

青藏高原水土耦合作用机理及伴生的环境地质问题研究

张文海^{1,2}, 吴华^{1*}, 孟盼望¹, 陶伟¹

(1. 西藏大学工学院, 西藏拉萨 850012; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041)

摘要 通过研究地表径流对地形地貌的改造侵蚀过程及产生的水土流失问题, 以及对相关学者研究成果进行总结, 结果表明, 地形地貌特征与水土流失均与地表径流存在直接相关联的关系, 大趋势上地形地貌的改变是地质侵蚀时期发生的各种构造运动作用的结果, 而局部产生的地形地貌是地表径流作用产生的, 造成水土流失的主要侵蚀营力是地表径流作用的结果, 地表径流与冻融侵蚀、土壤侵蚀相互作用加剧了水土流失。

关键词 青藏高原; 地形地貌; 水土流失; 地表径流; 侵蚀营力; 耦合作用

中图分类号 X 141 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)02-0068-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.02.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research on the Mechanism of Water-Soil Coupling and Associated Environmental Geological Problems in Tibet Plateau

ZHANG Wen-hai^{1,2}, WU Hua¹, MENG Pan-wang¹ et al (1. College of Engineering, Tibet University, Lhasa, Tibet 850012; 2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041)

Abstract By studying the erosion process of surface runoff on topography and landforms and the resulting water and soil loss, as well as summarizing the research results of related scholars, the results showed that the landform characteristics and soil erosion were directly associated with surface runoff, the relationship between changes in trend on topography of geological erosion period was the results of various tectonic movement effect, and the topography was generated by the local function produced by the surface runoff, soil erosion in the main force was the result of the role of surface runoff, erosion camp surface runoff, soil erosion and freeze-thaw erosion exacerbated the interaction between soil and water loss.

Key words Tibet Plateau; Topography and landform; Soil erosion; Surface runoff; Erosion force; Coupling effect

水土流失已成为限制人类生存和发展的主要环境灾害之一^[1], 近代以来随着几次工业革命及现代化建设需要, 人类对于地球的资源需要日益增多。矿产资源的开采、温室效应等都直接、间接地加剧了水土流失, 当然自然环境本身就是在不断演化。对于青藏高原而言冰川融水对生态环境的影响起主导作用, 其地形地貌的特征无一不透露着水土流失很严重。通过阐述高原地形地貌的特征及风化过程与水土流失之间的关系, 揭示高原山地、平原水土流失机理, 为治理高原区生态环境提供一定的参考及防治措施。从南极首次突破历史最高温度及珠穆朗玛峰植被生长高度的不断提高, 意味着温室效应在加剧气候变化越发明, 高原冰川融化及其伴随的水土流失会进一步加剧。由于地形地貌多样、气候复杂, 存在冻融、风力、水力和重力等多种侵蚀营力, 对于土壤侵蚀研究薄弱, 在冻融侵蚀、地质侵蚀、土壤侵蚀还缺乏相关研究^[2]。有学者认为是耕地及高原区特征的生态环境和长期人为活动造成生态退化^[3-4], 导致了水土流失。对于高原区侵蚀营力及造成水土流失的诸多因素还不是很完善, 也有学者希望通过定量研究青藏高原构造-侵蚀-气候三者之间的耦合关系, 探讨地形地貌的演化历史以及深部的地球动力学机制^[5]。地貌发育特征是气候变化的一种反馈标志^[6], 高原地貌复杂多样说明了气候变化非常大。笔者通过对基岩冻融破坏过程及其他风化作用、地表径流搬运过程、地表

径流对平原区的改造过程、气候等因素, 阐述地形地貌与水土流失的关系, 以期对高原区地表径流与地形地貌特征、水土流失有一个新的认识, 为治理高原区环境地质问题提供一定的理论基础。

