

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.01.001

国内灰绿基础设施协同策略研究进展及展望

王欣,朱峰,方圆,明卉

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司北京第三分公司,北京市100080)

摘要:从构建城市生命支持系统的视角,重新认知灰色与绿色基础设施以及灰绿协同的重要性。通过系统梳理国内相关研究,总结灰绿协同在涉水基础设施、交通基础设施、能源基础设施三个热点方向上的研究进展,继而提出灰绿协同的概念、内涵、特征及理论框架,为后续细化的协同技术体系提供理论支撑和现实依据。此外,探讨灰绿协同理论在过往研究中的局限,并在长期视角下针对协同方向、协同技术、协同评价、协同数字化提出四点展望,为强化基础设施协同,扎实推进生态文明建设提供相应建议。

关键词:市政基础设施;绿色基础设施;灰绿协同

中图分类号: TU99

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)01-0001-08

0 引言

基础设施的概念源于国外,又称基础结构。国内则通常将城市基础设施理解为工程性的市政基础设施,这些设施构成了城市主要物质支撑体系,为城市社会和经济活动的可持续进行提供了坚实的基础。近些年,随着人们对城市生态价值有了更深刻的认识,绿色基础设施的概念也得到广泛接受,认为其作为自然生命的支持系统,是实现城市可持续发展的重要保障。可以说市政基础设施和绿色基础设施共同构成了城市生命支持系统,发挥着物质供给、安全保障、生态保护、环境提升等功能,因此两者的协同发展被广泛认为是城市可持续发展的关键。这种协同发展通常被称为灰绿基础设施协同(下文简称灰绿协同),旨在整合传统的市政基础设施和绿色基础设施,以实现多方面的效益,包括降低成本、应对气候变化、提高资源利用效率以及改善生活质量等。尽管灰绿协同目前在水利与排水领域有一定研究和实践,但在其他领域的灰绿协同探索较少,也缺乏灰绿协同完整理论体系的研究。

本研究从构建城市生命支持系统视角出发,重新定义灰绿基础设施研究范畴,并通过梳理国内相关领域灰绿协同的研究方向与热点,总结灰绿协同的概念、内涵、特征与理论框架,为后续细化的协同技术体系提供理论支撑和现实依据。此外,研究还探

讨了灰绿协同理论在过往研究中的局限,为强化基础设施协同,扎实推进生态文明建设提供相应的建议。

1 灰色基础设施与绿色基础设施

1.1 相关概念

关于灰色基础设施(Grey Infrastructure),国际上通常将其定义为传统工程规划中的城市支持系统,如道路、机场、桥梁、市政下水管网等,以及确保工业化经济正常运行所必需的公共设施构成的网络^[1]。国内则有一些文献将其等同于市政基础设施,参考国家发布的市政基础设施相关法律法规,其主要包括城市道路、公共交通、供水、排水、燃气、热力、园林、环卫、污水处理、垃圾处理、防洪、地下公共设施及其相关附属设施的土建、管道、设备安装工程^[2]。本文将灰色基础设施界定为支持城市生命的工程性基础设施,因此结合城市生命线系统^[3]所涵盖的对公众日常生活至关重要的交通、通信、电力、供水、供气、人防等基础设施,以及市政基础设施中的工程性基础设施,将灰色基础设施的范畴划定为六大类,即城市综合防灾系统、通信通讯系统、环保环卫系统、能源供应系统、供水排水系统和交通运输系统。

关于绿色基础设施(Green Infrastructure),通常是指“自然生命支撑系统”,即由水道、绿道、湿地、公园、森林、农场和其他保护区域等组成的相互连接的网络^[4]。结合国内土地划分方法,本文将绿色基础设施的范畴划定为六类,即城市绿地系统、自然水系统、森林生态系统、草原生态系统、湿地生态系统、农田生态系统。

收稿日期:2023-10-13

作者简介:王欣(1981—),男,博士,高级工程师,主要从事市政工程专业。

灰色基础设施与绿色基础设施分类见表1。

表1 灰色基础设施与绿色基础设施分类

分类	类型	代表性设施
灰色基础设施	城市综合防灾系统	消防、防洪排涝、防灾、抗震
	通信通讯系统	电信、广播、电视、雷达、声纳、导航、遥控与遥测、遥感
	环保环卫系统	环境保护、环境卫生
	能源供应系统	供电、供暖、供燃气
	供水排水系统	水资源保护、给排水
	交通运输系统	道路、桥梁、隧道、地铁、轻轨高架、公共交通、停车场等
绿色基础设施	城市绿地系统	公园、游憩林荫带、居住区绿地、交通绿地、附属绿地、生产防护绿地、风景区绿地、道路广场等
	自然水系统	江、河、湖、海、运河、地下水
	森林生态系统	防护林、用材林、经济林、薪炭林、特种用途林
	草原生态系统	草甸草原、典型草原、荒漠草原及高寒草原
	湿地生态系统	沼泽湿地、湖泊湿地、河流湿地、滨海湿地、人工湿地
	农田生态系统	林地、耕地、牧草地、果园、茶园和竹园等

