

董志塬区固沟保塬工程水土侵蚀病害现状及科学挑战

张卜平, 朱兴华, 程 茜, 肖永玖, 王梦奎, 冯笑瑞

Current situation and scientific challenge of soil and water erosion in Gully Consolidation and Highland Protection Project of DongZhi Loess Plateau

ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Xi, XIAO Yongjiu, WANG Mengkui, and FENG Xiaorui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策

Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control

陈国光, 刘红樱, 陈进全, 张晓东, 湛 龙 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 26–35

瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究

An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum–reinforced loess

杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 贾卓龙, 曹怡菡 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 117–124

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess–filled slope

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈星, 刘悦 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 119–128

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151–160

侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83–89

川藏铁路廊道关键水工环地质问题：现状与发展方向

Key problems on hydro–engineering–environmental geology along the Sichuan–Tibet Railway corridor: Current status and development direction

张永双, 郭长宝, 李向全, 毕俊攀, 马剑飞, 刘峰 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 1–12



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306018

张卜平, 朱兴华, 程茜, 等. 董志塬区固沟保塬工程水土侵蚀病害现状及科学挑战 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 182-194.
ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Xi, et al. Current situation and scientific challenge of soil and water erosion in Gully Consolidation and Highland Protection Project of DongZhi Loess Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 182-194.

董志塬区固沟保塬工程水土侵蚀病害现状及科学挑战

张卜平^{1,2}, 朱兴华^{1,2}, 程茜^{1,2}, 肖永玖^{1,2}, 王梦奎^{1,2}, 冯笑瑞^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 由于极端降雨和高强度人类工程活动的影响, 黄土塬区沟头前进速度加剧, 严重威胁黄土塬区经济社会发展。近年来实施的大规模固沟保塬工程虽然有效抑制了黄土塬区溯源侵蚀的发展, 但是仍然存在严重的水土侵蚀病害问题。基于这一现状, 以陇东黄土高原董志塬地区典型固沟保塬工程为研究对象, 通过野外实地考察、查阅文献和综合分析等研究方法, 对董志塬地区典型固沟保塬工程水土侵蚀病害进行调查分析。结果表明: 固沟保塬工程水文调控功能可分为塬面拦蓄区、沟头填方截排区、沟坡削方截排消能区和沟道拦蓄区; 固沟保塬工程目前遭受表水侵蚀病害、黄土工程地质界面潜蚀病害、截排水渠淤积堵塞病害及黄土沟谷灾害链等 4 大类病害; 固沟保塬工程水文调控机制不明和水土互馈侵蚀灾变机理不清是当前面临的关键科学挑战; 未来固沟保塬工程水土侵蚀病害的防治应重视生物土壤结皮、新型土壤改良材料的研发应用以及固沟保塬工程全过程质量监督。研究成果可为未来固沟保塬工程水土侵蚀灾变机理研究和工程规划设计提供借鉴。

关键词: 固沟保塬; 黄土工程地质界面; 表水侵蚀; 内部侵蚀; 灾害链

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0182-13

Current situation and scientific challenge of soil and water erosion in Gully Consolidation and Highland Protection Project of DongZhi Loess Plateau

ZHANG Buping^{1,2}, ZHU Xinghua^{1,2}, CHENG Xi^{1,2}, XIAO Yongjiu^{1,2}, WANG Mengkui^{1,2}, FENG Xiaorui^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering,

Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Due to the influence of extreme rainfall and high intensity human engineering activities, the advance speed of the gully head in the Loess Tableland is intensified, which seriously threatens the economic and social development of the Loess Tableland. In recent years, although large-scale Gully Consolidation and Highland

收稿日期: 2023-06-10; 修订日期: 2023-09-05

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (442090053; 42041006; 41877249)

第一作者: 张卜平 (1993—), 男, 博士研究生, 主要从事黄土工程地质界面潜蚀灾变机理方面科研工作。E-mail: zhangbuping@chd.edu.cn

通讯作者: 朱兴华 (1984—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害防治方面的科研与教学工作。E-mail: zhuxinghua@chd.edu.cn

Protection (GCHP) projects have effectively inhibited the development of traceable erosion on Loess tableland, there are still serious problems of soil and water erosion. Based on this situation, this study investigated and analyzed the soil erosion diseases of the typical GCHP Projects through field investigation, literature review, and comprehensive analysis. The results show that the hydrology regulation function of GCHP Projects can be divided into the table-land intercept area, gully head cut row area, gully slope cutting line of energy dissipation, and channel held area. Currently, the GCHP suffers from surface water erosion, subsurface erosion of loess engineering geological interface, blockage of drainage channels, and disaster chain of loess gully. The unclear hydrological control mechanism and the mechanism of soil and water mutual feeding erosion disasters are the key scientific challenges of the project. In the future, attention should be paid to the application of biological soil crust, new soil improvement materials, and the complete quality supervision of gully protection tableland engineering. This study can provide basic information for future research on the mechanism of soil and water erosion disasters and engineering planning and design of the Gugou Plateau.

Keywords: Gully Consolidation and Highland Protection; loess engineering geological interface; surface water erosion; internal erosion; disaster chains

黄土塬是黄土高原千沟万壑中的平坦之地^[1], 是黄土高原上城镇化建设、工农业发展的宝贵土地资源和我国重要的能源、化工基地^[2-4]。近年来, 随着塬区经济社会快速发展, 大规模的城镇化建设、基础设施建设和农业快速发展等人类工程活动加剧, 引发了严重的水土侵蚀病害^[4-6]。在气候变暖、暴雨洪涝灾害频发的气候条件和大规模人类工程活动的共同影响下, 黄土塬边沟头侵蚀进一步加剧, 黄土塬面积快速缩小, 严重威胁黄土塬区经济社会发展^[4,7]。陇东的董志塬南北长约 87 km, 东西宽约 36 km, 面积约 2 260 km², 是黄土高原保存最好、面积最大的黄土塬, 被誉为“天下黄土第一塬”^[8]。资料表明, 董志塬东西宽度自唐代至今缩小了近一半, 最窄处目前仅以 50 m 宽的高速公路衔接^[3,8]。当前, 董志塬塬面快速缩小已经严重威胁到塬区人民的生产生活和城镇化建设, 是亟待解决的重要社会问题和科学难题。

固沟保塬工程有效抑制了黄土塬边沟头溯源侵蚀的发展速度, 经过水土保持、水利、农业等多部门长期联合探索, 提出了一系列有效的塬区溯源侵蚀控制措施^[2-3]。如“塬面径流调控、沟头加固防护、坡面植被恢复、沟道水沙集蓄”的“四道防线”治理模式^[9]。Jin 等^[3]提出了“拦-蓄-排-固”的系统治理思路, 极大促进了塬区固沟保塬治理模式的创新发展。然而, 塬区溯源侵蚀问题并未得到根本性解决, 部分地区固沟保塬工程水土侵蚀病害仍然十分严重, 部分设施甚至已经完全损坏失效。造成这些工程病害很重要的原因是对黄土塬区自然水文过程缺少了解, 对施加固沟保塬工程后的坡面和坡内水文过程尚待深入研究。固

