

DOI: 10.5846/stxb202204281179

顾恬玮, 彭建. 基于自然的碳达峰、碳中和解决方案: 关键议题. 生态学报, 2023, 43(9): 3384-3391.

Gu T W, Peng J. Nature-based solutions for carbon peaking and carbon neutrality goals: Key issues. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3384-3391.

基于自然的碳达峰、碳中和解决方案: 关键议题

顾恬玮¹, 彭建^{1,2,*}

1 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055

2 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

摘要: 实现碳达峰、碳中和是我国生态文明建设的重点战略方向。按照“目标设计-要素布局-方案实施”的基本逻辑, 可以对碳达峰、碳中和的工作要点进行系统梳理。基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)是国际社会普遍认可的生态恢复前沿理念, 具备可持续性、系统性、尺度性、适应性四方面核心特质, 能够有效回应“双碳”目标的工作要求。碳达峰、碳中和与NbS在目标导向和实践思路高度契合, 二者均以可持续发展为主要目标, NbS八项实施准则亦能够为“双碳”工作的积极推进提供全面系统的行动框架。结合NbS实施准则, 具体提出基于自然的碳达峰、碳中和八大关键议题: (1) 统筹减污降碳协同增效的政策体系; (2) 强化尺度级联的传导机制; (3) 构建基于自然的固碳途径; (4) 完善多元化的碳汇交易; (5) 兼顾社会公平的参与机制; (6) 促进基于权衡的路径选择; (7) 创新动态连续的监测手段; (8) 推动NbS在“双碳”领域主流化, 以期支撑国家碳达峰、碳中和可持续解决方案的落实。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 基于自然的解决方案; 关键议题

Nature-based solutions for carbon peaking and carbon neutrality goals: Key issues

GU Tianwei¹, PENG Jian^{1,2,*}

1 Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

2 Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Goals of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality are the key strategic direction for construction of an ecological civilization. Based on the principle of “goals setting, system element layout, and solution strategies implementation”, this paper summarized the key points to achieve peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality goals. As a cutting-edge concept, Nature-based Solutions (NbS) has been widely recognized by the international community. The core characteristics of sustainability, systematization, scale and adaptability of NbS can effectively promote the achievement of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality goals. As both taking sustainable development as the main goal, NbS is highly compatible with the goals of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality in goal orientation and thinking of practice. Furthermore the eight criteria of NbS can also provide a comprehensive and systematic framework for the active promotion of the goals of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality. Combined with the NbS criteria, eight issues are specifically proposed: (1) coordinating policy system for synergy of pollution reduction and carbon reduction; (2) strengthening the mechanism of information transmission in different scales; (3) building a nature-based pathway to carbon sequestration; (4) improving diversified carbon sink trading; (5) formulating participation rules

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03019)

收稿日期: 2022-04-28; **采用日期:** 2022-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

that take into account social equity; (6) promoting path selection based on trade-offs; (7) innovating dynamic and long-term monitoring methods; and (8) promoting the mainstreaming of NbS in field of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality.

Key Words: peak carbon dioxide emissions; carbon neutrality; Nature-based Solutions; key issues

应对全球气候变化已成为当前国际社会面对的共同挑战,绿色低碳发展则被视为复杂环境治理问题的重要途径^[1-2]。党的十八大将生态文明建设作为国家重大战略,从国土空间规划、国土空间用途管制和国土空间生态修复三大关键任务出发,将经济发展的重点从依赖资源消耗与环境污染转向质量和效益的全方位提升,在确保底线安全、提高资源利用效率以及提升空间品质等方面取得了显著成效^[3-5]。但在新发展阶段,我国仍然同时面对着全球气候变化、新冠疫情冲击等外部形势变化以及全面绿色转型基础薄弱、生态环境保护压力尚未得到根本缓解等内部矛盾问题^[6],社会经济的可持续发展受到了严重制约。为打破保护与发展困境,中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上首次宣布碳达峰和碳中和目标愿景,即二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。

