

流域水生态环境补偿研究进展

孟钰^{1,2}, 魏剑林^{1,2}, 管新建^{1,2}, 王慧亮^{1,2}, 吕翠美^{1,2}, 王田野^{1,2}, 严登华¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河实验室(郑州大学), 河南 郑州 450001)

摘要: 围绕补偿机制、控制阈值、标准与价值3个维度梳理了流域水生态环境补偿国内外研究成果。流域补偿问题需要突破单一水量或水质控制因素的限制, 兼顾水污染与水生态两方面, 建立水质与水量阈值联合控制下的流域水生态环境补偿机制架构; 补偿标准需要实现实际价格到经济价格, 再到与生态经济价格的属性叠加与内涵拓展。提出未来应在点面结合的多源河流环境损害补偿控制阈值、考虑河流生态系统服务功能的生态水量补偿控制阈值、水质与水量相互作用机理与双控演化博弈下多模式补偿策略等方面开展进一步的探索研究。

关键词: 水生态环境补偿; 补偿机制; 补偿控制阈值; 补偿标准; 补偿价值

中图分类号: X321; TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2024)06-0215-09

Research progress in watershed water ecological environment compensation//MENG Yu^{1,2}, WEI Jianlin^{1,2}, GUAN Xinjian^{1,2}, WANG Huiliang^{1,2}, LYU Cuimei^{1,2}, WANG Tianye^{1,2}, YAN Denghua¹ (1. College of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Laboratory (Zhengzhou University), Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Research achievements on watershed water ecological environment compensation in China and abroad are reviewed from three aspects, including compensation mechanism, control threshold, and standard and value. The watershed compensation issue needs to break through the limitations of single control factors related to water quantity or quality, balance both water pollution and water ecology, and establish a framework of watershed water ecological environment compensation mechanism under joint control of water quality and quantity thresholds. The compensation standards should be formulated based on attribute superposition and connotation extension of practical significance, economic value, and ecological benefits. It is proposed that future research should explore compensation thresholds for point and non-point source pollution-induced riverine environmental damage, ecological water quantity compensation thresholds considering ecosystem service functions of rivers, water quality and quantity interaction mechanism, and multi-model compensation strategies under dual control evolutionary games.

Key words: water ecological environment compensation; compensation mechanism; compensation control threshold; compensation standard; compensation value

在我国城市化与工业化快速发展进程中, 以水环境破坏、水生态退化为主的河流水生态环境问题已成为制约流域高质量发展的“水瓶颈”^[1]。随着地区经济的快速增长, 人类生产、生活产生的大量废污水对河流环境造成了极大的危害^[2]。生态环境部发布的《2022 中国生态环境状况公报》显示, IV类及以下地表水水质考核断面占比为 12.1%, 其中劣V类断面比例为 0.7%, 水污染现象仍需要持续改善。水资源利用中的河道内外用水矛盾、河流预留水资源被不断压缩等水问题深刻影响地区间利益关

系与流域整体协调发展^[3]。《中国水文年报:2022》显示, 2022 年为平水典型年, 但全国 234 个河流生态流量保障目标监测断面中, 生态流量满足程度小于 90%的断面为 28 个, 占比约 12%, 集中在松花江、淮河与长江流域。平水年条件下河流最低生态流量仍无法得到完全保障, 不利于水生态系统的丰枯自调节性。

联合国 2023 年水事会议为全球视野下加速实现 2030 年可持续发展议程涉水目标锚定方向, 并明确了具体路径, 强调以水调气候、提韧性、护环境, 指

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(242300421234); 国家自然科学基金项目(51879241); 郑州大学基础研究培育基金项目(32213979-23)

作者简介: 孟钰(1988—), 女, 副教授, 博士, 主要从事生态水文学研究。E-mail: mengyu8@zzu.edu.cn

通信作者: 管新建(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事城市水文水资源管理研究。E-mail: gxj1016@zzu.edu.cn

出保障河流生态环境以促进人与自然和谐发展仍是重要方向。2022年,党的二十大报告进一步指明了人与自然和谐共生的发展方向,一方面做出了“统筹水资源、水环境、水生态治理,推动重要江河湖库生态保护治理”的重要指示,另一方面明确了生态补偿的重要地位,提出“建立生态产品价值实现机制,完善生态保护补偿制度”。习近平生态文明思想是新时代我国生态文明建设的根本遵循和行动指南,生态补偿作为生态文明制度的重要组成部分,是落实生态保护权责、协调流域上下游和河道内外生态经济利益、调动各方参与生态保护积极性、推进生态文明建设的重要手段^[4-5]。

流域水生态环境补偿研究以河流保护与水资源可持续发展为目标。针对河流污染、生态缺水或两者兼具的人为水问题,水生态环境补偿以经济手段为主要调节方式,能够协调流域内上下游间、河道内外的生态经济利益,实现补偿资金的科学量化与补偿责任的合理划定。本文梳理了流域水生态环境补偿理论与方法的发展脉搏,围绕补偿机制、控制阈值、标准与价值量化3个方面进行了综述与分析,在前期研究的基础上,尝试构建未来水质与水量阈值联合控制下的流域水生态环境补偿机制架构,提出水质与水量补偿控制阈值与流域水生态环境补偿价值的关系,从水环境与水生态补偿控制阈值及双控博弈补偿策略方面,对未来研究进行展望。

1 水生态环境补偿机制

1.1 流域水环境与水生态补偿机制研究现状

流域水生态环境补偿主要分为河流水质超标引起的水环境补偿和河流水量亏缺引起的水生态补偿。

目前流域补偿研究集中在河流水环境补偿方面。流域水环境补偿是以河流水体污染程度为依据,衡量上下游排污关系及污染传递可能造成的区域生态经济利益损失,定量刻画流域内上下游行政单元的补偿价值。2000年欧盟颁布的《水框架指令》从流域尺度提出了污染物综合管理措施,将水质因子作为实施流域补偿措施的监测目标^[6-7]。自此,学者们广泛开展了以水环境质量作为补偿控制阈值,基于水质或水环境指标与质量标准、补偿价值之间响应关系的补偿机制研究,代表性的成果包括水环境污染损害补偿、水环境治理与恢复补偿、污染水体稀释补偿等^[8-12]。此外,面向缺少河流水质实测资料地区的研究或宏观层面的研究,通过分析流域内区域间的污染物排放量、水环境承载力、水功能区纳污能力等,建立以污染物削减为目标的补偿机

