

中国国家公园体制建设助力“双碳目标”实现的情景估算

王韶晗^{1,2} 宋爽^{1,2} 石梦溪^{1,2} 胡珊珊^{1,2} 邢姝寒^{1,2} 白赫^{1,2} 许大为^{1,2*}

(1 东北林业大学园林学院 黑龙江省 哈尔滨市香坊区 和兴路 26 号 150000

2 黑龙江省寒区种质植物资源与生态修复重点实验室 黑龙江省 哈尔滨市香坊区 和兴路 26 号 150000 联系方式:
13039937757 E-mail: 501205049@qq.com)

摘要

中国国家公园的正式建立,标志着中国的生态文明体制建设进入了一个新阶段。国家公园系统地保护了中国生物多样性最丰富、生态系统过程最完整的地区。这不仅有利于中国的自然保护工作,也有利于世界对气候变化等环境问题的应对。基于 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年四个时期的土地利用遥感图像,研究计算了中国首批 5 所国家公园在相应时期内的土地利用变化情况。并利用 Plus 模型 LEAS 模块,探讨了国家公园土地利用扩张的驱动因素。此外,研究使用 InVEST 模型碳储量模块,以各时期的遥感影像和各国家公园相应的碳库作为模型运行的基础数据,得到各国家公园过去 30 年的碳储存变化情况。基于热点分析功能,确定了过去 30 年国家公园碳储量变化的热点区域。在此基础上,基于 PLUS 模型的 CARS 模块,以国家公园区域管控措施为依据,估算了 2030 年不同情景下东北虎豹国家公园的碳储量情况,对东北虎豹国家公园核心保护区和一般控制区进行了恢复设想。结果表明,除三江源国家公园以草原为主要土地利用类型外,其他四个国家公园均以森林为主,主要土地利用类型的扩张和变化源于人类活动的作用。在过去的 30 年里,中国国家公园生态系统的碳储存主要呈现出先增加后逐渐减少的趋势。理想情景下东北虎豹国家公园 2030 年将达到近 30 年间碳储量最高值,将比 2020 年提升 7468250t。研究为中国国家公园的区域管理提供了参考,也进一步证实了国家公园体系的建设可以增强中国实现碳达峰和碳中和目标的能力,从而为改善区域及全球性环境问题贡献力量。

关键词: 中国国家公园, 土地利用变化, 碳储量, InVEST 模型, 情景模拟

Keywords: China National Park; land use change; carbon storage; InVEST model; Scenario Simulation

人类活动对于环境的影响日益凸显,特别是对于气候变化的影响,带来了极端天气、海平面上升等危及人类的重大问题^[1]。为应对气候变化,2015 年《巴黎协定》制定了将全球平均升温控制在 2℃,并力争在 21 世纪末将其限制在 1.5℃的长期温度目标。中国的温室气体排放量占全球的 26%^[2],作为第一个提交国家发展计划的发展中国家,中国政府承诺在 2030 年前达到二氧化碳排放峰值,并努力在 2060 年前实现碳中和^[3]。

自 1872 年美国建立世界上第一所国家公园——“黄石国家公园”以来,建立国家公园,为保护典型生态系统,为地域文化保护、开展科学研究、提供生态旅游场所以及对公众进行环境教育的概念在世界各国不断发展完善^[错误:未找到引用源。],在国际上,已经有 200 多个国家建立了自己的国家公园,并不断发展出多源内涵,国家公园代表着各国最精华的国土空间^[错误:未找到引用源。]。比如美国美国共有 62 座国家公园,总面积约 23 万平方公里,日本在全国建立了 29 处国立公园(国家公园),约占其国土陆地面积的 5%。而新中国成立以来,中国逐渐意识到生态环境保护的重要性,建立包括自然保护区、森林公园、湿地公园等多类自然保护地^[错误:未找到引用源。],力求对各类生态系统进行全面保护,各类自然保护地已超过 1.18 万个^[错误:未找到引用源。],但在探索的过程中,亦出现多类自然保护地重叠、多头管理等问题,严重影响了保护成效^[错误:未找到引用源。]。基于以上背景,国家提出构建以国家公园为主体的自然保护地体系,这是中国生态文明制度建设的重要内容,国家公园将重要生态区域进行了系统性保护,并通过移民搬迁、生态修复等手段更好的保护自然生态和自然文化遗产的原真性、完整性,同时增强区域碳汇能力,这将对对减缓生物多样性丧失及面对全球性气候变化贡献一定力量^[9-10]。截至 2023 年 5 月,首批 5 个国家公园各项工作稳步推进,特别是在生态保护方面,取得了不同程度的进展,生态保护效力逐步增强。

人类活动对环境的主要影响就是改变了地表利用状态,从而改变了生态系统服务功能,加剧了气候变化^[11]。土地覆盖信息对于环境变化研究、土地资源管理、可持续发展和许多其他社会效益来说是至关重要的^[12],目前应用遥感卫星数据对于土地利用变化进行分析是最为直观有效的手段,并且产生了多种数据类型。对于生态系统服务功能也形成了多种测量模型,其中 InVEST 模型的利用为土地利用及空间发展决策提供了科学支撑^[13]。该模型广泛应用在生境质量、产水、土壤保持、碳储量等生态系统服务功能探测,研究尺度涉及流域、省域、全国及世界范围内^[14-16]。

