

土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展

高儒学, 戴全厚, 甘艺贤, 彭旭东, 祝怀春, 林桎桓

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要: 土石混合堆积体是一种堆弃物, 因其特殊的物质组成与结构, 受到雨水冲刷极易发生次生灾害, 近年来越来越多的学者关注其坡面土壤侵蚀问题, 但研究尚无完整的理论与方法, 整体处于初步探索阶段; 综述了土石混合堆积体坡面特性、入渗过程、水流水动力学特征及产流产沙特征等研究现状; 提出在未来的研究中, 可借鉴元素示踪等研究方法深入探讨土石混合堆积体内部水分运移规律, 从物质来源、类型及研究方法等方面完善研究其坡面水流水动力学特性, 注重探讨堆置形态、原地貌形态以及砾石的分布状况等对其坡面及地下土壤侵蚀的影响, 着重研究降雨及径流共同作用下的坡面及地下侵蚀规律, 进一步探究其不同治理措施的减水减沙效益, 构建适宜各类型土石混合堆积体土壤侵蚀预报模型, 为生态防护体系的构建及区域经济可持续发展奠定基础。

关键词: 土石混合堆积体; 土壤侵蚀; 入渗; 水动力学特性; 产流产沙

中图分类号: S157; P90

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0001-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.001

Research Progress on Soil Erosion on the Slope Surface of Soil-Rock Mixed Engineering Accumulation

GAO Ruxue, DAI Quanhou, GAN Yixian, PENG Xudong, ZHU Huaichun, LIN Zhihuan

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Soil-rock mixed engineering accumulation is a kind of dump, and secondary disaster caused by rain water is easy to occur because of its special material composition and structure. In recent years, more and more scholars have paid attention to the problem of slope soil erosion of it. However, there is no complete theory and method in the study, and the whole research is in the preliminary exploratory stage. In this paper, the research status of infiltration process, runoff hydrodynamic characteristics and sediment yield of the slope surface of soil-rock mixed engineering accumulation are reviewed. It is proposed that in the future's research, the method of element tracer can be used to explore the law of water migration in the soil-rock mixed engineering accumulation, and improve the research of water flow dynamics characteristics of the slope from the material sources, types and research methods, and pay attention to the discussion of the heap shape, the original appearance and the distribution of the gravel, as well as the influence of them on the erosion of slope soil and underground soil, meanwhile the erosion law of slope soil and underground soil under the combined action of rainfall and runoff should be emphasized, and this will be benefit to explore the water and sediment reduction effect of different control measures. Soil erosion prediction model suitable for all types of soil-rock mixed engineering accumulation should be constructed, which is the foundation of constructing ecological protection system and sustainable development of regional economy.

Keywords: engineering accumulation; soil erosion; infiltration; hydrodynamic characteristics; water runoff and sediment yield

随着我国经济的高速发展, 工程建设项目如雨后春笋般涌现与推进, 这些建设项目在占据大面积土地的同时, 还产生了大量弃土弃渣, 造成严重水土流失,

破坏了生态系统, 在局部地区形成的危害甚至是不可逆转的^[1]。《中国水土保持公报》显示, 我国“十一五”及“十二五”期间, 全国共审批了生产建设项目水土保

收稿日期: 2018-06-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671275, 41461057); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502604); 贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022号); 贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007)

第一作者: 高儒学(1991—), 男, 贵州织金人, 博士研究生, 主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail: 2235274067@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

持方案 2.63 万个,扰动地表面积 $15.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,弃土弃渣量达 $484.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。大量土石混合堆积体极易成为人为加速侵蚀的物质来源^[2],工程建设造成的水土流失是一种典型的人为加速侵蚀,其具有水土流失强度高、范围广、危害大等特点,严重危及人类赖以生存的水土资源和自然环境,影响了社会发展,威胁了生态安全,制约了人民群众的生产生活^[3]。土石混合堆积体是一种特殊工程地质材料,是人为扰动地表和地下岩土层形成的一种土石混合物;其物质组成复杂、极度不均匀,结构松散、黏聚力差,保水保肥能力差,受到雨水冲刷极易发生水土流失及泥石流等次生灾害^[4];受其特殊组成与结构的影响,土石混合堆积体水土流失内在机制及外部特征均与原生地表存在很大差异,其土壤侵蚀速率远超原地貌^[5],造成的泥沙流失量明显大于耕地、林地等侵蚀地貌单元^[6];当前土石混合堆积体土壤侵蚀研究整体处于探索阶段,且研究主要集中在其坡面,而土石混合堆积体作为一种土石混合的松散堆弃物,水分在其内部如何运移的,水土是否会从其内部流失等科学问题,目前尚未有研究涉及,总的来看,当前土石混合堆积体土壤侵蚀研究还未能全面深入地揭示土石混合堆积体土壤侵蚀规律。因此,在充分掌握土石混合堆积体土壤

侵蚀规律的基础上构建其生态防护体系对促进生态良性发展具有重要的理论意义,对促进区域可持续发展具有重要的现实意义。

1 土石混合堆积体土壤侵蚀背景及目标

土石混合堆积体多数是由生产建设活动扰动并重塑而形成的明显区别于原地表的特殊地貌形态,其形成过程严重破坏了生态环境,主要体现在改变了区域的水文状况、致使水土资源的流失、导致非点源污染源扩散以及滑坡、泥石流等次生灾害的发生;同时,因土石混合堆积体具有明显的三维立体结构,其内部块石之间不规则的排列极易形成不同大大小小的孔隙,故当其受到雨水冲刷发生土壤侵蚀时,水土除了沿坡面流失之外,是否有可能从其内部发生流失,当前尚无定论,更无研究涉及。土石混合堆积体土壤侵蚀研究当前均以坡面尺度开展,其目的在于全面深入揭示土石混合堆积体坡面及地下土壤侵蚀规律,建立适用于不同类型土石混合堆积体的地上地下水土流失预报模型,形成不同类型的土石混合堆积体的土壤侵蚀理论,从而补充、完善土石混合堆积体的预测预报及指导其防护治理,丰富土壤侵蚀学科的基本内涵,有助于进一步探究全球变化与土壤侵蚀的关系(图 1)。

