

DOI: 10.12401/j.nwg.2023090

砒砂岩区水土流失机制及防治措施研究现状与展望

李华华^{1,2}, 张茂省^{1,2,*}, 冯立^{1,2}, 郑仕梅³, 杜臻^{1,2}

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119; 3. 榆林中科环保科技集团有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 砒砂岩集中分布于黄河中游晋陕蒙交接地带的多沙粗沙区, 是黄河下游地上悬河造床质粗泥沙的重要组成部分, 系关黄河安澜。由于砒砂岩孔隙发育、结构松散, 遇水崩解等特性, 以及地形地貌、气候、水文等因素的影响, 导致砒砂岩极易发生风化、侵蚀, 且侵蚀机制复杂、侵蚀类型多样。系统探究砒砂岩的风化、侵蚀与搬运机制及其发展演化过程是遏制粗泥沙入黄的关键。基于文献检索, 笔者系统整理砒砂岩风化与侵蚀机制, 分析坡面、沟道侵蚀与搬运演化过程、产沙产流规律, 梳理有关砒砂岩的水土流失防治措施研究成果以及存在的问题, 并提出遏制砒砂岩粗泥沙入黄的对策建议。①聚焦粗泥沙集中来源区, 从源头遏制粗泥沙入黄。②按照山水林田湖草沙生命共同体理念, 探索面向粗泥沙的水土保持新体系。③创新多元化投入、跨地区联动, 多部门协作, 多专业融合的遏制粗泥沙入黄工作机制。④加强砒砂岩风化-侵蚀-搬运机制与防治关键技术研究。

关键词: 砒砂岩; 水土流失; 风化侵蚀机制; 遏制技术; 黄河流域

中图分类号: P69; S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0109-12

Research Status and Prospect of Soil and Water Loss Mechanism and Prevention Measures in Pisha Sandstone Area

LI Huahua^{1,2}, ZHANG Maosheng^{1,2,*}, FENG Li^{1,2}, ZHENG Shimei³, DU Zhen^{1,2}

(1. School of Human Settlement Environment and Architecture Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Loess Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Yulin Zhongke Environmental Protection Technology Group Co., Ltd, Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: Pisha sandstone is mainly distributed in the sandy and coarse sand area at the junction of Shanxi, Shaanxi, and Inner Mongolia in the middle reaches of the Yellow River. Pisha sandstone is the main component of coarse sediment in the suspended river bed in the lower Yellow River, which is related to the safety of the Yellow River. The lithological characteristics of Pisha sandstone are developed pore structure, loose structure, and collapse when encountering water, resulting in its extremely easy weathering. In addition, due to the impact of various factors such as variable topographic and geomorphological characteristics, harsh climate, and complex hydrological conditions, the erosion mechanism in Pisha Sandstone areas is complex and the types of ero-

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-04-23; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011)联合资助。

作者简介: 李华华(1994-), 男, 博士, 主要从事地质工程、水土保持及生态修复方面研究。E-mail: 4121322001@stu.xjtu.edu.cn。

* 通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 教授, 博导, 长期从事地质调查、灾害防治与生态修复研究工作。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

sion are diverse. It is the key to control soil and water loss to describe the occurrence, development and evolution pattern of Pisha Sandstone erosion systematically. Based on the literature review, by reviewing the existing research results on the erosion of arsenic sandstone, the influencing factors and evolution process of weathering and erosion of arsenic sandstone are systematically sorted out. The erosion evolution process of slope and channel, sediment production and flow law were analyzed. This paper summarizes the research results of existing control measures and the existing problems in the Pisha sandstone area, and puts forward some suggestions. ① It is recommended to focus on the concentrated source areas of coarse sediment and curb the inflow of coarse sediment into the Yellow River from the source. ② Adhere to the concept of a life community of mountains, forests, fields, lakes, grass, and sand, and explore a new system of soil and water conservation oriented towards coarse sediment. ③ Innovate a diversified investment, cross regional linkage, multi department collaboration, and multi professional integration mechanism to curb the inflow of coarse sediment into the Yellow River. ④ Strengthen the research on weathering erosion transport mechanism and key technologies for prevention and control of Pisha sandstone.

Keywords: Pisha sandstone; soil erosion; weathering mechanism; erosion evolution mechanism; Yellow River Basin

黄河流域是华夏先民繁衍生息的重要家园。在长达 3 000 多年的时间里,黄河流域一直是全国重要的政治、经济和文化中心之一,诞生了中国灿烂的黄河文明。然而,黄河流域也是中国乃至全球水土流失最为严重的地区之一(Fu et al., 2016),是全世界泥沙含量最高、治理难度最大、水害严重的河流之一,历史上曾“三年两决口、百年一改道”,洪涝灾害波及范围北达天津、南抵江淮。水沙关系不协调,下游泥沙淤积、河道摆动、“地上悬河”等老问题尚未彻底解决(兰恒星等, 2022),下游滩区仍有近百万人受洪水威胁,全球气候变化和极端天气引发超标准洪水的风险依然存在。

洪水的威胁在下游,根子在流域。黄河中游流经的黄土高原地区,降雨集中,地质灾害频发,侵蚀强度大,包括滑坡、崩塌、泥石流等侵蚀方式造成严重的水土流失(徐张建等, 2007; 张茂省等, 2011)。据统计,1919~1989 年,黄河年均输沙量约为 16×10^8 t,最大年输沙量为 39.1×10^8 t(1933 年),年均输沙量 91% 来自河口镇至三门峡区间流域。黄河中游黄土高原黄土丘陵沟壑区是黄河泥沙主要来源区(图 1),共有 7.86 万 km^2 的多沙粗沙区。该区多年平均输沙量为 11.82 亿 t(1954~1969 年),占黄河同期总输沙量的 62.8%;粗泥沙(>0.05 mm)输沙量为 3.19 亿 t,占黄河粗泥沙总量的 72.5%。

尤其是广布于黄河中游晋陕蒙交界地带的二叠纪、三叠纪、侏罗纪厚层砂岩、泥岩及砂泥岩互层,被

当地人称之为“砒砂岩”(图 2)(王愿昌等, 2007a, 2007b),因其孔隙发育、结构松散,遇水崩解等特性(Ni et al., 2008),加之外部环境影响,侵蚀作用剧烈,水土流失极为严重,有地球“皮肤癌”之说(姚文艺等, 2018a, 2018b)。据 1954~1969 年资料统计,各支流的多年平均输沙量为皇甫川 6 081 万 t/a,清水川 1921 万 t/a,孤山川 2 659 万 t/a,石马川 487 万 t/a,窟野河 12 481 万 t/a,秃尾河 2 841 万 t/a,多年平均土壤侵蚀模数 $30\,000 \sim 40\,000$ $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$,贡献了黄河中游粗泥沙的 54%,是黄河下游粗泥沙最主要的物质来源区和“地上悬河”造床质的物质基础。从源头遏制粗泥沙入黄,是控制下游“地上悬河”发展的老问题,是确保下游安澜的根本之策。

中国在砒砂岩岩性特征、风化机理、侵蚀过程和防治技术等方面做了大量的科学研究和防治实践,奠定了砒砂岩区水土保持研究在国际上的先进水平,指导了该地区的重大水土保持工程实践。从入黄泥沙的年际分布来看,1989 年以前黄河每年输向下游的泥沙量平均为 15.8 亿 t;到如今黄河中游输向下游的泥沙量基本控制在 2~3 亿 t 的水平。由此可见,中国水土流失治理工作取得了巨大的成就,黄河流域的水沙调控实现了从被动到主动的历史性转变,为确保黄河岁岁安澜做出了重要贡献。

