

流域国土空间生态修复:理论认知与规划要点

顾恬玮¹, 彭建², 姜虹², 贺灿飞²

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 面向国土空间生态修复对生态系统完整性的高度强调, 针对完整自然地理单元——流域的国土空间生态修复将在新时期生态文明建设中发挥重要作用。按照“一个核心—两个维度—三对关系”的基本脉络深化流域国土空间生态修复的理论认知。其中, 一个核心, 指以“水”为流域生态保护修复的核心要素; 两个维度, 包括时空两个尺度, 时间尺度重在长短兼顾、动态适应, 空间尺度强调区域整合、区际协同; 三对关系, 指在“社会—生态系统”视角下协同生态功能与人类福祉的关系, 统筹自然边界与行政界线的关系, 协调自然恢复与人工修复的关系。结合流域国土空间生态修复的系统性认知, 具体提出流域国土空间生态修复规划编制四项要点, 即定量刻画人水关系、明确时空尺度衔接、开展分区分类治理、强化自然持续保障。研究结果能够为构建可持续的流域国土空间开发保护格局提供科学支撑。

关键词: 流域; 国土空间生态修复; 人水关系; 理论逻辑; 空间规划

国土空间生态修复作为提升生态功能、改善生态环境质量的人类活动^[1], 是缓解人地矛盾、保障人类福祉的重要途径^[2,3]。党的“十八大”以来, 中国高度重视生态文明建设, 实施一系列生态保护修复政策和重大工程, 生态保护修复制度体系也日趋完善, 国土空间治理能力显著增强。“十四五”规划和2035年远景目标纲要强调, “守住自然生态安全边界, 促进自然生态系统质量整体改善”。党的“二十大”报告将“促进人与自然和谐共生”确立为中国式现代化的本质要求, 并再次强调“坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理”, 把生态系统的完整性作为生态系统发挥生态功能、实现自然修复的前提条件, 对国土空间生态修复的系统性与协调性提出更高要求。

作为具有完整生态结构的自然地理单元, 流域包括了河流、湖泊、丘陵、森林、荒漠、农田、城镇等多种生态系统, 流域国土空间生态修复理论上具备更高的修复效益^[4,5]。流域生态修复起源于河流治理, 经历了从河流水质单目标治理到全流域综合修复的发展历程。20世纪中期, 欧洲多国为了解决工业污染问题, 联合启动莱茵河治理计划, 形成了国际河流保护与修复示范经验^[6]。21世纪初期, 《欧洲水框架指令》(EU Water Framework Directive) 将水生态修复的重点从河流转向了完整的流域生态系统, 为流域系统修复提供了行动框架^[7]。国内流域系统化治理虽然起步较晚, 但成果丰硕。自20世纪50年代开始, 中国陆续开展七大流域综合规划编制与修订, 逐步完善了江河治理体系。2016年, 中国全面推行以河长制、湖长制为代表的流域综合管理方案, 为提升流域生态环境质量奠定了基础^[8]。面向一体化保护需求, 中国又进一步作出长江经济带建设、黄河流域生态

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-07-01

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2021BEG03019)

作者简介: 顾恬玮 (1998-), 女, 辽宁丹东人, 硕士, 研究方向为国土空间生态修复。E-mail: twgu@stu.pku.edu.cn

通讯作者: 彭建 (1976-), 男, 四川彭州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为景观生态与土地利用、区域生态持续性评估、综合自然地理学。E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

保护和高质量发展两项宏观战略部署，就统筹流域尺度系统治理做出了重大探索^[9]。总体而言，提升生态系统完整性是当前国际社会的共同关注，开展流域生态系统保护修复是其中一项研究热点。综合考虑流域生态保护和经济发展目标，探索流域国土空间保护与修复的规划路径，是对中国国土空间生态修复规划体系的重要补充，也是新时期生态文明建设的重要方向^[10,11]。然而，流域国土空间生态修复仍然存在着理论指导科学性不足、实践方案可用性不强等现实问题^[12,13]，亟需进一步凝练流域生态保护修复的科学认知与规划要点。

因此，本文基于“一个核心—两个维度—三对关系”的基本逻辑梳理流域国土空间生态修复的理论认知，进一步提出定量刻画人水关系、明确时空尺度衔接、开展分区分类治理、强化自然持续保障四大规划要点，以期促进理论指导和规划实践的辩证统一，为新时期国土空间生态质量整体提升提供科学支撑。

1 流域国土空间生态修复理论认知

流域国土空间生态修复的对象是由自然生态、社会经济因素共同驱动的复杂开放系统，需要综合运用景观生态学、流域生态学、恢复生态学以及地理学人地关系论等学科观点，对流域内社会—生态要素进行系统梳理与优化配置。深入理解流域系统中的要素关联、过程耦合与空间集成是支撑国土空间生态修复的科学前提^[14]。按照“一个核心—两个维度—三对关系”的逻辑主线厘清流域国土空间生态修复的理论内涵（图1）：一是以水作为统筹流域山水林田湖草沙全要素的核心，深化对流域生态修复对象的理解；二是从空间与时间两个维度，厘清整体与局部、长期与短期之间的关系，提升流域生态修复的可持续性；三是立足人与自然的关系，协同生态保护与社会发展目标，统筹自然边

