

可持续发展理论及其在流域系统中应用研究综述

郝林钢^{1,2},江恩慧^{1,2,3},屈 博^{1,2},李佳琪⁴,刘 畅^{1,2},李洁玉¹,贾 佳¹

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003; 2. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室,河南 郑州 450003; 3. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室,河南 郑州 450003; 4. 郑州大学水利与交通学院,河南 郑州 450001)

摘要:对可持续发展理论和流域可持续发展的研究历程进行了总结,阐明了流域可持续发展与流域系统科学的关系。将可持续发展理论研究划分为 4 个时期:萌芽期(1972 年以前)、成型期(1972—1987 年)、快速发展期(1987—2000 年)和深度发展期(2001 年至今),归纳了可持续发展理论逐步成熟的关键节点和对应全球共识的关键事件。基于中国知网和 Web of Science 核心合集数据库,分析了流域可持续发展的研究热点和主要研究团队,将流域可持续发展研究划分为 3 个时期:初步探索期(2000 年以前)、稳定发展期(2000—2018 年)和快速发展期(2019 年至今),总结了不同阶段的关键事件和代表观点,指出流域系统科学与流域可持续发展互为支撑,流域系统可持续运行的关键在于流域行洪输沙-生态环境-社会经济多维功能的协同发挥。

关键词:可持续发展;流域系统科学;综合治理;黄河流域

中图分类号:TV212. 4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)02 - 0173 - 11

Review of sustainable development theory and its application in watershed system//HAO Lin^{1,2}, JIANG Enhui^{1,2,3}, QU Bo^{1,2}, LI Jiaqi⁴, LIU Chang^{1,2}, LI Jieyu¹, JIA Jia¹(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, MWR, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Key Laboratory of Yellow River Basin Ecological Protection and Restoration, Zhengzhou 450003, China; 4. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This paper summarizes the processes of research in the sustainable development theory and watershed sustainable development, and clarifies the relationship between watershed sustainable development and watershed system science. The research on sustainable development theory can be divided into four periods: the embryonic period (before 1972), the molding period (1972-1987), the rapid development period (1987-2000), and the in-depth development period (2001-present). It summarizes the key events that led to the gradual maturation and global consensus on the concept of sustainable development. Based on the China National Knowledge Infrastructure and Web of Science Core Collection Databases, the research hotspots and major teams in sustainable development within watersheds are analyzed. This analysis encompasses three periods: the preliminary exploration period (before 2000), the stable development period (2000-2018), and the rapid development period (2019-present). The key events and representative viewpoints from different periods are summarized. It is pointed out that watershed system science and sustainable development support each other. The key to the sustainable operation of a watershed lies in the synergistic performance of its multidimensional functions in flood and sediment transport, ecological environment, and socio-economy.

Key words: sustainable development; watershed system science; comprehensive management; the Yellow River Basin

随着工业化、城市化的快速推进,人类活动对自然系统的干扰日益加剧,导致水资源供需矛盾、水质恶化、生态系统退化等问题日益凸显^[1-2]。流域作为地球表层系统中的基本单元,不仅是自然界水沙资源产生与利用的基本载体,也是区域生态环境良性

维持和社会经济永续发展的基础^[3]。然而,长期以来,由于对流域资源的不合理利用和过度开发,许多流域面临生态系统失衡、水资源短缺危机等严峻挑战,严重制约了区域乃至全球的人类社会发展。可持续发展理论的提出为流域治理提供了新的思路和

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243601,52409027);黄河水利科学研究院科技发展基金项目(黄科发 202402)
作者简介:郝林钢(1991—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源与可持续发展研究。E-mail:haolg. 20b@ igsnnr. ac. cn
通信作者:江恩慧(1963—),女,正高级工程师,博士,主要从事流域系统治理研究。E-mail:1067741039@ qq. com

方向,强调实现经济、社会、环境的协调统一和共同发展^[4-5]。在此背景下,对流域可持续发展的理论研究和实践探索显得尤为迫切,不仅关乎水资源可持续利用和河道行洪输沙安全,更涉及生态系统保护与恢复、社会经济高质量发展、区域之间均衡发展等多个方面^[6]。

从全球范围来看,各国政府和国际组织纷纷将可持续发展作为国家战略的重要组成部分,通过制定相关政策、法规和标准,推动行政区、流域等的综合治理与可持续发展。联合国可持续发展目标的提出,为全球可持续发展设定了明确的方向和目标,其中多个目标直接关系到流域的综合治理,也受到流域自身健康程度的影响。我国重要流域的可持续发展已成为国家战略的重要组成部分,如黄河流域生态保护和高质量发展被提升到重大国家战略的高度,一系列重大政策、规划和工程的实施为流域可持续发展提供了有力支撑^[7-9]。同时,学术界正不断探索流域与区域可持续发展的新理论、新技术和新方法,以期流域可持续发展的实践提供科学指导和技术支持^[10-11],特别是,流域系统科学已逐步成为一门研究流域可持续发展的新兴学科^[3,12]。

总体而言,可持续发展理论与实践为流域尺度的可持续发展提供了理论研究和实践的基础,流域可持续发展是实现区域乃至全球可持续发展的关键环节,而流域系统科学作为一门研究复杂流域系统的新兴分支学科,是实现流域可持续发展的重要抓手。为此,本文在系统梳理可持续发展理论研究历程中主要事件和代表观点等基础上,进一步分析了流域尺度可持续发展研究的变化趋势,并划分了可持续发展理论与流域可持续发展的研究历程,阐述