尽管前人做了大量卓有成效的工作,砒砂岩区水土流失问题依然突出,对砒砂岩风化、侵蚀及搬运等方面缺乏系统性多层次深入研究,尚未形成有效的治

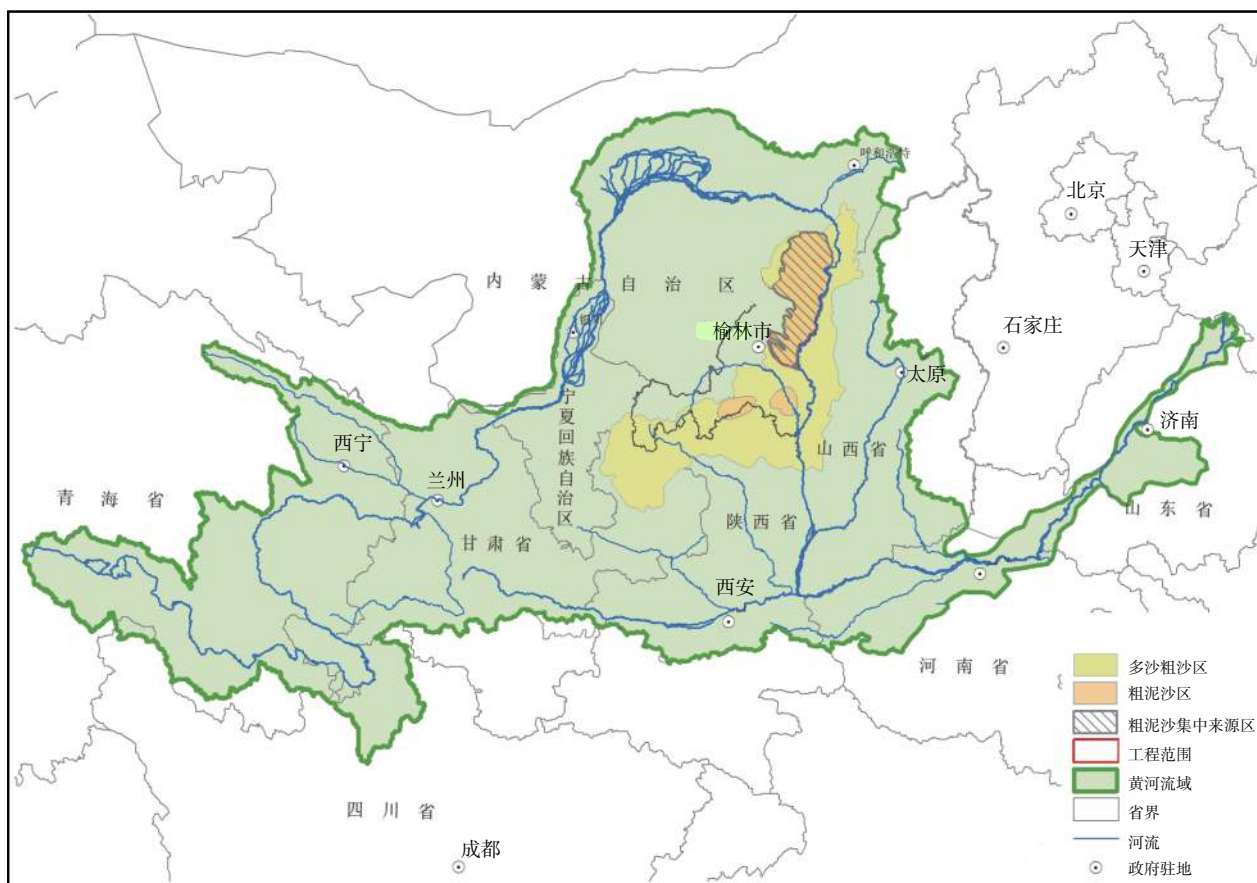


图1 黄河中游多沙粗沙区与粗泥沙集中区分布图

Fig. 1 Distribution of sediment rich and coarse sediment areas and coarse sediment concentrated areas in the middle reaches of the Yellow River

理措施体系。笔者在搜集和分析国内外相关文献的基础上,回顾砒砂岩地区水土流失机制和水土流失治理措施等方面的主要研究进展,总结砒砂岩风化、侵蚀机制,分析坡面、沟道侵蚀与搬运演化过程、产沙产流规律,梳理目前存在的主要问题,并提出遏制砒砂岩粗泥沙入黄的对策建议。

1 砒砂岩风化机制

砒砂岩分布区之所以水土流失严重,被誉为地球的“皮肤癌”,与其矿物成分、化学成分及微观结构等自身及环境因素密不可分(赵国际, 2001)。风化的发生及演化受到多种因素的综合调控,这些因素之间的相互作用在微观-细观-宏观空间尺度下影响着砒砂岩风化的类型、模式与途径。通过实地调研(图3),梳理出影响砒砂岩风化发生与动态的5类主导要素。研究认为矿物成分、化学成分及微观结构是控制砒砂

岩风化发生的自身条件,称之为内部因素;水分和温度变化是导致风化发生的外部驱动力,称之为外部因素。内-外因素中各影响要素的复杂相互作用决定了砒砂岩风化发生过程及演化的趋势。

1.1 内部因素

在砒砂岩矿物、化学组分方面,众多学者进行大量研究工作,已基本掌握砒砂岩中矿物及化学组分情况(表1)。性质稳定的石英颗粒是粗泥沙的来源之一,方解石、云石等碳酸盐矿物起胶结作用(石迎春等, 2004; 叶浩等, 2006; 王强恒等, 2013; 姚文艺, 2017)。化学成分有性质活跃的 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等,遇水易发生化学反应。

在矿物特性与赋存状态方面,砒砂岩微观结构由骨架颗粒、填隙物和孔隙组成,主要有3种典型结构面,包括接触式胶结类型,晶粒镶嵌/型和基地式胶结类型(葛磊等, 2019, 2021)。其中,组成颗粒物的物质包括原生矿物石英、长石和碳酸盐;孔隙填充物主要

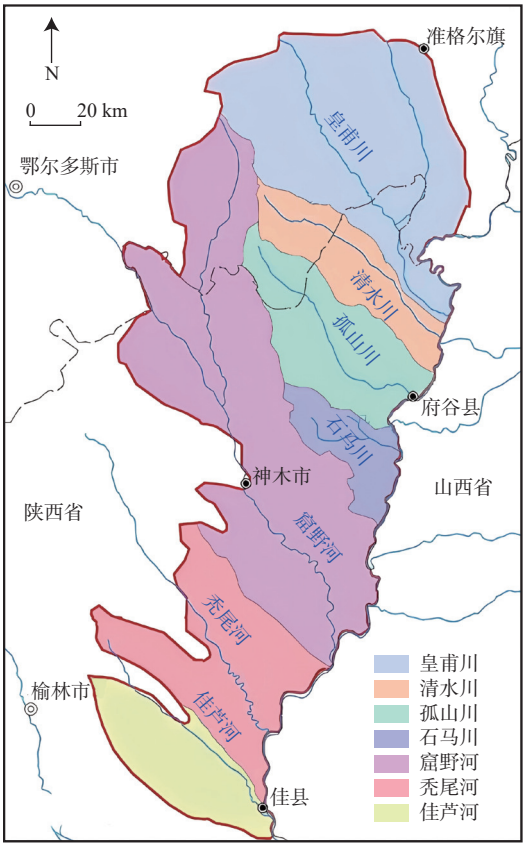


图2 榆林-鄂尔多斯地区砒砂岩集中分布区及水系图
Fig. 2 Concentrated distribution area and water system diagram of Pisha sandstone

包括云母、高岭石、伊利石、蒙脱石等次生黏土矿物；游离氧化物(如游离氧化铁等)作为颗粒接触界面的胶结物(葛磊等, 2019)。微观结构演化与矿物特性和赋存状态密切相关。其中, 由于碳酸盐类矿物易溶解, 起胶结作用的方解石易与水中的 CO_2 产生化学反应,

