

基于NbS提升陆地生态系统固碳能力的实践探索

师 阳

丽江市土地开发投资运营有限公司, 云南 丽江

收稿日期: 2022年5月10日; 录用日期: 2022年6月14日; 发布日期: 2022年6月21日

摘 要

陆地生态系统是全球碳循环中最复杂、受人类影响最大的部分,也是大气中CO₂重要的源和汇,通过探究陆地生态系统的固碳机制,增强其碳储存能力,有助于碳中和目标的实现。而基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)通过运用自然系统规律,能够从全面可持续的角度对陆地生态系统进行固碳分析,通过对十个NbS中国实践典型案例的分析,基于NbS的八大准则对陆地生态系统进行了固碳分析。最后提出,要完善法律法规,深化集体林权制度改革,完善草原承包经营制度,建立健全最严格的自然资源保护制度,完善生态补偿机制;要坚持系统观念,探索开展全域土地综合整治、山水林田湖草生态保护修复、国土综合整治、国土绿化,构建以国家公园为主体的自然保护地体系,编制生态系统治理规划,制定不同时段工作方案;要提升科技支撑和注重人才培养,完善自然资源动态监测体系,建立健全生态系统碳通量监测,来提升陆地生态系统的固碳能力。

关键词

陆地生态系统, 基于自然的解决方案, 固碳, 碳中和

Practical Exploration of Improving Carbon Sequestration Capacity of Terrestrial Ecosystems Based on NbS

Yang Shi

Lijiang Land Development Investment Operation Co., Ltd., Lijiang Yunnan

Received: May 10th, 2022; accepted: Jun. 14th, 2022; published: Jun. 21st, 2022

Abstract

Terrestrial ecosystems are the most complex and human-affected part of the global carbon cycle,

and are also an important source and convergence of CO₂ in the atmosphere. Explore the carbon sequestration mechanism of terrestrial ecosystems and enhance their carbon storage capacity, which will help to achieve the goal of carbon neutrality. Nature-based solutions enable carbon sequestration analysis of terrestrial ecosystems from a holistic and sustainable perspective by applying the laws of natural systems. Through the analysis of ten typical cases of NbS practice in China, this paper analyzes the carbon sequestration of terrestrial ecosystems based on the eight principles of NbS. This paper put forwards that, it ought to improve laws and regulations, deepen the reform of the collective forest tenure system, improve the grassland contract management system, establish and improve the strictest natural resource protection system, and improve the ecological compensation mechanism; it ought to adhere to system concept, explore ways to comprehensive improvement of land across the region, ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, farmland, lakes and grass, comprehensively improvement of land, and land greening, establish a system of nature reserves with national parks as the main body, draw up plans for ecosystem governance, and formulate work plans for different periods of time; it ought to enhance technological support, focus on talent training, improve the dynamic monitoring system for natural resources, establish and improve monitoring of ecosystem carbon flux, so as to enhance the carbon sequestration capacity of terrestrial ecosystems.

Keywords

Terrestrial Ecosystems, Nature-Based Solutions, Carbon Sequestration, Carbon Neutrality

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国“30-60”目标的提出，碳达峰、碳中和正式纳入生态文明建设的整体布局，并将全面推行绿色低碳循环经济发展。而碳中和目标的最终实现需要从供给侧和需求侧共同努力[1]，改变能源结构，倡导绿色生活，减少二氧化碳排放；探究不同生态系统碳循环机制，掌握自然资源固碳效应，增强生态空间固碳能力。基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)理念与中国“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念不谋而合[2]，其通过运用自然系统规律，能够增强森林、湿地、草原等自然生态系统碳存储能力，是助力碳中和目标实现的有效途径[3]。因此基于 NbS 的陆地生态系统固碳分析及提升固碳能力的实践探索显得尤为重要。