1 区域水文地质背景

青藏高原南起喜马拉雅山脉南缘, 北至昆仑山、阿尔金山和祁连山北缘, 东西长约 2 800 km, 南北宽 300~1 500 km, 介于 26°~39°N、73°~104°E。地壳厚度在东西方向上较均匀, 变化不大, 而南北方向上变化较大, 地势呈西高东低的特点。高原内部相对于边缘区起伏较低, 是一个巨大的山脉体系, 其由山系和高原面组成。由山、谷以及河流相间组成, 地形错综复杂。气温随高度和纬度的升高而降低, 气温日较差大; 平均气温由东南向西北递减。河流分布主要受到气候和自身地形地势的影响。内流河大多以冰雪融水为主要补给水源, 夏季水流量充沛, 冬季基本无水流, 多为间歇性河流。由于外流水系大多起源于藏东南或东部, 所以其补给的主要方式是雨水补给。青藏高原的水资源以河川径流为主体。青藏高原南部和东南部河网密集, 土地资源地域分布明显, 数量构成极不平衡。

2 坡面流等侵蚀营力对山地的改造

青藏高原是世界第三极, 由印度板块俯冲挤压亚洲板块致使地壳隆起形成。由于其独特的地理位置终年温度较低且日照充足水蒸发量也很大, 但因其上空四季均有水汽辐射场不利于降雨, 且由于是低纬度高原地形降雨量少^[7-8], 所以大气降雨较少, 其内流河水资源多半由冰川融水产生。这就导致对于地形地貌改变的侵蚀营力是冰川融水形成的地表径流作用的结果, 对于冻融侵蚀由于其冻融环境条件要求比

基金项目 高原地表环境遥感监测联合实验室建设项目(藏财教[2019]19号)。

作者简介 张文海(1994—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向: 地质灾害。*通信作者, 高级工程师, 博士, 硕士生导师, 从事遥感与地理信息系统应用研究。

收稿日期 2020-06-02

较苛刻,冻融效果明显的区域主要集中在环境气候变化敏感的区域及部分温差变化较大的山腰地带。基于高原区地形地貌复杂性,造就了其环境气候条件的敏感。对于地质侵蚀由于其经历的时间漫长且发生的各种侵蚀不断对地形地貌进行改造,造就了当今青藏高原地形地貌的总体雏形。虽然高原区地形地貌主要影响因素是构造运动的结果,构造作用在塑造地形地貌上起控制性作用^[9],但由于地质侵蚀作用时间漫长使得高原区地形地貌趋向于复杂的方向发展。随着近代间冰期的因素抑或是人为对环境的影响,使得冰川融化加剧,冰川进退地质活动明显增强,其融化形成的地表径流侵蚀活动能力加强。冰川由于复杂气候等因素融化形成的水流不规则流淌(图1),冰川融水终年对地表不断地进行下切侵蚀,致使诸多山体边坡曾现出区域性不规则的径流路线相互交织。边坡被冲沟分割成不规则的块状,如此大面积的地表流水,加剧了水土的流失。且高原区地壳不断抬升使地表被迫侵蚀,所以高原区冲沟广泛发育。



图1 冰川融水侵蚀形成的不规则水系地貌遥感影像

Fig.1 Remote sensing image of irregular water pattern formed by erosion of glacial meltwater

随着地壳不断抬升地质侵蚀、地表径流不间断作用,造就了高原区山地多由坡度较陡的山地组成。由于坡度对积雪覆盖的影响较大^[10],且土壤对水流的敏感性大于对坡度的敏感性^[11]。因此由于坡度影响,坡面冰川在自重等因素作用下失稳成块状整体向下运移,对地表的磨蚀程度较大。滑移过程产生的冰碛土向坡脚运移,地质历史时期已经形成的冰碛土颗粒也会进一步遭受破坏,为水土流失提供了原材料。冰川融水的流量较大,受坡度影响在重力加速度条件下具有较大的势能,对岩石侵蚀作用明显,对于水土的运移能力也得到增强。土壤对水流的敏感性则主要表现在与土壤颗粒、组成成分有关,经调研发现高压区地表颗粒普遍较小,使得侵蚀作用的产生变得容易。

冰川大面积分布随着季节更替,冰川融化形成的大面积径流使得山地水土流失严重,汇聚的水流对地表进行侵蚀形成了冲沟,因其径流可以说是无规则的流淌。如此反复形成的冲沟广泛分布,由于地质运动地表抬升使得冲沟充分发育,经过终年各种侵蚀营力作用形成了沟壑广泛分布(图2)。当然,这也是地质侵蚀的基础之上形成的地形地貌。且各个山地形成的冲沟不是独立存在的,彼此相连构成了山地

