

文章编号:1000-1638(2025)03-0302-15

DOI:10.13484/j.nmgdxzbk.20250309

水力侵蚀主要防治措施及其效果评价*

张伟东¹,徐湘田^{2,3},赵宇琴^{2,3},李高升⁴,曹艳伟⁵

(1. 鄂尔多斯应用技术学院土木工程学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

2. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 3. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010020;

4. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 5. 中国矿业大学公共管理学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:近年来,我国水力侵蚀防治取得显著成效,截至2023年,全国水力侵蚀面积较1985年减小了40.3%,特别是进入21世纪后,水力侵蚀面积减幅明显增大,较2000年减幅超过33%。为给我国水力侵蚀防治工程实践中方案设计和比选、配置改造和优化提供科学依据,本文结合文献调研、实地调研等方法,统计了我国水力侵蚀面积的时间演化过程,整理了水力侵蚀的不同类型防治措施,在此基础上,详细地对比、评价了常见防治措施的减流效益、减沙效益。结果显示,各类措施在年尺度和年平均尺度下减流效益、减沙效益之间均不存在显著差异。年尺度下复合措施的平均减流、减沙效益略大;年平均尺度下生物措施的平均减流效益较大,但同样是复合措施的平均减沙效益较大。年尺度下对照果园清耕小区时防治措施的平均减流、减沙效益较大;年平均尺度下同样是对照果园清耕小区时防治措施的平均减流效益较大,但对传统耕作小区时防治措施的平均减沙效益较大。时间尺度和对照小区类型是影响防治措施减流、减沙效益评价结果的两个重要因素,在后续的防治措施效益评价中应充分考虑。常见措施在不同实施区域的减流效益、减沙效益之间同样无显著差异,但在西南紫色土区防治措施年平均尺度下的平均减流、减沙效益较大。另外,无论采用何类对照小区,年平均尺度下防治措施的减沙效益普遍大于减流效益。

关键词:水力侵蚀; 防治措施; 减流效益; 减沙效益

中图分类号:S157 **文献标志码:**A

水力侵蚀是指在降水、地表径流、地下径流的作用下,土壤、土体或其他地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的全过程^[1],其表现形式主要包括溅蚀、片蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀、冲沟侵蚀等^[1-2]。水力侵蚀属于全球范围内的重要环境问题^[3-5],有研究数据表明,2015年全世界由水力侵蚀造成的土壤流失高达430亿t^[6]。水力侵蚀对生态环境保护和人类生存发展有重大影响,其危害主要包括^[1,2,5,7-10]:(1)破坏自然环境,威胁生态安全;(2)降低土壤肥力,缩减耕地面积;(3)加剧泥沙淤积,引发河道阻塞;(4)破坏基础设施,影响交通安全。

水力侵蚀是我国分布范围最广、危害最大的土壤侵蚀类型^[11]。数据显示,截至2011年,西北黄土高原区、东北黑土区分别有侵蚀沟666719条和295663条^[12],自然环境遭到严重破坏。由于水力侵蚀的作用,东北黑土区坡耕地土层正以2~3mm的年均速率变薄,有机质含量以1.35%的年均幅

* 收稿日期:2024-11-03; 修回日期:2025-02-26

基金项目:鄂尔多斯市科技合作重大专项(2021EEDSCXQDFZ013)

作者简介:张伟东(1994-),男,内蒙古赤峰人,讲师,博士。主要从事复杂环境下土体物理特性与土壤侵蚀过程、防治研究。E-mail:zwd1994imar@126.com

通信作者:徐湘田(1983-),男,湖南湘潭人,教授,博士。主要从事冻土水热力特征、寒区工程病害防治、水土流失治理等研究。E-mail:jtxuxt@imu.edu.cn

度下降,迫使粮食大量减产^[13-14]。还有统计数据表明,三门峡水库建成之前,黄河下游泥沙淤积量高达4亿t/年,河道年均抬高约10cm,“地上悬河”由此形成^[7,9]。上述数据有力地证实了水力侵蚀对我国生态安全屏障建设、农业经济发展、河流生态健康与通航等造成了极其不利的影响。

自我国大力推进水土流失治理以来,水力侵蚀得到有效遏制,在水土保持上取得了明显成效。统计数据显示,我国水力侵蚀面积已由1985年的179.42万km²缩减到2023年的107.14万km²^[11,15],减小幅度为40.3%。为此,本文首先结合文献调研结果,统计了全国及典型水土流失区域水力侵蚀面积随年份的动态变化过程;然后,在文献调研、实地调研的基础上,分类整理了我国现行水力侵蚀主要防治措施;最后,整合文献调研结果,对比、评价了主要水力侵蚀防治措施的减流、减沙效益,旨在为水力侵蚀防治工作中方案设计、配置优化、合理评估等提供科学依据。

1 我国水力侵蚀面积的时间演化过程

借鉴张伟东^[5]的研究,本文汇总了研究文献^[11]、普查公报^[12]、全国水土保持公报^[15-17]中的相关数据,调研我国水力侵蚀面积的时间演化过程。统计结果如图1所示,图1(a)为不同年份对应的水力侵蚀面积,图1(b)为不同年份水力侵蚀面积相对于1985年水力侵蚀面积的减小幅度,若文献或公报中不包括水力侵蚀面积减幅的计算结果,则依据不同年份的水力侵蚀面积自行计算。由图1可知,从1985年到2011年,我国水力侵蚀面积减小约50万km²,减幅约27.9%;到2023年,水力侵蚀面积减小约72万km²,减幅超过40%。尤其是进入21世纪以来,水力侵蚀面积大幅减小,从2000年到2023年,水力侵蚀面积减小约54万km²,减幅约33.5%。

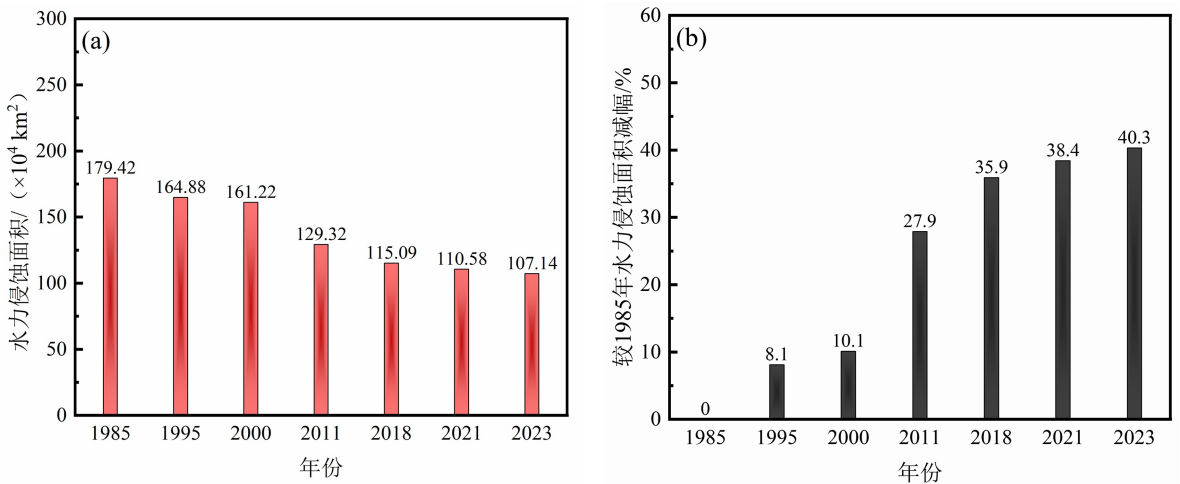


图1 我国水力侵蚀面积(a)与面积减幅(b)的时间演化过程

Fig. 1 Temporal evolutions of water erosion area (a) and reduction rate of area (b) in China

