

黄河流域水土保持发展过程及高质量发展面临的科学挑战

姚文艺^{1,2}, 肖培青^{1,2}, 张文敏³

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄土高原水土保持重点实验室, 河南 郑州 450003;
3. 河南水环境勘测设计有限公司, 河南 三门峡 472000)

摘要: 基于水土保持学科框架和阶段发展规律, 回顾总结了黄河流域水土保持发展历程, 分析了阶段发展特征, 从实践、理论、技术等层面归纳了新中国成立以来取得的进展, 并结合多年调查和研究基础, 剖析了黄河流域水土保持高质量发展存在的瓶颈和面临的科学挑战, 同时提出了水土保持高质量发展的科学内涵及学科拓展、多元服务价值评估、景观格局配置与空间区划、碳汇机制与功效评价、衍生产业协同发展等需要解决的科学问题与关键技术, 并对黄河流域水土保持发展前景进行了展望。

关键词: 高质量发展; 水土保持; 发展过程; 科学挑战; 黄河流域

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)05-0036-11

Development process of soil and water conservation in the Yellow River Basin and scientific challenges for its high-quality development//YAO Wenyi^{1,2}, XIAO Peiqing^{1,2}, ZHANG Wenmin³ (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Water Environment Survey and Design Co., Ltd., Sanmenxia 472000, China)

Abstract: Based on the disciplinary framework of soil and water conservation and its stage-wise development patterns, this paper reviews and summarizes the development process of soil and water conservation in the Yellow River Basin, analyzes the characteristics of different development stages, and synthesizes the progress achieved since the founding of the People's Republic of China in terms of practice, theory, and technology. Based on years of investigation and research, it further examines key challenges and scientific issues hindering the high-quality development of soil and water conservation in the region. In addition, it identifies key scientific issues and critical technologies that need to be addressed, including the scientific connotation and disciplinary expansion of high-quality development of soil and water conservation, multi-dimensional service value assessment, landscape configuration and spatial zoning, carbon sink mechanisms and effectiveness evaluation, and the coordinated development of derivative industries. Finally, future directions for soil and water conservation in the Yellow River Basin are discussed.

Key words: high-quality development; soil and water conservation; development process; scientific challenges; the Yellow River Basin

高质量发展是 21 世纪我国水土保持发展面临的最具挑战性的课题, 也是水土保持与荒漠化治理研究领域的前沿方向。水土保持是黄河的治本措施之一, 对当地乡村振兴及流域经济发展意义重大^[1]。1993 年国家首次提出将水土保持作为我国的一项基本国策, 在黄河流域生态保护和高质量发展国家战略中明确将其作为主要目标任务之一。然

而, 对于水土流失最严重、生态问题最突出的黄河流域, 水土保持高质量发展面临的科学、实践问题尤为突出。因此, 回顾黄河流域水土保持发展过程、实践经验和成就, 分析高质量发展需要应对的科学问题, 无论是对于实现新时期水土保持领域重大科技突破, 还是对于水土保持与生态治理实践的转型发展都具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2243210); 河南省中原学者工作站资助项目 (244400510011); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504500)

作者简介: 姚文艺 (1957—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 964144518@qq.com

黄河流域是我国洪水泥沙灾害最严重的地区,“三年两决口、百年一改道”是黄河灾害史的真实写照。黄河水流含沙量高,泥沙在洪水灾害中具有放大作用,形成泥沙灾害链^[2]。因此,水土保持是治理黄河的根本,对保障黄河长治久安具有重要的战略地位^[3]。早在远古时代,黄河流域就有了“平治水土”之说,可以说黄河流域是我国水土保持的起源地^[4]。古代,人们在与黄河肆虐洪水抗争的过程中意识到破坏森林对灾害的强化作用,并基于长期的实践经验,逐步形成了水土保持的思想观念,提出了诸如保护森林、修建沟洫、推行区田、植树等水土保持措施,并创造了农田水土保持工程^[5]。但是在历史时期,水土保持概念和措施均未形成完整的体系^[4]。

新中国成立以后,黄河流域水土保持得到系统、快速、全面发展,逐渐形成了明晰的水土保持概念和内涵。《中华人民共和国水土保持法》明确规定,水土保持是指对自然因素和人为活动造成水土流失所采取的预防和治理措施,强调综合运用农、林、牧、水利等手段。在水利行业,水土保持一般是指防治水土流失,保护、改良与合理利用水土资源,建立良好生态环境的工作,其措施涵盖工程、生物和耕作手段,旨在涵养水源、减少地表径流、防止土壤侵蚀,强调了水土保持在国土整治、江河治理以及国民经济和社会发展中的基础性作用。不过,也有人认为,这类定义已经不满足新时期公众日益增加的对水土保持的需要^[6]。随着我国高质量发展理念的提出,尤其是黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的实施,水土保持进入高质量发展新阶段^[7]。水土保持高质量发展的理论指导是新发展理念,其根本目的是满足人民日益增长的对美好生活和优美生态环境的需要,其目标是提升水土流失综合防治能力,增强水土保持功能和生态服务价值,是一种更可持续的发展^[8]。

目前,水土保持高质量发展已成为水土保持研究领域的主题和热点。近年来众多研究者就黄河流域水土保持高质量发展的科学内涵、路径、措施和实践开展了研究^[7,9-15],并提出了关于水土保持高质量发展的研究重点^[16]。由于黄河流域复杂的侵蚀环境和极为脆弱的生态系统,要实现水土保持高质量发展仍面临着许多科学问题与关键技术的挑战。为此,本文在对我国水土保持发展历程、取得成就等回顾总结的基础上,根据大量调查和前期研究基础,剖析了当前黄河流域水土保持发展中出现的新问题和多维挑战,提出了实现水土保持高质量发展亟待解决的重点研究方向,以期为实现黄河流域生态保护和高质量发展国家战略提出的加强生态环境保护的

目标任务提供参考。

1 黄河流域水土保持发展过程

1.1 近代以前时期

黄河流域 2002 年的水土流失面积为 46.5 万 km²^[17],其中约 98%位于黄土高原。面积为 64 万 km² 的黄土高原是黄河泥沙的主要来源地,其由山西高原、陇中高原、鄂尔多斯高原、河套平原组成,形成于早更新世初。由于黄土多孔性、透水性强,黏性低、土质松易塌陷,加之大部分为干旱半干旱气候区,水蚀-风蚀-冻融-重力多动力复合侵蚀严重,极强度侵蚀面积占全国的 64%。黄土高原在史前期就有了人类活动,随着生产活动的发展,古人已注意到黄土高原水土流失的危害,在夏商周时期就有了治理水土流失的实践^[3,18]。

在有文献记载的 3 000 多年历史中,自西周时期黄河流域普遍使用铁器以来,人类改造自然的能力不断增强,森林草地被垦为农地,各种水土流失灾害时常发生,严重影响了人们的生产生活,水土流失治理开始引起关注。经春秋、战国、秦、汉、魏、晋朝代演替,在观念、管理、官制、措施、规划等方面逐步建立起了水土保持体系^[1]。上古时期大禹的“平治水土”就体现了人水和谐、土壤保持的观念,使“土反其宅,水归其壑,昆虫毋作,草木归其泽”。