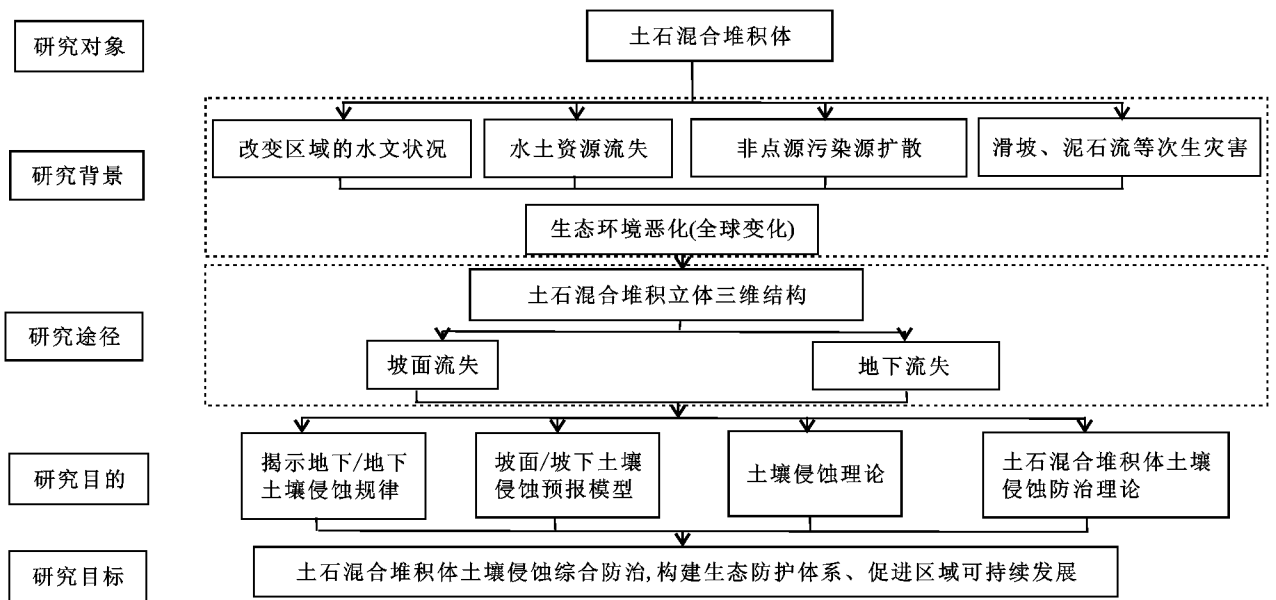


图 1 土石混合堆积体土壤侵蚀研究背景及目标结构示意图

2 土石混合堆积体类型特征

部分学者从不同的角度对土石混合堆积体做了不同的研究分类,但是因其堆置方式、所占地地貌、物质组成及稳定性等不同可划分为不同的类型,且呈现出不同的土壤侵蚀特征(表 1)。

已有的土石混合堆积体类型特征均是通过调查某一地区或某一类型建设类项目而得到,其结果具有很大的局限性,很多时候无法通用于其他地区,例如

像具有特殊“二元”三维结构的西南喀斯特山区,该区域内土石混合堆积体的土壤侵蚀特征是否与表 1 中其他区域一致,目前的研究成果尚不可知,因此,全面的土石混合堆积体分类研究仍需进一步探究。

3 研究现状与动态

土石混合堆积体下垫面物质组成及结构复杂,且坡度较陡,在短历时、高强度降雨条件下较容易发生剧烈土壤侵蚀。

近年来,学术界越来越关注土石混合堆积体土壤侵蚀的科学问题,主要集中在研究其坡面特性、入渗过程、坡面水流水动力学特征及坡面产流产沙特征等方面。

表 1 土石混合堆积体类型特征

分类依据	类型	土壤侵蚀特征
堆置方式 ^[7]	依坡倾倒堆置型	受降雨和水流的冲刷从而易产生侵蚀,易发生泄溜或滑塌
	散乱锥状堆置型	增大了水土流失的面积,结构松散,抗蚀能力差
	线型垆岗式堆置型	
	分层碾压坡顶散乱堆置型 坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置型	土壤密度大,渗透性差,易发生塌陷及泥石流等
原地貌形态 ^[8]	沟道型	松散易失稳,受到降雨和坡面径流的影响易发生侵蚀
	坡面型	松散易失稳,受到降雨和坡面径流的影响不仅易发生土壤侵蚀,还会出现诱发性滑坡等
	填字型	易出现砂砾化面蚀及不均匀沉降,土石易发生泻溜
	平地型	不均匀沉降及边坡浅沟侵蚀明显,且顶部易出现裂缝及陷穴
	河滩地型	下垫面含水量较高,易发生砂砾化面蚀及切沟侵蚀,还会出现边坡泄溜
物质组成 ^[8]	土质型	松散易失稳,易发生砂砾化面蚀及边坡细沟侵蚀,还会出现顶部塌陷及边缘裂缝
	土石混合质型	易发生风化及不均匀沉降现象,边坡不稳定,且易发生细沟侵蚀
	石质型	边坡易出现失稳滑坡且顶部易出现崩塌
稳定性 ^[9]	锁口型	堆积体稳定,内部构造紧密,渗透性差
	敞口型	松散易失稳,受到降雨和径流的影响易发生侵蚀
	坡面型	松散易失稳,受到降雨和坡面径流的影响不仅易发生土壤侵蚀,还会出现诱发性滑坡、泥石流等