1.2 单一基础设施所面临的问题和挑战

灰色基础设施和绿色基础设施各有其优点和挑战。灰色基础设施主要通过物质、能量、信息等要素的供给与循环,为市民的生活和城市正常运行提供保障,高效、稳定和安全是其追求的主要目标。但现实中由于过度强调灰色基础设施的功效,往往导致了资源的浪费、环境的破坏及高昂的成本,灰色基础设施“机械式”的做法忽视了其应具有生态、社会、文化功能。同时,灰色基础设施的“刚性”特征,也使得其在面对极端情况时变得极为脆弱,难以适应与恢复。

相比之下,绿色基础设施则通过自然生态过程为人们和城市提供普惠型生态系统服务功能,包括净化水质、改善空气和土壤质量、增强生物多样性、增加娱乐空间、减缓和适应气候变化等,具有功能复合性和韧性。但绿色基础设施也因为受到自然条件的制约,呈现出转化效率较低、稳定性弱、承载力有限等局限性。

1.3 灰绿协同研究方向

正是普遍认识到单一基础设施的问题和挑战,为发挥灰色与绿色基础设施各自的优势,学界普遍开展了灰绿协同的跨学科研究,主要涵盖了排水、水利、交通、能源等多个领域。研究在不同层次上展开,在城市规划层面,强调城市灰绿基础设施整体布局

的考虑;在工程设计层面,专注于灰绿协同的创新工程方案制定;在工程工艺层面,考虑具体工艺过程的优化;在工程施工层面,牵涉灰绿协同项目的实施和维护。此外,在不同的研究层次上,也有多个方面的关注,包括构建理论框架,以建立系统化的方法体系;开发支持项目设计和管理的技术方法,以提高实际操作的效率;开展效益评估,以量化灰绿协同对社会、经济和环境带来的益处。

这种多角度、多层次的研究有助于更全面地理解和应用灰绿协同,因此,本文将对已有的灰绿协同的研究文献进行分析,总结研究方法,并提出更系统的理论框架。

2 灰绿协同的研究热点

总结目前的灰绿协同研究,热点主要集中在涉水基础设施灰绿协同、交通基础设施灰绿协同、能源基础设施灰绿协同以及灰绿协同数字化4个研究方面。

2.1 涉水基础设施灰绿协同研究

2.1.1 生态水利

传统水利工程,即灰色基础设施,在防洪减旱、提升水资源利用、推动经济发展方面发挥着不可或缺的作用。然而,其过度使用对河流连通性、水体自净能力、河道生态等造成深远影响,使生态环境持续受到威胁。生态水利建设是从流域生态系统^[5]的视角出发,统筹考虑水循环、生态环境及社会经济发展,借助“灰绿协同”策略,实现从仅注重治水工程到综合管理水资源和水生态系统转变。

早期生态水利工程研究主要聚焦于理论内涵和特点,强调以可持续发展为基础,追求人水和谐、协调共生,集中总结新的治水、用水思路 and 理念^[6]。在研究内容方面,樊江串^[7]等通过对比分析生态水利工程与传统水利工程的优缺点,总结优化生态水利工程的基本设计原则。随着相关理论的日益成熟和研究方法的不断发展,以及相关技术工艺的持续完善,后来的学者开始逐渐关注生态理念与现代水利工程的融合后如何科学合理地处理各种工程技术问题和实际应用效果^[8,9],从理论摸索逐步转变为实践探索与应用。近年来一些学者开始关注评价体系方面,栗欣如等^[10]认为,生态要素评价在水利发展评价中日益重要。建议未来应从水利绿色发展出发,构建包含水资源利用、水环境保护、水生态修复等多子系统的评价指标体系,实现更完善的水利绿色发展评价。另一

些学者^[11,12]也开始研究生态水利工程的设计、施工、运行和维护对水域及周围生态环境的影响,运用定性和定量分析相结合的方法,致力于完善科学合理、公正统一、具有一致性和代表性的生态环境影响评价指标、方法、标准与机制。

2.1.2 海绵城市

海绵城市的本质是雨洪管理,旨在采用多种方案实现雨水蓄积、延缓洪峰流量、收集雨水并合理利用等功能。由于绿色基础设施兼具“自然存积、自然渗透、自然净化”的功能和灰色设施不具备的生态价值、文化价值,因此城市雨水系统的控制措施也开始逐步由以传统的灰色基础设施为主向源头减排、过程控制、系统治理的全过程、多层次的“灰绿协同”转变。