先秦时期还建立了“任土之法”的合理管理土地、保持水土、涵养地力的思想。“以时禁发”也是中国古代水土保持的核心思想之一,就是要按自然节律,在特定季节禁止或允许对动植物资源的开发利用,强调“顺天时,量地力”^[19],这是最早出现的封禁治理理念。据记载,战国时期已出现九州水土资源合理利用的国土规划思想^[5]。在西周时期,有了一定形制的水土保持管理体制,专门设立了虞官,其职责就是管理水土保持,并分为管理山林、河流湖泊的山虞、泽虞。在《商君书》中提出了“山林、藪泽、谿谷足以供其利,藪泽堤防足以畜。故兵出,粮给而财有余;兵休,民作而畜长足。此所谓任地待役之律也”,就是按比例合理利用山林、溪流、道路、农田等各类土地。在元世祖即位之初,颁发了《农桑辑要》,规定了每百亩土地种植树木的数量和对破坏山林者罚罪的制度。在 2 200 多年前的秦朝,为保持山林,颁发了“一山泽”法令^[1],并设立管理水土保持的“少府”之职。秦以后历代王朝都不同程度地颁布了与水土保持有关的法令^[1]。

在建立水土保持法令的同时,历朝历代都实践了不同类型的水土保持措施,包括耕作措施、生物措施和工程措施。4 000 多年前,后稷就提出了耨田的

保土耕作措施。西汉把这项技术发展为代田法,并在河南、山西、陕西、甘肃一带推广。夏末商初,伊尹提出了“区田法”集约耕作措施,以应对旱灾,提高作物产量。《论语》中有“尽力乎沟洫”的记载,说明在春秋时期有了沟洫措施,以挖渠排水,干旱时并可用于蓄水。周代还出现了井田制度。夏商周时期已逐步形成农田水土保持的雏形。随着农业向坡地发展,出现了坡耕地沟洫,即顺等高线挖沟,蓄水保土减轻土壤侵蚀,这可以说是坡式梯田的前身。

关于黄河流域梯田的起源,可以追溯到西汉时期^[20],这也是黄河流域农业发展的标志。在宋元时期梯田措施得到很大发展,宋代首次出现了“梯田”一词,并形成了梯田修筑方法。因此也有人认为梯田出现于740多年前的南宋。山西省洪洞、赵城遗留的老梯田已有600多年。淤地坝是黄河流域具有独创性的水土保持工程措施,具有拦沙淤地控蚀的作用。淤地坝最早起源于1569年陕西省子洲县黄土洼因山体滑坡所形成的天然聚淤,这种聚淤堆积的坝高超过60 m,淤积成数百亩的坝地,成为当地旱涝保收的农田^[4]。明代万历年间山西省已有明确的人工坝地记载,当地开始鼓励农民打坝淤地,清代至民国时期修筑淤地坝的技术得到了逐渐推广。

黄河流域水土保持生物措施的发展与人类活动有着密切的关系。据研究^[3],战国时期是黄土高原植被变化的重大转折时期,在其初期黄土高原的林木植被茂盛,属于天然植被,但在后期由于人类活动增强,植被开始遭受破坏。到了唐代后期,随着人口增加,农牧活动在黄土高原逐步迅速发展,植被覆盖度大为降低,黄河水含沙量显著增加。到了清代,这一情况尤甚。实际上先秦时人们已经注意到植被破坏会加剧水土流失的问题,如西周就有相关的记载。西汉已开始把种草作为防治水土流失的措施,有“草土之道”一说;战国时期曾把种山林作为富国之道;齐国管仲规定种树者奖励黄金,破坏山林者受罚;秦始皇下令保护山林,汉代文帝、景帝颁布植树诏令,提倡植桑种树;刘彻、元世祖下令广种苜蓿;明朝实行了植树的免税政策,鼓励植树造林。

民国时期,一些专家在研究历代治河方略和措施基础上,结合西方科学技术,提出了开展水土保持、建立组织结构、开展科学试验等建议。1933年黄河水利委员会设置林垦组,1940年成立林垦设计委员会,专门负责水土保持方面的工作。同年在黄河水利委员会林垦设计委员会与金陵大学农学院在成都召开的防止土壤冲刷的科学讨论会上,首次提出了“水土保持”概念,取代了此前的“土壤保持”一词,后逐渐被国际社会普遍采用。1941年在甘肃天

水建立了陇南水土保持实验区,这是我国建立的第一处水土保持科学试验站,开创了我国水土流失规律试验研究的历史。1942年8月成立天水水土保持实验区,于1944年首次在大柳树沟开展小流域治理试验,开启了我国小流域治理的实践。在20世纪40年代后期还开展了水土保持造林、修建梯田、筑坝造地、种草等示范推广工作。

1.2 新中国成立以来

新中国成立以来,黄河流域水土保持开启了大发展的新纪元。水土保持作为治理保护黄河的根本之策,已经成为关乎国计民生的重要行业,这在历史上是前所未有的。自1950年以来,黄河流域水土保持发展大致经历了5个阶段。

第一阶段为起步发展(1950—1960年)。1952年12月政务院颁布《关于发动群众继续开展防旱抗旱运动并大力推行水土保持工作的指示》,明确要求“以黄河的支流无定河、延水、泾、洛、渭诸河流域为全国的重点”,标志着把黄河流域水土保持纳入国家发展战略。1953年黄河水利委员会(以下简称“黄委”)制定的治黄任务决定中明确“把黄河由害河变成利河的关键,在于水土保持任务能否完成”。20世纪50年代水利部、中国科学院、黄委联合开展3次大规模水土流失查勘,在此基础上,1953—1954年首次对黄河中游流域进行了土壤侵蚀分区。1955年通过的《关于根治黄河水害和开发黄河水利的综合规划》成为黄河流域第一部系统性的水土保持规划,首次从国家层面系统部署了黄河流域水土保持工作。1956年黄委提出了以支毛沟为单元的综合治理模式。1957年设立了国务院水土保持委员会,同年发布《中华人民共和国水土保持暂行纲要》,第一次提出黄河中游水土保持遵循的方针是“全面规划,综合开发,坡沟兼治,集中治理”,水土保持要与当地生产相结合,以造林种草和封山育林为主。北京林业学院于1952年首开水土保持本科课程,并于1958年正式成立我国首个水土保持本科专业。1956年中国科学院、水利部联合成立了水土保持研究所,黄委、山西、河南等流域管理机构和省区在这一时期先后建立了西峰、绥德、离石、嵩县等多处水土保持科学试验站。1960年内蒙古林学院建立了我国第一个沙漠治理专业。这一时期治理实践的重点是有组织、系统地开展淤地坝建设的试点和示范工作。

第二阶段为波折发展(1961—1980年)。20世纪60年代初受经济困难影响,黄河流域水土保持基本上处于停顿状态,到中期开始恢复发展,但是到后期受“文化大革命”影响又有减弱,进入相对缓慢