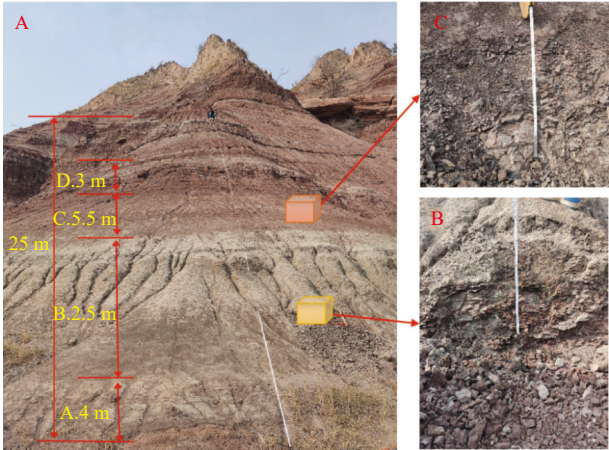


图3 砒砂岩坡面风化层测量与采样图片
Fig. 3 Sampling of weathered layer of arsenic sandstone slope

易溶于水, 颗粒间的胶结作用被减弱, 黏土类矿物蒙脱石遇水易发生强烈膨胀, 结构破坏进一步加剧。

目前, 虽然砒砂岩中的矿物组分已基本明确、定性分析了各种矿物性质及赋存状态在微观结构演化起到的作用, 但砒砂岩风化是一个动态演化的过程, 定性定量的描述风化过程中矿物成分与微观结构演化之间的相互关系研究还较少, 特别是起胶结作用的黏土矿物与具有膨胀特征的蒙脱石矿物在风化作用下赋存状态与微观结构演化规律之间关系的研究还不足, 加强上述研究, 对于从微观角度完善砒砂岩侵蚀机制具有重要指导意义。

在砒砂岩微观结构研究方面, 主要通过光学显微镜、SEM 和 CT 等 2D 或 3D 图像分析技术对砒砂岩中颗粒和孔隙等几何参数进行定性定量统计分析(吴利杰等, 2007; 杨才千等, 2019; 向杰, 2020)。但研究手

表1 砒砂岩矿物成分含量表
Tab. 1 Mineral composition of arsenic sandstone

砒砂岩类型	矿物成分平均含量(%)								取样地点	数据来源
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	钙蒙脱石	伊利石	高岭石		
灰白色	50.5	10.9	1.0	11.0	1.8	20.0	3.0	2.0	纳林川布尔洞沟	石迎春, 2004
紫红色	50.8	10.8	3.6	12.0	2.0	15.8	3.3	2.1		
紫红灰白条带	42.5	16.5	9.0	10.0	2.0	24.0	5.0	0		
未标注	36.4	21.5	13.3	6.9		2.5		4.3	东胜-准格尔旗	王强恒, 2013
未标注	47.1	5.7	4.0	12.6	1.8	18.2	3.3	2.0	内蒙古南部	叶浩, 2006
紫色	30.9	16.4	18.2	10.4	1.6	16.1	1.4	2.7	二老虎沟、圪秋沟、敖包塬	姚文艺, 2017
白色	44.6	19.4	16.3	6.8	1.5	7.5	1.0	2.0		
粉色	18.7	23.3	19.2	15.8	1.3	16.7	1.3	2.3		
灰色	30.5	18.8	16.3	2.0	2.0	22.5	1.0	3.5		

段多以光学显微镜、扫描电镜(SEM)等二维图像识别方法为主,只能观测到二维尺度上的孔隙大小、孔径、颗粒形态等微结构特征,对于砒砂岩三维微观结构还较少,因此应加强利用CT等三维图像识别技术,深入分析砒砂岩三维结构特征,建立风化前后砒砂岩三维微观结构模型,对于探究砒砂岩风化过程微观结构的变化规律具有重要意义。

1.2 外部因素

砒砂岩母岩风化开裂、破碎、崩解形成的碎屑风化层是粗泥沙侵蚀的物源(图3)。母岩的开裂、破碎、崩解等现象都是在砒砂岩风化过程中结构劣化的力学行为和宏观表现。目前对于砒砂岩的力学性能,包括砒砂岩抗剪强度、抗拉强度和无侧限抗压强度方面都做了较为深入的研究,分析了含水率、温度、微观结构、矿物成分等因素与砒砂岩力学性能的关系(石建省等,2009;李晓丽等,2016;杨才千,2019;赵晓雪等,2020)。普遍认为,由于砒砂岩区地处干旱半干旱区,夏季高温多雨,降雨集中且蒸发量大,冬春两季温度低,温度和水分变化是影响砒砂岩风化速率的主要外部因素,干湿循环和冻融循环是导致砒砂岩开裂、破碎和崩解的直接原因。

众多学者通过干湿、冻融循环,探究砒砂岩力学特性的劣化规律,明确循环次数、含水率、温度等条件对原状砒砂岩抗剪强度、抗拉强度、变形特性的影响以及微观结构的变化规律(Ni et al., 2008; 陈溯航等, 2016; Zhang et al., 2019; Ma et al., 2022)。砒砂岩风化时实际是处于一个较为复杂的应力场、水分场、温度场多场耦合环境中,岩体的开裂、破碎及崩解等现象本质上是由于复杂的水分场和温度场变化,在水-热-力的耦合作用下,岩体结构劣化导致内部应力变化,引发岩石开裂破碎。但目前对于砒砂岩在水-热-力耦合作用下,开裂的力学机制研究还较少。基于此,未来应考虑开展水-热-力耦合作用下,砒砂岩风化开裂、破碎及崩解的力学机制研究。

综上所述,目前已基本明确砒砂岩矿物、化学组分及微观结构特征及干湿、冻融循环作用下的力学劣化机制。但风化机制仍然不明确,特别是在水-热-力耦合作用下,砒砂岩微观结构损伤、力学性能劣化机制等尚不明确。建议引入CT等三维图像识别技术,加强在水-热-力耦合作用下矿物赋存状态、微观结构演变规律及岩体开裂崩解的力学机制研究,通过宏观、细观、微观等不同尺度的综合研究,有利于进一步阐

释砒砂岩风化侵蚀机制。

2 砒砂岩侵蚀与搬运机制

2.1 侵蚀机制

砒砂岩侵蚀过程主要是在水力、风力、重力和冻融等侵蚀营力作用下,导致表层物质被破坏、剥离、搬运和沉积,进而造成水土流失。其侵蚀过程具有显著的时空分布规律,在时间上与年度季节气候变化有关,在空间上与岩性和地形地貌等特征有关(叶浩等,2008;杨振奇等,2019,2020,2021)。例如,在裸露砒砂岩区、盖土砒砂岩区和盖沙砒砂岩区,由于岩性、下垫面以及上覆植被等因素不同,在侵蚀营力作用下,表现出不同的径流侵蚀产沙方式、侵蚀方式(Zhang et al., 2020)。同时,侵蚀类型包括水蚀、风蚀、重力侵蚀和冻融侵蚀等,不同侵蚀类型对应的侵蚀机理也存在差异,随着季节的交替,侵蚀类型存在相互交替、叠加现象(张攀等,2019)。众多学者通过室内模型试验、野外原位监测等多种技术手段,针对砒砂岩侵蚀模式、侵蚀影响因素、侵蚀演化规律等开展了大量卓有成效的研究工作。