制,也是水环境补偿研究的一大方向^[13-15]。流域水环境补偿研究主要针对流域水污染防治问题,在理论与实践研究中都取得了一定进展,在生态补偿资金的保障下,一些生态修复措施得到有效实施,改善了河流水环境质量^[16]。

水资源短缺是制约人与自然协调可持续发展的重要因素,在气候变化与人类活动双重影响下,水资源时空分布不均现象加剧,河道外生产、生活、生态“三生”用水与河道内生态用水矛盾突出,河流生态水量亏缺造成的水生态补偿问题不容忽视^[17]。流域水生态补偿研究以河流水生态系统需水满足程度为依据,判定河流生态缺水或流域内各单元取水超标量影响下的区域生态经济利益损失,定量描述流域内上下游行政单元的补偿价值。现有成果以保障河流生态基流的流域水生态补偿研究为主,在科学确定河流生态基流的基础上,计算河流生态缺水量,估计由于河流缺水造成的河流生态修复成本,核算生态补偿价值^[18-19]。此外,由于流域内上下游区域间河道外供需水关系不和谐造成的生态补偿问题也受到关注,目前,针对社会经济与河流生态用水矛盾,以河流水量分配为控制阈值的生态补偿研究初见成效^[20]。根据河流水量在流域内各行政单元间的分配额度确定社会经济用水限制条件,以此作为河道外补偿控制阈值,结合单位水资源价值补偿标准,获取补偿价值,是水生态补偿研究中的一项突破^[21]。由此可见,水生态补偿的关键点在河流水量盈缺判别上,河道内生态需水与河道外社会经济用水之间的矛盾长期存在并不断加剧,如何将河道内外需水和用水要求相结合进行协同判别与补偿,需要进一步探索,对水生态补偿机制研究也需进一步扩展。

1.2 流域水生态环境补偿机制研究现状及未来架构

从河流生态系统整体性与服务功能多样性的角度出发,河流的水质与水量条件均是保证河流健康的重要因素。水质表征了河流的水环境状况,水量则反映了河流的生境条件,间接表征河流生态系统健康水平。因此,水生态环境补偿研究能够兼顾河流水污染防治与水生态保护两方面,具有双重控制与监管作用,是当前补偿研究的一个重要方向。但是,针对水质与水量双控因素的补偿研究相较于单因素补偿研究明显偏少,相关的研究成果主要集中在两方面。①采用单因素(水质或水量)表征整体水生态环境状况建立补偿机制,这与水质或水量生态补偿研究相似,只是拓展了单因素补偿控制阈值的内涵,如水质指标不仅需要满足地表水环境质量标准与水功能区要求,还需达到河流生物对溶解氧、

酸碱度等的最低要求;河道内预留水量不仅要达到基本生态需水,还需兼顾排污稀释要求^[22-23]。②部分学者建立水质与水量双因素补偿机制,取得了突破性的研究成果^[24-26],但目前的双因素补偿仍是水质与水量两方面相对独立的补偿,双因素协同控制下的补偿机制尚需继续探究。

本文在前期研究基础上,提出水质与水量阈值联合控制下的流域水生态环境补偿机制架构(图1)。遵循人与自然和谐共生理念,面向水生态保护需求,以河流生态系统健康、河流生境整体性、河流功能多样性等为依据设置生态水量控制阈值;面向水环境治理需求,以河流水质标准、入河排污标准、水体纳污能力等为依据设置水质控制阈值。在“谁污染、谁超量、谁补偿”的原则下,建立水质与水量阈值、单位污染与缺水补偿标准、补偿主客体与补偿价值之间的响应关系,进而确定流域内各行政单元补偿客体对河流补偿主体的补偿责任,构建水质与水量双控制、超阈值判别的流域水生态环境补偿机制。

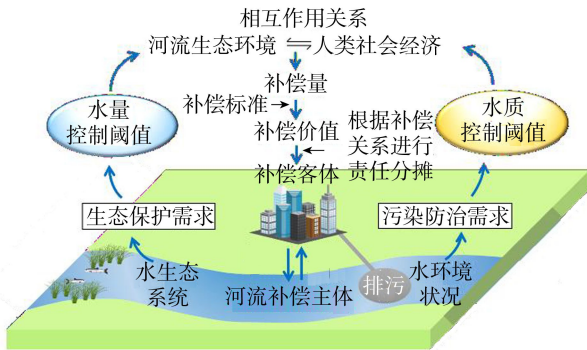


图1 水质与水量阈值联合控制下的流域水生态环境补偿机制架构

Fig. 1 Framework of watershed water ecological environment compensation mechanism under joint control of water quality and water quantity thresholds

2 水生态环境补偿控制阈值

在水生态环境补偿研究中,对于水环境污染、河流生态水量亏缺或两者共同造成的补偿问题,水环境与水生态补偿控制阈值的界定与量化是关键所在^[22,27]。

2.1 水环境补偿控制阈值

在水环境补偿研究中,通常以水质指标表征的水功能区保护目标浓度值或浓度范围作为补偿控制阈值。不同国家和组织根据河流水质本底浓度实际条件及开发利用情况,对各类水质指标的分类标准不尽相同,分别制定了相应的水质分级标准,如世界卫生组织的一类~五类水质分类标准、美国环境保护局的优~重度污染5级水质分类标准、欧盟的生