了流域系统科学理论的基本内容,以流域系统科学理论和可持续发展理论为指导,阐释了流域系统可持续运行的内涵。

1 可持续发展理论的研究历程

根据可持续发展理论的起源和发展过程,借鉴已有研究^[13-15],本文将可持续发展理论的研究划分为4个时期:萌芽期(1972年以前)、成型期(1972—1987年)、快速发展期(1987—2000年)和深度发展期(2001年至今),不同时期的标志性事件和主要观点如图1所示。

1.1 萌芽期(1972年以前)

在可持续发展理论的萌芽阶段,一系列管理思想与实践中已包含环境保护与资源合理利用的可持续性理念。具体而言,1713年“可持续性”一词首次用于剖析林业领域的可持续性问题^[13,16],标志着学术界对可持续概念的初步探索;1722年“环境限制思想”的提出拓展了可持续发展的理论边界^[14,17];受二战后经济增长理论的影响,1956年借助技术进步或发展可以维持经济持续增长观点的提出^[15,18]为可持续性与经济增长之间的关联奠定了理论基础。进入20世纪后半叶,公众对环境问题的意识显著提升。1962年 *Silent spring* 唤醒了全球对环境保护的深切关注,成为可持续发展领域公众认知的重要转折点;1970年美国颁布了《国家环境政策法案》,标志着环境保护政策的重大进步,为可持续发展的正式提出与实施奠定了法律与政策基础。这一系列历史事件与思想演进,构成了可持续发展理论从萌芽到逐步成型的关键阶段。

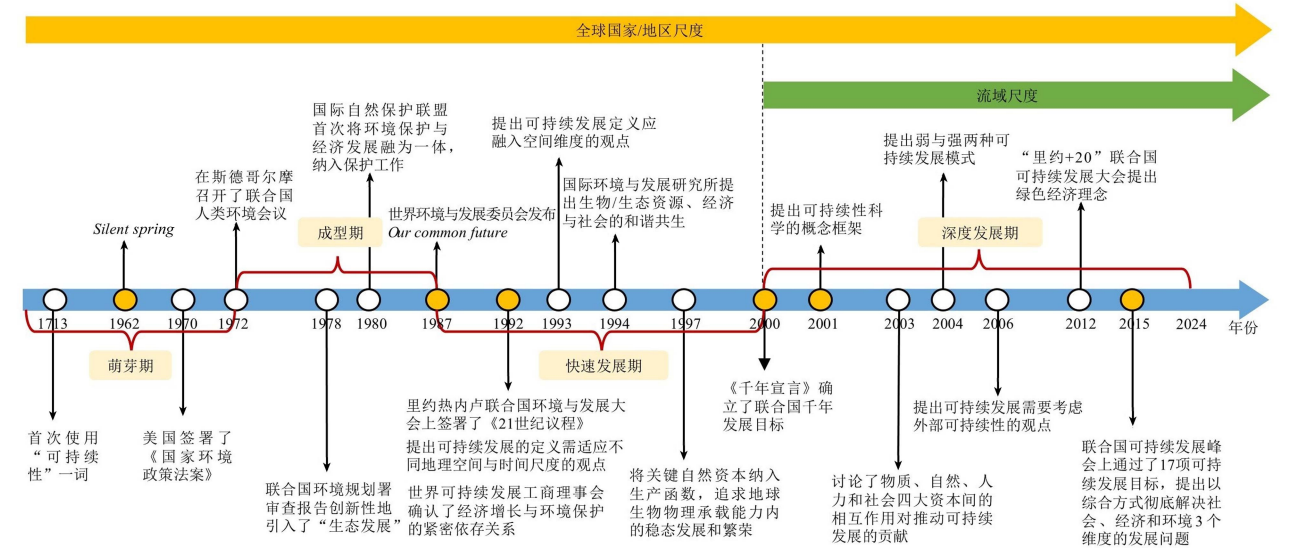


图1 可持续发展理论研究不同时期的标志性事件和主要观点

Fig.1 Milestone events and key perspectives across different periods in research of sustainable development theory

1.2 成型期(1972—1987年)

在可持续发展理论的成型阶段,国际社会与各大机构显著增强了对它的关注,并且深度参与其中。1972年联合国在斯德哥尔摩召开了人类环境会议,深刻揭示了环境问题的紧迫性与重要性,标志着全球对环境议题的共同觉醒;1978年联合国环境规划署的审查报告中,创新性地引入了“生态发展”的表述^[14],为可持续发展理论注入了新的内涵;20世纪70—80年代,能源和农业领域的可持续问题开始得到关注,学界认为随着污染的加剧和资源的过度使用,按目前的增长速度,能源生产和使用是不可持续的,对于农业领域,学界探索了实现农业可持续发展的可能路径^[15]。进入20世纪80年代,可持续发展的整合与深化趋势愈发明显。国际自然保护联盟于1980年首次尝试将环境保护与经济发展融为一体,纳入保护工作;次年,Brown^[19]指出可持续发展的核心挑战并非单纯的经济增长或能源供应的可持续性,而是社会整体的可持续性,强调了社会可持续性的重要性;1987年世界环境与发展委员会发布的 *Our common future*,成为可持续发展历史上的一座里程碑。该报告正式界定了可持续发展的定义,即“既满足当代人的需求,又不损害后代人满足其需求的能力”,为后续可持续发展的全球行动提供了坚实的理论基础。

1.3 快速发展期(1987—2000年)

