

DOI: 10.11766/trxb201907020127

陈同德, 焦菊英, 王颢霖, 赵春敬, 林红. 青藏高原土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 547-564.

CHEN Tongde, JIAO Juying, WANG Haolin, ZHAO Chunjing, LIN Hong. Progress in Research on Soil Erosion in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 547-564.

青藏高原土壤侵蚀研究进展*

陈同德¹, 焦菊英^{1, 2†}, 王颢霖¹, 赵春敬¹, 林红¹

(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: 青藏高原地貌类型多样, 气候复杂, 存在冻融、风力、水力和重力等多种侵蚀营力。在气候变化和高原人口增长的背景下, 青藏高原的土壤侵蚀不断加剧。然而, 相比我国其他区域, 青藏高原的土壤侵蚀研究相对薄弱。通过梳理文献, 对青藏高原的冻融侵蚀、风力侵蚀、水力侵蚀和重力侵蚀的研究现状进行了整理与分析, 研究发现: 冻融侵蚀的定义存在分歧, 地质侵蚀和土壤侵蚀的概念存在混淆, 与土壤侵蚀相关的基础研究缺乏。未来青藏高原研究应加强土壤侵蚀监测等基础工作, 关注温度变化对土壤侵蚀的影响, 重视土壤侵蚀防治工作, 为保障我国生态屏障安全提供决策依据。

关键词: 土壤侵蚀; 侵蚀类型; 冻融作用; 青藏高原

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Progress in Research on Soil Erosion in Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Tongde¹, JIAO Juying^{1, 2†}, WANG Haolin¹, ZHAO Chunjing¹, LIN Hong¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on 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 Qinghai-Tibet Plateau is an important ecological barrier in China, and plays an important role in maintaining climate stability, carbon balance and water resources. It is known as the “Asian water tower” and the “regulator” of the environment of Asia and even of the northern hemisphere. Under the background of global warming and population growth, the Qinghai-Tibet Plateau is very sensitive to climate changes. As the Qinghai-Tibet Plateau is highly diversified in landform, its climate is very complex. Therefore, there are many kinds of erosion forces, such as freezing-thawing, wind, water and gravity. The existing researches made use of RS and GIS, wind tunnel simulation, runoff plot monitoring and other experimental methods to study causes and temporal and spatial distribution of the different types of soil erosion. Some scholars also conducted experiments on soil erosion control in some regions, and evaluated effectiveness of the measures. Findings of these researches

* 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA20040202), 第二次青藏高原综合考察研究 (2019QZKK060300) 资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA20040202), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (No. 2019QZKK060300)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 陈同德, 男, 青海民和人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xnctd2015@126.com

收稿日期: 2019-07-02; 收到修改稿日期: 2019-11-19; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2020-01-16

provide some valuable information for studies on soil erosion in the Qinghai-Tibet Plateau. However, compared with other parts of China, the Qinghai-Tibet Plateau is relatively new in the study on soil erosion. This paper collated and analyzed what has been done in the research on freeze-thaw erosion, wind erosion, water erosion and gravity erosion in the Qinghai-Tibet Plateau, and found out some issues that call for attention. Firstly, divergence exists in definition of freeze-thaw erosion: e.g. freeze-thaw erosion should encompass the factors of wind, water, and gravity, or not? Secondly, geological erosion is confused with soil erosion in concept. Thicker humus layers are found in chestnut soil and mountain shrub soil in the Qinghai-Tibet Plateau except for in Huangshui Valley, Qinghai Lake basin, Hefei Long Qu Valley and Lhasa River Valley, and the two types of soils are relatively mature. However, soils in the other areas contain many coarse gravels or gravels. Geological erosion is a natural process that carries not only includes soil particles, but also rocks and weathered rocks from slopes and banks. So, in the Qinghai-Tibet Plateau where gravels dominate in the surface layer, what happens more, soil erosion or geological erosion? And thirdly, the topic of soil erosion still lacks basic research. For example, temperature and soil moisture data are the basis for the study of freeze-thaw erosion, however, at present, changes in soil temperature are generally reflected by air temperature data, and soil moisture data of a large area are derived from remote sensing data, and measured data in field are very limited. Consequently, the model for evaluating freeze-thaw erosion is not very accurate; Runoff and sediment monitoring data are important information for exploring law of the water erosion on slopes at a watershed scale, however, besides the measured data of the areas of the Qinghai-Tibet Highway slope and Three-river Source, of other areas very limited data are available; and soil and vegetation data are the basic ones needed for evaluation of regional erosion, but little is measured. In the future, the study in this area should dedicate more effort to basic work, such as soil erosion monitoring, pay more attention to influence of changes in temperature on soil erosion, and attach more importance to prevention and control of soil erosion, so as to provide certain scientific basis for decision-making to protect the ecological barrier in China.

Key words: Soil erosion; Erosion types; Freeze-thaw effect; Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原是我国重要的生态屏障, 对于维持气候稳定、碳收支平衡和水资源供应等方面有着重要作用, 被称为“亚洲水塔”, 是亚洲乃至北半球环境变化“调控器”^[1]。在全球气候变暖的大背景下, 青藏高原的生态环境对气候变化的响应更为敏感和突出^[2]; 在过去的几十年经历了显著的增温^[3], 冰川退缩、洪水频发^[1], 融水侵蚀加剧^[4]; 按照目前的气候变化趋势, 至 2050 年, 青藏高原南部和横断山脉将是我国潜在土壤侵蚀量最高的地区^[5]。

青藏高原地域辽阔, 不同区域地形、气候、植被等差异显著, 几乎包含陆地上所有的土壤侵蚀营力类型^[6]。仅西藏自治区, 就有藏东南暖热湿润高山深谷水蚀区、藏东温带半湿润高山峡谷水蚀区、藏南温带半干旱高原宽谷水蚀区、藏北寒冷半干旱高原水蚀和风蚀区、藏西温凉干旱高原宽谷风蚀区、藏西北寒冻高原冻融侵蚀区等 6 种侵蚀区^[7], 包含了冻融侵蚀、水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀, 及其两相、三相或者四相的组合侵蚀类型^[8]。前人利用遥感和 GIS^[9]、风洞模拟^[10]、径流小区监测^[11]等多种试验手段, 对不同类型土壤侵蚀的发生原因和

时空分布等方面进行了研究; 一些学者在个别区域开展了土壤侵蚀的防治试验, 并对其防治措施的效益进行了评价^[12], 这些研究成果为青藏高原土壤侵蚀研究提供了宝贵资料^[5]。但由于青藏高原自然环境条件的复杂性、特殊性, 当前青藏高原各类土壤侵蚀的发生、分布、预测及其防治等仍需要进一步研究。为此, 本文通过梳理青藏高原地区冻融侵蚀、风力侵蚀、水力侵蚀和重力侵蚀 4 种主要侵蚀类型的相关文献, 对各自研究现状进行了分述, 分析了各类型土壤侵蚀的影响因子, 据此提出了目前青藏高原土壤侵蚀研究中存在的问题以及需要加强关注的几个方面, 以期青藏高原的相关研究提供参考。

1 冻融侵蚀研究

冻融侵蚀是我国三大侵蚀类型之一, 主要分布于青海、西藏、内蒙古、新疆、甘肃、四川、黑龙江等 7 个省及自治区, 据第二次全国土壤侵蚀普查结果, 冻融侵蚀面积占总水土流失面积的 35.6%, 约 126.89 万 km²^[13]。青藏高原气候寒冷, 一些区域

全年冻结期可达 7—8 个月(9 月至次年 4、5 月份), 年均气温 -2°C 至 -6.9°C [14], 是我国最主要的冻融侵蚀区域之一, 冻融侵蚀面积占其国土面积的 59% [15], 冻融侵蚀产物成为黄河、长江等河流泥沙的主要来源之一。但相比水蚀和风蚀研究, 冻融侵蚀在我国并没有得到足够的重视。目前, 青藏高原冻融侵蚀研究主要集中在冻融侵蚀区域的界定和分布、冻融侵蚀分类分级评价和冻融侵蚀影响因素分析等方面。

1.1 冻融侵蚀区域的界定和分布

在青藏高原, 将主要侵蚀动力为冻融作用的区域称为冻融侵蚀区 [16], 该区的界定, 重点在于确定其海拔下界。张建国和刘淑珍 [16] 提出西藏地区冻融侵蚀区的海拔下界较冻土区海拔低 200 m (年均温度 -2.5°C) 左右, 与冰缘区的海拔下界接近, 并依据西藏地区气象站资料提出计算公式:

$$H=(66.3032-0.09197X_1-0.1438X_2+2.5/0.005596)-200$$

式中, H 为西藏冻融侵蚀区下界海拔 (m); X_1 为纬度 ($^{\circ}$); X_2 为经度 ($^{\circ}$)。

并依据该公式, 确定冻融侵蚀为那曲、阿里、日喀则、拉萨、昌都等地区最主要的土壤侵蚀类型。该方法的提出为我国冻融侵蚀区域的界定和分布提供了参考, 后续第一次全国水利普查 [17]、青藏高原地区冻融侵蚀分布区域的确定和冻融侵蚀强度的评价 [18] 等研究均基于此公式进行。

1.2 冻融侵蚀分类分级评价

目前没有统一的冻融侵蚀二级类型的划分方法。如: 王向阳 [19] 将西藏高原的冻融侵蚀分为寒冻剥蚀和热融滑塌两种类型; 李代明 [20] 将西藏冻融侵蚀分为冰川侵蚀和冻土侵蚀; 钱登峰等 [21] 将冻融侵蚀分为冰川侵蚀、融冰/雪径流侵蚀、冻融泥流、沟道冻融侵蚀、冻融风蚀等 6 种类型。目前无论是对冻融侵蚀的地面监测或遥感监测, 均未对上述各冻融侵蚀子类型进行监测。地面监测内容包括寒冻剥蚀和热融滑塌观测两种: 对寒冻剥蚀物进行定期收集得到坡面寒冻剥蚀量; 利用基准桩的位移距离确定滑塌面积, 测量土层厚度即可得到热融滑塌侵蚀量 [19]; 而遥感监测主要依据海拔、坡向、植被类型、土地利用等 [22] 指标, 对冻融侵蚀强度进行分级, 进而借助 RS 和 GIS 进行快速动态监测。因此, 在冻融侵蚀的二级类型的划分方法不明确的情况下, 难