活饮用水生物指标与水质指标条例、日本安全饮用水标准等^[28-30]。我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》明确划定了各类水质指标的分类标准,结合国民经济发展规划与水资源综合利用规划指导下的水功能分区,制定了水环境补偿中较为通用的水质指标阈值,在长江、黄河、淮河等重点流域的水环境补偿研究中均有应用^[27,31-32]。此外,在缺乏河流水质监测资料地区,通常以水功能区纳污红线控制下的入河排污量或恢复成本作为控制阈值,如黄河流域污染恢复成本补偿、淮河流域典型区污染总量补偿、新安江污水排放治理补偿等^[14,33-34]。因此,在水环境补偿研究中,补偿控制阈值的制定可充分参照国家与地方标准,而其难点在于如何建立水环境补偿控制阈值与补偿价值的响应关系,目前,大多数水环境补偿研究致力于补偿机制建立与补偿价值量化。

2.2 水生态补偿控制阈值

在水生态补偿研究中,河道内补偿控制阈值多将河流生态需水量作为标准。河流生态需水量指维持河流生态系统正常生态结构和功能所必须保持的河道水量。目前国内外关于生态需水量的确定方法大致分为水文学法、水力学法、栖息地模拟法和整体分析法四大类。水文学法最早提出,通常基于历史水文序列采用保证率或生态百分比确定生态需水,常用方法包括 Tennant 法、7Q10 法、水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)法等^[35-38]。水力学法主要考虑河流水力参数(湿周、水深、水面宽等),结合经验公式进行计算,常用方法有湿周法、R2-Cross 法等^[39-40]。栖息地模拟法是近年来发展最快的方法,以保障水生动植物适宜栖息地为目标,通过建立流量或水量与栖息地生态需求之间的响应关系和数学模型,推求生态需水量,如生态-生境-流量模块化模拟模型、鱼类栖息地有效面积-流量响应模型等^[41-42]。整体分析法在前述方法的基础上,尽可能全面考虑河流生态的多方面需求,融合多种计算方法,通常以组合式、评估类与模块化的形式构建方法体系,代表方法有 BBM (building block methodology) 法、DRIFT (downstream response to imposed flow transformations) 法和 ELOHA (ecological limits of hydrologic alteration) 法以及水文-生态响应关系法^[43-45]。尽管生态需水的量化方法多样,但由于河流缺水补偿研究起步较晚,且考虑到数据资料的可获取性及方法操作的简便性,目前,生态需水阈值控制下的水生态补偿研究中,生态需水的量化仍以水文学法为主,如基于 Tennant 法确定生态流量,结合单位体积水资源价值对永定河、南

阳白河等流域的补偿研究^[18,46];基于月保证率法估算生态需水量,结合生态效益对大沽河、滇池等流域的补偿研究^[47-49];基于年内展布法确定河道基流及其外溢价值,对渭河流域的补偿研究等^[50]。尽管水生生态补偿研究已取得了一定的进展,但以河流生态需水量为控制阈值的补偿研究在生态需水量化方法改进及补偿方式结合方面仍有很大的发展空间。

水生生态补偿研究的河道外补偿控制阈值多采用维持区域社会经济发展的河流取水标准,以水权、水资源分配研究为主。分配方法大致分为指标赋权分配法与目标优化分配法两大类。指标赋权分配法根据分配原则及影响因素建立指标体系,采用综合评估数学方法计算指标权重,获取下级单元的综合指数,并按综合指数从上级到下级分配水量,常用方法包括主观类的层次分析法、特尔菲法等和客观类的熵权法、变差系数法等^[51-54]。目标优化分配法通过设置不同的社会经济用水目标与约束条件,建立水量分配优化模型,得到各对象的最佳分配量^[55]。目前,基于水权分配、水资源利用量配置、水足迹理论等建立的补偿机制在黄河、淮河、珠江、长江等流域均有应用^[21,23,56-59],为河道外水量阈值控制的水生态补偿研究奠定了基础。然而,河流取水及用水标准涉及流域和省、市、县级行政区各层次的切身利益,未来对流域与区域相关联、河道内外用水相约束的多层次河流水量分配补偿研究仍需深入探讨。

2.3 水质与水量双控阈值对补偿价值的影响

水环境补偿控制阈值以水质指标的国家或地区标准为依据,结合水功能区情况确定,得到了普遍认可与应用,但水生生态河道内、外补偿控制阈值的确定

尚未有统一的标准,河流生态需水和社会经济取水标准的量化方法及其作用于补偿价值的计算研究仍在不断更新与发展中。此外,由于水质与水量双控补偿机制研究仍处于起步阶段,水质与水量补偿控制阈值的协同判别准则与双控作用也需进一步探索。

人类在取用河流水资源的同时,也向河流排放污水,导致河流在水量与水质两方面都承担着人类带来的压力。本文提出了水质与水量补偿控制阈值与流域水生态环境补偿价值的关系,如图2所示。水质方面,多源污染物进入河流后,河流污染物浓度提高,当超过水功能区内水体自净能力时,会对水环境造成损害。可根据污染物迁移转化规律下水环境污染程度与水体价值损失程度之间的响应关系,以水功能区目标对应的水质控制阈值作为水环境损害的临界判别依据,推求水环境损害补偿价值。水量方面,水资源在一定时空范围内的有限性导致河道内外“三生”用水之间长期存在竞争与矛盾,通常以河流特定保护目标需求下的生态水量作为河道内水量控制阈值,以满足流域内各区域基本用水目标需求的河流取水量作为河道外水量控制阈值,寻求河道内外水量控制阈值协同作用下的社会经济效益与河流生态效益之间的平衡模式,推求河流生态水量亏缺补偿价值。结合上述水质与水量两方面,形成水质与水量双控阈值作用下的流域水生态环境补偿价值研究思路。

