

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2025.04.011

黄河泥沙资源化利用的现状、挑战与展望

鲍宪远¹, 何进宇^{1,2,3}, 王忠静^{1,4}, 张登毓¹, 崔烜玮¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 4. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084)

摘要: 泥沙资源化利用作为一种综合考虑经济效益和生态效益的处理方式, 其研究现状、挑战和发展前景缺乏系统分析。通过对黄河泥沙来源、特点和利用现状的研究成果进行广泛梳理, 分析了黄河泥沙的形成过程和理化特性, 归纳整理了泥沙资源化利用现状, 基于现状提出并探讨了当前存在的挑战, 提出了相应的建议。虽然目前形成了较为成熟的泥沙资源化利用方向, 但在技术能力和环境保护等方面仍存在不足。当前存在的挑战有经济效益较低、生态环境保护要求、技术创新能力不足和社会认知度参与度低等。提出的策略包括探索资源化利用新途径、建立完善的环保监测评估体系、加强宣传教育、创新公众参与机制等。

关键词: 黄河流域; 泥沙治理; 资源化利用; 研究现状; 挑战与展望

中图分类号: TV143 **文献标识码:** B **文章编号:** 0468-155X(2025)04-0073-08

1 前言

泥沙是河流中重要的水文要素之一, 兼具灾害性和资源性的双重属性。泥沙的灾害性是世界性的难题, 全球年输沙量高达 200 亿 t^[1], 世界各国因泥沙淤积引起的洪涝灾害加剧和生态环境恶化愈发严重。如何将泥沙的灾害属性转化为资源属性已成为研究的主要课题^[2]。黄河是中国第二大河流, 也是世界上泥沙含量较高的河流之一, 泥沙问题在黄河面临的众多生态环境问题中尤显突出。大量泥沙流入黄河, 导致了众多社会和环境问题^[3]。黄河泥沙资源的合理利用变得至关重要, 已成为当前解决黄河流域生态环境问题、实现可持续发展的重要途径之一。

泥沙资源化利用是探索对泥沙作为原料的利用或循环利用, 作为一种极具潜力的泥沙治理方案^[4], 具有很大的经济效益和生态效益^[5]。近年来, 许多学者对不同领域的泥沙资源化利用进行了研究。河流泥沙最具性价比的利用方法是将其用于农业, 泥沙及相关养分的循环利用可为土壤养分流失问题提供可持续的解决方案^[6]。研究表明, 利用河流泥沙生产建筑工业材料也是合理的, 并能带来较可观的经济效益^[7]。生态环境修复也是泥沙资源化利用的方向之一, 将河流淤积泥沙进行无害化处理后回归自然环境, 促进生态系统的物质循环^[8]。

经济社会发展及生态利用对黄河泥沙资源的需求量显著增加, 其开发利用展现出极为广阔的前景^[9]。在新时代泥沙量大幅度减少的大环境下, 进一步开展黄河泥沙资源化研究的总结是非常重要的。基于前述考虑, 本文旨在对黄河泥沙资源化利用的研究进行梳理, 重点关注利用现状和挑战。本文将重点探讨以下问题: (1) 黄河泥沙是怎样形成的? 组成成分和理化特性分别是什么? (2) 当前黄河泥沙资源化利用有哪些方向? (3) 未来黄河泥沙资源化利用存在哪些挑战? (4) 针对存在的挑战, 我们可以采取哪些措施?

收稿日期: 2024-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243601); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

作者简介: 鲍宪远(2001—), 男, 安徽寿县人, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: baioxianyuan@126.com

