019[M]. 武汉: 长江出版社, 2020.
- [11] 常福宣, 洪晓峰. 长江源区水循环研究现状及问题思考[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(07): 1-6.
- [12] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估[J]. *地理学报*, 2016, 71(01): 3-20.
- [13] 秦海蓉, 陈长成, 胡月明, 等. 青海省高寒草地土壤侵蚀强度及其空间分布特点[J]. *草地学报*, 2021, 29(S1): 104-112.
- [14] 贺倩, 戴晓爱. 基于 LMDI 模型的三江源区植被对土壤侵蚀变化影响的定量分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(07): 61-67.
- [15] 闫霞, 周银军, 姚仕明. 长江源区河流地貌及水沙特性[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(12): 10-15.
- [16] 李志威, 吴叶舟, 胡旭跃, 等. 长江源通天河段辫状河道形态特征与变化规律[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(09): 6-11.
- [17] 高清竹, 李玉娥, 林而达, 等. 藏北地区草地退化的时空分布特征[J]. *地理学报*, 2005(06): 87-95.
- [18] 李强, 杨俊诚, 张加琼, 等. 植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(1): 17-23.
- [19] 孙宝洋, 吴志广, 李占斌, 等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 57-65.
- [20] 李光莹, 虎啸天, 李希来, 等. 黄河源玛沁地区高寒草地植物固土护坡的力学效应[J]. *山地学报*, 2014, 32(5): 550-560.
- [21] Wang Ling, Shi Zhihua. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 917-929.
- [22] An Shaoshan, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2010, 81: 226-233.
- [23] 肖海, 刘刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 106-111.
- [24] 申楠, 王占礼, 陈浩. 黄土坡面细沟水流分离能力[J]. *山地学报*, 2015, 33(2): 65-72.
- [25] 郭继成, 张科利, 董建志, 等. 西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(06): 1102-1108.