东北黑土区、北方土石山区、西北黄土高原区、南方红壤区和西南紫色土区是我国典型的水土流失区^[7,18-21],这些区域的水力侵蚀问题一直是学者们研究的重点、热点。本节汇总了全国水土保持公报^[15-17,19-21]中上述五个区域不同年份水力侵蚀面积的数据,结果如图2所示。由图2可知,西北黄土高原区水力侵蚀面积较大,南方红壤区水力侵蚀面积较小,北方土石山区、西南紫色土区、东北黑土区水力侵蚀面积相差不大。五个区域水力侵蚀面积逐年减小,年平均减小量分别为0.16、0.29、0.26、0.19和0.24万km²。总体来看,五个区域水力侵蚀防治工作主要针对坡面和侵蚀沟两个方面进行,坡面防治主要采用农作、林草、封禁、整地、改垄、梯田、水平条、反坡阶、地埂植物带、植物篱、鱼鳞坑等措施,侵蚀沟防治涉及沟头防治、沟坡防治、沟道防治三个部分^[22-26]。相对而言,北方土石山区、南方红壤区和西南紫色土区较多关注坡面防治,东北黑土区和西北黄土高原区除关注坡面防治外,还大力

推进侵蚀沟防治。例如,黑龙江省依托黑土区侵蚀沟治理工程,2022和2023年分别治理侵蚀沟8844和6330条^[27-28];山西省2021和2022年分别建成大型淤地坝56和49座,完成中型以上病险淤地坝除险加固34和50座^[29-30]。另外,各地区的气候、土质、地形地貌、不同土地利用类型面积占比等存在明显差异,因此各地区采用的主要防治措施不尽相同^[31-34]。例如,作为国家粮食的“压舱石”,东北黑土区坡耕地面积约10万 km^2 ,因此防治措施较多与耕作相关^[13-14,35-36]。

2 水力侵蚀防治措施的类型

以通用土壤流失方程^[37]为蓝本,我国学者提出了适用于我国水力侵蚀预测的中国土壤流失方程^[2,24,38]。中国土壤流失方程将通用土壤流失方程中的作物覆盖和管理、水土保持措施两个因子修正为耕作措施、生物措施和工程措施三个因子^[37-38]。刘宝元等^[39]建议同样将水力侵蚀防治措施划分为耕作措施、生物措施和工程措施三类。在此基础上,Wang等^[31]增加了复合措施,用以描述上述三类措施的联合实施。本节结合文献调研与实地调研结果,增加了化学措施这一类别,就耕作措施、生物措施、工程措施、化学措施和复合措施五个类型对水力侵蚀防治措施进行梳理,旨在为不同类型防治措施的对比、评价提供科学依据。

2.1 耕作措施

耕作措施主要指通过采取调整微地形、增加地表覆盖和改良土壤结构等方法实现减弱水力侵蚀的一系列耕作、栽培措施^[1,40-41]。顺坡垄作、横坡垄作、斜坡垄作、等高耕作、垄向区田等是调整微地形的常见耕作方式,增加地表覆盖多通过秸秆覆盖、地膜覆盖、等高带状间作等措施实现,免耕、少耕、深松耕作等常作为改良土壤结构的耕作措施被广泛应用^[7,39,40-42]。整体来看,耕作措施与农业生产紧密衔接,原理简单且容易实施,经济效益突出,但不同工况下的减流、减沙效益存在较大差异^[43-45]。因此,为提升水土保持效益,耕作措施与地理环境、气候环境、人为因素等的协调性值得深入讨论、研究。同时,气候特征、地形条件、环保要求等限制了不同耕作措施的应用。例如,机械犁耕导致垄丘土壤疏松,极端暴雨引发坡面径流汇集而加剧顺坡垄作耕地的水力侵蚀^[46];地膜覆盖的耕地中,地膜的回收或处理不当可造成环境污染^[47]。

2.2 生物措施

生物措施广泛应用于水力侵蚀的防治中,主要采取植物种植、植被恢复、经济林建设、退耕还林还草等措施实现植被盖度提高、水资源配置优化、土壤流失减轻、生态环境改善^[1,7,42,48]。生物措施的水力侵蚀防治原理包括^[5,7,42,49-50]:(1)植物地上部分通过拦截雨水实现减弱溅蚀,减小地表径流;(2)植物枯落物的蓄水截流作用;(3)植物根系对雨水入渗量与地表径流量比例关系的协调;(4)植物根系的力学加固作用与“根-土复合体”效应。常见的生物措施包括人工种草造林、飞播种草造林、封山育草育林、草地林地的经营和改良等^[1,7,39]。实施生物措施时,应重点关注适宜草种树种的选择、林草格局的合理配置、水力侵蚀防治的长期效果等问题^[7,51]。

2.3 工程措施

水力侵蚀的工程防治措施多通过拦截径流、泥沙或疏导排水、集水等实现水土保持的目标,整体

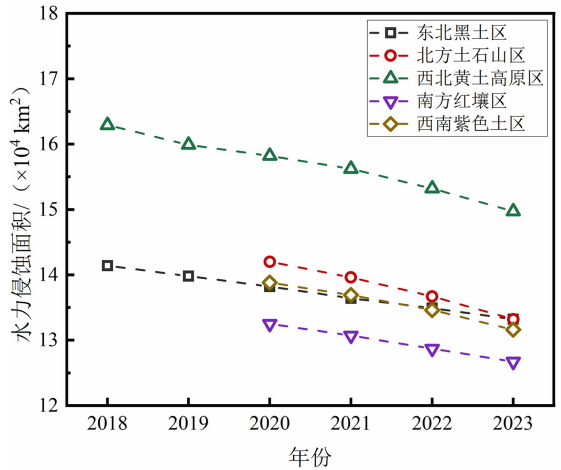
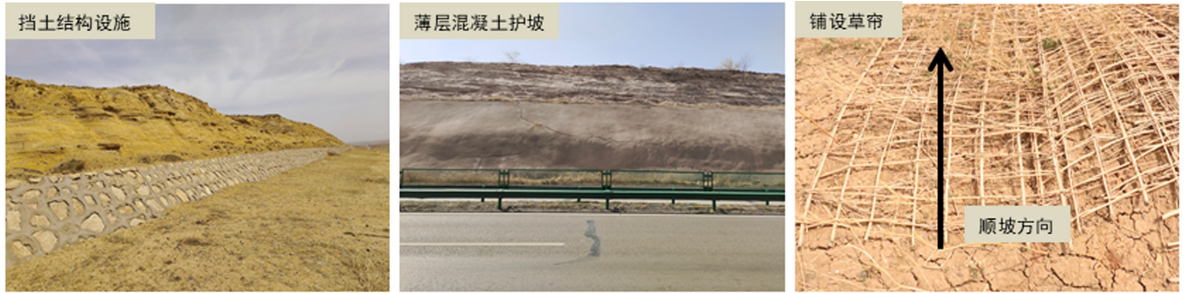


图2 我国典型水土流失区不同年份的水力侵蚀面积
Fig. 2 Water erosion areas of typical soil and water loss regions of China in different years

可划分为坡面水力侵蚀防治措施和沟道水力侵蚀防治措施两个部分^[7,52]。梯田、水平沟、水平阶、截水沟、拦水沟埂、鱼鳞坑等的作用以拦截坡面水力侵蚀中的径流、泥沙为主,排水沟、山塘、水窖等通过疏导排水或集水减弱坡面水力侵蚀^[1,7,39,42]。图3(a)所示的挡土结构设施^[5]、图3(b)所示的薄层混凝土护坡^[5]及图3(c)所示的铺设草帘同样是坡面水力侵蚀防治经常采用的工程措施,图3(a)和(b)为研究团队在鄂尔多斯市砒砂岩区调研时拍摄^[5],图3(c)为研究团队在锡林浩特市矿区排土场水力侵蚀防治调研时拍摄。淤地坝、拦沙坝、谷坊常修筑于沟谷之中,用于拦截沟谷中的径流、泥沙,进而实现沟谷水力侵蚀的防治^[1,7]。另外,排水、集水型工程设施也用于沟头前进的防治之中^[7]。