通信作者: 何进宇(1986—), 男, 宁夏银川人, 副教授, 博士, 主要从事水生态与水土资源调控方面研究。

E-mail: hejinyu2017@163.com

2 黄河泥沙的来源和特点

2.1 黄河泥沙的形成过程

黄河泥沙的形成是一个漫长而复杂的过程。河道侵蚀是泥沙的一个重要来源^[10]。黄河流域地理环境特殊,存在大量的风力和水力侵蚀现象^[11]。黄河上游由于地质构造活动、气候因素以及河流的长期侵蚀作用,岩石经历了复杂的物理和化学风化过程。这些风化作用使得岩石逐渐破碎,形成砂石。黄河沿途经过巨大的峡谷,“峡谷效应”使得水流加快,加上黄河上游海拔落差 3 496 m,平均坡度 0.10%^[12],巨大的海拔高差使得水势梯度较大,水流较急。强大的水流携带这些砂石,进一步加速了河床的侵蚀过程。黄土高原是黄河流域的重要组成部分,该区域水土流失极为严重^[13]。强烈的水土流失使黄土高原 70% 以上的地区变成了丘陵和沟壑^[14],并且该地区常年多风,土壤易被风吹走形成风沙。每年有大量的风沙在风力作用下进入黄河干、支流并沉积在河道中^[15],最终形成了黄河泥沙。黄河下游地势平缓,水量不足,导致中上游运输的泥沙大量沉积,河床不断抬高^[16],形成地上“悬河”。

黄河流域的气候条件也对黄河泥沙的形成起到了重要的影响作用^[17]。黄河流域属于半湿润气候和干旱气候过渡区,降雨量如图 1 所示,流域内雨水分布不均匀,多集中在夏季^[18]。由于气候干燥,水分难以聚集,植被相对较少,青藏高原融化的雪水持续不断地冲刷地表土壤,最终汇入黄河形成泥沙。随着经济社会的发展和人口密度的增加,黄河的泥沙变化受到环境因素和人类活动的综合影响^[19]。人类为了满足日益增长的粮食需求,开始将黄土高原上覆盖着森林、灌木和草地的大片区域改造成耕地,造成了严重的水土流失。

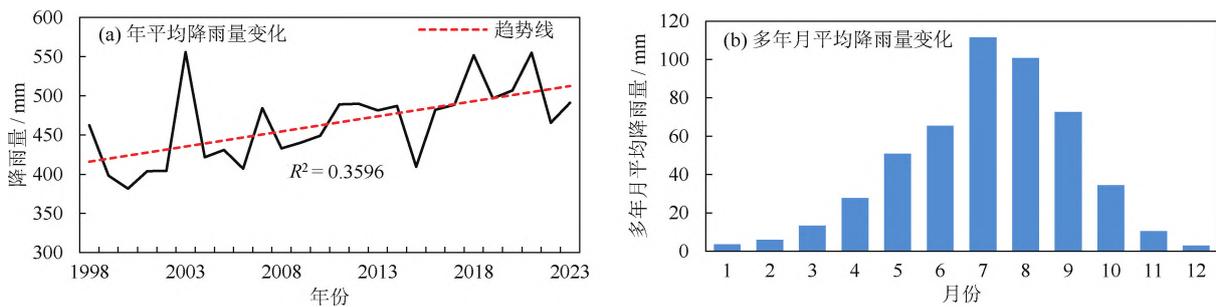


图 1 黄河流域降水量变化及年内分配

Fig. 1 Variations and annual allocation of precipitation in the Yellow River Basin

2.2 黄河泥沙的组成成分及理化特性

确定黄河泥沙的成分以及物理化学特性,是确定泥沙资源化利用领域的重要一步^[20]。黄河泥沙中含有大量的矿物成分。由于流经区域的差别,黄河泥沙的矿物组成在不同地区有所不同。黄河上游多高山峡谷,泥沙中富含来自青藏高原及周边山地的硅酸盐矿物^[21]。黄河近 90% 的泥沙量来自中游的黄土高原^[22],因此黄河中下游泥沙继承了黄土的特征,以丰富的直闪石为主,并含有高浓度的 Ca、Na 和 Sr^[23]。泥沙颗粒粗细不同,其成分也不同。粗颗粒主要由石英、方解石和长石组成,而细颗粒由黏土矿物(主要是蒙脱石、高岭石和伊利石)组成^[24]。在黄河穿越沙漠地区的河道中,泥沙主要矿物成分是石英、长石和云母^[25]。此外,黄河泥沙中还含有一定量的稀土元素^[26]。