以对其进行监测从而获得准确的冻融侵蚀量。

冻融侵蚀分级评价方法主要分为两种: 一类是依据遥感影像中不同程度冻融侵蚀的特征 (解译标志), 进行目视解译, 提取对应特征的冻融侵蚀面积, 从而做出评价; 二是权重法, 不同学者依据各自对冻融侵蚀的理解, 选出影响冻融侵蚀的各类因子, 并根据因子的重要性进行赋值, 提出相应的评价模型。以往研究中冻融侵蚀的遥感解译标志尚无统一标准, 研究结果之间不能直接进行横向对比。如欧阳琰等 [23], 根据 TM 影像中冻融侵蚀的色调、分布范围和主要代表植物等解译标志将冻融侵蚀强度划分为轻 (亮白色, 分布于高寒缓坡和草原灌木等区域, 代表植被为草甸和灌丛)、中 (灰白色, 分布于高山荒漠和冰川积雪覆盖等区域, 代表植被为高山植被和草原)、重 (青灰色, 分布于紧靠冰川或常年积雪区域, 代表植被为垫状植被) 三个等级, 并对雅鲁藏布江流域 1990、2000 和 2010 年 3 期的影像进行了目视解译, 得出近 20 年雅江冻融侵蚀总面积下降约 3.5%, 主要原因是因为部分中度侵蚀区转化为轻度侵蚀区; 赵晓丽等 [22] 根据海拔高度、坡向和植被类型将冻融侵蚀强度分为微 (5 100~5 500 m, 阳坡, 草原)、轻 (5 100~5 500 m, 阳坡, 草甸)、中 (5 100~5 500 m, 阴坡, 草原和 5 500~6 000 m, 阳坡, 草原)、强 (5 100~5 00 m, 阴坡, 草甸和 5 500~6 000 m, 阳坡, 草甸)、极强 (5 100~6 000 m, 阴坡) 和剧烈 ($>6 000$ m) 等 6 个等级。权重法评价过程中, 冻融侵蚀评价因子的选择对结果有较大影响, 郭兵和姜琳 [24] 提出了冻融侵蚀动力因子的概念, 包括冻融期降雨侵蚀力和风场强度, 利用这两个侵蚀动力因子和冻融期降水量, 构建冻融侵蚀评价模型 (评价精度达到 92%), 并对青藏高原的冻融侵蚀的强度进行了评价。Zhang 等 [9] 选取了植被、气温年较差、年降水量、坡度、坡向、土壤等 6 个因子作为冻融侵蚀分级评价指标, 采用加权的方法 (对影响冻融侵蚀的各因子进行赋值, 并使用层次分析法确定每个因子的权重, 之后进行加权和计算) 建立了西藏地区冻融侵蚀强度的分级评价模型, 在 GIS 中运行上述模型, 得出西藏地区冻融侵蚀面积为 $6.64 \times 10^5 \text{ km}^2$, 强度侵蚀面积可占冻融侵蚀总面积的 13.9%; 不少学者也参考上述方法, 对青海湖流域 [25]、“一江两河”地区 [26] 以及整个青藏高原地区 [18] 不同强度冻融侵蚀的空间变化和分布、区域冻融侵

蚀主控因子等方面进行了研究。

1.3 冻融侵蚀影响因素

温度、坡度和坡向、植被和降水是影响冻融侵蚀的几个主要因素。 0°C 上下土壤温度变化的频率和幅度被认为是冻融作用的强度,影响着土层的冻融过程,进而影响土壤结构的稳定性和抗蚀性;温差越大,冻融作用的强度越大,土层冻融的深度越大,发生冻融侵蚀的可能性也越大^[27]。坡度影响冻融侵蚀产物向坡下的多少和输移的距离的远近^[25];坡向的差异影响坡面接受太阳辐射量,因此通过影响冻融作用强度来影响冻融侵蚀过程。较高的植被盖度可以提高土壤稳定性、减小土壤温度变化,削弱冻融作用强度,进而减小冻融侵蚀强度。降水可通过影响岩土中水分含量来间接影响冻融过程,岩土中的水分含量越大,在冻结过程中水分相变对岩土体的破坏作用越大,融化过程也会加快坡面径流对土壤的搬运^[27]。

综上所述,因青藏高原高寒环境的局限,冻融侵蚀的研究方法基本上是靠 RS、GIS 等手段进行宏观定性分析与评价,为了解青藏高原不同区域的冻融侵蚀特征提供了众多参考依据。但现有冻融侵蚀评价体系基本是依据经验对植被、降水量、温度、土壤等因子赋予权重后进行计算,进而对冻融侵蚀的强度和空间分布进行分析与评价,并非根据冻融侵蚀量的测算结果进行分级,因此存在一定的主观性。冻融侵蚀的地面监测内容目前多为寒冻剥蚀和热融滑塌两种侵蚀类型斑块尺度的观测,但根据前人研究,冻融侵蚀具有多种类型,上述的监测项目,并不能反映冻融侵蚀的所有内容,因此,更应该重视更多冻融侵蚀子类型的实地监测,获得冻融侵蚀量,从而进行定量的分析评价研究。

2 风力侵蚀研究

风力侵蚀是青藏高原主要的侵蚀类型之一,截至 2014 年,青藏高原沙化土地面积为 34.04 万 km^2 ,占全国沙化总面积的 19.78%^[28],主要包括砾质沙漠化土地、沙质沙漠化土地和风蚀残丘 3 种类型,主要分布于高原西部和北部区域,其他区域的分布较零散^[29]。目前有关青藏高原风蚀研究集中于风蚀区分布与风蚀地貌、风蚀特征与风沙运移规律和风蚀影响因素等方面。

2.1 风蚀区分布与风蚀地貌

青藏高原主要受风蚀影响的区域包括柴达木干旱盆地沙漠化区、黄河上游半干旱河流域沙漠化区、藏北青南高寒高原沙漠化区、雅鲁藏布江半干旱高山宽谷沙漠化区、“三江”流域湿润半湿润高山沙漠化区和雅鲁藏布江半干旱高山宽谷区^[29]。因地表物质和地貌的差异,青藏高原形成的风蚀地貌也有所差异。如西藏地区的沙地主要分为河流谷底型、湖积平原型和洪积平原型,每种类型的分布、成因和变化方式均不同^[30]。河流谷底型是指在“一江两河”区域河谷地带,在枯水期河床泥沙在风力作用下出现风蚀地貌^[31],这种风蚀地貌受河谷风力作用明显,山南宽谷地区 6—8 月土壤风蚀量大于风积作用形成的堆积量,风蚀、风积随河谷风向改变互相中和,出现流动沙丘不断往复的现象^[32]。湖积平原型和洪积平原型分别是指湖泊滩地和高大山系间的低平原上的细颗粒,在强风场作用下发生扩散而形成的沙地^[30]。

2.2 风蚀特征和风沙运移规律

风蚀速率是表征风蚀特征的重要指标,目前青藏高原地区测定风蚀速率的方法主要有 3 种:标桩法、元素示踪法和风洞试验法。标桩法是利用在样地中布设标桩,定期测量风蚀量或风积量^[32],来计算某个时段的净风蚀量,进而计算出风蚀速率。元素示踪法通过测定土壤剖面中放射性元素的含量,与背景值进行比较后,根据公式计算得到风蚀量^[33],再除以放射性元素的半衰期可计算出风蚀速率,这是测定风蚀速率较为便捷的方法。用于青藏高原风蚀速率测定的元素主要有 ^{137}Cs 和 ^{10}Be ,如严平等^[33]利用 ^{137}Cs 测定了青藏高原风蚀区(即青藏高原南部、中部和北部地区)风蚀速率平均为 $47.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,整体上属于中度侵蚀,而位于青藏高原北部区域的共和盆地,其风蚀速率却高达 $1.3 \times 10^3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[34];李俊杰等^[35]使用相同方法得到长江源区沱沱河流域(是青藏高原典型的风蚀地带)的风蚀速率为 $2.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;Rohrmann 等^[36]测定柴达木盆地第三纪沉积岩中 ^{10}Be 的含量后,确定风蚀速率范围在 $0.05\sim 0.4 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,并提出该地区是黄土高原及其东部地区产生沙尘天气的主要沙源之一,贡献率达到 50%以上。风洞可以模拟不同的风速,可定量测定与分析不同土壤或者下垫面的风蚀速率,也可定量分析风蚀对土壤养分的影响。有研究显示风

速在 $8\sim 22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，青藏高原表层土壤的全氮、总碳和总磷的损失率分别达到 $0.00\sim 8.81$ 、 $0.10\sim 122.27$ 和 $0.00\sim 1.14\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[37]，养分流失将导致土壤可蚀性增大^[10]；鲁春霞等^[10]试验得出青藏高原草地的风蚀速率大小为高寒草原 ($1\sim 2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$) > 草原化草甸 ($0.12\sim 0.52\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$) > 高寒草甸 ($0.1\sim 0.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$)。

风沙运移规律研究是防治沙化和控制沙害的理论基础，目前国内外学者在沙粒运动、风速廓线、输沙率和风沙流结构等方面已取得了众多研究成果^[38]。青藏高原分布众多沙区，青藏铁路等建设项目部分也分布于沙区^[39]，风沙运移规律对于防沙治沙和铁路保护等方面意义重大。种植植被和沙障可改变下垫面，进而改变风速廓线、输沙率和风沙流结构等，达到防沙治沙的效果。沙棘破坏了青海湖沙区沙丘的风速廓线对数递增规律，明显降低了近地层风速，因此在中低层的防风效果较好^[40]；青海湖东岸由于植被盖度增加，输沙量 2016—2017 年较 2013—2014 年减少 77.18 kg ^[41]；在青藏铁路措那湖段采取碎石压沙、石方格沙障和高立式沙障结合的防风固沙措施后，风速最大可降低 99.30% ，输沙率可降低至 0.25% ^[39]。上述研究多关注田块尺度，但风沙运移是流域、区域尺度的问题，以后应加强较大尺度的研究。

2.3 风蚀影响因素

风力是风蚀发生的源动力，风速越大，侵蚀力越强，风蚀侵蚀力与风速、高原季风、气温和降水等因素有关^[42]，青藏高原的风蚀侵蚀力空间上从东南向西北逐渐增大^[43]，时间上部分区域的侵蚀力随时间变化呈下降趋势^[42]。青藏高原发生风蚀的原因主要有以下四个：一是青藏高原除东南部，其余大部分地区属于干旱、半干旱气候，降水稀少，表现出较强风蚀气候侵蚀力^[29]，且风季通常与干季同步^[43]，如林芝 8 级以上的大风年平均日数为 8.6 d ，且在春季地表最干旱的时候达到最大值，因此造成土地沙化^[44]；二是藏北高原、雅鲁藏布江藏南谷地、柴达木盆地和青南高原等区域地表有大量的第四纪松散沉积物，如湖积物、洪积物、冰水沉积物等，为风蚀的发生提供了充足物质来源^[29]；三是该区域近年来年平均温度不断升高，冰川退缩，雪线上升^[1]，之后出现大量裸露地表，这些区域容易发生风蚀，有研究显示三江源地区现已因气候变

暖成为青藏高原沙尘暴的起源地之一^[35]；四是部分区域下垫面近年来受到过度人为干扰，如采集药用植被、过度放牧和采沙挖金等活动破坏植被，地表裸露后发生风蚀^[45]。