1987年起,可持续发展议题激起了跨学科的广泛争议与深入探讨。经济学界、社会学界和生态学界的诸多机构与专家基于各自的专业视角与需求进行了多元化的阐释^[13-15,20]。具体而言,经济学领域侧重于环境经济学的研究,旨在合理量化并评估生态资源与服务价值;社会学领域则聚焦于社会生态学,强调人类与自然环境的和谐共生与协同演进;生态学领域的学者,特别是深层生态学的倡导者,更加强调对自然界的敬畏之心,主张以生物资源为核心,强调自然物种多样性的保护。1992年Holmberg^[21]提出,可持续发展的定义需适应不同地理空间与时间尺度,强调任何忽视跨国间公平性的发展模式均不应被视为真正的可持续发展。这些学术界的见解与争鸣,共同丰富了可持续发展理论的内涵,促进了其在全球范围内的深入实践。1992年在里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上,来自102个国家的领导人共同签署了《21世纪议程》,彰显了可持续发展作为全人类共同追求的愿景;同年,由跨国公司首席执行官领导的全球联盟——世界可持续发展工商理事会从商业战略的高度达成共识,确认了经济增长与环境保护的紧密依存关系,强调不应以牺牲

环境为代价来满足当前及未来人类的基本需求;次年,基于对自然认知的深化,Niu等^[22]提出可持续发展需要有跨越空间界限的新视角,主张其定义应融入空间维度;1994年国际环境与发展研究所从乡村社区发展的微观视角出发,认为可持续发展应该是生物/生态资源、经济与社会3个系统的和谐共生;1997年Daly^[23]进一步区分了可持续发展与传统经济增长模式,强调将关键自然资本纳入生产函数,追求在地球生物物理承载能力内的稳态发展和繁荣。至2000年,这一全球共识达到了新的高度,联合国会议一致通过《千年宣言》,确立了联合国千年发展目标,共包括八大目标,旨在消灭极端贫穷和饥饿,普及初等教育,促进两性平等并赋予妇女权力,降低儿童死亡率,改善产妇保健,与艾滋病、疟疾和其他疾病作斗争,确保环境的可持续能力,制订促进发展的全球伙伴关系。

1.4 深度发展期(2001年至今)

2000年之前,可持续发展领域始终缺乏一个全面且系统的概念框架,相关研究因缺乏严谨的科学方法与标准化准则而显得零散,限制了大多数可持续发展研究,使它们主要被归类为社会科学的范畴,或是紧密贴合政府政策实践的应用性研究。尽管生态学与环境科学等自然科学也是可持续发展研究的重要方面,但长期聚焦于生态与环境的可持续性层面,特别是生物多样性保护及生态系统稳定性维护,而对社会经济维度的可持续性探讨比较薄弱^[24]。进入21世纪,综合环境、经济和社会以实现可持续发展的理念逐步引起重视并得到广泛认可^[5,25-26]。

21世纪初,Kates等^[27]提出了可持续性科学的概念框架,随后,Clark等^[28-29]深入探讨了可持续性科学,标志着可持续发展研究迈入了一个融合理论与实践的新时期。可持续性科学是对可持续发展多维度探索的集成,更加注重知行合一,是兼顾理论与实践应用导向的基础研究,即所谓的巴斯德式研究路径^[30]。2003年Clark等^[28]系统剖析了物质、自然、人力和社会四大资本间的相互作用,讨论了其对推动可持续发展的重要贡献。随后,相关学者揭示了人类需求与地球供应能力之间的不平衡,强调需要减少人类社会的需求,或提高地球系统的供给,或协调二者关系,认为以可持续发展为目标的发展路径是统筹人类和地球系统的重要手段^[31],并区分了弱与强两种可持续发展模式。前者侧重于人类福祉的经济导向,追求自然资源的高效利用,后者则强调自然系统的保护,通过调控经济活动以维护生态平衡^[14,32]。2006年Zuindeau^[33]提出区域可持续发展的实践需纳入外部可持续性进行考量,以应对国家

1998年方子云^[50]聚焦于长江经济带,提出了保护水环境是该区域可持续发展的重要保障。1999年水利部黄河水利委员会在国务院授权下,开创性地实施了黄河水量的统一调度管理,为黄河水资源可持续利用提供了保障,也为大江大河树立了水量统一调度的典范。

3.2 稳定发展期(2000—2018年)

2000年欧洲议会与欧盟理事会联合颁布的《欧盟水框架指令手册》正式生效,标志着欧洲正式进入流域综合管理的新阶段。同年,中国工程院通过“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目,发布了综合报告,深入探讨了我国水资源战略的未来方向^[51]。这一时期,王慧敏等^[52-55]围绕流域系统可持续发展,展开了一系列研究工作,涵盖了可持续发展评估方法、动态模拟技术和协同控制策略等,为流域可持续管理的科学决策提供了有力支持。陈利顶等^[56]依据长江流域地理与经济特征,从经济、生态、社会3个维度出发,提出了促进长江流域可持续发展的综合性政策框架。2001年,为解决密西西比河/墨西哥湾流域的非点源污染问题,美国富营养化工作组发布了“2001年行动计划”,标志着该区域环境治理迈入新阶段。2002年程国栋^[57]提出了以水资源可持续利用为核心的黑河流域生态经济综合研究框架,强调了水资源在生态经济系统中的重要作用;王浩等^[58]也深入探讨了流域水资源规划的系统视角与方法论。2006年中国国务院颁布了《黄河水量调度条例》,标志着黄河流域水资源管理进入了法制化、规范化的新阶段。而在澳大利亚,2008年通过了《墨累—达令河流域改革谅解备忘录》《政府间合作协议》,实现了墨累—达令河流域水管理权从州政府向联邦政府的转移,开始了流域—社会经济—生态环境系统治理的国家统一管理新时期。2010年金帅等^[59]分析了流域系统的复杂性与适应性管理。2015年程国栋等^[60]提出了流域科学及其集成研究方法,为流域综合治理与可持续发展研究提供了新的方向。这一时期,虽然直接以流域可持续发展为主题的研究相对较少,但政府部门和学术界对流域的治理和研究已经蕴含了社会、经济与环境综合治理的可持续发展理论思想。

