

中国自然保护区碳中和贡献的初步
评估及三个关键研究课题

The Preliminary Assessment and Three Key Issues
of Carbon Neutrality Contribution of Protected
Areas in China

王方邑
赵智聪
王 沛
杨 锐*

WANG Fangyi
ZHAO Zhicong
WANG Pei
YANG Rui

摘 要: 自然保护区不仅对保护生物多样性具有重要意义, 也在减缓气候变化、实现碳中和目标方面起到关键作用。中国自然保护区的碳中和贡献尚未得到充分的认识 and 关注, 相关研究尚处于起步阶段。首先对中国陆域自然保护区的碳储量、碳吸收能力、人为碳排放水平展开初步评估, 发现陆域自然保护区在保护高碳中和贡献生态系统方面存在不足。随后提出了中国自然保护区碳中和贡献研究的3个关键课题, 分别是自然保护区碳循环作用机理研究、自然保护区碳中和贡献评估与管理、生物多样性保护和碳中和的协同治理。最后围绕关键课题提出14个具体研究问题, 为中国自然保护区减缓气候变化的科学研究与管理实践构建系统框架。

关 键 词: 风景园林; 碳达峰碳中和; 气候变化; 生物多样性; 国家公园

文章编号: 1000-6664(2023)03-0006-08
DOI: 10.19775/j.cla.2023.03.0006
中图分类号: TU 986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-12-02
修回日期: 2022-12-23
基金项目: 国家自然科学基金项目“国家公园背景下中国荒野地空间格局与保护机制优化研究”(编号51978365)资助

Abstract: Protected areas (PAs) are not only important for biodiversity conservation, but also play a key role in mitigating climate change and achieving carbon neutrality. The contribution of PAs to carbon neutrality in China has not yet been fully recognized and paid attention to, and relevant studies are still in the initial stage. This paper firstly assesses the carbon storage, carbon capture capacity and anthropogenic carbon emission level of terrestrial PAs in China, finding the gaps in the conservation of ecosystems with high carbon neutrality contribution. Then this paper proposes three key issues for the study of carbon neutrality contribution of PAs in China, namely, the mechanism of carbon cycling in PAs, the assessment and management based on carbon neutrality contribution, and the synergistic management of biodiversity conservation and carbon neutrality. In addition, 14 specific research questions are proposed around the key issues. In this way, this paper develops a systematic framework for scientific research and management practices of climate change mitigation in China's PAs.

Keywords: landscape architecture; carbon peak and carbon neutrality; climate change; biodiversity; national park

1 自然保护区对实现碳中和目标具有关键作用

气候变化是当前人类社会面临的主要挑战之一。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告, 全球气温正以每10年0.2℃的速度上升, 严重破坏各类生态系统, 造成了不可逆转的损失^[1]。气候变化的应对策略包含减缓与适应两方面, 其中减缓指的是降低气候变化的速度, 通过限制或防止温室气体排放, 以及从大气中去除温室气体来实现^[2-3]。在气候变化减缓方面, 全球已有近200个国家通过签署《巴黎协定》对遏制全球变暖做出积

极响应; 其中已有193个国家提交了至少1版的《国家自主贡献》(Nationally Determined Contributions, NDC), 明确自身减排责任^[4]。其中, 中国于2020年联合国大会上做出了“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”的重要承诺^[5]。

“碳中和”目标的实现有赖于工业减排和碳捕集、碳封存技术, 也离不开对现有生态系统碳库的保护。如果认为研发新技术是制造新的容器来容纳大气中的温室气体, 那么保护自然生态系统就是确保现有的温室气体容器不破损泄漏、保护现有容器的温室气体消纳能力。自然保护区

作为生物多样性保护的有效工具已经成为广泛共识, 同时自然保护区对于实现碳中和目标也具有多方面的关键作用。首先, 自然保护区保护的是最具完整性、原真性的生态系统, 这些生态系统中存储了大量的碳, 是重要的碳库^[6], 已有研究显示, 2019年全球自然保护区覆盖的地上生物量碳达到了全球地上生物量碳总量的23.7%, 土壤碳储量达到了全球总量的14.6%^[7]。其次, 自然生态系统作为当前的重要碳汇, 具有为工业减排赢得关键时间窗口的重要作用^[8], 相关研究表明, 全球自然保护区每年的碳固定量约占所有陆地生态系统碳固定量的1/5^[9]。再次, 自然保护区

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: yrui@tsinghua.edu.cn

地内的人为活动受到最严格的管理,自然保护地能够起到限制碳排放的积极作用^[10],而围绕自然保护地营建开展的生态体验和自然教育活动,也有助于低碳理念的形成和传播。

基于自然保护地对碳中和的突出贡献,IUCN呼吁各国在《国家自主贡献》中更新有关自然保护地的内容,并在选定新的自然保护地时将生态系统碳密度纳入考虑^[11]。2019年联合国秘书长气候行动峰会提出,要在“基于自然的解决方案”(Nature-based Solutions, NbS)的基础上,发展“基于自然的气候解决方案”(Nature-based Climate Solutions, NCS),通过生物多样性保护实现减排增汇^[12]。自然保护地作为实现碳中和目标的有效工具,正得到越来越广泛的认可和关注。