3.1 坡面特性

土石混合堆积体坡面特性因其特殊的物质组成区别于自然坡面,因此呈现出特殊的土壤侵蚀规律,了解掌握土石混合堆积体坡面特性是进一步开展土壤侵蚀研究的基础。据野外调查显示,土石混合堆积体坡面形态通常呈凸、凹及平 3 种。国外相关研究开展较早,Chow 等^[10]研究发现坡面水土流失随坡面组成物质颗粒增大而减小;Coli 等^[11]对意大利矿山土石混合体内部块石的形态及分布特征进行了研究。国内近年来相关研究较多,黄洁等^[12]发现水电站弃渣场坡面基本上为大块砾石和土壤细粒混合物所覆盖;彭旭东^[13]研究表明,工程堆积体具有松散的结构特征,其土石含量不同不仅其边坡物理性质特性存在明显差异,而且其边坡坡面土壤侵蚀类型和形式亦存在差异;丁文斌等^[14]研究了堆积体坡面土壤物理力学性质,指出堆积体坡面粒度分布不均匀;史倩华等^[15]调查全国 368 座不同类型堆积体,结果显示堆积体坡面坡长大多数在 2~8 m 范围内,坡度主要集中在 25°~40°,大部分堆积体砾石质量含量<40%。总体来看,土石混合堆积体坡面物质组成复杂且极度不均匀,坡面坡长因堆积体类型不同而不同,坡面坡度一般为堆积体自然休止角,坡面物质组成结构松散、黏聚力差,保水保肥能力差,受雨水冲刷极易发生水土流失,土壤侵蚀主要为水力侵蚀,包含溅蚀、面蚀及沟蚀。

3.2 坡面入渗过程

坡面产流产沙与其入渗关系密切,土石混合堆积体的物质组成和入渗性能均较原地貌存在明显差异

性^[16];整体来看,土石混合堆积体坡面入渗率随时间变化呈快速减小、缓慢减小、稳定入渗 3 个阶段^[14]。国内外就土石混合堆积体坡面入渗开展了一定的研究,Olyphant 等^[17]研究发现土石混合堆积体增加砾石覆盖能增加其坡面入渗量;Li 等^[18]研究表明,砾石对土石混合堆积体坡面入渗能力有明显的影响作用;Jiang 等^[19]研究发现,土石混合堆积体坡面入渗量和入渗系数随坡度的增加而减小;倪含斌等^[20]指出,土石混合堆积体坡面坡度越大,产流越快、入渗过程越不稳定;坡长越长,产流越慢、入渗率变化越大;李叶鑫等^[21]、郭宏忠等^[22]及 Peng 等^[23]研究表明,弃渣场入渗性能随着恢复年限的增加有所改善,而于亚莉等^[24]指出弃渣场边坡处稳定入渗率则随植被恢复年限的增加呈先减小后增加的趋势;李叶鑫等^[25]研究发现,堆积体下垫面稳定入渗率及达到稳定入渗的时间均与其碎石含量呈正相关的关系,而甘凤玲等^[26]研究却结果显示,堆积体入渗能力随碎石含量的变化呈不规则的变化。降雨强度对土石混合堆积体入渗性能的影响因堆积体类型的不同而呈现出不同的规律^[27-28]。综上可知,对于土石混合堆积体坡面入渗就研究方法而言,当前几乎采用的是环刀法测定,但是环刀法仅仅能反映出入渗的量及推算出入渗率,且水分下渗进入土石混合堆积体内部以后是如何运移的,其规律性如何,当前的研究方法无法揭示;另外,土石混合堆积体坡面入渗规律因其所属区域及类型不同而不同,故以往的研究结论不能通用于其他地区。由此看来,今后关于土石混合堆积体坡面入渗的研究应在加强创新研究方法的同时,还应注重堆积体