发展阶段。截至 1963 年年底,全流域建立了 59 处水土保持科学试验站和推广站。1964 年成立了黄河中游水土保持委员会及黄河中游水土保持局。在黄河中游第三次水土流失重点治理区会议上提出了因地制宜、以农为主、农林牧结合等 7 条工作方针。在 20 世纪 70 年代中期以前,受全国开展“农业学大寨”运动的影响,水土保持工作奉行“以土为主”的方针,梯田建设得到较大发展。20 世纪 70 年代初研发出水坠法筑坝技术,淤地坝建设有了突破性发展。据统计,山西、陕西两省 1970—1977 年利用水坠法建成了 8000 多座淤地坝。20 世纪 60—70 年代是黄河流域淤地坝建设规模最大、速度最快的时期^[20]。这一时期具有标志性的工作是形成了以小流域为单元的综合治理模式^[21-22]。1980 年水利部颁布《水土保持小流域治理办法(草案)》,小流域综合治理进入规范化发展阶段,这是我国对世界水土保持理论与实践作出的重大贡献。1980 年恢复了黄河中游水土保持委员会,并组建黄委黄河中游治理局(1990 年更名为“黄委黄河上中游管理局”)。

第三阶段为依法发展(1981—1992 年)。20 世纪 80 年代初国家下达开展黄土高原水土保持专项治理任务,同期朱显谟院士提出黄土高原国土整治“28 字方略”^[23-25]。1983 年黄土高原治理重点开始向粗泥沙来源区转移,并首次提出建设治沟骨干工程的治理途径。1985 年水利部提出以沙棘开发作为黄土高原治理的突破口,实施了被称为“地球癌症”的砒砂岩区的治理,并探索出了治理沟道的“沙棘柔性坝”措施。1986 年颁布了黄河流域水土保持治沟骨干工程建设的第一部技术规范《水土保持治沟骨干工程暂行技术规范》。1991 年 6 月 29 日《中华人民共和国水土保持法》的颁布首次确立了水土保持的法律地位,标志着我国将水土保持发展推向新阶段。自 20 世纪 80 年代中期开始,黄河流域梯田建设出现了前所未有的持久发展的强劲势头^[3]。1992 年黄河流域开始试点推行水土保持个人承包责任制,试行了股份制、“四荒”拍卖制等。

第四阶段为大规模发展(1993—2000 年)。1993 年国务院“关于加强水土保持工作的通知”中明确提出了水土保持“是国民经济和社会发展的基础,是我们必须长期坚持的一项基本国策”,对水土保持工作的社会地位和作用给予充分肯定^[26]。1994 年黄河流域首次引进黄土高原水土保持世行贷款项目,覆盖陕西、山西、甘肃、内蒙古 4 省区。2004 年黄委提出黄河泥沙的“三道防线”模式,即黄土高原水土流失治理、小北干流放淤、小浪底水库调控综合治理,将水土流失治理提高到新水平。

1995 年黄委组织国内有关单位重新界定黄河多沙粗沙区,并于 2000 年 5 月发布黄河中游多沙粗沙区区域界定结果为 7.86 万 km²,涉及陕西、山西、内蒙古、甘肃、宁夏 5 省区。1998 年延安吴起县率先实施封山禁牧和退耕还林,1999 年延安正式开启全国首个大规模退耕还林试点地区,提出了“退耕还林(草)、封山绿化、以粮代赈、个体承包”十六字方针,2000 年在黄河上中游流域实施首轮大规模的退耕还林还草工程。以 2002 年国务院公布的《退耕还林条例》为标志,退耕还林还草工程推广至全国。

第五阶段为高质量发展(2001 年至今)。自 2000 年后在全流域推行实施退耕还林还草工程。2002 年国务院批复的《黄河近期重点治理开发规划》明确将 7.86 万 km² 的多沙粗沙区作为黄土高原水土流失治理的重点地区。2004 年黄委组织开展黄河粗泥沙集中来源区界定研究,2006 年研究成果通过验收,确认黄河粗泥沙集中来源区面积为 1.88 万 km²。2010 年 12 月《中华人民共和国水土保持法》通过全国人大修订,实行“预防为主、保护优先、全面规划、综合治理”的方针,更加强调科学管理与效益。2010 年黄委开始发布黄河流域(片)大型建设项目水土保持公报,包括项目监管、措施实施及存在问题等。2013 年习近平总书记首次提出“山水林田湖是生命共同体”概念,2014 年发展为山水林田湖草沙系统治理的理念。2019 年 9 月提出黄河流域生态保护和高质量发展国家战略(简称“黄河重大国家战略”),将水土保持列为主要目标任务之一,标志着黄河流域水土保持工作进入高质量发展阶段。2019 年水利部提出水土保持率的概念,同年启动了包括黄河流域水土保持率研究在内的水利部重大科技问题项目“新时代水土保持目标和对策研究”。2021 年 10 月中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,明确制定了加强重点区域荒漠化治理、大力实施林草保护、增强水土保持能力等重点工作。2022 年《中华人民共和国黄河保护法》颁布,明确了黄河流域砒砂岩区、多沙粗沙区、水蚀风蚀交错区和沙漠入河区作为重点治理区的法律地位。2021 年黄委开始定期发布《黄河流域水土保持公报》,此后每年更新。2025 年国务院批复实施《黄河流域国土空间规划(2021—2035 年)》。

上述 5 个阶段均有不同的标志性事件和阶段特点(表 1),尽管这些阶段在时间上有所嵌套,不同研究者划分的阶段也会有一定差异,但在不同阶段中人们对于黄河流域水土保持发展的内涵、特征的理解在不断深化。

表 1 黄河流域水土保持自 1950 年以来发展阶段特征

阶段	划分时段	标志事件	阶段特点
第 1 阶段:起步发展	1950—1960 年	政务院颁布《关于发动群众继续开展防旱抗旱运动并大力推行水土保持工作的指示》,黄河支流无定河、延水、泾、洛、渭诸河流域纳入全国治理重点	黄河流域水土保持纳入国家发展战略层面,确立了水土保持作为黄河保护治理的根本之策
第 2 阶段:波折发展	1961—1980 年	因“文化大革命”影响,黄河流域水土保持发展经历低谷、恢复过程,后期提出以小流域为单元综合治理的模式	在曲折中仍呈现发展的总趋势,综合治理理论与实践得到突破
第 3 阶段:依法发展	1981—1992 年	《中华人民共和国水土保持法》颁布,黄河流域试行水土保持个人承包责任制	水土保持工作纳入法治化轨道,完善水土保持管理制度与治理体系
第 4 阶段:大规模发展	1993—2000 年	国家推动退耕还林还草工程全面实施	建立了水土保持系统治理、统筹布局的科学观念和知识体系
第 5 阶段:高质量发展	2001 年至今	黄河流域生态保护和高质量发展国家战略实施	更加注重生态保护与高质量发展关系,强化水土保持科学管理与定量监测