2 我国自然保护地碳中和贡献研究存在明显空缺

我国陆地生态系统的碳储量、碳吸收,以及人为碳排放量得到了大量、充分的研究:当前我国生态系统总碳库约为 $89.27 \pm 1.05 \text{ PgC}^{[13]}$,陆地生态系统年碳汇量约为 0.24 PgC ($0.17 \sim 0.35 \text{ PgC}$)^[14],年人为碳排放量约100亿t^[15]。然而,尚未有研究对我国自然保护地的碳中和贡献进行系统核算,相关研究针对某种自然保护地类型或单体自然保护地展开,评估的维度也相对单一。我国自然保护地碳中和贡献研究的局限,导致管理路径上的探索更加受限。已有研究主要包括:李威等评估了1982—2017年中国881处国家森林公园的碳储量、碳密度和固碳速率并绘制了空间分布图^[16];邓喆等评估了祁连山国家公园碳储量的时空分布及土地利用变化对碳储量的影响^[17];Zhao等评估和预测了气候变化和不同管理措施下拟建昆仑山国家公园的碳汇能力变化,绘制了保护生态系统碳汇能力的空间规划方案^[18];刘伟等计算了钱江源国家公园体制试点内百山祖公益林的碳储量^[19];Zhang等计算了海南热带雨林国家公园吊罗山林区的碳汇变化^[20]。

从全球范围来看,已有部分国家围绕自然保护地碳中和贡献开展了理论和实践方面的探索。在自然保护地碳中和贡献的认识方面,相关研究主要在北美、欧洲,以及热带地区开展:美国国家公园管理局核算了美国国家公园的碳吸收量^[21];Zheng等通过1992—2001年的数据计

算证明了美国自然保护地有效保护了森林的碳储量^[22];Jantke等研究发现欧洲的自然保护地体系“Natura 2000”与欧洲碳含量高的地区存在明显重叠^[23];Collins等的研究表明,热带地区有14.5%的森林生物量碳存储在自然保护地当中,然而自然保护地的森林面积正在逐渐减少^[24]。在基于碳中和目标的自然保护地管理方面,美国通过发起“绿色公园”计划(Green Parks Plan)、“气候友好型公园”项目(Climate Friendly Parks Program, CFP)、设立“环境成就奖”,对国家公园减排给予支持和奖励^[25];英国国家公园通过“自然净零”(Net Zero with Nature)计划,修复具有高碳储量和高碳吸收能力的生态系统,尤为关注对泥炭地的保护^[26]。

基于以上研究背景,本文首先基于现有公开数据,对中国陆域自然保护地碳中和贡献展开初步评估,以获得我国陆域自然保护地碳储量、碳吸收与人为碳排放水平的宏观认知。在此基础上,构建中国自然保护地碳中和贡献的系统研究框架,提出关键研究课题,为我国自然保护地减缓气候变化的科学研究与管理实践提供线索和参考。

3 中国陆域自然保护地碳中和贡献的初步评估

3.1 数据来源与评估方法

本文的评估对象包括全国首批5个国家公园和459个国家级自然保护区,为我国自然保护地体系中管理级别最高、保护手段最严格、保护面积最大的2类自然保护地。其中,国家公园边界数据为笔者根据国家公园总体规划自行绘制,国家级自然保护区原始数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。本文去除了国家公园和自然保护区重叠的区域。处理后的2类自然保护地总面积约占国土面积的11.28%。

在碳储量方面,本文以生物量碳(Biomass Carbon)和脆弱土壤有机碳(Vulnerable Soil Organic Carbon)之和来计算。对于生物量碳,使用Spawn等绘制的2010年全球生物量碳数据^[27],空间分辨率300m,该数据被广泛应用于全球生物量碳储量相关的研究^[28]。脆弱土壤有机碳是未来30年内可能由于土地利用变化而损失的土壤有机碳,相比于直接评估土壤有机碳,脆弱土壤有机碳对于生态系统保护和自然保护地管

理更具有参考价值。本文参考Jung等^[29]和Zhu等^[30]的方法,以全球土壤有机碳储量数据^[31]和美国农业部预测的全球土壤分类数据^[32]为基础,绘制了我国脆弱土壤有机碳储量的空间分布图,空间分辨率为250m。

在碳吸收方面,使用生态系统净初级生产力(Net Primary Production, NPP)作为陆地生态系统碳吸收能力的表征。NPP是陆地生态系统生产能力评估的常用指标量^[33]。本文使用的数据是基于MOD17A3的全球NPP分布数据,时间跨度为2000—2020年(逐5年),空间分辨率 0.083° ,该数据被广泛应用于陆地植被生产力的估算中^[34]。