为研究坡面侵蚀规律,室内模型试验主要通过取松散重塑样进行水槽冲刷试验,通常借助温度湿度传感器、流量传感器、三维激光扫描等现代传感设备及影像技术,分析坡面产沙产流规律及侵蚀微地貌变化规律。张赢等(2021)通过冲刷槽模拟不同雨强、坡度时降雨冲刷作用对的产沙产流的影响规律,发现压实密度为 1.50g/cm^3 和 1.60g/cm^3 坡面的侵蚀量主要由重力侵蚀造成, 1.70g/cm^3 坡面的侵蚀量主要受水流冲刷的影响。常平等(2019)研究发现,水流弗罗德数和雷诺数等水流动力参数与坡度密切相关,流量对流速的影响小于坡度的影响,影响单位水流功率的主要因素为坡度,影响冲刷率的主要因素为单宽流量与坡度。水动力参数是表征水蚀水动力学机制的重要指标,是建立水蚀模型基础,但对于砒砂岩侵蚀的水动力学指标与侵蚀机制的研究还较为欠缺。

考虑到室内模型试验的尺寸限制、侵蚀营力与自然条件存在一定差别,已有众多学者通过野外原位监测手段,试图揭示真实自然条件下砒砂岩侵蚀机制。张攀等(2019)通过在准格尔旗二老虎沟小流域野外典型砒砂岩坡体布设水文、气象、地温、土壤等监测站点,收集含水量、温度、风力、水力等关键参数,系统分析砒砂岩典型坡面发生复合侵蚀过程中3种代

表性的动力组合模式。进一步研究发现,复合侵蚀过程存在着显著的叠加放大效应,风蚀作用对于侵蚀产沙量的影响作用较小,冻融作用是增加产流产沙量的关键促进因素(卫午毓等, 2020; 高玄娜等, 2021; Zhang et al., 2021; 张攀等, 2022)。复合侵蚀过程是使砒砂岩成为黄河粗泥沙核心来源区的重要原因之一,但对于复合侵蚀作用下,各侵蚀营力对于坡面侵蚀的动力学机制、分离各类侵蚀作用对产流产沙的贡献方面的研究还较少,应加强这方面的研究。

2.2 搬运机制

通过粒度分析法,分析砒砂岩区 3 条典型小流域不同侵蚀类型产沙量规律,发现小流域总产沙量的 15.86%~20.61% 来自沟间地, 79.39%~84.14% 来自沟谷地(王晓, 2001)。土壤侵蚀以砒砂区沟谷坡面为主,输移动力以暴雨径流为主,小流域输运路径以顶坡沟谷坡脚沟床为主。径流引起沟床冲刷和沟谷壁淘刷,形成高含沙洪水,最终将高含沙洪水沿沟床向下个干流通过推移、跃动、蠕动、悬移等方式转移(毕慈芬等, 2008)。砒砂岩地区泥沙的输移比值接近于 1,这就是说砒砂岩地区的产沙量在较长的时间段是接近其侵蚀量的。从年内来看,砒砂岩地区侵蚀与产沙明显具有不同步性,虽然侵蚀在一年四季内都有发生,但产沙主要集中在汛期的几场暴雨,尤其是首次洪水,产沙过程明显受制于侵蚀规律和径流变化规律。

3 砒砂岩区水土保持措施

20 世纪 80 年代中期,水利部提出以沙棘资源开发作为砒砂岩区水土流失治理的突破口,1998 年水利部启动了砒砂岩沙棘生态工程,之后国家水土保持重点治理项目、水土保持治沟骨干工程、砒砂岩沙棘减沙生态治理项目、小流域综合治理项目陆续实施,以及新世纪开展的山川秀美、退耕还林还草、山水林田湖草沙一体化保护修复、绿色矿山建设、矿山地质环境治理恢复与土地复垦等重大工程项目的实施,在遏制砒砂岩地区水土流失方面取得了卓有成效的进展,对改善砒砂岩区生态环境发挥了积极作用。

3.1 坡面侵蚀治理措施

植被水保措施对于调控黄土高原坡体重力侵蚀起到了较好的效果(于国强等, 2012a, 2012b),但砒砂岩坡面土壤薄、养分少、侵蚀强度大,缺少立地条件,植被难以生长,坡面很难直接实施如植树造林、植被

自然恢复等生物治理措施(图 4)。另外,受限于砒砂岩遇水易发生崩解、抗冲刷能力弱等特点,在黄土地区取得较好效果的水保措施,例如水平沟、鱼鳞坑、坡改梯等坡面工程措施,直接用于砒砂岩区推广应用具有一定难度(姚文艺等, 2015)。因此,目前对于坡面侵蚀的治理措施主要以化学材料加固为主。

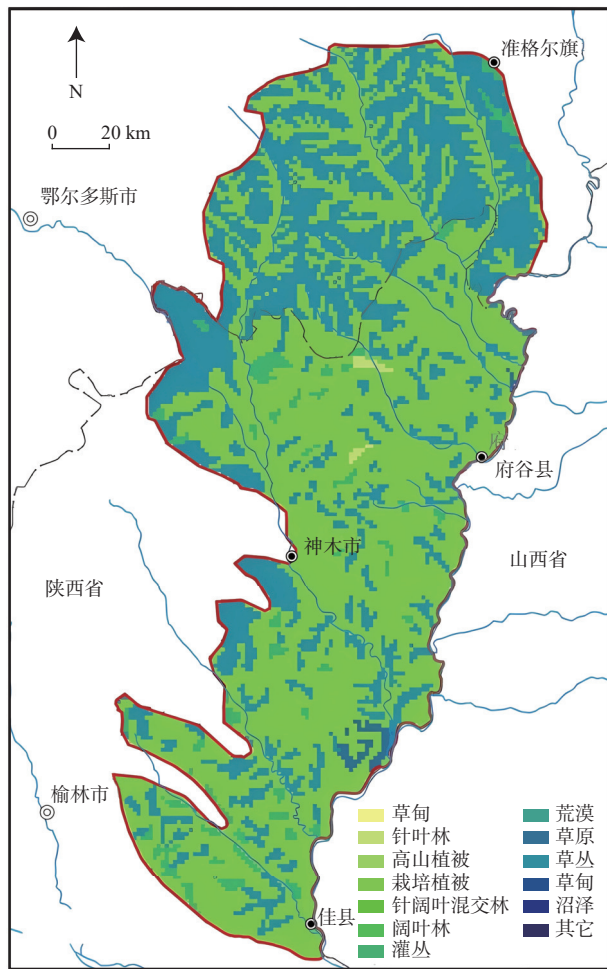


图 4 榆林-鄂尔多斯地区砒砂岩集中分布区植被类型分布图

Fig. 4 Distribution map of vegetation types in the concentrated distribution area of Pisha sandstone

为探究 EN-1 固化剂对于提升砒砂岩边坡抗冲刷性能,基于室内外冲刷试验和土工试验,分析改良砒砂岩风化土的力学特性和抗冲性能,获得了固化剂掺量、养护龄期、压实度和土壤含水量的最优组合(苏涛等, 2011a, 2011b)。黄河水利科学研究院研发并形成抗蚀促生复合材料及砒砂岩抗蚀促生治理技术,将新型环保型的改良 W-OH 材料应用于砒砂岩坡体加固,开展了加固土的干湿循环、冻融循环和抗紫外线等材料耐久性试验,并通过野外冲刷试验,验证了新

型改良 W-OH 抗蚀促生材料具有良好的渗透、抗蚀、抗老化、保水、植生性能(姚文艺等, 2016, 2018a, 2018b)。成都理工大学裴向军与西安交通大学张茂省利用双聚材料(SPJ)在粗泥沙水土流失治理和延安革命老区革命旧址保护中取得良好的效果。

目前, 一种新的加固技术正尝试应用于砒砂岩坡面加固, 王燕星等(2022)将微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术用于砒砂岩风化土改良加固, 研究发现, 经微生物诱导的碳酸钙晶体方解石-球霏石团聚体的晶型被沉积, 并填充于砒砂岩风化土的孔隙中, 使得砒砂岩风化土密实度提高, 抗蚀能力得到增强。由于微生物诱导的碳酸钙晶体的填充和胶结作用, 可以很好地解决砒砂岩遇水崩解的问题。但该技术还处于理论研究阶段, 未见应用于砒砂岩区的野外试验成果的报道。