黄河泥沙的矿物组成不同很大程度上导致其理化性质差异。黄河泥沙理化性质是多样的,在物理上表现为密度大、粒径均匀等特点。黄河泥沙颗粒的粒径分布变化较大,其中粘土和极细粉砂是主要组分,约占 40%^[27]。黄河泥沙理化性质的多样性不仅体现在泥沙的粒度分布、密度和含水量上,还深刻影响着泥沙的吸附能力、沉降速率以及化学反应活性。富含硅酸盐矿物的泥沙通常具有较好的吸附性,能够吸附水中的重金属离子和有机污染物^[28],对水质有一定的净化作用。而富含黏土矿物的泥沙则具有较高的比表面积和保水能力,有利于土壤的形成和保持^[29],对下游农业灌溉和生态环境具有重要影响。黄河泥沙的化学性质则表现为弱碱性,pH 值在 7~9 之间,且有重要的水质传输和环境效应^[30]。此外,

与世界其他主要河流对比表明,黄河泥沙的溶解固体含量较高^[31]。

3 黄河泥沙资源化利用问题的起源

3.1 早期黄河治理与泥沙利用的探索

早期泥沙利用的探索可以追溯到对泥沙资源属性的重新认识以及资源化管理理念的发展。泥沙淤积往往被视为河流治理中的不利因素,但随着对泥沙资源价值的深入研究和理解,人们开始认识到泥沙其实是一种潜在的资源^[32]。江恩慧等近年来开展的相关研究,就强调了黄河泥沙的资源禀赋,并强调了“黄河泥沙资源利用”的概念^[33]。这种观点认为,通过科学的方法和技术手段,可以将泥沙转化为有益的资源,实现“以河治河”的目的,并与挖河疏浚、畸形河势治理和环境保护相结合,实现一举多赢的效果。此外,循环经济理念的推广和实践,泥沙作为一种可再生的自然资源,其利用价值也得到了更加广泛的认可。随着流域泥沙资源化研究的深入,学者们还探讨了流域泥沙资源优化配置,建立了流域泥沙优化配置的模型^[34-35]。

3.2 生态修复与可持续发展的需求

最新监测成果显示,我国水土流失面积已经下降到 262.76 万 km²,较 2018 年有所减少^[36]。但我国仍然是世界上水土流失较为严重的国家之一,水土流失面广,对生态环境造成了严重威胁。水土流失加剧生态环境恶化,而生态环境的恶化又会反过来加剧水土流失。泥沙资源化利用在生态修复中扮演着重要的角色,其主要是通过科学的方法和技术手段将废弃的泥沙转化为有价值的资源并用于生态环境的改善和修复,可以实现资源的再利用、减少资源的消耗和浪费、改善土壤质量以及促进循环经济的发展等多重目标。生态修复和可持续发展的需求促进了泥沙资源化利用的发展。

3.3 科技进步对泥沙资源化利用的推动

泥沙分离技术、资源化利用技术和工艺等新技术的出现,提高了泥沙的利用效率,降低了处理成本,为泥沙资源化利用提供了强大的技术支撑,推动泥沙资源化利用的发展。科技进步推动新技术和新工艺在泥沙资源化利用领域的应用,扩大其使用范围,提高泥沙资源的综合利用率,实现了泥沙资源的最大化利用。一些环保技术和设备的发明,减少了泥沙处理过程中的污染排放,降低泥沙处理对环境的负面影响,解决了泥沙资源化利用过程中的环境问题,实现资源的可持续利用和环境的可持续保护。

4 黄河泥沙资源化利用现状

4.1 农业领域

前人研究普遍认为,黄河下游引黄清淤泥沙较细,在农业领域一般无法利用,泥沙的弊大于利。然而近年来的一些研究表明,黄河泥沙资源在农业领域存在一定的应用空间,特别是在改良盐碱地方面。盐碱地是指土壤中含有过多盐分的土地^[37],土壤盐碱化会导致土地失去肥力和抗旱特性,严重制约农业的发展^[38]。黄河中上游地区可以引黄淤灌沉积一定厚度的黄河泥沙,形成新的土层,填高地面并淋洗盐分^[39],下游地区可以通过提高土壤含水率有效溶解和淋洗土地中的盐分^[40],从而降低土壤中的盐度,让盐土逐渐恢复肥沃。除应用于改良盐碱地之外,黄河泥沙还可用于土地整治与湿地塑造。黄河泥沙中含有丰富的有机质,把含有黄河泥沙的水用于灌溉可使土壤有机碳储量大量增加^[41],同时可以有效地促进浮游植物和水生动植物的生长,提高土壤肥力^[42]。研究表明,黄河泥沙能够显著增加土壤容重,降低土壤孔隙度和 pH 值,促进农业氮循环,增加土壤导电率^[43]。