自 2003 年开始出现国家公园系统服务的相关研究,研究初期主要聚焦于服务价值的量化,研究对象也主要集中于国家公园的森林生态系统或是湿地生态系统,得益于 3s 技术的发展,也加强了国家公园生态系统服务对自然变化及人类活动的响应。其中国家公园土地利用格局变化也受到了学者的关注,例如,Palomo 和 Muhammed 分别对西班牙多尼亚纳国家公园和埃塞尔比亚贝尔山国家公园进行研究,均发现伴随着栖息地破碎、区域斑块变小等特征,景观生态空间结构的变化影响着与之关联的生态系统服务^[17-18]。

针对国家公园生态系统碳储量各国学者开展了相关研究,比如 Lutz, J.A 等学者估计了优胜美地国家公园、红杉和国王峡谷国家公园的地上碳含量^[19]; Dimobe, K 等学者估计了 Burkina Faso 的 W 国家公园的地上碳储量,并将碳密度与结构、物种多样性和特定功能特征联系起来^[20]; Chimner, RA 等人量化了秘鲁的瓦斯卡兰国家公园,湿草甸和泥炭地之间的土壤碳储量是如何变化的^[21]; Pache, R.-G. 等评估了罗马尼亚的 Retezat 国家公园 (RNP) 在特定时间范围内的碳储存和封存量,以及估计国家公园内的生态系统所固存的碳的经济价值^[22]。中国学者对祁连山、钱江源两个国家公园试点开展了相应研究,进行了区域碳储量核算^[24-25]。但现有国家公园生态系统碳储量或是生态系统服务功能研究多基于现状进行探讨,对未来发展把握并不充分,结合土地利用预测模型进行相关情景模拟,可拓宽国家公园管理工作相关视角,并增强国家公园规划发展的科学指导。

国家公园为主体的自然保护地对于维护生物多样性、提升生态系统服务功能具有重要意义^[25],目前保护了至少 30% 的地球,并聚焦于生物多样性特别重要的地区^[26],中国国家公园体制的建设将最珍贵的生态系统进行了有效保护,基于国家公园管理办法开展区域生态修复,提升相应的生态系统碳汇功能不仅作用于一定区域内乃至影响至全球范围,研究对于中国国家公园土地利用变化情况及其生态系统碳储量的响应进行测算,可对国家公园生态系统管理,及内部土地利用政策的调整形成具有科学性、指导性建议,从而助力碳达峰与碳中和目标实现。

本研究首先使用 LULC 转移矩阵,探究 1990-2020 年中国 5 所正式设立的国家公园土地利用类型变化情况,在此基础上,利用 Plus 模型对 30 年间各国家公园主要变化的土地类型,及其相应的变化驱动因素进行探测,挖掘土地利用变化根本原因,并基于 InVEST 碳储量模块进行各国家公园相应年份以及各用地类型的碳储量估算。最终应用空间统计——热点分析这一功能评判各国家公园内碳储量总部退化和改善的热点区域。研究基于土地利用变化情况明确了国家公园生态系统服务的重点改善及提升区域,并基于设想情况,以东北虎豹国家公园为例,进行国家公园碳储量发展情景预设,本研究将有助于各国家公园生态恢复及土地利用发展与管理规划政策的制定,进一步明晰国家公园的设立可为 2060 碳中和目标实现的助力程度。

2 材料及方法

2.1 研究区

国家公园具有最大的生物多样性和生态完整性^[25],中国首批 5 所国家公园具有典型的国家代表性及生态保护意义,不仅包括珍惜动植物栖息地,也涵盖意义重大的生态源地。其中三江源国家公园为中国第一个国家公园、也是世界上面积最大的国家公园,位于青海省,经过调整总面积达 $19 \times 10^4 \text{ km}^2$,为长江、黄河和澜沧江的源头汇水区,是中国乃至亚洲重要淡水供给地,有着“高寒生物种质资源库”之称,也是全球气候变化反应最敏感的区域之一^[27];大熊猫国家公园主要保护了中国特有物种——大熊猫,建立大熊猫国家公园,有利于增强大熊猫栖息地的连通性、协调性和完整性,实现大熊猫种群稳定繁衍位于中国西部地

区，横跨四川、甘肃、陕西三省，规划面积为 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[28]；海南热带雨林国家公园，位于中国海南省，规划面积 4269 km^2 ，是中国国家一级保护动物海南长臂猿的主要栖息地，海南热带雨林是全球重要的种质资源基因库，是中国热带生物多样性保护的重要地区^[29]；武夷山国家公园，横跨江西、福建两省，是世界人与生物圈保护区，又是世界自然和文化双遗产的国家公园，规划面积 1280 km^2 ^[30]；东北虎豹国家公园位于吉林、黑龙江两省交界，是中国东北虎、豹种群数量最多、活动最频繁、最重要的定居和繁育区域，也是重要的野生动植物分布区和北半球温带区生物多样性最丰富的地区之一，规划面积 $1.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[31]，五所国家公园分布如图 1：