目前“灰绿协同”已经成为海绵城市建设的研究核心之一。在实际效能方面,李江云^[13]、侯精明等^[14]认为灰绿协同基础设施相较于单一灰色或绿色基础设施在应对防洪排涝、削减溢流污染等问题中具有明显优势。在协同体系方面,杨青娟等^[15]基于城市建成区中雨水管网和城市绿地工程系统的关联要素分析,在场地、局部区域和区域三个层级进行优化要素和途径研究,并提出了设计优化程序。杨帆等^[16]总结梳理现阶段灰绿协同在海绵城市建设领域的关键障碍及优化模式。翟俊将灰绿协同整合并实现区域内生态网络、交通网络、户外步行网络的一体化发展范式。在技术方法方面,部分学者通过模型模拟改进规划技术方法,常用的包括水量平衡模型和 SWMM 模型^[17],后者已被国内研究者广泛应用到城市暴雨径流量和污染负荷量的估算与预测,以及绿地系统的布局和排水管网的设计中。在此基础上,部分学者构建多目标优化模型,将经济效益、生态效益的变化规律纳入研究范围,增强方案优选的科学性。

2.1.3 污水治理

城镇污水来源广泛,包含居民生活废水及工业废水。城市污水管道建设复杂且昂贵,常因资金不足而无法及时更新设备,从而影响处理效率,甚至导致未经充分处理的污水被直接排放。此外,城镇污水处理面临各地经济发展不均衡和生态环境、人口等方面的差异,导致处理方式存在明显差异,对污水处理工作开展的效率有着严重的影响。

在此背景下,人工湿地等“灰绿协同”的污水处理技术因其低建设成本和便于后期维护等优势逐渐受到重视^[18,19]。这种兼具水处理功能与生态景观功能

的工程系统通过模仿自然湿地的生态系统中植物和微生物的协同作用,不仅有效去除污水中的污染物^[20],还充分利用当地资源,降低建设和维护成本,弥补了传统处理设施的不足。相关研究主要集中在在污水处理厂尾水处理和生态修复两个方面。管策等^[21]认为,将人工湿地作为一种深度处理二级出水的有效手段,可大幅消减进入收纳水体的氮磷污染负荷,改善收纳水体的水质。张晓维^[22]、洪松等^[23]借助实际案例探讨了表流人工湿地在黑臭水体治理中的应用,认为具有自净能力的表流人工湿地技术在降低建设成本和人力成本方面具有优势。

地下污水处理厂因其节省土地资源、噪声污染小、与周围景观相协调的优势在近些年逐渐受到广泛关注。刘玉瑛等^[24]在针对深圳布吉地下污水厂的研究中指出,其创新性地将城市污水处理和绿色基础设施融合,引领了基础设施“灰绿协同”的新模式。在生态价值方面,张增强等^[25]在研究中指出,将污水处理后产生的污泥用于种植的植物、花卉、草地的土壤中,有助于提前开花时间、延长花期、增加植物花量,并延长草地的绿色期。但由于地下污水处理厂的“灰绿协同”理念还处于起步阶段,大多数的地上景观设计以局部修复利用为主要建设目标,并没有系统性考虑以污水处理厂为代表的景观功能和生态功能。

2.2 交通基础设施灰绿协同研究

2.2.1 交通绿廊与绿道

在交通绿廊领域,“灰绿协同”理论强调依托铁路、公路等交通干线打造生态廊道,系统性地连接自然斑块,增强网络连接性,综合性规划交通廊道和绿道,超越传统的单一价值取向,实现自然资源与城市基础设施的协调。

在评价体系方面,夏梦婷等^[26]和刘扬等^[27]分别构建了铁路沿线景观生态评价体系和绿道协同评价体系,定量分析不同绿色廊道与道路之间的协同作用,并以此提出了相应的规划方法和应用途径。在协同方法方面,刘圣维等^[28]顺应城市更新脚步,利用交通路线的连接特征,以滨水空间和交通灰空间为城市更新的类型,探索绿道优化的新方向。姜雪等^[29]在全域旅游视角下对宁安市现状绿道进行网络空间解析,通过 GIS 技术模拟优化达到资源整合的效果。王富^[30]从微观设计角度提出了绿道与绿色交通的融合方式。李正等^[31]基于洛杉矶都市区圣莫妮卡山的山地绿道,探讨了公路与绿道叠加合作规划方法和应

用途。在实际应用方面,芦建国^[32]、周旭丹等^[33]从景观生态学的角度,探讨了铁路景观廊道建设中的景观配置模式和协同设计方法,并提出了基于自然资源和生态环境保护的景观廊道建设意见。