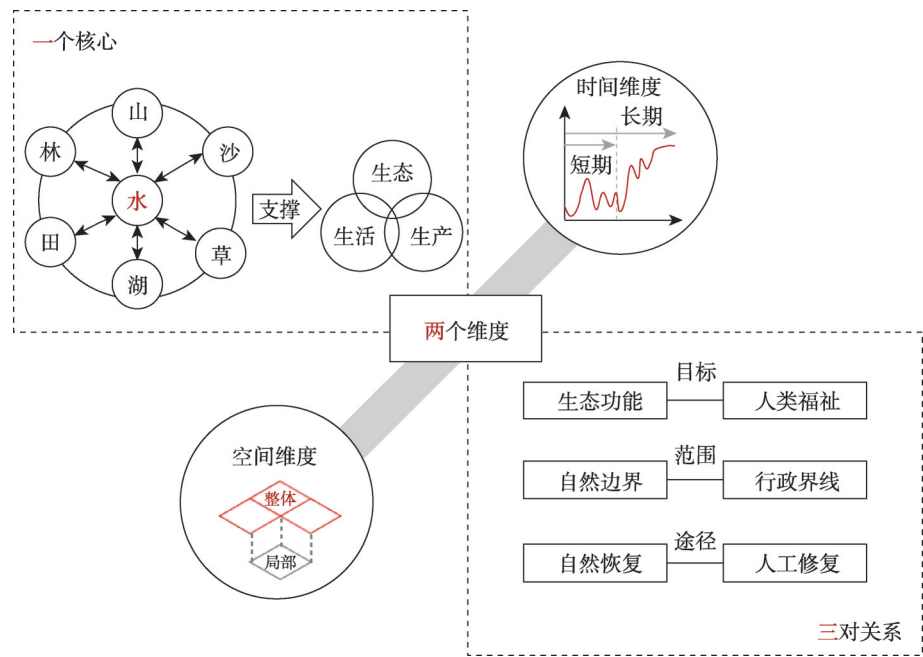


图1 流域国土空间生态修复理论认知

Fig. 1 Theoretical cognition of watershed-based territorial ecological restoration

界与行政界线,协调自然恢复与人工修复共同“做功”,从目标、范围和途径三个层次保障流域国土空间生态修复的系统性。

1.1 “一个核心”——准确识别以“水”为核心的关键要素

流域是以河湖水系为基底的完整生态系统,“水”是流域生态保护修复的核心要素^[15]。一方面,流域水循环过程与生态系统服务的空间流动高度相关。例如,流域水土保持服务在上下游地区呈现出明显的供需错位特征,明确水沙运移过程在流域上下游一体化的生态系统管理中具有重要指导意义^[16];另一方面,一系列生态问题的解决(如植树造林)往往受到水资源供给条件的制约,特别是在半干旱、干旱地区,如果不考虑用水量影响,盲目扩大退耕还林还草工程规模反而会加剧生态系统的长期退化^[17]。

流域一方面面临着水资源短缺、植被退化、土壤流失、自然灾害威胁等生态风险,另一方面也存在着区域发展失衡、产业结构低效等社会经济发展问题。传统的单要素线性治理模式违背了自然发展规律,忽视了生态系统构成要素之间的耦合关联,导致生态保护修复工作难以达到预期的整体效益^[18]。因此,流域国土空间生态修复的重点是识别“水”与其他自然生态要素的相互作用关系和动态变化特征,在此基础上构建山水林田湖草沙全自然要素和以“人”为核心的社会经济要素的耦合联系,基于流域水资源生态承载力优化要素分配,规避生产、生活、生态用水竞争^[19],立足生命共同体的高度系统谋划全域全要素综合治理。例如,云南抚仙湖流域山水林田湖系统治理项目,即是利用关键要素“湖”与“水”的生态过程串联山、林、田等要素,根据问题导向和目标指引原则部署生态保护修复工程,满足区域社会、经济、生态可持续发展的需求^[20,21]。

1.2 “两个维度”——深入把握时间和空间两大维度

流域国土空间生态修复是一项长期性、系统性战略目标,需要从时间和空间两个维度出发明确生态保护修复工作的尺度依赖,确保工程措施的稳健有效。

(1) 时间尺度重在长短兼顾、动态适应。生态系统兼具复杂性与动态性,伴随着人类活动干扰下的生态系统演替过程,生态系统状态也会相应发生变化,需要根据实际情况对修复方案进行动态调整,确保生态系统质量在长时序范围稳定提升^[22]。特别是在气候变化背景下,流域开发保护同时面临陆地储水量失衡与发展用水需求日益增加的双重压力^[23]。因此,流域国土空间生态修复需要立足当下,解决流域生态系统核心生态问题(如水源涵养、防洪防灾、水质提升等),通过严格自然保护地监管、退耕还林、河岸带综合整治等措施,为进一步提高生态系统质量奠定基础。面向长期的远景规划,则需要从单一系统优化转向生态网络构建,同时结合生态修复需求的动态变化开展生态修复模式的适应性调整。例如,内蒙古乌梁素海流域初期的主要矛盾是湖区面积急剧减少、生态功能严重退化,后期主要目标则是在提升自然要素协同性的基础上,进一步促进“人、地、业”要素整体优化布局,当地经过分时、分区、分步部署生态修复项目,完成了从保护湖区到保护完整生态系统,从解决生态问题到促进社会—生态协调发展的转型^[24,25]。