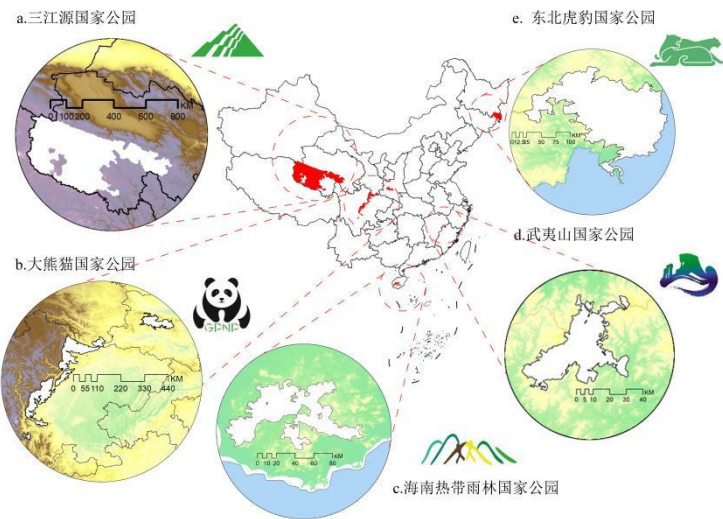


图 1 中国首批国家公园区位图

2.2 数据来源及处理

本研究土地利用类型数据选自中国武汉大学黄鑫教授团队，其成果是在 GEE 平台产出的第一个源自 Landsat 的年度中国土地覆盖 CLCD 数据集^[32]，该数据集分辨率为 30m，产品整体精度为 79.31%，研究范围更新为 1985 年至 2020 年，不仅在空间分辨率和时间分辨率上具有明显的优势，而且改善了时空一致性问题。本研究选择 1990、2000、2010、2020 四个年份，土地利用类型采取九级分类，分别为：农田、森林、灌木、草地、水体、冰雪、未利用地、不透水地表、湿地。同时选取社会经济、交通等方面共 11 项土地利用变化驱动因子探测国家公园 30 年间土地利用变化驱动力，数据来源见(表 1)。应用 GIS 软件进行相应数据处理，各国家公园相应碳密度来源于已有研究数据，根据相应地域进行针对性计算，形成 InVEST 模型计算 table。

表 1 基础数据来源

数据类型	数据来源
90mDEM	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
坡度	DEM 数据处理
交通数据	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org)
水系	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
1km2020 年均温	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
1km2020 年均降水	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
1km2019 人口密度	资源环境科学与数据中心 Center (https://www.resdc.cn/)
1km2019GDP	资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)

2.3 方法

2.3.1 转移矩阵

土地利用转移矩阵能够细致而全面地刻画区域土地利用的结构特征和变化过程,并能反映出土地利用类型内部的变化方向。通过土地利用类型面积作为转移矩阵中的向量,可以很好地揭示一定时间间隔内区域土地利用类型的格局特征和时空演变过程^[33],其公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

式中: S 表示面积; i 、 j 分别代表研究期内初期和末期的土地利用类型; n 为土地利用类型总数量; S_{ij} 为研究时间段内第 i 类土地利用向第 j 类土地利用转移的面积。

在本研究中采用土地转移矩阵来确定各类土地转移方向,研究节点选择 1990 年与 2020 年份,整体辨别土地变化情况,同时结果根据转移数据形成弦图进行结果可视化。

2.3.2 土地利用扩张驱动因子分析

土地利用类型的变化作为影响区域碳储量变化的主要影响因素,其变化会改变生态系统的组成与功能,并对植被和土壤的固碳能力产生一定作用,从而影响到区域碳储量水平,进而影响区域气候变化。对区域土地利用变化状况进行研究,能够很好地分析其对碳储量变化造成的影响^[34]。

众多专家学者运用多种模型模拟土地利用变化与碳储量的关系。其中 Plus (patch-generating land use simulation) 模型是一个具有更高模拟精度和更能真实度量景观格局的土地利用模拟模型^[35]。该模型综合了挖掘土地利用变化驱动机理的转化分析策略和基于浮现概率和竞争机制的格局分析策略的优势部分,并结合种子生长机制和多目标算法,能够更加精确地分析土地利用变化,反映更为真实的景观状态,目前应用该模型进行国家公园生态系统碳储量定量评估的研究较少^[36]。plus 模型主要基于土地扩张分析策略 (Land expansion analysis strategy, LEAS) 与基于多个随机种子的 CA (CA-based on multiple random seeds, CARS) 模块组成。

2.3.3 生态系统碳储量分析

In VEST (the intergrated valuation of environmental services and tradeoffs) 全称为生态系统服务能力综合估价和权衡得失评估模型^[37]。可以实现生态系统服务能力的空间化和图像化,使自然资本较为容易地纳入决策体系,将经济因素与环境保护有机结合。

InVEST 模型的评估单元为植被覆盖类型或土地覆被类型,以每种碳库的平均碳密度乘以各评估单元的面积来估算该区的生态系统碳储量。在生态系统碳储量估算模型中地上生物碳为所有活体植被的生态系统碳储量,地下生物碳为活体植物根系中的生态系统碳储量,土壤碳库指土壤中的有机碳,死亡有机碳指凋零枯萎的植物中储存的^[38-39]。InVEST 模型中生态系统碳储量计算方式如下:

$$Ci = Ci\text{-above} + Ci\text{-below} + Ci\text{-soil} + Ci\text{-dead}$$

$$TC = \sum_{i=1}^n Ci * Si$$

式中: TC 为总碳量, CI 为不同土地利用类型碳储量, si 为相应土地利用类型面积, $Ci\text{-above}$ 、 $Ci\text{-below}$ 、 $Ci\text{-dead}$ 、 $Ci\text{-soil}$ 分别为地上部分生态系统碳储量,地下部分生态系统碳储量,死亡有机生态系统碳储量和土壤生态系统碳储量 (t/hm^2)。本研究碳密度参数主要来源于各研究区参考文献并参考 InVEST 模型碳储量模块参数,主要区分不同生态系统类型和不同植被类型的碳密度。

2.3.4 空间热点检测方法

热点分析可以通过聚集基于计算距离而彼此接近的样本值,来确定在一个地理区域内具有统计学意义的高值和低值的位置。当在一个集群中发现类似的高(热)值或低(冷)值时,这种特殊的分析将样本分