2.2.2 立体复合开发

土地资源的紧缺造成了城市绿地与其他基础设施在用地上的严重矛盾。绿色基础设施与地下空间的复合开发策略成为有效的缓解手段,基础设施不再与绿地竞争有限的地表空间,而是更加利用地下空间实现与绿色基础设施的有机融合。

“灰绿协同”的复合式绿色廊道模式有效利用城市土地的垂直空间潜力,在不扩展道路红线的前提下,显著增大了道路绿色空间,运用生态原理解决了环境问题。贺月元等^[34]探索了基于集约利用、缝补城市功能等手段的地铁盖上空间景观优化设计方法。郁枫^[35]通过实际案例,探索了将 TOD 模式与科技园建设结合,建构地上——地下完善公共空间体系的新模式。赵万民^[36]从生态优先理念出发,探讨了 TOD 廊道导向的低碳生态途径,并提出复合中枢系统的构建方式及过程,认为 TOD 廊道的构建有赖于轨道交通、绿地系统、城市基础设施步行系统等专项规划的整合。该模式重新连接了被道路分割的区域,促进了道路两侧社区市民的交流,拓展了社会服务功能,与城市可持续发展目标相符,具有实际价值和普适性。

2.3 能源基础设施灰绿协同研究

2.3.1 “光伏+”综合利用模式

随着光伏产业的迅猛发展,光伏电站场地面积大、土地利用效益不高的问题日益显现。近年来,因地制宜发展“光伏+”综合利用模式,推进光伏治沙、林光互补、农光互补、牧光互补,实现太阳能发电与生态修复、农林牧渔业等协同发展,提升经济与生态的双重价值,已经成为一个新兴的研究领域。

在工程选址上,有学者提出光伏电站除了主要考虑自然条件和经济效益两个方面以外,生态效益也是决定光伏电站选址的重要因素。例如,光伏电站建设对植被和土壤固碳能力的影响在不同地区具有明显差异。因此,光伏电站规划时可以选择在能预期大幅度提升电站整体生态效益的区域,能够进一步辅助政府和企业进行科学决策。在技术方法方面,不同学者结合实践应用案例,分别进行了渔光互补^[37]、“光伏+”荒漠化治理^[38]、“光伏+”矿区治理^[39]和“光伏+”土地治理^[40]等多方面的探索。这些方式共同

现了光伏发电与绿色生态发展的有机结合,实现了社会、经济和生态效益的多赢局面,为光伏产业的可持续发展提供了重要方向。但多数研究停留在具体的工程项目,在宏观规划层面的研究尚处于探索阶段。在环境影响评估和效益评价方面,田政卿等认为光伏电站建设可以提高植被盖度和植物生产力,特别在荒漠等生态系统中可一定程度上改善生态环境,王旭采用模糊层次分析法构建了综合效益评价模型,并对渔光互补光伏电站项目进行了综合评价。尽管目前有大量研究报道光伏电站对生态系统可能具有的效应,但实验性论据尚不充分,对生态系统功能影响机制的研究更为少见,无法为生态保护与修复提供依据。

2.3.2 绿色水电工程

水力发电是一种利用水流动能产生电力的可再生能源,它在能源产业中扮演着重要的角色。传统的水电站运行多单纯追求发电效益的最大化,对生态效益解决水库群调度生产运行所面临的生态问题不够重视。近年来,基于绿色发展理念,国内外学者针对如何既能有效推动经济发展,还能够发挥生态环境保护的重要职能,实现兴利、生态、防洪等多个调度目标的协同优化开展了一系列研究。其中,以水电清洁能源与生态环境相互协调发展为核心的绿色水电评估成为研究热点,取得了比较丰富的研究成果。部分学者提出在重大规划编制方面,将生态用水纳入流域水资源统一配置和管理,并对现有水利水电工程进行绿色生态改造、制定水利水电工程生态调度方案、强化生态流量依法管控和执法监管等改进措施和建议;部分学者针对均衡考虑电站群经济和生态效益的工程需求和科学问题,开展了水库群多目标生态优化调度建模理论与优化技术等方面的研究;部分学者建立了覆盖水电工程项目全生命周期的生态保护—经济效益—社会影响评估体系,以保证我国水电工程项目建设中每个环节的“绿色性”,促进我国水电清洁能源的可持续发展;还有部分学者提出了采取生态补偿^[41]的方法和措施,以修复受到水电站建设破坏的生态环境,增强生态系统的韧性和适应性。

此外,大部分的水电站位于高山深河地区,自然环境优美,生物种类繁多,因此水电站旅游资源作为水体旅游资源的一大种类,一直被视为我国水资源综合利用的重要组成部分。近年来,我国水利旅游领域供给和需求均呈快速增长趋势。国内已有文献研