沟保塬工程水土侵蚀病害主要包括降雨引发的坡面侵蚀、入渗引发的黄土潜蚀以及填埋型沟头的水文地质效应^[3-10]。固沟保塬工程是在自然演化沟头上施加的人类调控措施, 目的是减小沟头径流的直接冲刷, 从而减缓沟头前进速度。然而, 目前对固沟保塬工程与水土侵蚀病害的互馈作用机制研究不够深入。固沟保塬工程的核心是“控水”^[3], “控水”的基础是明确固沟保塬工程的水文调控功能。揭示水文过程与固沟保塬工程水土侵蚀病害之间的互馈作用机制, 对进一步优化和创新固沟保塬综合治理模式等具有重要意义。

2023 年 3 月 15—19 日, 通过对庆阳市董志塬地区小崆峒沟、火巷沟、李家寺沟、安家寺沟、驿马镇北胡同沟等典型固沟保塬工程水文过程调控措施考察, 详细调查了典型固沟保塬工程当前遭受的水土侵蚀病害发育特征。在野外工作的基础上, 讨论当前固沟保塬工程中水土侵蚀病害研究面临的科学挑战, 为未来固沟保塬工程水土侵蚀病害防治提出可行建议, 以期在今后固沟保塬工程建设模式创新提供借鉴。

1 固沟保塬工程水文调控功能分区

在流域不同位置固沟保塬工程水文调控功能存在显著差异, 按照水文调控功能将固沟保塬工程分为塬面拦蓄区、沟头填方截排区、沟坡削方截排消能区和沟道拦蓄区, 如图 1 所示。

1.1 塬面拦蓄区

塬面拦蓄区主要是为了实现“水不下塬或有序下塬”的目的^[3]。蓄水设施主要有涝池、人工湖、蓄水



图 1 固沟保塬工程水文调控功能分区 (小峪峡地质公园)

Fig. 1 Hydrologic control function zones of GCHP (Xiaokongtong Geopark)

池、海绵设施(图 1)等。拦截设施通过截断下塬径流路径实现水文过程调控,主要设施包括边埂、梯田和塬边截水渠。拦蓄区可以有效拦截和储蓄塬面径流,减小沟头径流直接排放,塬面蓄水通过下渗和有序排放至沟道,以减缓径流对沟头的冲刷。

1.2 沟头填方截排区

沟头填方截排区(图 1)主要“控水”措施有截排水渠、盲沟、生物措施及边坡支挡工程等(图 2)。截水渠主要截留上级边坡径流,然后通过排水渠排泄到坡脚的排水沟。盲沟主要用于排泄填方区的地下水,实现对地下水的人为调控,以降低填方区地下水的潜蚀作用。沟头填方区坡面一般还会配套生物措施,减少降雨和径流对坡面的溅蚀和冲蚀作用。边坡支挡工程主要用于防止填方区发生重力失稳。

1.3 沟坡削方截排消能区

沟坡削方截排消能区的水文调控设施主要有截水渠、阶梯状消能排水渠、消能池和排水渠(图 3)。

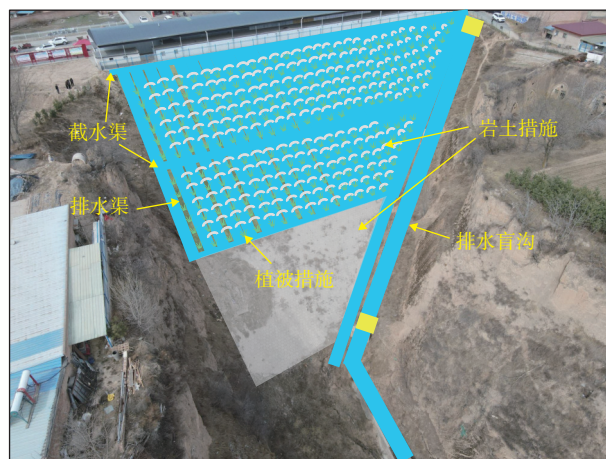


图 2 典型沟头填方截排水区 (驿马镇北沟)

Fig. 2 Typical ditch head filling and cut-off drainage area (Yima Town North Ditch)

截水渠主要截留上级边坡坡面径流,阶梯状消能排水渠一般用于高陡边坡,可以减缓上级台阶径流向下流动过程中的动能,降低对边坡土体的溅蚀和溢流冲



(a) 削坡+截排水+防护网 (小峪峡)



(b) 削坡+格构框架+截排水 (李家寺)

图 3 沟坡截排消能区

Fig. 3 Slope cut-off drainage energy dissipation area

蚀。沟坡削方区水文调控作用主要为汇水和消能。

1.4 沟道拦蓄区

沟道水文调控措施主要有排水渠、谷坊、拦挡坝等(图 1, 图 4)。这些措施可以降低沟道径流速率, 进而减少对沟道两侧斜坡的侧蚀, 谷坊和淤地坝可以拦

截上游泥沙, 减少水土流失。沟道拦蓄区一般会结合生物防护林等进行综合治理。如, 小崆峒沟小流域共修建 4 道重力式拦挡坝和 4 道柳谷坊, 重力式拦挡坝和柳谷坊间互排列, 在各坝之间种植柳树等植被, 形成了综合拦蓄体系。

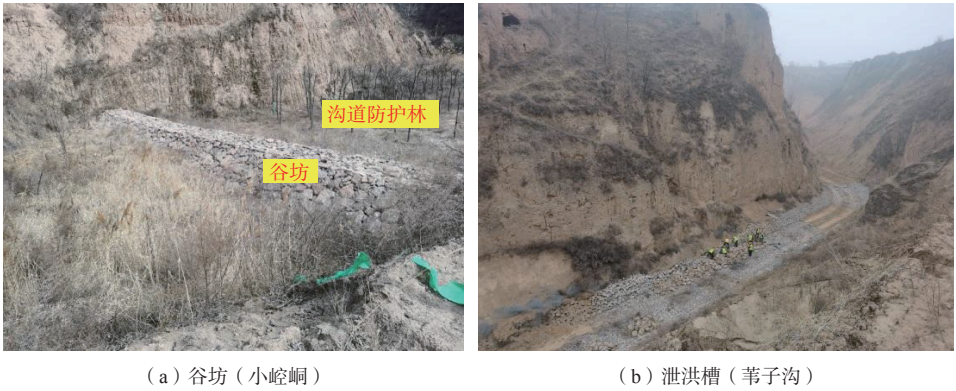


图 4 沟道拦蓄区
Fig. 4 Trench holding area

总体来看, 固沟保塬工程的水文调控作用主要有“拦、蓄、截排、消能”等。通过人为干预沟头水文过程极大减缓了沟头前进速率, 但是由于固沟保塬工程与水文过程之间互馈作用不清, 沟头径流产汇流过程不明, 加之固沟保塬工程缺少规范性科学性指导, 导致发生一些严重的水土侵蚀工程病害, 部分区域甚至

导致固沟保塬工程面临完全失效的境况。

2 固沟保塬工程水土侵蚀病害

通过对 6 处典型固沟保塬工程调查, 除李家寺沟沟岸崩塌治理工程尚未竣工外, 其余 5 处已竣工工程均存在水土侵蚀病害问题(表 1)。

表 1 典型固沟保塬工程水土侵蚀病害发育特征统计表
Table 1 Development characteristics of soil and water erosion diseases in typical GCHP