目前，基于 NbS 提高陆地生态系统固碳能力方面的研究主要集中在森林[4] [5] [6] [7]、湿地[6]以及农田利用[6] [8]的单独研究上，主要是从基于自然的核心理念出发进行分析，提出通过增加面积、改变管理模式、发展绿色经济等方式来提升碳汇的结论。对于 NbS 的运用，从其提出的每一条准则出发进行详细深入的分析，更有利于掌握全面，得出综合性的结论指引。同时，各个陆地生态系统间都是相互联系的，基于 NbS 对整个陆地生态系统进行整体性固碳分析研究，才有利于提出不相矛盾的固碳增汇实现路径，避免为实现各自领域固碳目标争抢资源的现象。因此基于 NbS 的八大准则对各陆地生态系统进行固碳分析，综合考虑提出固碳增汇措施的实践探索为本文的重点。

2. NbS 概述及实践应用

2021年6月自然资源部与世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)联

合发布了《IUCN 基于自然的解决方案全球标准》《IUCN 基于自然的解决方案全球标准使用指南》中文版, 以及《基于自然的解决方案中国实践典型案例》。为我国 NbS 的继续实践探究提供了可靠的理论和标准基础, 并对我国乃至全球 NbS 本地化应用具有示范和借鉴作用。

2.1. NbS 准则及指标

准则 1 NbS 应以优先性和关联性为原则, 应对多项社会挑战, 并带来实质性的效益。社会挑战被归纳为气候变化减缓和适应、防灾减灾、经济与社会发展、人类健康、粮食安全、水安全、生态环境退化和生物多样性丧失共七项。准则 2 应统筹经济、社会和生态系统尺度来设计 NbS, 并与其他相关措施结合互补产生协同作用。准则 3 NbS 应制定关键生物多样性价值增加的目标, 阶段性评估、监测 NbS 可能对自然造成的不利影响, 识别加强生态系统整体性与连通性的机会并整合到 NbS 策略中。准则 4 NbS 应具有经济可行性, 设计备选方案进行成本有效性对比, 创新融资模式的同时保证多种来源的资金使用合规, 风险和回报分配合理。准则 5 NbS 应基于包容、透明和赋权进行管理, 保障全过程的“公众参与”, 当 NbS 的范围超出管辖区域时, 相关机构跨区域联合决策。准则 6 NbS 应在首要目标和其他多种效益间公正地权衡, 保证整个 NbS 的稳定性。准则 7 NbS 应基于定期监测和评估证据, 建立迭代学习框架, 进行适应性管理。准则 8 NbS 应具有可持续性并在适当的辖区内主流化。

2.2. NbS 中国实践案例

《基于自然的解决方案中国实践典型案例》展示了近几年中国 NbS 的运用领域研究已经逐步扩展到山水林田湖草生态修护、动物生境保护以及乡村振兴、城市更新等与可持续发展相关的多重领域[9], 各领域协同相关又共同作用于应对气候变化。

通过对十个 NbS 中国实践典型案例的准则对应分析[10]-[19], 可以掌握 NbS 的内涵就是放眼大尺度, 结合目的关联性地确定方案主要应对的挑战, 通过效益权衡、公众参与, 考虑经济可行性、生物多样性、生态系统完整性确定方案设计, 并基于证据对方案进行适应性调整管理, 使方案能够获得广泛支持, 实现主流化。其中大尺度就是要从经济、社会和生态系统之间的相互作用统筹考虑, 包括生态尺度上具有连通性、景观尺度上具有完整性等; 主流化就要求方案不但要具有解决特定问题的特殊性方法, 还要具有解决同类问题的普遍性参考价值。

3. 碳循环概述

3.1. 陆地生态系统碳循环

地球系统中主要碳库包括大气碳库、海洋碳库、陆地生态系统碳库以及岩石圈碳库[20]。陆地生态系统是全球碳循环中最复杂、受人类影响最大的部分, 碳在陆地生态系统中主要以各种有机物或无机物的形式存在于植被和土壤中[21]。