究主要集中在水电站旅游现状分析^[42],水电站旅游开发的可行性研究^[43],水电站与其他产业联合开发,水电站旅游资源的开发、利用和价值评价,水电站旅游的可持续发展研究^[44],以及个案研究等方面。这些研究有助于深入了解水电站旅游的潜力和挑战,为该领域的进一步发展提供了有力支持。

2.4 数字化灰绿协同研究

数字化城市基础设施建设,即运用物联网、云计算、大数据、GIS等技术把城市中分散的诸如交通、水利、能源、环境等城市子系统协同到一起,实现数据的实时收集、分析、环境评估、智能决策和项目管理,形成一个具有高协调性的有机整体。其作为提高城市效率、优化资源管理、支持智能决策、改善环境质量、促进经济增长、提高城市韧性、推动数字经济发展的有效手段,逐渐受到研究者的关注和重视。

在涉水基础设施的灰绿协同方面,数字化研究主要聚焦于智慧水务^[45]领域,综合运用数字化技术,以实现更科学、更精细的灰绿协同。这种数字化方法主要依次应用于以下几个方面:首先,通过构建“源—网—厂—河”一体化的智慧排水系统,采取源头、过程、末端相结合的系统治理思路,控制源头污染、提升管网效能、污水处理、恢复河湖水体容量,保障河湖自然调节、生态和社会服务功能;其次,利用数字孪生技术,通过信息采集和数字化监测优化大型给水工程的取水、输水、净化和分配系统,通过严格检测实时控制水生态环境质量,将对生态环境的影响降到最低;再次,在海绵城市建设中,借助物联网监测雨水和排水系统,可提高城市的可持续性;最后,通过数字监测,可进行水体污染监测和防洪流域调度。

交通基础设施灰绿协同则聚焦于环境监测方面,数字化传感器和监测系统可以用于监测交通基础设施对环境的影响,包括噪音、大气质量和水质。结合GIS数据建立数字化地图和监测系统,用于识别和保护重要的生态通道,以便野生动物能够安全地迁徙,减少因交通基础设施而引起的生态障碍。

在能源基础设施灰绿协同研究中,主要聚焦于生态流量监测,通过数字化检测系统远程监测水库、河流等水体的实时水位(或流量)以及水电站的实时下泄流量等数据,并将其与电站的生产运行数据相结合进行深度分析。此举不仅有助于满足环境生态保护的需求,还能够优化电站的运行,以满足可持续

发电和资源管理等方面的学术和实际要求。

3 结语

3.1 灰绿协同的概念与内涵

综合灰绿协同的相关研究方向和热点,可以发现其共同点均是在探讨城市基础设施领域中人工系统与自然系统的有机协调,以实现城市生态、经济、社会效益的统一。在生态价值方面,灰绿协同以可持续发展为核心,强调协同过程中的生态保护、环境治理、资源节约,维护人类生存与发展的基础;在经济价值方面,灰绿协同以循环经济为核心,强调协同过程中各要素的高效利用、科学配置、协调统一;在社会价值方面,灰绿协同以人与自然和谐共生为核心,强调协同过程中满足人们更高质量的健康、安全和精神文化需求。可以说,灰绿协同实践中所包含的人与自然环境和谐共处、经济持续发展、城市良性循环的理念,完整体现了生态城市理论的核心价值观。因此,本文提出灰绿协同的概念,即以生态城市理论为基础,以城市良性循环、可持续发展和人与自然和谐共生为原则,通过灰色与绿色基础设施协同作用,形成城市生态、经济、社会更高质量综合效益的城市生命支持基础设施系统。

以生态城市为理论基础,灰绿协同的内涵体现为以下4个方面。

(1)安全韧性:灰绿协同下的城市安全既包括维护生活生产的传统基础设施的安全,也包括维护生态环境健康的生态基础设施安全。两者相互支撑、互为补充,在应对极端自然与人为灾害时维护城市安全,并体现出耐受、适应和快速恢复的韧性特征。

(2)复合高效:灰绿协同强调灰色与绿色基础设施在功能属性、空间组织、运作过程方面的复合,叠加灰色基础设施的功能效应与绿色基础设施的生态效应,实现节约资源与能耗基础上的整体功能增强与效益增加。

(3)绿色低碳:灰绿协同强调灰色与绿色基础设施在规划、设计、建造、施工、运维的全生命周期内运用绿色低碳的技术方法,通过节能、降碳、减污、扩绿实现可持续发展并最大化发挥灰绿协同的生态价值。