3.3 快速发展期(2019年至今)

2019年我国提出了黄河流域生态保护和高质量发展的重大国家战略,体现了对流域管理与可持续发展的高度重视,流域系统治理与综合管理的观念受到广泛关注^[61-63],在学术界也引起了热烈反响。刘昌明^[7]认为要实现黄河的长治久安,亟须阐明黄河流域水资源-生态-经济可持续发展面临的关

键问题,识别黄河流域水资源-生态-经济可持续发展内部的复杂关系;陆大道等^[9]阐述了黄河流域的综合治理与可持续发展,促进了对该领域的认识。至此,黄河流域可持续发展与系统治理的理念得到了广泛认可^[44,64],学术界开展了大量有关黄河流域可持续发展的研究工作。在单一要素可持续发展研究方面,主要工作包括:水量和水质可持续性分析^[65]、可持续水管理的策略研究^[66]、水资源可持续利用评价^[67-68]和耕地利用的可持续发展路径探析^[69]。针对农业用水为主的特点,相关学者系统阐述了黄河流域可持续农业水管理相关问题^[70]。在多要素可持续发展综合评价方面,主要工作包括:采用系统动力学模型,基于情景设计,对生态环境与社会经济发展可持续性的动态模拟^[71]、对水资源-能源-粮食系统可持续发展能力的评估^[72]和对水资源-生态-经济系统可持续发展的评价^[73]。在可持续发展目标和水平综合评估方面,主要工作包括:根据联合国可持续发展目标,构建评价指标体系,综合评估可持续发展目标达成度与目标间均衡度^[74];采用生态足迹模型,通过综合足迹深度、生态利用效率指数、生态经济协调指数和生态足迹多样性指数等,计算沿黄9省区的可持续发展水平^[75];从社会、经济、资源、生态环境和科技出发,建立综合评价指标体系,计算可持续发展综合评价指数^[76]。

2020年江恩慧等^[3]提出了流域系统科学,其基本思想是在地球系统科学的框架下,以物质、能量、信息、价值流动过程为纽带,将流域看作一个由行洪输沙、生态环境和社会经济三大子系统耦合构成的复杂巨系统。流域系统科学的研究对象是整个流域系统及其3个功能子系统,基本研究方法是系统科学的理论与方法体系,包括但不限于突变论、控制论、协同学、博弈论、非线性科学,以及各子系统传统学科体系的基本理论方法。具体而言,流域系统科学强调将复杂系统科学的理论和方法应用于流域尺度可持续发展的理论研究和实践中,旨在研究各子系统内部演化过程与机理以及各子系统间多尺度、多过程的相互作用关系与协同演化机制,进而提出流域可持续发展策略与配置格局。

在流域系统科学理论的指导下,江恩慧^[77]开展了黄河流域可持续发展相关理论和实践研究,深入剖析了黄河流域系统的复杂性与治理挑战。相关工作主要包括:研究了黄河下游河道滩槽的协同治理,提出了新的治理策略^[78],探索了流域系统科学理论在黄河下游河道系统治理中的实践路径^[79];系统归纳了治黄系统工程的历史演变和现状^[80],从行洪输沙、生态环境和社会经济出发,构建了黄河水沙多目标协

同模型^[81];考虑流域系统的可持续运行,基于多目标协同分析了黄河干流水库调度约束因子阈值^[82];在下游滩区,考虑防洪安全、资源利用、产业发展和乡村建设等,开展了自然-社会-经济可持续发展研究^[83];构建了可持续发展评价指标体系,研究了黄河流域系统可持续发展的相对阈值^[84]。

总体而言,流域可持续发展与流域系统科学相辅相成、互为借鉴,流域可持续发展是流域系统科学理论的重要应用领域,对流域系统科学理论、技术与方法的发展提出需求,流域系统科学是实现流域可持续发展的基础理论,为流域系统的可持续运行提供指导。流域可持续发展的关键在于实现流域系统的可持续运行,而如何评估流域系统所处的状态,调控和实现流域系统当前和未来的可持续运行,是流域系统科学所要解决的问题。根据流域系统科学的理念,流域系统可持续运行最主要的表现是,流域行洪输沙-生态环境-社会经济多维功能的协同发挥,从复杂系统理论的角度出发,包括3个层面的内涵:①行洪输沙、生态环境、社会经济3个子系统都可以实现自身的可持续发展;②在3个子系统自身可持续发展的基础上,两两之间互为支撑、良性协同,实现共同发展;③3个子系统相互作用、有机整合,与流域所处的外部环境(气候条件、管理政策等)不断交互影响,通过自组织过程产生新结构、新属性,进而形成新状态下的行洪输沙-生态环境-社会经济复杂巨系统,保障流域系统当前和未来的可持续运行。