2 黄河流域水土保持取得的主要成就

2.1 实践发展成就

a. 累计治理水土流失面积过半。据 2022 年统计^[27],黄河流域累计治理水土流失面积达到 26.88 万 km²,占水土流失总面积 46.5 万 km² 的 57.8%,其中修建梯田 646.15 万 hm²,营造水土保持林 1335.51 万 hm²,种草 244.87 万 hm²,封禁治理 461.52 万 hm²。到 2024 年年底,累计修建淤地坝 5.83 万座,植被覆盖面积 54.13 万 km²,其中高覆盖度面积占比达 42.34%,中覆盖度及以上占比达 70.12%^[28]。

b. 实现了水土流失面积和强度“双下降”、水蚀风蚀“双减少”的良好态势。据统计^[28],与 2019 年相比,2024 年黄河流域水土流失面积减少了 1.84 万 km²,减幅为 6.96%。其中水力侵蚀面积减少了 1.30 km²,减幅为 6.86%;风力侵蚀面积减少了 0.54 万 km²,减幅为 7.24%。从侵蚀强度等级来看,极强烈等级和剧烈等级减幅较大,分别减少了 33.05%和 42.42%。其中强烈及以上水土流失面积减少了 1.20 万 km²,减幅为 31.25%。2024 年水土保持率达 69.07%,比 1990 年的 41.50% 提高了 27.57 个百分点。总的来说,黄河流域水土流失状况得到了有效改善,持续呈现生态环境稳中向好。

c. 入黄泥沙量明显减少。三门峡水库控制断面潼关在 1919—1959 年的平均输沙量为 16 亿 t,到 2000—2024 年,其平均输沙量仅为 1.78 亿 t,减幅达 89%,后一时期的最大输沙量也只有 2018 年的 3.73 亿 t。据统计^[29],2004—2024 年潼关年均输沙量为 1.73 亿 t,2024 年为 1.83 亿 t,平均含沙量为 5.57 kg/m³,较 1919—1959 年平均含沙量 38 kg/m³ 减少 85% 以上。这一显著下降反映了近年来黄河泥沙治理的成效,黄土高原水土保持措施的加强和植被覆盖度的提升是重要原因。根据初步分析^[30-31],20 世纪 80 年代水土保持措施减沙量占总

减沙量的 22%;1997—2006 年水土保持措施减沙占比为 35%;2006—2020 年水土保持措施的减沙作用显著增加,约达 70%。不过,水土保持措施减少径流量的占比约为 20%,径流减少的主要因素是经济社会用水,占 80%。应该指出的是,黄河近 10 年的平均输沙量仍占全国总输沙量的 47%,比长江高 25 个百分点。

d. 为实现“双碳”国家战略目标发挥了重要作用。水土保持措施(如造林、坡改梯、建设淤地坝等)可以通过增加植被覆盖、减少土壤侵蚀,实现植被增汇、土壤增汇、保土固碳和减蚀减排,直接提升碳汇能力^[32]。淤地坝可以通过拦泥发挥固碳作用,例如 2011—2017 年黄土高原淤地坝拦泥固碳量达 222.33 万 t,年均拦泥固碳量和减蚀减碳量分别为 31.76 万 t/a 和 34.94 万~46.58 万 t。50 年内黄土高原淤地坝共拦泥 102 亿 t,淤地坝拦泥固碳总量为 2164 万 t,有机碳年均埋藏率分别为中国水库和湖泊有机碳埋藏率的 36%、24%,单位面积有机碳埋藏速率高于全球典型沉积区 1~2 个数量级^[33-34]。另据分析,在黄土高原丘陵沟壑区,修建 30 年的梯田,土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳较坡耕地分别增加 146%、196%、100%^[35]。在碳排放权交易管理方面,2024 年 9 月延安市开启了黄河流域首单水土保持碳汇项目交易。之后,宁夏、山东、河南、甘肃等省区陆续试行了水土保持碳汇交易项目。

e. 为建设“三北”防护林体系、构筑西北地区生态安全屏障作出了贡献。黄河流域是“三北”防护林体系建设的重点区域和关键节点,通过几十年持续不断开展营造水土保持林等实施综合治理,已经形成了防风固沙、固土抗蚀的生态防护体系,筑起了“三北”防护林体系的关键区地带^[4]。例如:兰州通过 40 余年持续治理,在黄河“几字弯”区域构起了一道复合型生态屏障,创造了“陇上塞罕坝”的奇迹,形成了“三北”防护林体系的重要组成部分;内蒙古等地把“三北”防护林体系建设与荒漠化治理

有机结合,通过山水林田湖草沙一体化治理,形成了具有特色的“人退绿进”的“三北”防护林体系建设模式;陕西省通过大规模植树造林和生态修复,推进陕西省的“三北”防护林体系建设,在 2023 年启动的“三北”防护林工程攻坚战中,人工造林种草 18 万亩(1 亩=1/15 hm²),退化林草修复 18 万亩。

f. 民生改善取得明显效益。根据黄委对 1996—2015 年水土保持经济效益的分析,黄河流域水土保持效益为 9 556 亿元,其中粮食 2 662 亿元、果品 6 894 亿元。人民治理黄河 70 年,黄河流域累计增产粮食 15 662 万 t、增产果品 15 570 万 t,产生的水土保持经济效益总计 11 789 亿元^[36]。近年来生态治理与衍生产业协同发展已逐渐成为水土保持综合治理实践的主题,是水土保持与生态治理研究领域的热点课题^[37]。例如,黄土高原丘陵沟壑区坑镇河、罗玉沟、清水沟 3 个典型小流域(片)的实践表明,通过实施“水土保持+特色产业”综合治理模式,年人均纯收入可增加 2 969~4 600 元,使城乡居民生活水平差距持续缩小^[38]。

g. 初步形成了较为完善的黄河流域水土保持监管体系和法规制度。历经多年发展,黄河流域水土保持法制建设取得显著成效。首先,立法与制度框架不断得到完善。20 世纪 80 年代颁布的《开发建设晋陕蒙接壤地区水土保持规定》标志着黄河流域水土保持法治化的起程,《中华人民共和国水土保持法》的颁布首次从国家层面明确了流域管理机构的水土保持监管的法定职责,《中华人民共和国黄河保护法》的实施,进一步从国家层面强化了黄河流域水土保持法规制度的建设力度,极大地推进了水土保持监督管理的法治化。其次,黄委与流域各省区逐步建立了水土保持监督管理的协同机制,其中黄河流域(片)大型生产建设项目水土保持公报发布制度的实施,强化了社会监督。再次,诸如《陕西省水土保持条例》等各省区的水土保持监督管理规章制度和法规也相继建立,完善了黄河流域法制框架。通过法制建设,实现了从被动治理到主动监管的转变,为黄河流域水土保持高质量发展提供了坚实的法制保障。

2.2 学科发展成就

a. 在全国首次开展水土流失分区。1953—1954 年,为编制《黄河综合利用规划技术经济报告》,黄委、农业部、林业部及中国科学院共同组织开展了黄土高原水土保持考察,在此基础上,根据水土流失轻重程度,以地形、地貌为主要参数,完成了土壤侵蚀类型区划分,将黄河中游流域划分为 9 个土壤侵蚀类型区,同时编制了黄河中游流域土壤侵