4.2 建筑工业材料领域

黄河泥沙作为一种以矿物质为主的物质,具有较高的利用价值^[44]。黄河中上游粗泥沙颗粒中含有大量黏土、砂石等矿物成分,可以用来制备砖块、砂浆、混凝土等建筑材料。黄河泥沙具有粒度均匀、固结性强的特点^[45],可以用于制作各类砖块。水化动力学表明,黄河泥沙能大大加快水合过程,显著加速水泥水化过程^[46]。利用黄河泥沙制作的砖块具有质量稳定、强度高、耐久性好等优点,被广泛应用于建筑工程^[47]中。砂浆是建筑工程中常用的黏结剂,黄河泥沙中的沙子质地坚硬,可以提供良好的黏结层,

使砂浆具有较好的黏结强度和耐久性,满足建筑工程的要求^[48]。混凝土是建筑工程中最常用的材料之一,黄河泥沙中的石英砂和细颗粒物可以作为混凝土的主要骨料^[49]。利用黄河泥沙制备的混凝土具有韧性好、强度高、耐久性强等优点,广泛应用于房屋建筑、桥梁、水利工程等领域。此外,采用全结晶工艺将黄河泥沙经过熔融、退火和烧制得到微晶玻璃^[50]。

4.3 生态环境领域

黄河泥沙不仅为沿岸土地提供了丰富的养分,还对生态环境的修复起到了积极的作用。黄河泥沙能够有效地修复受损的生态环境,促进生态保护和可持续发展。黄河泥沙富含多种营养成分,通过合理利用泥沙,可以促进植物的生长^[51]。这对于恢复和保护生态环境具有重要意义,尤其是在一些生态脆弱区。湿地是生态环境的重要组成部分,黄河的泥沙能够为湿地的修复提供必要的水源和养分,保障湿地的恢复和生态的长远发展^[52]。科学合理利用黄河泥沙进行填土复垦^[53],将原生底土与黄河泥沙分层组合,可以构建出具有促进农作物生长的土壤^[54],不仅增加了耕地面积,还能起到固沙保肥的作用,实现耕地的可持续利用。研究表明,黄河泥沙在修复抗生素污染水体方面表现出显著的可用性和经济可行性,尤其适宜于处理抗生素生产企业的废水^[55]。进一步实验证实,生物炭改良后的黄河泥沙能显著提高植被性能,为干旱和半干旱地区的矿山生态恢复提供了一种创新的种植土解决方案^[56]。

5 黄河泥沙资源化利用面临的挑战

5.1 资源化利用效率较低

黄河泥沙成分复杂,含有大量的泥质和杂质^[57],这使得其直接利用的技术难度较大。尽管已经有一些技术如改良土壤、建筑材料制造等被应用于黄河泥沙的资源化利用^[58],但这些技术的效率和范围仍然有限,不能满足大规模、高效利用的需求。经济效益相对较低也是影响利用效率的一个重要因素。大部分黄河泥沙被用作堤防加固、河道治理等工程,这些工程虽然具有一定的社会价值,但其经济效益并不显著,难以吸引更多的资金和技术投入。市场对黄河泥沙资源的需求相对较低,也限制了其利用效率的提升。黄河泥沙主要用于一些传统的工程领域,如建筑、堤防等,而在新型材料、新能源等领域的应用较少,这使得黄河泥沙的市场需求相对较小,难以形成产业化发展。

5.2 环境风险严峻

黄河泥沙资源化利用过程中所带来的环境问题不容忽视。黄河部分泥沙中含有重金属、有毒化学物质等污染物^[59],在资源化利用过程中,如果这些污染物未经妥善处理而进入土壤或水体,可能会对土壤和水质造成污染,进而对生态环境和人体健康产生威胁。黄河泥沙资源化利用可能会改变原有的生态环境,如湿地、滩涂等,破坏生态平衡。这种变化可能会破坏动植物的栖息地,影响生物多样性和生态平衡。黄河泥沙在用于矿坑填埋或建设工程项目,可能会改变原有地质结构,引发地质灾害,如地基沉降、滑坡等。此外,气候变化对黄河水资源的影响日益加剧,进一步增加了泥沙资源化利用的风险。