3.2 沟道侵蚀治理措施

沟道治理主要是通过工程措施、生物措施减缓水流流速、降低水流输沙能力, 淤积泥沙。毕慈芬等(2021, 2022)创新性地提出可以通过种植沙棘, 在山间沟壑地带形成沙棘“植物柔性坝”的构想, 通过“柔性坝”滞积洪水泥沙于沙棘群, 从而降低小流域产沙量, 达到治理砒砂岩区沟壑水土流失的目的。研究表明, 沙棘“植物柔性坝”的建立能够极大削弱洪峰强度, 降低水流剪切力, 使得水流行进流速小于泥沙沉降速度(张涛等, 2008; 李怀恩等, 2009; Yang et al., 2013, Yang et al., 2014; 毕慈芬等, 2021, 2022)。砒砂岩区水土流失治理工程包括谷坊、塘坝、淤地坝、小型拦蓄工程等。但受限于砒砂岩沙粒间胶结程度差、遇水易崩解等特性, 很难将其直接作为淤地坝筑坝材料。为解决筑坝材料问题, 一些学者尝试对砒砂岩进行改性, 通过添加固化剂, 改变其遇水崩解的性质, 以实现改性材料用于筑坝的目的(姚文艺等, 2015; 李长明等, 2016; 王立久等, 2016)。姚文艺等(2015, 2016, 2018a, 2018b)通过大量试验研究和野外监测, 提出一种二元立体配置治理模式, 研发了砒砂岩区水土流失治理的抗蚀促生与改性筑坝新技术。此外, 一些学者开始探究生物措施与工程措施的有机结合, 将植物柔性坝与刚性谷坊、淤地坝有机配置, 以期能够对泥沙进行分选, 实现柔性坝拦挡粗泥沙, 刚性谷坊和淤地坝淤积细泥沙的功能(姚文艺等, 2016), 但如何实现各种治理措施高效有机结合还有待深入研究。

在砒砂岩资源化利用研究方面, 陕西省地建集团

联合中科院地理科学与资源研究所和西安理工大学等多家单位, 开创性的提出砒砂岩资源化利用的新路子, 充分利用砒砂岩与沙 2 种物质在矿物成分、结构特征上的优势互补特性, 攻关沙与砒砂岩混合造地的关键技术, 实现人造耕地(韩霁昌等, 2012)。

中国在砒砂岩区水土流失防治措施的理论研究与工程实践方面取得了卓有成效的成果, 砒砂岩区坡面、沟道的治理措施、技术方案正在日趋成熟, 治理手段多元化, 治理技术不断更新, 包括对于减缓坡面侵蚀风化的化学材料加固措施, 起到拦沙削峰的“沙棘柔性坝”措施以及拦沙拦水的淤地坝系统。但对于砒砂岩区水土流失的综合治理仍相当薄弱, 传统治理存在局部化、零散化、间断化等问题, 还未形成从坡-沟体系出发的有效综合治理体系, 同时在砒砂岩资源开发利用方面, 也缺乏全区域尺度山水林田湖草空间一体化综合治理系统。

4 存在的问题与展望

4.1 存在的问题

前已述及, 新中国成立以来, 黄河流域水土流失治理工作取得了明显效果(穆兴民, 2020, 2021), 确保了黄河岁岁安澜。但黄河流域水土流失尚存在许多有待解决的重大问题。

(1)黄河下游“地上悬河”与洪水风险依然是流域的最大威胁。必须清醒的认识到, 黄河中游水土流失量大面广、生态环境脆弱、流域生态屏障功能不强的局面没有发生根本改变; 粗泥沙集中来源区易发生水土流失的黄土丘陵沟壑地形地貌没有变、易被侵蚀的黄土和砒砂岩性质没有变、暴雨集中的降水特征都没有变; 改变的是以往的水土保持工程的服务年限越来越少, 部分拦砂坝、淤地坝、水库的淤积已接近极限; 2022 汛期, 黄河流域多处降雨量激增, 下游险情突现, 洪水风险仍然很高, “小流量高水位”现象充分说明黄河下游河道淤积之严重; 因此不得不冒着影响壶口瀑布、乾坤湾等名胜风景的风险, 建议修建古贤水库, 以缓解下游淤积压力。由此可见, 洪水风险依然是流域的最大威胁, 黄河水害隐患还像一把利剑悬在头上, 威胁近百万人的生命安全, 丝毫不能放松警惕。

(2)亟待坚持山水林田湖草沙生命共同体理念, 开展系统治理, 推进综合施策。20 世纪 60 年代开展的淤地坝工程、20 世纪 80 年代开展的小流域综合治

理、20 世纪 80 年代中期开展的沙棘减沙生态治理项目,以及新世纪开展的山川秀美、退耕还林还草、山水林田湖草沙一体化保护修复、绿色矿山建设、矿山地质环境治理恢复与土地复垦等重大工程项目,使黄河流域的水沙调控实现了从被动到主动的历史性转变。但在山水林田湖草沙系统治理,综合施策,以及多部门协同推进的工作机制等方面有待进一步提高。

(3) 砒砂岩风化-侵蚀-搬运-防治全过程的物理机制与防治措施体系研究有待加强。前人针对砒砂岩做了大量的科学研究和防治实践,取得了丰硕的研究成果和卓有成效的工程实践。但与人与自然和谐共生的现代化要求相比,仍存在以下问题,有待进一步研究深化。①在砒砂岩风化机制方面,还未定性定量揭示起胶结作用的黏土矿物与具有膨胀特征的蒙脱石矿物的含量、赋存状态与微观结构演化规律的关系;在水-热-力耦合作用下,砒砂岩微观结构损伤、力学性能劣化机制等尚不明确。②在砒砂岩侵蚀动力学机制及复合侵蚀机理方面,水动力参数是表征水蚀水动力学机制的重要指标,但对于砒砂岩坡面侵蚀的水动力学机制研究还较为欠缺;对于复合侵蚀作用下,各类侵蚀作用对产流产沙的贡献占比方面尚缺少深入研究。③在砒砂岩区水土流失防治措施方面尚缺乏系统的综合治理体系,未形成从坡-沟体系出发针对砒砂岩风化-侵蚀-搬运每一个环节的有效的综合治理体系,缺乏全区域尺度山水林田湖草空间一体化综合治理。

4.2 展望

(1) 聚焦粗泥沙集中来源区,从源头遏制粗泥沙入黄是保障黄河长久安澜的根本之策。黄河流域水土流失治理成效显著,已经使入黄泥沙量锐减到史前水平(于国强等, 2012a, 2012b; 穆兴民等, 2020, 2021)。在泥沙平衡方面,入海的黏粒、粉粒等细小的悬移质明显减少,对海岸带稳定带来负面影响;粗泥沙引起的“地上悬河”与洪水风险依然存在。因此,提出黄河流域水土流失治理工作应从黄河中游地区普遍治理,逐步转向多沙粗沙区为主,并聚焦粗泥沙集中来源区(图 5),尤其是在砒砂岩集中分布区部署生态保护修复工程,从源头遏制粗泥沙入黄,缓解拦沙坝、水库和“地上悬河”泥沙淤积压力,抓住水沙协调的“牛鼻子”,保障黄河长久安澜。