(2) 空间尺度强调区域整合、区际协同。流域既是一个包含多种要素的完整系统,同时也是更大尺度流域或区域系统的组成部分^[26]。不同社会—生态要素之间的相互作用形成了完整的流域生态结构与过程,也使得各个子系统(如上下游、左右岸、干支流)之间产生复杂联系。例如,上游地区人类扰动有可能经过水体运移过程形成放大效应,从而对下游及流域整体生态系统稳定性造成损害^[27]。因此,开展流域系统治理需要以全自然要素的区域协调系统治理为基本前提,强化基于水循环的不同地区之间的耦合关

联, 同时关注不同地区之间资源禀赋和发展水平的客观差异, 基于空间全局视角推进区域协同、实现全局社会—生态系统最优的系统治理目标。

1.3 “三对关系”——从目标、范围、途径三个层次实现人与自然和谐共生

不断加剧的人类活动正在深刻影响着自然生态系统的结构与功能。以人类为主体的社会经济系统与自然生态系统之间的耦合关系越发密切, “社会—生态”复合系统已成为当前生态保护修复的基本视角^[28]。流域是人与自然共存的空间载体, 开展生态保护修复工作需要把握生态修复系统性、长期性的基础上, 进一步协调好人与自然的关系。

(1) 协同生态功能与人类福祉的关系。从国际生态修复的理念发展来看, 21世纪以来人们对于“社会—生态”复合系统的关注度显著提升, 兼顾人类福祉提升与生态系统健康成为了首要目标, 需要在明确各要素相互影响路径和机理的基础上, 开展山水林田湖草沙一体化保护修复。流域生态系统涵盖了水循环、养分运移、水沙输移等多个完整的生态过程^[29,30], 为人类提供了水源涵养、土壤保持、洪水调蓄、产品供给、休闲游憩等多重生态系统服务^[31-33], 是人类社会保持生产生活稳定的基本保障。生态系统服务与人类福祉存在复杂联系^[34], 人类福祉的实现过程不可避免会对流域生态过程造成干扰^[35], 进而导致自然生态系统脆弱性加剧^[36], 损害生态系统贡献人类福祉的能力。提升生态系统结构与功能的多样性, 进而提高生态系统抗干扰能力是保护与修复的直接目标。面向社会—生态复杂系统可持续发展需求, 还需要在提高生态环境承载能力的同时转变生产方式与发展理念, 积极实现人类福祉与生态功能的双重提升。

(2) 统筹自然边界与行政界线的关系。完整的生态过程通常在一个流域边界内发生, 而出于管理便利的需要, 生态保护修复工作往往基于行政区划开展。但中国的省市县各级行政界线往往使得自然空间被人为割裂, 对生态系统完整性构成强大冲击, 不利于生态系统整体质量提升^[37,38]。中国自2017年开始试点的五批44个山水工程充分考虑到生态修复的整体性与系统性, 基于自然地理格局确定项目实施范围, 为全面推进一体化保护修复提供了重要经验。然而, 流域内部的发展差异导致不同行政区之间的利益博弈客观存在, 限制了流域治理成效整体提升, 生态系统与社会系统协同机制有待进一步完善落实^[39,40]。

(3) 协调自然恢复与人工修复的关系。工业文明以来, 人类生产力水平(亦即对自然的影响能力)逐渐提升, 可以依赖人工技术手段进行生态保护与治理, 如水坝、河堤等硬质基础设施能够有效应对洪水灾害, 但也带来了河流生境破碎化的风险^[41]。以自然恢复为主的生态修复方针是开展流域国土空间生态修复的更优途径, 也是正确处理人地关系、人水关系的基础。按照自然恢复与人工修复强度的比例差异, 通常可以将生态保护与修复途径区分为利用(更好地利用现有自然生态系统)、恢复(调整现有生态系统的解决方案)、重建(创建和管理新生态系统的解决方案)三大层次^[42]。由于流域水系之间的自然本底条件、生态系统退化机制与受损程度存在明显的时空分异特征, 需要针对不同水系空间的主导问题, 因地制宜确定治理模式。对于轻微退化的系统仅需适当的人工引导系统自然恢复, 而退化严重的生态系统则应通过生态重建来适时遏制退化趋势^[43]。

2 流域国土空间生态修复规划要点

国土空间生态修复规划是一项服务于生态文明建设和高质量发展的专项规划, 既要

深化各级国土空间规划中生态修复和国土综合整治的目标,同时也要细化生态保护和修复的实施途径,对各类保护修复项目作出统筹安排^[44]。专项规划一般在国家、省和市县层级编制,或针对特定的区域或流域尺度展开。区域是一种客观存在、主观划分的地域形式,多以行政单元作为空间基础(例如京津冀地区、长三角地区、粤港澳大湾区等等),区域规划为地方政府跨区域生态治理协同联动提供了支撑。流域是按照自然边界划分的特殊地理单元,河流水文作用使得自然与社会要素之间的联系更为紧密。流域规划同样关注协调跨行政区域的生态问题,但在方案制定过程中更为尊重自然生态系统的发展规律,基于系统思维解决流域内部复杂的人水矛盾。总体而言,流域与区域是基于不同地理认知与发展需求所确定的空间规划具体边界,二者相辅相成,在生态文明建设中均发挥着重要作用。当前区域国土空间生态修复规划编制方案已经基本成熟,而流域国土空间生态修复规划将成为下一步协调跨区域生态保护修复问题的重要抓手,有必要梳理规划编制重点,服务国土空间规划体系建设。