水分内部运移规律研究,由此方能全面地剖析堆积体坡面入渗的规律。

3.3 坡面水流水动力学特征

土壤侵蚀的主要动力是含沙水流,了解掌握水流水动力学特征是进一步认识土壤侵蚀的基础。学术界一直关注着土壤侵蚀与水流水动力学特征之间的关系^[29-35];而物质组成极不均匀且离散程度大是土石混合堆积体最明显的特点,其边坡土体条件和坡面径流的水力学特性是其坡面发生土壤侵蚀的决定性条件。近年来,部分学者借鉴以往针对坡耕地等传统坡面径流的水力学特性研究方法,对土石混合堆积体坡面水流水动力特征展开了一定的研究,但是研究结果却不尽相同,学者研究^[36-43]表明,土石混合堆积体坡面水流剪切力、水流功率、过水断面单位能量对土壤侵蚀率的影响皆可用线性方程描述,且水流功率是用来描述工程堆积体坡面侵蚀最理想的水力参数,但是也有学者^[44]发现,土石混合堆积体土壤侵蚀率与单位水流功率关系不显著,且过水断面单位能量与剥蚀率之间相关性不密切^[45]。阻力系数是坡面径流所受阻力大小的水流水动力学参数,其与产沙量之间呈现负相关的关系^[46],而阻力系数受到降雨强度及降雨历时^[47]、坡面坡度^[48]等的影响,李永红等^[48]发现其与水流流态的关系表现为水流由层流向紊流、急流向缓流的过渡而逐渐增大;张翔等^[49]研究指出其与雷诺数及弗劳德数之间的关系发现呈正相关关系;而张乐涛等^[50]研究却发现其与雷诺数之间呈正相关关系,与弗劳德数之间却呈负相关的关系。另外,有学者研究^[51-52]发现,土壤侵蚀率与雷诺数、弗劳德数、阻力系数之间的关系因土石混合堆积体坡面土石比率不同而异。总结发现,以上试验的研究方法有放水冲刷法和人工模拟降雨 2 种,土石混合堆积体来源也存在不同的现象;研究方法不同雨水对堆积体坡面的作用也不尽相同,放水冲刷法较人工模拟降雨而言没有雨滴击溅侵蚀这一前期过程,而雨滴击溅侵蚀导致泥浆溅散会对坡面径流造成阻碍的作用,从而进一步影响到坡面水流水动力学特征;另外,土石混合堆积体来源不同,其物质组成之间有很大差异,雨水在坡面的形态特征及流动特性也不同,其水流水动力学特性自然也就呈现出不同的规律。因此,究其原因是否因为研究方法不同或者是堆积体类型不同而出现不同的结果,这需要后续的科学进一步证实。

3.4 坡面产流产沙特征

土石混合堆积体的结构和物理性质明显区别于岩石及土壤,故其坡面易发生侵蚀,同时,要想在自然条件下获取其完整的水土流失基础数据需要较长的时间,因此,学术界多以人工模拟降雨和模拟放水冲

刷试验来研究其坡面的土壤侵蚀,从而探究其土壤侵蚀的影响因素和产流产沙规律。国外对工程建设引起的水土流失关注较早,研究主要集中在矿产开采和道路建设等方面^[53-55],如 Meyer 等^[56]通过研究发现工程建设堆积体在裸露情况下极易产生水土流失,且地表覆盖物增加时侵蚀量随之减少;Bjorn^[57]研究指出,露天矿排土场易发生水土流失主要是因为弃土弃渣回填方式不同其固结率差异较大;Evans^[58]研究了煤矿堆积体土壤侵蚀对河流泥沙的影响。国内对土石混合堆积体土壤侵蚀的研究相对滞后,但是发展迅速,初始,主要是以探索其土壤侵蚀形式^[59]及其土壤侵蚀造成的危害^[2]为主,然后学者们尝试着研究其土壤侵蚀规律^[60-65],而近年来主要集中在探究其坡面物质组成与可调控因子对其土壤侵蚀的影响及土石混合堆积体坡面防护措施的减水减沙研究等方面。

3.4.1 坡面物质组成与土壤侵蚀的关系 坡面物质组成不同直接影响到土石混合堆积体坡面产流产沙特性,李建明等^[66]及马洪超等^[67]对壤土、黏土及砂土 3 种土质的堆积体土壤侵蚀特征进行研究,均发现平均侵蚀速率为砂土 > 黏土 > 壤土。砾石掺杂进入土壤后会影响到土壤本身的结构和物理性质,进而影响到坡面水蚀过程,而砾石特性主要包含其类型、粒径以及其含量大小,王雪松等^[68]研究发现,堆积体坡面产流产沙规律受砾石类型的影响不明显,但是受粒径影响明显;Rieke-Zapp 等^[69]指出土壤中加入岩石碎片可显著降低产沙量,史东梅等^[16]、康宏亮等^[70]、彭旭东等^[71]、戎玉博等^[72]研究发现,砾石含量与堆积体坡面产流产沙呈负相关的关系;有学者^[73-74]指出,在相同降雨强度下堆积体产流时长随着石粒含量增大而逐渐变短,总径流量和总产沙量随着含石量增大而减小^[74],径流平均含沙量和累计含沙量随着碎石含量的增加而减小^[75];Chow 等^[10]也指出,粗碎屑含量和粒径的增加能降低土壤流失率,然而,有学者^[76]发现,在其他情况相同时,堆积体坡面土壤流失量随着土壤颗粒粒径增大与砾石含量增加而逐渐增大;史倩华等^[15]及康宏亮等^[77]研究指出,雨强等于 1.0 mm/min 时,堆积体坡面砾石含量对其坡面土壤侵蚀有促进作用,而雨强 > 1.0 mm/min 时却相反。可以发现,土石混合堆积体坡面物质组成与土壤侵蚀的关系是非常复杂的。首先,土质不同其抗蚀性也不同;其次,砾石含量的差别直接影响到堆积体坡面土壤质地与结构,一般来说,砾石含量越大,质地越粗,结构性越好,孔隙含量便越多,透水性能越好,因此有降低侵蚀的作用;总体来看,当前的研究结论却不完全一致,有人指出砾石含量可以减少堆积体坡面土壤侵蚀,有人的研究结果却相反,更有学者发现砾石含量对堆积

体坡面土壤侵蚀的影响是存在临界雨强和临界砾石含量的;但是,当前的研究均关注的是堆积体坡面的侵蚀状况,且并未考虑堆积体的堆置形态、原地貌形态以及砾石的分布状况等影响因素。因此,今后在研究堆积体坡面物质组成与土壤侵蚀的关系时应该加强考虑多种影响因素的组合。