作为全球最大的发展中国家,中国当前仍处于由工业文明向生态文明转型的关键阶段,经济发展与生态保护之间的矛盾依然存在,但中国依然积极投身气候变化实践,大力推进能源消费结构调整与产业绿色低碳转型,为应对全球气候变化贡献了中国力量。相较于西方发达国家,我国降碳幅度更大,实现时间更为紧张,迫切需要引入前沿理论方法,支撑“双碳”目标如期平稳实现。作为减缓和适应气候变化领域的重要政策工具^[7],基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)最早由世界银行正式提出。NbS提出了一条兼顾人类与自然协调发展的新思路,致力于转变依赖资源消耗的经济增长模式,具备实现多重可持续发展目标的潜力^[8-9],与“双碳”目标内在要求不谋而合。将NbS理念融入碳达峰、碳中和的不同阶段与关键环节,不仅有助于补齐高质量发展要求下传统“双碳”技术缺乏系统性的短板,还有利于与国际话语体系接轨,将中国应对气候变化的治理经验推广到全球。因此,如何基于NbS理念凝练适合中国国情的碳达峰、碳中和行动框架成为亟待解决的重要科学难题。本文按照“目标设计-要素布局-方案实施”的基本逻辑梳理了碳达峰、碳中和工作思路和战略需求,提出NbS八项准则在碳达峰、碳中和推进过程中的关键应用指向,以期促进NbS在中国碳达峰、碳中和领域的可持续推进。

1 碳达峰、碳中和与 NbS

1.1 碳达峰、碳中和工作要点

我国始终将应对气候变化作为国家治理的重要组成部分,相关政策改革与行动有力促进了气候变化适应^[10],有效控制了碳排放强度增长^[11]。伴随着生态文明建设进程不断加快,生命共同体理念深入人心,碳排放问题已经不仅是一项环境议题,而是一项关乎广大人民根本利益的可持续发展问题。碳达峰、碳中和是基于新发展理念提出的新目标指引,涉及产业结构调整、生产生活方式优化、国土空间格局重塑等经济社会发展与自然生态修复全过程,是一项系统性、长期性的宏观战略。从国家“双碳”目标总体路线图来看,“十四五”时期是迈向碳达峰、碳中和的关键阶段,明确碳达峰、碳中和实现的基本工作逻辑显得尤为重要。

(1) 目标设计层面,强调发展与减排并重。近百年来的人类活动加剧了气候变化,由此引发全球变暖、极端灾害频发、生态系统退化、生物多样性损失等一系列问题。2020年,联合国开发计划署首次将二氧化碳排放量和物质足迹纳入人类发展指数考核体系,把人类福祉和缓解地球环境承载压力均视作发展水平的衡量标准,绿色低碳与可持续发展已然成为世界共识。在“双碳”语境下,发展与减排均处于核心地位而非彼此对立,重点是实现由资源依赖向绿色低碳的全面转型,并最终实现社会经济与碳排放量的脱钩发展。我国作为全球最大的发展中国家,能源需求仍然旺盛,短期内难以摆脱对资源的依赖^[12],在促进碳密集型产业转型的

同时要警惕“唯降碳论”,不能片面强调降碳而制约经济社会发展。

(2)要素布局层面,强调碳中和与气候治理的全域、全要素、全过程。2011年,德国波恩会议提出“水-能源-粮食纽带关系”概念,将全球所面临的资源环境挑战抽象为水安全、能源安全、粮食安全三个方面,同时指出三者之间存在复杂的相互作用甚至冲突关系。能源开发利用是碳排放的重要来源,从这一层面上说“双碳”目标与能源问题直接相关,管理决策的制定势必导致其他领域的权衡或协同效应。因此,碳达峰、碳中和并不仅限于对能源、工业等高碳排放行业的调整,而是需要纳入经济社会发展全局进行统筹谋划。

(3)方案实施层面,强调全局统筹与本地适应相结合。当前,我国区域发展不均衡的问题依然客观存在。例如,东部发达地区低碳产业转型与区域一体化已初步形成体系,具备降碳潜力,但中西部欠发达地区(特别是山西、河北、内蒙古等资源密集型地区)一定时期内难以摆脱化石燃料依赖^[13]。碳循环的区域性以及资源本底的差异性共同决定了碳中和难以在小尺度上实现,需要自上而下统筹协调,确保“双碳”目标在国家尺度上整体实现。与此同时,“双碳”工作的实施也应当注重小尺度上的分解落实,需要以“双碳”目标为指引,各地区结合自身资源禀赋条件与社会经济发展水平,自下而上整合本地化的绿色低碳方案^[14]。