陆地生态系统碳循环过程就是绿色植物通过光合作用吸收大气中的 CO_2 , 合成有机化合物, 又直接通过植物的呼吸作用和土壤及枯枝落叶层中有机质的腐烂分解返回大气, 或经食物链传递构成生物机体最终经微生物分解再返回大气的过程。也就是说陆地生态系统同时具有碳吸收和碳释放的功能, 是大气中 CO_2 重要的源和汇, 但通过估算, 陆地生态系统整体具有可观的碳蓄积量。

3.2. 陆地生态系统碳汇现状

从生态系统类型来看, 陆地生态系统主要包括森林生态系统、草地生态系统、农田生态系统和湿地生态系统等。全世界陆地生态系统有机碳储量分布中, 森林占 39%~40%, 草地占 33%~34%, 农田占

20%~22%，其他占 4%~7% [22]。

森林生态系统碳汇是陆地生态系统中最大的碳汇，但其通过植被和土壤吸收储存碳的功能并不是无限的，会逐步趋于饱和状态，并且已经积累的碳也会因干旱、火灾、病虫害或不可持续性的管理而发生逆转的风险[1]。草地生态系统碳循环中最重要的一环是土壤呼吸和光合作用[23]。农田生态系统中大部分碳随着农产品的转移被运走，而废弃物中的碳以有机质的形式存储到土壤中，因此农田受到人为干扰最强烈，是全球碳库中最活跃的部分，可以在较短的时间内对农田区域的碳库进行调节[24] [25] [26]。湿地生态系统主要是通过水体与外界进行碳交换的，泥炭地和森林湿地是重要的碳汇，但由于气候变暖引起土壤干旱也会造成碳汇转变为碳源[27] [28] [29]。不同陆地生态系统中碳汇的稳定性不同，碳汇与碳源之间存在互相转换，所以在实现碳中和目标的行动中不能单一追求短期固碳效益最大化而不顾及各效益间的权衡，要结合实际，宜林则林、宜草则草、宜农则农、宜湿则湿[1]。

4. 基于 NbS 的陆地生态系统固碳分析

4.1. 有效应对社会挑战

森林生态系统的碳平衡是一个碳获得过程与碳释放过程之间的差值，碳获得过程是指光合作用、树木生长、碳在土壤中的积累等，碳释放过程是指生物呼吸、树木死亡、土壤碳的氧化、降解等[30] [31]。多数研究认为森林的碳平衡主要体现在碳汇方面，而影响森林生态系统碳汇作用的因数主要有生物量、林产品、植物枯枝落叶和根系碎屑、森林土壤[30]。因此提升森林生态系统固碳能力的 NbS 中主要应对的挑战有防灾减灾、协调经济与社会发展、避免生态环境退化和生物多样性丧失。

由于过度放牧、不合理的开发利用和气候变化等因素的影响，我国 90%的天然草地发生了不同程度的退化，而退化草地的恢复有比较可观的固碳量[32]。因此提升草地生态系统固碳能力的 NbS 中主要应对的挑战有防灾减灾、粮食安全、协调经济与社会发展、避免生态环境退化和生物多样性丧失。同时，退化草地恢复有助于促进水源涵养能力的提升，因此水安全也是要应对的挑战。

农田生态系统碳循环是一个非常复杂的过程，受气候、种植制度、土壤性质、农田管理等多种因子的影响和制约[33]。因此在提升农田生态系统固碳能力的 NbS 中主要应对的挑战有防灾减灾、协调经济与社会发展、粮食安全、人类健康、避免生态环境退化和生物多样性丧失。

湿地生态系统具有为动植物提供生境栖息地、净化水质和防洪排涝等生态服务功能，湿地生态系统中影响碳积累与分解过程的重要因素有温度、水文条件和植物群落等[34]。因此在提升湿地生态系统固碳能力的 NbS 中主要应对挑战有保障水安全、避免生态环境退化和生物多样性丧失。