3 水生态环境补偿标准与价值

补偿标准的确定是水生态环境补偿经济价值量

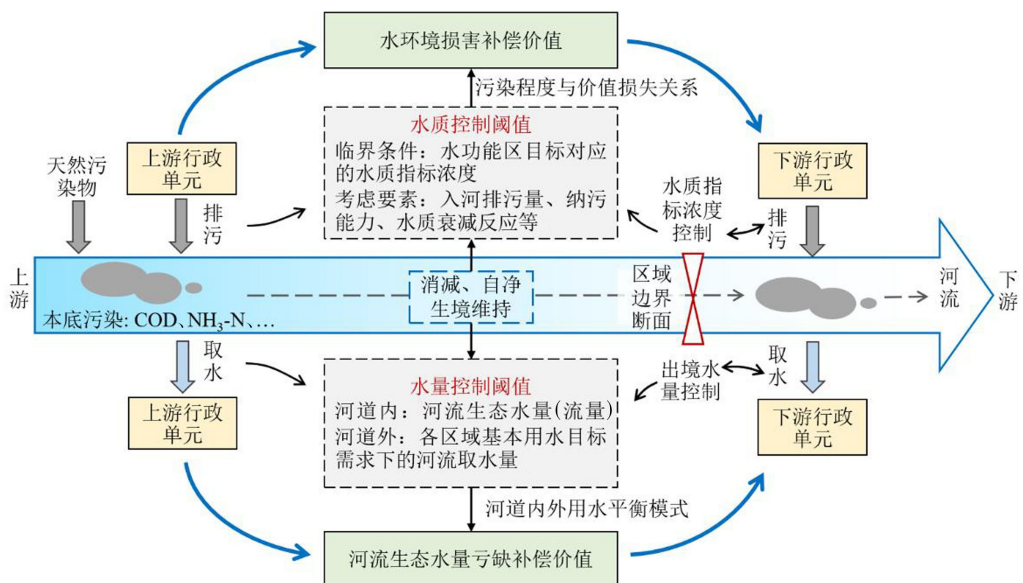


图2 水质与水量补偿控制阈值与补偿价值的关系

Fig. 2 Relationship between water quality and quantity compensation control thresholds and compensation value

化的基础与关键。目前,学者们对补偿标准的定义略有不同,主要分为两大类:①将水生态环境补偿标准定义为水生态环境损害或水资源保护所需的补偿总金额^[60];②将水生态环境补偿标准定义为单位体积污染物治理或单位体积水资源价值,结合水污染超标量、河流生态缺水量、河道外用水超标量、水污染治理量等,进一步推求水生态环境补偿总价值^[61]。无论是总量还是单位量的定义,补偿标准都是为了定量描述水生态环境补偿“补多少”的单位价值,形成流域上下游协调合作的激励机制,以促进流域水生态环境的恢复与改善。

流域水生态环境补偿标准的测算方法可以分为3类。①以实际价格作为补偿标准,即根据所在区域的现状条件或规划要求,采用污水处理成本、行业水价等作为补偿标准,或通过理论方法明确流域内各区域生态保护贡献值,对政府现有的水生态环境补偿奖励资金进行合理分配,如长江经济带生态补偿资金分配测算^[62]、湖北省典型流域生态补偿实践成效^[63]、汾河流域修复补偿水量资金来源分析等^[64],基于此制定的补偿标准符合实际情况,更容易被接受与应用,但在理论研究层面,可以进一步探索意义更广泛的补偿标准。②以经济价格作为补偿标准,通过经济学方法结合实际情况对资源成本价值进行重新测定以确定补偿标准,包括资源的直接成本、间接成本、机会成本等,常用方法包括费用分析法、支付意愿法、机会成本法、恢复成本法、市场价值估算法等。现有研究通过将上述经济学方法与水环境、水生态补偿相结合,已测算出污水处理恢复成本^[65]、水环境容量损失价值^[66]、水源地保护成本^[67]、水资源经济价值等^[68]。③以生态经济价格作为补偿标准。自然资源价值需兼顾人类社会需求与自然生态需求两方面,故补偿标准还需要体现资源的社会属性与自然属性,既需要支撑人类社会的发展,也需要维持生态系统功能。该类补偿标准的测算往往与生态学、资源学等学科交叉融合,现有方法主要包括:基于多维指标综合评价的水资源价值定量法,即考虑经济、社会、环境等各类因素对水资源的影响程度,建立多因素指标体系,结合综合评估方法确定水资源价值^[69];基于生态系统服务功能的水资源价值分析法,既考虑服务于人类社会的供给与文化功能,也考虑维持生态系统循环的调节与支撑功能,核算能够表征经济效益、社会效益与生态效益的水资源价值^[70-71];基于能值理论的水资源价值核算法,即应用能值理论分析各行业生态经济系统的能量流动关系,确定分行业水资源生态经济价值,作为水生态环境补偿标准等^[27,72-73]。水资源生态经济

价值研究在理论研究层面有很好的发展潜力,但由于考虑了自然属性,测定的补偿标准往往偏高,在实践中较难进行应用。水生态环境补偿标准从实际价格到经济价格再到生态经济价格的演进过程,也表明了补偿标准的属性叠加与内涵扩展(图3)。

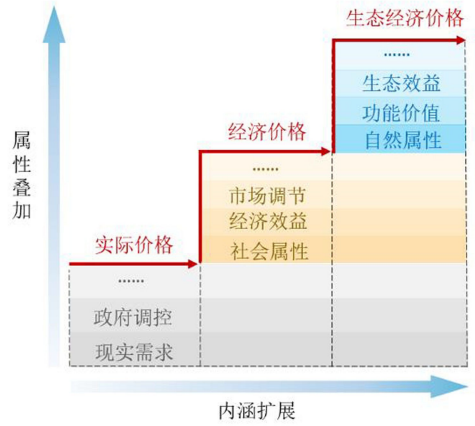


图3 补偿标准的属性叠加与内涵扩展

Fig. 3 Attribute superposition and connotation extension of compensation standard

综上,水生态环境补偿标准无论是总量还是单位量,所表征的都是水生态环境损害者所应承担或水生态环境保护者所应获得的补偿价值。水生态环境补偿标准的定量方法虽尚未有统一的认识,但3类方法都沿用至今,并根据实际或科研需求不断拓展应用与改进更新,均具有一定的应用意义与科学价值。