1.2 NbS 实施准则与理念特质

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,从而有效和适应性地应对社会挑战,同时提升人类福祉和生物多样性^[15]。2020年,IUCN 发布 NbS 八项全球实施准则^[16],旨在规避概念误用风险,促进 NbS 有效实施,保障可持续发展目标实现(图1)。其中,准则1高度凝练 NbS 核心目标,即解决气候变化、粮食安全、水安全等社会挑战,促进自然资源可持续利用;准则2规范了 NbS 的实施路径,即强调了规划设计 NbS 所要遵循的尺度性;准则3、4、5分别明确 NbS 在生态、经济、社会三方面的实施原则,即生态优美、经济可行与社会公平;准则6指出在多元目标前提下,权衡在 NbS 中的重要性;准则7强调方案实施过程中的动态性与长期性,需要开展适应性管理以提升项目的整体效益;准则8则基于可持续性的视角,致力于促进 NbS 的主流化。

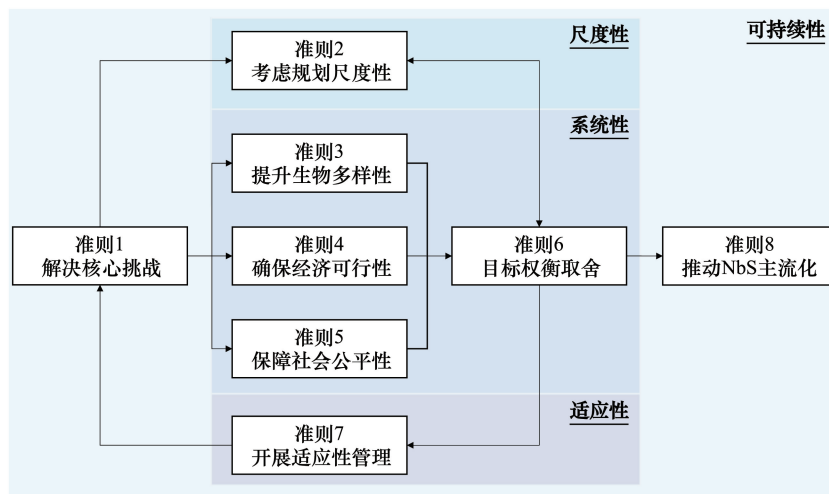


图1 NbS 实施准则与核心特质

Fig.1 NbS criteria and core characteristics

NbS: 基于自然的解决方案 Nature-based Solutions

上述八项实施准则为 NbS 构建了可持续的行动框架,同时确定了 NbS 成功实施的必要条件,即基于系统性思维确保生态-经济-社会三方面综合效益,遵循尺度性和适应性保障方案在空间和时间两个维度的可持续性。相较于传统技术导向的气候治理手段,NbS 具备四方面的理念特质(图2):(1)可持续性。NbS 以可持续性作为解决方案的核心,在充分认识社会系统与自然系统关联的基础上解决多重社会挑战。这种实现多种可

持续发展目标的潜力既是 NbS 概念得到广泛关注的原因^[17],也是区分 NbS 与传统生态保护修复工具的重要依据^[18]。(2)系统性。NbS 以借鉴自然发展规律的系统化途径作为保障生态-经济-社会多维度协同可持续发展的基本原则,即考虑系统构成要素的耦合关联,基于整体视角制定系统解决方案^[19]。(3)尺度性。NbS 以景观作为主要研究尺度^[20],研究视角既要关注特定尺度下的规划目标传导,还要基于整体性视角关注该区域与其他邻近系统之间的关联交互,通过尺度级联确保 NbS 方案协同^[21]。(4)适应性。NbS 既需要符合自然、经济、政策等本地化特征,也需要在实践过程中根据社会发展需求与生态系统的动态变化对方案进行适应性调整,最终确保解决方案的长期有效。