组。事实上，热点分析需要在空间数据集内存在聚类。在这项研究中，Getis-Ord G_i^* 统计学，它是从局部角度衡量空间自相关的一种方法^[40]。用来识别碳储量变化数据中的高和低的聚类。GetisOrd G_i^* 统计量的计算公式如下^[41-43]。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n \omega_{ij})^2}{n-1}}}$$

其中 x_j 是特征 j 的属性值， ω_{ij} 是特征 i 和 j 之间的空间权重， n 等于特征的总数和：

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n X_j^2}{n} - \bar{X}^2}$$

3. 结果

3.1 土地覆盖类型变化情况

通过土地利用转移弦图，可以清晰展现各国家公园 1990-2020 年间土地利用转变方向，及转变幅度(图 2)，2020 年间三江源国家公园土地利用类型以草原 (80.55%)、未利用地 (14.65%) 为主要类型，并且彼此之间准换为三江源国家公园土地利用变化的主要方向，草地面积减少了 $344.65 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ，未利用地增加了 211.03 hm^2 ；大熊猫国家公园内部土地利用类型主要以耕地 (1.19%)、林地 (85.22%)、草地 (10.67%) 为主，各土地利用类型之间相互变化情况与其他国家公园相比稍显复杂，1990-2020 年间，内部土地利用耕地多数转变为林地，，同时灌木及草地也向林地进行了一定程度的转化,林地面积共增加 692.70 hm^2 ；海南热带雨林国家公园、武夷山国家公园以及东北虎豹国家公园均以林地、耕地为主要土地覆盖类型，2020 年林地在各国家公园内部土地利用占比依次为：97.42%、99.39%、94.56%；耕地分别占比 1.57%、0.41%、4.66%，三十年间海南国家公园林地面积增加了 7.43 hm^2 、东北虎豹国家公园林地面积增加了 7.03 hm^2 ，但武夷山国家公园林地面积稍有减少，耕地面积增加了 0.33 hm^2 。

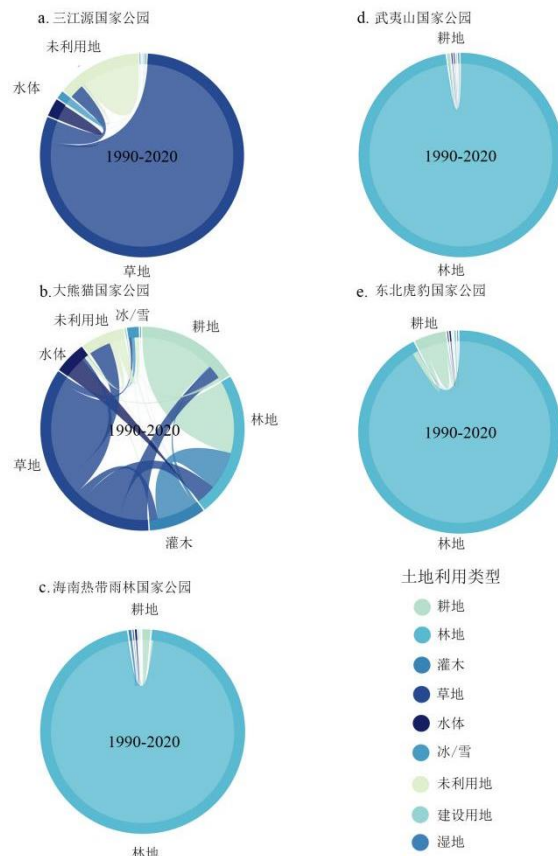


图 2 1990-2020 国家公园土地利用转移弦图

3.2 土地扩张驱动力分析

本文选择 5 所国家公园相应土地利用变化数量最大的土地利用类型，进行其变化的驱动力探测，基于 Plus 模型的 LEAS 模块进行探测（图 3）。三江源国家公园 1990-2020 年间，土地利用变化数量较多的为草地类型，根据探测结果查看距政府驻地距离及距铁路距离等人类活动影响因素较大的驱动因子对草地扩张的影响较大，距政府驻地及距铁路距离占总体扩张贡献度的 19.1%与 14.5%，根据扩张区域图谱显示，草地扩张部分主要与距政府驻地距离呈反向关系；大熊猫国家公园土地利用变化较大的类型为林地，30 年间林地共扩张 2222 面积，且内部高程 DME 与区域温度对林地扩张起主要影响因素，分别占总体影响因子贡献率的 25.5%与 21.8%，林地扩张部分集中在海拔相对较低区域；海南热带雨林国家公园水域扩张面积较大，主要是因为海南岛西部进行了水体整治，疏通淤堵部分，水体扩张主要位于 DME 高程较低区域，受其影响较大，高程因子占水体扩张贡献率的 18.4%；武夷山国家公园及东北虎豹国家公园面积变化较大土地利用类型均为林地，前者面积扩张主要受公园内部坡度影响，坡度占总体因子贡献的 33.2%，主要扩张面积集中在坡度较低区域；后者扩张部分驱动因素主要为人为影响，排名较高为距铁路距离及区域 GDP，两项驱动因子分别占贡献率的 13.5%与 11.6%，GDP 在一定程度上代表了人群的聚集程度，而有扩张图谱显示，距铁路距离较近部分林地扩张面积较大，主要因为在 30 年间，中国东北地区开展了天然林保护工程，并停止了商业性采伐，将原有林地受损较大区域进行了封山育林等保护措施。