(a) 道路边坡的挡土结构设施^[5] (b) 道路边坡的薄层混凝土护坡^[5] (c) 矿区排土场边坡的铺设草帘

图3 边坡水力侵蚀防治的常见工程措施

Fig. 3 Typical engineering measures for preventing and controlling water erosion on slopes

2.4 化学措施

“固土”是水力侵蚀防治措施的重要原理,如“根-土复合体”中植物根系对土壤的包裹作用,增强其抵御雨滴溅蚀与径流冲蚀的能力^[49-50]。近些年来,许多新型固化技术蓬勃发展,如微生物固化技术、化学固化技术等,通过添加微生物菌剂、化学改良剂等促使土体内部颗粒间胶结程度增大、孔隙结构改善,进而增强土壤抗蚀能力^[53-58]。从原理上看,微生物固化技术、化学固化技术均是基于物理化学反应提升土壤抗蚀性^[54-56,58],因此将其划入水力侵蚀防治的化学措施更为合理。有研究表明微生物诱导碳酸钙沉淀加固紫色土的平均崩解速率较素土平均崩解速率减小84%~99%^[59],在适宜菌液浓度下固化5次的松散砒砂岩水力侵蚀量可降至未经处理的砒砂岩水力侵蚀量的10%^[60];再如,有机复合固化材料W-OH处理后的砒砂岩坡面在降雨或冲刷作用下产沙量较未经处理的砒砂岩坡面产沙量可减小98%以上^[61]。尽管化学措施在水力侵蚀防治上取得了明显效益,但在实施化学防治措施时,需考虑土地利用、经济成本、施工技术、环境保护等问题。

2.5 复合措施

水力侵蚀防治的复合措施是指在某一区域内实施了耕作措施、生物措施、工程措施、化学措施中的两类或两类以上措施,弥补单一措施的不足,形成相对综合的防护体系^[31,62]。耕作措施+生物措施、耕作措施+工程措施和生物措施+工程措施是水力侵蚀复合防治措施常采用的结构形式。王艳^[63]采用横垄+植物篱的模式治理东北黑土区坡耕地的水力侵蚀,观测结果显示该模式下小区年平均产流量、产沙量仅为顺垄耕作小区年平均产流量、产沙量的25.8%和11.8%;姜宇等^[25]采用等高耕作+石坎反坡阶的模式治理北方土石山区坡耕地的水力侵蚀,观测结果显示该模式下小区年产流量、产沙量仅为自然恢复小区年产流量、产沙量的7.7%和0.6%;Fang^[64]采用刺槐+鱼鳞坑复合措施的模式治理北京市山区的水力侵蚀,监测结果显示该小区2014—2019年的年平均径流深度为5.2 mm,年平均侵蚀模数为19.0 t/km²。

3 不同防治措施减流、减沙效益的对比与评价

3.1 数据来源与评价方法

径流小区监测试验是定量研究水力侵蚀产流、产沙规律的重要方法^[5,65-67]。本节在文献调研的

基础上,整理了我国东北黑土区^[63,68-71]、北方土石山区^[25,64,72-73]、西北黄土高原区^[74-75]、南方红壤区^[76-80]和西南紫色土区^[81-84]径流小区监测试验的重要研究成果,旨在对比、评价不同措施的防治效果。文中统计数据对应的监测试验遵循以下前提:(1)径流小区的几何尺寸不宜过小,不小于 50 m^2 ;(2)径流小区的产流、产沙数据均来源于自然降雨条件下的监测结果,不考虑模拟降雨试验结果;(3)需有裸地径流小区、传统耕作小区或其他小区与实施措施小区作对比;(4)对照小区不产流、不产沙的数据不计入统计分析范围。

减流效益和减沙效益是定量描述水土保持措施效果的关键指标^[32,42,79],本文同样以不同径流小区减流、减沙效益计算结果为依据,对比、评价不同措施的水土保持效果。减流效益 n_w 和减沙效益 n_s ^[32,42,79]公式为: $n_w = (\omega_0 - \omega_m) / \omega_0 \times 100\%$, $n_s = (s_0 - s_m) / s_0 \times 100\%$,式中 ω_0 和 s_0 分别为对照小区的产流量和产沙量, ω_m 和 s_m 分别为实施措施小区的产流量和产沙量。但在工程实践中,描述径流小区的产流量和产沙量有多个时间尺度,例如次降雨产流量和产沙量、某一时间范围内次降雨平均产流量和产沙量、年产流量和产沙量、多年平均产流量和产沙量等。 ω_0 和 ω_m 、 s_0 和 s_m 单位一致且处于相同时间尺度时,即可运用上式计算实施措施小区对于不同对照小区的减流效益和减沙效益。基于其他学者^[25,63-64,68-84]有关水力侵蚀防治的径流小区试验结果及防治措施减流、减沙效益的计算结果,表1汇总了常见措施在不同工况下的减流效益、减沙效益,同时还列出了研究区域、数据时间尺度、小区尺寸与坡度、实施措施小区的具体防治措施及小区内植物、对照小区类型等重要信息。

3.2 不同防治措施减流、减沙效益的对比与评价

3.2.1 不同时间尺度下防治措施的减流、减沙效益

图4(a)、(b)和(c)分别为次降雨尺度、年尺度和年平均尺度下水力侵蚀不同类型防治措施减流效益的对比,图中数据基于表1中其他学者^[25,63-64,68-79,81-84]的试验数据或研究结果得到。年平均尺度下减流、减沙效益的计算结果要求实际监测时间不少于2年,因此表1中文献^[63,68,72,76-78,81-83]的研究结果不仅用于年尺度下防治措施减流、减沙效益的分析,还用于年平均尺度下水力侵蚀防治措施的减流、减沙效益研究(下同)。同时采用非参数检验 Kruskal-Wallis 方差分析方法^[5,85],检验不同防治措施减流、减沙效益之间的差异(下同)。整体来看,不同时间尺度下各类措施的减流效益变化范围均较大,原因是减流效益与实施措施小区的土壤类型、气候条件、地理条件、各类措施的实施标准与细节等紧密相关^[7,31-34]。图4(a)中次降雨尺度下垄作措施、植物篱措施的减流效益之间存在极显著差异($P < 0.001$),且垄作措施的平均减流效益大于植物篱措施的平均减流效益。垄作措施减流效益数据来源于表1中史彦林等^[71]的研究,实施措施小区采取垄作+大豆的防治模式,裸地小区为对照小区;植物篱措施减流效益数据来源于表1中湛芸等^[84]的研究,顺坡农作小区为对照小区。

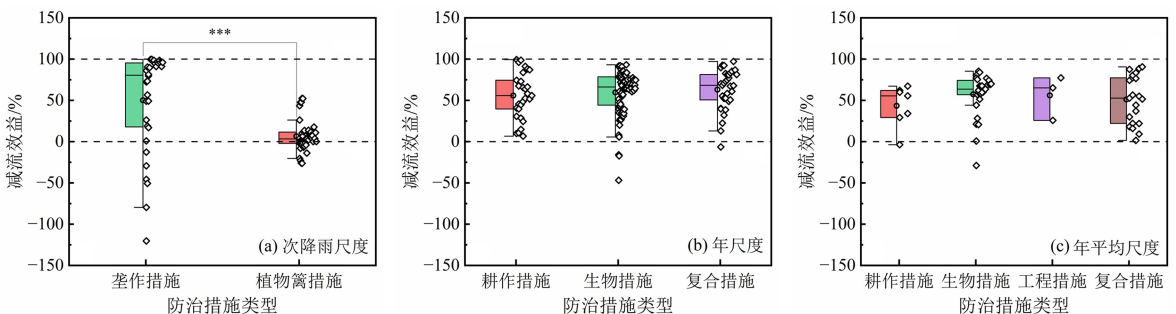


图4 不同时间尺度下各类防治措施减流效益的对比

Fig. 4 Comparison on the benefits of reducing runoff of different kinds of measures at different time scales