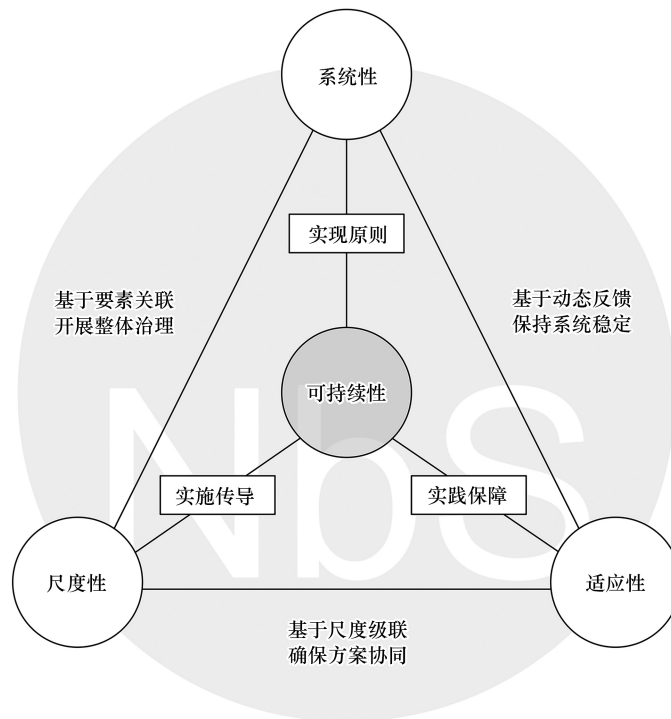


图2 NbS 核心特质的逻辑关联

Fig.2 Correlation of NbS core characteristics

1.3 碳达峰、碳中和与 NbS 理念契合

碳达峰、碳中和的实质是平衡发展和减排之间的关系,既是未来我国破解资源环境约束难题、保障社会经济可持续发展的重要抓手,也是中国适应气候变化危机、构建人类命运共同体的大国担当^[22]。2021 年,我国发布《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》与《2030 年前碳达峰行动方案》,确定了“双碳”时间表与近期十大重点行动。作为气候变化领域的前沿理念,NbS 高度重视自然系统与社会系统的复杂关联,兼顾生态系统保护与社会行为约束,在实现可持续发展目标方面具备重大的发展潜力,与我国的生态文明思想和高质量发展要求不谋而合(图 3)。一方面,NbS 理念集成了生态系统服务理论、蓝绿基础设施、生态工程、生态系统管理以及自然资本等在内的一系列生态系统方法^[23],能够直接在碳汇能力巩固提升、循环经济以及绿色低碳全民行动三个方面提供全面系统的实践框架;另一方面,NbS 为全球气候变化适应提供了国际社会普遍认同的交流平台^[24],能够在能源消费、产业结构、城乡建设、交通运输、科技创新等层面提供理念指引,帮助决策者以更系统的手段推进相关领域技术革命。在新发展阶段下,NbS 能够为“双碳”目标提供系统方案支撑,成为推动高质量发展的重要政策工具。但受发展阶段的限制,NbS 目前仍然重点应用于生态系统保护与修复领域,还需进一步发挥 NbS 与“基于技术”的解决方案的组合效应,提高“双碳”领域的政策关联与路径协同。