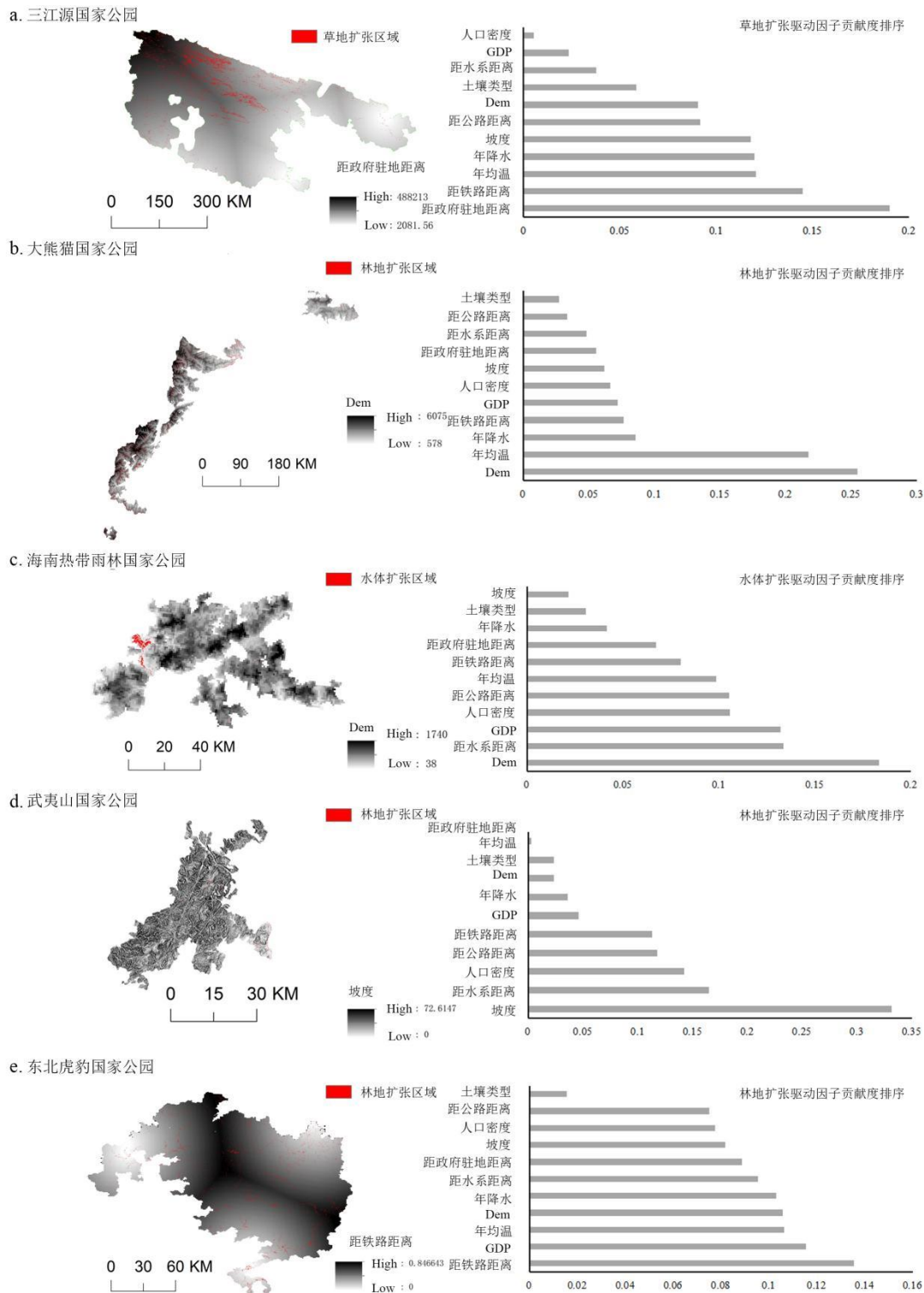


图 3 国家公园土地扩张区位及驱动排序

3.3 碳储量年均变化分析

土地利用类型及数量的改变带来了国家公园生态系统服务碳储量的变化,利用 InVEST 模型 Carbon 模块对 1990、2000、2010、2020 年份各国家公园碳储量进行测算,结果可见表 2。利用 Pearson 探测了国家公园面积与其生态系统碳储量的相关关系,结果表明二者相关性系数为 0.973,相关性显著,二者在一定程度上呈正向关系,在之后国家公园设立工作中,应尽量考虑涵盖更广泛的生态空间。研究亦在像素尺度下对 2020

年份各国家公园总体碳储量分布进行分析（图 4），三江源国家公园南部碳储量较高，大熊猫国家公园碳储量高值集中于东南方向，海南国家公园及东北虎豹国家公园碳储量较低区域为水域和人类聚集区域，而武夷山国家公园相对其他四所国家公园表现较为均质，研究对 2020 年份各国家公园内部相应土地利用类型碳储量进行了估算（图 5），除三江源国家公园以草地碳储量估值最高外，其余四所国家公园均以林地碳储量为较大占比。

表 2 国家公园碳储量 1990- 2020 年					单位:1x10 ⁴ Mg/t
年份	三江源国家 公园	大熊猫国家 公园	海南热带雨林国家 公园	武夷山国家 公园	东北虎豹国家 公园
1990	129456.910	57539.915	14532.995	2701.158	30043.057
2000	130291.401	57887.591	14508.074	2699.834	30008.889
2010	128803.051	57718.026	14543.523	2700.078	30072.602
2020	126865.093	57848.348	14415.848	2699.754	30028.260