前人在青藏高原风蚀地貌、风蚀速率及其时空分布等方面已开展了很多重要的研究工作，但还存在一些问题，如研究区域尺度的风蚀特征时，使用的风蚀模型为第一次全国水利普查中所使用的经验模型^[46]，但难以确定其在青藏高原的适用性；青藏高原气候恶劣，地形复杂，难以选择 ^{137}Cs 示踪法所需要的本底值的采样点^[33]，进而产生误差；风洞模拟试验可以控制试验条件，对比不同环境条件对于风蚀的影响，但无论是施加的条件还是试验土样，与高原多变的外界环境存在较大差异，试验结果难以广泛推广；风蚀防治试验研究仅在小范围内开展，在青藏高原其他区域的适用性并不清楚。在后续研究中，应在田块尺度进行更多实地研究，获得高原多变环境下土壤风蚀的实测资料；应选择多种风蚀评估模型，根据实测值对各类风蚀模型进行比对，选择或者改进更适合青藏高原的模型，从而对青藏高原的区域尺度的风蚀进行分析和评价。

3 水力侵蚀研究

青藏高原地形多变，海拔高度从西藏东南部的几百米到西藏南部的 $8\ 000\text{ m}$ ^[6]，存在大量陡坡；降水量在空间、时间上分布不均，加之分布的冰川、积雪在暖季容易融化，一方面提供了大量融水，另一方面产生较多裸露地表^[47]，因此青藏高原部分区域极易发生水力侵蚀。藏东、藏南和湟水谷地是青藏高原水蚀作用强烈的区域^[48]，其中：藏东年降水量较多，地表受到流落下切作用明显；藏南地区是西藏重要的农业区，坡耕地受到降水、径流的打击和冲刷作用明显^[48]，“一江三河”区域山坡中下部面蚀、沟蚀非常强烈^[31]，河谷山麓洪积扇切沟发育广泛^[49]；湟水谷地土壤为黄土，水土流失严重，输沙模数可达到 $2\ 000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[48]。目前青藏高原的水力侵蚀研究，主要集中在水蚀特征与强度确定和水力侵蚀影响因素分析两个方面。

3.1 水蚀特征与强度

青藏高原水蚀特征与水蚀强度可通过试验或者模型计算获得。试验方法主要为人工模拟降雨、径流

小区监测和 ^{137}Cs 示踪技术。利用人工模拟降雨试验或小区监测等方法确定不同下垫面的产流产沙特征,是了解水蚀因素和评价水土保持措施效益的重要手段,研究对象主要为长江和黄河源区以及青藏公路边坡。李国荣等^[50]采用野外人工模拟降雨试验,发现黄河源区退化草地植被盖度在 40% 以下时,小区径流和泥沙含量增加幅度明显增大。李元寿等^[11]在长江和黄河源区 3 个小流域建立了不同植被盖度下的径流小区,监测结果显示植被盖度小于 30% 的小区在单次自然降雨后形成的泥沙量为盖度的 68%、92% 和 95% 小区产沙量的 2 倍~4 倍;同时,人工模拟降雨试验表明,5% 和 30% 的退化草地在降雨量仅为 7 mm、历时 15 min 就能产生明显的径流和泥沙。

青藏公路的修建,促进了青藏高原的交通运输条件和社会经济发展,公路边坡土壤侵蚀是影响公路安全运行的重要影响因素之一,因此一些学者对青藏公路边坡的水蚀特征、水蚀强度及其防治等方面进行了研究。如徐宪立等^[12]在青藏公路裸露边坡利用径流小区,对坡面产流产沙规律的研究表明,产流量、产沙量随坡长增加而减小,年侵蚀模数达到 $1.19 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$;单永体等^[51]对青海省共和至玉树公路裸露边坡进行野外放水冲刷试验的结果表明,产沙量随着放水时长的增加先增大,后减小。有学者通过试验发现在青藏公路边坡坡面布设“预制方格+植草”和 74% 三维网植草措施后,取得了良好的减水减沙效益(表 1)。

表 1 青藏公路边坡不同水土保持措施的效益

Table 1 Benefits of erosion control measures on the slopes alongside the Qinghai-Tibet Highway

地点 Site	试验方法 Experimental approach	措施 Measure	水土保持效益		备注 Note
			减水效益	减沙效益	
			Benefit in runoff reduction/%	Benefit in sediment reduction/%	
青藏公路桩号 (K3181), 沱沱河以 南 25km 处 (E92°18', N34°01')	径流小区监 测	预制块方格	61.91	99.36	徐宪立等 ^[52] ,表中减水减沙效 益是有防护措施小区与裸坡 小区监测结果对比结果
		土工格室	44.77	89.16	
		客土喷播植草	2.81	82.79	
		预制方格+植草	67.18	99.69	
共玉公路 D5 标段 (E97°11'31", N33°38'4")	径流冲刷试 验	边坡上部铺草皮	21.11~63.46	15.54~52.26	胡林等 ^[53] ,表中减水减沙效益 是有防护措施小区边坡的放 水冲刷结果与裸坡对比结果
		边坡中部铺草皮	31.39~71.15	23.14~74.91	
		37% 三维网植草	34.72~94.23	27.75~96.86	
		74% 三维网植草	36.94~92.31	39.54~97.91	

由于青藏高原恶劣的自然环境,布设小区获得水蚀强度的研究相对较少,因此一些学者利用 ^{137}Cs 技术开展了研究。邵全琴等^[54]使用 ^{137}Cs 示踪技术得到三江源高寒草甸的侵蚀速率为 $415 \sim 875 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,侵蚀速率与植被盖度呈反比。文安邦等^[55]利用 ^{137}Cs 示踪技术对雅鲁藏布江中游地区林草地的土壤侵蚀强度进行了分析,其平均侵蚀强度介于 $341 \sim 1\,971 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。李俊杰等^[35]通过 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 联合示踪技术,得到三江源地区玛沁县军功镇典型水蚀地貌的侵蚀速率为 $8.0 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,并且发现该区域由于 20 世纪 50—60 年代的极端暴雨产生的严重水土流失导致坡面出现 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的

空白区。

^{137}Cs 示踪技术较好地弥补了青藏高原进行实地土壤侵蚀相关试验的难点,是一种较为简便获取土壤侵蚀速率的方法。 ^{137}Cs 示踪技术的难点之一在于选择良好的本底值采样点,要求本底值采样点未发生土壤侵蚀。青藏高原环境恶劣,一些采样点难以判断是否发生侵蚀,因此将上文研究中本底值采样点的相关信息整理至表 2,供后续研究参考。

区域尺度的水蚀强度特征一般利用水蚀模型获得,USLE/RUSLE 由于其物理意义明确,参数较易获取,具有很强的实用性,在青藏高原的应用较广泛^[56]。康琳琦等^[57]使用 RUSLE 模型计算了青藏高

表 2 青藏高原部分 ¹³⁷Cs 本底值概况

Table 2 Background ¹³⁷Cs values of parts of the Qinghai-Tibet Plateau

采样点地理位置 Location of sampling site	经纬度 Longitude and Latitude	样点选择及取样深度 Site selection and sampling depth	计算公式 Equation	本底值 Background value/ (Bq·m ⁻²)	备注 Note
沱沱河	34°12'05.2" N, 92°26'49.9" E	①样点选择：样点容易选择时，选择植被覆盖良好，地表枯落物完整，不受外来水沙影响的区域； ②取样深度：30~60 cm	$A = A \cdot M \cdot r \cdot S^{-1}$; A^* : ¹³⁷ Cs 面积浓度, Bq·m ⁻² ; A : ¹³⁷ Cs 比活度, Bq·kg ⁻¹ ; M_r 样品重, kg; S : 土钻横断面积, m ² .	317~588	李俊杰等 ^[35]
玛沁县东倾沟乡	34°29'14.3" N, 99°57'23.5" E	①样点选择：地形平坦，草甸盖度达 90%~100%，无侵蚀，无堆积。	$CPI = 10^3 \sum_{i=1}^n C_i \cdot B_i \cdot D_i$; CPI 是样品	968~1 245	
玛沁县军牧场	34°20'46.8" N, 100°27'58.3" E	①样点选择：在坡面顶部采集样品，近似认为坡面顶部未发生土壤侵蚀。	¹³⁷ Cs 总面积浓度 (Bq·m ⁻²) ; i 为取样土层序号 ; n 为采样层数 ; C_i 为第 i	1 379~2 049	
玛沁县军功镇	34°39'42.2" N, 100°37'22.9" E	②取样深度：0~24 cm 土层每 2 cm 取一次样。	采样层中 ¹³⁷ Cs 的比活度 (Bq·kg ⁻¹) ; B_i 为第 i 采样层的土壤容重 (t·m ⁻³) ; D_i 为第 i 采样厚度 (m)。	1 623~1 689	
玉树县玛龙村	32°58'25.3" N, 96°19'01.1" E	耕地堆积区：>40 cm。		2 130	
称多县珍秦乡	33°24'26.8" N, 97°20'25.4" E	①样点选择：未受人类活动影响的天然草场。		1 969	
玛多县野牛沟乡	34°27'51.98" N, 97°58'9.4" E	②取样深度：30 cm		2 538	邵全琴等 ^[54]
拉孜县	—	①样点选择：平坦的农耕地 (0°)。		969	文安邦等 ^[55] , 文中未提供准 确地理坐标, 以“—”表示 空缺。
日喀则市	—	②取样深度：非农地侵蚀区 20~30 cm; 非农地堆积区 30~40 cm; 农耕地侵蚀区 20~35cm; 农耕地堆积区：>40 cm。	文章未提供本底值计算方法	830.6	
扎囊县	—			1 114.0	
拉萨市	—			1 055.5	
萨迦县城西 2.5 km	28°54' N, 88°00' E			982.11	
五道梁北麓河沿	34°54' N, 92°55' E			1 738.36~2 993.60	严平等 ^[33]
五道梁贡冒日玛山	35°06' N, 92°47' E		计算方法见本表邵全琴等 ^[54]	1 738.36~2 993.60	