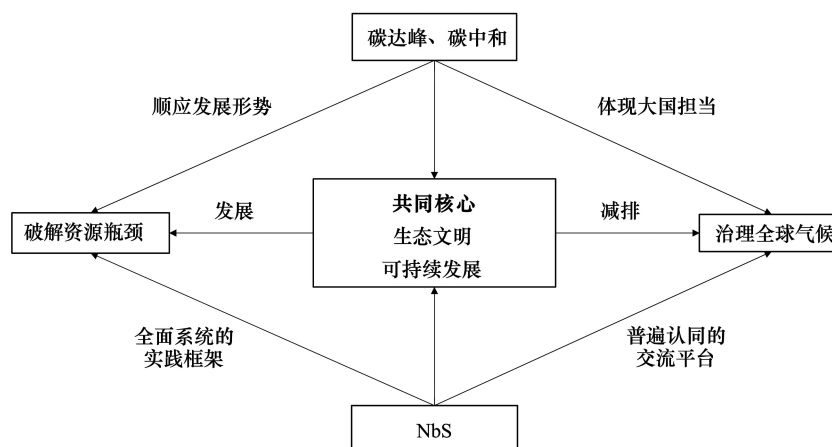


图3 碳达峰、碳中和与 NbS 理念契合

Fig.3 Consistency between carbon peaking and carbon neutrality goals and NbS

2 基于 NbS 的碳达峰、碳中和关键议题

从碳达峰、碳中和的基础逻辑出发,构建“双碳”目标实施框架需具体回应目标顶层设计、要素组合布局与方案可持续保障三方面工作要求。首先,基于区域自然本底状况与社会需求,确定以减污降碳协同增效为核心的目标顶层设计;其次,在考虑生态、社会、经济三方面要素关联的基础上,形成低碳化的空间用途管制和政策引导;最后,统筹考虑整体与局部、长期与短期的关系,建立时空协同的“双碳”目标保障方案。作为一项涵盖性术语,NbS 集成了国际前沿生态系统管理方法,为实现人与自然和谐共生提供了系统解决方案,其所强调的可持续性、系统性、尺度性以及适应性,与“双碳”目标战略需求高度契合(图4)。基于 NbS 八项实施准则,可以凝练实现碳达峰、碳中和国家战略的关键议题。

2.1 统筹减污降碳协同增效的政策体系

NbS 准则 1 关注社会-生态系统的耦合关联,倡导识别与应对关键社会挑战,将兼顾提升人类福祉与生态系统健康作为主要目标导向。伴随着我国城镇化进程的不断加快,能源消耗量也在不断增长,高耗能、高碳排放产业不仅产生了大量的温室气体,也对生态环境造成了污染,尤其是大气污染、水污染等。在“双碳”目标导向下,降碳是推动生态环境保护与经济发展转型的关键抓手,是引领可持续发展的关键领域,要充分利用现有的生态环境政策体系,把握减污与降碳的内在联系,推进政策改革,统筹气候治理、环境保护以及经济发展等多重目标协同实现。

2.2 强化尺度级联的传导机制

NbS 准则 2 指出应基于尺度开展设计,启示“双碳”工作不仅要关注特定尺度下的规划目标传导,还要基于整体性视角关注该区域与其他邻近系统之间的关联交互。目前,各地区均已开始推进“双碳”工作,但尚未形成从国家顶层设计到地方精细落实的规划目标逐级传导以及分解落实机制。碳达峰、碳中和是需要在宏观尺度上实现的整体目标,但在具体实施过程中具有明显的层次传导,不同尺度的工作重点相应各异。相对而言,国家层面侧重协调性,从宏观层面依据地区间资源环境禀赋、社会经济条件以及碳排放现状的差异确定工作要求,保障有条件的地区尽快实现“双碳”目标,为高度依赖化石能源的地区以及产业提供帮扶,确保全国范围内形成合力;省级或城市群层面则侧重于主动性,重点是主动服务国家战略,因地制宜明确本地区双碳工作方案;市区级层面则更侧重适应性,需要根据城市类型特点探索经济增长与低碳化发展的共赢路径。