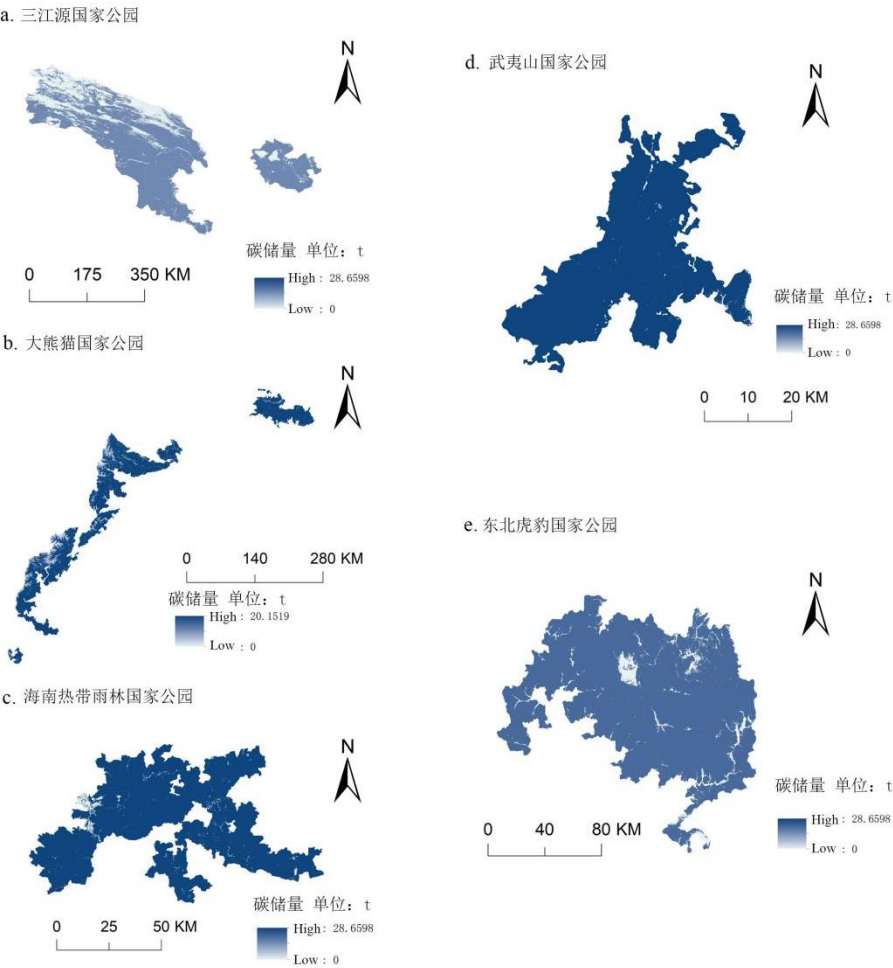


图 4 国家公园 2020 年碳储量分布图

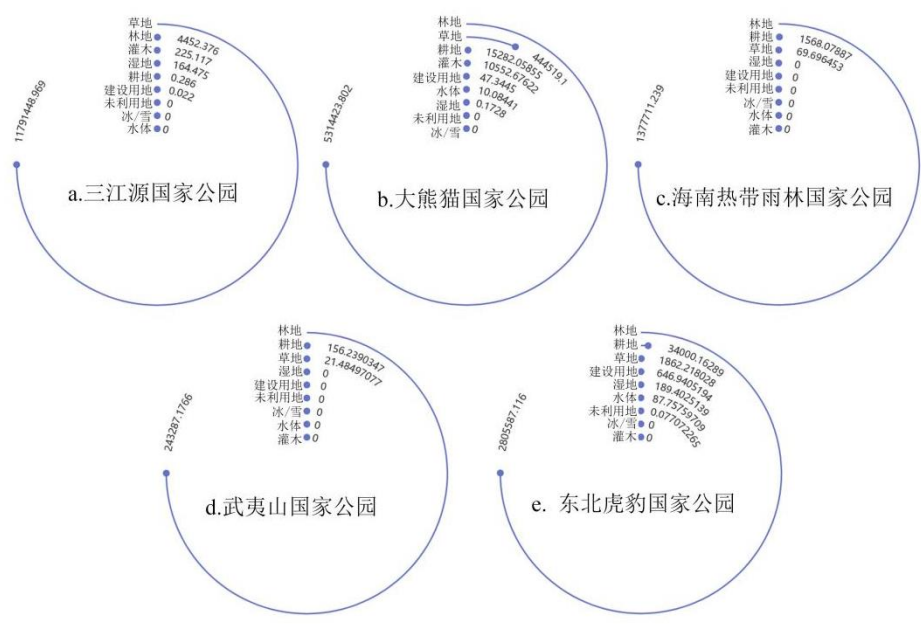


图 5 2020 年国家公园各地类碳储量

3.4 碳储量变化区域热点分析

研究拟从 1km 格网尺度对各国家公园碳储量 1990-2020 年变化量进行探讨,分析碳储量变化的冷热点区域(图 6)。从而可从利于各国家公园进行区域空间管理方案的制定。根据热点分析结果可知,三江公园 30 年间碳储量增加区域主要集中于公园的中部及北部,集中在长江源园区,碳储量减少区域主要集中在公园的西侧,即可可西里区域;大熊猫国家公园碳储量变化区域相对分散,碳储量减少区域位于公园的西北海拔较高区域;海南国家公园碳储量以西侧变化为减少集中区,碳储量增加区域主要集中在公园中部;武夷山国家公园相比其他国家公园总体碳储量变化较少,增加区域在公园南部;东北虎豹国家公园 1990-2020 年间碳储量变化相对较多,近 20 年间碳储量减少区域主要集中在城镇聚集区,位于公园的中部偏北的吉林省汪清林业局地区。