3.4.2 降雨强度、放水流量及坡度对土石混合堆积体坡面土壤侵蚀的影响 降雨强度、放水流量及坡度是影响土石混合堆积体坡面土壤侵蚀较为重要的因素。降水决定着水资源的时空分布及农业生产,同时其还能诱发水土流失、泥石流等自然灾害。Jiang等^[19]研究发现,堆积体坡面径流量和产沙量随降雨强度的增加而增加;景民晓等^[78]阐述了降雨强度与堆积体平均径流率及平均侵蚀率之间均存在线性关系;史清华等^[15]指出,堆积体产沙量与降雨强度之间亦存在线性关系;李建明等^[66]及丁亚东等^[73]研究发现,堆积体的径流量和侵蚀量均与降雨强度存在显著相关关系;戎玉博等^[72,79]进一步研究表明,堆积体总侵蚀量与降雨强度之间存在指数函数关系。堆积体因其物质组成特殊故抗蚀性较差,Riley^[80]研究发现,即使是很小的径流也会对堆积体坡面造成侵蚀,而径流的冲刷时极易使堆积体坡面出现细沟侵蚀,细沟汇集的股流具有较强的冲刷能力和搬运能力^[16],因此,土壤侵蚀量会随径流量的增大而增大^[37]。丁文斌等^[4]研究了重庆地区广泛分布的2种土质类型的堆积体土壤侵蚀受放水流量的影响,结果显示工程堆积体侵蚀模数与放水流量之间呈显著的正相关关系;Peng等^[81]对该地区堆积体土壤侵蚀研究亦发现平均产沙率亦随着放水流量的增大而增大;马春燕等^[65]研究指出,水电站堆积体供水流量增大的同时次产流深、次产沙模数也随之增加;张乐涛等^[82]及张翔等^[83]研究西北地区堆积体土壤侵蚀随放水流量的变化规律,结果均表明堆积体径流强度变化与放水强度、径流含沙量之间呈多元线性密切相关的关系,累计径流量与累计产沙量之间表现出线性关系;牛耀彬等^[84]研究发现,堆积体侵蚀细沟的沟宽及沟深均随着放水流量的增大而增大,而沟宽随着坡度的增加逐渐变小,沟深随坡度的变化在小流量时表现为负相关,大流量时表现为正相关;张少佳等^[85]进一步研究指出,堆积体坡度及放水流量对产流量、产沙量的影响显著,均呈现正相关的线性关系;而张翔等^[83]研究发现,不同放水流量下,堆积体坡面平均含沙量随坡度的变化呈线性关系,且存在临界坡度;Dong等^[86]研究表明,坡度对径流强度的影响随降雨强度的变化而变化,但是对土壤侵蚀的影响呈正相关关系。整体来看,当前研究表明降雨强度及径流量对土石混合堆

积体坡面土壤侵蚀的影响均呈线性相关,且由于研究对象、堆积体下垫面处理方式以及研究的方法不同而出现不同的研究结果。细沟侵蚀是侵蚀量显著增大的主要原因^[66],而室内模拟试验却因试验设计的原因未能很好地模拟细沟侵蚀,将严重影响到试验研究结果,这是今后室内模拟试验研究有待改进的地方;堆积体坡面土壤侵蚀与坡度之间的关系如何,不同的研究者得出不一样的结论,今后的研究应该在充分结合野外调查的基础上,对不同类型的堆积体设置较为详细的坡度等级,以便于更好地探讨其与堆积体坡面土壤侵蚀之间的变化规律。另外,堆积体在野外实际中受雨水的影响是综合性的,即受到雨水影响的同时坡面上部汇集的雨水会形成径流冲刷坡面,二者是如何影响堆积体坡面侵蚀的,有待进一步研究,这将是今后研究的难点。

3.4.3 坡面防护措施的减水减沙效益研究 土石混合堆积体边坡因自我修复能力弱且所需时间较长而易出现不稳定和水土流失等现象,其边坡水土流失防治主要有工程和生物这2类措施。植被措施能明显减缓堆积体坡面水土流失^[87-88],有研究^[89]指出,堆积体坡面水土流失量随着植被覆盖度的增加而减小,相反,堆积体坡面植被恢复也受其上水土流失的抑制^[90];有学者^[91-94]研究植物篱的减水减沙效益发现,植物篱可以很好地阻延堆积体坡面径流、减缓初始产流时间、降低坡面土壤剥蚀率从而减少径流量和侵蚀量;还有学者^[95-96]发现,优化植被搭配模式能有效减缓堆积体坡面土壤侵蚀;Zhang等^[97]研究表明,灌木林对堆积体坡面土壤侵蚀综合防治效果最佳;但是,张艳等^[98]指出,植物措施对堆积体坡面土壤侵蚀的防治效果受到坡面覆土厚度及降雨强度的综合影响;杨波等^[99]进一步发现,无论是工程措施鱼鳞坑还是植物措施种草其防护效益均受堆积体坡面土石比的影响,更有学者研究了生物、工程等不同配置治理措施对堆积体坡面土壤侵蚀的影响发现并非所有治理措施都能起到减缓堆积体坡面水土流失,不合理的治理措施反而会增加堆积体坡面水土流失^[100]。整体而言,当前对堆积体坡面防护措施的减水减沙效益研究深度较浅,基本只考虑像措施类型等单一因素的影响,然而,实际中堆积体坡面水土流失是极其复杂的,在进行试验研究时应该要综合考虑多种影响因素的共同作用,例如坡面坡长、坡度、土石比、内部孔隙等与不同治理措施共同作用下对堆积体坡面减水减沙效益的影响。另外,工程与植物措施如何搭配才能起到最佳的水土流失防治效果等,以上均是今后该研究方向的重点和难点,这不仅是堆积边坡生态恢复治理措施布设的迫切需求,更是堆积体土壤侵蚀研究领域