原 1984—2013 年的土壤侵蚀量, 分析了土壤侵蚀强度的时空变化特征, 表明剧烈侵蚀主要分布于日喀则、拉萨、昌都等青藏高原南部地区。方广玲等^[58]利用 RUSLE 模型, 计算了拉萨河 2010 年的土壤侵蚀量, 得到拉萨河流域的土壤侵蚀强度空间分布特征, 结果表明流域平均土壤侵蚀模数为 $3\ 076.6\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 中度 ($2\ 500\sim 5\ 000\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 侵蚀面积比例可达 59%。王雪璐^[59]依据模拟退火算法 (一种基于概率的反复迭代算法) 从影响各类型土壤侵蚀的 33 个潜在参数 (多年平均气温、多年平均风速和降水侵蚀力等) 中选择出 13 个, 并使用 Cubist 建模方法, 得到自建的模拟退火-Cubist 模型; 并使用自建模型和 RUSLE 对三江源地区高寒草地的土壤侵蚀情况进行了评估, 再与实测法 (^{137}Cs 示踪) 进行对比, 确定模拟退火-Cubist 模型得到的值更接近实测值, 优于 RUSLE 模型, 原因是 RUSLE 并未考虑高寒地区影响风蚀和冻融两种侵蚀的各类因子。Teng 等^[60]使用 RUSLE 和 CMIP5 气候模型计算得出当下青藏高原多年平均土壤侵蚀模数为 $276\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 预测至 2050 年, 将达到 $317\sim 391\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。张鹏等^[26]利用 CSLE 对西藏“一江两河”地区的土壤侵蚀现状进行分析, 得出水力侵蚀面积为 2.12 万 km^2 。宫奎方等^[61]使用 CSLE, 对昌都县的土壤侵蚀状况进行了评估, 计算得到昌都县年均土壤侵蚀模数为 $789\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 西部地区的土壤侵蚀强度大于东部。此外, 也有人尝试使用分布式水文模型对西藏高山深谷区域的水土流失进行模拟^[62], 通过多情景分析, 预测植被盖度、降雨等因素变化对该区域水土流失的影响程度。

上述研究中水蚀的主要侵蚀营力为降水, 而融水侵蚀也是青藏高原最主要的水蚀类型之一, 其营力主要为冰川积雪融化后形成的季节性径流^[4]。其强度评价主要依据经验模型, 陈飞^[63]利用纳木错流域冰雪融水资料和第一次水力普查资料建立了纳木错流域融水侵蚀强度评价体系, 对该流域的融水侵蚀强度进行了分析, 其中, 融水侵蚀强烈区域占流域面积的 12.36%; 并使用自动观测系统观测了扎当冰川 (海拔 5 400 m) 冰舌处的径流和泥沙过程, 结果表明含沙量和径流量呈显著线性相关^[64]。冯君园等^[65]基于主成分分析, 选取冰川积雪变化因子 (利用不同时期 MODIS 冰川积雪产品得到冰川积雪的变化情况)、土壤可蚀性因子和坡向等 10 个因子评

价了那曲地区融水侵蚀分布强度, 指出该地区影响融水侵蚀的主要影响因子为冰川积雪变化因子、土壤因子、地形因子和气候因子; 也分析了该地区融水侵蚀形成的洪积物的影响因素, 主要包括风速、植被、坡度、土壤可蚀性、气温年较差等 5 个因子, 并提出洪积扇面积可作为指标反映融水侵蚀沉积的强弱^[66]。

3.2 水力侵蚀影响因素

3.2.1 地质地貌 青藏高原被称为世界屋脊, 在印度洋板块和亚欧板块影响下, 目前还在以大约 $10\ \text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的平均速度上升^[67], 在抬升运动和流水作用下, 形成众多高差达千米的峡谷, 地势险陡, 同时分布有众多地震带, 地质活动对地壳表层性质及土壤侵蚀的发生有重要影响。青藏高原东北部两百万年以来, 地层抬升和水流下切作用使河流两岸阶地存在数百米高差, 河流的侵蚀速率增加近 10 倍^[68]。百万年来, 雅鲁藏布江宽谷段相对于下游峡谷河段抬升较慢, 宽谷段泥沙蓄积约 5 180 亿 m^3 , 而下游因抬升速率快而形成峡谷^[69]。青藏高原在复杂的地质活动和外营力的作用下形成了多变的地貌环境, 有学者将青藏高原的地貌分为低海拔丘陵、小起伏中山、大起伏高山等 16 种地貌形态^[70]。地貌通过坡度、坡长或者坡度坡长的不同组合以及坡向来影响土壤侵蚀^[71], 有研究表明, 拉萨河流域的水蚀强度在坡度为 $15^\circ\sim 25^\circ$ 的区域最大, 其次是 $25^\circ\sim 35^\circ$ 的区域^[58]。

3.2.2 降水和融水 降雨的年内分布会对土壤侵蚀产生影响, 青藏高原地区水土流失集中在 6—9 月, 该时间段输沙量占全年 90% 左右, 其中 7—8 月输沙量占 65% 左右^[48]。R (降雨侵蚀力) 为 USLE/RUSLE 中反映区域降雨侵蚀能力强弱的一个重要指标。三江源地区的降雨侵蚀力, 在 1961—2012 年不断增大, 原因是该地区降雨次数和降雨量增多^[72]。辜世贤等^[73]基于月平均和年平均降雨量资料, 结合前人在西藏自治区的研究, 比较了多种计算 R 的模型, 指出在西藏东部区域, 降雨侵蚀力的计算可使用基于年降雨量的指数函数模型, 具有较高精度。降水形态也影响着水土流失, 相同降水量时, 降雪融水较降水和雨夹雪产流量增加 2.1 倍~3.5 倍; 但相比降雨条件, 可减少约 45.4%~80.3% 的产沙量^[11]。

不同于降水, 融水是冰川积雪融化后的季节性

径流,受温度影响较大,是青藏高原的一种特殊的水蚀营力^[63]。Ban 等^[74]通过室内模拟试验,对冻土融化后的坡面与未冻结坡面的土壤侵蚀过程差异性进行了对比研究,结果表明融化后的坡面其最大含沙量要高于未冻结坡面,且含沙量受融化深度的影响较大^[75]。同时,青藏高原广泛存在冻融作用,冻融作用使土壤中的水分不断发生相变,水分体积不断改变导致土体收缩膨胀,破坏土壤团聚体,引起土壤可蚀性增大,二者共同决定区域融水侵蚀强度。

3.2.3 植被 三江源地区植被盖度高于 60%以上且完整草皮层的高寒草甸,具有良好的水土保持功能^[54],而植被破坏后,将出现严重水蚀,速率可达 $8.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[35]。长江和黄河源地区,高覆盖度植被能有效降低由降水径流产生的泥沙量^[11],而低覆盖度植被区域的土壤,土壤水分因土壤温度提升较大而以较快的速度流失,同时带走更多的土壤,造成严重水土流失^[76]。雅江中游地区的土壤侵蚀强度最重要的影响因素为林草盖度^[55],其中拉萨河流域植被盖度大于 60%的区域,中度以上的侵蚀面积占比仅为 28.3%^[58]。也有人开始关注植被多样性与土壤侵蚀的关系,Hou 等^[77]在三江源地区利用 ^{137}Cs 示踪法研究发现植被盖度随着物种多样性的增大而减小,土壤侵蚀随之增大。青藏高原幅员辽阔,气候、地形和土壤等多变,植被分布有明显的地带性规律以及植被的垂直地带性规律^[78],但目前少有人关注到其对土壤侵蚀的影响。

3.2.4 土壤 目前,青藏高原有关土壤性质对土壤侵蚀影响方面的研究很少,主要是利用不同的经验模型计算不同区域的土壤可蚀性及其分布。刘斌涛等^[79]使用 EPIC 中土壤可蚀性(K)值的计算公式,结合收集的 1 255 个土壤剖面的颗粒组成和有机质等资料,采用美国制土壤粒径分级制度,计算得到青藏高原平均 K 值为 0.23,高可蚀性土壤分布在柴达木盆地、藏东低海拔河谷和羌塘高原地区,同时具有明显垂直分带规律,垂直方向上 1 000~2 000 m 海拔高度的土壤具有较高可蚀性。王小丹等^[80]采用与上述相同的方法,收集了西藏自治区的土壤普查数据,将其土壤粒径制从国际制转换为美国制,计算了西藏各土种的可蚀性(K 值范围为 0.269 3~0.495 9),利用 GIS 得到西藏可蚀性分布图,其中,藏西北地区的土壤可蚀性较低,藏东南地区的土壤可蚀性较高。梁博等^[81]利用 EPIC 模型计算了喜马

拉雅山南麓(墨脱县)4 种林地下山地黄棕壤、山地黄壤、新成土、漂灰暗棕壤的 K 值,其大小分别为 0.19、0.28、0.34、0.25,发现可蚀性与土壤有机质呈正相关,其原因是该区域的地质历史年轻,土壤的风化程度低,粉砂粒占主体地位,并且砾石含量高,而土壤有机质主要存在于黏粉粒中,受粉砂粒的影响,有机质对黏粉粒的胶结能力降低,从而土壤团聚体的破坏率增高,因此,土壤的抗蚀性表现出随土壤有机质的增高而降低。辜世贤等^[82]对比了 3 种计算土壤可蚀性的公式,确定 RUSLE 中 K 的计算方法适用于藏东矮西沟的可蚀性计算,流域平均 K 值为 0.005,不同土壤 K 值大小顺序为:灰褐土(0.86×10^{-2})>高山草甸土(0.43×10^{-2})>棕壤(6.24×10^{-7})>暗棕壤(7.20×10^{-7})。上述利用 EPIC 模型计算所得结果之间相差不大,但与最后一个由 RUSLE 模型中 K 值计算方法所得结果差 2~5 个量级,说明土壤可蚀性计算方法对计算结果影响很大。后续应进行部分实地研究,对不同计算方法进行校准和比对,选择或者修正适合青藏高原的计算方式进行区域性土壤可蚀性研究。

3.2.5 人类活动 随着青藏高原人口密度的增大,人们在农牧业生产过程中,开垦、过渡放牧和砍伐等活动造成森林和草被退化、消失^[35],引起土壤侵蚀加剧。西藏自治区现有耕地 60%~70%的坡度大于 6° ,易产生水土流失^[58]。环青海湖地区,大面积油菜收获后,农田裸露期长达半年以上,每年该区域产生大量泥沙随径流进入青海湖^[47]。工程建设也是促进土壤侵蚀的一个重要方面,在施工过程中地表植被和土层受到破坏,地表容易发生侵蚀,如青藏公路建设过程中产生大量裸坡,其坡面抗蚀力极差,易在降雨作用下形成剧烈水土流失^[53]。不过人类活动对土壤侵蚀也有抑制作用,退耕还林(草)工程、水土保持综合治理工程等工作,均减轻了土壤侵蚀^[83]。

上述研究表明,青藏高原水蚀研究相比冻融侵蚀和风蚀研究涉及的面广,也更为深入;高寒条件下水蚀特征、区域水蚀强度和水利侵蚀的影响因子、水蚀防治等方面的研究均有相关报道,但在各方面均存在一些不足。青藏高原地貌形态复杂多样,目前仅有坡度对水蚀强度的影响方面的研究^[58],在坡长、坡度和坡长不同组合以及坡向如何影响水蚀,需要进一步研究。利用水蚀模型进行区域水蚀强度

特征的宏观分析较多,但是使用模型时很少有适用性评价和模型结果验证。青藏高原侵蚀环境复杂,多种侵蚀类型在时间和空间上交错进行,以雅江中上游段为例,时间尺度上:冬春季节多发生冻融侵蚀和风力侵蚀,夏秋季节多发生水力侵蚀;空间尺度上:河流阶地、山间洪积扇等海拔相对较低的区域多发生水力侵蚀,而高海拔区域多发生风蚀和水蚀,因此在青藏高原,用 USLE/RUSLE/CSLE 等水力侵蚀模型区估算整个区域或者部分区域的水蚀量并不合适,其他营力产生的侵蚀量对水力侵蚀也有一定贡献,因此使用以上模型所得结果可能偏小。因此,在未来研究中应加强从田块尺度到小流域尺度的实测数据,对不同尺度的水蚀机理及发生规律等方面进行进一步研究。