4 研究展望

纵观国内外对流域水生态环境补偿的补偿机制、控制阈值、标准与价值量化等方面的研究,从理论与方法上都取得了进步,并有一定的创新,对流域补偿制度的建立与生态文明的推进发挥了重要的支撑作用。但鉴于流域水环境污染与水生态破坏的多样性与复杂性,需在以下方面进一步深入研究与探讨:

a. 点面结合的多源河流水环境损害补偿控制阈值。在河流水环境损害补偿问题研究中,以地表水环境质量标准为控制目标,对于有水质实测资料河流依据关键断面实际水质指标浓度设置补偿控制阈值,对于缺乏资料河流则主要针对流域点源污染进行补偿研究。水环境补偿研究的根本目标是通过划定补偿责任,加强对水体污染源的排放控制,因此,在流域与区域相嵌套的补偿研究中,区域多源污染物共同作用的水污染损害效应至关重要,仅考虑点源污染的影响难以全面反映河流总体污染情况,补偿主体的涵盖面不全也会导致补偿责任的划定不

够明确。一方面,需进一步探究点源与面源污染相结合的水环境损害补偿机制,建立点面源结合的多源水污染补偿控制阈值、补偿主客体、补偿价值之间的响应关系;另一方面,多源水污染量化技术需进一步提高,将流域、行政区、水功能区相关联,统筹考虑沿河点源与面源污染排放情况,尝试建立多源汇集、混合叠加、损失量化的多源水污染损害量化技术体系。

b. 考虑河流生态系统服务功能的生态水量补偿控制阈值。在河流生态水量亏缺补偿问题中,河道内补偿控制阈值多将河流生态流量或水量作为标准,生态流量和水量的计算方法由水文学法到整体分析法的发展过程中,尽管生态流量的内涵逐渐丰富,但仍然是从保护河流物理条件与水生态系统健康的角度出发,而河流需兼具服务于自然的调节、支撑等功能与服务于人类的供给、文化等功能,河流生态流量和水量的内涵需进一步拓展,河流生态流量过程需形成一种适宜的水文条件,为人与自然提供水资源、环境资源,并维持各项生态功能。河流生态系统服务功能的科学量化是确定其对应生态水量的前提,能值理论能够很好地融合物质质量与价值量的评价方法,建立属性多样且功能全面的量化方法体系,具有较好的研究前景。

c. 水质与水量相互作用机理与双控演化博弈下多模式补偿策略。针对流域水环境损害补偿逐步开展了污染物多源汇集、跨区域混合传递、水体价值损失量化等方面的研究;针对河流生态水量亏缺补偿也逐步开展了河流生境需水模拟、社会经济供需水调控、河道内外用水关系协调等方面的研究。针对单项水污染或水生态补偿问题的研究成果都较为丰富,而河流水资源需要兼顾社会经济发展与生态环境保护的双重目标,保障河道内外的用水需求,且河流预留的生态水量需支撑多源污染排放下的水体自净功能,故流域水环境与水生态问题不可分割,流域水生态环境补偿研究仍需要深入探讨。今后的研究中需打破水环境污染与水生态退化单项研究的局限,解析补偿问题中水环境与水生态之间的作用机理,建立水质与水量补偿控制阈值之间的相互作用关系。目前对于水质与水量双控作用的补偿研究仍处于探索阶段,可进一步研究水质与水量双控阈值的协同判别准则与动态博弈补偿策略。

参考文献:

[1] MENG Yu, WANG Meng, XU Wenjing, et al. Structure construction, evolution analysis and sustainability evaluation of water-ecological-economic system [J].

Sustainable Cities and Society, 2022, 83: 103966.

- [2] 张帆,邓宏兵,彭永樟. 长江经济带经济集聚对工业废水排放影响的空间溢出效应与门槛特征[J]. 资源科学, 2021, 43(1): 57-68. (ZHANG Fan, DENG Hongbing, PENG Yongzhang. Spatial spillover effect and threshold characteristics of economic agglomeration on industrial wastewater discharge in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources Science, 2021, 43 (1): 57-68. (in Chinese))
- [3] 杨荣雪,王丰,王红瑞,等. 国土空间规划体系下的城市水资源空间均衡评价模型及应用[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 130-136. (YANG Rongxue, WANG Feng, WANG Hongrui, et al. Spatial equilibrium evaluation model of urban water resources and its application under territorial spatial planning system [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 130-136. (in Chinese))
- [4] 宋晓娜,经小川,张峰. 水生态文明建设质量的时空演化评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 246-252. (SONG Xiaona, JING Xiaochuan, ZHANG Feng. Evaluation on spatiotemporal evolution of water ecological civilization construction quality [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 246-252. (in Chinese))
- [5] 许凤冉,阮本清,张春玲,等. 跨区域调水生态补偿研究进展与关键技术[J]. 水利经济, 2022, 40(4): 34-40. (XU Fengran, RUAN Benqing, ZHANG Chunling, et al. Research progress and key technologies of ecological compensation for inter-basin water diversion [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4): 34-40. (in Chinese))
- [6] KEJSER A. European attitudes to water pricing: internalizing environmental and resource costs[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 183: 453-459.
- [7] VOULVOULIS N, ARPON K D, GIAKOUKIS T. The EU water framework directive: from great expectations to problems with implementation [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 358-366.
- [8] 凌星元,孟卫东,黄波. 基于多种污染物损害和生态补偿的跨界污染合作治理策略研究[J]. 管理评论, 2022, 34(12): 288-301. (LING Xingyuan, MENG Weidong, HUANG Bo. Research on cooperative governance strategy of transboundary pollution based on multiple pollutants damage and ecological compensation [J]. Management Review, 2022, 34(12): 288-301. (in Chinese))
- [9] 陈军飞,张学友,李远航,等. 考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 18-28. (CHEN Junfei, ZHANG Xueyou, LI Yuanhang, et al. Ecological compensation contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 18-28. (in