工程地点	沟头高程/m	塬面拦蓄区	沟头填方截排区	沟坡削方截排区	沟道拦蓄区
冯家堡子	1 343	1. 塬边裂缝 2. 塬边落水洞发育	1. 填方体沉降开裂 2. 落水洞发育 3. 冲沟发育	1. 差异性侵蚀 2. 浅层滑移 3. 截排水渠淤积堵塞	1. 截排水渠潜蚀悬空 2. 淤积堵塞 3. 侧蚀滑塌堵沟
小崆峒沟	1 354	新建海绵设施未见明显病害	1. 表水冲沟侵蚀发育 2. 轻微界面潜蚀	1. 冲沟侵蚀极为发育 2. 界面潜蚀发育 3. 局部浅层滑塌	1. 多处小型重力失稳 2. 大规模边坡滑塌堵沟 3. 泄洪渠侵蚀悬空折断
火巷沟	1 364	1. 沉降变形明显 2. 未见落水洞	1. 表水冲沟侵蚀发育 2. 界面潜蚀发育 3. 溯源侵蚀致路面悬空	1. 冲沟侵蚀发育 2. 界面潜蚀发育 3. 局部浅层滑塌	1. 多处小规模滑塌 2. 沟坡削方堆积体滑移
驿马沟	1 481	1. 沉降变形 2. 未见落水洞	1. 表水冲沟侵蚀发育 2. 界面潜蚀发育	1. 苔藓发育较好, 未见明显病害	1. 截排水渠潜蚀悬空 2. 小规模滑塌
安家寺	1 497	1. 串珠状落水洞 2. 溯源侵蚀	1. 冲沟侵蚀严重	1. 冲沟侵蚀极为发育 2. 潜蚀落水洞极为发育	1. 小规模滑塌病害

2.1 坡面表水侵蚀病害

坡面表水侵蚀是削方斜坡最常见的侵蚀病害(图 5a), 通常发生在沟坡位置。在冯家堡子削方斜坡调查发现, 坡面表水侵蚀存在差异性特征^[4]。具体表现为: 从上至下不同地层差异性侵蚀和从坡面向坡内的同一土层不同风化程度的差异性侵蚀。地层侵蚀差异性表现在黄土地层以冲沟侵蚀为主, 冲沟窄且深度较

大; 而古土壤层以面蚀为主, 冲沟发育较浅, 在有构造节理发育的古土壤层中, 冲沟发育较深(图 5a)。

溅蚀主要表现为鱼鳞状的小坑(图 5b), 小坑边可见溅蚀后落下的土颗粒。在地衣苔藓发育的部位, 溅蚀量大大降低, 可见地衣苔藓对坡面防护具有较好的作用。

剥蚀主要发生在地衣苔藓覆盖的部位, 在干湿循

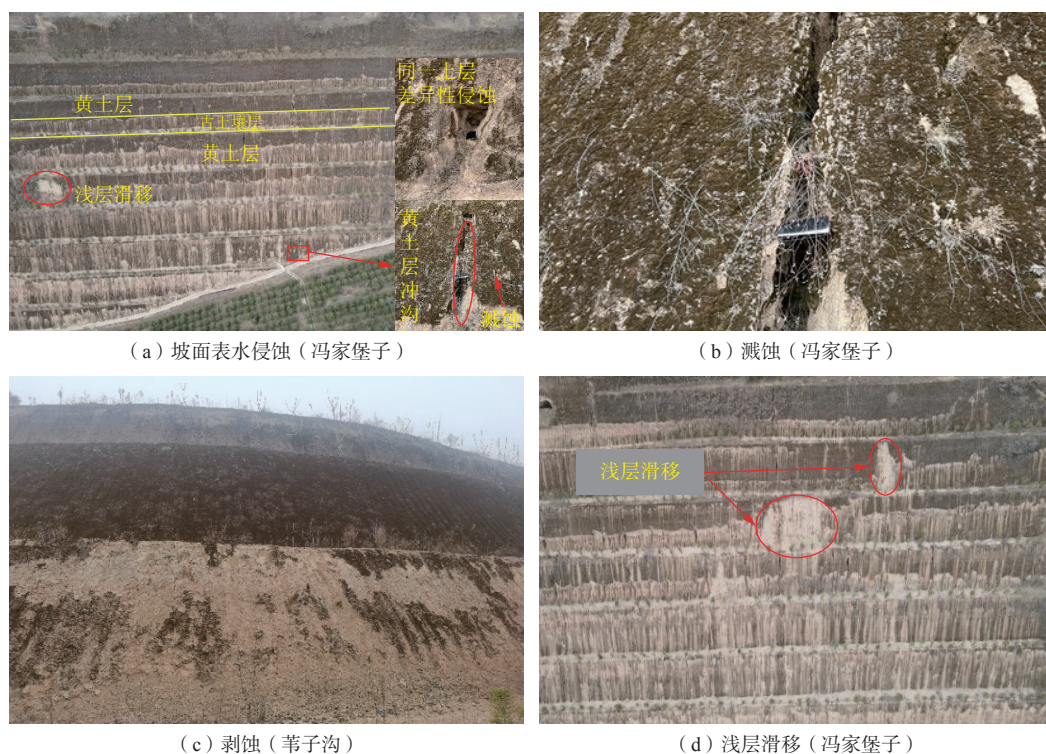


图 5 坡面、坡脚表水侵蚀病害

Fig. 5 Surface water erosion diseases of slope surface and slope foot

环、冻融循环及昼夜温差共同作用下,发生膨胀碎裂,最终发生剥落,如图 5(c)所示。另外,也有因为坡面径流冲刷造成的小规模剥蚀发生,但是并不显著。

浅层滑移主要是降雨作用下,边坡上节理裂隙发育的部位快速充水饱和,进而发生浅层滑移破坏,如图 5(d)所示。

剥蚀与浅层滑移的区别在于:剥蚀掉落的土块碎散分布,呈碎片状,土质粗糙,棱角分明,自然堆积在坡脚,后壁粗糙;而浅层滑移下落的土块整体性较好,土质绵软,后壁可见有清晰的滑动痕迹。

2.2 黄土工程地质界面潜蚀病害

工程地质界面是指地层中受自然营力和工程活动共同作用的两种或多种介质之间的接触面,以及对三相介质迁移、物态变化和岩土体稳定性起控制作用的转换面^[12]。黄土工程地质界面具体包括黄土与其他地层或堆积物接触界面、黄土内部宏细微观结构界面以及黄土与工程结构交界面等三大类。笔者通过野外实地调查发现,固沟保塬工程中常见的黄土工程地质界面有:填方体与原始斜坡交界面、黄土与工程结构交界面以及黄土内部多尺度结构界面(图 6)。这些黄土工程地质界面控制着固沟保塬工程和黄土体中水分的运移过程,影响着黄土内部水土灾变过程,因

而表现出不同的病害特征。

填方体与原始斜坡的交界面是一种在挖填方过程中人为创造的优势渗流界面,在连续降雨作用下,雨水沿交填界面入渗至填方体中下部,交填界面加速了填方体的饱和进程,改变了填方体的渗流场和有效应力场,坡顶与坡肩处产生张拉应力,诱发多条拉张裂缝萌生和扩展^[13-14]。此后,雨水和地表径流沿着裂缝快速进入填方体内部,径流不断冲刷潜蚀裂缝侧壁,最终形成黄土洞穴,黄土洞穴内部侵蚀进一步加剧极有可能诱发大规模填方体滑坡灾害^[15]。通过 Google Earth 历史影像图发现,图 6(a)所示斜坡在 2014 年以前是发育有两条沟道的自然斜坡,2017 年进行冯家堡子沟道综合治理时将其挖填为 5 级梯田。此后,梯田上逐渐开始出现落水洞和张拉裂缝。通过对比 Google Earth 历史影像图发现落水洞发育区几乎全部分布在原自然沟道位置,即填方区位置,由此可推测交填界面是潜蚀病害易发的优势界面。