4 重力侵蚀研究

重力侵蚀是土壤及其母质或者基岩,主要在重力作用下发生位移和堆积的过程,主要包括泄溜、崩塌、滑坡和泥石流等形式。青藏高原的崩塌、滑坡、泥石流等重力侵蚀趋于活跃,由此引发的灾害频率呈增加趋势,受到政府部门和众多学者的关注^[84]。青藏高原主要重力侵蚀区域集中在林芝、昌都以及雅江一线^[85],此处构造活动活跃、地势陡峭、水量充沛,有利于重力侵蚀的发生。青藏高原重力侵蚀的研究内容包括崩塌、滑坡和泥石流的分类及其表现特征和影响因素等方面。

4.1 重力侵蚀分类及表现特征

崩塌、滑坡和泥石流根据其物质组成、发生机理和分布区域等,被分为多种类型。西藏樟木扎美拉山崩塌源区的岩体风化强烈,裂隙发育广泛,发育了4处典型危岩体,根据危岩体岩石性质以及崩塌机理分析,崩塌可分为坠落式、倾倒式和滑移式^[86];西藏林芝2017年11月30日由地震引起的崩塌类型多样,沿帕隆藏布江和雅鲁藏布江分布,根据物质来源可分为岩质崩塌、坡积崩塌、崩积崩塌、洪积物崩塌、冰崩泥石流崩塌、冰碛崩塌、和滑坡堆积体崩塌,而根据发生机理可分为:震动-滚落型崩塌、拉裂-倾倒型崩塌、震动-滑移型崩塌和震动-坠落型崩塌^[87]。黄河上游干流区,由于特殊地貌和地质构造,滑坡灾害频发,根据滑坡体空间形态可以分为半圆状、葫芦状、梯形状、三角状、矩形状、舌状

和长弧形状等7种滑坡类型^[88],而根据滑坡体岩土类型可分为土质、岩质、碎块石、岩土质、碎块石土质和岩质碎块石等6种滑坡类型^[88]。帕隆藏布流域是西藏境内泥石流最活跃,类型也最全的区域,泥石流按照成因划分为冰川型泥石流、冰湖溃决型泥石流和降雨型泥石流,冰川型泥石流根据动力来源由可分为冰川融水泥石流和巨型冰雪崩滑泥石流,冰湖溃决型和降雨型的动力来源分别为溃决形成的洪水和暴雨^[89]。

4.2 重力侵蚀影响因素

青藏高原的崩塌、滑坡和泥石流等重力侵蚀活动有群发性和链生性的特点^[84],其发生原因有很多共同之处,包括构造活动、地形地貌、气候和人类活动等。构造活动形成断裂带,从中会产生众多破碎的岩体,为崩塌、滑坡和泥石流的形成提供了地形^[90]和物质条件^[84],如西藏樟木扎美拉山崩塌物质主要来源为陡崖顶部的破碎岩体^[86],易贡特大山体滑坡的物质来源主要为花岗岩、板岩和大理岩被强烈风化后形成的石块和沙土构成^[91]。抬升运动和流水下切作用形成陡峭的地形地貌,岩土体容易失稳,容易发生崩塌和滑坡^[87];坡向也影响着重力侵蚀的发生,阳坡寒冻风化强烈,植被稀疏,土层薄,形成的松散固体物质相对较多,加之冰雪融水,发生的崩塌、滑坡和泥石流,相比阴坡规模大、数量多^[92]。气候变暖引起的大量融水,为泥石流的产生提供了动力条件,帕隆藏布河河谷发育的冰雪融水泥石流沟和雨水泥石流沟多达124条^[93];西藏易贡2000年4月9日发生的特大滑坡,是由于气温转暖发生雪崩,使上亿立方米滑坡体饱和失衡导致滑坡^[91];在前期高温作用下,2007年9月4日西藏波密县松绕天摩沟源区冰川发生“冰崩”,冰川下部不断有水流涌出,因此产生的泥石流的在沟口处形成体积约4.41万 m^3 的扇形堆积体^[93],冰川型泥石流、冰湖溃决型泥石流和冰雪融水泥石流等重力侵蚀的发生,均与区域冻融作用和融水径流密切相关。发生滑坡和泥石流的可能性也与前期降雨、雨型和雨强密切相关^[85]。人类的工程建设活动的重力侵蚀发生的影响因素之一,2017年11月18日发生的林芝地震,道路两侧崩塌点有148处,占该次地震出现崩塌点总数的71%^[87];西藏樟木稳定的古滑坡在人类工程扰动(包括工程切坡、随意排水、新增建筑和重车碾压等)下,产生大量变形体和浅层滑坡^[94]。

可见,重力侵蚀是青藏高原比较严重的一类自然灾害,目前的研究侧重对重力侵蚀的分类、表现特征及其原因,但在重力侵蚀的预测方面多有不足。重力侵蚀类型以及诱发因素多样,在后续研究中,应分区域、分类型对重力侵蚀进行实地观测,探明重力侵蚀的发生机制,发展适合各区域的重力侵蚀预报模型,进而对重力侵蚀进行有效防治,保障生态和人民生命财产安全。

5 问题与展望

5.1 冻融侵蚀的定义存在分歧

我国对冻融侵蚀的研究相对于风蚀和水蚀较晚,其定义尚未明晰。唐克丽^[95]和王向阳^[19]强调冻融侵蚀是岩土在冻融作用下发生的机械破坏和位移。刘淑珍等^[6]、吴发启和张洪江^[71]认为冻融侵蚀是一种特殊复合侵蚀,第一阶段以寒冻风化为主,此时温度变化和岩土内部水的相变引起岩土破碎;第二阶段是寒冻风化形成的风化物在重力、冰雪融水力、冻融力等外营力作用下产生位移。这是目前国内两种冻融侵蚀的定义,差别在于冻融侵蚀是否包含第二种定义中的第二阶段。定义的不清晰导致冻融侵蚀分类产生一些“混乱”,比如景国臣^[13]认为冻融侵蚀是指岩土在冻融作用下产生机械破坏和位移,并使其无法恢复原状的现象;该定义中强调冻融作用的物理机械破坏,但作者在后续分类中,将融雪侵蚀、冰川侵蚀、冻融风蚀等以其他外营力为主导的侵蚀均统一归类为冻融侵蚀,然而这些侵蚀的主导外营力是融水、冰川运动、风力等,而并非冻融作用。

因冻融侵蚀的定义及分类不明确,冻融侵蚀监测的具体指标和内容也无法具体确定,难以对其量化表达。张科利和刘宏远^[96]认为,冻融作用并不能直接导致土壤颗粒移动,只有在降雨、径流、风力和重力等其他外营力作用时才真正体现出来;真正因冻融循环造成的土壤侵蚀量很小,将冻融侵蚀改称冻融作用更为合适^[96]。青藏高原一直以来在我国被划分为冻融侵蚀区,但大部分侵蚀量是在冻融作用影响下由其他营力作用于土壤而产生的,冻融作用对于土壤侵蚀更多的是促进作用,所以上文中的第二种定义在青藏高原可能更为合适。在以后坡面尺度的研究中,如何量化冻融作用影响下的土壤侵蚀,可考虑借鉴

USLE/RUSLE 系列模型;USLE/RUSLE 考虑到了融雪侵蚀和融水侵蚀,但并未单独提出冻融侵蚀的概念,而是将融雪和融水作为影响降雨侵蚀力的一个因子,对 R 不断地进行修订,进而完善水蚀模型^[97],量化冻融影响下的土壤侵蚀量。在青藏高原,可利用该思路,进行试验,量化冻融作用对 R、K、C 和 P 因子的影响,对模型加以修正和完善,形成一个水蚀影响因素 $F(R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \cdot F)$,然后将青藏高原的冻融作用对侵蚀的影响转换为影响水蚀的一个因素进行综合分析研究。

5.2 地质侵蚀和土壤侵蚀的概念存在混淆

青藏高原除了湟水谷地、青海湖盆地、堆龙曲谷地和拉萨河河谷段区域分布的栗钙土和山地灌丛土有较厚的腐殖层,发育相对成熟^[98],其余区域大多为母质(粗砾质或沙砾石较多),或岩石及其风化物。在地表砾石占比较多的青藏高原^[83],发生的更多是土壤侵蚀还是地质侵蚀?地质侵蚀是自然过程,也称做自然侵蚀,是指不受人类干扰时,自然状态下外营力对土体的分离和搬运,其侵蚀速率要低于成土速率^[99],其侵蚀的对象不仅包含土壤颗粒,也包括岩石和风化物^[100],这与青藏高原的侵蚀环境更相符。与之相对的概念是加速侵蚀(人为侵蚀),是由于砍伐森林、过度放牧和坡耕地开垦等人类活动引起的侵蚀,其侵蚀速率远大于成土速率,导致土壤破坏和流失;目前土壤侵蚀研究针对的是加速侵蚀,以期通过水土保持等人类活动来减缓日益加剧的加速侵蚀^[99]。因此,土壤侵蚀研究理应区分发生的是土壤侵蚀还是地质侵蚀^[100],然而目前有关青藏高原的冻融侵蚀和风力侵蚀研究中,有一定比例的研究混淆了土壤侵蚀和地质侵蚀,扩大了土壤侵蚀的研究范围。如王向阳^[19]在监测寒冻剥蚀量时,是在一块较大的岩石下方收集冻融风化的量,此时侵蚀的对象并不是土壤,并非由于人为活动引起的岩石风化,应属于地质侵蚀;Rohrmann 等^[36]测定第三纪沉积岩中 ^{10}Be 含量后确定柴达木盆地沉积岩的风蚀速率范围在 $0.05 \sim 0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,但此时侵蚀的对象为沉积岩,研究对象也不是土壤。

青藏高原地域辽阔,很多区域人类干扰很小甚至无法到达,发生的基本为地质侵蚀。地质侵蚀的产物,比如风化的岩石碎屑、撒落的坡积物等,大多是土壤发育初级阶段所必须,这对于成土过程是有利的,并且地质侵蚀是很难防治的,应更多考虑

如何去利用这类侵蚀。如雅鲁藏布江流域山间发育众多洪积扇^[101],其物质来源为高大山系中千百年地质侵蚀的产物;洪积扇的水土环境较好,分布有大量农田、牧草地和村落等。因此,发生在洪积扇以上山坡的地质侵蚀对形成洪积扇有利,而真正需要做的是防止洪积扇发生冲蚀,以保护洪积扇^[101]。未来青藏高原的侵蚀研究更应该关注土壤侵蚀,而非不加以区分,与地质侵蚀混为一谈。