在人为碳排放方面,使用欧盟出版物办公室出版的全球大气排放数据库(EDGAR)的二氧化碳排放数据,时间跨度为2000—2020年(逐5年),空间分辨率 0.1° 。EDGAR使用与IPCC相一致的碳排放评估方法,评估结果相对可靠^[35]。

需要说明的是,虽然本文分析的是2000—2020年碳吸收和碳排放的情况,但各个自然保护地的建立时间不同,有些甚至并未建立于这一时间段内,因此评估结果不能完全代表各个自然保护地的管理效果,而是对自然保护地所涉区域生态系统宏观状况的反映。在评估过程中,碳储量、碳吸收和碳排放数据被统一重采样到1km,所有数据分析过程在ArcGIS 10.8中进行。

3.2 陆域自然保护地的碳储量评估结果

我国陆域自然保护地碳储量的评估结果如图1~3和表1所示。从碳储量总量上看,陆域自然保护地内储存了我国陆地生态系统11.76%的碳;从单位面积上看,陆域自然保护地的单位面积碳储量约为全国陆地生态系统单位面积碳储量的1.07倍,略高于全国水平,也略高于非自然保护地。分别分析生物量碳储量和脆弱土壤有机碳储量,可知陆域自然保护地的单位面积生物量碳储量低于全国和非自然保护地水平,而单位面积脆弱土壤有机碳储量则显著高于全国和非自然保护地水平。国家公园的生态系统单位面积碳储量为全国的1.47倍,其中生物量碳储量为全国的93.10%,而脆弱土壤有机碳储量为全国的1.59倍。