5.3 技术创新能力不足

泥沙资源化利用需要大量的资金投入,以支持新技术、新工艺的研发和试验。然而,目前技术研发投入相对较少,导致创新进展缓慢,难以满足实际应用的需求。在黄河泥沙资源化利用领域,技术转化机制不够顺畅。一方面,科研成果与实际应用的结合不够紧密,许多成果无法有效转化为应用技术;另一方面,技术转移和扩散的渠道不畅,限制了技术创新的传播和应用。由于缺乏先进技术的支持,黄河泥沙资源化利用的效率和效益难以提高,限制了其产业化发展和市场竞争力。技术创新能力不足也制约了黄河泥沙资源化利用在环保、生态、经济等方面的综合效益的发挥。

5.4 社会认知度和参与度低

泥沙资源化利用面临的社会认知度和参与度低等问题,也是一个需要关注的重要挑战。由于缺乏对黄河泥沙资源化利用的广泛宣传和教育,公众对其了解有限,往往只关注其作为河流污染和自然灾害的负面形象,而忽视了其潜在的资源价值。在一些地区,受传统观念的影响,人们可能认为黄河泥沙是“废物”或“污染源”,对其资源化利用持怀疑或抵触态度。黄河泥沙资源化利用的公众参与机制尚不完

善,公众缺乏参与决策、监督评估等环节的渠道和机会,从而降低了其参与度。

6 讨论与展望

黄河泥沙资源化利用面临多重挑战,为了推动资源化利用的持续发展,需要重视以下三个方面:

(1)探索资源化利用新途径。尝试利用深度学习、图像识别等人工智能新技术开发黄河泥沙智能分类系统,实现高效、精准的泥沙分类,为不同用途提供合适的原材料。利用纳米技术、生物技术等现代科技手段,对黄河泥沙进行改性处理,提高其物理性能,开发出适用于不同建筑需求的新型建材,推动绿色建筑材料产业发展,降低能源消耗和碳排放,为“双碳”计划做贡献。研究表明,黄河泥沙中有机质含量一般在 0.43%~0.92%之间^[60],尽管含量较低,但黄河每年携带的泥沙量巨大,其有机质总量仍具有开发价值。因此可以探索利用黄河泥沙中的有机物质作为生物质能的原料,通过生物质发酵、气化等技术,将其转化为生物质气、生物质油等清洁能源;利用黄河泥沙中的有机物质进行沼气发酵用于发电,实现清洁能源的利用,改善生态环境。在资源化利用过程中,产生的废弃物可以进一步利用,如通过堆肥、厌氧消化等技术,将其转化为有机肥料或沼气等清洁能源。

(2)建立完善的环境保护和监测评估体系。在黄河泥沙资源化利用过程中,开发使用清洁能源和环保技术的生产设备,减少污染物排放。利用大数据、人工智能等技术手段,实现泥沙资源化利用过程的智能化管理。通过实时监测和数据分析,及时发现问题并采取措施,减少环境污染。我国目前已经形成较为完善的流域水质生态补偿机制,未来可以尝试探索推广至陆地生态系统,对于因资源化利用而对生态环境造成破坏的地区,建立生态补偿机制。为加强黄河流域生态环境保护,严格执行《黄河保护法》,加大对违法行为的处罚力度。加大对黄河泥沙资源化利用过程中环境问题的监测力度,建立完善的监测网络,及时发现并解决环境问题。

(3)加强宣传教育,创新公众参与机制。针对社会认知度和参与度低的问题,未来需要侧重于提高公众对黄河泥沙资源化利用的认识,激发参与热情,并构建一个更广泛的社会支持体系。加强科普宣传和教育,通过组织科普讲座、展览和实地参观活动,让公众了解黄河泥沙资源化利用的重要性、可行性和潜力。创新公众参与机制,让公众参与讨论、提出意见,组织公益活动让公众亲身体验,增强公众的参与感和归属感。政府应出台相关政策,对参与黄河泥沙资源化利用的企业、机构和个人给予税收优惠、资金扶持等激励措施,以强化政策引导和激励。构建社会支持体系,可以成立相关的行业协会、培养专业人才等,为黄河泥沙资源化利用行业提供全方位的支持和服务。

7 结论

通过系统梳理黄河泥沙形成过程、理化特性及资源化利用现状、挑战,得出以下结论:

(1)黄河泥沙形成的原因是多方面的。地理环境和地质构造是主要原因,黄河流域地理环境特殊,地质构造复杂,风化作用导致岩石破碎,形成泥沙。气候条件和人类活动是次要原因。季节性降雨量冲刷土壤岩石和流域内城市化进程等导致泥沙产生。

(2)黄河泥沙的矿物组成在不同地区有所不同。上游泥沙富含硅酸盐矿物;中下游泥沙继承了黄土高原黄土的特征,含有高浓度的 Ca、Na 和 Sr。黄河泥沙的理化性质不仅体现在泥沙的粒度分布、密度和含水量上,还深刻影响着泥沙的吸附能力、沉降速率以及化学反应活性。

(3)黄河泥沙当前主要应用与农业、建筑工业材料、生态环境等领域。泥沙含有的矿物质和微量元素可以有效地改善土壤的质地和肥力;通过对泥沙的处理和加工,可以生产出诸如砖块、混凝土等各种建筑材料;通过在受损生态环境中投放泥沙,可以修复土地退化、防止水土流失。

(4)黄河泥沙资源化利用面临利用效率低、环境风险大、技术创新能力不足、社会认知度和参与度低等挑战。应对黄河泥沙资源化利用面临的挑战,我们可以考虑探索资源化利用新途径、建立完善的环境保护和监测评估体系、加强宣传教育,创新公众参与机制三个方面。

参考文献:

- [1] HOLEMAN J N. The sediment yield of major rivers of the world[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(4): 737-747.
- [2] 王延贵,胡春宏. 流域泥沙灾害与泥沙资源性的研究[J]. *泥沙研究*, 2006(2): 65-71.
- [3] WANG L, SHAO Y, ZHAO Z, et al. Optimized utilization studies of dredging sediment for making water treatment ceramicsite based on an extreme vertex design[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38: 101603.
- [4] QI Y, DAI B, HE S, et al. Effect of chemical constituents of oxytetracycline mycelia residue and dredged sediments on characteristics of ultra-lightweight ceramicsite[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 65: 225-232.
- [5] YAN J, ZHONG S, CHEN S, et al. Study on the application of sediment-based embankment building and ultra-high-performance concrete (uhpc) preparation in the resource utilization of Yellow River sediment[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5668-5668.
- [6] KAZBERUK W, SZULC W, RUTKOWSKA B. Use bottom sediment to agriculture-effect on plant and heavy metal content in soil[J]. *Agronomy*, 2021, 11(6): 1077-1077.
- [7] ZHOU A, LI K, LIU T, et al. Recycling and optimum utilization of engineering sediment waste into low-carbon geopolymer paste for sustainable infrastructure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135549.
- [8] DONG Y, XU F, LIANG X, et al. Beneficial use of dredged sediments as a resource for mine reclamation: a case study of Lake Dianchi's management in China[J]. *Waste Management*, 2023, 167: 81-91.
- [9] 王军,姚仕明,周银军. 我国河流泥沙资源利用的发展与展望[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(1): 73-80.
- [10] TA W, JIA X, WANG H. Channel deposition induced by bank erosion in response to decreased flows in the sand-banked reach of the upstream Yellow River[J]. *Catena*, 2013, 105: 62-68.
- [11] TUO D, XU M, ZHAO Y, et al. Interactions between wind and water erosion change sediment yield and particle distribution under simulated conditions[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7: 590-598.
- [12] BRIERLEY G J, YU G A, LI Z. *Geomorphic diversity of rivers in the upper Yellow River Basin*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016: 59-77.
- [13] FU B, 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 and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [14] ZHAO G, MU X, WEN Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499-510.
- [15] DU H, XUE X, WANG T, et al. Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River, Northern China[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 193-204.
- [16] HU C, GUO Q. Modeling sediment transport in the lower Yellow River and dynamic equilibrium threshold value[J]. *Science in China Series E-Technological Sciences*, 2004, 47(S): 161-172.
- [17] ZHONG Y, WILLETT S D, PICOTTI V. Climate oscillations and erosional processes in the ordos tectonic block and implications for sediment supply to the Yellow River [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 616: 118233.
- [18] LI T, LIU F, ABELS H A, et al. Continued obliquity pacing of east Asian summer precipitation after the mid-pleistocene transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 457: 181-190.
- [19] MIAO J, ZHANG X, ZHAO Y, et al. Evolution patterns and spatial sources of water and sediment discharge over the last 70 years in the Yellow River, China: A case study in the Ningxia Reach[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155952.
- [20] COUVIDAT J, CHATAIN V, BOUZAHZAH H, et al. Characterization of how contaminants arise in a dredged marine sediment and analysis of the effect of natural weathering[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 323-332.
- [21] LI W, QIAN H, XU P, et al. Insights into mineralogical distribution mechanism and environmental significance from geochemical behavior of sediments in the Yellow River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166278.
- [22] WANG S, FU B, PIAO S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [23] QIAO S, YANG Z, PAN Y, et al. Metals in suspended sediments from the Changjiang (Yangtze River) and Huanghe (Yellow River) to the sea, and their comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(3): 539-548.