蚀分区图,为黄河流域土壤侵蚀规律研究与治理规划奠定了重要的理论基础。

b. 提出了以小流域为单元综合治理的理念与模式。黄土高原尤其是丘陵沟壑区小流域(面积小于 50 km²)的产汇流、产输沙在过程上具有相似性,在空间上具有分带性。通过对坡沟系统综合治理技术的长期探索,1980 年提出了以小流域为单元的水土保持综合治理模式,形成了适合黄土高原自然和经济规律的具有独特综合科学内涵的小流域治理技术体系,1990 年水利部正式提出“以小流域为单元,山水田林路统一规划”的综合治理理念,成为国际水土保持领域的范例。同时水土保持“28 字方略”的提出为进一步提高以小流域为单元的综合治理水平提供了理论基础。

c. 发现了黄土高原泥沙输移比约等于 1 的侵蚀-产沙输沙规律。在 20 世纪 70 年代以前,黄土高原侵蚀与产沙的关系是争论不休的科学问题,对治黄方略决策影响很大。在大量的径流小区试验和水文泥沙观测基础上,根据泥沙运动学理论解析,发现黄土高原丘陵沟壑区泥沙输移比接近 1,即土壤侵蚀 1 t,进入黄河的泥沙也大致为 1 t。黄土高原大部分地区泥沙输移比接近 1,但在渭河下游、汾河中下游等部分流域的泥沙输移比明显小于 1。

d. 建立了较系统的水土流失科学试验观测站网。以 1941 年天水陇南水土保持实验区的建立为标志,黄河流域乃至我国的水土保持科学试验与监测工作开启,至今已经积累了 80 余年的观测数据。自 20 世纪 50 年代起,经过几十年建设,黄河流域已形成了以黄委西峰、天水、绥德水土保持科学试验站为骨干的试验监测站网,包括青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等省区以及其他高校、科研院所建立的试验站所近 40 处,主要分布在黄土丘陵沟壑区第 I~V 副区、黄土高原沟壑区,以及土石山区、石质山区等,具有较好的代表性。另外,近年来还建设了多处水土保持监测站点,加上黄河干支流有关的水文站点,覆盖了全流域多个重点区域。通过长期试验观测,获取了海量的水土流失规律、水土保持效益和水文泥沙等多元数据,建立了数据库,编制了黄河水沙时空图谱等,为水土流失治理与水沙调控提供了基础支撑。与此同时,也形成了以高校、科研单位为主体的水土保持创新体系。

e. 探索出了多类分区治理模式。黄土高原自然环境和经济社会具有显著的空间分异性,需要通过分区优化土地利用结构,科学量化配置水土保持措施,采取不同的治理模式。通过几十年的持续探索,先后形成了黄河中游丘陵沟壑区、风沙区、高原

沟壑区、土石山区“生态经济带模式”“生态防线模式”等分区综合治理模式,并取得了显著的生态、经济和社会效益^[39-41]。

f. 形成了淤地坝坝系、梯田、植被建设成套关键技术。在黄河流域水土保持长期历史发展基础上,已经形成了由水土保持农业技术措施、水土保持工程措施、水土保持林草植被措施组合的三大措施体系,探索出的诸如“植物柔性坝”“水坠法筑坝”“水力治沙造田”“固结植生”“旱作节水农业”等多项新措施新技术,进一步丰富了水土保持措施体系。

g. 量化了水土保持贡献率。针对 20 世纪 70 年代黄河水沙开始发生变化的问题,80 年代中期水利部首先设立黄河水沙变化研究基金项目资助水沙变化及其成因研究,之后国家自然科学基金、国家科技攻关(支撑)计划、国家重点研发计划等多类国家级科技计划项目,以及相关省区的科技计划项目连续资助黄河水沙变化研究。通过几十年几代人的研究,明晰了黄河水沙变化规律、量化了水土保持等多因素对水沙变化的贡献率,为治黄决策提供了坚实的基础数据支撑,同时提出的水土保持分析法、水文分析法等定量评价水沙变化的方法,创新了水土保持效益评估技术与理论。

h. 建立了一套系统的水水土保持技术规范。通过多年理论研究和实践探索,形成了较为完善的黄河流域水土保持技术规范体系。例如,先后制订了《水土保持沟骨干工程技术规范》《水坠坝设计及施工暂行规定》《淤地坝技术规范》《水土保持工程调查与勘测标准》《水利部关于进一步加强黄土高原地区淤地坝工程安全运用管理的意见》《黄土丘陵沟壑区水土流失综合治理技术规范》《淤地坝维修养护标准》《生态清洁小流域建设技术规范》《高标准梯田建设技术规范》《沙打旺栽培技术规程》等多项国家级、省部级技术规范,不仅为黄河流域水土保持综合治理的规范化提供了技术支撑,同时也为编制适应全国范围的国家级水土保持技术规范提供了黄河流域的实践成果。

3 黄河流域水土保持高质量发展面临的科学挑战

3.1 存在的突出问题

a. 区域生态系统不稳定。部分区域的林草植被系统无论是人工修复的还是通过封禁自然恢复的,均存在着不同程度的退化现象,尤以人工林草植被系统的不稳定性问题突出。在个别流域仍然存在着年年种树、年年补栽的问题。在干旱半干旱地区退耕还林还草工程实施初期,植被恢复效果明显,但

10 余年后就会出现不同程度的退化及病虫害现象,造成植被枯萎、萌芽率降低、死亡等^[42]。在黄土高原丘陵沟壑区第 I 副区、砭砂岩区、十大孔兑等地区均存在林草植被退化的问题。

b. 现有治理措施对暴雨侵蚀阻控能力弱。随着全球气候变化,黄河流域局地暴雨或特大暴雨频发,即使在林草、淤地坝等治理相对较好的情况下,也往往造成严重的洪水泥沙灾害,现有治理措施对水土流失的阻控能力是有限的。例如:黄河流域重点治理区的无定河流域,2017 年 5 月 25 日 20 时至 26 日 8 时发生全流域 50 mm 的暴雨,其支流大理河几乎被 100 mm 的大暴雨笼罩,造成严重的土壤侵蚀,坡耕地细沟侵蚀模数多在 2 万 t/km² 左右,最大可达 4.2 万 t/km²^[43];延河流域被公认治理度较高,接近 80%,延安市全域植被覆盖度超过 80%,但在 2013 年 7 月大暴雨期间,尽管暴雨灾害较近 100 年来有所减轻,其最大含沙量仍达 456 kg/m³^[44],受灾人口达 155 万人次,发生滑塌 8 135 处,死亡 42 人,经济损失达 114 亿元;2021 年郑州市“7·20”暴雨,尽管其黄土地区流域植被覆盖度超过 80%,但是暴雨期间坡面侵蚀非常严重,林草与土体整体滑塌,造成严重的水沙灾害。

c. 水土流失治理面临“最后一公里”攻坚战。虽然 2024 年黄河流域水土保持率已接近 70%,容易治理的区域其治理度都比较高,但不容忽视的事实是在粗泥沙集中来源区,特别是砭砂岩区、十大孔兑、风蚀水蚀交错区等侵蚀十分严重、生态极为脆弱且难治理的地区,治理度仍然比较低^[45]。此外,沟道也是治理薄弱的地带,黄土高原山顶一片绿沟坡一片黄的“虚绿”现象严重。据分析,在黄河泥沙大幅减少态势下,诸如黄土丘陵沟壑区等不少区域的沟道侵蚀量仍然占总侵蚀量的 60% 左右。因此,要实现黄河减沙的稳定性,实现黄土高原植被由“绿”向“稳”的高质量转变,水土保持综合治理必须打响“最后一公里”攻坚战。