(4)品质服务:灰绿协同在满足城市安全、健康、绿色、发展基础上,更要体现灰绿协同背后的文化价值、美学价值、休闲价值,并积极借助数字化赋能,为人们提供更高品质的城市服务。

3.2 灰绿协同的特征

灰绿协同理论主要呈现出以下四点特征。

(1)系统性:虽然城市不同基础设施子系统之间有明确的专业分工,如灰色基础设施主要负责城市的功能性需求,而绿色基础设施则主要关注生态和环境方面的需求,但灰绿协同将其作为一个整体,在功能属性、空间组织、运作过程中彼此协调,并在外部影响下能保持稳定和平衡,形成一个更加综合和可持续的城市生命支持系统,因此不能将其割裂。

(2)动态性:由于人类科学技术的进步以及对自然认知能力的提升,灰色与绿色基础设施的形式、功能、协作方式都会发生变化,比如新型灰色基础设施的创新、绿色基础设施潜在价值的发现、灰绿协同方法的更新迭代、灰绿协同工程技术的改进等,因此,灰绿协同理论的发展也是动态演化的。

(3)复杂性:灰绿协同支持生态城市建设,而城市核心要素人的复杂性,决定了目标与体系构成的复杂性。同时灰绿协同涉及不同类型基础设施,其协同方向不仅涉及总体的系统协同,也包括功能协同、空间协同、工艺协同、运维协同、数字化协同等分支领域的协同,体现了协同过程的复杂性。

(4)层次性:灰绿协同因研究范畴不同其研究重点也有所不同,体现出区域、城镇和项目三个不同层次。区域尺度上灰绿协同重点是通过合理布局灰绿基础设施,协调分配资源能源等要素、协同风险防范与生态环境治理、协作产生最大综合效益,促进三生协调发展。城镇尺度上灰绿协同重点是协调各子系统功能、结构和运作模式,实现系统集成最优。项目尺度上灰绿协同重点是探索项目全生命周期中的灰绿协同,实现相关模式与技术的融合。

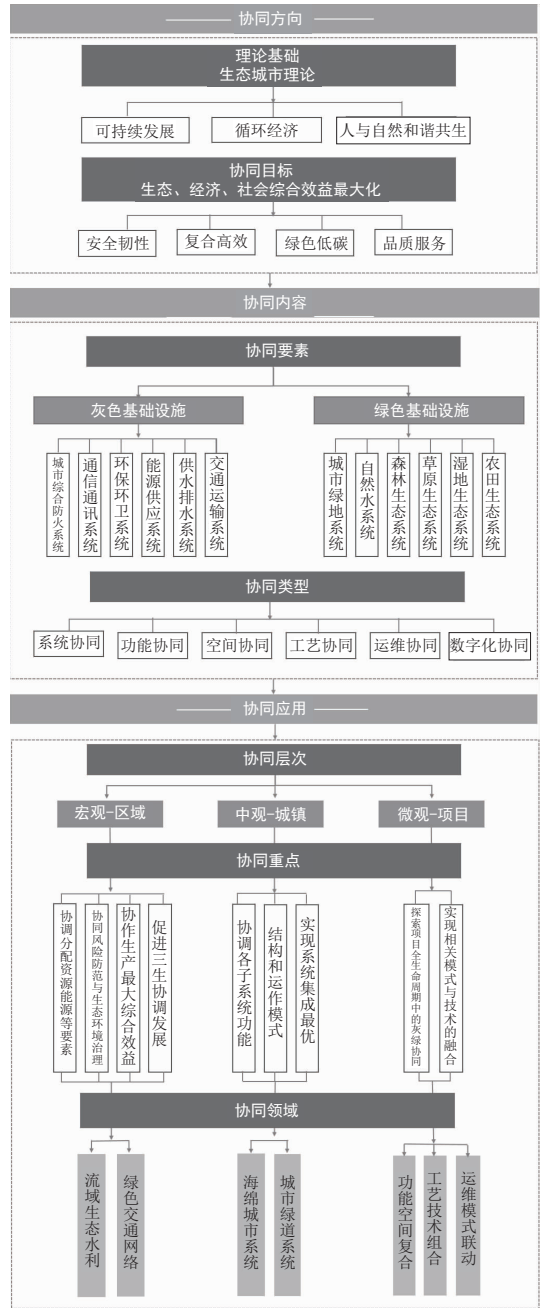
3.3 灰绿协同的理论框架

基于上述研究,本文提出灰绿协同的理论框架,旨在促进宏观、中观和微观不同层面的研究和实践,以更全面地理解和应对生态城市发展中的多样挑战,如图1所示。

3.4 灰绿协同研究的挑战

结合当前不同领域灰绿协同的实践研究,以及本文提出的灰绿协同理论框架,笔者认为仍存在着一些亟待面对的问题。

(1)灰绿协同研究主要集中在涉水基础设施领域,在交通、能源领域及相关数字化灰绿协同方面的研究相对匮乏,特别是与自然进行密切物质能量循环的环卫系统方面几乎没有相关研究。