碳储量初步评价结果表明,当前我国陆域自然保护地对高碳储量生态系统的保护还存在较大空缺,差距主要体现在生物量碳上,而对脆弱土

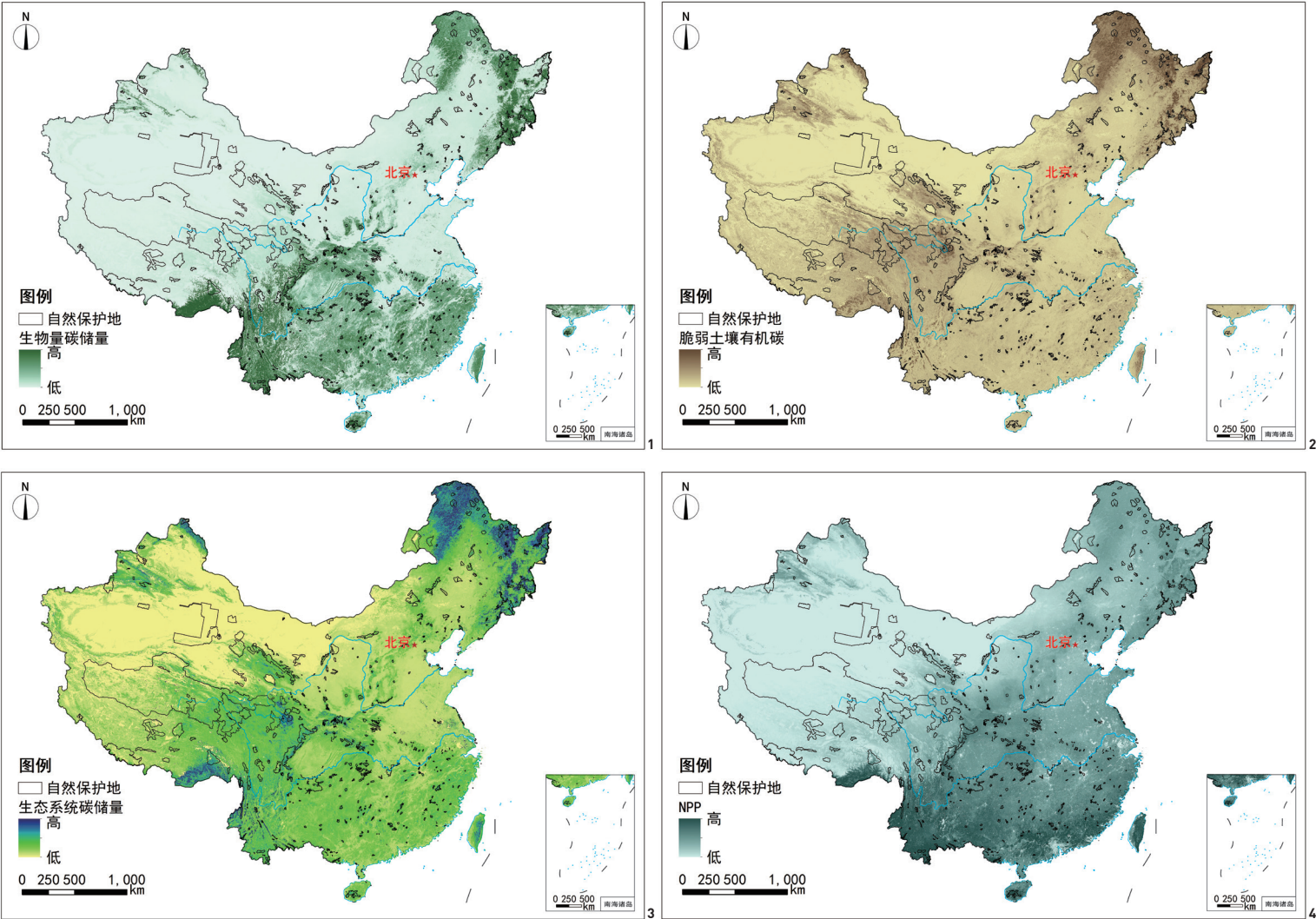


图1 我国陆域自然保护地生物量碳储量空间分布[审图号：GS京(2023)0291号]
Fig. 1 The biomass carbon storage in terrestrial PAs in China
图2 我国陆域自然保护地脆弱土壤有机碳储量空间分布[审图号：GS京(2023)0291号]
Fig. 2 The vulnerable soil organic carbon storage in terrestrial PAs in China

图3 我国陆域自然保护地生态系统碳储量空间分布[审图号：GS京(2023)0291号]
Fig. 3 The carbon storage in terrestrial PAs in China
图4 我国陆域自然保护地NPP空间分布(2020年)[审图号：GS京(2023)0291号]
Fig. 4 The NPP in terrestrial PAs in China in 2020

壤有机碳的保护效果相对较好，这与我国当前陆域自然保护地主要分布于西北、西部和北部地区有关。

3.3 陆域自然保护地的碳吸收评估结果

我国陆域自然保护地NPP的评估结果如表2所示，2020年陆域自然保护地和NPP叠加制图结果如图4所示。2000—2020年，我国陆地生态系统NPP总量增长，陆域自然保护地的

NPP总量也有所增长，但增长速率低于全国水平。2020年，陆域自然保护地内的NPP总量约占全国的5.46%，单位面积NPP约为全国的48.39%，显著低于全国单位面积NPP和非自然保护地的单位面积NPP。

NPP的初步评价结果表明，我国陆域自然保护地的碳吸收能力并不突出，这同样主要是因为我国目前有大面积的陆域自然保护地位于

西北、西部和北部地区，这些区域以草原、荒漠等生态系统为主，植被生产力较低，固碳能力较弱。在保护高碳吸收能力的生态系统方面，我国的陆域自然保护地体系仍有较大完善空间。

3.4 自然保护地的人为碳排放评估结果

我国陆域自然保护地人为碳排放的评估结果如表3所示，2020年陆域自然保护地和人为碳排放叠加制图结果如图5所示。2000—2020年，

表1
Tab. 1
我国自然保护地碳储量统计
Statistics of carbon storage in China

	生物量碳储量				脆弱土壤有机碳储量				生态系统碳储量			
	中国	国家公园	自然保护地	非自然保护地	中国	国家公园	自然保护地	非自然保护地	中国	国家公园	自然保护地	非自然保护地
碳储量总量/PgC	13.31	0.31	1.05	12.26	57.00	2.22	7.21	49.79	70.24	2.53	8.26	61.99
占全国的比例/%	—	2.31	7.92	92.08	—	3.89	12.65	87.35	—	3.59	11.76	88.24
单位面积碳储量/(kgC/m ²)	1.40	1.30	0.99	1.45	6.13	9.76	7.08	6.01	7.55	11.11	8.11	7.48
是全国的几倍	—	0.93	0.70	1.03	—	1.59	1.16	0.98	—	1.47	1.07	0.99

全国碳排放水平持续增长，陆域自然保护地碳排放也在增长，但陆域自然保护地内碳排放增长速率低于全国水平，国家公园的碳排放增长速率更是显著低于全国水平。2020年，陆域自然保护地内的人为碳排放总量约为全国的1.28%，单位面积人为碳排放量仅为全国的11.41%。

人为碳排放的初步评价结果表明，我国陆域自然保护地内的人为活动水平较低，并且人为碳排放量的增长较慢。陆域自然保护地内人为碳排放的增加可能受到周边城市、农田或道路上人为活动的影响；同时，自然保护地的保护管理措施可能在一定程度上对自然保护地范围内及周边人为活动的增长起到了抑制作用。

3.5 小结

上述评估结果表明，我国陆域自然保护地在保护生态系统碳储量、碳吸收能力方面的贡献并不突出，对于高碳储量生态系统，特别是高碳吸收能力生态系统的保护还不够充分。一方面，既往自然保护地的设立初衷是以保护自然生态系统和生物多样性为主，未考虑碳中和贡献也在情理之中；另一方面，自然保护地的空间布局有待优化，进一步保护具有高碳储量和碳吸收能力的生态系统。

从空间分布上看，当前陆域自然保护地对我我国南部、东北部等高碳中和贡献地区的保护相对不足。而在碳排放方面，我国陆域自然保护地内的人为活动碳排放虽远低于全国平均水平，但仍存在碳排放增长趋势，说明需要对自然保护地内的人为活动进行更严格的监控，制定更具有针对性、更详细的碳排放核算方法。