与山地之间的水系,径流随着地形流淌又构成了山地与平原区水系(图2~3)。



图2 山地—山地构成的水系地形地貌航拍

Fig.2 Aerial photos of water system topography and landform formed by mountains



图3 山地—平原区构成的水系地形地貌遥感影像

Fig.3 Remote sensing image of water system topography and geomorphology composed of mountainous and plain areas

高原地形受板块俯冲影响不断上升,被动受侵蚀风化作用,造成地表岩石不断加速风化直至露出基岩。冰川融水入渗经过冰劈作用使得基岩破碎,由冰劈作用破碎的基岩物质往下运移时,其中一部分碎裂的基岩由于风化作用、冰川的反复进退以及反复冻融作用变成细小颗粒,随地表径流不断向平原地带运移(图2)。向下运移过程中经过平原等海拔较低区域时,由于气候影响岩石会进行一个反复冻融的过程加剧了岩石的风化,冻融效果明显的地带,通常岩体孔隙含水率越高,且温度越大的区域冻融效果越明显,所以风化程度越高的区域主要集中在山腰地带,以及由于地形影响温差较大的区域。基岩的破碎对于受地形、气候影响明显的区域也可以说是冰劈作用及反复冻融共同作用的结果^[12]。如此反复不断地产生细小颗粒向平原堆积,长此以往造成平原区土地沙化。风化的细小颗粒随水流流失,使得山地难以形成有利于植被生长的腐殖质,这也为生态治理过程中的突出水土流失问题形成了恶性循环。

3 河槽流等侵蚀营力对地表的改造

在高原山地地表由于冰劈作用,所以其地表主要分布的冰碛土一般都是块状,高处的坡面流沿着冲沟向下汇聚,具有较强的势能与动能,所以在山地坡脚处总是产生下蚀作

用,使得地表河流也总是在坡脚处产生(图4)。在夏季冰川大面积融化造成河水漫溢,由于地质侵蚀及其往期各种侵蚀营力的作用,沉积的砂土堆积在平原区。在河水漫溢时大量的砂石通过水流被搬运流失,在侵蚀营力小的区域地带沉积,不断地对地表进行改造造成了平原区复杂的地形,在工程建设中往往面临着这样的隐患。由于冻土广泛分布,因此治理难度非常大,为人类生存活动所需的环境条件带来了挑战。



图4 平原区水系遥感影像

Fig.4 Remote sensing image of water system in plain region

由于冻融及风化作用岩土体不断破坏,破碎的岩石随着水流不断往山脚运移汇聚,并随着河槽流及地面流水进行运移。在高原区夏季水量充沛其水能也是较大的。充足的水量使得水流在平原区进行漫溢,逐渐形成区域水系,因此水土流失最严重的地区就是河流及其组成的水系。在构造运动及水流侧蚀作用所形成的地貌中最具代表性的就是“九曲回肠”(图5)。说明该地区水流作用强烈,水流源源不断地把冰碛土及风化土进行运移。冰碛土也在水流过程中不断地进行磨蚀,成为细小颗粒被运走。表明构造活动对于流域地形地貌发育具有强烈的控制作用,构造活动是造成河流纵剖面发生改变的最主要因素,而局部河段同时还受到岩性因素的控制和影响,但并非主控因素^[5]。由冰川基岩反复冻融产生的冰碛土随径流运移至平缓地带,冰碛土经过运移一部分变成细小颗粒,与风化作用形成的小颗粒土一起被运移至平缓地带,长此以往造成砂土的集中使得平缓区域部分地区土地沙化。风对于细小颗粒也具有较强的搬运能力,细小颗粒随风运移至遇到山谷等在底部沉积,随径流也会搬运至平缓地带。在夏季由于冰川融水增多,使得对山地的侵蚀增强,在河流流域水土携带能力也会增强^[13],且夏季为水土流失高峰期。高原区阳光充足堆积在平原区的砂土含水率流失严重,使得岩土砂粒黏聚力下降,易引起扬尘、沙尘暴等环境问题。

4 引发高原区环境地质问题相关因素

4.1 水土流失问题

(1)不同的土地利用类型水土流失程度不同^[14],在不同的土地利用方式中,农业用地受到的侵蚀最大,而森林受到的侵蚀最小^[15]。由于青藏高原农业用地、森林覆盖率均较低就不讨论。同样,不同的地形地貌水土流失差异也不同,