4 结 语

对可持续发展理论和流域可持续发展相关研究主题、成果、方法等进行了系统回顾。在可持续发展理论的研究历程中,萌芽期以感性认识为主,以*Silent spring*为标志,重点关注环境保护问题;成型期的关注点拓宽至环境保护、经济发展、能源、农业等多领域,1987年*Our common future*界定了可持续发展的定义;快速发展期对可持续发展进行了多元化的阐释,2000年联合国确立了千年发展目标;深度发展期开始重视系统研究,2015年联合国进一步提出了可持续发展目标。在流域可持续发展研究中,国内学者的研究显著多于国外学者,初步探索期聚焦单一要素,以零散化的直观感性认识为主;稳定发展期综合水资源利用、生态、经济等,开展了初步的量化研究;快速发展期在流域单一要素和多要素可持续发展评价、联合国可持续发展目标和水平综合评估等方面,开展了大量理论与实践。

流域系统科学作为一门研究复杂流域的新兴分支学科,为研究流域可持续发展提供了重要的理论方法,目前,虽然已经开展了一些相关工作,但仍不

足以保障流域可持续发展。根据流域系统可持续运行的内涵,亟须以流域系统科学理论为指导。在理论研究方面,以行洪输沙和生态环境表征流域系统的自然属性,以社会经济表征流域系统的人类社会属性,综合考虑流域系统行洪输沙的自身功能,维持生态环境面向自然的外部性效应,保障经济社会发展服务人类的外部性效应,进而探索流域可持续发展的内在耦合机制与外在驱动,揭示流域内部各要素可持续发展之间的互馈关系,明晰流域治理保护中人类与自然之间复杂的互动关系。在技术方法方面,考虑流域系统运行过程中自然属性与人类属性的交互作用,从3个子系统功能的维度出发,构建流域行洪输沙-生态环境-社会经济复合系统可持续运行的评价指标体系,提出表征流域系统可持续运行的功效函数,推动流域可持续发展评价的统一性、规范性和可比性。

参考文献:

[1] 刘欢,甘永德,杨钦,等. 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 62-68. (LIU Huan, GAN Yongde, YANG Qin, et al. Adaptability evaluation of water resources and associated elements based on perspective of water network [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 62-68. (in Chinese))

[2] 王成坤,黄纪萍,王川涛,等. 面向流域治理与城镇发展统筹的城市水系统规划协同机制探讨: 广东东莞生态园实证研究[J]. 水利学报, 2024, 55(3): 278-287. (WANG Chengkun, HUANG Jiping, WANG Chuantao, et al. Discussion on the coordination mechanism of urban water system planning for watershed management and urban development: an empirical study about Dongguan Ecological Industrial Park, Guangdong [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3): 278-287. (in Chinese))

[3] 江恩慧,王远见,田世民,等. 流域系统科学初探[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1026-1037. (JIANG Enhui, WANG Yuanjian, TIAN Shimin, et al. Exploration of watershed system science [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1026-1037. (in Chinese))

[4] LI Yurui, ZHANG Xuanchang, CAO Zhi, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development [J]. Science of the Total Environment, 2021, 756: 143676.

[5] 王如松,欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 337-345. (WANG Rusong, OUYANG Zhiyun. Social-economic-natural complex ecosystem and sustainability [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 337-345. (in Chinese))