评估结果从总体上初步揭示了中国陆域自然保护地的碳中和贡献，然而也存在多方面的局限性。首先，本文使用的是全球尺度数据，数据的分辨率较低，用于国土尺度计算可能存在误差，尤其是面积较小的自然保护地评估结果准确性受到的影响较大，且本文仅进行了陆域自然保护地的评估，海洋自然保护地的碳中和贡献评估还有待进一步开展；其次，本文直接使用已有开源数据，而非基于碳循环过程的作用机理展开碳中和贡献评估，特别是没有基于自然保护地内的碳循环过程特点展开评估，因此未能从原理上完整还原碳循环过程，未能计算生态系统净碳汇；最后，在碳中和贡献评估的基础上，还需要进一步讨论其与自然保护地生物多样性保护的关系。

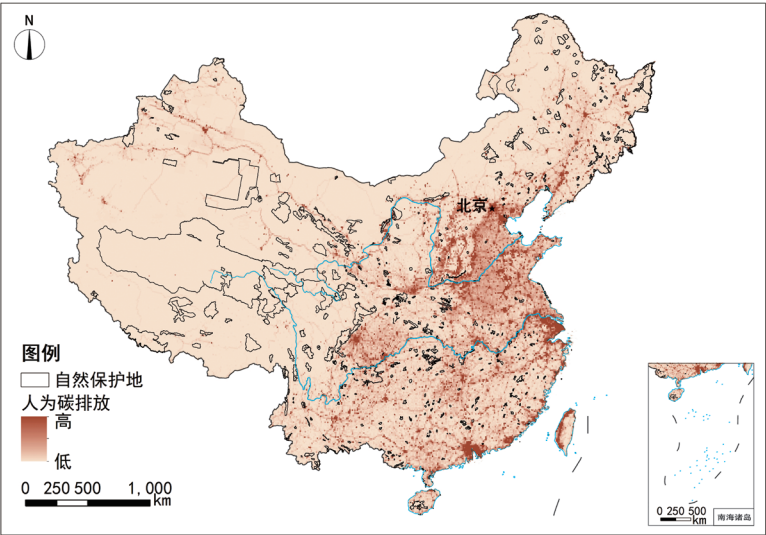


图5 我国陆域自然保护地人为碳排放空间分布(2020年)[审图号: GS京(2023)0291号]
Fig. 5 The anthropogenic carbon emissions in terrestrial PAs in China in 2020

4 中国自然保护地碳中和贡献研究的关键课题

基于研究现状和空缺分析，以及陆域自然保护地碳中和贡献的初步评估，本文提出中国自然保护地碳中和贡献的3个关键研究课题和14个研究问题(图6)，系统建构我国自然保护地碳中和贡献的研究体系。

表2 我国自然保护地2000—2020年NPP统计
Tab. 2 Statistics of NPP in China from 2000 to 2020

NPP总量(PgC)及占全国的比例				
年份	全国	国家公园	自然保护地	非自然保护地
2000	2.75	0.04	0.16	2.59
		1.56%	5.74%	94.26%
2005	3.00	0.04	0.17	2.83
		1.47%	5.63%	94.37%
2010	3.06	0.05	0.17	2.89
		1.50%	5.69%	94.31%
2015	3.26	0.05	0.18	3.08
		1.42%	5.43%	94.57%
2020	3.34	0.05	0.18	3.15
		1.45%	5.46%	94.54%
单位面积NPP(kgC/m²)及是全国的几倍				
年份	全国	国家公园	自然保护地	非自然保护地
2000	0.29	0.18	0.15	0.31
		0.63	0.51	1.06
2005	0.32	0.19	0.16	0.34
		0.59	0.50	1.06
2010	0.32	0.19	0.16	0.34
		0.60	0.51	1.06
2015	0.34	0.20	0.17	0.37
		0.57	0.48	1.07
2020	0.35	0.20	0.17	0.37
		0.58	0.48	1.07

4.1 关键课题一：自然保护地碳循环作用机理研究

认识自然保护地碳循环的作用机理，是维持和增强自然保护地碳中和贡献的基础。虽然本文的评估结果能够提供对自然保护地碳中和贡献的初步认识，但所用数据未能覆盖自然保护地内碳循环的全部过程，例如未能考虑土壤呼吸、凋落

表3 我国自然保护地2000—2020年人为碳排放统计
Tab. 3 Statistics of anthropogenic carbon emissions in China from 2000 to 2020