图5 “九曲回肠”航拍

Fig.5 Aerial photo of "Jiuqu ileum"

平原区更容易水土流失。

(2)大孔隙度和土壤容重会影响地表径流,草地表现出最大的地表径流和土壤流失,而高原区以农牧为主,因此倾向于改善土壤生态系统服务,改善入渗,减少地表径流和土壤侵蚀^[16]。

(3)青藏高原高寒草地生态系统脆弱、抗干扰能力差,气候变化以及人类的活动进一步加剧了其脆弱性^[17],使得水土流失导致环境变差。

(4)矿产资源的开发利用也会引发地质灾害、地形地貌景观破坏、水土污染等地质环境问题,废弃的土壤也会随着径流流失^[18]。

综上所述,不同的土地利用方式水土流失方式不同,不同的地形地貌决定地表径流方式不同。对于水土流失问题,可以从相关方式减少土壤流失,如建立水土资源防线^[19-20]也可以通过人为方式改变地形地貌,从而改变某一区域水土流失严重问题。

4.2 土地沙化问题 在日夜温差、季节温差较大的高原,砂土集中的平原地带,经过阳光的暴晒,细小颗粒经过风吹极易形成扬尘,造成环境污染。土地沙化会造成土地荒芜,荒地会加剧土壤侵蚀^[17],由于土地沙化造成土壤黏聚力降低,土壤颗粒会在地表流水以及风的作用下向四周蔓延,使得环境地质条件向着恶性循环方向发展。高寒地区生态脆弱,气候变化、人类活动同样会使土地沙化加剧。综上所述,生态环境破坏所造成的土地沙化问题较为严峻,而环境破坏最主要的直接原因在于水土流失严重,所以探讨水土流失与径流的关系是很有必要的。

5 结语

(1)青藏高原地形地貌总体上大趋势是有构造运动作用及地质侵蚀产生的,但在局部上的地形地貌由冰川融水产生的地表径流决定的,水土之间存在耦合作用地表径流对地表改造可以说是侵蚀营力中最有侵蚀能力的因素。

(2)建立在地质侵蚀营力的基础之上,在各种侵蚀营力中,地表径流是最具侵蚀能力的侵蚀活动,冻融侵蚀等一些侵蚀只是促进了侵蚀作用的进行。

(3)探讨地形地貌与水土流失的关系,或可通过改变地形地貌使得地表径流能够避开人类活动的区域,如改变河道

流向。通过充分了解地表径流、地形地貌与水土流失之间的关系,使得人类对于人居环境有一定的选择能力,促进人与自然环境和谐相处。

(4) 高原地区水土流失的源头是基岩的冰劈作用产生的碎石土,地表的沉积土是地质历史各时期沉积的结果。土地利用类型、人类活动因素、矿产资源的开发利用等,都是促进生态环境变得恶劣的一些因素,最主要的是水土流失问题。

(5) 地表径流与地形地貌标志、水土流失是相互作用相互影响的。地表径流可以改变地形地貌形态,也能引起水土流失;水土流失反过来又可以改变地形地貌从而改变径流流向。这为环境治理带来很大的困难,个人认为治理的最主要因素是进行治砂、排水,对需要进行环境治理及工程建设的区域进行排水工程、边坡治理。

参考文献

[1] YANG L X, YANG G S, LI H P, et al. Effects of rainfall intensities on sediment loss and phosphorus enrichment ratio from typical land use type in Taihu Basin, China [J]. Environmental science and pollution research, 2020, 27(12): 12866-12873.

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

[3] 吕清华. 高原区坡耕地水土流失综合治理[J]. 区域治理, 2019(38): 32-34.

[4] 彭旭东. 喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土流失过程及特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.

[5] 王伟. 青藏高原东缘地表侵蚀与地貌演化定量研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2018.

[6] 苏琦. 青藏高原东北缘典型流域地貌参数分析与构造变形探讨[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2015.

[7] 段玮, 段旭, 樊凤, 等. 青藏高原东南侧干湿季气候特征与成因分析[A]//中国气象学会. 第32届中国气象学会年会 S4 东亚气候变异成

因和预测. 北京: 中国气象学会, 2015: 4.

[8] 张寅生, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 青藏高原唐古拉山-冬克玛底河流域水文过程特征分析[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 214-222.