相较而言,流域国土空间生态修复规划突破了行政单元的限制,在区域国土空间生态修复规划编制内容的基础上,还需在本底调查、尺度传导、实施途径以及规划保障四个层面进一步明确工作要点(图2)。其中,本底调查需特别强调人水关系的定量刻画,基于供需确定各项规划目标的用水安排;尺度传导则需以本底调查结果为基础依据,在空间尺度下明确流域规划与其他相关规划的关系,在时间尺度上开展全周期实施监测确保规划有序落实;实施途径层面重在分区分类管理,需要结合不同尺度下的观测和分析开展系统设计,基于规划手段确保流域上下游、左右岸协同发展;规划保障的关键在于吸纳国际前沿的生态恢复理念,为规划方案实施提供可持续保障。

2.1 定量刻画人水关系

流域生态修复的重点在于调节流域人水关系,缓解国土空间开发与保护矛盾。其中,“人”是干扰活动的实施主体,以“水”为核心的自然要素是抵抗干扰的主体,二者

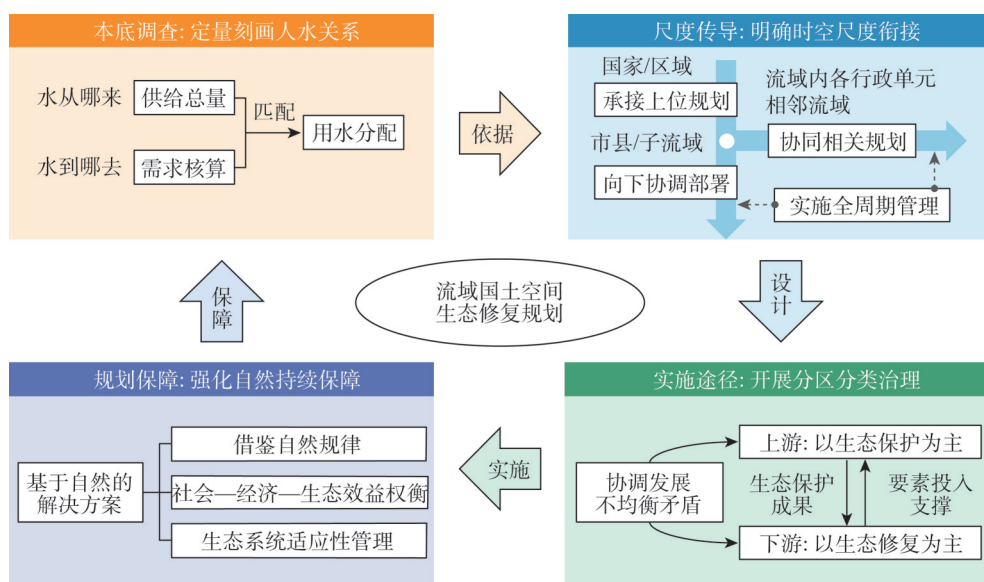


图2 流域国土空间生态修复规划要点

Fig. 2 Key planning issues of watershed-based territorial ecological restoration

之间的关系决定了生态系统的健康水平^[45]。流域尺度开展的国土空间生态修复仍然遵循生态保护修复专项规划的任务要求，但需要在规划导向与任务安排等方面进一步突出以水为核心的规划特色，统筹水资源约束、水生态基底、水环境容量、水灾害规避作用，基于社会—生态过程串联各项自然生态与社会经济要素，协调经济、社会、生态三方面发展目标对水资源利用的现实矛盾，提出流域多目标协同优化方案，推动全面绿色转型发展。在规划编制前期阶段，需要开展科学的本底调查工作，明确水资源供给与需求的关系，即回答“水从哪儿来，水到哪儿去”两方面密切相关的问题：一方面需要对地表生态过程进行定量刻画，明确流域内天然径流量、地下水位等水文特征年际变化趋势，科学计算流域内可支配的水资源供给总量，突出水资源对生态保护修复以及社会经济发展的刚性约束；另一方面则需要测算生态保护、工业发展以及农业灌溉等方面的水资源利用系数，统筹保障流域内生态安全、粮食安全以及能源安全的用水需求，依据水资源生态承载力协调生态用水指标。科学的量化结果不仅能够协调自然生态过程和社会经济过程，为生态保护与社会发展提供综合水资源保障，还能够杜绝生态工程项目过度取水等问题，避免对生态环境造成二次破坏^[46]。