- Chinese))
- [10] LAZARIDOU D, MICHAILIDIS A. Valuing users' willingness to pay for improved water quality in the context of the water framework directive[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(5):424-434.
- [11] 马军旗, 乐章. 黄河流域生态补偿的水环境治理效应: 基于双重差分方法的检验[J]. *资源科学*, 2021, 43(11): 2277-2288. (MA Junqi, YUE Zhang. Effects of ecological compensation on water environment governance in the Yellow River Basin: a test based on difference-in-difference method[J]. *Resources Science*, 2021, 43(11): 2277-2288. (in Chinese))
- [12] GUAN Xinjian, LIU Wenkang, WANG Huiliang. Study on the ecological compensation standard for river basin based on a coupling model of TPC-WRV[J]. *Water Supply*, 2018, 18(4): 1196-1205.
- [13] 郭丽峰, 刘明喆, 张辉, 等. 基于污染物通量的潘家口—大黑汀水源地水污染生态补偿量化研究[J]. *水资源保护*, 2016, 32(5): 146-151. (GUO Lifeng, LIU Mingzhe, ZHANG Hui, et al. Quantification research of eco-compensation for water pollution in source area of Panjiakou-Daheiting Water source areas based on flux of pollutants[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(5): 146-151. (in Chinese))
- [14] GUAN Xinjian, LIU Wenkang, CHEN Moyu. Study on the ecological compensation standard for river basin water environment based on total pollutants control[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69:446-452.
- [15] 袁广达, 仲也, 郭译文. 基于太湖流域生态承载力的生态补偿横向转移支付研究[J]. *南京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 20(2): 77-87. (YUAN Guangda, ZHONG Ye, GUO Yiwen. Research on horizontal transfer payment of ecological compensation based on ecological carrying capacity of Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition)*, 2021, 20(2): 77-87. (in Chinese))
- [16] 苏荟琰, 李金燕, 魏怡敏, 等. 基于机会成本的宁夏中南部调水工程水源区生态补偿标准研究[J]. *水利经济*, 2023, 41(6): 45-50. (SU Huiyan, LI Jinya, WEI Yiming, et al. Study on ecological compensation standards in the water source area of the water diversion project in Central and Southern Ningxia based on opportunity cost[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023, 41(6): 45-50. (in Chinese))
- [17] MCMILLAN H, MONTANARI A, CU DENNEC C, et al. *Panta Rhei 2013-2015: global perspectives on hydrology, society and change*[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(7): 1174-1191.
- [18] 管新建, 高丰, 孟钰, 等. 基于河流生态水量保护的南阳市白河流域生态补偿机制研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(10): 68-71. (GUAN Xinjian, GAO Feng, MENG Yu, et al. Research on ecological compensation mechanism of Baihe Basin in Nanyang City based on river ecological flow protection[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(10): 68-71. (in Chinese))
- [19] WANG Yizhuo, YANG Rongjin, LI Xiuhong, et al. Study on trans-boundary water quality and quantity ecological compensation standard: a case of the Bahao Bridge Section in Yongding River, China[J]. *Water*, 2021, 13(11): 1488.
- [20] 曾维华, 解钰茜, 陈岩. 整合水权和排污权促进黄河流域横向生态补偿机制建设[J]. *环境保护*, 2022, 50(14): 29-31. (ZENG Weihua, XIE Yuxi, CHEN Yan. Integrate water use rights and pollutant discharge rights to promote the construction of horizontal eco-compensation mechanism in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(14): 29-31. (in Chinese))
- [21] 杨开忠, 李少鹏, 董亚宁, 等. 纳入水资源利用量配置变化的流域生态补偿机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 184-197. (YANG Kaizhong, LI Shaopeng, DONG Yaning, et al. Mechanism of river basin ecological compensation incorporating the allocation change of water resource utilization[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(11): 184-197. (in Chinese))
- [22] 强安丰, 汪妮, 雒少江, 等. 基于成本视角的水质水量双向调节生态补偿量研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 144-149. (QIANG Anfeng, WANG Ni, LUO Shaojiang, et al. Bidirectional regulation of water quality and quantity of ecological compensation based on cost perspective[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 144-149. (in Chinese))
- [23] 王中豪. 基于水量-水质双向调节的横向生态补偿标准研究: 以黄河流域陕—豫区区间为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [24] 江国旺. 基于水质水量的流域横向生态补偿标准研究: 以赣江流域宜春—南昌段为例[D]. 南昌: 江西财经大学, 2020.
- [25] 徐丽思. 基于水质水量的流域上下游横向生态补偿标准研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2021.
- [26] 杨玉霞, 闫莉, 韩艳利, 等. 基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J]. *水资源保护*, 2020, 36(6): 18-23. (YANG Yuxia, YAN Li, HAN Yanli, et al. Compensation mechanism of the Yellow River water ecology based on watershed scale[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6): 18-23. (in Chinese))
- [27] GUAN Xinjian, LIU Meng, MENG Yu. A comprehensive ecological compensation indicator based on pollution damage-protection bidirectional model for river basin[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107708.
- [28] United States Environmental Protection Agency. *National recommended water quality criteria*[R]. Washington, D.