碳排放总量(×10 ⁸ tCO ₂)及占全国的比例				
年份	全国	国家公园	自然保护地	非自然保护地
2000	37.85	0.04	0.51	37.34
		0.09%	1.35%	98.65%
2005	63.79	0.05	0.83	62.96
		0.08%	1.31%	98.69%
2010	92.61	0.07	1.14	91.47
		0.07%	1.23%	98.77%
2015	107.09	0.08	1.35	105.73
		0.07%	1.26%	98.74%
2020	117.53	0.08	1.51	116.03
		0.07%	1.28%	98.72%
单位面积碳排放(kgCO ₂ /km ²)及是全国的几倍				
年份	全国	国家公园	自然保护地	非自然保护地
2000	3 980.97	150.32	477.43	4 425.22
		0.04	0.12	1.11
2005	6 709.84	206.36	780.41	7 461.68
		0.03	0.12	1.11
2010	9 741.20	276.18	1 067.92	10 840.96
		0.03	0.11	1.11
2015	11 263.60	319.44	1 264.98	12 531.40
		0.03	0.11	1.11
2020	12 362.61	329.73	1 411.03	13 751.25
		0.03	0.11	1.11

物呼吸、动物呼吸、野火等过程。同时，不同自然保护地碳循环过程的特点各不相同，宏观数据分析难以反映这种差异。因此，有必要以实际观测测量为基础，展开自然保护地碳循环科学机理的研究。

关键课题一涉及的具体研究问题包括：1)自然保护地碳循环过程，识别自然保护地碳循环的关键环节，以便针对各个环节展开具体研究；2)生态系统碳储存机制，包括不同碳库储存碳的原理、能力，及其碳储存能力易受哪些自然和人为因素的影响而改变；3)初级生产者碳吸收机制，研究不同类型、不同结构、不同年龄段的植被和其他生产者的碳吸收原理、碳吸收能力及其影响因素，测算生态系统的碳吸收潜力；4)人为活动碳排放机制，研究自然保护地内各类别、各强度的人为活动如何影响生态系统碳循环过程；5)碳循环与生物多样性关系，开展自然保护地碳循环与生物多样性、生态系统原真性和完整性的关系研究，从系统层面建立自然保护地碳中和贡献机制的宏观框架，对于自然保护地碳中和贡献的进一步评估与管理具有重要意义。

4.2 关键课题二：自然保护地碳中和贡献评估与管理

在理清自然保护地碳循环科学机理的基础上，关键课题二实现科学研究成果向实践应用的转化，包括自然保护地碳中和贡献的评估与围绕碳中和贡献的管理2个层次。

在碳中和贡献的评估方面，本文已经开展了初步尝试，然而受限于可获得数据的精度，还存在不足，有待更深入的精细化研究。因此，碳中和贡献评估相关的具体研究问题包括：1)自然保护地碳储量调查和测定，制定自然保护地碳库碳含量测定标准与方法，搭建自然保护地碳库碳含量测定实验室，获取碳储量数据并识别高碳储量区域；2)自然保护地碳吸收能力监测与评估，构建统一标准的自然保护地尺度的碳吸收过程观测指标、观测体系，结合遥感等技术手段，加强自然保护地碳收支过程监测，测定碳吸收量并识别具有高碳吸收能力的生态系统，监测生态系统碳吸收能力的动态变化；3)自然保护地人为碳排放监测与评估，结合自然保护地内允许开展的人为活动类型与强度，编制自然保护地人为碳排放核算清单，研发自然保护地人为碳排放数据的汇总路径和平台，识别碳排放量较高的区域、监测自然保

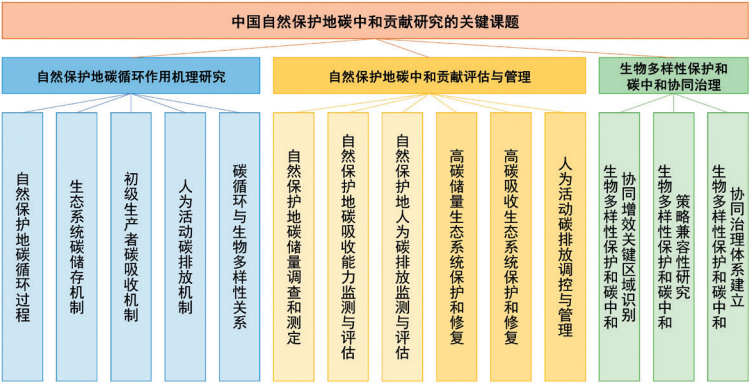


图6 我国自然保护地碳中和贡献研究的关键课题
Fig. 6 The framework of research on the carbon neutrality contribution of PAs in China

护地碳排放的动态变化。上述研究应尽快转化为适用于各类自然保护地的评估技术指南与标准，以利于进行横向、纵向比较和相关决策。

在碳中和贡献的管理方面，需要以评估结果为基础，具体包括以下几方面问题：1)高碳储量生态系统保护和修复，一方面加强对现有的具有高碳储量和高碳吸收能力的生态系统的保护，另一方面需要进一步识别受损碳库，把碳库修复任务整合到我国重点生态工程当中，优先在自然保护地开展试点和修复工作；2)高碳吸收生态系统保护和修复，根据本文的初步评估结果，需要重点加强对我国低纬度地区生态系统的保护，此外还需要对具有较高碳吸收潜力的生态系统加以保护，通过生态修复提升自然保护地的碳吸收能力；3)人为活动碳排放调控与管理，尽可能从各个环节降低自然保护地内人为活动的碳足迹，包括制定自然保护地低碳运营计划、增加清洁能源的使用、推广低碳出行与办公策略、建立废物回收和资源循环利用机制等，还可以设置激励机制，鼓励公众广泛参与自然保护地的低碳运营。