2.2 明确时空尺度衔接

流域国土空间生态修复规划是对现行国土空间规划体系的重要补充，有必要进一步明确流域尺度规划编制在国土空间规划体系中的职能作用。从空间尺度上看，流域国土空间生态修复规划具有明显的层次性特征，纵向视角上需要承接上位规划（包括国家级重大战略规划、区域国土空间规划等）的生态保护格局、生态修复目标任务，也需要针对市县或子流域尺度具体生态保护修复实践开展协调性部署，实现从宏观总体目标制定到中微观具体保护修复措施遴选的有效衔接。流域作为完整的自然地理单元，其规划范围往往呈现尺度大、跨行政区域的特点，从横向视角来看需要遵循全域修复的系统思想，协调流域内外关系：对内建立统一规划平台，一方面统筹流域内各行政单元形成规划合力，另一方面需要配合各类专项规划，协同构建生态保护、农业生产以及城镇开发格局，确保规划核心目标一致、空间布局统一；对外关注与相邻流域之间的溢出效应、协同效应，统筹解决跨流域生态安全问题。与此同时，在时间尺度上则需要做好流域国土空间生态修复规划的全周期管理，开展适应性调节：规划方案应首先明确各类生态保护修复工程项目的建设时序，中后期则需要通过定期体检与评估识别规划实施瓶颈，及时调整规划方案以适应新发展需求。

2.3 开展分区分类治理

流域国土空间生态修复规划编制既要尊重自然规律，更要协调社会经济发展需求，统筹实施分区分类管理。流域上下游区位不同，经济发展水平之间的差异客观存在，规划编制的难点在于如何落实整体保护、系统修复的规划理念，协调上下游发展不均衡的矛盾。流域国土空间生态修复规划应从自然地理格局的空间异质性入手，针对上下游的不同阶段发展特点按需施策，提出协同治理的有效路径^[47-49]。一般而言，流域上游地区的生态系统健康状况关系流域整体的生态安全，应以生态保护作为主要导向，重构自然保护地体系以增强生态系统稳定性与生物多样性。流域下游地区往往是社会经济发展的重要承载地，应重点开展生态保护和修复工程，提高生态环境承载能力，支撑区域可持续发展。规划还应同时考虑到上下游生态补偿政策的顶层设计，基于生态系统服务付费等政策补偿工具提升上下游地区协同治理的积极性，确保全流域居民都能够切实享受到生

态修复带来的惠益^[50,51]。在流域分区基础上,可以按照开展修复的适宜性与可行性,划分保护、恢复、重建等生态修复类型,作为项目落地实施的基本依据。总体来看,分区从较为宏观的角度剖析自然资源本底特征与生态系统功能的格局,分类则是基于系统要素组合特征,在中微观尺度上划分不同的保护修复措施。

2.4 强化自然持续保障

流域生态保护与修复工作既要立足中国国情,也要兼具全球视野。基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)集成了国际前沿生态系统管理方法,不仅将自然作为生态保护修复的对象,同时也将其视作解决社会问题的有效途径,倡导借助小规模人工修复提升大尺度自然保护与恢复成效,增强生态保护修复可持续性。NbS是保护、可持续利用和修复自然的或被改造的生态系统的行动^[52],以景观作为主要研究尺度^[53]。从修复途径来说, NbS强调人工与自然方法集成的系统化途径,强调尊重并运用自然规律应对社会挑战^[54];从修复目标来看, NbS不是仅追求生态治理,而是倡导社会—生态协同发展^[55];从修复手段来看, NbS并非一成不变的解决方案,而是更强调根据生态系统动态变化,实施适应性管理^[56]。因此, NbS与流域一体化保护修复理念高度契合,能够有效保障规划可持续性^[57]。NbS涵盖从方案规划、工程设计以及项目管理的全过程^[58]:在规划设计初期, NbS强调借鉴自然规律,通过关键生态过程识别,从源头规避生态退化,实现一体化修复;在中期的工程设计阶段, NbS倡导统筹生态供给与社会需求,权衡社会—经济—生态三方面的效益,促进多目标协同实现;在规划设计后期阶段,生态系统适应性管理是项目实施的重点保障,需要结合自然生态系统状态、社会经济发展水平及其变化趋势,以及工程实施效果适时调整保护修复目标与策略,结合管理与控制手段引导系统韧性提升^[59]。NbS所蕴涵的借鉴自然规律、多目标效益权衡以及生态系统适应性管理等规划理念能够为可持续推进流域国土空间开发与保护协同提供核心支撑。

3 结论

流域国土空间生态修复立足完整生态单元,是新时期实现国土空间整体保护、系统修复的关键途径。如何凝练流域国土空间生态修复的系统认知,进而指导规划实践仍然是当前亟待解决的关键问题^[60]。“一个核心—两个维度—三对关系”的认知逻辑,从修复对象、修复尺度以及修复模式三个方面深化流域国土空间生态修复的理论内涵,为促进流域可持续发展提供了认知基础。受限于流域生态系统的异质性、复杂性,本文仅对流域国土空间生态修复基本逻辑做出一般性探讨,未能完全覆盖所有要素关联与过程耦合,流域生态修复的理论方法仍有待进一步深入探索。研究所提出的流域国土空间生态修复规划四项要点,为新时期有序推进流域生态保护与修复工作提供了有效工作指引,但尚未形成完整的规划路径。下一步研究中应当聚焦典型流域特质分析,探讨因地制宜的流域生态保护与修复规划方案编制技术要点。

参考文献(References):

- [1] 曹宇,王嘉怡,李国焜. 国土空间生态修复:概念思辨与理论认知. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1-10. [CAO Y, WANG J Y, LI G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations. China Land Science, 2019, 33(7): 1-10.]
- [2] 彭建,李冰,董建权,等. 论国土空间生态修复基本逻辑. 中国土地科学, 2020, 34(5): 18-26. [PENG J, LI B, DONG J Q, et al. Basic logic of territorial ecological restoration. China Land Science, 2020, 34(5): 18-26.]
- [3] 王静,方莹,翟天林,等. 国土空间生态保护和修复研究路径:科学到决策. 中国土地科学, 2021, 35(6): 1-10. [WANG