- C. : United States Environmental Protection Agency, 2006.
- [29] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality, 4th edition [S]. Geneva: World Health Organization, 2011.
- [30] 李萌萌, 梁涛, 王真臻, 等. 日本饮用水水质检测标准化概述及启示[J]. 中国给水排水, 2022, 38(3): 131-138. (LI Mengmeng, LIANG Tao, WANG Zhenzhen, et al. Overview and enlightenment of standardization of drinking water quality detection in Japan [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(3): 131-138. (in Chinese))
- [31] JIANG Ke, YOU Daming, LI Zhendong, et al. A differential game approach to dynamic optimal control strategies for watershed pollution across regional boundaries under eco-compensation criterion [J]. Ecological Indicators, 2019, 105:229-241.
- [32] 朱琪, 罗军刚, 张璇. 河流跨界水污染双向补偿定量化研究[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(2): 185-193. (ZHU Qi, LUO Jungang, ZHANG Xuan. Quantitative study of two-way compensation for rivers transboundary water pollution[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(2): 185-193. (in Chinese))
- [33] 李晓丽, 葛颜祥, 李颖. 黄河流域横向生态补偿标准的测度研究 [J]. 科学决策, 2023 (10): 181-192. (LI Xiaoli, GE Yanxiang, LI Ying. Measurement of horizontal ecological compensation standard in the Yellow River Basin [J]. Scientific Decision Making, 2023 (10): 181-192. (in Chinese))
- [34] CHENG Yuxiang, WU Desheng, BIAN Yuan. A systematic approach of determining compensation and allocation for river basin water environment based on total pollutants control [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271:110896.
- [35] 冯平, 白粟, 张婷, 等. 径流变异对滹沱河流域水库生态调度的影响 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 99-108. (in Chinese))
- [36] 武连洲, 白涛, 黄强. 基于 RVA 阈值区间集成的河道内生态需水计算与应用 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 168-174. (WU Lianzhou, BAI Tao, HUANG Qiang. Integrated calculation of ecological water demand of rivers based on RVA threshold interval and its application [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 168-174. (in Chinese))
- [37] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (5): 454-457. (in Chinese))
- [38] 王钦, 王银堂, 胡庆芳, 等. 考虑河道内生态需水与径流情势的水库群优化调度 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5): 109-117. (WANG Qin, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Optimization of reservoir group operation considering instream ecological water demand and flow regime [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5): 109-117. (in Chinese))
- [39] 黄冬菁, 李一平, 崔广柏, 等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 142-148. (in Chinese))
- [40] MOSLEY M P. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a braided river, Ohau River, New Zealand [J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 800-812.
- [41] MENG Yu, XU Wenjing, GUAN Xinjian, et al. Ecology-habitat-flow modular simulation model for the recommendation of river ecological flow combination [J]. Environmental Modelling & Software, 2023, 169:105823.
- [42] 赵晨旭, 宋策, 曹永祥, 等. 汉江桥闸工程下游河段典型鱼种栖息地模拟研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32 (3): 151-157. (ZHAO Chenxu, SONG Ce, CAO Yongxiang, et al. Simulation of typical fish habitats in the downstream reach of Hanjiang River Bridge Sluice Project [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(3): 151-157. (in Chinese))
- [43] WANG Junna, DONG Zheren, LIAO Wengen, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: a case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56 (6): 1471-1484.
- [44] ARTHINGTON A H, RALL J L, KENNARD M J, et al. Environmental flow requirements of fish in Lesotho rivers using the DRIFT methodology [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5/6): 641-666.
- [45] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 147-170.
- [46] 马杏. 永定河流域生态需水及生态补偿机制研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [47] 解煜翔. 不确定条件下面向生态需水保障的大沽河流域生态补偿研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [48] XIE Yuxiang, KONG Fanlong, ZHANG Junlong, et al. Medium- and long-term planning of an integrated eco-compensation system considering ecological water demand

- under uncertainty: a case study of Daguhe Watershed in China [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2022, 148(10): 04022049.
- [49] 王明净. 基于生态需水和生态补偿的滇池流域水资源优化配置[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- [50] 冯颖璇. 基于河道生态基流外溢价值的生态补偿标准研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [51] GUAN Xinjian, FU Yuwen, MENG Yu, et al. Water ecology emergy analytic system construction and health diagnosis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270: 116254.
- [52] POKHREL S R, CHHIPI-SHRESTHA G, MIAN H R, et al. Integrated performance assessment of urban water systems: identification and prioritization of one water approach indicators [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 36: 62-74.
- [53] 王媛, 张志慧, 任杰, 等. 基于动态权重-云模型的大型渡槽安全综合评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 56-63. (WANG Yuan, ZHANG Zhihui, REN Jie, et al. Comprehensive evaluation of large-scale aqueduct safety based on dynamic weight-cloud model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 56-63. (in Chinese))
- [54] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [55] 方国华, 李智超, 钟华昱, 等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(3): 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(3): 10-18. (in Chinese))
- [56] LYU Cuimei, LI Huiqin, LING Minhua, et al. An innovative emergy quantification method for eco-economic compensation for agricultural water rights trading [J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(3): 775-792.
- [57] 邱宇. 不确定条件下汀江流域水资源优化配置与生态补偿研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [58] 刘红光, 陈敏, 唐志鹏. 基于灰水足迹的长江经济带水资源生态补偿标准研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(11): 2553-2563. (LIU Hongguang, CHEN Min, TANG Zhipeng. Study on ecological compensation standards of water resources based on grey water footprint: a case of the Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(11): 2553-2563. (in Chinese))
- [59] 方国华, 赵文萃, 李鑫, 等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui, LI Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 1-8. (in Chinese))
- [60] 焦蒙蒙, 何理, 王喻宣. 基于水资源格局和保险增益的区域横向生态补偿及生态系统服务价值[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 751-760. (JIAO Mengmeng, HE Li, WANG Yuxuan. Regional horizontal ecological compensation and ecosystem service value based on water resources pattern and insurance gain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3): 751-760. (in Chinese))
- [61] GUAN Xinjian, HOU Shengling, MENG Yu, et al. Study on the quantification of ecological compensation in a river basin considering different industries based on water pollution loss value [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(30): 30954-30966.
- [62] 续衍雪, 魏明海, 张雨航, 等. 基于水质的长江经济带生态补偿资金分配测算研究[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(5): 13-15. (XU Yanxue, WEI Minghai, ZHANG Yuhang, et al. Research on calculation method of ecological compensation fund allocation based on water environment quality in Yangtze River Economic Belt [J]. *Environmental Protection Science*, 2021, 47(5): 13-15. (in Chinese))
- [63] 陆青, 杨霞, 张强, 等. 湖北省流域横向生态补偿发展实践和政策建议[J/OL]. *长江科学院院报*, 2023: 1-7. [2024-06-21]. <http://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20230918.1324.010>. (LU Qing, YANG Xia, ZHANG Qiang, et al. Practice and policy suggestions of horizontal ecological compensation development in Hubei river basin [J/OL]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023: 1-7. [2024-06-21]. <http://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20230918.1324.010>. (in Chinese))
- [64] 任世芳, 马义娟. 基于生态基流的汾河流域水资源生态修复补偿研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(7): 63-67. (REN Shifang, MA Yijuan. Study on the eco-compensation of water resources in Fenhe River Basin based on the ecological flow [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(7): 63-67. (in Chinese))
- [65] 张落成, 李青, 武清华. 天目湖流域生态补偿标准核算探讨[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 412-418. (ZHANG Luocheng, LI Qing, WU Qinghua. Evaluation on the ecological compensation in Tianmu Lake [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 412-418. (in Chinese))