4.3 关键课题三：生物多样性保护和碳中和的协同治理

自然保护地保护的是生态系统的综合价值，其设立目标是多层次、多元化的。本文强调的关注自然保护地的碳中和贡献，是作为当前气候变化应对背景下自然保护地管理目标的补充，并不意味着将其作为唯一目标。为此，需要开展生物多样性保护和碳中和之间关系的研究，构建相应的治理体系，实现生物多样性保护和碳中和目标的协同增效^[6]。

关键课题三涉及的具体研究问题包括：1)生物多样性保护和碳中和协同增效关键区域识别，绘制碳中和贡献和生物多样性保护价值的空间分

布、梳理不同的空间类型；2)生物多样性保护和碳中和策略的兼容性研究，既需要考察气候变化减缓策略对生物多样性保护的影响^[36]，也需要考察生物多样性保护策略对减缓气候变化的作用^[37]，从而形成合适的治理策略工具集；3)生物多样性保护和碳中和协同治理体系的建立，基于生物多样性保护价值和碳中和贡献，梳理自然保护地内不同的空间类型，采取相应的治理手段，对于碳中和贡献为主导的区域，可以考虑拓展现有自然保护地类型，或考虑采取其他有效区域保护措施(Other Effective Area-based Conservation Measures, OECMs)，例如设立以保护自然碳库、开展碳中和科普宣教为主要目标的“碳公园”^[38]。

5 结语

自然保护地作为生物多样性保护的有效工具，在保护生态系统碳储量、维持生态系统碳吸收能力、抑制人为活动碳排放方面具有突出作用，自然保护地的碳中和贡献也受到越来越广泛的关注。针对我国当前自然保护地碳中和贡献研究尚处于起步阶段的现状，本文使用现有开源数据，对我国自然保护地的碳中和贡献展开了初步评估，发现我国自然保护地在保护高碳储量、高碳吸收能力的生态系统方面仍有较大完善空间；自然保护地内的碳排放水平较低，但也面临着碳排放增长的压力。基于评估结果，本文进一步提出了自然保护地碳中和贡献的3个关键研究课题和14个具体研究问题。自然保护地作为生物多样性保护和气候变化减缓的前沿阵地，需要开展系统的科学研究、踏实的调查分析和大胆的管理实践尝试，从而为全球基于自然的气候变化解决方案和生物多样性保护方案贡献中国智慧。

注：文中图片均由作者绘制。

致谢：感谢大熊猫国家公园成都管理分局对本研究的支持；感谢华中农业大学钟乐副教授对本研究的建议，硕士研究生杨胜兰、唐佳乐为资料收集提供的帮助；感谢清华大学建筑学院景观学系硕士研究生陈雪纯、李可心在前期研究中作出的贡献。

参考文献：

[1] IPCC. Sixth Assessment Report — IPCC[EB/OL]. [2022-11-30]. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.

[2] Dovie D B K. Case for equity between Paris Climate agreement's Co-benefits and adaptation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 732-739.

[3] IPCC. Working Group III — Mitigation of Climate Change[EB/OL]. [2022-11-30]. <https://www.ipcc.ch/working-group/wg3/>.

[4] United Nations. All About the NDCs[EB/OL]. [2022-11-30]. <https://www.un.org/en/climatechange/all-about-ndcs>.

[5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 努力推动实现碳达峰碳中和目标[EB/OL]. (2021-11-11)[2022-11-30]. https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202111/t20211111_1303691_ext.html.

[6] 钟乐, 赵智聪, 王小珊, 等. 基于气候变化与生物多样性协同的中国自然保护地建设路径[J]. *风景园林*, 2022, 29(6): 56-62.

[7] Maxwell S L, Cazalis V, Dudley N, et al. Area-based conservation in the twenty-first century[J]. *Nature*, 2020, 586(7828): 217-227.

[8] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J]. *中国科学：地球科学*, 2022, 52(7): 419-426.

[9] Melillo J M, Lu X, Kicklighter D W, et al. Protected areas' role in climate-change mitigation[J]. *Ambio*, 2016, 45(2): 1-13.

[10] UNEP, WCMC. Protected areas: an effective tool to reduce emissions from deforestation and forest degradation in developing countries?[EB/OL]. (2022-10-19)[2022-11-30]. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8554/protectedareasef08clar.pdf?sequence=3&%3BisAllowed=>.

[11] IUCN. Protected Areas and Climate Change[EB/OL]. (2022-07-21)[2022-11-30]. https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-07/protected_areas_and_climate_change_briefing_paper_december_2019-final.pdf.