5.3 基础数据缺乏

由于高原气候和海拔的影响,青藏高原与冻融侵蚀、风力侵蚀、水力侵蚀和重力侵蚀相关的基础数据难以采集。温度和土壤水分数据是研究冻融侵蚀的基础,而目前一般以气温变化数据反映土壤温度变化^[27],利用遥感数据获得大面积的土壤水分数据,实测值非常少^[102],导致冻融侵蚀评价模型并不是很准确^[9]。径流泥沙监测数据是了解坡面和流域尺度水蚀规律的重要途径,但目前除了青藏公路边坡、三江源等区域有部分实测数据,其他区域基本处于空白状态;土壤和植被等是区域侵蚀评价所需的基础数据,但这部分的实测数据也非常稀缺。风蚀速率是了解防风蚀措施效益和评价区域风蚀强度等方面的基本参数,但在青藏高原,非常缺乏风蚀的野外观测数据,风力侵蚀评估基本依靠预报模型,模型所得结果也很少用实测数据来进行验证。

目前,青藏高原冻融作用影响土壤可蚀性方面的室内研究相对丰富,集中在研究冻融循环对土壤理化性质的影响^[103],积累了一些实测数据,但这些数据基本依靠室内模拟试验获得,在野外真实环境中,冻融作用对土壤性质的影响并不会一直伴随冻融循环持续进行,有一定的变化范围,土壤性质也不会无限制改变,因此也需要加强野外实测,为室内研究可蚀性因子提供参数依据^[96]。此外,青藏高原大部分区域地表土层砾石含量较大,砾石含量及其分布对可蚀性有较大影响,但在室内试验中未考虑砾石的影响,而且几类土壤可蚀性计算公式中也未将砾石的作用考虑在内^[104]。因此,在青藏高原地区利用可蚀性公式计算所得值,其正确性应值得商榷。

青藏高原有关土壤侵蚀的基础数据缺乏,已经影响了土壤侵蚀相关研究的开展和继续深入,应根据研究需求,在野外进行不同尺度的土壤侵蚀监测,获得实测数据。

5.4 关注温度变化对土壤侵蚀的影响

目前有关青藏高原温度变化方面的研究较多,但少有研究定量地去分析青藏高原温度的变化对土壤侵蚀的影响。青藏高原是世界第三极,其升温速率为全球平均值的2倍^[1],因分布有大量冰川、永久冰雪和冻土,其生态环境对温度相对于我国其他区域更为敏感。温度升高,区域气候出现暖干化,导致土壤湿度下降、地表蒸发量增大和多年冻土退化等环境问题,进一步导致地表植被退化、枯萎,为风蚀创造有利条件^[45]。气候变暖导致近年来青藏高原冰川迅速消退,冰川、积雪和冰湖融化形成的融水,使地表径流增加^[105],水力侵蚀加剧^[63]。青藏高原广泛分布的冻土,因温度升高,其强度降低,加上水分作用,易产生热融性滑坡^[2]。青藏高原由重力侵蚀产生的特大灾害频繁,对一些区域人民的生命和财产安全产生了严重的损害^[106],可见重力侵蚀也进一步加剧。综上,温度变化通过影响冻融循环过程、地表覆盖和水文要素等方面间接作用于青藏高原的各类土壤侵蚀环境,加剧了水土流失。因此,在全球升温的大背景下,温度对于青藏高原土壤侵蚀的影响是多方面的,应对此加以重视。

5.5 重视土壤侵蚀防治示范研究

现阶段青藏高原区域性的水土保持理论和实践基础严重不足,水土流失治理工作应以实验示范为主^[107]。水利部近年来在全国范围内开展水土保持科技示范园区,这些示范园区已成为土壤侵蚀治理、监测、科研和宣传教育等方面的重要基地和平台^[108]。目前青藏高原土壤侵蚀防治方面的研究,多为治理区域的划分^[8]和治理模式^[30,107]的提出,停留在“文章”中,少有实地示范,应加大经费投入力度,建立几个示范点,为大面积的土壤侵蚀治理提供科学依据。难以开展土壤侵蚀治理的原因主要有以下3点:一是由于严酷的自然环境,植被遭到破坏后很难恢复其生态功能;二是特殊的冻融作用环境和夏秋季节大量高山冰雪融水造成工程措施损毁;三是治理费用来源单一,水土保持措施管护不足^[101]。然而,目前青藏高原的经济正处于快速发展阶段,不可避免地会对地表产生破坏;而青藏高原地表脆弱的水土环境,一旦受到破坏,就很难恢复,无法正常发挥其生态功能。遏制地表土地沙化和水土流失,保护珍贵的土壤是高原生态环境建设的最

基础的内容, 地方对此有急切需求。因此, 应加大青藏高原土壤侵蚀防治工作的试验与示范研究工作, 为地区土壤侵蚀防治提供经验, 进而为保障我国生态屏障提供决策依据。

参考文献 (References)

- [1] Yao T D, Chen F H, Cui P, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (9): 924—931. [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.]
- [2] Niu F J, Cheng G D, Lai Y M, et al. Instability study on thaw slumping in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26 (3): 402—406. [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.]
- [3] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20 (14): 1729—1742.
- [4] Feng J Y, Cai Q G, Li Z X, et al. Research progresses of melt water erosion in the high altitude and cold regions of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22 (3): 331—335. [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.]
- [5] Teng H F. Assimilating multi-source data to model and map potential soil loss in China[D]. Hangzhou: College of Environmental and Resources, Zhejiang University, 2017. [滕洪芬. 基于多源信息的潜在土壤侵蚀估算与数字制图研究[D]. 杭州: 浙江大学环境与资源学院, 2017.]
- [6] Liu S Z, Zhang J G, Gu S X. Study on the soil erosion types in Tibet[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24 (5): 592—596. [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.]
- [7] Zhang J G, Wen A B, Chai Z X, et al. Characteristics and status of the soil erosion in Tibet[J]. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21 (S1): 148—152. [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 (S1): 148—152.]
- [8] Zhao J, Li R. Soil erosion and subarea characteristics in Yarlung Tsangpo River Basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25 (3): 42—45. [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.]
- [9] Zhang J G, Liu S Z, Yang S Q. The classification and assessment of freeze-thaw erosion in Tibet[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17 (2): 165—174.
- [10] Lu C X, Yu G, Xie G D, et al. Wind tunnel simulation and assessment of soil conservation of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (2): 319—326. [鲁春霞, 于格, 谢高地, 等. 高寒草地土壤保持功能的风洞模拟及其定量评估[J]. *自然资源学报*, 2006, 21 (2): 319—326.]
- [11] Li Y S, Wang G X, Wang Y B, et al. Impacts of land cover change on runoff and sediment yields in the headwater areas of the Yangtze River and the Yellow River, China[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17 (5): 616—623. [李元寿, 王根绪, 王一博, 等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17 (5): 616—623.]
- [12] Xu X L, Zhang K L, Pang L, et al. Laws of soil erosion on sideslopes of Qinghai-Tibet highway[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26 (2): 2211—2216. [徐宪立, 张科利, 庞玲, 等. 青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2006, 26 (2): 2211—2216.]
- [13] Jing G C. Study on types of freeze-thaw erosion and its characteristics[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003 (10): 17—18. [景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. *中国水土保持*, 2003 (10): 17—18.]
- [14] Dong R K, Xu Z Y, Yang C Y. Dynamic and characteristic of freezing-thawing erosion on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14 (4): 12—16, 42. [董瑞琨, 许兆义, 杨成永. 青藏高原冻融侵蚀动力特征研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14 (4): 12—16, 42.]
- [15] Dong R K. Characteristic of freezing-thawing erosion on Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2001. [董瑞琨. 青藏高原冻融侵蚀特征研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2001.]
- [16] Zhang J G, Liu S Z. A new way for defining the freezing-thaw erosion area in Tibet[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21 (2): 32—34, 47. [张建国, 刘淑珍. 界定西藏冻融侵蚀区分布的一种新方法[J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21 (2): 32—34, 47.]
- [17] Li Z G, Liu S Z, Zhang J G, et al. Survey method of freeze-thaw erosion in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10 (4): 1—5. [李智广, 刘淑珍, 张建国, 等. 我国冻融侵蚀的调查方法[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10 (4): 1—5.]
- [18] Wang L Y, Xiao Y, Jiang L, et al. Assessment and analysis of the freeze-thaw erosion sensitivity on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39 (1): 61—69. [王莉雁, 肖焱, 江凌, 等. 青藏高原冻融侵蚀敏感性评价与分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39 (1): 61—69.]