的重要补充。

4 研究不足与展望

当前土石混合堆积体土壤侵蚀研究内容主要集中在坡面特性、入渗过程、水流水动力学特征及产流产沙特征等方面,试验方法多采取室内人工模拟降雨及野外人工放水冲刷,研究结果虽不尽相同但亦能为土石混合堆积体水土流失综合防治提供一定的理论参考。总结前人研究发现还存在许多亟待解决的问题:

(1)实际中土石混合堆积体是立体的三维结构,其坡面入渗研究还不够深入,研究方法和内容均存在很大的极限,今后不仅要注重在研究内容上的突破,而且要加强研究方法的创新,可借鉴同位素或稀土元素示踪等方法,深入探讨水分子于堆积体内部的运移规律。

(2)土石混合堆积体坡面水流水动力学特征是否因其来源与类型不同而不同,又或者是因研究方法不同而异,当前的研究尚无定论,这需要后续科研工作者在根据其形态、性质、特征对土石混合堆积体进行精准分类的基础上进一步研究证实,从而全面充分掌握堆积体坡面水流水动力学特性。

(3)土石混合堆积体坡面物质组成直接影响到其土壤侵蚀状况,但当前研究却主要集中在探讨坡面土质、土石比对土壤侵蚀的影响,且研究结果不尽相同,今后研究应充分考虑堆积体堆置形态、原地貌形态以及坡面特性等影响因素,且是否存在地下流失现象,其规律如何,这是今后的研究重点。

(4)降雨强度、放水流量及边坡坡度对土石混合堆积体坡面土壤侵蚀的影响是综合性的,且因堆积体下垫面处理方式以及研究的方法不同而呈现不同的研究结果,今后应尝试探讨堆积体坡面模拟降雨与上方集水共同作用下堆积体坡面土壤侵蚀规律;另外,土石混合堆积体地下流失如若存在,其与降雨强度及径流量等影响因素之间关系及规律如何有待进一步研究。

(5)应充分考虑土石混合堆积体坡面坡长、坡度、土石比、内部孔隙等与不同治理措施共同作用下对堆积体坡面减水减沙效益的影响,这是今后该研究方向的重点和难点。

(6)土石混合堆积体坡面土壤侵蚀的研究主要集中在坡面,整体处于初步探索阶段,研究深度不足以建立起全面的土壤侵蚀预报模型,今后应在充分掌握不同类型堆积体土壤侵蚀机理的基础上构建适宜各类型土石混合堆积体土壤侵蚀预报模型,以便于为土石混合堆积体土壤侵蚀预测与防治提供参考依据。

5 结语

土石混合堆积体由于其特殊的物质组成及理化

性状,当前尚无一套完整的研究理论与方法,整体处于探索阶段,因此,有必要加大其土壤侵蚀研究力度及深度,根据其形态、性质及特征对其进行精准分类,后依类型开展相应研究和防治,从而更好地揭示堆积体水土流失机理,建立起堆积体的防控治理体系,对当前生态环境建设能起到很好地支撑作用,对区域经济良性发展具有良好的促进作用。同时,土石混合堆积体土壤侵蚀研究涉及农学、工学、理学等内容,开展交叉学科研究是推动该领域研究进一步发展的趋势。

参考文献:

- [1] 王治国,李文银,蔡继清. 开发建设项目水土保持与传统水土保持比较[J]. 中国水土保持,1998(10):16-17.
- [2] 高学田,唐克丽,张平仑,等. 神府一东胜矿区一、二期工程中的人为加速侵蚀[J]. 水土保持研究,1994,1(4):23-34.
- [3] 郭索彦,姜德文,赵永军,等. 建设项目水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):51-56.
- [4] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等. 两种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. 土壤学报,2017,54(3):558-569.
- [5] Keith M C, Harbor J. Modeling potential impacts of land development on sediment yield[J]. Physical Geography,2013,16(5):359-370.
- [6] Kaufman M M. Erosion control at construction sites: The science-policy gap[J]. Environmental Management, 2000,26(1):89-97.
- [7] 赵暄,谢永生,景民晓,等. 生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J]. 中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.
- [8] 郭宏忠,江东,蒋光毅,等. 生产建设项目弃渣场物理性质变化特征及类型划分[J]. 水土保持应用技术,2014(6):32-35.
- [9] 刘志勇,黄伟伟,吴仁铤. 晴兴高速公路典型弃土场分类与渣体性质研究[J]. 交通科技,2012(4):97-99.
- [10] Chow T L, Rees H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall. [J]. Canadian Journal of Soil Science,1995,75(2):227-232.
- [11] Coli N, Berry P, Boldini D, et al. The contribution of geostatistics to the characterisation of some bimrock properties[J]. Engineering Geology,2012,137/138(7):53-63.
- [12] 黄洁,刘志双,鲁艳妮,等. 弃渣场岩土侵蚀研究进展[J]. 亚热带水土保持,2012,24(2):20-22.
- [13] 彭旭东. 生产建设项目工程堆积体边坡土壤侵蚀过程[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [14] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等. 重庆市典型工程堆积体边坡物理力学变化及稳定性特征[J]. 水土保持学报,2017,31(1):109-115.
- [15] 史倩华,王文龙,郭明明,等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.
- [16] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等. 不同土石比的工程堆积体