表 1 不同水力侵蚀防治措施的减流、减沙效益

Table 1 Benefits of reducing runoff and sediment of different measures for preventing and controlling water erosion

研究区域	数据来源	时间尺度	对照小区	小区尺寸/ (m×m)	小区坡度/ (°)	具体防治措施	植物	措施类型	减流效益/%	减沙效益/%
东北黑土区	Chen 等 ^[68]	年 (2011—2016 年)	传统耕作	20×4.5	5	免耕	玉米或大豆	耕作措施	40.77~99.43	91.99~99.96
						免耕	玉米或大豆	耕作措施	44.69~83.71	84.90~99.81
	李健宇 ^[69]	年 (2020 年)	顺坡垄作	20×4.5	5	免耕	大豆	耕作措施	91.19	98.87
						少耕	大豆	耕作措施	9.87	5.51
	王艳 ^[63]	年 (2019—2022 年)	顺坡垄作	20×5	3	顺垄+秸秆还田	玉米、大豆	耕作措施	10.57~48.55	5.83~79.52
						横垄+植物篱	玉米、大豆、胡枝子	复合措施	40.24~89.65	61.88~94.83
						横垄	玉米、大豆	耕作措施	39.53~88.13	40.81~91.90
						顺垄+垄作区田	玉米、大豆	耕作措施	6.61~66.34	45.71~76.89
	韩富伟等 ^[70]	年 (2005 年)	裸地	30×5	6	生态修复	杂草、灌木	生物措施	51.48	33.99
						地埂植物带	玉米、柠条	生物措施	78.43	87.91
荒山灌木埂						荒草、灌木	生物措施	78.62	94.27	
横垄						玉米	耕作措施	55.74	90.76	
顺垄						玉米	耕作措施	24.47	48.15	
水平台田						李子、土豆	复合措施	92.52	99.15	
史彦林等 ^[71]	次降雨 (2010 年 8 次侵蚀性降雨)	裸地	20×5	3	顺垄	大豆	耕作措施	-120.39~86.12	19.26~98.37	
					横垄	大豆	耕作措施	79.59~99.66	93.44~99.91	
				5	顺垄	大豆	耕作措施	-79.75~56.59	-60.68~92.99	
					横垄	大豆	耕作措施	90.98~98.45	98.49~99.96	
北方土石山区	Fang ^[64]	年平均 (2014—2019 年)	裸地	10×5	14.4	灌木	荆条	生物措施	80.09	95.44
						等高耕作	玉米	耕作措施	-3.71	44.52
						农作	玉米	生物措施	0.66	-4.95
	姜宇等 ^[25]	年 (2022 年)	自然恢复	20×5	17	等高耕作	玉米	耕作措施	86.98	89.39
						石坎反坡阶+等高耕作	玉米	复合措施	92.27	99.39
						梯田	板栗	复合措施	87.50	94.34
彭芳 ^[72]	年 (2005—2009 年)	裸地	10×5	15	农作	玉米	生物措施	34.92~60.98	86.67~97.30	
					石坎梯田	油菜、白菜	复合措施	39.68~70.73	64.77~87.93	
					鱼鳞坑	京白梨	复合措施	73.08~82.50	68.00~88.80	
符素华等 ^[73]	年平均 (2001—2006 年)	清耕 休闲	10×5	15	树盘	板栗	生物措施	81.82	95.27	
					水平条	—	工程措施	65.15	90.56	
					鱼鳞坑	—	工程措施	77.27	92.40	
					水平条	板栗	复合措施	80.30	95.52	
					鱼鳞坑	侧柏	复合措施	83.33	96.88	
西北黄土高原区	张兴昌等 ^[74]	年平均 (1987—1991 年)	裸地	20×5	23	水平沟	—	工程措施	25.70	56.05
						水平沟	谷子	复合措施	29.99	70.70
						水平沟	糜子	复合措施	22.03	65.02
						水平沟	春播荞麦	复合措施	36.90	80.61
						水平沟	夏播荞麦	复合措施	21.93	72.13
						水平沟	黄豆	复合措施	17.99	61.68
						水平沟	黑豆	复合措施	56.46	90.24
						水平沟	黄豆、黄芥	复合措施	44.26	78.55
						水平沟	马铃薯	复合措施	15.97	68.82
						水平沟	小麦	复合措施	1.48	68.74
* 石戴杰等 ^[75]	年平均 (2019—2021 年)	裸地	20×5	10	天然草	本氏针茅	生物措施	56.84	86.98	
					灌木林	柠条	生物措施	76.95	92.90	
					深耕条播	荞麦	耕作措施	55.45	18.74	
					鱼鳞坑	油松	复合措施	88.55	96.62	

表 1(续)

研究区域	数据来源	时间尺度	对照小区	小区尺寸/(m×m)	小区坡度/(°)	具体防治措施	植物	措施类型	减流效益/%	减沙效益/%	
南方红壤区	谢颂华等 ^[76]	年 (2001—2005年)	裸地	20×5	12	果园清耕	柑橘	生物措施	7.91~26.99	3.50~84.74	
						果园+顺坡间作	柑橘、黄豆、萝卜	生物措施	34.76~90.08	19.93~98.18	
						果园+横坡间作	柑橘、黄豆、萝卜	生物措施	43.22~91.61	45.43~99.20	
	丁光敏等 ^[77]	年 (2003—2005年)	裸地	20×5	10	果园+全园草	荔枝、百喜草	生物措施	33.60~76.04	94.00~99.80	
						果园+宽草带	荔枝、草	生物措施	5.60~72.92	86.15~98.85	
						果园清耕	荔枝	生物措施	-46.88~-16.00	-127.09~-30.11	
						果园+梯田	荔枝	复合措施	-6.41~22.40	55.46~71.98	
						果园+梯田+梯壁种草	荔枝、百喜草	复合措施	32.00~67.19	69.55~85.22	
						果园+梯田+全园草	荔枝、百喜草	复合措施	60.80~83.33	90.68~99.84	
	刘士余 ^[78]	年 (1998—2001年)	果园清耕	25×5	14	果园+全园草	柑橘、百喜草	生物措施	30.34~91.93	89.48~100.00	
						果园+草带间作作物	柑橘、百喜草、大豆	生物措施	35.87~87.26	70.39~100.00	
						果园+带状草	柑橘、百喜草	生物措施	30.86~90.83	80.00~100.00	
						果园+全园草	柑橘、假俭草	生物措施	19.98~85.43	87.51~100.00	
						果园+草带间作作物	柑橘、香根草、花生	生物措施	34.01~81.72	61.33~100.00	
						果园+水平梯田梯壁植草	柑橘、草	复合措施	81.34~97.14	98.85~100.00	
顾朝军等 ^[79]	年平均 (2019—2020年)	裸地	20×5	8	经果林	柑橘	生物措施	28.16	58.48		
					经果林	油茶	生物措施	20.59	67.84		
					人工草地	百喜草	生物措施	59.58	85.03		
					人工混交林	湿地松、樟树	生物措施	69.99	98.15		
					人工混交林	湿地松、杜鹃	生物措施	83.99	99.53		
					秦伟等 ^[80]	年平均 (2001—2006年)	裸地	20×5	12	果园+全园草	柑橘、百喜草
果园+全园草	柑橘、宽叶雀稗	生物措施	—	99.63							
果园+全园草	柑橘、狗牙根	生物措施	—	99.70							
果园+带状草	柑橘、百喜草	生物措施	—	99.89							
果园+带状草	柑橘、狗牙根	生物措施	—	99.81							
果园清耕	柑橘	生物措施	—	51.93							
果园+梯壁植草前埂后沟水平梯田	柑橘、百喜草	复合措施	—	99.85							
果园+梯壁植草水平梯田	柑橘、百喜草	复合措施	—	99.57							
果园+水平梯田	柑橘	复合措施	—	86.3							
果园+梯壁植草内斜式梯田	柑橘、百喜草	复合措施	—	99.61							
果园+梯壁植草外斜式梯田	柑橘、百喜草	复合措施	—	98.76							
西南紫色土区	廖晓勇等 ^[81]	年 (2002—2005年)	果园清耕	20×5	25	果园+植物篱	柚、皇竹草	生物措施	58.71~65.74	70.70~77.92	
						林超文等 ^[82]	年 (1998—2005年)	坡耕地	20×7	20	轮作+植物篱
	轮作+植物篱	玉米、红苕、小麦、紫穗槐	生物措施	39.25~75.60	50.00~96.36						
	蒲玉琳等 ^[83]	年 (2010—2012年)	横坡农作	20×7	13		农作+植物篱	小麦、玉米、紫花苜蓿	生物措施	69.26~77.45	86.69~97.05
							农作+植物篱	小麦、玉米、藜草	生物措施	55.99~61.76	87.70~95.92
							农作+植物篱	小麦、玉米、紫穗槐	生物措施	73.33~93.14	92.70~97.26
							农作+植物篱	小麦、玉米、香根草	生物措施	64.46~74.54	90.27~94.48
	湛芸等 ^[84]	次降雨 (2010—2011年 14次侵蚀性降雨)	顺坡农作	20×5	10		农作+植物篱	玉米、新银合欢	生物措施	-20.41~47.62	-16.51~37.69
							农作+植物篱	玉米、香根草	生物措施	-23.00~52.38	-54.83~38.96
					15		农作+植物篱	玉米、香根草	生物措施	-26.29~52.17	-35.99~48.50