d. 水土保持与衍生产业发展协同度低。水土保持具有多元服务价值,可以形成诸如文旅、康养、林果产品等多业态的衍生产业。而从黄河流域综合治理的发展效果看,水土保持规划与措施配置仍基本停留在传统层面,没有体现水土保持的多元化服务价值,目前黄河流域衍生经济发展还不充分不均衡不协调,碎片化、短链化、初级化等问题还非常突出,在经济发展中严重缺失水土保持要素,这也直接涉及如何在我国完成土地确权制度改革后调动农民及社会参与水土保持的积极性问题,成为制约水土保持高质量发展的瓶颈。

e. 水土保持监测信息化智能化水平不适应高质量发展需求。虽然黄河流域水土保持监测网络体系已基本建成、监测技术手段日益先进、监测成果应用取得显著成效,但还存在着监测覆盖面与精度不足、监测要素单一且多为传统参数、智能化自动化水平低等问题。目前在粗泥沙来源区、水蚀风蚀交错区、沙漠入河区等区域的监测体系还很薄弱,不少监测站点的智能化自动化仪器设备配置低,甚至有的缺乏现代化监测手段,缺乏对侵蚀产沙过程及动力系统、水土保持措施固碳机理与作用、坡沟系统水文泥沙连通性及河道输沙效应动力边界等参数的监测,监测要素少、精度低的问题十分突出,对水土流失及水土保持工程风险的预警预报能力不足,对水土保持决策的支持力度薄弱,难以满足水利部提出的智慧水利体系建设的目标要求。

3.2 科学挑战

a. 水土保持高质量发展的科学内涵及学科拓展。高质量发展的核心内涵就是发展理念的根本转变,水土保持高质量发展也需要更新观念、创新思路、扩展价值,以实现水土流失有效稳定控制、生态环境根本改善、水沙关系协调发展、水土保持功能与多元服务价值协同提升的目标。为此,黄河流域水土保持高质量发展的内涵应包括治理实践、管理、监测、效益 4 个方面:①在治理实践方面,改变工程学意义上的以小流域为单元的综合治理,转向注重生态学意义上的以小流域为单元的水土保持景观格局精细化构建;把大规模面上治理阶段转到高风险低治理区集中治理阶段,已治理区转入提质增效阶段;由单一的水土资源保持转向水土保持与生态经济协同发展。②在管理方面,理念上换轨、手段上智能。把为“管”而“管”,改为以“效”促“管”,即通过水土保持多元服务价值实现,让农牧民在水土保持综合治理中得好处、得效益,提高其参与水土保持的自觉性,促进管理;创新管理体制机制,建立水土保持工程建设占地补偿制度,完善水土保持工程招投标机制;进一步完善适应高质量发展的水土保持法律法规体系,切实确立水土保持监管在监察、执法、司法及诉讼链中的法律地位。③在监测方面,把黄河流域水土保持监测体系建设作为国家治理重点工程的重要组成部分,制定黄河流域水土保持监测工程建设规划,构建融合空间技术、信息技术和智能分析与预警决策的现代化水土保持监测体系,为水土流失治理提供更为科学、多元、精细的数据支撑和决策依据。④在效益方面,更加注重生态、社会、经济效益的协同实现,树立水土保持与衍生产业统一规划、协同发展、系统布局的观念,不仅注重提升土地生产

力、改善生态环境,还应注重水土保持在带动、促进和创建衍生产业中的地位与作用,探索“水土保持+衍生产业”综合治理模式,塑造黄河流域水土保持在高质量发展中的独特新地位。水土保持的高质量发展必然要求进一步拓展其学科内涵。因此,需要在传统的学科体系下,增加土壤侵蚀动力学、水土保持生态学、水土保持水文学、水土保持经济学、水土保持产业技术、水土保持法规学等学科方向,进一步突出水土保持学科的交叉特性,形成“理-工-农-林-草-经”交叉体系;从传统的目标范畴向“综合治理、多元服务”转型,强调生态治理-衍生产业协同发展。

b. 水土保持多元服务价值的科学评估。水土保持的多元服务价值不仅是对其功能的定义问题,而且是水土保持实践的客观产出,其外溢效益十分显著。要实现水土保持高质量发展,需要科学评估其多元服务价值,获取更广泛的社会认可度及参与度。水土保持服务价值不仅包括防治水土流失、服务农业,而且具有多元服务价值链,包括固碳与碳汇、调控与改善水沙关系、平衡与优化生物群落、提供与营造康养环境、助力文旅开发、驱动衍生产业经济发展等。因此,需要研究水土保持多元效益的评价理论与方法,建立水土保持价值链评价指标体系,构建水土保持多元服务价值实现的理论架构和实现路径,建立水土保持价值链示范样板与运维机制。尤其是关于水土保持碳汇功能及作用逐步引起人们的高度关注,成为评价水土保持服务价值的新课题,迫切需要重点研究水土保持固碳增汇形成机理,揭示水土保持植被-工程-土壤碳汇功能提升机制,研发水土保持固碳减排增汇协同关键技术,探索黄河流域水土保持碳汇减排交易机制和完善包括碳汇要素在内的生态补偿机制,提出水土保持碳汇监测与试验技术,建立水土保持碳汇的价值实现模式。

c. 制定基于高质量发展的黄河流域水土保持空间区划。习近平总书记《在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话》中指出,“水土保持不是简单挖几个坑种几棵树,黄土高原降雨量少,能不能种树,种什么树合适,要搞清楚再干。有条件的地方要大力建设旱作梯田、淤地坝等,有的地方则要以自然恢复为主……。”从方法论上提出了水土保持区划的重要性。2012 年水利部印发了《全国水土保持区划(试行)》,按照总体格局区、区域协调区、基本功能区把全国治理区划分为 8 个一级区、40 个二级区和 115 个三级区,提出了不同分区的治理目标、治理重点和主要措施等,但相对来说仍属于宏观目标指导性的。为实现黄河流域水土保持高质量发展,还需要针对全流域作进一步科学区划、精准施