- [19] Wang X Y. Observation of freezing-thaw erosion in Tibet Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2014 (11): 51—53. [王向阳. 西藏高原冻融侵蚀观测探索[J]. 中国水土保持, 2014 (11): 51—53.]
- [20] Li D M. Initial analysis for water and soil moving distribution and its damage and difficulty of management in Tibet[J]. *Tibet Science and Technology*, 2001 (1): 21—24. [李代明. 西藏水土流失分布成因、危害及治理难度初步分析[J]. 西藏科技, 2001 (1): 21—24.]
- [21] Qian D F, Zhuang X H, Zhang B. Analysis on freeze-thaw erosion type in alpine area and driving force[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2014 (6): 16—17, 69. [钱登峰, 庄晓晖, 张博. 高寒区冻融侵蚀类型及驱动力分析[J]. 中国水土保持, 2014 (6): 16—17, 69.]
- [22] Zhao X L, Zhang Z X, Wang C Y, et al. Dynamic monitoring of soil erosion based on RS and GIS in central Tibet[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 13 (2): 44—50. [赵晓丽, 张增祥, 王长有, 等. 基于 RS 和 GIS 的西藏中部地区土壤侵蚀动态监测[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 13 (2): 44—50.]
- [23] Ouyang Y, Shen W S, Yang K, et al. The trend of freeze-thaw erosion in Yarlung Zangbo River basin in nearly twenty years[J]. *Journal of Mountain Research*, 2014, 32 (4): 417—422. [欧阳琰, 沈渭寿, 杨凯, 等. 近 20a 雅鲁藏布江流域冻融侵蚀演变趋势[J]. 山地学报, 2014, 32 (4): 417—422.]
- [24] Guo B, Jiang L. Evaluation of freeze-thaw erosion in Qinghai-Tibet Plateau based on multi-source data[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37 (4): 12—19. [郭兵, 姜琳. 基于多源地空耦合数据的青藏高原冻融侵蚀强度评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37 (4): 12—19.]
- [25] Zhang J, Sha Z J, Song C B, et al. Freeze-thaw erosion in the Buha River basin[J]. *Journal of Earth Environment*, 2011, 2 (6): 680—684. [张娟, 沙占江, 宋昌斌, 等. 布哈河流域冻融侵蚀研究[J]. 地球环境学报, 2011, 2 (6): 680—684.]
- [26] Zhang P, Gesangzhuoma, Fan J R, et al. Soil erosion status and distribution characteristics in the ‘One River and Two Streams’ Region in Tibet[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24 (1): 49—53, 2. [张鹏, 格桑卓玛, 范建容, 等. 西藏“一江两河”地区土壤侵蚀现状及分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24 (1): 49—53, 2.]
- [27] Shi Z, Tao H P, Liu S Z, et al. Research of freeze-thaw erosion in the Three-River-Source area based on GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (19): 214—221, 300. [史展, 陶和平, 刘淑珍, 等. 基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀评价与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (19): 214—221, 300.]
- [28] State Administration of Forestry Grassland. A Bulletin of Status Quo of Desertification and Sandification in China[S]. 2011. [国家林业与草原局. 中国荒漠化和沙化状况公报[S]. 2011.]
- [29] Li Q, Zhang C L, Zhou N, et al. Spatial distribution of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38 (4): 690—700. [李庆, 张春来, 周娜, 等. 青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J]. 中国沙漠, 2018, 38 (4): 690—700.]
- [30] Zhang G P, Liu J Y, Zhang Z X. Study on wind erosion and changes of sandy land in Tibet[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (1): 158—161. [张国平, 刘纪远, 张增祥. 西藏自治区土壤风力侵蚀与沙地变化研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (1): 158—161.]
- [31] Liu S Z, Liu H J, Zhong X H, et al. The study on evaluation system and monitoring method of soil erosion on the Tibet plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27 (1): 76—81. [刘淑珍, 刘海军, 钟祥浩, 等. 青藏高原土壤侵蚀评价体系及监测方法[J]. 山地学报, 2009, 27 (1): 76—81.]
- [32] Li H D, Shen W S, Zou C X, et al. Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (16): 4981—4992. [李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征[J]. 生态学报, 2012, 32 (16): 4981—4992.]
- [33] Yan P, Dong G R, Zhang X B, et al. Preliminary results of the study on wind erosion in Qinghai-Tibet Plateau using ^{137}Cs technique[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (2): 199—204. [严平, 董光荣, 张信宝, 等. ^{137}Cs 法测定青藏高原土壤风蚀的初步结果[J]. 科学通报, 2000, 45 (2): 199—204.]
- [34] Yan P, Dong G R. Application of the caesium ^{137}Cs technique on wind erosion in the Gonghe basin, Qinghai Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (4): 497—503. [严平, 董光荣. 青海共和盆地土壤风蚀的 ^{137}Cs 法研究[J]. 土壤学报, 2003, 40 (4): 497—503.]
- [35] Li J J, Li Y, Wang Y L, et al. Study of soil erosion on the east-west transects in the Three-Rivers headwaters region using ^{137}Cs and ^{210}Pb tracing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22 (12): 1452—1459. [李俊杰, 李勇, 王仰麟, 等. 三江源区东西样带土壤侵蚀的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 示踪研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22 (12): 1452—1459.]
- [36] Rohrmann A, Heermance R, Kapp P, et al. Wind as the primary driver of erosion in the Qaidam Basin, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 374: 1—10.
- [37] Wang X M, Lang L L, Yan P, et al. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: A wind tunnel experiment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158: 67—75.

- [38] Liu F, Hao Y G, Xu J, et al. Sand flow characteristics in Ulan Buh Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1163—1169. [刘芳, 郝玉光, 徐军, 等. 乌兰布和沙区风沙运移特征分析[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1163—1169.]
- [39] Xue Z D, Liu S H, Xu Z Y, et al. Efficiency of wind erosion control measures along Cuona Labe on Qinghai-Tibet railway, Western China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(6): 61—65. [薛智德, 刘世海, 许兆义, 等. 青藏铁路措那湖沿岸防风固沙工程效益[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(6): 61—65.]
- [40] Zhou X, Tian L H, Zhang D S, et al. Study on wind-prevention and sand-fixing benefits of different vegetation on the east coast dune of Qinghai Lake[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(8): 180—185. [周鑫, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖沙区不同植被防风固沙效益研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(8): 180—185.]
- [41] Wang H J, Tian L H, Zhang D S, et al. Characteristics of blown sand activities in sandy land on the eastern shore of the Qinghai Lake of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 49—56. [汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东岸沙地风沙活动特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 49—56.]
- [42] Wu C Y, Chen K L, Cao G C, et al. The spatial and temporal differences and driving forces of wind erosion climatic erosivity in Qinghai Province from 1984 to 2013[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 717—730. [吴成永, 陈克龙, 曹广超, 等. 近 30 年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 717—730.]
- [43] Zhang C L, Li Q, Shen Y P, et al. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 1648—1659.
- [44] Jin H L, Dong G R, Li S. Study on the cause, developing trend and control measures of land desertification in the lower middle reaches of Yarlung zangbo river[J]. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(3): 255—260. [靳鹤龄, 董光荣, 李森. 雅鲁藏布江中游下段土地沙漠化成因、趋势及防治对策[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(3): 255—260.]
- [45] Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, et al. Spatial and temporal changes of desertification land and its influence factors in source region of the Yellow River from 1975 to 2005[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1079—1086. [胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1079—1086.]
- [46] Li Z G, Zou X Y, Cheng H. Method of wind erosion sampling survey in China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(4): 17—21. [李智广, 邹学勇, 程宏. 我国风力侵蚀抽样调查方法[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 17—21.]
- [47] Yuan X W, Zhang S F. The causes and treatments for soil and water loss in Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science Edition)*, 2004, 22(5): 32—35. [袁晓伟, 张世丰. 浅析青海省水土流失的成因及防护措施[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2004, 22(5): 32—35.]
- [48] Luo L F, Zhang K L, Kong Y P, et al. Temporal and spatial distribution of soil loss on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 58—62. [罗利芳, 张科利, 孔亚平, 等. 青藏高原地区水土流失时空分异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 58—62.]
- [49] Liu Y H, Yang Q Y. A study on land types of Lasa region, Xizang[J]. *Journal of Mountain Research*, 1984, 2(1): 17—24. [刘燕华, 杨勤业. 拉萨附近的土地类型研究[J]. *山地研究*, 1984, 2(1): 17—24.]
- [50] Li G R, Li X L, Chen W T, et al. Experimental study on soil erosion rule of degraded grassland in source area of the Yellow River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 51—55, 63. [李国荣, 李希来, 陈文婷, 等. 黄河源区退化草地水土流失规律[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 51—55, 63.]
- [51] Shan Y T, Hu L, Wang Q, et al. Impacts of runoff scouring on high-grade highway slope erosion in alpine and high-altitude regions[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(4): 88—95. [单永体, 胡林, 王琦, 等. 径流冲刷对高寒高海拔地区高等级公路边坡侵蚀的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(4): 88—95.]
- [52] Xu X L, Zhang K L, Liu W, et al. Effectiveness of erosion control measures on Qinghai-Tibet highway slopes[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(4): 619—622. [徐宪立, 张科利, 刘雯, 等. 青藏公路路堤边坡水土保持措施及效益分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(4): 619—622.]
- [53] Hu L, Wang Q, Shan Y T, et al. Characteristics of runoff and sediment yields for highway slope under different vegetation measures in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(4): 96—103. [胡林, 王琦, 单永体, 等. 青藏高原不同植被措施下公路边坡产流产沙特征[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(4): 96—103.]
- [54] Shao Q Q, Xiao T, Liu J Y, et al. Soil erosion rates and characteristics of typical alpine meadow using ^{137}Cs technique in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(13): 1019—1025. [邵全琴, 肖桐, 刘纪远, 等. 三江源区典型高寒草甸土壤侵蚀的 ^{137}Cs 定量分析[J]. *科学通报*, 2011, 56(13): 1019—1025.]
- [55] Wen A B, Liu S Z, Fan J R, et al. Soil erosion rate using ^{137}Cs technique in the Middle Yalungtsangpo[J]. *Journal*

- of Soil and Water Conservation, 2000, 14 (4): 47—50. [文安邦, 刘淑珍, 范建容, 等. 雅鲁藏布江中游地区土壤侵蚀的¹³⁷Cs示踪法研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14 (4): 47—50.]
- [56] Hu L. Study on development and mechanism of water erosion and ecological water erosion control technology of highway slope in cold region[D]. Xi'an: Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, 2016. [胡林. 高寒地区水蚀发育机理及公路边坡水蚀生态防控技术研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 2016.]
- [57] Kang L Q, Zhou T C, Gan Y M, et al. Spatial and temporal patterns of soil erosion in the Tibetan Plateau from 1984 to 2013[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24 (2): 245—253. [康琳琦, 周天财, 干友民, 等. 1984-2013年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24 (2): 245—253.]
- [58] Fang G L, Xiang B, Zhao W, et al. Study on soil erosion in Lasa river basin based on GIS and RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (3): 6—12. [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.]
- [59] Wang X L. Soil erosion of alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau Sanjiangyuan region[D]. Lanzhou: College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, 2016. [王雪璐. 青藏高原三江源高寒草地生态系统土壤侵蚀研究[D]. 兰州: 兰州大学草地农业科技学院, 2016.]
- [60] Teng H F, Liang Z Z, Chen S C, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 673—686.
- [61] Gong K F, Fan J R, Zhang D R, et al. Assessment on soil erosion of changdu county with support of RS and GIS techniques[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011 (5): 51—53. [宫奎方, 范建容, 张定容, 等. RS和GIS技术支持下的昌都县土壤侵蚀评估[J]. 中国水土保持, 2011 (5): 51—53.]
- [62] Shi H Y, Fu X D, Wang H, et al. Modeling and prediction of water loss and soil erosion for high-relief mountainous region: Case study of Qamdo region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19 (S1): 17—27. [史海匀, 傅旭东, 王皓, 等. 高山深谷地区水土流失模拟与预测——以昌都地区为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19 (S1): 17—27.]
- [63] Chen F. Study on evaluation of erosion intensity and sediment characteristics by meltwater flow in the Nam Co basin on the Tibetan Plateau[D]. Beijing: College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, 2016. [陈飞. 青藏高原纳木错流域融水侵蚀强度评价及产沙特性研究[D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2016.]
- [64] Chen F, Cai Q G, Sun L Y, et al. Discharge-sediment processes of the Zhadang glacier on the Tibetan Plateau measured with a high frequency data acquisition system[J]. Hydrological Processes, 2016, 30: 4330—4338.
- [65] Feng J Y, Lu Y, Cai Q G, et al. Evaluation of meltwater erosion intensity in Naqu district based on principal components analysis[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43 (5): 90—95. [冯君园, 卢艳, 蔡强国, 等. 基于主成分分析的那曲地区融水侵蚀强度评价[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2015, 43 (5): 90—95.]
- [66] Feng J Y, Cai Q G, Li Z X, et al. Influence factors of deposition induced by melt water erosion in Naqu region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (2): 535—540. [冯君园, 蔡强国, 李朝霞, 等. 那曲地区融水侵蚀引起沉积的影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (2): 535—540.]
- [67] Zhang Q S, Zhou Y F, Lu X S, et al. On the present uplift speed of Qing-Zang Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36 (7): 529—531. [张青松, 周耀飞, 陆祥顺, 等. 现代青藏高原上升速度问题[J]. 科学通报, 1991, 36 (7): 529—531.]
- [68] Lu H Y, Wang X Y, Jef V. Landform evolution and the uplift of northeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36 (3): 176—181. [鹿化煜, 王先彦, Vandenberghe Jef. 青藏高原东北部地貌演化与隆升[J]. 自然杂志, 2014, 36 (3): 176—181.]
- [69] Wang Z Y, Yu G A, Wang X Z, et al. Impact of tectonic motion on sediment storage and morphology of Yalu Tsangpo Valley[J]. Journal of Sediment Research, 2014 (2): 1—7. [王兆印, 余国安, 王旭昭, 等. 青藏高原抬升对雅鲁藏布江泥沙运动和地貌演变的影响[J]. 泥沙研究, 2014 (2): 1—7.]
- [70] Cao W C, Tao H P, Kong B, et al. Recognition of general topographic features in Qinghai-Tibet Plateau based on GIS[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31 (4): 163—167, 247. [曹伟超, 陶和平, 孔博, 等. 青藏高原地貌形态总体特征的GIS识别分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31 (4): 163—167, 247.]
- [71] Wu F Q, Zhang H J. Soil erosion study[M]. Beijing: Science Press, 2012. [吴发启, 张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [72] Wang Y S, Cheng C C, Xie Y, et al. Increasing trends in rainfall-runoff erosivity in the Source Region of the Three Rivers, 1961—2012[J]. Science of the Total Environment, 2017, 592: 639—648.
- [73] Gu S X, Wang X D, Liu S Z. The preliminary research on rainfall erosivity based on simple estimation method in the Hengduan mountainous region of the eastern Tibet[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18 (3): 28—31. [辜世贤, 王小丹, 刘淑珍. 青藏高原东部横断