注:径流小区位于临近黄土高原的黄土丘陵区。

上述两类措施的减流效益均存在负值,垄作措施的负值减流效益多来源于顺坡垄作小区,主要是由于顺坡垄作可加剧坡耕地的水流汇集^[36,46];植物篱措施的减流效益与植物生长年限紧密相关,当植物生长时间较短,茎、叶尚未密闭,篱墙稀疏,植被盖度较低,亦或植物篱带与作物之间存在隔离带,均会使实施植物篱措施小区的产流量高于对照小区的产流量^[84]。图4(b)中年尺度下耕作措施、生物措施、复合措施的减流效益之间不存在显著差异,但复合措施的平均减流效益较大。图4(c)中年平

均尺度下耕作措施、生物措施、工程措施、复合措施的减流效益之间同样不存在显著差异,生物措施的平均减流效益较大。各类措施在年尺度和年平均尺度下的平均减流效益如表 2 所示。

表 2 不同时间尺度下各类防治措施的平均减流效益

Table 2 Average benefits of reducing runoff of different kinds of measures at different time scales

时间尺度	耕作措施	生物措施	工程措施	复合措施
年尺度	55.75%	59.67%		63.02%
年平均尺度	43.45%	57.39%	56.04%	51.13%

图 5(a)、(b)和(c)分别为次降雨尺度、年尺度和年平均尺度下不同类型水力侵蚀防治措施减沙效益的对比,图中数据同样基于表 1 中其他学者^[25,63-64,68-84]的试验数据或研究结果得到。图 5(a)中次降雨尺度下垄作措施、植物篱措施的减沙效益之间同样存在极显著差异($P < 0.001$),垄作措施的平均减沙效益大于植物篱措施的平均减沙效益,两类措施的减沙效益同样均存在负值,垄作措施的负值减沙效益依然与顺坡垄作加剧坡耕地水流汇集紧密相关^[36,46],植物篱措施的负值减沙效益同样与植物生长年限较短及隔离带的存在有关^[84]。图 5(b)中年尺度下耕作措施、生物措施、复合措施的减沙效益之间不存在显著差异,图 5(c)中年平均尺度下耕作措施、生物措施、工程措施、复合措施的减沙效益之间同样不存在显著差异,但两个时间尺度下均是复合措施的平均减沙效益较大。各类措施在年尺度和年平均尺度下的平均减沙效益如表 3 所示。

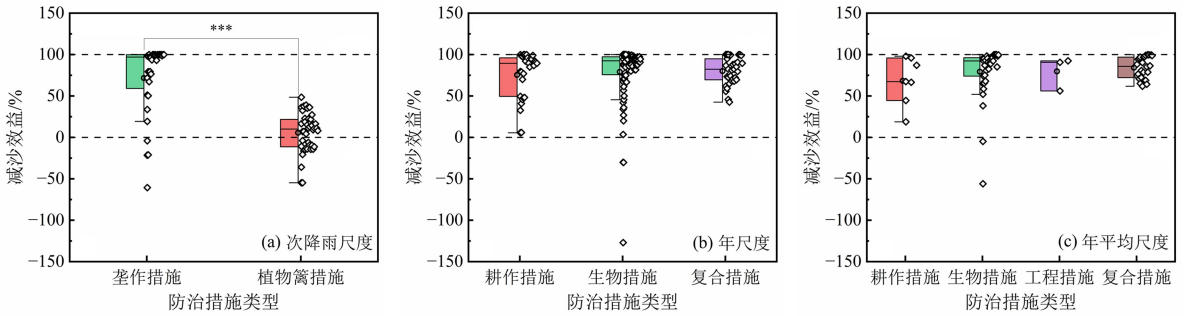


图 5 不同时间尺度下各类防治措施减沙效益的对比

Fig. 5 Comparison on the benefits of reducing sediment of different kinds of measures at different time scales

表 3 不同时间尺度下各类防治措施的平均减沙效益

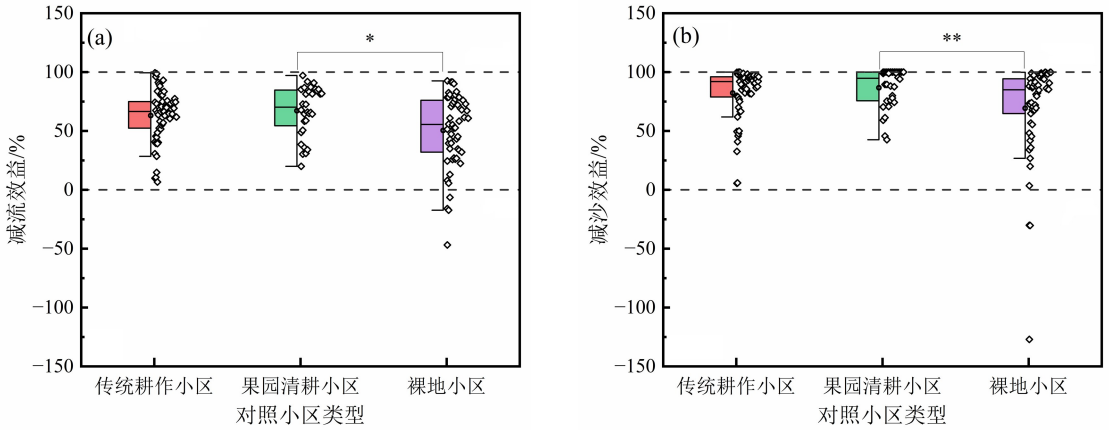
Table 3 Average benefits of reducing sediment of different kinds of measures at different time scales

时间尺度	耕作措施	生物措施	工程措施	复合措施
年尺度	75.38%	79.09%		80.08%
年平均尺度	68.26%	79.27%	79.67%	84.12%

3.2.2 不同对照小区下防治措施的减流、减沙效益

对比表 1 中的汇总结果可知,减流效益、减沙效益计算中对照小区主要包含三类,分别是传统耕作(坡耕地、顺坡农作、横坡农作、顺坡垄作等)小区、果园清耕小区和裸地(包括清耕休闲等)小区。图 6 为采用不同对照小区时年尺度下水力侵蚀防治措施减流效益、减沙效益的对比,平均减流效益、减沙效益如表 4 所示。图 6(a)中对照果园清耕小区与对照裸地小区时水力侵蚀防治措施的减流效益之间存在显著差异($P < 0.05$),图 6(b)中对照果园清耕小区与对照裸地小区时水力侵蚀防治措施的减沙效益之间存在极显著差异($P < 0.01$),但无论对于减流效益还是减沙效益,均是对照果园清耕小