2.3 构建基于自然的固碳途径

NbS 准则 3 要求通过实施 NbS 保护和提升生物多样性和生态系统的完整性,旨在提升整体功能、避免潜

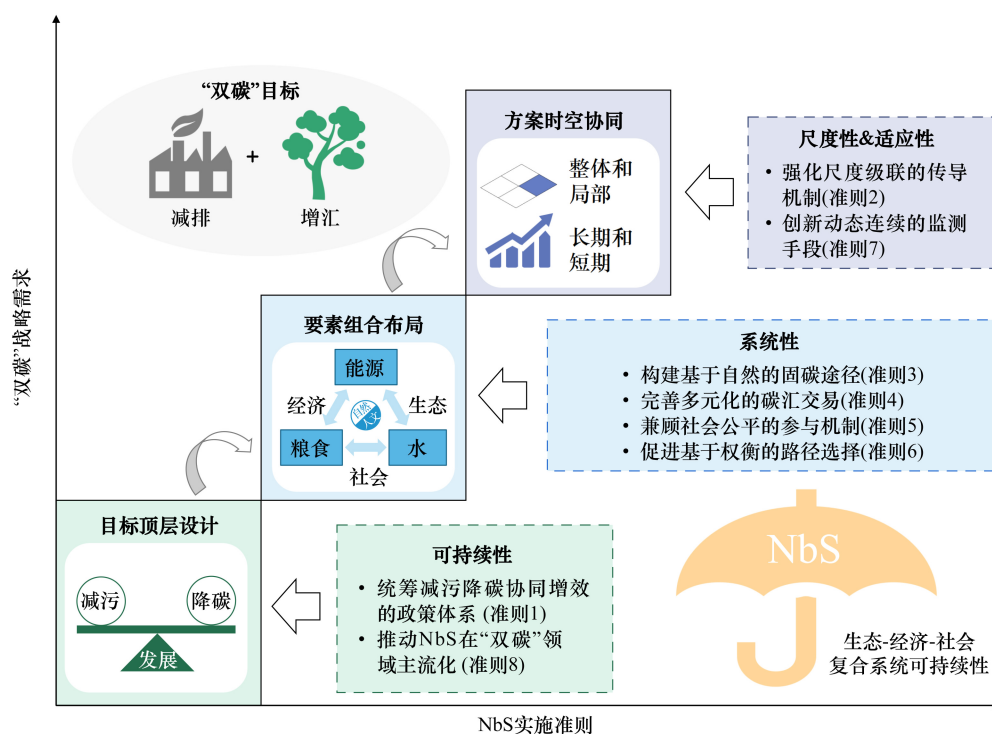


图4 基于 NbS 的碳达峰、碳中和关键议题

Fig.4 Key issues of carbon peak and neutrality goals from the perspective of NbS

在风险。近三十年来,我国大力开展国土绿化行动^[25],保持森林面积和蓄积量实现持续增长,有效提升了生态系统碳汇能力。但随着森林面积的不断增加,适宜开展植树造林的空间逐渐紧张,进一步扩张森林规模难度较大,由此新增碳汇有限,在生态脆弱地区不当的人为干扰甚至有可能造成负面效应^[26-27]。在 NbS 理念指导下,生态固碳的重点是增汇而非增量,即重点增强生态系统的碳汇能力和效率,而非盲目扩大森林生态系统规模。因此,一方面,在生态适宜性基础上通过恢复森林、草原、湿地等退化生态系统的结构与功能,可以增加碳汇、减缓气候变化^[28];另一方面,保护好现有的森林(包括减少火灾、病虫害)、提升森林质量,也能够减少生态系统退化所造成的碳固定损失。

2.4 完善多元化的碳汇交易

NbS 准则 4 对规划实施的成本效益做出了具体要求,鼓励通过相关的法规与补贴政策提升 NbS 效益、拓宽项目资金来源。我国目前正在探索完善的生态保护补偿、生态权属交易、绿色 GDP 核算、绿色金融支持等政策机制均是显化自然资源资产价值的有力政策工具,也是强化自然资源管理、保障“双碳”目标实现的有效途径。但当前的生态资产核算结果仍存在着较大的不确定性,碳汇价值核算并不突出,需要进一步发挥政府与市场的双重作用,完善多元化的碳汇交易,推动碳金融体系的深度发展。

2.5 兼顾社会公平的参与机制

NbS 准则 5 强调社会公平性,指出 NbS 必须得到当地利益相关方的理解,保证方案实施全过程的透明与公平,相关方案才能有效推动实施。公众参与和多方协同始终是我国解决气候问题的重要原则,社会各界的广泛参与为建立良好的气候变化适应机制作出了突出贡献。但高质量发展背景下,一方面我国已经迈入了生态文明新时代,绿色低碳已经成为统一发展主线;另一方面,伴随着新时期社会结构的不断变化,人民对美好生活的向往趋于多元化、个性化。如何协调“双碳”目标的统一性与特色性,如何将广大人民的个人利益同国家需求紧密联系,同时兼顾不同群体的发展需求实现整体性社会收益,是未来一段时间内“双碳”工作需要关注的重要议题。