- J, FANG Y, ZHAI T L, et al. Research framework for territorial ecological conservation and restoration: From scientific research to decision making. *China Land Science*, 2021, 35(6): 1-10.]
- [4] 邓楚雄, 刘唱唱, 李忠武. 生态修复背景下流域国土空间韧性研究思路. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 11-20. [DENG C X, LIU C C, LI Z W. Research path on the resilience of watershed territorial space under the background of ecological restoration. *China Land Science*, 2022, 36(5): 11-20.]
- [5] GRIZZETTI B, LIQUETE C, PISTOCCHI A, et al. Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 452-465.
- [6] VAN PELT S C, SWART R J. Climate change risk management in transnational river basins: The Rhine. *Water Resources Management*, 2011, 25: 3837-3861.
- [7] VOULVOULIS N, ARPON K D, GIAKOURIS T. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 358-366.
- [8] 沈坤荣, 金刚. 中国地方政府环境治理的政策效应: 基于“河长制”演进的研究. *中国社会科学*, 2018, (5): 92-115, 206. [SHEN K R, JIN G. The policy effects of local governments' environmental governance in China: A study based on the evolution of the "River-Director" system. *Social Sciences in China*, 2018, (5): 92-115, 206.]
- [9] 郝庆. 以流域为单元的山水林田湖草沙一体化保护修复. *中国国土资源经济*, 2022, 35(9): 31-36, 53. [HAO Q. Protection and restoration for the integration of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasslands and sands based on watershed. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 35(9): 31-36, 53.]
- [10] 刘文平, 宋子亮, 李岩, 等. 基于自然的解决方案的流域生态修复路径: 以长江经济带为例. *风景园林*, 2021, 28(12): 23-28. [LIU W P, SONG Z L, LI Y, et al. Application of nature-based solutions in ecological restoration of watershed: A case study of the Yangtze River Economic Belt. *Landscape Architecture*, 2021, 28(12): 23-28.]
- [11] DING Z W, ZHENG H, WANG J, et al. Integrating top-down and bottom-up approaches improves practicality and efficiency of large-scale ecological restoration planning: Insights from a social-ecological system. *Engineering*, 2022, Doi: 10.1016/j.eng.2022.08.008.
- [12] 王启轩, 任婕. 我国流域国土空间规划制度构建的若干探讨: 基于国际经验的启示. *城市规划*, 2021, 45(2): 65-72. [WANG Q X, REN J. On the institutional construction for territorial planning of China's river basin: The enlightenment from international experience. *City Planning Review*, 2021, 45(2): 65-72.]
- [13] ABELL R, VIGERSTOL K, HIGGINS J, et al. Freshwater biodiversity conservation through source water protection: Quantifying the potential and addressing the challenges. *Aquatic Conservation- Marine and Freshwater Ecosystems*, 2019, 29(7): 1022-1038.
- [14] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 3-13. [PENG J, LYU D N, DONG J Q, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 3-13.]
- [15] 曹伟. “双碳”目标下的流域生态环境保护规划: 理念更新与措施调适. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(12): 31-40. [CAO W. Watershed ecological and environmental protection planning under the 'dual carbon' goals: Concept renewal and measure adjustment. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(12): 31-40.]
- [16] XU B C, PAN J H. Simulation and measurement of soil conservation service flow in the Loess Plateau: A case study for the Jinghe River Basin, Northwestern China. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109072, Doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109072.
- [17] FENG X M, FU B J, PIAO S L. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [18] 王夏晖, 何军, 饶胜, 等. 山水林田湖草生态保护修复思路与实践. *环境保护*, 2018, 46(Z1): 17-20. [WANG X H, HE J, RAO S, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements. *Environmental Protection*, 2018, 46(Z1): 17-20.]
- [19] ZHANG X Y, XU D Y, WANG Z Y, et al. Balance of water supply and consumption during ecological restoration in arid regions of Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 2021, 186: 104406, Doi: 10.1016/j.jaridenv.2020.104406.
- [20] 彭建, 吕丹娜, 张甜, 等. 山水林田湖草生态保护修复的系统性认知. *生态学报*, 2019, 39(23): 8755-8762. [PENG J, LYU D N, ZHANG T, et al. Systematic cognition of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8755-8762.]