区时水力侵蚀防治措施的平均效益较大。



基于表 1 中其他学者^[63,68-70,72,76-78,81-83]的计算结果或水力侵蚀监测试验数据得到本图数据。

图 6 采用不同对照小区时年尺度下水力侵蚀防治措施减流效益(a)、减沙效益(b)的对比

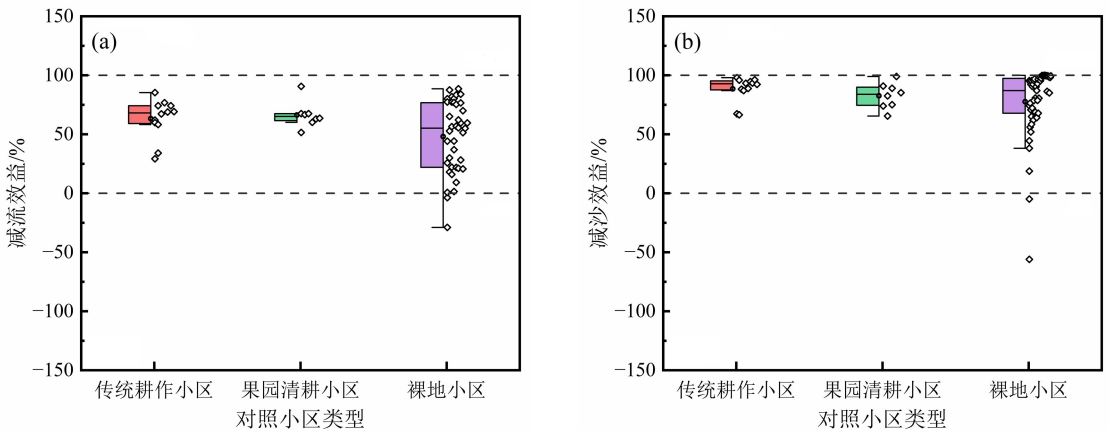
Fig. 6 Comparison on the benefits of reducing runoff (a) and sediment (b) of measures under different controlled plots at the yearly scale

表 4 采用不同对照小区时年尺度下防治措施的平均减流效益和减沙效益

Table 4 Average benefits of reducing runoff and sediment of measures under different controlled plots at the yearly scale

效益	传统耕作小区	果园清耕小区	裸地小区
减流效益	63.06%	67.13%	50.45%
减沙效益	82.21%	86.69%	69.29%

图 7 为采用不同对照小区时年平均尺度下水力侵蚀防治措施减流效益、减沙效益的对比,平均减流效益、减沙效益如表 5 所示。图 7(a)和(b)中对照三类小区防治措施的减流效益和减沙效益之间均不存在显著差异,同样是对照果园清耕小区时水力侵蚀防治措施的平均减流效益较大,但对照传统耕作小区时水力侵蚀防治措施的平均减沙效益较大。



基于表 1 中其他学者^[63-64,68,72-83]的计算结果或水力侵蚀监测试验数据得到本图数据。

图 7 采用不同对照小区时年平均尺度下水力侵蚀防治措施减流效益(a)、减沙效益(b)的对比

Fig. 7 Comparison on the benefits of reducing runoff (a) and sediment (b) of measures under different controlled plots at the annual average scale

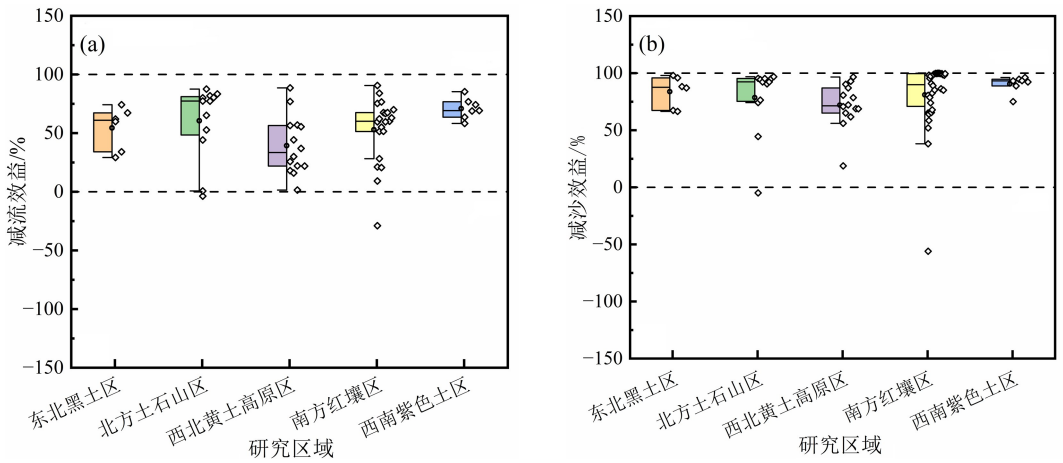
表 5 采用不同对照小区时年平均尺度下防治措施的平均减流效益和减沙效益

Table 5 Average benefits of reducing runoff and sediment of measures under different controlled plots at the annual average scale

效益	传统耕作小区	果园清耕小区	裸地小区
减流效益	63.26%	66.31%	48.02%
减沙效益	88.45%	82.63%	77.57%

3.2.3 不同研究区域下防治措施的减流、减沙效益

图 8 对比了东北黑土区、北方土石山区、西北黄土高原区、南方红壤区和西南紫色土区年平均尺度下水力侵蚀防治措施的减流效益和减沙效益,不同区域防治措施的平均减流效益、减沙效益如表 6 所示。图 8 中五个区域防治措施的减流效益和减沙效益之间均不存在显著差异,但从平均减流效益、减沙效益来看,西南紫色土区防治措施的效益较大,西北黄土高原区防治措施的效益较小。



基于表 1 中其他学者^[63-64,68,72-83]的计算结果或水力侵蚀监测试验数据得到本图数据。

图 8 不同研究区域年平均尺度下水力侵蚀防治措施减流效益(a)、减沙效益(b)的对比

Fig. 8 Comparison on the benefits of reducing runoff (a) and sediment (b) of measures in different regions at the annual average scale

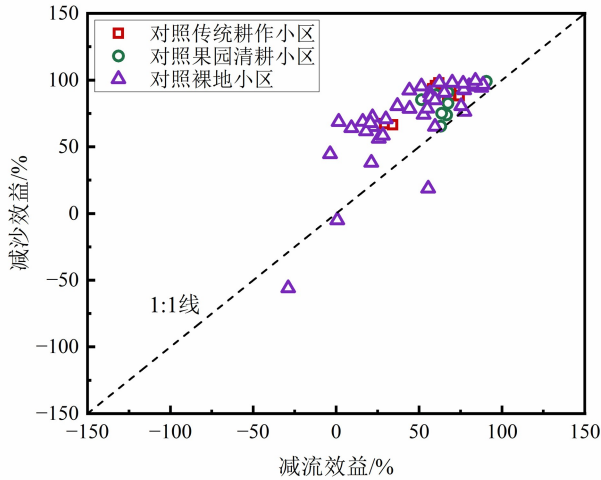
表 6 不同研究区域年平均尺度下防治措施的平均减流效益和减沙效益

Table 6 Average benefits of reducing runoff and sediment of measures in different regions at the annual average scale

效益	东北黑土区	北方土石山区	西北黄土高原区	南方红壤区	西南紫色土区
减流效益	54.43%	60.55%	39.32%	52.88%	70.86%
减沙效益	83.80%	78.57%	71.98%	80.98%	90.52%