(2) 坚持山水林田湖草沙生命共同体理念,探索面向粗泥沙的水土保持新体系。遵循生态系统内在

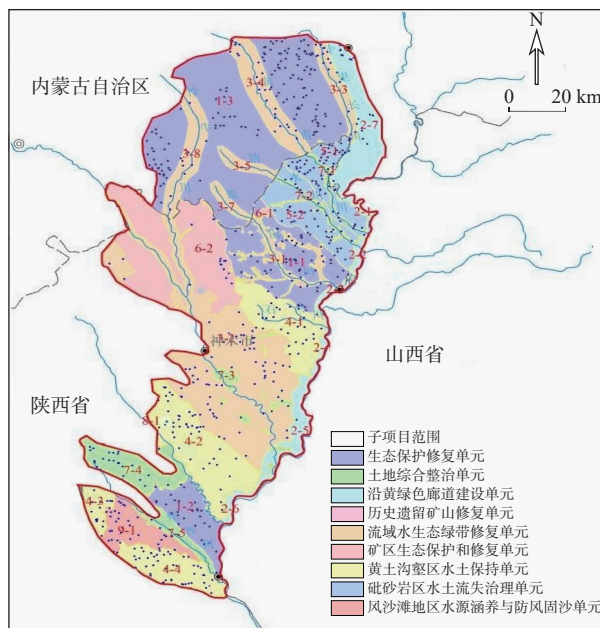


图 5 榆林-鄂尔多斯地区砒砂岩集中分布区生态修复工程建议图

Fig. 5 Proposed layout of ecological protection and restoration works in the concentrated distribution area of Pisha sandstone

机理,以生态本底和自然禀赋为基础,统筹考虑自然地理单元的完整性、生态系统的关联性、自然生态要素的综合性,坚持山水林田湖草沙全生态要素一体化保护与修复的理念,坚持节约优先、保护优先、自然修复为主。以重要生态系统为单元,以实现人与自然和谐共生的现代化为目标,科学配置保护与修复、自然与人工、生物与工程等措施,综合施策,强化山水林田湖草沙系统治理,推进产业生态化、生态产业化,变绿水青山为金山银山,探索水土保持面向粗泥沙的新体制。使自然生态要素、农业农村生态空间格局和城市绿色空间生态环境得到根本改善,生态系统质量明显改善,生态服务功能显著提升,生态稳定性日益增强,生态系统韧性稳步提升,是生态环境建设的新模式和优质发展的新路子。

(3) 创新多元化投入、跨地区联动,多部门协作,多专业融合的遏制粗泥沙入黄工作机制。位于鄂尔多斯盆地国家大型能源基地范围内的粗泥沙集中来源区,要发挥和利用好矿企修复基金,引入社会资本解决治理资金来源问题,必须将粗泥沙水土流失治理与能源基地矿山地质环境治理修复和土地复垦相结合。对皇甫川、清水川、孤山老水、石马川、窟野河、秃尾河、佳芦河等流域上下游及左右岸,涉及内蒙古鄂尔多斯市、陕西榆林市的粗泥沙集中来源区,一定

要坚持治流域理念,实行跨区域统筹规划设计。粗泥沙水土流失治理同时涉及水利、自然资源、农业农村、环境保护、发改委等多个部门,以及水土保持、水文

水资源、地质工程、国土资源、环境保护、农业、林草等多个专业,必须构建多部门协作,多专业融合联合部署、协同推进的工作机制(图6)。

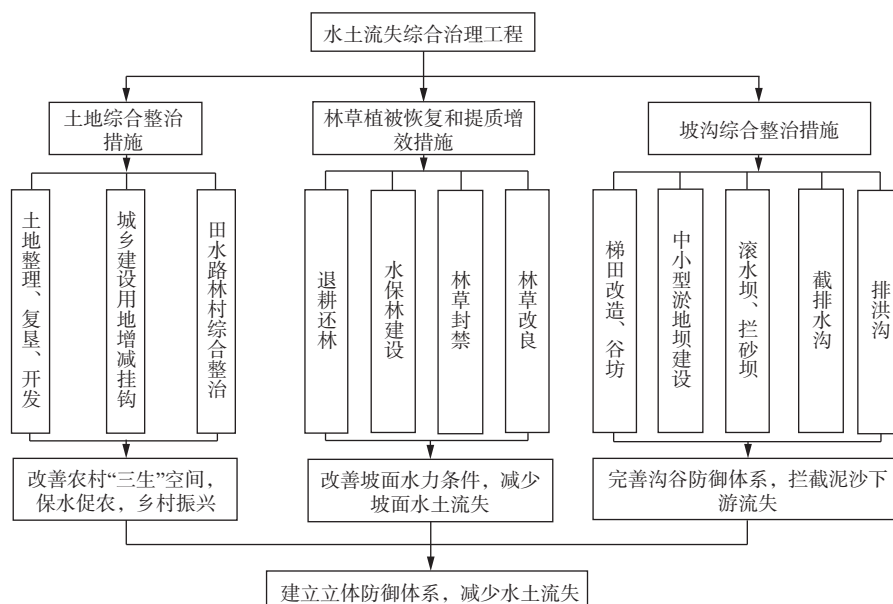


图6 多部门多专业协同联动的砒砂岩水土流失综合治理框架图

Fig. 6 Framework diagram for comprehensive control of water and soil loss in soft sandstone with multi-departmental and multidisciplinary coordination

(4)加强砒砂岩风化-侵蚀-搬运机制与防治关键技术研究。①针对砒砂岩风化特征研究,可引入CT等三维图像识别技术,加强在水-热-力耦合作用下矿物赋存状态、微观结构演变规律及岩体开裂崩解的力学机制研究,通过宏观、细观、微观等不同尺度的综合研究,进一步阐释砒砂岩风化侵蚀机制。②在砒砂岩区复合侵蚀时空分异规律研究方面,鉴于砒砂岩区的土壤侵蚀作用是多营力参与的复合侵蚀过程,水蚀、风蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀在时间和空间上的交互作用,应加强各类型侵蚀的动力学机制研究,开展定量分离复合侵蚀的时空作用机制研究。③在坡-沟体系下综合治理措施研究方面,从遏制砒砂岩风化-侵蚀-搬运全过程的每一个环节出发,研发关键技术,构建有效的综合治理体系。根据“山顶戴帽子,山腰系带子,山脚穿靴子”的治理原则,开展全立体多单元的复合侵蚀综合治理系统研究,建立生物-工程-改性材料的生态措施体系及模式,实现固沙-植绿-造地的治理目标。

参考文献(References):

毕慈芬,沈受百,王富贵.植物柔性工程学浅思[J].中国水土保持, 2021, (12): 47-49.

持, 2021, (12): 47-49.

BI Cifen, SHEN Shoubai, WANG Fugui. Thoughts on plant flexible engineering[J]. Water and Soil Conservation in China, 2021, (12): 47-49.

毕慈芬,王富贵.砒砂岩地区土壤侵蚀机理研究[J].泥沙研究, 2008, (01): 70-73.

BI Cifen, WANG Fugui. Study on soil erosion mechanism in soft sandstone area[J]. Sediment Study, 2008, (01): 70-73.

毕慈芬,王富贵,李学勇.砒砂岩区沙棘植物柔性坝野外试验研究综述[J].中国水土保持, 2022, (04): 46-52.

BI Cifen, WANG Fugui, LI Xueyong. Summary of field test and research on seabuckthorn plant flexible dam in soft sandstone area[J]. Water and Soil Conservation in China, 2022, (04): 46-52.

常平,李晓丽,李明玉,等.砒砂岩坡面薄层水流水力冲刷特性试验研究[J].排灌机械工程学报, 2019, 37(04): 325-331.

CHANG Ping, LI Xiaoli, LI Mingyu, et al. Experiment of hydraulic scouring characteristics of thin water in Pisha-sandstone[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2019, 37(04): 325-331.

陈溯航,李晓丽,张强,等.鄂尔多斯红色砒砂岩冻融循环变形特性[J].中国水土保持科学, 2016, 14(4): 34-41.