黄土与工程结构交界面属于软硬介质交界面(图 6 c、d)。黄土节理裂隙发育,具有强烈湿陷性,遇水极易发生湿陷、崩解、软化和变形^[16],而工程结构尤其是混凝土结构具有相对于黄土较高的强度和抗侵蚀性。介质差异造成黄土与工程结构交界面极易发生

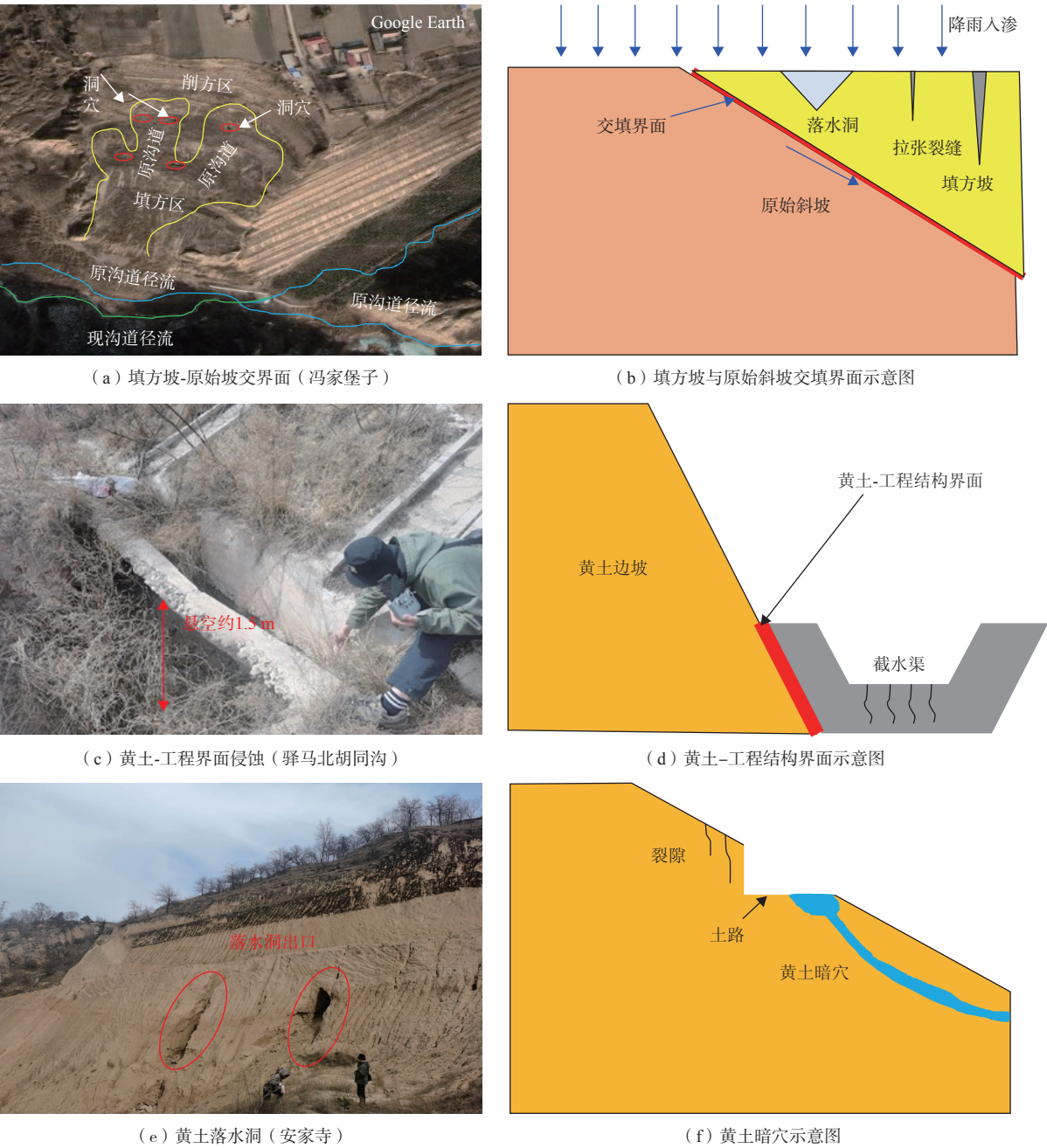


图 6 黄土工程界面潜蚀病害典型案例及示意图

Fig. 6 Typical cases and schematic diagram of subsurface erosion diseases on loess engineering interface

冲刷潜蚀病害^[17-18]。调查过程中发现,固沟保塬工程中径流沿截水渠、排水渠以及岩土支挡结构外侧黄土-工程结构界面处发生冲刷潜蚀,造成了极为严重的损坏。冯家堡子沟道综合治理修建的排水渠已被径流冲刷临空或悬空,局部黄土-工程界面处径流冲刷潜蚀深度达 1.5 m,部分排水渠因底部黄土被潜蚀掏空发生悬空折断。

彭建兵等^[19]指出黄土内部存在微-细-宏-巨观多尺度界面,不同尺度黄土界面表现出不同的优势渗流

特性。其中微观优势渗流界面指黄土中的大孔隙;细观优势渗流界面指节理裂隙、断层及根孔、虫孔;而宏观优势渗流界面指开放性裂缝和落水洞^[19-21]。董志塬塬边节理裂隙等细观界面极为发育,且存在大规模落水洞群。地表径流沿节理裂隙等快速垂向入渗,不断冲刷裂隙壁面,在古土壤层等渗透性较差的地层附近发生侧向流动,最终从坡面流出斜坡,如图 6 所示,径流沿土路流动过程中,遇到黄土节理裂隙,转为垂向运动,遇到古土壤层后又转为侧向运动,最终冲

出坡面,形成了贯通的落水洞。

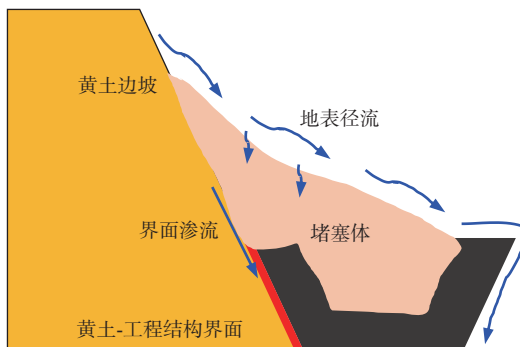
2.3 截排水渠淤积堵塞病害

截排水渠是固沟保塬工程中调控水文过程的关键措施。然而,调查中发现由于截水渠上部斜坡冲刷、剥蚀、浅层滑移造成渠道严重的堵塞病害。冯家

堡子多级台阶上原有的截水渠已被土体完全掩埋;苇子沟截水渠由于上部斜坡长期剥蚀和浅层滑移,导致截水渠中断,在径流冲刷淘蚀下发生悬空失效(图7)。截排水渠的局部淤积堵塞还会造成渠道内大量积水,积水沿黄土-工程界面入渗导致浅层滑移病害。