- [6] JIANG Enhui, QU Bo, JIA Jia, et al. Study on the coordination of flow and sediment transport, ecological environment, and crop production in the Lower Yellow River since 2000[J]. *River*,2023,2(3):326-335.
- [7] 刘昌明. 对黄河流域生态保护和高质量发展的几点认识[J]. *人民黄河*,2019,41(10):158. (LIU Changming. Some insights into the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*,2019,41(10):158. (in Chinese))
- [8] 刘昌明,刘小莽,田巍,等. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题[J]. *人民黄河*,2020,42(9):6-9. (LIU Changming, LIU Xiaomang, TIAN Wei, et al. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin urgently need to solve the water shortage problem[J]. *Yellow River*,2020,42(9):6-9. (in Chinese))
- [9] 陆大道,孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. *地理学报*,2019,74(12):2431-2436. (LU Dadao, SUN Dongqi. Development and management tasks of the Yellow River Basin: a preliminary understanding and suggestion[J]. *Acta Geographica Sinica*,2019,74(12):2431-2436. (in Chinese))
- [10] 张志强,程国栋,徐中民. 可持续发展评估指标、方法及应用研究[J]. *冰川冻土*,2002,24(4):344-360. (ZHANG Zhiqiang, CHENG Guodong, XU Zhongmin. Review of indicators and methodologies for measuring sustainable development and their applications[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2002,24(4):344-360. (in Chinese))
- [11] 牛文元. 中国可持续发展的理论与实践[J]. *中国科学院院刊*,2012,27(3):280-289. (NIU Wenyuan. Theory and practice of China's sustainable development[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2012,27(3):280-289. (in Chinese))
- [12] 夏军,张永勇,余敦先,等. 城市水系统理论及其模型研制与应用[J]. *中国科学:地球科学*,2024,54(3):725-744. (XIA Jun, ZHANG Yongyong, SHE Dunxian, et al. Urban water system theory and its model development and application[J]. *Scientia Sinica Terrae*,2024,54(3):725-744. (in Chinese))
- [13] SHI Longyu, HAN Linwei, YANG Fengmei, et al. The evolution of sustainable development theory: types, goals, and research prospects[J]. *Sustainability*,2019,11(24):7158.
- [14] 张晓玲. 可持续发展理论:概念演变、维度与展望[J]. *中国科学院院刊*,2018,33(1):10-19. (ZHANG Xiaoling. Theory of sustainable development: concept evolution,dimension and prospect[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2018,33(1):10-19. (in Chinese))
- [15] MITCHAM C. The concept of sustainable development: its origins and ambivalence[J]. *Technology in Society*,1995,17(3):311-326.
- [16] VON CARLOWITZ H C. *Encyclopedia of public health* [M]. Dordrecht:Springer,2008.
- [17] PEARCE D W, TURNER R K. *Economics of natural resources and the environment* [M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press,1990.
- [18] ROSTOW W W. The take-off into self-sustained growth [J]. *The Economic Journal*,1956,66(261):25-48.
- [19] BROWN L R. Building a sustainable society[J]. *Society*,1982,19(2):75-85.
- [20] MEBRATU D. Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review [J]. *Environmental Impact Assessment Review*,1998,18(6):493-520.
- [21] HOLMBERG J. Making development sustainable: redefining institutions, policy, and economics [M]. Washington, D. C. :Island Press,1992.
- [22] NIU Wenyuan, LU J J, KHAN A A. Spatial systems approach to sustainable development: a conceptual framework[J]. *Environmental Management*,1993,17(2):179-186.
- [23] DALY H E. *Beyond growth: the economics of sustainable development*[M]. Boston:Beacon Press,1997.
- [24] 邬建国,郭晓川,杨斌,等. 什么是可持续性科学? [J]. *应用生态学报*,2014,25(1):1-11. (WU Jianguo, GUO Xiaochuan, YANG Jie, et al. What is sustainability science? [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2014,25(1):1-11. (in Chinese))
- [25] GIDDINGS B, HOPWOOD B, O' BRIEN G. Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development[J]. *Sustainable Development*,2002,10(4):187-196.
- [26] SCHMIDT-TRAUB G, KROLL C, TEKSOZ K, et al. National baselines for the sustainable development goals assessed in the SDG index and dashboards[J]. *Nature Geoscience*,2017,10:547-555.
- [27] KATES R W, CLARK W C, CORELL R, et al. Sustainability science [J]. *Science*,2001,292(5517):641-642.
- [28] CLARK W C, DICKSON N M. Sustainability science: the emerging research program [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2003,100(14):8059-8061.
- [29] OSTROM E, JANSSEN M A, ANDERIES J M. Going beyond panaceas [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,2007,104(39):15176-15178.
- [30] 周兵兵,马群,邬建国,等. 再论可持续性科学:新形势与新机遇[J]. *应用生态学报*,2019,30(1):325-336. (ZHOU Bingbing, MA Qun, WU Jianguo, et al. Sustainability science revisited: recent advances and new opportunities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2019,30(1):325-336. (in Chinese))
- [31] GRIGGS D, STAFFORD-SMITH M, GAFFNEY O, et al.

- Sustainable development goals for people and planet[J]. Nature, 2013, 495(7441): 305-307.
- [32] WILLIAMS C C, MILLINGTON A C. The diverse and contested meanings of sustainable development[J]. The Geographical Journal, 2004, 170(2): 99-104.
- [33] ZUINDEAU B. Spatial approach to sustainable development: challenges of equity and efficacy[J]. Regional Studies, 2006, 40(5): 459-470.
- [34] LIU Yali, DU Jianqing, WANG Yanfen, et al. Overlooked uneven progress across sustainable development goals at the global scale: challenges and opportunities[J]. The Innovation, 2024, 5(2): 100573.
- [35] XIAO Huijuan, BAO Sheng, REN Jingzheng, et al. Global transboundary synergies and trade-offs among sustainable development goals from an integrated sustainability perspective[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 500.
- [36] XU Zhenci, LI Yingjie, CHAU S N, et al. Impacts of international trade on global sustainable development[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 964-971.
- [37] 傅伯杰. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务[J]. 科技导报, 2020, 38(13): 19-24. (FU Bojie. UN sustainable development goals and historical mission of geography[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(13): 19-24. (in Chinese))
- [38] BASHEER M, NECHIFOR V, CALZADILLA A, et al. Balancing national economic policy outcomes for sustainable development[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5041.
- [39] 赵旭, 谢慧钰, 李俊龙, 等. 黄河流域生态状况研究热点迁移与评价方法演变分析[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 63-72. (ZHAO Xu, XIE Huiyu, LI Junlong, et al. Analysis of research hotspot migration and assessment method evolution for the ecological status of the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 63-72. (in Chinese))
- [40] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))
- [41] 贾绍凤, 梁媛, 张士锋. 黄河流域天然径流量评价探讨[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 33-38. (JIA Shaofeng, LIANG Yuan, ZHANG Shifeng. Discussion on evaluation of natural runoff in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 33-38. (in Chinese))
- [42] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 等. 黄河沿线 9 省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 121-129. (ZHAO Zimeng, CAO Yongqiang, CHANG Zhidong, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 121-129. (in Chinese))
- [43] 陈莉, 张安安. 黄河流域水资源与社会经济协同评价及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 1-8. (CHEN Li, ZHANG Anan. Synergistic evaluation of water resources and social economy in the Yellow River Basin and analysis of influencing factors[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 1-8. (in Chinese))
- [44] 汪芳, 苗长虹. 系统性、整体性与协同性: 黄河流域高质量发展的思维与策略: 写在专辑刊发之后的话[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 270-272. (WANG Fang, MIAO Changhong. Introduction to the special issue on high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 270-272. (in Chinese))
- [45] 王礼先. 流域治理的可持续发展标准[J]. 中国水土保持, 1995(3): 46-48. (WANG Lixian. Sustainable development criteria for watershed governance[J]. Soil and Water Conservation in China, 1995(3): 46-48. (in Chinese))
- [46] 陈家琦. 可持续的水资源开发与利用[J]. 自然资源学报, 1995, 10(3): 252-258. (CHEN Jiaqi. Sustainable development and utilization of water resource[J]. Journal of Natural Resources, 1995, 10(3): 252-258. (in Chinese))
- [47] 金立新. 试论水资源保护在淮河流域可持续发展中的作用[J]. 水资源保护, 1997(3): 1-4. (JIN Lixin. Discussion on the role of water resources protection in the sustainable development of Huaihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 1997(3): 1-4. (in Chinese))
- [48] 张彦军. 流域开发与可持续发展研究: 以黄河流域开发为例[J]. 河海大学学报, 1997, 25(6): 67-70. (ZHANG Yanjun. Valley exploitation and sustainable development: exploitation of the Huanghe River valley[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(6): 67-70. (in Chinese))
- [49] 王侠. 水土保持与黄河经济可持续发展[J]. 水土保持通报, 1997, 17(7): 79-83. (WANG Xia. Soil conservation and sustained development of Yellow River economy[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(7): 79-83. (in Chinese))
- [50] 方子云. 保护水环境促进长江经济带的可持续发展[J]. 人民长江, 1998, 29(1): 38-40. (FANG Ziyun. Protection water environment: promoting sustainable development of Changjiang economic belt[J]. Yangtze River, 1998, 29(1): 38-40. (in Chinese))
- [51] 中国工程院“21 世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. 中国工程科学, 2000, 2(8): 1-17. (Project Group of “Strategic Research on Sustainable Development of Water Resource in China in 21st Century”, Chinese Academy of Engineering. Strategic research on sustainable development