(2)尽管全球范围内存在大量工程实践经验和可供借鉴的成功案例,但是往往忽视了在规划协调、战略决策方面的协同,灰绿协同尚未在顶层设计中发挥其应有的价值。

(3)目前的灰绿协同研究主要局限在市政各专业体系内,主要关注系统自组织、新技术与技术集成、施工管理三方面的绿色化,缺乏跨专业间有关灰绿设施布局的协同统筹,多元协同发展的思维也不够成熟,全局性思考不足。

(4)在效益评价体系方面,目前的研究主要集中在项目内部效益,对于项目外部衍生效益评价不足,往往导致个体最优而非城市整体最优。

4 展望

结合未来发展趋势,本文提出了关于灰绿协同应用发展4个方面的展望。

(1)从协同方向看,应逐步将焦点从工程领域的灰绿结合转向更高层次的规划领域的灰绿统筹。开展灰绿协同的城市生命支持基础设施综合规划和相关专项规划,以指导不同层级的国土空间规划。

(2)从协同技术看,应该从单一专业领域的灰绿结合发展为跨学科的多维灰绿共生。这需要摒弃当前各领域孤立研究的模式,结合生态环境导向的开发模式(EOD)和区域综合开发的契机,打通专业壁垒,实现整合布局。

(3)从协同评价看,应该从项目内部效益评价转向内外部综合效益评价。综合考虑灰绿协同与城市的发展阶段、生态环境特色、功能空间特点、产业发展特征间的关系,以及对生态、经济、社会的促进作用,并采用适应中国国情的效益计算方法来综合比较不同方案。

(4)从协同智能化看,灰绿协同将迎来数字化整合和优化的浪潮,要充分发挥人工智能在基础设施的调查、监测、反馈、联动、决策、评估方面的能力,形成灰绿协同的城市数字化模型,引导相关策略制定更加精准和智能。

尽管目前灰绿协同的理论与实践尚未形成完整体系,但明确无疑的是,灰绿协同领域正普遍开展着多要素的跨尺度研究,谋求建立生态过程与基础设施之间的“双赢”与“共存”,相关的研究视野和范畴正不断扩大,系统性思维以及新技术的探索也普遍展开,未来的灰绿协同研究将成为生态城市美好愿景的重要支撑。

参考文献:

- [1] PIERRE B L. Redefining Infrastructure [M]. New York: Lars M ü ller Publishers, 2010: 238-239.
- [2] 住房和城乡建设部.市政基础设施工程施工技术文件管理规定(建城[2002]221号)[Z].北京:住房和城乡建设部,2002.
- [3] 王济昌,王晓琍.现代科学技术名词选编[M].郑州:河南科学技术出版社,2006.
- [4] Green Infrastructure [EB/OL].[2023-10-13]http://www.sprawlwatch.org/greeninfrastructure.pdf.
- [5] 黄强,邓铭江,畅建霞,等.构建生态流域理论体系支撑流域生态文明建设[J].人民黄河,2020,42(9):10-15.
- [6] 邓铭江,黄强,畅建霞,等.广义生态水利的内涵及其过程与维度[J].水科学进展,2020,31(5):775-792.
- [7] 樊江申,何冰.试析城市生态水利的理论内涵和特征[J].水利发展研究,2006(12):15-18.
- [8] 刘丹.以生态水利理念引领河道治理[J].河北水利,2017(2):31.
- [9] 王婷,王卿,毛宗杰.浅谈生态水利在广州番禺水利整治工程中的应用[J].科技信息,2010(1):312-390.
- [10] 栗欣如,姜文来,关鑫,等.我国水利绿色发展研究进展[J].中国农业资源与区划,2020,41(11):49-55.
- [11] LI S, SUN T, YANG W, et al. A biodiversity evaluation framework for restoration of aquatic macrophyte communities in shallow lakes driven by hydrological process management [J]. Hydrological Processes, 2021(35): 1-16.
- [12] 刘浩,唐清华,高强.等.基于水质改善的白云湖生态水利工程建设思路与方案[J].水电能源科学,2013,31(9):148-151.
- [13] 李江云,李瑶,胡子欣.灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J].水资源保护,2022,38(6):49-55,80.
- [14] 侯精明,栾广学,王添,等.“灰绿”协同措施对银川市合流制溢流污染的影响[J].水资源保护,2022,38(3):43-49,86.
- [15] 杨青娟,朱钢.雨水管网和城市绿地的协同优化设计研究[J].中国给水排水,2014,(4):94-98.
- [16] 杨帆,陶蕴哲.雨洪管理与城市绿地系统协同的规划模式与优化策略研究[J].中外建筑,2020(1):87-90.
- [17] 黄国如,麦叶鹏,李碧琦,等.基于 PCSWMM 模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究[J].南方建筑,2017(3):38-45.
- [18] 李小艳,丁爱中,郑蕾,等.1990—2015年人工湿地在我国污水处理中的应用分析[J].环境工程,2018,36(4):11-17.
- [19] 王昕竹,张星星,杨艳艳,等.景观生态型生物污水处理系统研究进展[J].环境科学与技术,2019,42(6):197-206.
- [20] Seo DC, JS Lee, H J, et al. Phosphorous retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland[J]. Water Res. 2005, 39(11):2445-2457.
- [21] 管策,郁达伟,郑祥,等.我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的应用研究[J].农业环境科学学报,2012,31(12):2309-2320.
- [22] 张晓晓,凌微.表面流人工湿地在城市黑臭水体治理中的应用——以南城白马大岔为例[J].工程建设与设计,2020(12):159-160.
- [23] 洪松.城市河道黑臭水体污染治理技术探析[J].内蒙古水利,2019(5):46-48.
- [24] 刘玉瑛,邓彬.深圳市布吉污水处理厂建设过程综述[J].城市道桥与防洪,2014(7):257-259.
- [25] 张增强,薛澄泽.污泥堆肥对几种花卉的生长响应研究[J].环境污染与防治,1996(5):1-4,44.
- [26] 夏梦婷,徐文辉.基于多功能协同评价模型的乡村绿道规划研究.中国园林,2021,37(11):86-91.
- [27] 刘扬,赵先超,胡艺觉.株洲县京广铁路沿线景观生态评价[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2019,28(1):40-46.
- [28] 刘圣维,丁戎,白杨.绿道建设在城市更新中的实践和思考[J].中国园林,2021,37(S1):40-43.
- [29] 姜雪,赵天宇.全域旅游视角下旅游小城镇绿道网络组织机制研究——以宁安市为例[J].建筑学报,2020(S1):119-124.
- [30] 王富,高健,杨阳.城市绿色交通与绿道融合交通设计研究[J].中国

- 园林,2015,31(9):47-49.
- [31] 李正,裴欣.山地风景道合作规划与管理:洛杉矶都市区圣莫妮卡山案例[J].风景园林,2021,28(7):69-75.
- [32] 芦建国,邵帅.沪宁高速铁路南京段配置及景观生态学研究[J].中国城市林业,2011,9(2):35-37,53.
- [33] 周旭丹,文岳,李玉兰,等.依托景观再生设计方法 营造绿色生态自然走廊——以煤矿乡镇型废弃铁路景观再生设计方案为例[J].吉林农业,2017(14):88-91.
- [34] 贺月元,周雷.“停车库上的城市公园”——北京地铁16号线北安河车辆段上盖开发综合利用概述[J].建筑技艺,2017(7):46-50.
- [35] 郁枫.基于TOD模式的科技园规划探析——以北京中关村科技园区·托普科技园规划为例[J].规划师,2010,26(7):61-66.
- [36] 赵万民,杨欣,汪洋.复合中枢:TOD廊道导向的低碳生态城市途径[J].规划师,2011,27(3):76-81.
- [37] 赵轶洁,孟宪学,王聚博.探索“渔光互补”发展光伏农业——以鄂州20MW_p农业光伏科技示范园为例[J].安徽农业科学,2015,43(22):360-362.
- [38] 王涛,王得祥,郭廷栋,等.光伏电站建设对土壤和植被的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):90-94.
- [39] 杨海宾.矿区采煤沉陷废弃地农光互补研究与实践[J].节能与环保,2018(2):58-61.
- [40] 朱小康,傅斌.中国水电开发的生态补偿机制研究进展[J].中国国土资源经济,2021,34(9):47-54.
- [41] 余凤龙,黄震方,尚正永.水利风景区的价值内涵、发展历程与运行现状的思考[J].经济地理,2012,32(12):169-175.
- [42] 王会战.我国水利风景区旅游开发存在的问题及对策[J].经济与社会发展,2007(1):109-111.
- [43] 马勇,童昀.水利旅游资源空间结构特征及自驾车可达性研究——以长江中游城市群国家水利风景区为例[J].长江流域资源与环境,2016,25(8):1167-1175.
- [44] 王爱华,陈才.智慧城市——构筑于信息高地上的城市智慧发展之道[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [45] Register R. Eco-city Berkeley: Building Cities for A Healthier Future[M]. CA: North Atlantic Books,1987.13-43.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com