同时，每一个陆地生态系统通过提升固碳能力共同助力于应对气候变化减缓和适应挑战。

4.2. 根据尺度设计

NbS 设计应从经济、社会和生态系统全面综合考虑，确保可持续性。森林生态系统要考虑土地利用/土地覆被变化，人类培育、砍伐等活动影响，火灾、虫灾扰动等各类因素进行综合规划。草地生态系统要考虑土地利用变化、气候变化、过度放牧等人类活动影响各类因素进行综合规划。农田生态系统要考虑土地利用变化、种植制度、耕作措施、土壤特征、施肥情况等各类因素进行综合规划。湿地生态系统的要考虑气候变化、水文条件、植物群落等各类因素进行综合规划。

4.3. 带来生物多样性净增长和生态系统完整性

森林生态系统要避免因单一追求短期内固碳效益最大化而采用单一树种或外来速生树种大规模造林 [1]，要考虑动物生境问题，还要考虑与其他生态系统的连通性等。草地生态系统孕育了丰富的动植物资

源, 构成我国野生动植物资源基因库[32], 所以要通过制定合理的放牧制度规范放牧行为, 加强草地保护修复, 遏制草地退化, 提高气候变化适应能力, 推进草地生态治理。在农田生态系统中, 探索可持续农业, 合理保留农田周边自然植被, 不用或合理使用农药, 通过轮作、套种等方式发展绿色农业。我国湿地生态系统的动植物资源极为丰富并有不少珍稀濒危物种和中国特有物种, 因此要通过湿地资源清查制定保护规划, 加强水污染防治和湿地开发的环境影响评价, 全方位保护湿地生物多样性[35]。

4.4. 具有经济可行性

NbS 必须设计备选方案并进行成本有效性对比, 同时还要结合各生态系统特点创新融资模式, 合理考虑经济成效。比如森林生态系统可以考虑林业产业的发展[36], 不仅可以拉动森林资源培育, 还可以提高森林资源的经济价值, 当然林产品的使用寿命也是固碳量变化的主要考虑因素。草地生态系统可以发展草地农业[32], 优化牧区产业结构, 鼓励农牧民创新经营模式, 拓宽增收渠道。农田生态系统的经济效益不言而喻, 但“双碳”目标背景下追求的农业经济应该是技术与制度创新、现代化、规模化、产业化的低碳农业经济。湿地生态系统也具有较高的生产力, 许多湿地能够持续地收获一系列物产[35]。

4.5. 基于包容、透明和赋权的治理过程

NbS 在实施过程中应按需建立相应的包括政府、科研机构、相关企业和基层组织等的合作平台, 各方按技术功能各司其职[17]。同时还要建立相应反馈和申诉平台, 让切身利益相关方能公平参与到 NbS 实施的全过程。

4.6. 在首要目标和其他多种效益间公正地权衡

NbS 的实施要实现短期与长期、生态与经济发展、生物多样性与碳排放的权衡[10]。比如森林生态系统的林业产业可以带来经济效益, 但主要目的是通过森林的循环来实现森林资源的培育保护、固碳能力的提升。草地生态系统只有在统筹推进保护修复的同时, 才能协调均衡生产资源要素进行产业发展。对于农田生态系统来说, 不管是传统农业还是现代化农业, 都要保障耕地数量不减少、质量不降低, 而且这是一个长期性的问题, 不能追求短暂的经济高效益而破坏农田耕作层, 不能走先破坏再修复的路子。湿地生态系统最主要的是要加强生物多样性的保护。所以这些都需要在整体考虑、系统权衡的基础上整体把控规划。

4.7. 基于证据进行适应性管理

NbS 应该充分利用传输网络、大数据、人工智能等新一代信息技术, 建立相应的生态要素动态监测系统, 实现生态风险管控。同时通过合作交流, 学习借鉴典型案例应对新问题的经验, 根据实际适时调整, 确保方案落地有成效。