(a) 截水渠堵塞



(b) 截排水渠堵塞示意图

图7 截排水渠淤堵病害典型案例及示意图

Fig. 7 Typical cases and schematic diagram of blockage in cut-off drainage channels

2.4 黄土沟坡滑塌-堵溃-洪水灾害链

在固沟保塬工程中常对不稳定沟坡进行削坡处理,但是削方斜坡一般仅配套相应的截排水措施和植被措施,甚至仅是简单的植被措施。这些未施加岩土工程措施保护的黄土边坡的坡脚常年遭受严重的径流侧蚀,导致坡脚前缘临空,加之坡脚毛细水的上升导致土体强度降低,最终发生较大规模的黄土边坡滑塌病害(图8)。由于沟道较为狭窄,滑塌的堆积体又会造成沟道堵塞形成黄土堰塞湖,进而演变为堰塞湖-溃决洪水-黄土泥石流地质灾害链^[22],严重威胁下游安全。另外,堰塞湖的溃决又具有明显的“放大效应”,进一步加剧下游沟道斜坡的侧蚀和滑塌灾害。

3 固沟保塬工程水土侵蚀病害研究所面临的科学挑战

3.1 固沟保塬工程下的边坡水文过程响应机制

固沟保塬工程干预了沟头的水文过程(图9)^[23-27],然而各类固沟保塬工程对水文过程的调控机制尚不清楚。例如,沟头填方区坡面产汇流机制不清,未充分考虑填方区岩土工程措施和生态植被措施等与水文过程的互馈作用。塬面拦蓄区积水主要以哪种方式排泄,长期积水塬面是否会对塬区地质环境产生负

面效应。填方区水分主要入渗方式是什么?填方区黄土结构松散,易发生沉降形成裂缝,导致形成优势渗流,进而造成填方区地下水位的抬升,最终演变为填方区黄土滑坡泥石流等灾害^[17,28]。在今后的研究中,需要重点关注固沟保塬工程后水文过程(包括地表水文过程和地下水文过程)的演变规律,为固沟保塬工程水土侵蚀病害防治提供理论基础,为进一步优化固沟保塬工程设计提供有益借鉴。

3.2 黄土地质结构及性质对坡面侵蚀的影响机制

固沟保塬工程中常对沟坡中的不稳定斜坡进行削坡处理,这样就形成了大规模高陡黄土边坡。由于当前对人工边坡产汇流水文过程的研究还不够深入,造成了严重的表水侵蚀灾害。另外,在昼夜温差、干湿循环和冻融循环等地质营力作用下坡面自然生长的地衣会发生剥落,进一步加速了坡面侵蚀。然而当前对坡面土体在多种地质营力耦合作用下的侵蚀机理研究还不够深入。

极端气候条件和人类工程活动双动力耦合互馈是固沟保塬工程中人工边坡表水侵蚀病害的控制性因子,边坡产汇流与水动力过程是动力条件,而黄土本身特殊的地质结构和强烈的水敏性是差异性侵蚀灾变发生的本底因素(图10)。今后在人工黄土边坡

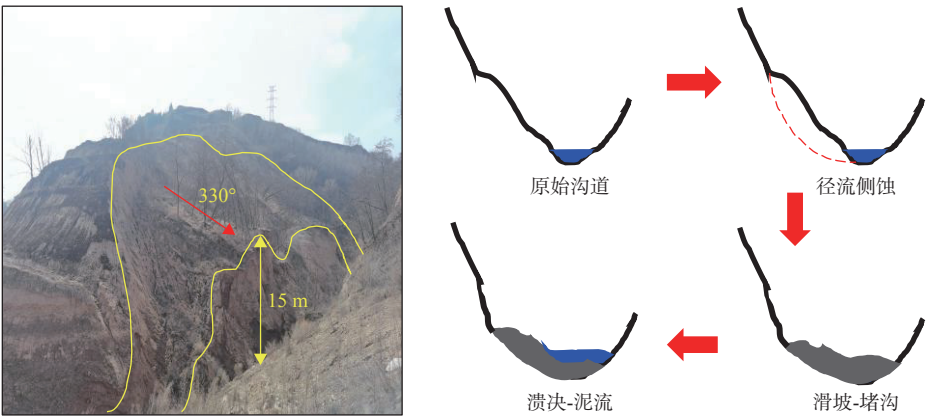


图 8 黄土沟坡滑塌-堵溃-洪水灾害链

Fig. 8 Disaster chain of sliding, plugging, and flood of loess gully slope

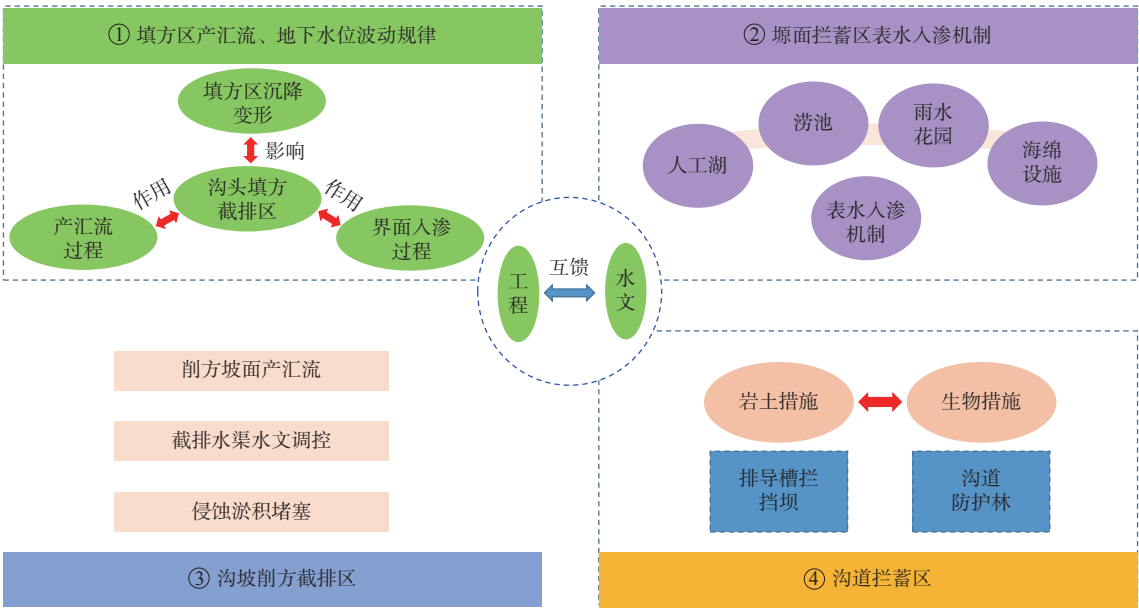


图 9 固沟保塬工程与水文过程互馈作用

Fig. 9 Interaction between GCHP and hydrological processes

表水侵蚀病害防治研究方面,需要更加充分地考虑黄土地质结构及水敏性对黄土表面侵蚀的控制机制;在此基础上充分考虑人工边坡上野生苔藓等生物土壤结皮的护坡效果^[29-32],通过人工种植地衣苔藓实现人