策。黄河流域自然、社会、经济具有极大的空间差异性,不仅上中下游差异性大,而且同一河段的不同区域也表现出不同的水土流失规律和生态系统的多样性,必须采取分区治理、差异化治理的路径。为此,需要应用水土保持学、生态学原理和方法,遵循黄河流域不同自然区域的相似性和差异性规律,以生态系统功能修复与稳定性维持作为水土保持的基点,注重水土保持多元服务价值体现,从全流域整体性、系统性划分水土保持的区域单元,确立不同区域水土保持主导功能,分区域确定不同的治理目标和保护治理途径以及措施科学配置,保障黄河流域生态系统的长期稳定性和自然资源的永续利用。

d. 水土保持区域景观格局优化配置理论与关键技术。针对黄河流域区域存在林草植被系统不稳定和不同程度退化的问题,需要以景观格局的科学视角,优化配置具有景观格局背景的水土保持措施体系及空间布局。为此,需要研究黄河流域景观要素构型空间异质变化规律,剖析黄河流域景观格局与生态过程耦合机制及其演变过程,分析景观格局的生态效应,揭示水土保持在景观格局演变过程中的作用机制,研究人工植被群落演替规律、多样性形成机制及与水土保持因子关系,分析小流域空间异质性、生态学过程和尺度的关系,搞清水土保持对植被群落结构的调控作用,研发具有生态学意义的水土保持措施类型、植被结构、群落多样性和空间配置技术,提出基于景观格局效应的水土保持措施精细化空间配置模式,解决由“绿”到“稳”的高品质发展问题。

e. 水土保持措施阻控暴雨侵蚀能力提升技术。针对目前黄河流域水土保持措施对暴雨洪水侵蚀阻控能力低的问题,重点研究黄土丘陵沟壑区植被恢复与根系固土抗蚀的生物学关系及力学机制,辨析暴雨驱动下坡面植被根系层重力侵蚀发生的动力过程及其形成机理,分析水土保持单一措施、多类措施组合对暴雨侵蚀阻控机制的差异及措施体系的协同效应,揭示水土保持措施体系对流域水文泥沙连通性的影响作用与形成机制,研发基于提升阻控暴雨侵蚀能力的水土保持措施体系优化配置理论与技术,提出坡面根系重力侵蚀治理的措施体系配置与技术途径,研发水土保持新技术新措施,提升对暴雨洪水侵蚀的调控作用。

f. 基于生态安全和资源开发的水土保持-衍生经济协同长链发展关键技术。生态治理-衍生经济协同发展已经成为国际研究热点,也是黄河国家重大战略的需求。为此,针对黄河流域水土保持-衍生经济协同发展碎片化短链化和水土保持要素严重缺

失的问题,开展黄河流域特色产业专项调查摸底,研究基于水量平衡及土壤侵蚀环境制约的生态承载力维持提升机制与阈值,研发基于生态友好型土地资源开发保护、水资源高效利用和诸如灌草平茬、林果、景观等水土保持衍生产品开发关键技术,探索区域经济发展和生态安全的空间科学布局与水土资源可持续开发利用结构模式,提出水土保持-衍生经济协同发展机制与实现路径,建立集成科学技术范式体系、生态衍生产业体系、监测监督评估体系、生态管理创新体系、模式示范应用体系的新时期中国自主的黄土高原现代化水土保持高质量发展样板^[15]。

4 结 语

黄河流域水土保持漫长的发展历史,为我国水土保持发展奠定了坚实的基础,在理论、实践方面取得的不少成果对我国乃至世界水土保持发展起到了引领作用。黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的实施,必将极大地推动黄河流域水土保持理论、实践进入发展的重要转型时期,同时也必将推动水土保持学科的创新与发展,水土保持高质量发展成为新时期国家战略需求的必然。黄河流域水土保持高质量发展的科学内涵、驱动机制、实现路径引起了生态学、水土保持学、水利工程学、经济学、地理经济学和产业经济学等多学科多领域的关注,是当前研究的重点和热点问题之一。关于黄河流域水土保持的诸多课题的研究,不仅将极大地推动黄河流域乃至我国水土保持治理实践的重大突破,而且也必将促进水土保持学科理论的完善与丰富,可望在水土保持领域的前瞻性、理论性的科学问题,以及在具有先进性、创造性、实用性的关键技术等方面取得进展,水土保持学科体系将得到进一步完善,进而对行业科技进步起到新的推动作用。

参考文献:

[1] 黄河水利委员会,黄河中游治理局. 黄河水土保持志 [M]. 郑州:河南人民出版社,1993:1,81.

[2] 倪晋仁,李秀霞,薛安,等. 泥沙灾害链及其在灾害过程规律研究中的应用[J]. 自然灾害学报,2004,13(5):1-9. (NI Jinren,LI Xiuxia,XUE An,et al. Sediment disaster chain and its applications to interpretation of disaster process characteristics related to sediment transport [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13 (5): 1-9. (in Chinese))

[3] 孟庆枚. 黄土高原水土保持:黄河水利科学技术丛书 [M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.

[4] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.

[5] 周魁一. 中国科学技术史(水利卷)[M]. 北京:科学出

- 版社,2022:136-139.
- [6] 郭忠升.新时期水土保持高质量可持续发展[C]//中国环境科学学会.中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集(二).天津:中国环境科学学会,2021:1193-1202.
- [7] 胡春宏,张晓明.山水林田湖草沙系统治理与水土保持高质量发展[J].水土保持通报,2024,44(4):441-447. (HU Chunhong, ZHANG Xiaoming. Relationship of systematic management of mountains, waters, forests, farmlands, lakes, grasses and sands with high-quality development of soil and water conservation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4):441-447. (in Chinese))
- [8] 蒲朝勇.推动新阶段水土保持高质量发展的思路与举措[J].中国水利,2022(7):6-8. (PU Chaoyong. Promoting high-quality development of soil and water conservation in the new stage: strategies and measures [J]. China Water Resources, 2022(7):6-8. (in Chinese))
- [9] 邓蕾,王凯博,汪晓珍,等.黄河流域-黄土高原水土保持与高质量发展:成效、问题与对策[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(1):1-7. (DENG Lei, WANG Kaibo, WANG Xiaozhen, et al. Soil and water conservation and high quality development of the Loess Plateau in the Yellow River Basin: effects, problems and countermeasures[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2024, 52(1):1-7. (in Chinese))
- [10] 张军政,翟羽佳.对黄河流域水土保持高质量发展的思考[J].中国水土保持,2020(6):5-8. (ZHANG Junzheng, ZHAI Yujia. Thoughts on the high-quality development of soil and water conservation in the Yellow River Basin[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(6):5-8. (in Chinese))
- [11] 苏佳园,王白春,王飞,等.论水土保持在黄河流域生态保护和高质量发展战略中的地位和作用[J].中国水土保持,2021(11):1-3. (SU Jiayuan, WANG Baichun, WANG Fei, et al. On the position and role of soil and water conservation in the ecological protection and high-quality development strategy of the Yellow River Basin [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(11):1-3. (in Chinese))
- [12] 蒲朝勇.奋力推进黄河流域水土保持高质量发展[J].中国水利,2021(18):4-5. (PU Chaoyong. Strive to promote high-quality development for soil and water conservation in the Yellow River Basin[J]. China Water Resources, 2021(18):4-5. (in Chinese))
- [13] 李智广.试论黄河流域水土保持高质量发展目标与途径[J].中国水利,2020(10):7-10. (LI Zhiguang. Discussion on the goal and approach of high quality development of soil and water conservation in the Yellow River Basin [J]. China Water Resources, 2020(10):7-10. (in Chinese))
- [14] 乔殿新.水土保持高质量发展思考[J].中国水利,2020(1):18-21. (QIAO Dianxin. High-quality development for soil and water conservation [J]. China Water Resources, 2020(1):18-21. (in Chinese))
- [15] 姚文艺.新时代黄河流域水土保持发展机遇与科学定位[J].人民黄河,2019,41(12):1-7. (YAO Wenyi. Development opportunity and scientific positioning of soil and water conservation of the Yellow River in the new era [J]. Yellow River, 2019, 41(12):1-7. (in Chinese))
- [16] 王飞,山仑,戈文艳,等.黄土高原水土保持高质量发展研究重点[J].中国水土保持,2022(9):61-64. (WANG Fei, SHAN Lun, GE Wenyan, et al. Research focus on high-quality development of soil and water conservation in the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(9):61-64. (in Chinese))
- [17] 水利部黄河水利委员会.黄河流域综合规划:2012—2030年[M].郑州:黄河水利出版社,2013:9-10.
- [18] 中国水土保持学会水土保持规划设计专业委员会,水利部水利水电规划设计总院.水土保持设计手册:专业基础卷[M].北京:中国水利水电出版社,2018:3.
- [19] 李凤,吴长文.水土保持学的发展[J].南昌水专学报,1995,14(1):69-74. (LI Feng, WU Changwen. The development of soil and water conservation science [J]. Journal of Nanchang Hydraulic & Water Power Engineering College, 1995, 14(1):69-74. (in Chinese))
- [20] 黄河水利委员会水土保持局.打坝造田促生产 拦沙调洪保安全:黄土高原淤地坝建设和安全运用70年[EB/OL]. (2019-09-25) [2025-06-30]. <http://www.swcc.org.cn/ztbd/zg70/lyst/hwgh/2019-09-25/68159.html>.
- [21] 张超,王治国,王秀茹,等.我国水土保持区划的回顾与思考[J].中国水土保持科学,2008,6(4):100-104. (ZHANG Chao, WANG Zhiguo, WANG Xiuru, et al. Review and thoughts on the regionalization of soil and water conservation in China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(4):100-104. (in Chinese))
- [22] 田济扬,李传哲,刘佳,等.新时期我国小流域综合治理思路与模式探讨[J].中国水利,2016(8):39-42. (TIAN Jiyang, LI Chuanzhe, LIU Jia, et al. Study on thought and model for small watershed comprehensive management in new period [J]. China Water Resources, 2016(8):39-42. (in Chinese))
- [23] 龚子同.追忆朱显谟:(8)朱显谟先生是我们的良师益友[EB/OL]. (2020-12-04) [2025-06-30]. <https://news.nwsuaf.edu.cn/xnxw/dab6e0e25a5748f189eaf3b1ff49d0bd.htm>.
- [24] 朱显谟.黄土高原土地资源的开发和保护[J].地理科学,1984,4(2):97-105. (ZHU Xianmo. Proper development and careful protection of land resources in the