- [23] 蒋然,李召旭.典型河口区硝态氮短程还原成铵的活性氮累积途径研究进展[J].水资源保护,2014,30(4):10-13. (JIANG Ran, LI Zhaoxu. Active nitrogen accumulation mechanism in typical estuarine regions based on dissimilatory nitrate reduction to ammonium[J]. Water Resources Protection,2014,30(4):10-13. (in Chinese))
- [24] 陈意超,李伏生,李烙布.不同灌溉方式和尿素猪粪比例对稻田氮素转化相关微生物活性的影响[J].华南农业大学学报,2018,39(1):31-39. (CHEN Yichao, LI Fusheng, LI Luobu. Effects of different irrigation methods and ratios of urea pig manure on microbial activity related to nitrogen transformation in paddy soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 39(1):31-39. (in Chinese))
- [25] LU Z, IMLAY J A. When anaerobes encounter oxygen: mechanisms of oxygen toxicity, tolerance and defence[J]. Nature Reviews Microbiology,2021,19(12):774-785.
- [26] 谢志煌,高志颖,郭丽丽,等.土壤微生物活性和生物量对干湿交替的响应[J].土壤与作物,2020,9(4):348-354. (XIE Zhihuang, GAO Zhiying, GUO Lili, et al. Responses of soil microbial activities and biomass to drying and wetting;a review[J]. Soils and Crops,2020,9(4):348-354. (in Chinese))
- [27] DENEK K, SIX J, PAUSTIAN K, et al. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles [J]. Soil Biology and Biochemistry,2001,33(15):2145-2153.
- [28] ZHOU W P, SHEN W J, LI Y E, et al. Interactive effects of temperature and moisture on composition of the soil microbial community [J]. European Journal of Soil Science,2017,68(6):909-918.
- [29] LI Yi, XU Chen, ZHANG Wenlong, et al. Response of bacterial community in composition and function to the various DOM at river confluences in the urban area[J]. Water Research,2020,169:115293.
- [30] CHEN Danmei, LIU Qingfu, ZHANG Guangqi, et al. Enhancement of soil available nutrients and crop growth in sustainable agriculture by a biocontrol bacterium *Lysobacter enzymogenes* LE16: preliminary results in controlled conditions[J]. Agronomy,2023,13(6):1453.
- [31] YAN Junwei, SU Hantao, KUANG Xiaoxian, et al. Characteristics and mechanism of simultaneous nitrate and phenol removal by a newly isolated *Cupriavidus oxalaticus* T2[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2021,161:105234.
- [32] ZHENG Xuan, LIU Xing, YANG Hang, et al. Effect of macroporous zeolite substrate on denitrification in tidal flow constructed wetland[J]. Environmental Technology & Innovation,2023,32:103424.
- [33] YUAN Dongdan, ZHENG Lei, LIU Yongxin, et al. Nitrifiers cooperate to produce nitrous oxide in plateau wetland sediments [J]. Environmental Science & Technology,2023,57(1):810-821.
- [34] MA Lin, JIANG Xiaoliang, LIU Guihua. Environmental factors and microbial diversity and abundance jointly regulate soil nitrogen and carbon biogeochemical processes in Tibetan wetlands [J]. Environmental Science & Technology,2020,54(6):3267-3277.

(收稿日期:2024-03-06 编辑:施业)

(上接第223页)

- [66] LIU Mengkai, GUO Jing. Comparisons and improvements of eco-compensation standards for water resource protection in the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Supply,2020,20(8):2988-2999.
- [67] 穆贵玲,汪义杰,李丽,等.水源地生态补偿标准动态测算模型及其应用[J].中国环境科学,2018,38(7):2658-2664. (MU Guiling, WANG Yijie, LI Li, et al. Development and application of the dynamic calculation model for proposing a water source eco-compensation standard[J]. China Environmental Science,2018,38(7):2658-2664. (in Chinese))
- [68] FANG Zhou, CHEN Junyu, LIU Gang, et al. Framework of basin eco-compensation standard valuation for cross-regional water supply: a case study in northern China[J]. Journal of Cleaner Production,2021,279:123630.
- [69] 李晓英,江崇秀,张琛.基于云模型的城市资源水价研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):215-221. (LI Xiaoying, JIANG Chongxiu, ZHANG Chen. Study on city resource water price based on cloud model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):215-221. (in Chinese))
- [70] ZHAO Yue, WU Fengping, LI Fang, et al. Ecological compensation standard of trans-boundary river basin based on ecological spillover value: a case study for the Lancang-Mekong River Basin[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(3):1251.
- [71] 陈默,林育青,张建云,等.水生态系统生产总值核算体系及应用[J].水资源保护,2023,39(1):234-242. (CHEN Mo, LIN Yuqing, ZHANG Jianyun, et al. Accounting system of gross water ecosystem product and its application[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):234-242. (in Chinese))
- [72] LI Huiqin, LYU Cuimei, LING Minhua, et al. Emergy analysis and ecological spillover as tools to quantify ecological compensation in Xuchang City, Qingyi River Basin, China[J]. Water,2021,13(4):414.
- [73] MENG Yu, ZHANG Hao, JIANG Pengkun, et al. Quantitative assessment of safety, society and economy, sustainability benefits from the combined use of reservoirs [J]. Journal of Cleaner Production,2021,324:129242.

(收稿日期:2023-10-11 编辑:施业)