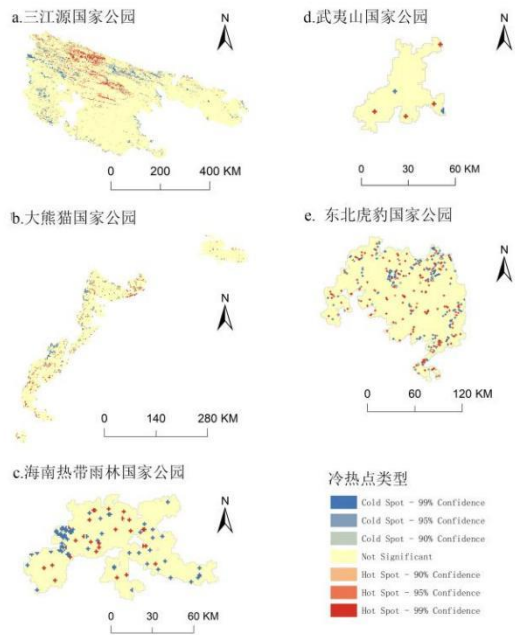


图 6 国家公园 1990-2020 1KM 格网尺度下冷热点分析

4. 讨论

4.1 国家公园设立对“双碳”目标实现的推动

2021 年中国正式设立了五所国家公园，标志着中国自然保护工作进入全新阶段。五所国家公园 1990-2020 年间碳储量变化趋势不尽相同，但多数符合 1990-2000 碳储量递减、2000-2010 年递增，2010-2020 年递减的趋势，原因在于 1998 年中国《天然林保护工程实施方案》等国家政策的出台，中国对于生态环境保护意识的不断增强，植树造林，退耕还林等政策的推进，致使生态环境恶化趋势减缓，有研究表明，全球绿地增长的 25% 均贡献于中国^[44]。但随着经济的发展需求，耕地、建设用地不断侵占原有生态用地，碳储量降低趋势不可避免。跟随国家公园相关政策的实施与推进，目前将国家公园范围内的原有各级各类自然保护地整合归并，并在国家公园内部核心保护区采取生态搬迁、退耕还林还草等生态保护措施，这将进一步提升国家公园整体生态服务功能，国家公园生态系统碳储量亦将不断提升。

2022 年末《国家公园空间布局方案》的出台是中国生态文明体制建设的重大成果，对于推进中国国家公园高质量发展、建设全世界最大的国家公园体系具有重要的指导意义。《空间布局方案》初步选定 49 所国家公园进行全国范围内的空间规划，并将不断进行修正，这预示着中国生态系统服务较高效之地区将开展较为全面的系统性保护工作，亦将提升全国范围内生态系统碳储量，为“双碳”目标的实现进行助力。

4.2 重点区域管控及成效预测

根据实际状况，中国国家公园规划过程中进行了不同保护程度的分区设计，基本均涵盖核心保护区、一般控制区，为提高国家公园生态系统服务功能，保护生态系统的完整性，在国家公园核心保护区采用生态移民搬迁，修复生态环境，拓展野生动植物栖息空间为主要保护手段，通过本研究将国家公园碳储量降低区域进行确定，可助力各国家公园针对性管控措施的实施（图 7）。

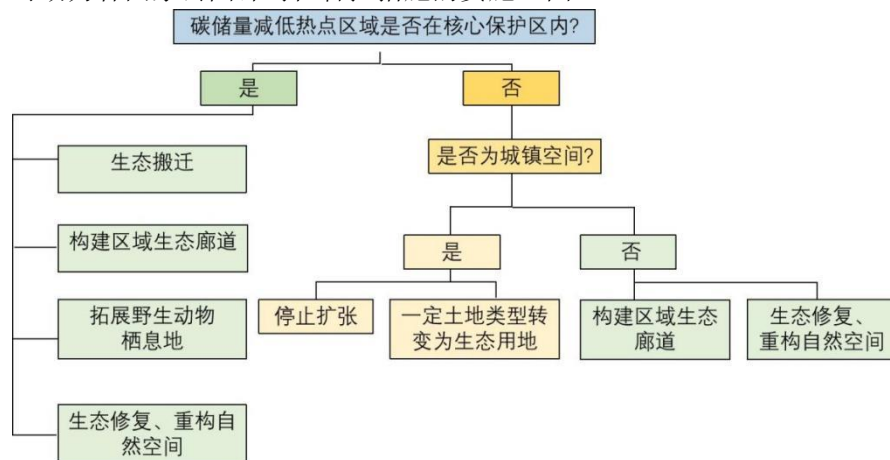


图 7 国家公园碳储量降低区域分区管控措施

本研究以东北虎豹公园为例，基于 PLUS 模型（CARS 模块）对该公园的一般控制区（人口聚集区）部分，选取自然、经济、社会等影响因子，通过 2010、2020 年份变化情况对 2030 年的土地利用进行了自然发展及生态保护情景下的土地分布预测。同时对于核心区、一般控制区（虎豹恢复区）发展进行了理想情景模式下的碳储量设想，这将进一步表明国家公园体制的设立，对于中国双碳目标实现的贡献作用，东北虎豹国家公园分区图及影响因子如下图 8 所示：