- [24] TIAN S, LI Z, WANG Z, et al. Mineral composition and particle size distribution of river sediment and loess in the middle and Lower Yellow River[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(3): 392–400.
- [25] JIA X, WANG H. Mineral compositions and sources of the riverbed sediment in the desert channel of Yellow River[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 173: 969–983.
- [26] LI W, QIAN H, XU P, et al. Tracing sediment provenance in the Yellow River, China: insights from weathering, recycling, and rock compositions[J]. *Catena*, 2023, 220: 106727.
- [27] YAO Q, WANG X, JIAN H, et al. Characterization of the particle size fraction associated with heavy metals in suspended sediments of the Yellow River [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(6): 6725–6744.
- [28] LIANG X, LIU L, JIANG Y, et al. Study of the sorption/desorption behavior of chlortetracycline on sediments in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 131958.
- [29] 唐本玲,胡振琪,王亚平.不同黄河泥沙充填复垦土壤剖面对土壤与作物中元素分布的影响[J].*煤炭学报*,2021,46(S2):915–924.
- [30] LI X, DING Y, HAN T, et al. Seasonal and interannual changes of river chemistry in the source region of Yellow River, Tibetan Plateau[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 119: 104638.
- [31] ZHANG J, HUANG W, LÉTOLLE R, et al. Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 168(1): 173–203.
- [32] 景可,李凤新.泥沙灾害类型及成因机制分析[J].*泥沙研究*,1999(1):13–18.
- [33] 江恩慧,宋万增,曹永涛,等.黄河泥沙资源利用关键技术与应用[M].北京:科学出版社,2019.
- [34] 陈绪坚,胡春宏,安毓琪,等.黄河泥沙合理配置方案研究[J].*泥沙研究*,2021,46(3):1–9.
- [35] 陈绪坚,安毓琪,王小红.黄河下游宽滩河段泥沙均衡配置方法[J].*泥沙研究*,2017,42(1):20–27.
- [36] 莫沫.中国水土保持公报(2022)[Z].北京:中华人民共和国水利部,2022.
- [37] 冯娟,丁建丽,魏雯瑜.基于雷达数据的区域土壤盐渍化监测[J].*国土资源遥感*,2019,31(1):195–203.
- [38] YIN C Y, ZHAO J, CHEN X B, et al. Desalination characteristics and efficiency of high saline soil leached by brackish water and Yellow River water[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107461.
- [39] 逢焕成,李玉义,等.西北沿黄灌区盐碱地改良与利用[M].北京:科学出版社,2014.
- [40] LIU Z, FENG S, ZHANG D, et al. Effects of precipitation, irrigation, and exploitation on groundwater geochemical evolution in the people's victory canal irrigation area, China[J]. *Applied Water Science*, 2022, 13(1): 1.
- [41] DONG L, ZHANG H, WANG L, et al. Irrigation with sediment-laden river water affects the soil texture and composition of organic matter fractions in arid and semi-arid areas of northwest China[J]. *Geoderma*, 2018, 328: 10–19.
- [42] HOU J, WANG Y. Study on the assessment of the comprehensive benefits of the utilization of sediment resources in reservoir areas[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(3): 313–323.
- [43] WANG J, YANG C, ZHANG H, et al. Improving soil properties by sand application in the saline-alkali area of the middle and lower reaches of the Yellow River, China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(12). DOI:10.3390/su15129437.
- [44] WANG S, YANG L, MA X, et al. The formation of porous light ceramsite using Yellow River sediment and its application in concrete masonry production[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01340.
- [45] JING X, LI G, ZHANG Y, et al. Experimental research on the modification of the Yellow River sediment[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2021, 45(2): 1–7.
- [46] ZHANG H, CAO M, XING Z. Early-age properties of cement paste with mechanically ground Yellow River sediment [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134635.
- [47] GUO C, KONG J, WANG Z, et al. Study on preparation and properties of sintered brick from multi-source solid waste [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 10181.
- [48] 和瑞勇.黄河泥沙资源化利用的实践[J].*科技传播*,2011(23):69–70.
- [49] YAN J, ZHONG S, CHEN S, et al. Study on the application of sediment-based embankment building and ultra-high-performance concrete (uhpc) preparation in the resource utilization of Yellow River sediment[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5668.
- [50] WANG S, LI Y, YANG Y, et al. Sediment from the Yellow River salvaging as glass-ceramics[C]//Advanced Materials Research: Vol. 734 Resources and Sustainable Development. Trans Tech Publications Ltd, 2013: 2439–2442.