- [21] 牛远, 胡小贞, 王琳杰, 等. 抚仙湖流域山水林田湖草生态保护修复思路与实践. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 482-490. [NIU Y, HU X Z, WANG L J, et al. Ideas and practice of ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in Lake Fuxian Basin. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 482-490.]
- [22] CALLIARI E, STACCIONE A, MYSIAK J. An assessment framework for climate-proof nature-based solutions. Science of the Total Environment, 2019, 656(15): 691-700.
- [23] LI X Y, LONG D, SCANLON B R, et al. Climate change threatens terrestrial water storage over the Tibetan Plateau. Nature Climate Change, 2022, 12(9): 801-807.
- [24] 田野, 冯启源, 唐明方, 等. 基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究: 以乌梁素海流域为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8826-8836. [TIAN Y, FENG Q Y, TANG M F, et al. Ecological protection and restoration of forest, wetland, grassland and cropland based on the perspective of ecosystem assessment: A case study in Wuliangsuhai Watershed. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8826-8836.]
- [25] 罗明, 于恩逸, 周妍, 等. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略. 生态学报, 2019, 39(23): 8692-8701. [LUO M, YU E Y, ZHOU Y, et al. Distribution and technical strategies of ecological protection and restoration projects for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8692-8701.]
- [26] NIKA C E, GUSMAROLI L, GHAFOURIAN M, et al. Nature-based solutions as enablers of circularity in water systems: A review on assessment methodologies, tools and indicators. Water Research, 2020, 183: 115988, Doi: 10.1016/j.watres.2020.115988.
- [27] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理. 中国土地科学, 2019, 33(2): 1-11. [BAI Z K, ZHOU W, WANG J M, et al. Overall protection, systematic restoration and comprehensive management of land space. China Land Science, 2019, 33(2): 1-11.]
- [28] 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. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 337-345. [WANG R S, OUYANG Z Y. Social-economic-natural complex ecosystem and sustainability. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 337-345.]
- [29] 程思, 于兴修, 李振炜, 等. 流域输沙量变化归因分析方法综述. 地理科学进展, 2021, 40(12): 2140-2152. [CHENG S, YU X X, LI Z W, et al. Review on the methods to separate the impacts of climate and human activities on sediment discharge. Progress in Geography, 2021, 40(12): 2140-2152.]
- [30] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26. [HAO L, SUN G. Impacts of urbanization on watershed ecohydrological processes: Progresses and perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 13-26.]
- [31] 孔令桥, 郑华, 欧阳志云. 基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复: 以洞庭湖流域为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8903-8910. [KONG L Q, ZHENG H, OUYANG Z Y. Ecological protection and restoration of forest, wetland, grassland and cropland based on the perspective of ecosystem services: A case study in Dongting Lake Watershed. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8903-8910.]
- [32] 莫兴国, 刘苏峡, 胡实. 黄河源区气候—植被—水文协同演变及成因辨析. 地理学报, 2022, 77(7): 1730-1744. [MO X G, LIU S X, HU S. Co-evolution of climate-vegetation-hydrology and its mechanisms in the source region of Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1730-1744.]
- [33] 夏沛, 宋世雄, 刘志锋, 等. 中国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价研究进展. 生态学报, 2020, 40(17): 5884-5893. [XIA P, SONG S X, LIU Z F, et al. Research progress of evaluation on the impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem services in inland river basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5884-5893.]
- [34] LIU L M, WU J G. Ecosystem services-human wellbeing relationships vary with spatial scales and indicators: The case of China. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 172: 105662, Doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105662.
- [35] JIA Z M, CAI Y P, CHEN Y P, et al. Regionalization of water environmental carrying capacity for supporting the sustainable water resources management and development in China. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 134: 282-293.
- [36] JIANG C, GUO H W, WEI Y P, et al. Ecological restoration is not sufficient for reconciling the trade-off between soil retention and water yield: A contrasting study from catchment governance perspective. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142139, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142139.
- [37] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 64-69. [FU B J. Several key points