[9] 何玉林. 青藏高原东缘主干断裂活动性及其构造变形模式研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.

[10] 除多, 达珍, 拉巴卓玛. 西藏高原积雪覆盖空间分布及地形影响[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 635-645.

[11] MA Q H, ZHANG K L, CAO Z H, et al. Soil detachment by overland flow on steep cropland in the subtropical region of China [J]. Hydrological processes, 2020, 34(8): 1810-1820.

[12] 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, 2016.

[13] GUSAROV A V. The response of water flow, suspended sediment yield and erosion intensity to contemporary long-term changes in climate and land use/cover in river basins of the Middle Volga Region, European Russia [J]. The science of the total environment, 2020, 719: 1-24.

[14] CHALISE D, KUMAR L. Land use change affects water erosion in the Nepal Himalayas [J]. PLoS One, 2020, 15(4): 1-19.

[15] 杨祎. 青藏高原高寒草地生态承载力研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2019.

[16] DOS SANTOS FALCÃO K, PANACHUKI E, DAS NEVES MONTEIRO F, et al. Surface runoff and soil erosion in a natural regeneration area of the Brazilian Cerrado [J]. International soil and water conservation research, 2020, 8(2): 124-130.

[17] 杨与靖. 高原高山峡谷区矿产资源开发地质环境问题及防治研究: 以西藏甲玛、玉龙铜矿为例[J]. 四川地质学报, 2019, 39(S1): 106-115.

[18] 扎西坚村. 西藏高原河谷农业区生态清洁小流域建设探讨[C]//《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司.《环境工程》2018年全国学术年会论文集(下册). 北京:《工业建筑》杂志社, 2018: 5.

[19] ADEKIYA A O, AGBEDE T M, OLYANJU A, et al. Effect of biochar on soil properties, soil loss, and cocoyam yield on a tropical sandy loam Alfisol [J]. The scientific word journal, 2020, 2020: 1-9.

[20] RAJBANSHI J, BHATTACHARYA S. Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar river basin, India [J/OL]. Journal of hydrology, 2002, 587[2020-04-05]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124935.

(上接第 67 页)

[28] IYAMA K, STONE B A, MACAULEY B J. Compositional changes in compost during composting and growth of *Agaricus bisporus* [J]. Applied and environmental microbiology, 1994, 60(5): 1538-1546.

[29] JOURAIPHY A, AMIR S, EL GHAROUS M, et al. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste [J]. International biodeterioration & biodegradation, 2005, 56(2): 101-108.

[30] AMBERT-BALAY K, DOUGHERTY M, TIEN M. Reactivity of manganese peroxidase: Site-directed mutagenesis of residues in proximity to the porphyrin ring [J]. Archives of biochemistry and biophysics, 2000, 382(1): 89-94.

[31] 王秀红, 李欣欣, 史向远, 等. 好氧堆肥微生物代谢多样性及其细菌群落结构[J]. 环境科学研究, 2018, 31(8): 1457-1463.

[32] ST-PIERRE B, WRIGHT A D G. Comparative metagenomic analysis of bacterial populations in three full-scale mesophilic anaerobic manure digesters [J]. Applied microbiology and biotechnology, 2014, 98(6): 2709-

2717.

[33] 席北斗, 刘鸿亮, 白庆中, 等. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(3): 19-23.

[34] STEGER K, SJÖGREN Å M, JARVIS Å, et al. Development of compost maturity and Actinobacteria populations during full-scale composting of organic household waste [J]. Journal of applied microbiology, 2007, 103(2): 487-498.

[35] RIVIÈRE D, DESVIGNES V, PELLETIER E, et al. Towards the definition of a core of microorganisms involved in anaerobic digestion of sludge [J]. The ISME Journal, 2009, 3(6): 700-714.

[36] BERKA R M, SCHNEIDER P, GOLIGHTLY E J, et al. Characterization of the gene encoding an extracellular laccase of *Myceliophthora thermophila* and analysis of the recombinant enzyme expressed in *Aspergillus oryzae* [J]. Applied & environmental microbiology, 1997, 63(8): 3151-3157.

[37] 王涵. 堆肥中 β -glucosidase 家族微生物群落与纤维素降解的相关性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016: 17-18.