2.6 促进基于权衡的路径选择

NbS 准则 6 要求方案实施要能够促进首要目标和其它多种效益间的平衡,也就是权衡生态-经济-社会三方面的效益,实现多目标协调发展。尽管从概念上看,保障生态系统健康和生物多样性是 NbS 的优先事项^[29],但实施 NbS 的效益并不仅限于生态保护修复所能带来的碳汇潜力,同时也应该兼顾灾害防控、粮食安全、水安全以及社会发展等多维度目标。自然资源具有稀缺性,增加某种生态系统服务或将降低另一种服务的数量或质量,因此落实“双碳”目标的过程中,权衡取舍不可避免。如何解析“双碳”目标与其他领域目标的相互关联,科学选择 NbS 路径,引领经济社会全方面绿色转型,是当前“双碳”工作需要迫切解决的问题^[30]。

2.7 创新动态连续的监测手段

准则 7 指出 NbS 的实施计划包含适应性管理以解决不确定问题,适应性管理的过程需要通过连续的监测评估明确系统内部不同要素应对外部环境改变的时空响应机制,对方案实施效果进行反馈,不断修正实施方案,从而结合管理与控制手段引导系统抗风险能力的提升。碳达峰、碳中和战略具有长期性与动态性,系统开展全程监测并适时调整形成适应新变化的行动方案显得尤为重要。特别是“双碳”目标中后期阶段,自然要素条件与社会经济环境可能已经发生较大变化,需要通过长期的监测分析要素变化趋势,及时调整策略,以保证政策的长期可行^[31]。目前,适应性管理大多停留在理论探讨层面,尽管已有研究制定了全面的评价指标体系,但在具体操作过程中仍然存在指标难以获取、部门之间目标不统一以及动态监测响应机制不健全等问题,既需要融合多学科视角丰富评价方法,也需要通过机制体制改革完善气候治理体系,推动各地区各部门之间合作机制的实质性响应^[32]。

2.8 推动 NbS 在“双碳”领域主流化

近年来,NbS 在中国越来越受到重视,《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》、《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》等政策文件都强调了对 NbS 理念的运用,初步提升了 NbS 在国内的主流认知。2020 年 6 月,自然资源部与 IUCN 联合发布《基于自然的解决方案中国实践典型案例》,进一步将 NbS 的中国实践经验进行总结归纳。作为国际前沿发展理念,NbS 强调尊重并运用自然规律解决生态系统开发与保护之间的矛盾,与我国生态文明思想不谋而合,在中国有巨大的应用前景;碳达峰、碳中和这一国家战略的核心也在于协同发展与保护、实现高质量发展,为 NbS 提供了又一重要的推广应用领域。当前应继续深入理解 NbS 理念内涵与外延,积极推动 NbS 的主流化进程,为碳达峰、碳中和提供理论支撑。

3 结论

实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的变革,但如何科学设定顺应变革的政策体系,如何基于系统观念开展要素布局,如何考虑时空尺度分类施策,仍然是未能充分解决的问题。NbS 与我国的生态文明思想高度契合,为实现“双碳”目标提供了可持续性的解决方案。首先在目标顶层设计层面,统筹减污降碳协同增效的政策体系,并且通过政策宣传推动 NbS 在“双碳”领域主流化,确保碳达峰、碳中和解决方案的可持续性;其次在要素组合布局层面,通过构建基于自然的固碳途径、完善多元化的碳汇交易、兼顾社会公平的参与机制,实现社会-生态复合系统的整体效益,并促进基于权衡的路径选择;最后在方案实施层面,通过尺度级联的传导机制以及动态连续的监测手段保障方案时空协同,确保实现“双碳”目标并维持其可持续性。

参考文献(References):

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.
- [2] 周丽, 夏玉辉, 陈文颖. 中国低碳发展目标及协同效益研究综述. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 10-17.
- [3] 郝庆, 邓玲, 封志明. 国土空间规划中的承载力反思: 概念、理论与实践. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2073-2086.
- [4] 张晓玲, 吕晓. 国土空间用途管制的改革逻辑及其规划响应路径. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1261-1272.
- [5] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考. 自然资源学报, 2020, 35(1): 26-36.