CHEN Suhang, LI Xiaoli, ZHANG Qiang, et al. Deformation characteristics of red pisha sandstone during freezing thawing cycles in

- Ordos[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(4): 34-41.
- 高玄娜, 肖培青, 张攀, 等. 复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(01): 44-49.
- GAO Xuanna, XIAO Peiqing, ZHANG Pan, et al. Characteristics of sediment particles in soft sandstone slope under combined erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(01): 44-49.
- 葛磊, 李娟, 彭飏. 鄂尔多斯砒砂岩微观结构特征研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(08): 36-42.
- GE Lei, LI Juan, PENG Biao. Study on microstructure characteristics of Ordos soft sandstone[J]. Western Development (Land Development Engineering Research), 2019, 4(08): 36-42.
- 葛磊, 卢垟杰, 曹婷婷. 黄棕色砒砂岩微结构特征及崩散微观特征研究[J]. 电子显微学报, 2021, 40(02): 126-131.
- GE Lei, LU Yangjie, CAO Tingting. Study on microstructure characteristics and collapse microscopic characteristics of yellow-brown soft sandstone[J]. Journal of Electronic Microscopy, 2021, 40(02): 126-131.
- 韩霖昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(08): 87-94.
- HAN Jichang, LIU Yansui, LUO Lintao. Research on the core technology of rapid composite soil formation of soft sandstone and sand in Mu Us Sandy Land[J]. China Land Science, 2012, 26(08): 87-94.
- 兰恒星, 彭建兵, 祝艳波, 等. 黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(02): 199-221.
- LAN Xingxing, PENG Jianbing, ZHU Yanbo, et al. Research and prospect on geological and surface processes and major disaster effects in the Yellow River basin[J]. Chinese Science: Earth Science, 2022, 52(02): 199-221.
- 李长明. 砒砂岩中蒙脱石膨胀抑制机理及改性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- LI Changming. Research on the Swelling Inhibition Mechanism and Modification Experiment of Pisha Sandstone Montmorillonite [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- 李怀恩, 杨方社, 张日俊, 等. 沙棘柔性坝对水流影响的野外试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(01): 124-129.
- LI Huaen, YANG Fangshe, ZHANG Rijun, et al. Field test study on the impact of seabuckthorn flexible dam on water flow[J]. Journal of Hydropower, 2009, 28(01): 124-129.
- 李晓丽, 于际伟, 刘李杰, 等. 鄂尔多斯砒砂岩力学特性的试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(05): 118-123.
- LI Xiaoli, YU Jiwei, LIU Lijie, et al. The experimental research on mechanical properties of Pisha-sandstone of Erdos[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(05): 118-123.
- 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 等. 黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40(05): 328-332.
- MU Xingmin, ZHAO Guangju, GAO Peng, et al. The Future Sediment Transport Situation of the Yellow River and Its Applicability Countermeasures[J]. Water and Soil Conservation Bulletin, 2020, 40(05): 328-332.
- 穆兴民, 贾昊, 高鹏, 等. 水土保持生态建设对黄河中游水文情势影响研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 44-50.
- MU Xingmin, JIA Hao, GAO Peng, et al. Study on the impact of ecological construction of soil and water conservation on the hydrological regime in the middle reaches of the Yellow River[J]. People's Yellow River, 2021, 43(10): 44-50.
- 石迎春, 叶浩, 侯宏冰, 等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报, 2004, 25(06): 659-664.
- SHI Yingchun, YE Hao, HOU Hongbing, et al. Analysis of internal causes of erosion of soft sandstone in southern Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(06): 659-664.
- 石建省, 叶浩, 王强恒, 等. 水岩作用对内蒙古南部砒砂岩风化侵蚀的影响分析[J]. 现代地质, 2009, 23(01): 171-177.
- SHI Jiansheng, YE Hao, WANG Qiangheng, et al. Effect of Water-rock Interaction on the Weathering and Erosion of Pi-sandstone, Southern Inner Mongolia, China[J]. Geoscience, 2009, 23(1): 171-177.
- 苏涛, 张兴昌. EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J]. 农业机械学报, 2011a, 42(11): 68-75.
- SU Tao, ZHANG Xingchang. Effect of EN - 1 on the hydrodynamic characteristics of runoff on soft sandstone solidified soil slopes[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011a, 42(11): 68-75.
- 苏涛, 张兴昌, 赵怀玉. 砒砂岩地区坡面径流水动力学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011b, 39(08): 203-209.
- SU Tao, ZHANG Xingchang, ZHAO Huaiyu. Study on the dynamic characteristics of slope runoff in soft sandstone area[J]. Journal of Northwest Agricultural and Forestry University (Natural Science Edition), 2011b, 39(08): 203-209.
- 王立久, 杨大令, 李长明, 等. 砒砂岩改性筑坝技术研发[R]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- 王强恒, 孙旭, 刘昀, 等. 室内模拟水岩作用对砒砂岩风化侵蚀的影响[J]. 人民黄河, 2013, 35(04): 45-47.
- WANG Qiangheng, SUN Xu, LIU Yun, et al. Indoor simulation of the effect of water rock interaction on weathering and erosion of soft sandstone[J]. People's Yellow River, 2013, 35(04): 45-47.
- 王晓. 用粒度分析法计算砒砂岩区小流域泥沙来源的探讨[J]. 中国水土保持, 2001, (01): 25-27.
- WANG Xiao. Discussion on the calculation of sediment source in