4.8. 具有可持续性并在适当的辖区内主流化

有效提高陆地生态系统固碳能力是实现碳中和目标的有力一环, NbS 的设计和实施只要符合相关政策法规, 能与当地政府及其他关键利益相关方充分合作, 符合以上七条准则并带来可持续发展的可借鉴性, 那就一定会走向主流化的。

5. 提升陆地生态系统固碳能力的措施

基于 NbS 的陆地生态系统固碳分析, 提出了提升陆地生态系统固碳能力的具体措施(见表 1)。森林生态系统要加强公益林保护, 统筹推进天然林保护; 强化野生动植物及栖息地保护; 合理安排绿化用地、

科学选择绿化树种；因地制宜的退耕还林；严格控制林地转为建设用地；加强火灾、生物灾害防范和处理能力提升。草地生态系统要避免生物入侵，强化野生动植物及栖息地保护；落实禁牧、休牧和草畜平衡制度，规范放牧行为；因地制宜的退耕还草；严格控制草地转为建设用地；加强火灾、生物灾害防范和处理能力提升。农田生态系统要合理安排作物格局，采用套种、轮作、休耕等模式，提高作物的多样性；不同作物的田块与非耕地镶嵌式布局，保障动物生存环境；因地制宜采取农田防护林、水土保持林、植物生态护坡等措施，增强景观连通性；继续推进耕地整治和提质改造项目，注重耕作层保护，避免过度硬化；加强土壤污染治理。湿地生态系统要加强对湿地濒危物种进行迁地保护，促进物种种群的恢复和增殖；对湿地开发利用进行环境影响评价；加强退化湿地生态系统的保护修复；加强水污染防治。

Table 1. Improving carbon sequestration capacity of terrestrial ecosystems based on NbS
表 1. 基于 NbS 提升陆地生态系统固碳能力