工黄土边坡的生态地质修复。

3.3 黄土工程地质界面对土体潜蚀的影响机制

在极端气候如暴雨等条件下,黄土与固沟保塬工程设施之间存在的工程地质界面势必会发生潜蚀灾变。当前,人们已经注意到了交填界面优势渗流现象,并开展了系列研究^[13-14]。但是,对于黄土-工程界面之间的潜蚀灾变机理尚待深入研究。例如,在塬面拦截区,大量雨水易沿雨水花园入渗造成地下黄土发生湿陷变形,进而引发城市路面塌陷等问题。极端降雨条件下沟头和沟坡修建的截排水渠无法及时排泄积水和泥沙,导致径流溢出截排水沟,沿黄土-工程界面发生优势入渗,进而造成严重的界面潜蚀灾变,最终导致截排水渠破损失效。

黄土工程地质界面几乎遍布于所有固沟保塬工

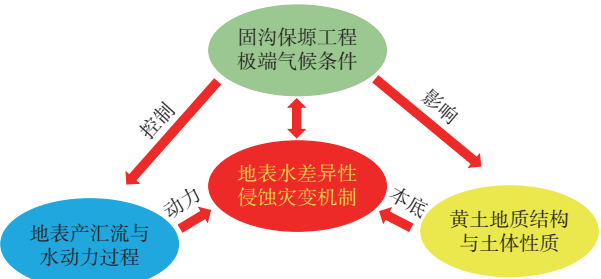


图 10 人工黄土边坡表水差异性侵蚀灾变主控因子

Fig. 10 Main controlling factors of surface water differential erosion disaster of artificial loess slope

程中,揭示黄土工程地质界面对潜蚀灾变的控制作用至关重要。黄土内部微细宏观多尺度界面分别控制着团聚体的水稳性、颗粒剥蚀搬运过程以及斜坡内部渗流场和应力场的分布^[33];黄土工程界面则控制着土体-结构界面剪切滑移、渗流潜蚀等灾变机制^[18]。因此在未来固沟保塬工程建设中,首先要提高对黄土工程地质界面病害尤其是潜蚀病害的重视程度;深入研

究黄土-工程界面、黄土内部界面和交填界面中复杂的土-水、土-结构耦合机制;通过裂隙性黄土潜蚀机理模型试验和数值计算方法等揭示水分在 3 大类界面中的运移规律;通过黄土工程地质界面渗透潜蚀试验等查明 3 大界面中潜蚀病害发生的临界条件和主控因素,为后期固沟保塬工程提供理论支撑(图 11)。

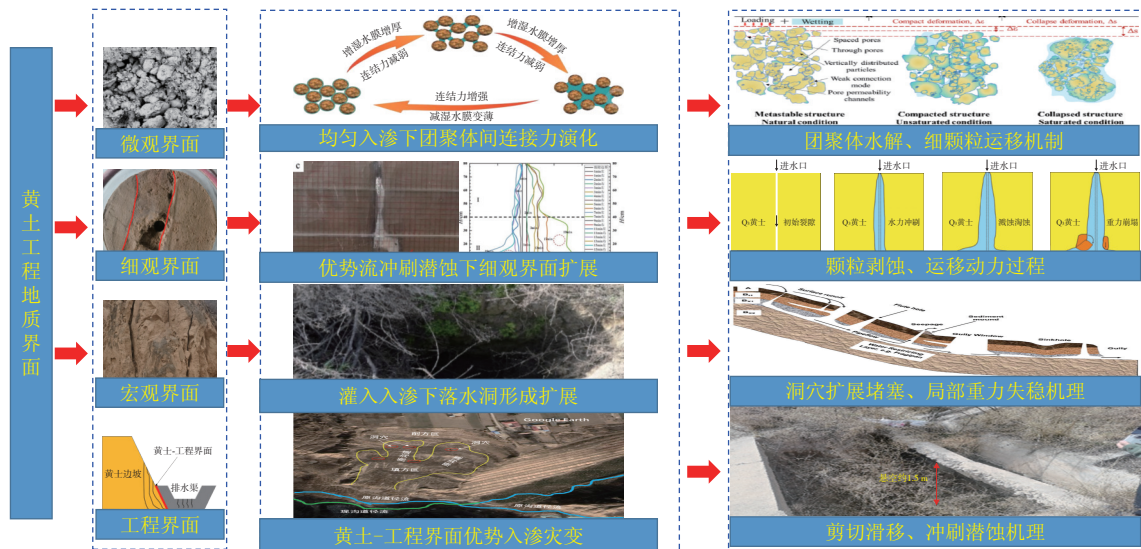


图 11 黄土工程地质界面潜蚀灾变机理^[34-36]

Fig. 11 Mechanism of subsurface erosion disaster at the engineering geological interface of loess^[34-36]

3.4 水土侵蚀对沟谷灾害链生演化的影响机制

黄土侵蚀是遍布于固沟保塬工程中的关键外动力地质过程,尤其是在黄土沟谷地质灾害链中扮演着重要角色。由于大规模生产生活污水的排放导致沟道径流量常年处于较高水平,加剧了沟道侧蚀和溯源侵蚀,造成沟坡前缘临空;斜坡应力场重分布后,会造成塬边大规模开裂,降雨及地表径流沿拉张裂缝等界面入渗会造成严重的潜蚀病害。随着沟道侧蚀的进一步加剧,沟坡崩滑失稳^[37],形成堰塞坝堵塞沟道;随着库水位的上升,面临漫顶或渗流溃坝等灾害,进而形成溃坝洪水,威胁下游安危(图 12)。可见在黄土沟谷灾害链形成、演变过程中,黄土的侵蚀都起到了十分重要的作用。当前对黄土物理力学等工程地质性质关注较多,对不同水动力作用下黄土侵蚀性评价,土体空间侵蚀变异性及侵蚀机制研究不足。

评价土体侵蚀性有两个关键参数,即临界剪切应力和可蚀性系数^[38],目前确定这两个关键参数的试验方法有很多种(表 2)^[39],其中应用较多、理论基础较为明确的淹没射流侵蚀试验(JET)主要用于评价土体表

面侵蚀性,而以伯努利方程为基础的孔蚀试验(HET)主要用于评价土体内部侵蚀性。因此,在今后的研究中,可对黄土侵蚀性及侵蚀机理开展大规模测试,建立土体物理力学参数与侵蚀性评价参数之间的函数关系,通过机器学习等方法开展土体侵蚀性智能预测评价,从而为黄土水土侵蚀病害研究等提供可靠参数。

3.5 固沟保塬工程中生态环境-地质环境-工程措施互馈机制

固沟保塬工程是施加在生态环境和地质环境中

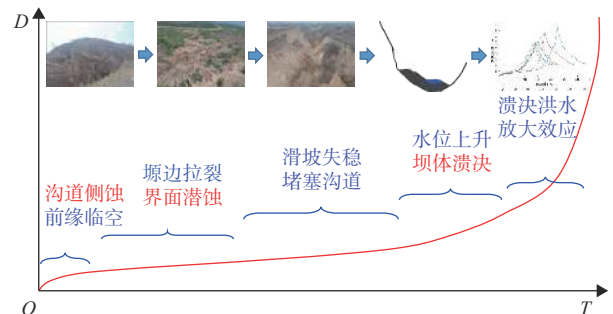


图 12 黄土沟谷型灾害链演变过程

Fig. 12 Evolution processes of gully disaster chain in loess

表 2 土体侵蚀性测试方法分类^[39]