- in territorial ecological restoration. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(1): 64-69.]
- [38] 夏皓轩, 岳文泽, 王田雨, 等. 省级“双评价”的理论思考与实践方案: 以浙江省为例. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2325-2338. [XIA H X, YUE W Z, WANG T Y, et al. Theoretical thinking and practical scheme of "double evaluations" at provincial level: A case study of Zhejiang province. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2325-2338.]
- [39] 廖建凯, 杜群. 黄河流域协同治理: 现实要求、实现路径与立法保障. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(10): 39-46. [LIAO J K, DU Q. Collaborative governance of the Yellow River Basin: Realistic requirements, realization approaches and legislative emphases. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(10): 39-46.]
- [40] 王江, 王鹏. 流域府际生态协同治理优于属地治理的证成与实现: 基于动态演化博弈模型. *自然资源学报*, 2023, 38(5): 1334-1348. [WANG J, WANG P. The justification of inter-government ecological collaborative governance in the river basin better than territorial governance and its realization path: Based on the dynamic evolutionary game model. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(5): 1334-1348.]
- [41] BELLETTI B, DE LEANIZ C G, JONES J, et al. More than one million barriers fragment Europe's rivers. *Nature*, 2020, 588: 436-441.
- [42] EGGERMONT H, BALIAN E V, AZEVEDO J M N, et al. Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe nature-based solutions, an emerging term. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 2015, 24(4): 243-248.
- [43] 白中科, 师学义, 周伟, 等. 人工如何支持引导生态系统自然修复. *中国土地科学*, 2020, 34(9): 1-9. [BAI Z K, SHI X Y, ZHOU W, et al. How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems. *China Land Science*, 2020, 34(9): 1-9.]
- [44] 叶玉瑶, 张虹鸥, 任庆昌, 等. 省级国土空间生态修复规划编制的思路与方法: 以广东省为例. *热带地理*, 2021, 41(4): 657-667. [YE Y Y, ZHANG H O, REN Q C, et al. The thought and methodology of ecological restoration planning of national land space at the provincial level: A case study of Guangdong province. *Tropical Geography*, 2021, 41(4): 657-667.]
- [45] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等. 国土空间生态修复布局研究进展. *地理科学进展*, 2021, 40(11): 1925-1941. [WANG C X, LIU Y X, YU C Y, et al. Research progress on the arrangement of territorial ecological restoration. *Progress in Geography*, 2021, 40(11): 1925-1941.]
- [46] STRASSBURG B B N, IRIBARREM A, BEYER H L, et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 2020, 586(7831): 724-729.
- [47] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 3024-3032. [GUO Y, LIANG C, LI X W. Priority conservation pattern of wetlands in the Yellow River Basin based on systematic conservation planning. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9): 3024-3032.]
- [48] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法: 以长江流域为例. *生态学报*, 2019, 39(3): 835-843. [KONG L Q, WANG Y Q, ZHENG H, et al. A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 835-843.]
- [49] 付扬军, 师学义. 基于小流域尺度的县域国土空间生态修复分区: 以山西汾河上游为例. *自然资源学报*, 2023, 38(5): 1225-1239. [FU Y J, SHI X Y. Ecological restoration zoning of county-level territorial space based on small watershed scale: A case study of the upper Fenhe River in Shanxi. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(5): 1225-1239.]
- [50] 靳乐山, 楚宗岭, 邹苍改. 不同类型生态补偿在山水林田湖草生态保护与修复中的作用. *生态学报*, 2019, 39(23): 8709-8716. [JIN L S, CHU Z L, ZOU C G. Role of various types of eco-compensation in ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakesgrasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8709-8716.]
- [51] 白中科. 国土空间生态修复若干重大问题研究. *地学前缘*, 2021, 28(4): 1-13. [BAI Z K. The major issues in ecological restoration of China's territorial space. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 1-13.]
- [52] DONATTI C I, ANDRADE A, COHEN-SHACHAM E, et al. Ensuring that nature-based solutions for climate mitigation address multiple global challenges. *One Earth*, 2022, 5(5): 493-504.
- [53] COHEN-SHACHAM E, ANDRADE A, DALTON J, et al. Core principles for successfully implementing and upscaling nature-based solutions. *Environmental Science & Policy*, 2019, 98: 20-29.
- [54] 陈梦芸, 林广思. 基于自然的解决方案: 一个容易被误解的新术语. *南方建筑*, 2019, (3): 40-44. [CHEN M Y, LIN G S. Nature-based solutions: A new term that is easily misunderstood. *South Architecture*, 2019, (3): 40-44.]
- [55] RAYMOND C M, FRANTZESKAKI N, KABISCH N, et al. A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban area. *Environmental Science and Policy*, 2017, 77: 15-24.

- [56] 王志芳, 简钰清, 黄志彬, 等. 基于自然解决方案的研究视角综述及中国应用启示. 风景园林, 2022, 29(6): 12-19. [WANG Z F, JIAN Y Q, HUANG Z B, et al. A review of nature-based solutions research perspectives and enlightenments thereof to the application in China. Landscape Architecture, 2022, 29(6): 12-19.]
- [57] ALBERT C, BRILLINGER M, GUERRERO P, et al. Planning nature-based solutions: Principles, steps, and insights. Ambio, 2021, 50: 1446-1461.
- [58] KUMAR P, DEBELE S E, SAHANI J, et al. Towards an operationalisation of nature-based solutions for natural hazards. Science of the Total Environment, 2020, 731: 138855, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138855.
- [59] WAMSLER C, WICKENBERG B, HANSON H. Environmental and climate policy integration: Targeted strategies for overcoming barriers to nature-based solutions and climate change adaptation. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119154, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119154.
- [60] 王军, 彭建, 傅伯杰. 关于粤港澳大湾区一体化生态保护修复的思考与建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 288-293. [WANG J, PENG J, FU B J. Integrated ecological protection and restoration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: Thoughts and suggestions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 288-293.]

Watershed-based territorial ecological restoration: Theoretical cognition and key planning issues

GU Tian-wei¹, PENG Jian², JIANG Hong², HE Can-fei²

(1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Territorial ecological restoration highly emphasizes ecosystem integrity. For watersheds, complete natural geographical units, territorial ecological restoration will play an important role in the construction of ecological civilization in the new era. According to the context of "one core-two dimensions-three connections", the theoretical cognition of watershed-based territorial ecological restoration is deepened. Among them, "one core" refers to "water" as the core element of watershed ecological protection and restoration. "Two dimensions" includes two scales of time and space, among which temporal scale focuses on the balance in the short term and long term, and the dynamic adaptation, while the spatial scale emphasizes regional integration and inter-regional cooperation. "Three connections", proposed from the perspective of "social-ecological systems", refers to the coordination of ecological functions and human well-being, the coordination of natural boundaries and administrative boundaries, and the coordination of natural restoration and artificial restoration. Combined with the systematic cognition of watershed-based territorial ecological restoration, four key points of watershed ecological restoration planning are proposed, including quantitative characterization of the relationship between human and water, clarity on connection between spatial and temporal scales, implement governance by zoning and classification, and strengthening of planning sustainability by nature-based solutions. The research results can provide scientific support for the construction of sustainable pattern of watershed territorial development and protection.

Keywords: watershed; territorial ecological restoration; human-water relationship; theoretical logic; spatial planning