- 边坡径流侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 152-161.
- [17] Olyphant G A, Harper D. Effects of direct revegetation on the hydrology, erosion and sediment yield of an abandoned deposit of coal-mine refuse[J]. *Geomorphology*, 1995, 11(94): 261-272.
- [18] Li T, He B, Chen Z, et al. Effects of gravel on infiltration, runoff, and sediment yield in landslide deposit slope in Wenchuan earthquake area, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 12075-12084.
- [19] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(5): 1742-1752.
- [20] 倪含斌, 张丽萍. 神东矿区堆积弃土坡地入渗规律试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 28-31.
- [21] 李叶鑫, 史东梅, 吕刚, 等. 不同恢复年限弃渣场入渗特征研究与评价[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 91-95.
- [22] 郭宏忠, 蒋光毅, 江东, 等. 生产建设项目弃土弃渣与林地土壤入渗特征分析[J]. 中国水土保持, 2014(7): 51-53.
- [23] Peng X D, Shi D M, Guo H Z, et al. Effect of urbanisation the water retention function in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Catena*, 2015, 133(10): 241-249.
- [24] 于亚莉, 汪三树, 彭旭东, 等. 不同植被恢复年限弃渣场入渗性能研究[J]. 中国水土保持, 2016(6): 51-53.
- [25] 李叶鑫, 郭宏忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面入渗特征及影响因素[J]. 环境科学学报, 2014, 34(5): 1292-1297.
- [26] 甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 汶川震区滑坡堆积体降雨入渗产流特征人工模拟实验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 780-788.
- [27] 刘志鹏, 蒋光毅, 史东梅, 等. 工程堆积体入渗特性及持水能力对降雨条件的响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 240-245.
- [28] 赵暄, 谢永生, 王允怡, 等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 1-8.
- [29] Lyle W M, Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils[J]. 1965, 8(3): 419-422.
- [30] Yang C T, Song C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979, 105(7): 769-784.
- [31] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model[J]. *Transactions of the Asae*, 1993, 36(1): 65-72.
- [32] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1999, 24(8): 677-686.
- [33] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 9-15.
- [34] 张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48-52.
- [35] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片蚀过程水动力学机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 144-149.
- [36] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94-102.
- [37] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap[J]. *Catena*, 2015, 128: 108-121.
- [38] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 775-796.
- [39] 蒋芳市, 陈培济, 黄炎和, 等. 集中水流下土石混合崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 8-14.
- [40] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 125-134.
- [41] 丁文斌, 史东梅, 何文健, 等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 153-161.
- [42] 牛耀彬, 高照良, 刘子壮, 等. 工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 105-111.
- [43] Jiang F, Zhan Z, Chen J, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain[J]. *Catena*, 2018, 169: 46-58.
- [44] 王仁新, 何丙辉, 李天阳, 等. 汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 375-387.
- [45] 王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 117-124.
- [46] 李宏伟, 牛俊文, 宋立旺, 等. 工程堆积体水动力学参数及其产沙效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 63-67.
- [47] 张孝中, 王文龙, 李建明. 神府东胜煤田弃土弃渣体径流水动力学特性研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 76-81.
- [48] 李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 83-88.
- [49] 张翔, 高照良, 袁雪红, 等. 工程堆积体坡面细沟流水力学参数特性研究[J]. 泥沙研究, 2016(4): 34-40.
- [50] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 34-38.
- [51] 王仁新, 何丙辉, 李天阳, 等. 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面土壤侵蚀率与水力学参数关系室内模拟[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 7-11.

- [52] 李天阳,何丙辉,雷廷武,等.汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J].水利学报,2014,45(8):892-902.
- [53] Rubiomontoya D, Brown K W. Erodibility of strip-mine spoils[J]. Soil Science,1984,138(5):365-373.
- [54] Gordon W M, Schick A P. Effects of construction on fluvial sediment, urban and suburban areas of maryland[J]. Water Resources Research,1967,3(2):451-464.
- [55] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. Catena,1994,23(1/2):1-28.
- [56] Meyer L D, Wischmeier W H, Daniel W H. Erosion, runoff and revegetation of denuded construction sites[J]. Amer Soc Agr Eng Trans Asae,1971,14(1):138-141.
- [57] Bjorn K B. Erosion and sediment delivery from peat mines [J]. Soil & Tillage Research,1998,45(1/2):199-216.
- [58] Evans K G. Erosion risk assessment of the Jabiluka Mine Site, Northern Territory, Australia[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2004,9(6):512-522.
- [59] 王治国,白中科,赵景逵,等.黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究[J].水土保持学报,1994,8(2):11-17.
- [60] 孙虎,唐克丽.城镇建设中人为弃土降雨侵蚀实验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):30-36.
- [61] 奚成刚,杨成永,许兆义.铁路工程施工期路堑边坡面产流产沙规律研究[J].中国环境科学,2002,22(2):174-178.
- [62] 王文龙,李占斌,李鹏,等.神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J].水土保持学报,2004,18(5):68-71.
- [63] 陈宗伟,江玉林,张洪江,等.青藏高原高速公路建设中弃土场土壤流失特性:以青海平阿高速公路为例[J].水土保持研究,2006,13(6):4-6.
- [64] 何凡,尹婧,陈宗伟,等.青海省公路弃土场土壤侵蚀规律天然降雨试验研究[J].水土保持通报,2008,28(2):131-134.
- [65] 马春艳,王占礼,寇晓梅,等.工程建设弃土弃渣水土流失过程试验研究[J].水土保持通报,2009,29(3):78-82.
- [66] 李建明,牛俊,王文龙,等.不同土质工程堆积体径流产沙差异[J].农业工程学报,2016,32(14):187-194.
- [67] 马洪超,吴媛媛,谢永生.基于砾石比面积的土石混合堆积体可蚀性因子研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2017,2(7):64-70.
- [68] 王雪松,谢永生,景民晓,等.不同砾石类型对工程堆积体侵蚀规律的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):21-25.
- [69] Rieke-Zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion[J]. Earth Surface Processes & Landforms,2010,32(7):1063-1076.
- [70] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- [71] 彭旭东,江东,史东梅,等.紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面产流产沙试验研究[J].水土保持学报,2013,27(3):9-13.
- [72] 戎玉博,白玉洁,王森,等.含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征[J].水土保持学报,2018,32(1):109-115.
- [73] 丁亚东,谢永生,景民晓,等.轻壤土散乱锥状堆置体侵蚀产沙规律研究[J].水土保持学报,2014,28(5):31-36.
- [74] 景民晓,谢永生,李文华,等.不同土石比例弃土堆置体产流产沙模拟研究[J].水土保持学报,2014,28(3):78-82.
- [75] 甘凤玲,何丙辉,王涛.人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律[J].农业工程学报,2016,32(12):158-164.
- [76] 李艳梅,胡兵辉,陈平平.云南省高速公路弃渣场土壤流失特征研究:以昆明—石林高速公路为例[J].中国水土保持,2011(2):62-64.
- [77] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J].水科学进展,2016,27(2):256-265.
- [78] 景民晓,谢永生,赵暄,等.土石混合弃土堆置体产流产沙模拟研究[J].水土保持学报,2013,27(6):11-15.
- [79] 戎玉博,骆汉,谢永生,等.雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J].泥沙研究,2016(6):12-18.
- [80] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia[J]. Applied Geography,1995,15(4):309-323.
- [81] Peng X, Shi D, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2014,123(123):215-224.
- [82] 张乐涛,高照良,李永红,等.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J].农业工程学报,2013,29(8):145-153.
- [83] 张翔,高照良,杜捷,等.工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J].水土保持学报,2016,30(4):19-24.
- [84] 牛耀彬,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J].农业工程学报,2016,32(19):154-161.
- [85] 张少佳,高照良,李永红,等.高边坡工程堆积体产流产沙特性研究[J].水土保持学报,2016,30(2):107-110.
- [86] Dong J, Zhang K, Guo Z. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study [J]. Transportation Research Part D,2012,17(1):8-14.
- [87] 史倩华,李焱林,王文龙,等.不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响[J].草地学报,2016,24(6):1263-1271.
- [88] Cao S, Xu C, Ye H, et al. The use of air bricks for planting roadside vegetation: A new technique to improve landscaping of steep roadsides in China's Hubei Province[J]. Ecological Engineering,2010,36(5):697-702.