生态系统	准则 1 社会挑战	准则 2 尺度考虑	准则 3 生物多样性增长和生态完整性	准则 4 经济可行性	准则 5 公众参与	准则 6 效益权衡	准则 7 适应性管理	准则 8 可持续性 及主流化
森林生态系统	① 气候变幻减缓和适应 ② 防灾减灾 ③ 经济和社会发展 ④ 环境退化和生物多样性丧失	考虑土地利用/土地覆被变化,人类培育、砍伐等活动影响,火灾、虫害扰动等各类因素,从经济、社会和生态系统全面考虑综合规划	① 构建以国家公园为主体的自然保护地体系; ② 加强公益林保护,统筹推进天然林保护,强化野生动植物及栖息地保护; ③ 开展国土绿化行动,合理安排绿化用地、科学选择绿化树种; ④ 因地制宜的退耕还林; ⑤ 严格控制林地转为建设用地; ⑥ 加强火灾、生物灾害防范和处理能力提升。	① 创新融资渠道,争取绿色金融支持; ② 创新设立专项产业资金; ③ 探索森林覆盖率指标交易机制; ④ 发展林业产业,通过采伐利用、造林培育形成循环利用模式,注重砍伐和培育林种的科学选择。				
草地生态系统	① 气候变幻减缓和适应 ② 防灾减灾 ③ 经济和社会发展 ④ 粮食安全 ⑤ 水安全 ⑥ 环境退化和生物多样性丧失	考虑土地利用变化、气候变化、过度放牧等人类活动影响各类因素,从经济、社会和生态系统全面综合规划	① 构建以国家公园为主体的自然保护地体系; ② 避免生物入侵,强化野生动植物及栖息地保护; ③ 落实禁牧、休牧和草畜平衡制度,规范放牧行为; ④ 因地制宜的退耕还草; ⑤ 严格控制草地转为建设用地; ⑥ 加强火灾、生物灾害防范和处理能力提升。	① 创新融资渠道,争取绿色金融支持; ② 创新设立专项产业资金; ③ 完善草原承包经营制度,发展草地农业,推广牧草种植,形成牧草饲料生产体系; ④ 优化牧区产业结构,创新发展多形式适度规模经营现代农牧业。	① 按需建立包括政府、科研机构、相关企业 and 基层组织等的合作平台,各方按技术功能各司其职; ② 建立反馈和申诉平台,让切身利益相关方公平参与到 NbS 实施的全过程。	实现短期与长期、生态与经济发展、生物多样性与碳排放权衡	① 严格按照需求比选实施最优方案; ② 充分利用“3S”和无人机监测等现代信息技术手段,完善资源“一张图”动态监测体系; ③ 丰富生态系统碳通量监测,建立健全生态系统碳排放监测核算体系; ④ 建立相关部门协同机制,实现信息平台共建共享; ⑤ 构建统一的调查监测评价体系,设立监测数据分析评估小组,制定适应变化的迭代更新机制。	① 符合相关法律法规; ② 与政府及其他关键利益相关方充分合作; ③ 符合七条准则并带来可持续发展的可借鉴性。
农田生态系统	① 气候变幻减缓和适应 ② 防灾减灾 ③ 经济和社会发展 ④ 粮食安全 ⑤ 人类健康 ⑥ 环境退化和生物多样性丧失	考虑土地利用变化、种植制度、耕作措施、土壤特征、施肥情况等各类因素,从经济、社会和生态系统全面综合规划	① 合理安排作物格局,采用套种、轮作、休耕等模式,提高作物的多样性; ② 不同作物的田块与非耕地镶嵌式布局,保障动物生存环境; ③ 因地制宜采取农田防护林、水土保持林、植物生态护坡等措施,增强景观连通性; ④ 继续推进耕地整治和提质改造项目,注重耕作层保护,避免过度硬化; ⑤ 土壤污染治理。	① 创新融资渠道,争取绿色金融支持; ② 创新设立专项产业资金; ③ 发展新型高原特色绿色农业,建设规模化、标准化、高品质的农业产业园区; ④ 把现代特色农业与设施农业和休闲农业相结合,通过田园综合体、休闲农牧场、农业公园等产业新业态形式,培育“农业+旅游”模式。				
湿地生态系统	① 气候变幻减缓和适应 ② 水安全 ③ 环境退化和生物多样性丧失	考虑气候变化、水文条件、植物群落等各类因素,从经济、社会和生态系统全面综合规划	① 构建以国家公园为主体的自然保护地体系; ② 对湿地濒危物种进行迁地保护,促进物种种群的恢复和增殖; ③ 对湿地开发利用进行环境影响评价; ④ 加强退化湿地生态系统的保护修复; ⑤ 水污染防治。	① 创新融资渠道,争取绿色金融支持; ② 创新设立专项产业资金; ③ 评估发展虾蟹养殖、水稻田、盐场等湿地农业; ④ 利用丰富的资源发展湿地旅游经济。				

6. 结论

本文通过对森林、草地、农田和湿地四个生态系统进行分析,在NbS背景下提出了提升固碳能力的措施。要保障这些措施的精准实施,需要制度、资金、技术、人才等多方面的支持。同时,在实际中生态系统间都有着复杂的物质和能量联系,需要坚持系统的观念,需要更大尺度的效益权衡。

6.1. 完善法律制度, 发展绿色经济

完善自然资源保护相关法律法规,深化集体林权制度改革,完善草原承包经营制度,建立健全最严格的自然资源保护制度,加强生态保护修复,强化资源用途管制。完善自然资源资产开发利用标准和产业准入政策,严厉打击破坏自然资源和生物多样性行为,抓好自然资源灾害防控。创新融资渠道,争取绿色金融支持,创新设立专项产业资金,完善生态补偿机制,探索通过“生态银行”实现生态产品价值。创新发展多形式适度规模经营现代农牧业,利用丰富的自然资源发展相关旅游经济。