- of water resource in China [J]. Engineering Science, 2000, 2(8): 1-17. (in Chinese))
- [52] 王慧敏,刘新仁. 流域复合系统可持续发展测度[J]. 河海大学学报, 1999, 27(3): 45-48. (WANG Huimin, LIU Xinren. Measurement for sustainable development of basin complex system[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(3): 45-48. (in Chinese))
- [53] 王慧敏,徐立中. 流域系统可持续发展分析[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 165-172. (WANG Huimin, XU Lizhong. Analysis on sustainable development of the basin system[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(2): 165-172. (in Chinese))
- [54] 王慧敏,刘新仁,徐立中. 流域可持续发展的系统动力学预警方法研究[J]. 系统工程, 2001, 19(3): 61-68. (WANG Huimin, LIU Xinren, XU Lizhong. Study on early warning methods of system dynamics of river basin sustainable development[J]. Systems Engineering, 2001, 19(3): 61-68. (in Chinese))
- [55] 王慧敏,杜荣江. 流域可持续发展系统的协调控制[J]. 运筹与管理, 2001, 10(3): 112-118. (WANG Huimin, DU Rongjiang. Coordination control of the sustainable development system of river basin [J]. Operations Research and Management Science, 2001, 10(3): 112-118. (in Chinese))
- [56] 陈利顶,傅伯杰. 长江流域可持续发展基本政策研究[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(2): 148-153. (CHEN Liding, FU Bojie. Basic policy framework for sustainable development in Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(2): 148-153. (in Chinese))
- [57] 程国栋. 黑河流域可持续发展的生态经济学研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 335-343. (CHENG Guodong. Study on the sustainable development in Heihe River watershed from the view of ecological economics [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(4): 335-343. (in Chinese))
- [58] 王浩,秦大庸,王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002, 33(8): 1-6. (WANG Hao, QIN Dayong, WANG Jianhua. Concept of system and methodology for river basin water resources programming [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(8): 1-6. (in Chinese))
- [59] 金帅,盛昭瀚,刘小峰. 流域系统复杂性与适应性管理[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(7): 60-67. (JIN Shuai, SHENG Zhaohan, LIU Xiaofeng. Complexity analysis on watershed system and adaptive management [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(7): 60-67. (in Chinese))
- [60] 程国栋,李新. 流域科学及其集成研究方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 811-819. (CHENG Guodong, LI Xin. Integrated research methods in watershed science[J]. Scientia Sinica Terrae, 2015, 45(6): 811-819. (in Chinese))
- [61] 李肇桀,张旺,刘璐,等. 对国家“江河战略”的认识与思考[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 12-15. (LI Zhaojie, ZHANG Wang, LIU Lu, et al. Understanding and thought on the national “River Strategy” [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 12-15. (in Chinese))
- [62] 杨锋. 强化流域治理管理 打造幸福河湖“淮河样板”: 淮河流域幸福河湖建设实践与展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 41-45. (YANG Feng. Promoting the governance and management of the river basin building a “Huaihe River Model” for happy rivers and lakes: practice and prospect of building happy rivers and lakes in the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 41-45. (in Chinese))
- [63] 廖志伟. 以流域综合治理 筑牢长江经济带高质量发展水安全底线[J]. 水利发展研究, 2024, 24(2): 76-81. (LIAO Zhiwei. Establishing a solid water security foundation for high-quality development of the Yangtze River Economic Belt through comprehensive control of small watersheds [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(2): 76-81. (in Chinese))
- [64] 田美荣,冯朝阳,王世曦,等. 近 70 年来黄河流域生态修复历程及系统性修复思考[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1787-1797. (TIAN Meirong, FENG Chaoyang, WANG Shixi, et al. Ecological restoration of the Yellow River Basin in the last 70 years and systematic restoration thinking [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1787-1797. (in Chinese))
- [65] CHEN Yiping, FU Bojie, ZHAO Yan, et al. Sustainable development in the Yellow River Basin: issues and strategies[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121223.
- [66] 程蕾,陈吕军,田金平,等. “以水定产”驱动的黄河流域可持续水管理策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 187-197. (CHENG Lei, CHEN Luyun, TIAN Jinping, et al. Sustainable water management in Yellow River Basin based on balancing water resources and industrial development[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 187-197. (in Chinese))
- [67] LAI Zhicheng, LI Lei, HUANG Min, et al. Spatiotemporal evolution and decoupling effects of sustainable water resources utilization in the Yellow River Basin: based on three-dimensional water ecological footprint[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 366: 121846.
- [68] 甘容,李旖旎,郭林,等. 基于水足迹的黄河流域九省(区)水资源可持续利用评价[J]. 人民黄河, 2024, 46(2): 93-99. (GAN Rong, LI Yini, GUO Lin, et al. Comprehensive evaluation of sustainable water resources utilization in nine provinces of the Yellow River Basin based on water footprint[J]. Yellow River, 2024, 46(2):