- 产沙过程的影响[J]. 山西水利科技, 1996(3): 77-80.
- [5] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68-73.
- [6] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 24-28.
- [7] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108-117.
- [8] 王占礼, 黄新会, 张振国, 等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 1-4.
- [9] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 721-725.
- [10] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 415-421.
- [11] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
- [12] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 66-70.
- [13] 曾晔, 许林书. 松嫩平原黑土侵蚀成因分析及治理措施[J]. 农业与技术, 2005, 25(4): 54-57.
- [14] 胡伟, 郑粉莉, 边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4708-4717.
- [15] 陈思旭, 杨小唤, 肖树林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [16] 汪邦稳, 肖胜生, 张光辉, 等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239-243.
- [17] 付兴涛, 张丽萍. 坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 474-483.
- [18] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.
- [19] 李凤英, 何小武, 周春火. 坡度影响土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 229-231.
- [20] Elkabet H, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shanxi Province, China[J]. Catena, 2013, 105: 1-10.
- [21] 许海超, 李子君, 林锦阔, 等. 燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 46-53.
- [22] 潘强, 徐得潜. 安徽淮北地区水土流失与防治对策[J]. 治淮, 2007(5): 44-45.
- [23] 程冬兵, 左长清, 蔡崇法. 不同下垫面每次降雨水土流失特征及影响因素分析[J]. 草业学报, 2007, 16(5): 84-89.
- [24] 黄义端, 田积莹, 雍绍萍. 土壤内在性质对侵蚀影响的研究[J]. 水土保持学报, 1989, 3(3): 9-14.
- [25] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types[J]. Water Resource Manage, 2014, 28: 2415-2433.
- [26] 朱智勇, 解建仓, 李占斌, 等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 1-7.
- (上接第8页)
- [89] 李德平, 张玉梅, 方继臣, 等. 研石山水土流失规律与防治措施的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3): 22-25.
- [90] Espigares T, Heras M D L, Nicolau J M. Performance of vegetation in reclaimed slopes affected by soil erosion[J]. Restoration Ecology, 2011, 19(1): 35-44.
- [91] 袁普金, 张翔, 王万君, 等. 植物篱措施下工程堆积体坡面减流减沙效益研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 374-380.
- [92] 杨帅, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 147-154.
- [93] 杜捷, 高照良, 王凯. 布设植物篱条件下工程堆积体坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 102-106.
- [94] 杨帅, 李永红, 高照良, 等. 黄土堆积体植物篱减沙效益与泥沙颗粒分形特征研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 270-278.
- [95] 刘瑞顺, 王文龙, 廖超英, 等. 露天煤矿排土场边坡防护措施减水减沙效益分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 59-64.
- [96] 杨汉宏, 张勇, 郑海峰, 等. 不同人工植物配置对排土场边坡水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 6-11.
- [97] Zhang L, Wang J, Bai Z, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an open-cast coal-mine dump in a loess area[J]. Catena, 2015, 128: 44-53.
- [98] 张艳, 杨建英, 冯明明, 等. 松散堆积体边坡竹栅栏防护措施的水土保持效益[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 12-16.
- [99] 杨波, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的减水减沙效益[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1357-1368.
- [100] 郭建英, 何京丽, 李锦荣, 等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 296-303.