6.2. 提升科技支撑, 注重人才培养

充分利用“3S”和无人机等现代信息技术手段,完善资源“一张图”动态监测体系,建立资源长效监测机制。构建统一的调查监测评价体系,建立相关部门协同机制,实现信息平台共建共享。丰富生态系统碳通量监测,建立健全生态系统碳排放监测核算体系。加强组织领导,全面推行林长制、田长制,逐步推行草长制,层层抓牢自然资源保护责任落实。加强现代信息技术、智慧平台等专业人才培养、调查研究队伍建设,建立健全现代化的生态保护修复队伍和火灾、虫灾等应急处理队伍。

6.3. 坚持系统观念, 保障生态系统完整性

探索开展全域土地综合整治、山水林田湖草生态保护修复、国土综合整治,不断总结经验,在系统的尺度上统筹短期与长期、生态与发展。优化国土空间格局,严守耕地红线和生态保护红线,持续开展国土绿化,构建以国家公园为主体的自然保护地体系。编制生态系统治理规划,与国土空间规划、重要保护地规划以及经济发展规划有效衔接,通过规划整体把握,然后制定不同时间段工作方案。

致 谢

魏寿煜在本文的英文摘要归纳翻译中给予了帮助,在此表示由衷的感谢!

参考文献

- [1] 罗明, 翟紫含, 应凌霄, 等. 探索自然的力量, 助力碳中和[N]. 中国自然资源报, 2021-04-07(3).
- [2] 安岩, 顾佰和, 王毅, 等. 基于自然的解决方案: 中国应对气候变化领域的政策进展、问题与对策[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 184-194.
- [3] 顾佰和, 王毅, 杨方义. NbS 促进碳中和的定位和政策路径分析[J]. 中国土地, 2021(6): 13-16.
- [4] 张小全, 谢茜, 曾楠. 基于自然的气候变化解决方案[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 336-344.
- [5] 田惠玲, 朱建华, 李宸宇, 等. 基于自然的解决方案: 林业增汇减碳路径、潜力与经济性分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 195-203.
- [6] 欧阳海龙, 董实忠, 高素娟. 以生态碳汇助推碳中和的武汉 NbS 实践路径[J]. 长江经济带发展, 2021(4): 38-44.
- [7] 李宸宇, 朱建华, 张峰, 等. 基于 NbS 的北京市乔木林固碳能力分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13-22.
- [8] 罗明, 杨崇曜, 张骁. 基于自然的全域土地综合整治思考[J]. 中国土地, 2020(8): 10-13.
- [9] 罗明, 刘世梁, 张琰. 基于自然的解决方案(NbS)优先领域初探[J]. 中国土地, 2021(2): 4-11.
- [10] 罗明, 周旭, 周妍, 等. 基于自然的解决方案典型案例之一: 官厅库区山水林田湖草生态保护修复项目[EB/OL]. 土地观察. <https://mp.weixin.qq.com/s/EYQNwUxFdaHV8yClvneeg>, 2021-01-04.