- 93-99. (in Chinese))
- [69] 李程秀. 河南省黄河流域耕地利用可持续发展路径研究[D]. 郑州:河南农业大学,2023.
- [70] ZHANG Yitao, YANG Pingguo, LIU Jian, et al. Sustainable agricultural water management in the Yellow River Basin, China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 288: 108473.
- [71] 王奕淇, 李国平. 基于 SD 模型的黄河流域生态环境与社会经济发展可持续性模拟[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 901-911. (WANG Yiqi, LI Guoping. Sustainable simulation of ecological environment and socio-economic development in the Yellow River Basin based on the SD model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 901-911. (in Chinese))
- [72] 孙才志, 段兴杰. 黄河流域水资源-能源-粮食系统生态可持续发展能力评价[J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 85-90. (SUN Caizhi, DUAN Xingjie. Ecological sustainable development capacity assessment of water-energy-food system in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(2): 85-90. (in Chinese))
- [73] 王慧亮, 申言霞, 李卓成, 等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 12-17. (in Chinese))
- [74] 宁瑶, 刘雅莉, 杜剑卿, 等. 黄河流域可持续发展评估及协同发展策略[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 990-1001. (NING Yao, LIU Yali, DU Jianqing, et al. Sustainable development assessment of the Yellow River Basin and the coordinated development strategy [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 990-1001. (in Chinese))
- [75] 王成军, 汤晶翔, 冯涛, 等. 基于能值生态足迹的黄河流域 9 省区可持续发展评价[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 138-151. (WANG Chengjun, TANG Jingxiang, FENG Tao, et al. Sustainable development evaluation of nine provinces in the Yellow River Basin based on energy ecological footprint[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 138-151. (in Chinese))
- [76] 史习习, 杨力. 黄河流域 2008—2018 年可持续发展评价与系统协调发展分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 260-267. (SHI Xixi, YANG Li. Sustainable development evaluation and system coordination development analysis of Yellow River Basin during 2008-2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 260-267. (in Chinese))
- [77] 江恩慧. 黄河流域系统与黄河流域的系统治理[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 159. (JIANG Enhui. Yellow River Basin system and systematic governance of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2019, 41(10): 159. (in Chinese))
- [78] 江恩慧, 赵连军, 王远见, 等. 基于系统论的黄河下游河道滩槽协同治理研究进展[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 58-63. (JIANG Enhui, ZHAO Lianjun, WANG Yuanjian, et al. Research progress on synergistic regulation for floodplain and main-channel of Lower Yellow River based on system theory[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 58-63. (in Chinese))
- [79] 江恩慧, 屈博, 王远见, 等. 基于流域系统科学的黄河下游河道系统治理研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 7-15. (JIANG Enhui, QU Bo, WANG Yuanjian, et al. Research on synergistic regulation of the Lower Yellow River based on watershed system science[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 7-15. (in Chinese))
- [80] 陈蕴真, 江恩慧, 李军华. 治黄系统工程的形成、演化和未来[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 58-64. (CHEN Yunzhen, JIANG Enhui, LI Junhua, et al. The formation, evolution and future of systems engineering for harnessing the Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(2): 58-64. (in Chinese))
- [81] 李洁玉, 李航, 王远见, 等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 708-718. (LI Jieyu, LI Hang, WANG Yuanjian, et al. Construction and application of a multi-objective collaborative model of water and sediment regulation in the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 708-718. (in Chinese))
- [82] 田世民, 江恩慧, 王远见, 等. 基于黄河流域系统治理的水库多目标调度约束阈值研究[J]. 水利学报, 2024, 55(6): 631-642. (TIAN Shimin, JIANG Enhui, WANG Yuanjian, et al. Research on constraint thresholds for multi-objective scheduling of reservoirs based on Yellow River Basin system governance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(6): 631-642. (in Chinese))
- [83] 岳瑜素, 王宏伟, 江恩慧, 等. 滩区自然-经济-社会协同的可持续发展模式[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1131-1137. (YUE Yusu, WANG Hongwei, JIANG Enhui, et al. Sustainable development model of floodplain based on coordination of nature, economy and society[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1131-1137. (in Chinese))
- [84] WANG Yue, LIU Yue, LUO Ying, et al. Research on the relative threshold of sustainable development of the complex system in the Yellow River Basin[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 472: 143448.

(收稿日期:2024-09-24 编辑:施业)