[12] UNEP. Nature-Based Solutions for Climate | UNEP – UN Environment Programme[EB/OL]. [2022-11-30]. <https://www.unep.org/nature-based-solutions-climate>.

[13] Tang X, Zhao X, Bai Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.

[14] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算：方法、进展、展望[J]. *中国科学：地球科学*, 2022, 52(6): 1010-1020.

[15] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(19): 14095-14111.

[16] 李威, 黄玫, 张远东, 等. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 799-809.

[17] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 324-334.

[18] Zhao L, Du M, Du W, et al. Evaluation of the Carbon Sink Capacity of the Proposed Kunlun Mountain National Park[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 9887.

[19] 刘伟, 潘永柱, 徐肇友, 等. 百山祖国家公园公益林碳储量及分配特征[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 1-10.

[20] Zhang C, Li Z, Zhang X, et al. Carbon Sink Calculation and Time Variation in Hainan Tropical Rainforest National Park: A Case Study of Diaoluo Mountain Forest Area[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1637(1): 12002-12007.

[21] USGS. Terrestrial Carbon Sequestration in National Parks: Values for the Conterminous United States[EB/OL]. [2022-11-30]. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70148512>.

[22] Zheng D, Heath L S, Ducey M J. Carbon benefits from protected areas in the conterminous United States[J]. *Carbon Balance and Management*, 2013, 8(1): 1-14.

[23] Jantke K, Müller J, Trapp N, et al. Is climate-smart conservation feasible in Europe? Spatial relations of protected areas, soil carbon, and land values[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 57: 40-49.

[24] Collins M B, Mitchard E T A. A small subset of protected areas are a highly significant source of carbon emissions[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-11.

[25] National Park Service US. Green Parks Plan Advancing Our Mission Through Sustainable Operations[EB/OL]. (2017-10-31)[2022-11-30]. <https://www.nps.gov/subjects/sustainability/pload/NPS-Green-Parks-Plan-2016.pdf>.

[26] National Parks UK. Net Zero with Nature[EB/OL]. (2021-12-23)[2022-11-30]. <https://www.nationalparks.uk/net-zero-with-nature/>.

[27] Spawn S A, Sullivan C C, Lark T J, et al. Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1-12.

[28] Soto-Navarro C, Ravilious C, Arnell A, et al. Mapping co-benefits for carbon storage and biodiversity to inform conservation policy and action[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 375(1794): 20190128.

[29] Jung M, Arnell A, Lamo X D, et al. Areas of global importance for terrestrial biodiversity, carbon, and

water[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2021(5): 1499-1509.

[30] Zhu L, Hughes A C, Zhao X, et al. Regional scalable priorities for national biodiversity and carbon conservation planning in Asia[J]. *Science Advances*, 2021, 7(35): e4261.

[31] Hengl T, Wheeler I. Soil organic carbon stock in kg/m² for 5 standard depth intervals (0-10, 10-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm) at 250 m resolution (v0.2)[EB/OL]. (2022-11-30)[2022-11-30]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2536040>.

[32] Hengl T, Nauman T. Predicted USDA soil orders at 250 m (probabilities) | Zenodo[EB/OL]. [2022-11-30]. <https://zenodo.org/record/2658183#.Y4b-AOTBGAh>.

[33] Piao S, Fang J, Chen A. Seasonal Dynamics of Terrestrial Net Primary Production in Response to Climate Changes in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(3): 269.

[34] 李登科, 王钊. 基于MOD17A3的中国陆地植被NPP变化特征分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 397-405.

[35] European Commission. EDGAR – The Emissions Database for Global Atmospheric Research[EB/OL]. [2022-11-30]. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022.

[36] Smith P, Arneeth A, Barnes D K A, et al. How do we best synergize climate mitigation actions to co-benefit biodiversity[J]. *Global Change Biology*, 2021, 28(8): 2555-2577.

[37] Shin Y J, Midgley G F, Archer E R M, et al. Actions to halt biodiversity loss generally benefit the climate[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(9): 2846-2874.

[38] Loisel J, Walenta J. Carbon parks could secure essential ecosystems for climate stabilization[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(5): 486-488.

(编辑/刘欣雅)

作者简介：

王方邑
1997年生/女/吉林吉林人/清华大学建筑学院景观学系在读博士
研究生/研究方向为国家公园与自然保护地、地景规划与生态修复(北京 100084)

赵智聪
1982年生/女/吉林长春人/博士/清华大学国家公园研究院院长助理/清华大学建筑学院景观学系副教授/研究方向为国家公园与自然保护地、风景园林遗产保护、景观治理(北京 100084)

王 沛
1998年生/男/陕西富平人/清华大学建筑学院景观学系在读博士
研究生/研究方向为国家公园与自然保护地、风景园林遗产、荒野保护(北京 100084)

杨 锐
1965年生/男/陕西西安人/博士/清华大学国家公园研究院院长/
清华大学建筑学院景观学系系主任, 教授, 博士生导师/研究方向为国家公园与自然保护地、世界遗产、风景园林理论与教育/
本刊副主编(北京 100084)