- [51] HONG Z, DING S, ZHAO Q, et al. Plant trait-environment trends and their conservation implications for riparian wetlands in the Yellow River [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 144867.
- [52] LU Q, KANG L, SHAO H, et al. Investigating marsh sediment dynamics and its driving factors in Yellow River delta for wetland restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 307–313.
- [53] HU Z, WANG X, MCSWEENEY K, et al. Restoring subsided coal mined land to farmland using optimized placement of Yellow River sediment to amend soil[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(7): 1029–1042.
- [54] HU Z, SHAO F, MCSWEENEY K. Reclaiming subsided land with Yellow River sediments; Evaluation of soil-sediment columns[J]. *Geoderma*, 2017, 307: 210–219.
- [55] CUI Q, FAN M, LIU X, et al. Activation ability of Yellow River (Huanghe) suspended sediment to degrade carbamazepine pollutants in water environment using peroxymonosulfate; Performance, mechanism, and potential toxicity evaluation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 337: 126422.
- [56] LIU B, LIAO M, WAN Y, et al. Hydraulic characteristics and vegetation performance of the Yellow River sediment modified by biochar[J]. *Biogeotechnics*, 2024: 100070.
- [57] CHEN Y, FU B, ZHAO Y, et al. Sustainable development in the Yellow River basin; Issues and strategies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121223.
- [58] SINGH D K, XU M, SINGH N, et al. Perspectives on emerging pressures and their integrated impact on large river systems: An insight from the Yellow River Basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113423.
- [59] 江恩慧. 黄河泥沙研究重大科技进展及趋势[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020, 18(1): 1–9.
- [60] 陈静生, 张宇, 于涛, 等. 对黄河泥沙有机质的溶解特性和降解特性的研究——再论黄河水的 COD 值不能真实反映其污染状况[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(1): 1–15.

Research status, challenges and prospects of the utilization of Yellow River sediment resources

BAO Xian-yuan¹, HE Jin-yu^{1,2,3}, WANG Zhong-jing^{1,4}, ZHANG Deng-yu¹, CUI Xuan-wei¹

(1. School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Research Center of Technology on Water-saving Irrigation and Water Resources Regulation, Yinchuan 750021, China; 4. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Sediment resource utilization is used as a treatment method that integrates economic and ecological benefits, but there is a lack of systematic analysis of its research status, challenges and development prospects. By extensively combing the research results on the sources, characteristics and current status of resource utilization of the Yellow River sediment, the formation processes and physical and chemical characteristics of the Yellow River sediment are analyzed, the current status of resource utilization of Yellow River sediment is summarized, and based on the current status, the current challenges are proposed and explored, and corresponding suggestions are put forward to address the challenges. Although a more mature direction for the resource utilization of sediment has been formed, there are still deficiencies in many aspects, such as technical capacity and environmental protection. The current challenges include low economic efficiency, ecological and environmental protection requirements, lack of technological innovation and low social awareness and participation. The strategies proposed include exploring new ways to utilize sediment resources, establishing a sound environmental protection and monitoring and evaluation system, strengthening publicity and education, and innovating public participation mechanisms.

Key words: Yellow River Basin; sediment management; resource utilization; research status; challenges and prospects

(责任编辑:陈绪坚)