3.2.4 年平均尺度下防治措施减流、减沙效益的对比

图 9 对比了采用不同类型对照小区时水力侵蚀防治措施年平均尺度下的减流效益和减沙效益,同时绘制 1:1 线辅助分析^[32,86]。由图 9 可知,除对照裸地小区的个别数据点外,其余数据集中分布在 1:1 线的上侧,说明水力侵蚀防治措施的减沙效益普遍大于减流效益,这与 Niu 等^[32]、Xiong 等^[33]、Jia 等^[34]得到的结论相似,并且该规律不受对照小区类型的影响。



基于表 1 中其他学者^[63-64, 68, 72-79, 81-83]的计算结果或水力侵蚀监测试验数据得到本图数据。

图 9 采用不同对照小区时防治措施年平均尺度下减流效益、减沙效益的对比

Fig. 9 Comparison on the benefits of reducing runoff and sediment of measures at the annual average scale when adopting different controlled plots

4 总结与展望

(1) 统计数据显示,相比于 1985 年,2023 年我国水力侵蚀面积减小了 40.3%;相比于 2000 年,减幅为 33.5%,充分证实了我国现行水力侵蚀防治措施在水土保持上取得明显成效,特别是进入 21 世纪后,水力侵蚀面积大幅减小。

(2) 近些年来,许多新型“固土”防治措施相继被提出,建议依据加固原理增加化学措施这一类别,将现行水力侵蚀防治措施划分为耕作措施、生物措施、工程措施、化学措施和复合措施五类。但在工程实践中,需重点关注化学措施的经济成本、实施区域的土地利用类型、施工技术与方法、生态环境保护等问题。

(3) 基于文献调研结果的数据统计分析发现,时间尺度与对照小区类型是影响水力侵蚀防治措施减流、减沙效益评价结果的两个重要因素。次降雨尺度下垄作、植物篱措施的减流效益、减沙效益之间均存在极显著差异($P < 0.001$);年尺度下复合措施的平均减流、减沙效益较大;年平均尺度下生物措施的平均减流效益较大,复合措施的平均减沙效益较大;但年尺度和年平均尺度下各类措施的减流效益、减沙效益之间均不存在显著差异。年尺度下对照果园清耕小区时,水力侵蚀防治措施的平均减流、减沙效益较大;年平均尺度下同样是对照果园清耕小区时防治措施的平均减流效益较大,但对照传统耕作小区时防治措施的平均减沙效益较大。尽管东北黑土区、北方土石山区、西北黄土高原区、南方红壤区和西南紫色土区年平均尺度下水力侵蚀防治措施的减流效益、减沙效益之间均不存在显著差异,但西南紫色土区防治措施的平均减流效益、减沙效益较大。另外,无论对照何类径流小区时,年平均尺度下水力侵蚀防治措施的减沙效益普遍大于减流效益。

(4) 为更好地服务于水土流失治理与农业经济发展,在今后的水土保持措施效益评价工作中,建议关注下述问题:①明确对照小区类型。工程实践中,裸地小区常被视为防治措施水土保持效果评价的对照小区,但裸地小区要求植被盖度应小于 5%且连续清耕裸露(休闲小区)^[87],实际上较多区域并不是裸地,若仍将裸地小区作为对照小区而未考虑原有土地利用类型是否合理值得深入探讨。②划定评价时间区间。前文的讨论分析表明时间尺度可以影响防治措施减流、减沙效益的评价结果,确定评价时间区间同样是准确评价水力侵蚀防治措施效益的重要前提,若考虑防治措施的中远期效益,将评价时间区间确定为何值仍需深入分析。③完善效益评价体系。整体来看,现有的研究更多关

注水力侵蚀防治措施的减流、减沙效益,从水土保持效果的角度进行评价,但在工程实践中,涉及防治措施工程造价、经济效益、实施难易程度、副反应等诸多问题,因此,有必要建立更加完善的评价体系,为防治措施的配置优化、因地制宜提供更加科学的理论依据。

参考文献:

- [1] 王礼先. 中国水利百科全书:水土保持分册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [2] 郑粉莉,江忠善,高学田. 水蚀过程与预报模型[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [3] AIELLO A, ADAMO M, CANORA F. Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy[J]. *Catena*,2015,131:174-185.
- [4] KATEBIKORD A, DARVISHAN A K, ALAVI S J. Changeability of soil erosion variables in small field plots from different rainfall durations with constant intensity[J]. *Journal of African Earth Sciences*,2017,129:751-758.
- [5] 张伟东. 降雨诱发砒砂岩陡坡重力侵蚀的形成机制研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2024.
- [6] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020,117(36):21994-22001.
- [7] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [8] PANDEY A, HIMANSHU S K, MISHRA S K, et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited[J]. *Catena*,2016,147:595-620.
- [9] 张世杰,焦菊英. 基于下游河流健康的黄土高原土壤容许流失量[J]. *中国水土保持科学*,2011,9(1):9-15.
- [10] 高海燕,王鑫,杨振奇,等. 黄河中游窟野河流域土壤侵蚀与生态修复研究进展[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*,2024,55(3):329-336.
- [11] 李智广,曹炜,刘秉正,等. 我国水土流失状况与发展趋势研究[J]. *中国水土保持科学*,2008,6(1):57-62.
- [12] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2013.
- [13] 张少良,张兴义,刘晓冰,等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. *水土保持学报*,2009,23(3):11-15.
- [14] 张兴义,刘晓冰. 东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J]. *农业工程学报*,2021,37(3):320-326.
- [15] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2023年)[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2023.
- [16] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2018年)[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2018.
- [17] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2021年)[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2021.
- [18] 程琴娟,蔡强国,马文军. 我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J]. *地理研究*,2008,27(6):1290-1298.
- [19] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2019年)[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2019.
- [20] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2020年)[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2020.
- [21] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2022年)[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2022.
- [22] 郑粉莉. 东北黑土区复合土壤侵蚀特征及其防治[M]. 北京:科学出版社,2021.
- [23] 温磊磊,许海超,秦伟,等. 东北黑土区水土保持重点工程措施保存现状及其问题[J]. *水土保持通报*,2023,43(1):417-423.
- [24] 刘宝元,毕小刚,符素华. 北京土壤流失方程[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [25] 姜宇,程宏远. 北方土石山区薄土坡耕地石坎反坡阶措施减流减沙效益分析[J]. *长江科学院院报*,2024,41(8):55-62.
- [26] 张科利,谢云,魏欣. 黄土高原土壤侵蚀评价[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [27] 黑龙江省水利厅. 黑龙江省水土保持公报(2022年)[R]. 哈尔滨:黑龙江省水利厅,2022.
- [28] 黑龙江省水利厅. 黑龙江省水土保持公报(2023年)[R]. 哈尔滨:黑龙江省水利厅,2023.
- [29] 山西省水利厅. 山西省水土保持公报(2021年)[R]. 太原:山西省水利厅,2021.
- [30] 山西省水利厅. 山西省水土保持公报(2022年)[R]. 太原:山西省水利厅,2022.
- [31] WANG Y B, HU X D, YU S X, et al. Soil conservation of sloping farmland in China: History, present, and future [J]. *Earth-Science Reviews*,2024,249:104655.