- 山区降雨侵蚀力初步研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18 (3): 28—31.]
- [74] Ban Y Y, Lei T W, Liu Z Q, et al. Comparative study of erosion processes of thawed and non-frozen soil by concentrated meltwater flow[J]. *Catena*, 2017, 148: 153—159.
- [75] Ban Y Y, Lei T W, Chen C, et al. Meltwater erosion process of frozen soil as affected by thawed depth under concentrated flow in high altitude and cold regions[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42 (13): 2139—2146.
- [76] Li Y S. Study of the impact of Alpine meadows coverage changes on the hydrological cycle at permafrost zone of the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007. [李元寿. 青藏高原典型多年冻土区高寒草甸覆盖变化对水循环影响的试验研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.]
- [77] Hou J, Wang H Q, Fu B J, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns[J]. *Catena*, 2016, 147: 632—637.
- [78] Sun S Z. The vegetation of Qaidam basin and its surrounding mountains[J]. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1989, 13 (3): 236—249. [孙世洲. 青海省柴达木盆地及其周围山地植被[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13 (3): 236—249.]
- [79] Liu B T, Tao H P, Shi Z, et al. Spatial distribution characteristics of soil erodibility *K* value in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34 (4): 11—16. [刘斌涛, 陶和平, 史展, 等. 青藏高原土壤可蚀性 *K* 值的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34 (4): 11—16.]
- [80] Wang X D, Zhong X H, Wang J P. Preliminary study on the soil erodibility and its spatial distribution on the Tibetan Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27 (3): 343—346. [王小丹, 钟祥浩, 王建平. 青藏高原土壤可蚀性及其空间分布规律初步研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27 (3): 343—346.]
- [81] Liang B, Nie X G, Wan D, et al. Impacts of forest typical of the southern piedmont of the Himalaya mountains on soil physicochemical properties and erodibility *K*[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1377—1388. [梁博, 聂晓刚, 万丹, 等. 喜马拉雅山脉南麓典型林地对土壤理化性质及可蚀性 *K* 值影响[J]. 土壤学报, 2018, 55 (6): 1377—1388.]
- [82] Gu S X, Wang X D, Liu S Z. The preliminary research on the model method of soil erodibility in the Aixigou watershed of Jinsha river[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18 (1): 77—81. [辜世贤, 王小丹, 刘淑珍. 青藏高原东部矮西沟流域土壤可蚀性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18 (1): 77—81.]
- [83] Lin X F, Qu X B. Planning conception of soil and water conservation and ecological construction in the Three-Rivers Basin of Eastern Tibet[J]. *Yangtze River*, 2008, 39 (18): 40—42, 66. [林学锋, 瞿雪波. 藏东三江流域水土保持及生态建设的规划构想[J]. 人民长江, 2008, 39 (18): 40—42, 66.]
- [84] Cui P, Jia Y, Su F H, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (9): 985—992. [崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32 (9): 985—992.]
- [85] Ma Y X, Yu Z S. Analysis on temporal and spatial distribution characteristic of mud-rock flow and landslide with the rainfall condition[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2009, 29 (1): 55—58. [马艳鲜, 余忠水. 西藏泥石流、滑坡时空分布特征及其与降水条件的分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29 (1): 55—58.]
- [86] Li X, Li X Z, He S M, et al. Characteristics and stability evaluation of the Zhameilashan unstable rock in Zham, Tibet[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2018, 38 (2): 310—316. [李鑫, 李秀珍, 何思明, 等. 西藏樟木扎美拉山危岩特征与稳定性评价[J]. 四川地质学报, 2018, 38 (2): 310—316.]
- [87] Li X, Wang Y S, Zhao B. Simple analysis on the collapse geohazard failure modes induced by Linzhi Ms 6.9 earthquake, Tibet[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18 (19): 170—175. [李翔, 王运生, 赵波. 西藏林芝 6.9 级地震崩塌地质灾害模式浅析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (19): 170—175.]
- [88] He Y H, Zhang D S, Li Y T, et al. Analysis of landslide characteristics in main stream area of the upper reaches of the Yellow River based on google earth image[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40 (7): 91—94. [何玉花, 张东水, 李燕婷, 等. 基于 Google Earth 影像的黄河上游干流地区滑坡特征分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40 (7): 91—94.]
- [89] He Y P, Hu K H, Wei F Q, et al. Characteristics of debris flow in polongzangbu basin of Sichuan-Tibet highway[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15 (3): 76—80. [何易平, 胡凯衡, 韦方强, 等. 川藏公路迫隆藏布流域段泥石流活动特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15 (3): 76—80.]
- [90] He P, Tong L Q, Guo Z C, et al. Evaluation research on the landslide disaster liability in Zhada region of Tibet[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16 (25): 193—200. [贺鹏, 童立强, 郭兆成, 等. GIS 支持下基于层次分析法的西藏札达地区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (25): 193—200.]
- [91] Wan H B. Extraordinary mountain slide in Yigong of Xizang and its measures for disaster mitigation[J].

- Advances in Water Science, 2000, 11(3): 321—324. [万海斌. 西藏易贡特大山体滑坡及其减灾措施[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 321—324.]
- [92] Jiang Z X. Differential distribution regularity of collapse-landslides and debris flows along Palong Zangbu River Valley in Tibet[J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 495—503. [蒋忠信. 西藏帕隆藏布河谷崩塌滑坡、泥石流分布规律[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 495—503.]
- [93] Deng M F, Chen N S, Ding H T, et al. The hydrothermal condition and formation mechanism of the group-occurring debris flows in the southeast Tibet in 2007[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(4): 128—134. [邓明枫, 陈宁生, 丁海涛, 等. 2007年西藏东南部群发性泥石流的水热条件及其形成机制[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 128—134.]
- [94] Chen J, Wang Q C, Li B. Characteristics and cause analysis of Zhangmu landslide in Tibet[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(2): 103—109. [陈剑, 王全才, 李波. 西藏樟木滑坡特征及成因研究[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 103—109.]
- [95] 《Selected papers from Tang Ke Li》Editorial Board. Selected papers from Tang Ke Li the study of soil erosion and soil and water conservation from 1954 to 2004[C]. Xi'an: Shaanxi People's Press, 2004. [《唐克丽论文选集》编辑委员会. 唐克丽论文选集《土壤侵蚀与水土保持研究50年(1954-2004)》[C]. 西安: 陕西人民出版社, 2004.]
- [96] Zhang K L, Liu H Y. Research progresses and prospects on freeze-thaw erosion in the black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 17—24. [张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 17—24.]
- [97] Fan H M, Wu M, Zhou L L, et al. Review on the snowmelt erosion[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 146—152. [范昊明, 武敏, 周丽丽, 等. 融雪侵蚀研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 146—152.]
- [98] Xie S B, Qu J J. Analyses on the types, distributions and characteristics of vegetation and soil along Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(19): 8268—8270. [谢胜波, 屈建军. 青藏铁路沿线植被土壤的类型分布及特征分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(19): 8268—8270.]
- [99] Liu B Y, Yang Y, Lu S J. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 9—16. [刘宝元, 杨扬, 陆绍娟. 几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 9—16.]
- [100] García-Ruiz J M, Beguería S, Lana-Renault N, et al. Ongoing and emerging questions in water erosion studies[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 5—21.
- [101] Ma B, Zhang J Q, Shui J F, et al. Report on field survey of soil erosion in central and eastern Tibet[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 1—8, 361. [马波, 张加琼, 税军锋, 等. 西藏中东部地区土壤侵蚀野外调查报告[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 1—8, 361]
- [102] Zhu X C, Shao M A. A review of soil moisture study on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1523—1528. [朱绪超, 邵明安. 青藏高原土壤水分研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1523—1528.]
- [103] Zhang S J, Lai Y M, Sun Z Z, et al. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 47(3): 263—270.
- [104] Shi C X. Effects of gravel content on soil erodibility and the methods of estimating soil erodibility factor K[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(6): 1398—1401. [师长兴. 砾石对土壤可蚀性的影响及土壤可蚀性值估算方法[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1398—1401.]
- [105] Cheng G W, Fan J H, Peng L. Progresses in soil freezing-thawing effects on the runoff generation in plateau-mountain regions[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(10): 1020—1029. [程根伟, 范继辉, 彭立. 高原山地土壤冻融对径流形成的影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(10): 1020—1029.]
- [106] Cui P, Chen R, Xiang L Z, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming[J]. Advances in Climate Change, 2014, 10(2): 103—109. [崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 103—109.]
- [107] Gu S X. Study on the soil and water loss control model of the typical watershed in the eastern Tibet[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6): 86—89, 311. [辜世贤. 藏东典型小流域水土流失治理模式研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 86—89, 311.]
- [108] Wang Y X, Ye F, Xia B, et al. Design theory and practice of the Shenzhen soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 67—71. [王永喜, 叶枫, 夏兵, 等. 深圳水土保持科技示范园建设的理念与实践[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 67—71.]

(责任编辑: 檀满枝)