- [11] 罗明, 杨崇曜, 周妍, 等. 基于自然的解决方案典型案例之二: 深圳湾红树林湿地修复项目[EB/OL]. 土地观察. https://mp.weixin.qq.com/s/Q_nGCzlsi71hSPce4KCEXA, 2021-01-13.
- [12] 罗明, 周妍, 陈妍, 等. 基于自然的解决方案典型案例之三: 云南抚仙湖流域生态修复工程[EB/OL]. 土地观察. <https://mp.weixin.qq.com/s/Gnfu0e10wkjQj7LE9Dglw>, 2021-02-01.
- [13] 罗明, 杨崇曜, 郭义强, 等. 基于自然的解决方案典型案例之四: 贺兰山生态保护修复工程[EB/OL]. 土地观察. https://mp.weixin.qq.com/s/fgIjnAtUk_5gEuLd9po-ag, 2021-02-08.
- [14] 周妍, 张丽佳, 张骁, 等. 基于自然的解决方案典型案例系列之五: 内蒙古乌梁素海流域生态保护修复工程[EB/OL]. 土地观察. https://mp.weixin.qq.com/s/XYIu2_wCc-YAx3qqzmNvEA, 2021-03-04.
- [15] 李嘉宁, 周妍, 谢梦云, 等. 基于自然的解决方案之六: 江西省婺源县巡检司乡村振兴的望山生活[EB/OL]. 土地观察. <https://mp.weixin.qq.com/s/A0cLDed6eSM8vj12qeJECw>, 2021-05-10.
- [16] 周妍, 翟紫含, 李满意, 等. 基于自然的解决方案之七: 重庆城市更新[EB/OL]. 土地观察. <https://mp.weixin.qq.com/s/41fOFsOmyt7w3Uq3LeCCKw>, 2021-05-17.
- [17] 李保国, 王祥, 罗明, 等. 基于自然的解决方案之八: 黑土地保护性利用[EB/OL]. 土地观察. https://mp.weixin.qq.com/s/4tJN_f8gK3D9CtM9fKIEZg, 2021-05-31.
- [18] 金勇, 靳彤, 程骅, 等. 基于自然的解决方案之十: 钱塘江源头区域山水林田湖草生态保护修复工程[EB/OL]. 土地观察. <https://mp.weixin.qq.com/s/ch8VsCwKXzNM50Vg1UjzLA>, 2021-06-15.
- [19] 卢丽华, 周妍, 苏香燕, 等. 基于自然的解决方案之十一: 广西北海陆海统筹生态修复实践[EB/OL]. 土地观察. <https://mp.weixin.qq.com/s/P6xU6W15waF-1wx5m3CAug>, 2021-06-21.
- [20] Falkowski, P., Scholes, R., Boyle, E., *et al.* (2000) The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, **290**, 291-296. <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>
- [21] 陶波, 葛全胜, 李克让, 等. 陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(5): 564-575.
- [22] 赵新. 为碳中和贡献“绿色”力量[N]. 中国自然资源报, 2021-04-20(3).
- [23] Kucera, C.L. and Kirkham, D.R. (1971) Soil Respiration Studies in Tallgrass Prairie in Missouri. *Ecology*, **52**, 912-915. <https://doi.org/10.2307/1936043>
- [24] 冯涛. 地表大气 CO₂ 浓度数值模拟及碳通量反演研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2013: 1-4.
- [25] 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势——第 236 次香山科学会议侧记[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 587-590.
- [26] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.
- [27] Waddington, J.M. and Roulet, N.T. (2000) Carbon Balance of a Boreal Patterned Peatland. *Global Change Biology*, **6**, 87-97. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00283.x>
- [28] Belyea, L.R. and Malmer, N. (2004) Carbon Sequestration in Peatland: Patterns and Mechanisms of Response to Climate Change. *Global Change Biology*, **10**, 1043-1052. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00783.x>
- [29] 张文菊, 童成立, 吴金水, 等. 典型湿地生态系统碳循环模拟与预测[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 1905-1911.
- [30] 吴颖. 碳达峰与碳中和视角下森林生态与碳循环关系探讨[J]. 林业建设, 2021(9): 34-37.
- [31] 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4241-4256.
- [32] 李通, 崔丽珍, 朱佳佩, 等. 草地生态系统多功能性与可持续发展目标的实现[J]. 自然杂志, 2021, 43(2): 149-156.
- [33] 刘昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 1-9.
- [34] 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 622-628.
- [35] 蒋明康, 周泽江, 贺苏宁. 中国湿地生物多样性的保护和持续利用[J]. 东北师大学报自然科学版, 1998(2): 79-84.
- [36] 赵海凤, 闫昱霖, 张彩虹, 等. 森林参与碳循环的 3 种模式: 机制与选择[J]. 林业科学, 2014, 50(10): 134-139.