- small watershed of soft sandstone area using particle size analysis method[J]. *China Water and Soil Conservation*, 2001, (01): 25–27.
- 王燕星, 李驰, 葛晓东, 等. 黄河流域内蒙古段砒砂岩风化土微生物矿化改良的试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(03): 708–718.
- WANG Yanxing, LI Chi, GE Xiaodong, et al. Experimental study on microbial mineralization improvement of weathered soft sandstone soil in Inner Mongolia section of the Yellow River basin[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2022, 43(03): 708–718.
- 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. *中国水土保持科学*, 2007a, 5(01): 14–18.
- WANG Yuanchang, WU Yonghong, KOU Quan, et al. Definition of distribution range and type division of soft sandstone[J]. *Chinese Science of Soil and Water Conservation*, 2007a, 5(01): 14–18.
- 王愿昌, 吴永红, 李敏. 砒砂岩地区水土流失及其治理途径研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007b.
- WANG Yuanchang, WU Yonghong, LI Min. Study on Soil and Water Loss and Its Control Approaches in Soft Sandstone Area[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2007b.
- 卫午毓, 肖培青, 张攀, 等. 复合侵蚀作用下砒砂岩坡面产流产沙过程试验[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(02): 18–22.
- WEI Wuyu, XIAO Peiqing, ZHANG Pan, et al. Experiment on runoff and sediment production process on soft sandstone slope under combined erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(02): 18–22.
- 吴利杰, 李新勇, 石建省, 等. 砒砂岩的微结构量化特征研究[J]. *地球学报*, 2007, 28(06): 597–602.
- WU Lijie, LI Xinyong, SHI Jiansheng, et al. Quantitative characteristics of microstructure of soft sandstone[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(06): 597–602.
- 向杰. 基于 CT 扫描试验的砒砂岩孔隙分布特征研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(05): 112–115.
- XIANG Jie. Study on pore distribution characteristics of soft sandstone based on CT scanning test[J]. *People's Yellow River*, 2020, 42(05): 112–115.
- 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 07: 1297–1312.
- XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Province Loess and loess landslides in China[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 07: 1297–1312.
- 杨才千, 刘强, 瞿冯, 等. 砒砂岩风化特性试验[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(05): 10–15.
- YANG Caiqian, LIU Qiang, QU Feng, et al. Test for weathering characteristics of soft sandstone[J]. *Progress in Water Resources and Hydropower Technology*, 2019, 39(05): 10–15.
- 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系[J]. *土壤*, 2021, 53(03): 620–627.
- YANG Zhenqi, QIN Fucang, LI Long, et al. The relationship between multifractal characteristics and water holding characteristics of surface soil with different erosion degrees in the soft sandstone area[J]. *Soil*, 2021, 53 (03): 620–627.
- 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(04): 733–739.
- YANG Zhenqi, QIN Fucang, LI Minyu, et al. Study on soil infiltration performance and its influencing factors of different land use types in soft rock area[J]. *Journal of Ecological Environment*, 2020, 29(04): 733–739.
- 杨振奇, 秦富仓, 于晓杰, 等. 砒砂岩区小流域林地土壤机械组成与分形维数关系[J]. *土壤通报*, 2019, 50(04): 823–829.
- YANG Zhenqi, QIN Fucang, YU Xiaojie, et al. The relationship between soil mechanical composition and fractal dimension in small watershed woodland in soft rock area Soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(04): 823–829.
- 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018a, 40(06): 1–7.
- YAO Wenyi, LI Changming, ZHANG Pan, et al. Research and Prospect on Erosion Mechanism of Soft Sandstone[J]. *People's Yellow River*, 2018a, 40(06): 1–7.
- 姚文艺, 刘慧, 梁止水. 砒砂岩区生态恢复的新途径——一种环境友好型抗蚀促生技术[J]. *水土保持通报*, 2018b, 38(04): 118–124.
- YAO Wenyi, LIU Hui, LIANG Zhishui. A new approach to ecological restoration in soft rock areas: an environmentally friendly anti erosion and growth promotion technology[J]. *Water and Soil Conservation Bulletin*, 2018b, 38(04): 118–124.
- 姚文艺, 时明立, 吴智仁, 等. 砒砂岩区二元立体配置治理技术及示范效果[J]. *人民黄河*, 2016, 38(06): 1–7.
- YAO Wenyi, SHI Mingli, WU Zhiren, et al. Dual three-dimensional configuration treatment technology and demonstration effect in soft rock area[J]. *People's Yellow River*, 2016, 38(06): 1–7.
- 姚文艺, 吴智仁, 刘慧, 等. 黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J]. *人民黄河*, 2015, 37(01): 6–10.
- YAO Wenyi, WU Zhiren, LIU Hui, et al. Experimental study on anti erosion and growth promotion technology in soft sandstone area of the Yellow River basin[J]. *People's Yellow River*, 2015, 37(01): 6–10.
- 姚文艺, 肖培青, 刘慧, 等. 黄河流域砒砂岩区辨识与抗蚀促生关键技术及应用[R]. 郑州: 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 2017, 69–70.
- 叶浩, 石建省, 侯宏冰, 等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(03): 402–405.
- YE Hao, SHI Jiansheng, HOU Hongbing, et al. The influence of li-

- thological characteristics of soft sandstone on gravity erosion in southern[J]. Inner Mongolia Arid Area Research, 2008, 25(03): 402–405.
- 叶浩, 石建省, 李向全, 等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J]. 地球学报, 2006, 27(02): 145–150.
- YE Hao, SHI Jiansheng, LI Xiangquan, et al. Analysis of the impact of lithological characteristics of soft sandstone on erosion resistance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(02): 145–150.
- 于国强, 李占斌, 张茂省, 等. 水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究[J]. 土壤学报, 2012a, 49(04): 646–654.
- YU Guoqiang, LI Zhanbin, ZHANG Maosheng, et al. Study on the regulation mechanism of soil and water conservation measures on gravity erosion in small watersheds on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil Science, 2012a, 49 (04): 646–654.
- 于国强, 张霞, 张茂省, 等. 植被对黄土高原坡沟系统重力侵蚀调控机理研究[J]. 自然资源学报, 2012b, 27(06): 922–932.
- YU Guoqiang, ZHANG Xia, ZHANG Maosheng, et al. Study on the Mechanism of Vegetation Controlling Gravity Erosion in Slope Gully System of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2012b, 27(06): 922–932.
- 赵晓雪, 饶良懿, 申震洲. 砒砂岩区不同地形位置土壤物理性质分异特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1359–1368.
- ZHAO Xiaoxue, RO Liangyi, SHEN Zhenzhou. Heterogeneous characteristics of soil physical properties of different terrain locations in the Pisha sandstone area[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2020, 26(6): 1359–1368.
- 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(04): 530–540.
- ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Study on the inducing factors and formation mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(04): 530–540.
- 张攀, 姚文艺, 刘国彬, 等. 砒砂岩区典型小流域复合侵蚀动力特征分析[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1384–1391.
- ZHANG Pan, YAO Wenyi, LIU Guobin, et al. Analysis on dynamic characteristics of composite erosion in typical small watershed in soft sandstone area[J]. Journal of Water Conservancy, 2019, 50(11): 1384–1391.
- 张攀, 姚文艺, 肖培青, 等. 黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J]. 水利学报, 2022, 53(01): 109–116.
- ZHANG Pan, YAO Wenyi, XIAO Peiqing, et al. Study on the Interaction and Superposition Effect of Multidynamic Erosion in the Soft Sandstone Region of the Yellow River Basin[J]. Journal of Water Resources, 2022, 53(01): 109–116.
- 张涛, 李怀恩, 刘健, 等. 沙棘“柔性坝”对沟道土壤粒径分布影响的试验研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(02): 22–25.
- ZHANG Tao, LI Huaen, LIU Jian, et al. Experimental Study on the Effect of Seabuckthorn "Flexible Dam" on Soil Particle Size Distribution in Trenches[J]. Research on Water and Soil Conservation, 2008, 15(02): 22–25.
- 张赢, 李晓丽, 常平, 等. 不同密度砒砂岩风化物坡面水蚀机理试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(01): 75–80.
- ZHANG Ying, LI Xiaoli, CHANG Ping, et al. Experimental study on water erosion mechanism of weathered soft sandstone slope with different densities[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2021, 39(01): 75–80.
- 赵国际. 内蒙古砒砂岩地区水土流失规律研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(04): 158–160.
- ZHAO Guoji. Study on the law of water and soil loss in the soft sandstone area of Inner Mongolia[J]. Research on soil and water conservation, 2001, 8(04): 158–160.
- Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic Ecosystem Responses to Natural and Anthropogenic Changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2016, 45(1): 223–243..
- Ma Wenbo, Peng Tang, Xuan Zhou, et al. Study on the Failure Mechanism of a Modified Hydrophilic Polyurethane Material Pisha Sandstone System under Dry–Wet Cycles[J]. Polymers, 2022, 14(22): 4837.
- Ni H, Zhang L, Zhang D, et al. Weathering of pisha-sandstones in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau. Journal of Mountain Science, 2008, 5(4): 340–349.
- Yang F, Bi C, Cao M, et al. Simulation of sediment retention effects of the double seabuckthorn plant flexible dams in the Pisha Sandstone area of China[J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 21–31.
- Yang F, Cao M, Li H, et al. Simulation of sediment retention effects of the single seabuckthorn flexible dam in the Pisha Sandstone area[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 228–237.
- Zhang P, Xiao P, Yao W, et al. Analysis of complex erosion models and their implication in the transport of Pisha sandstone sediments[J]. Catena, 2021, 207: 105636.
- Zhang P, Yao W, Liu G, et al. Experimental study of sediment transport processes and size selectivity of eroded sediment on steep Pisha sandstone slopes[J]. Geomorphology, 2020, 363: 107211.
- Zhang Qiang, Song Zhanping, Li Xiaoli, et al. Deformation behaviors and meso-structure characteristics variation of the weathered soil of Pisha sandstone caused by freezing–thawing effect[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 167: 102864.