- [6] 蔡睿, 朱汉雄, 李婉君, 肖宇, 刘中民. “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 502-510.
- [7] MacKinnon K, Sobrevila C, Hickey V. Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. 2008
- [8] Raymond C M, Frantzeskaki N, Kabisch N, Berry P, Breil M, Nita M R, Geneletti D, Calfapietra C. A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 2017, 77: 15-24.
- [9] Nature editorial. ‘Nature-based solutions’ is the latest green jargon that means more than You might think. *Nature*, 2017, 541(7636): 133-134.
- [10] Kriegler E, Riahi K, Bauer N, Schwanitz V J, Petermann N, Bosetti V, Marcucci A, Otto S, Paroussos L, Rao S, Arroyo Currás T, Ashina S, Bollen J, Eom J, Hamdi-Cherif M, Longden T, Kitous A, Méjean A, Edenhofer O. Making or breaking climate targets: the AMPERE study on staged accession scenarios for climate policy. *Technological Forecasting and Social Change*, 2015, 90: 24-44.
- [11] Liu Z, Deng Z, He G, Wang H L, Zhang X, Lin J, Qi Y, Liang X. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(2): 141-155.
- [12] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 焦小森. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [13] 郭艺, 曹贤忠, 魏文栋, 曾刚. 长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究. 地理研究, 2022, 41(1): 181-192.
- [14] 庄贵阳, 魏明听. 城市引领碳达峰、碳中和的理论和路径. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 114-121.
- [15] Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C. Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland: IUCN, 2016.
- [16] IUCN. Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions; first editions. Gland: IUCN, International Union for Conservation of Nature, 2020.
- [17] Gómez Martín E, Giordano R, Pagano A, van der Keur P, Mániez Costa M. Using a system thinking approach to assess the contribution of nature based solutions to sustainable development goals. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 139693.
- [18] Albert C, Spangenberg J H, Schröter B. Nature-based solutions: criteria. *Nature*, 2017, 543(7645): 315.
- [19] Keith H, Vardon M, Obst C, Young V, Houghton R A, MacKey B. Evaluating nature-based solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144341.
- [20] Cohen-Shacham E, Andrade A, Dalton J, Dudley N, Jones M, Kumar C, Maginnis S, Maynard S, Nelson C R, Renaud F G, Welling R, Walters G. Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environmental Science & Policy*, 2019, 98: 20-29.
- [21] Nika C E, Gusmaroli L, Ghafourian M, Atanasova N, Buttiglieri G, Katsou E. Nature-based solutions as enablers of circularity in water systems: a review on assessment methodologies, tools and indicators. *Water Research*, 2020, 183: 115988.
- [22] 戴铁军, 周宏春. 构建人类命运共同体、应对气候变化与生态文明建设. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(1): 1-8.
- [23] Nesshöver C, Assmuth T, Irvine K N, Rusch G M, Waylen K A, Delbaere B, Haase D, Jones-Walters L, Keune H, Kovacs E, Krauze K, Kylvik M, Rey F, van Dijk J, Vistad O I, Wilkinson M E, Wittmer H. The science, policy and practice of nature-based solutions: an interdisciplinary perspective. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 1215-1227.
- [24] Cousins J J. Justice in nature-based solutions: research and pathways. *Ecological Economics*, 2021, 180: 106874.
- [25] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 李海奎. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5093-5105.
- [26] Friggens N L, Hester A J, Mitchell R J, Parker T C, Subke J A, Wookey P A. Tree planting in organic soils does not result in net carbon sequestration on decadal timescales. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 5178-5188.
- [27] Schwärzel K, Zhang L L, Montanarella L, Wang Y H, Sun G. How afforestation affects the water cycle in drylands: a process-based comparative analysis. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 944-959.
- [28] 王乐, 杜灵通, 马龙龙, 丹杨. 人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 246-254.
- [29] Seddon N, Smith A, Smith P, Key I, Chausson A, Girardin C, House J, Srivastava S, Turner B. Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology*, 2021, 27(8): 1518-1546.
- [30] 陈明星, 程嘉梵, 周园, 丁子津, 马海涛. 碳中和的缘起、实现路径与关键科学问题: 气候变化与可持续城市化. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1233-1246.
- [31] 赵东升, 郭彩赞, 郭义强, 刘磊, 高璇, 张家诚, 朱瑜, 张雪梅. 气候变化对“山水林田湖草”重大生态工程的影响. 生态学报, 2019, 39(23): 8780-8788.
- [32] 周妍, 陈妍, 应凌霄, 杨崇曜. 山水林田湖草生态保护修复技术框架研究. 地学前缘, 2021, 28(4): 14-24.