Table 2 Classification of soil erosivity test methods^[39]

室内测试方法	原位测试方法
淹没射流侵蚀试验(JET)	淹没射流侵蚀试验(JET)
孔蚀试验(HET)	美国北卡罗莱纳州立大学的原位侵蚀评价探测器
针孔侵蚀试验	钻孔侵蚀试验(BET)
钻孔冲蚀试验	袖珍测湿仪(PET)
槽蚀试验(SET)	可调剪切应力侵蚀和运输(资产)水槽
旋转圆柱体试验(RCT)	现场冲刷试验装置(ISTD)
侵蚀功试验	现场水槽试验
应力控制侵蚀试验	
真三轴管涌试验	
恒梯度管涌试验	

的人类工程活动,其核心是对塬边沟头水文过程的调控,水文过程的人为调控又与黄土塬边沟谷中各类水土侵蚀病害、灾害等密切相关。当前,对水动力作用下各类灾害或病害的形成机理研究较多,但是由于固沟保塬工程系统的复杂性,尚未能充分考虑固沟保塬工程与生态环境、地质环境之间的互馈作用。因此,在未来需要以地球系统科学理论为指导,深入研究工程-水文、工程-环境、水文-灾害、生态-灾害等之间的互馈作用机制,紧扣水文过程这一核心主题,将固沟

保塬工程中各类灾害有机联系起来(图 13)。

目前已有部分学者在上述方面开展了针对性研究。固沟保塬工程是一个包括岩土措施、生物措施和社会治理措施在内的系统性工程,一套完备的固沟保塬工程措施应该以塬面、沟头、沟坡和沟道的水文调控功能区划为基础。Jin 等^[3]指出,在流域系统内可采用沟头回填等“刚性工程”和林草植被等“柔性措施”相结合的方式,按照“水文地质条件适宜-工程设计合理-水土力作用稳定-流域系统协调”的原则开展固沟保塬工程。固沟保塬工程中的生态环境与工程病害互馈机制是一个极其复杂的问题,研究表明植被即有固土护坡的积极功能,同时也存在植被蒸腾量增加、耗水量较高、土地变得更为干燥的问题^[40-41]。另外,临空面上植被根系的根劈作用也是较为严重的负面功能。当前对植被覆盖下斜坡侵蚀产沙机理和效益研究较为深入,但是对植被根系的减灾机理研究不足,尤其是对“植被-土体-工程-水分”系统的结构组合及其水文调控功能研究鲜见,另外植被措施进行灾害防治功能量化评估研究较少,对植被措施与岩土措施相结合的综合治理机理也缺乏系统性研究^[42]。

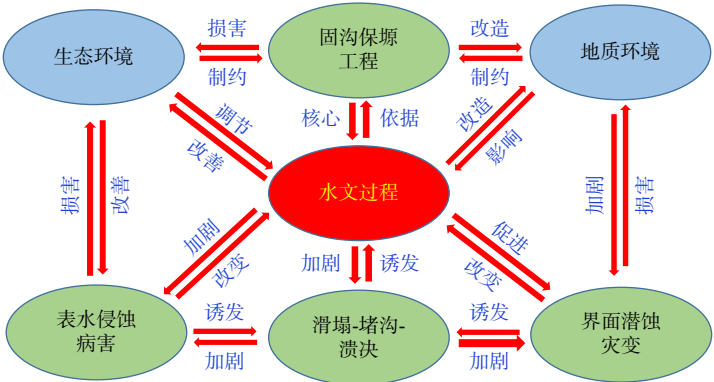


图 13 固沟保塬工程-生态环境-地质环境互馈作用

Fig. 13 Interaction between engineering, ecological environment, and geological environment in the GCHP

4 结论与展望

固沟保塬工程有效抑制了塬区溯源侵蚀速率,但是依然面对严重的水土侵蚀病害,通过野外考察、分析和整理相关文献得到以下结论:

(1)固沟保塬工程的核心作用是沟头水文过程调控。现有固沟保塬工程按照水文调控功能可以分为:塬面拦蓄区、沟头截排区、沟坡截排消能和沟道拦蓄区。

(2)固沟保塬工程面临着坡面表水侵蚀病害、黄土工程地质界面潜蚀病害、截排水渠淤积堵塞病害以

及黄土沟坡滑塌-堵溃-洪水地质灾害链等 4 大类较为严重的病害。

(3)固沟保塬工程水土侵蚀病害当前面临着工程与水文过程互馈机制不明,黄土结构性和水敏特性对表水差异性侵蚀灾变机理不清,黄土工程地质界面潜蚀灾变过程不详,黄土侵蚀性时空变异特征不清以及生态环境-地质环境-工程措施互馈作用不明等科学挑战。

在开展固沟保塬工程水土侵蚀病害关键科学问题研究的同时,鉴于固沟保塬工程水土侵蚀病害已造

成严重的经济损失,还应注重对水土侵蚀病害防治新技术新方法的研发。在今后研究中,尤其注重以下两个问题:

(1)发展微生物生态地质修复技术。目前针对黄土边坡坡面侵蚀性的改良已开发出诸多化学稳定剂。化学稳定剂虽然见效较快,但是由于添加了新物质,对原始黄土地层存在一定的影响。黄土地区野生地衣苔藓等生物土壤结皮具有良好的抗侵蚀能力,且具备由苔藓向更高一级生态系统发展的能力,因此,以自然修复为主,人工干预为辅的微生物生态地质修复技术将会是今后的重点。

(2)加强工程全寿命周期的监管与维护。目前固沟保塬工程失效发生病害的一个重要原因是工程设计施工不合理,且工后未进行及时维护。因此,未来需要建立健全固沟保塬工程全过程监督机制,建立维护档案,明确维护责任。

参考文献 (References):