- [32] NIU Y H, WANG L, WAN X G, et al. A systematic review of soil erosion in citrus orchards worldwide[J]. *Catena*, 2021, 206: 105558.
- [33] XIONG M Q, SUN R H, CHEN L D. Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 753-760.
- [34] JIA L Z, ZHAO W W, ZHAI R J, et al. Regional differences in the soil and water conservation efficiency of conservation tillage in China[J]. *Catena*, 2019, 175: 18-26.
- [35] 王磊, 何超, 郑粉莉, 等. 黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 141-148.
- [36] 沈海鸥, 温磊磊, 武佳龙, 等. 垄作与垄向区田技术对黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22): 56-62.
- [37] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion: A guide to conservation planning[M]. Washington D C: Department of Agriculture, 1978.
- [38] LIU B Y, ZHANG K L, XIE Y. An empirical soil loss equation[C]//International Soil Conservation Organization Conference. Beijing: ISCO, 2002: 21-25.
- [39] 刘宝元, 刘瑛娜, 张科利, 等. 中国水土保持措施分类[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 80-84.
- [40] 吴发启. 水土保持农业技术措施分类初探[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(3): 111-114.
- [41] 欧阳铨人, 吴伯志. 水土保持耕作措施的研究进展及展望[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(4): 718-726.
- [42] 袁希平, 雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 296-300.
- [43] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕, 等. 长江上游紫色土地区不同坡度坡耕地水保措施的适宜性分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(12): 2157-2163.
- [44] 和继军, 蔡强国, 王学强. 北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J]. *地理研究*, 2010, 29(6): 1017-1026.
- [45] 方乾, 赵龙山, 吴发启. 降雨强度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(2): 215-219.
- [46] 王磊, 师宏强, 刘刚, 等. 黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 176-182.
- [47] 郝爱红, 赵保卫, 张建, 等. 土壤中微塑料污染现状及其生态风险研究进展[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1100-1111.
- [48] 张庆, 李元恒, 丁勇, 等. 退化草地生态修复: 理论、技术、设备与评价[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(6): 663-672.
- [49] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [50] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [51] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [52] 杨磊, 冯青郁, 陈利顶. 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 87-95.
- [53] 沈泰宇, 汪时机, 薛乐, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂质黏性紫色土试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3115-3124.
- [54] 王恒星, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 微生物诱导固化技术研究进展[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(1): 70-81.
- [55] 刘家明, 童华炜, 赵寄橦, 等. 盐溶液环境下微生物固化技术加固钙质砂的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(12): 5046-5053.
- [56] 张冠华, 牛俊, 孙金伟, 等. 土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 28-34.
- [57] 钟玉健, 张晓超, 袁锐, 等. 非钙基土壤固化剂加固机理及其应用性能研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(14): 20110066.
- [58] 王楠, 王琼, 叶为民, 等. 微生物加固技术研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(5): 231-244.
- [59] 黎松君, 许冲, 李贤, 等. 非饱和砂质黏性紫色土崩解特性及 MICP 加固试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 127-135.
- [60] 邵新航, 李晓丽, 王海军, 等. MICP 固化松散砒砂岩抗水蚀机理研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(6): 261-270.
- [61] 王其东. 降雨条件下砒砂岩坡面侵蚀规律试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

- [62] LIANG Z S, WU Z R, YAO W Y, et al. Pisha sandstone: Causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7: 1-8.
- [63] 王艳. 不同耕作措施对黑土区坡耕地产流产沙的防治效果[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.
- [64] FANG H Y. Impacts of soil conservation measures on runoff and soil loss in a hilly region, northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247: 106740.
- [65] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7-13.
- [66] ZHU R P, YU Y, ZHAO J C, et al. Evaluating the applicability of the water erosion prediction project (WEPP) model to runoff and soil loss of sandstone reliefs in the Loess Plateau, China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11: 240-250.
- [67] DU L L, HU Y X, GAO X, et al. Mitigation of soil organic carbon mineralization by soil redistribution: An erosion-deposition plot study under natural rainfall over five years[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 327: 107827.
- [68] CHEN S, BURRAS C L, E L L, et al. Interrelationship among slope steepness, tillage practice and rainfall properties with surface runoff and soil loss on Mollisols in northeast China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(13): 1860-1872.
- [69] 李健宇. 长期保护性耕作后黑土坡耕地水土保持效应研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [70] 韩富伟, 张柏, 宋开山, 等. 黑龙江省低山丘陵区水保措施减蚀效应研究[J]. *东北农业大学学报*, 2008, 39(2): 179-183.
- [71] 史彦林, 陈生永, 刘建新, 等. 东北黑土区不同耕作措施保水保土效应研究[J]. *中国水土保持*, 2019(1): 47-49.
- [72] 彭芳. 北方土石山区典型水保措施生态效应评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [73] 符素华, 刘宝元, 路炳军, 等. 官厅水库上游水土保持措施的减水减沙效益[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 18-23.
- [74] 张兴昌, 卢宗凡. 农作物水土保持效益的数值化综合评价[J]. *水土保持学报*, 1993, 7(2): 51-56.
- [75] 石默杰, 杨光, 薛艳春, 等. 黄土丘陵沟壑区降雨特征对不同土地利用类型坡面产流产沙的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(10): 101-109.
- [76] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 81-86.
- [77] 丁光敏, 林桂志, 刘廉海, 等. 坡地幼龄果园不同水土保持措施水沙调控研究[J]. *亚热带水土保持*, 2006, 18(3): 1-3.
- [78] 刘士余. 红壤坡地果园水土保持效应的对比研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(4): 7-10.
- [79] 顾朝军, 朱永清, 黄立文, 等. 不同土地利用对江西红壤坡地产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(4): 10-18.
- [80] 秦伟, 左长清, 郑海金, 等. 赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 115-125.
- [81] 廖晓勇, 罗承德, 陈治谏, 等. 三峡库区坡地果园间植草篱的水土保持效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 152-156.
- [82] 林超文, 涂仕华, 黄晶晶, 等. 植物篱对紫色土区坡耕地水土流失及土壤肥力的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2191-2198.
- [83] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 138-147.
- [84] 湛芸, 何丙辉, 向明辉, 等. 紫色土坡耕地植物篱的水土保持效应研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 47-52.
- [85] KEESSTRA S, PEREIRA P, NOVARA A, et al. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551-552: 357-366.
- [86] ZHANG W D, BAI R Q, XU X T, et al. An evaluation of soil thermal conductivity models based on the porosity and degree of saturation and a proposal of a new improved model[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 129: 105738.
- [87] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究[J]. *泥沙研究*, 2005(4): 1-6.

Main Measures for Preventing and Controlling Water Erosion and Evaluations on Their Benefits

ZHANG Weidong¹, XU Xiangtian^{2,3}, ZHAO Yuqin^{2,3}, LI Gaosheng⁴, CAO Yanwei⁵

(1. *School of Civil Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos 017000, China;*

2. *Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;*

3. *School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China;*

4. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

5. *School of Public Policy and Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)*

Abstract: In recent years, China has achieved remarkable success in preventing and controlling water erosion. By 2023, the national water erosion area had decreased by 40.3% compared to that in 1985. Especially, the reduction in water erosion area has accelerated since the 21st century, with a decrease rate exceeding 33% compared to the water erosion area in 2000. To provide scientific basis for scheme design, configuration optimization, comparison and evaluation in future practices of preventing and controlling water erosion in China, this study analyzed the temporal evolution of water erosion area in China, summarized different types of measures for preventing and controlling water erosion, and compared and evaluated the benefits of reducing runoff and sediment of common measures in detail with the support of data statistics by conducting literature research and field investigation. Results show that there are no significant differences in the benefits of reducing runoff and sediment among different kinds of measures at yearly and annual average scales. At the yearly scale, the average benefits of reducing runoff and sediment of composite measure are slightly larger. At the annual average scale, the average benefit of reducing runoff of biological measure is marginally larger, while the average benefit of reducing sediment of composite measure is also slightly larger. The average benefits of reducing runoff and sediment of measures are relatively larger when the bared orchard plot is regarded as the controlled plot at the yearly scale. And the average benefit of reducing runoff of measures is also relatively larger when comparing the bared orchard plot at the annual average scale, whereas the average benefit of reducing sediment of measures is relatively larger when comparing the traditional tillage plot. Time scale and the type of controlled plot are two important factors which can affect the evaluation results of the benefits of reducing runoff and sediment of measures, and they should be considered in the next evaluations on the effectivenesses of measures. There are no significant differences in the benefits of reducing runoff and sediment of common measures in different implementation regions, however, the average benefits of reducing runoff and sediment of measures in the southwestern purple soil region are larger at the annual average scale. Additionally, the benefits of reducing sediment of measures are generally larger than the benefits of reducing runoff at the annual average scale, which is not affected by the type of controlled plot.

Key words: water erosion; preventing and controlling measure; benefit of reducing runoff; benefit of reducing sediment