- Loess Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 1984, 4 (2):97-105. (in Chinese))
- [25] 朱显谟. 再论黄土高原国土整治“28 字方略”[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 1 (1): 4-11. (ZHU Xianmo. The restatement on the “28-Word General Plan” for the Loess Plateau’s territory rehabilitation[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1995, 1 (1):4-11. (in Chinese))
- [26] 郭廷辅. 中国水土保持成就与展望[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17 (4): 7-10. (GUO Tingfu. Success and prospect of soil and water conservation in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997, 17(4): 7-10. (in Chinese))
- [27] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域水土保持公报 (2022 年)[M]. 郑州:水利部黄河水利委员会, 2023:19-22.
- [28] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域水土保持公报 (2024 年)[M]. 郑州:水利部黄河水利委员会, 2025:1-42.
- [29] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2024 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2025:23-36.
- [30] 顾文书. 黄河水沙变化及其影响的综合分析报告 [M]//汪岗,范昭. 黄河水沙变化·第 1 卷(上册). 郑州:黄河水利出版社, 2002:1-45.
- [31] 姚文艺,冉大川,陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测 [J]. 水科学进展, 2013, 24 (5): 607-616. (YAO Wenyi, RAN Dachuan, CHEN Jiangnan. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 607-616. (in Chinese))
- [32] 胡春宏,张晓明. 水土保持生态产品价值实现原理与路径[J]. 中国水利, 2025 (12): 8-17. (HU Chunhong, ZHANG Xiaoming. Principles and paths for realizing the value of ecological products for soil and water conservation [J]. China Water Resources, 2025 (12): 8-17. (in Chinese))
- [33] 曹文洪,张晓明,张永娥,等. 水土保持碳汇内涵与测算方法[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22 (1): 1-11. (CAO Wenhong, ZHANG Xiaoming, ZHANG Yong’e, et al. Connotation of carbon sink in soil and water conservation and its calculation method[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1): 1-11. (in Chinese))
- [34] FANG Nufang, ZENG Yi, RAN Lishan, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau [J]. Communications Earth & Environment, 2023, 4(1): 65.
- [35] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等. 侵蚀环境坡耕地改造对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28 (4): 17-21. (DAI Quanhou, LIU Guobin, XUE Sha, et al. Impacts of slope cropland rebuilding on soil labile organic matter and carbon management index in the eroded hilly loess plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(4): 17-21. (in Chinese))
- [36] 李文学. 黄河治理开发与保护 70 年效益分析[J]. 人民黄河, 2016, 38 (10): 1-6. (LI Wenxue. Benefits analysis of the Yellow River harnessment and protection in the last 70 years [J]. Yellow River, 2016, 38 (10): 1-6. (in Chinese))
- [37] 姚文艺,刘国彬. 新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J]. 水土保持通报, 2020, 40 (5): 333-340. (YAO Wenyi, LIU Guobin. Strategic goal change and development countermeasures of soil and water conservation in Yellow River Basin in new period [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (5): 333-340. (in Chinese))
- [38] 朱莉莉,祁宇麟,许林军,等. 黄土高原小流域“水土保持+特色产业”综合体治理模式研究[J]. 中国水土保持, 2024(7): 21-24. (ZHU Lili, QI Yulin, XU Linjun, et al. The comprehensive management model of soil and water conservation and characteristic industries in small watersheds of the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(7): 21-24. (in Chinese))
- [39] 姚文艺,李占斌,康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京:科学出版社, 2005:89-128.
- [40] 许炯心,姚文艺,韩鹏,等. 基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程[M]. 北京:科学出版社, 2009: 198-262.
- [41] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997:122-330.
- [42] 程积民,井赵斌,金晶炜,等. 黄土高原半干旱区退化草地恢复与利用过程研究[J]. 中国科学:生命科学, 2014, 44 (3): 267-279. (CHENG Jimin, JING Zhaobin, JIN Jingwei, et al. Restoration and utilization mechanism of degraded grassland in the semi-arid region of Loess Plateau [J]. SCIENTIA SINICA Vitae, 2014, 44(3): 267-279. (in Chinese))
- [43] 刘宝元,姚文艺,刘国彬,等. 黄土高原“7. 26”特大暴雨洪水与水土保持效益综合考察报告[M]. 北京:科学出版社, 2020:73-187.
- [44] 姜胜利. 2013 年黄河流域延雨水情分析[J]. 东北水利水电, 2018, 36(5): 41-42. (JIANG Shengli. Analysis of rain and water regime of Yanshui in Yellow River Basin in 2013 [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2018, 36(5): 41-42. (in Chinese))
- [45] 姚文艺,焦鹏. 黄河流域水土保持综合治理空间均衡性分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37 (1): 1-7. (YAO Wenyi, JIAO Peng. Spatial equilibrium analysis of comprehensive control of soil and water conservation in the Yellow River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-12 编辑:俞云利)