- [1] 金钊.黄土塬——千沟万壑之中的平坦之地[J].地球环境学报,2020,11(1):119-124. [JIN Zhao. Loess tableland: A flat land among thousands of valleys and valleys[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(1): 119-124. (in Chinese)]
- [2] 王小帆,霍艾迪,朱兴华,等.陇东黄土塬区固沟保塬工程治理模式研究[J].人民黄河,2019,41(9):106-109. [WANG Xiaofan, HUO Aidi, ZHU Xinghua, et al. Study on governance mode of gully consolidation and highland protection project in East Gansu[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 106-109. (in Chinese with English abstract)]
- [3] JIN Zhao, PENG Jianbing, ZHUANG Jianqi, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(4): 821-839.
- [4] WANG Jiaxi, ZHANG Yan, LI Kunheng, et al. Gully internal erosion triggered by a prolonged heavy rainfall event in the tableland region of China's Loess Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(4): 610-621.
- [5] LIU Wanfeng, ZHANG Huyuan, ZHU Jianghong, et al. Strategies for gully stabilization and highland protection in Chinese Loess Plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 812609.
- [6] 曹国帆,金钊,杨思齐,等.近60年人类活动对洛川塬典型沟道侵蚀演化的影响[J].矿物岩石地球化学通报,2022,41(5):1041-1050. [CAO Guofan, JIN Zhao, YANG Siqu, et al. Impacts of human activities on gully erosion on the Luochuan tableland of the Chinese Loess Plateau during the past 60 years[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2022, 41(5): 1041-1050. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 赵景波,朱显谟.黄土高原的演变与侵蚀历史[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999(2):58-63. [ZHAO Jingbo, ZHU Xianmo. Evolution and erodind histry of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999(2): 58-63. (in Chinese)]
- [8] 史念海.历史时期黄土高原沟壑的演变[J].中国历史地理论丛,1987,2(2):3-54. [SHI Nianhai. Evolution of gully in Loess Plateau in historical period[J]. Journal of Chinese Historical Geography, 1987, 2(2): 3-54. (in Chinese)]
- [9] 庆阳市水土保持监督局.庆阳市固沟保塬综合治理实施规划(2015—2020)[R].庆阳,2014. [Qingyang City Soil and Water Conservation Supervision Bureau. Qingyang City Gugou Baoyuan comprehensive treatment implementation plan (2015—2020)[R]. Qingyang, 2014.(in Chinese)]
- [10] ZHU Yi, ZHUANG Jianqi, ZHAO Yong. Evaluation of loess-filled slope failure triggered by groundwater rise using a flume test[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022, 13(1): 2471-2488.
- [11] 张智锋.黄土边坡不同土层差异性侵蚀模式与土性改良试验研究[D].西安:长安大学,2022. [ZHANG Zhifeng. Experimental study on differential erosion patterns and soil property improvement in different soil layers of loess slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 朱鸿鹄.工程地质界面:从多元表征到演化机理[J].地质科技通报,2023,42(1):1-19. [ZHU Honghu. Engineering geological interface: From multivariate characterization to evolution mechanism[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 1-19. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 余岱金,黄强兵,康孝森,等.黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(5):119-128. [YU Daijin, HUANG Qiangbing, KANG Xiaosen, et al. A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 119-128. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 龚伟翔, 张晓超, 裴向军, 等. 基于高陡交填界面软弱带影响下黄土填方边坡失稳模式研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 288 – 298. [GONG Weixiang, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Instability modelling of loess fill slope with influence of weak zone of high and steep filling interface[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 288 – 298. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 等. 黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 41 – 52. [ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Yuxiang, et al. A review on loess subsurface-erosion mechanism and it's hazard effects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 41 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 971 – 980. [PENG Jianbing, WU Di, DUAN Zhao, et al. Disaster characteristics and destructive mechanism of typical loess landslide cases triggered by human engineering activities[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 971 – 980. (in Chinese with English abstract)]
- [17] XIE Quanyi, LIU Jian, HAN Bo, et al. Critical hydraulic gradient of internal erosion at the soil-structure interface[J]. *Processes*, 2018, 6(7): 92.
- [18] KIM H J, PARK J M, SHIN J H. Flow behaviour and piping potential at the soil-structure interface[J]. *Géotechnique*, 2019, 69(1): 79 – 84.
- [19] 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 714 – 730. [PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 714 – 730. (in Chinese with English abstract)]
- [20] WANG Shaokai, PENG Jianbing, ZHUANG Jianqi, et al. Underlying mechanisms of the geohazards of macro Loess discontinuities on the Chinese Loess Plateau[J]. *Engineering Geology*, 2019, 263: 105357.
- [21] FENG Li, ZHANG Maosheng, JIN Zhao, et al. The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103526.
- [22] 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等. 黄土地区地质灾害链研究初探 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 117 – 122. [ZHU Xinghua, PENG Jianbing, TONG Xiao, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 117 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [23] HUO Aidi, ZHAO Zhixin, LUO Pingping, et al. Assessment of spatial heterogeneity of soil moisture in the critical zone of gully consolidation and highland protection[J]. *Water*, 2022, 14(22): 3674.
- [24] HUO Aidi, PENG Jianbing, CHENG Yuxiang, et al. Hydrological analysis of Loess Plateau highland control schemes in Dongzhi Plateau[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 637.
- [25] 史倩华. 黄土塬区溯源侵蚀水动力过程与形态演化试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. [SHI Qianhua. Experimental Study of hydrodynamic processes and gully head morphological evolution in the loess yuan[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 姜程. 黄土高塬沟壑区固沟保塬(沟头填埋)与水力侵蚀的互馈机制 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [JIANG Cheng. Dynamic interaction mechanism of gully consolidation and highland protection(gully head landfill) and hydraulic erosion in gully region of loess plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王小帆. 基于水文特征分析的固沟保塬综合治理方案优化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [WANG Xiaofan. Study on optimization of comprehensive treatment plan of gully consolidation and highland protection based on analysis of hydrological characteristics[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 赵勇. 水动力作用下不同防护措施黄土填方边坡失稳过程研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020. [ZHAO Yong. Study on instability process of loess filled slope under different protective measures under hydrodynamic force[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [29] BELNAP J, WILCOX B P, VAN SCOYOC M W, et al. Successional stage of biological soil crusts: An accurate indicator of ecohydrological condition[J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(3): 474 – 482.
- [30] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105 – 112. [GAO Liqian, ZHAO Yunge, QIN Ningqiang, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in Hilly Loess Plateau Region of Northwest

- China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 105 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 张丙昌, 武志芳, 李彬. 黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望 [J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1123 – 1131. [ZHANG Bingchang, WU Zhifang, LI Bin. Progress and prospect of biological soil crusts in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1123 – 1131. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 808 – 812. [ZHANG Kankan, BU Chongfeng, GAO Guoxiong. Effect of microbiotic crust on soil water infiltration in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(5): 808 – 812. (in Chinese with English abstract)]
- [33] SUN Jiqiang, LI Xi'an, LI Jie, et al. Numerical investigation of characteristics and mechanism of tunnel erosion of loess with coupled CFD and DEM method[J]. CATENA, 2023, 222: 106729.
- [34] YANG Hui, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Three-stage collapsibility evolution of Malan loess in the Loess Plateau[J]. CATENA, 2022, 217: 106482.
- [35] WILSON G V, WELLS R, KUHNLE R, et al. Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(1): 45 – 63.
- [36] 王力. 基于微结构单元理论的黄土湿陷性预测模型研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021. [WANG Li. Research on prediction model of loess collapsibility based on microstructure unit Theory[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 成玉祥, 张卜平, 唐亚明. 溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 86 – 91. [CHENG Yuxiang, ZHANG Buping, TANG Yaming. The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 86 – 91. (in Chinese with English abstract)]
- [38] FELL R, WAN C F. Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test - interpretative report[R]. NSW: School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, 2002
- [39] BRIAUD J L, SHAFII I, CHEN H C, et al. Relationship between erodibility and properties of soils[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2019.
- [40] 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(2): 199 – 221. [LAN Hengxing, PENG Jianbing, ZHU Yanbo, et al. Research and prospect of geological surface processes and major disaster effects in the Yellow River Basin[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(2): 199 – 221. (in Chinese)]
- [41] 祝艳波, 兰恒星, 彭建兵, 等. 黄河中游地区水土灾害机理与灾害链效应研究进展 [J]. 人民黄河, 2021, 43(8): 108 – 116. [ZHU Yanbo, LAN Hengxing, PENG Jianbing, et al. Research progress of water-soil disaster mechanism and disaster chain effect in the middle reaches of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(8): 108 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 崔鹏, 邓宏艳, 王成华, 等. 山地灾害 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018. [CUI Peng, DENG Hongyan, WANG Chenghua et al. Mountain disaster [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018. (in Chinese)]

编辑: 王支农