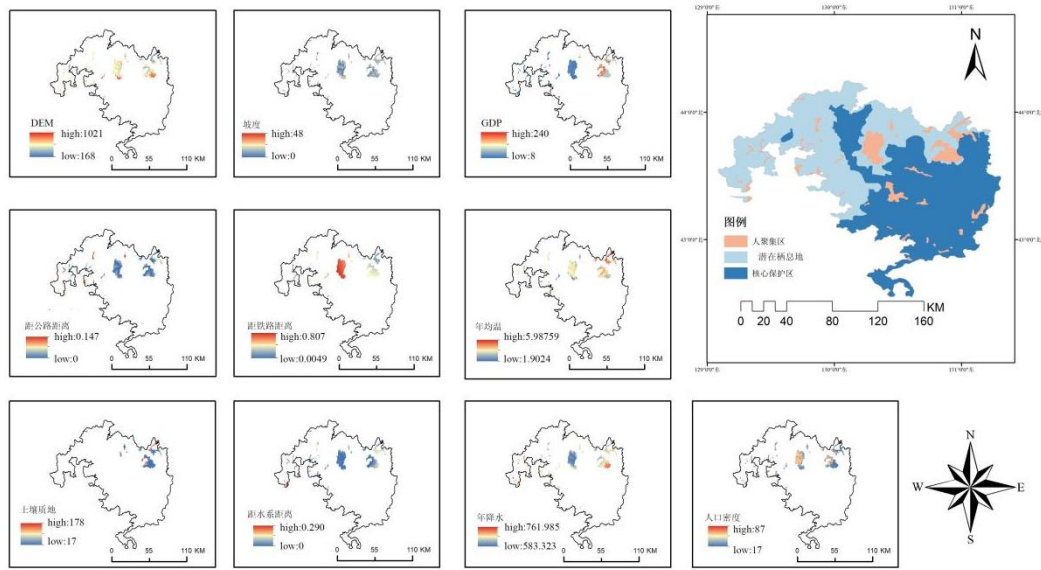


图 8 东北虎豹国家公园分区及驱动影响因子

研究首先预测了 2020 年份的土地利用情况，并与实际土地利用情况进行了模拟精度的对比验证，模拟年份的 Kappa 系数为 $0.797 > 0.7$ ，具有较高一致性，符合研究的精度要求。基于此以相同的模拟系数进行了自然发展模式下的土地利用预测，而生态保护模式主要以生态保护要求为基础，并结合国家公园管理要求，停止建设用地扩张，且生态用地的增长率比自然发展情景增加，本文设定建设用地及农田转向生态用地概率提升 30%，土地利用预测图如图 9 所示：

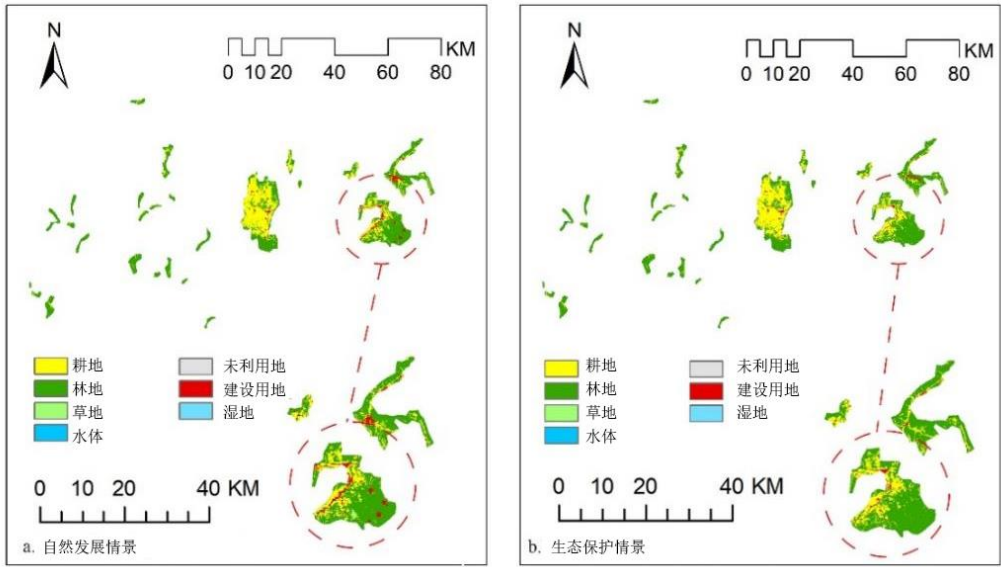


图 9 东北虎豹国家公园 2030 年土地利用变化预测

根据中国国家公园管理办法，研究设置了核心保护区以及一般控制区（虎豹潜在栖息地）内农田及建设用地均向生态用地转化，并且设置了转向林地及草地的理想情景，对于人口聚集区，模拟了 2030 年自然发展模式下以及基于国家公园管理后的生态保护要求，不同分区的碳储量核算结果见表 3。由分析结果可知，在情景设想下东北虎豹国家公园生态系统碳储量较 2020 年有着明显的提升，在理想条件下，可达到近 30 年内最大碳储量（表 3）。实现建立近 50 个国家公园的愿景，贯彻生态保护的理念，将进一步有助

于实现碳封顶和碳中和的美好愿景。

表 3 东北虎豹国家公园 2030 年情景模拟碳储量 单位:1x10⁴t

公家公园分区	情景 1	情景 2
核心保护区	16307. 184	16674. 188
一般控制区 (人口聚集区)	1179. 369	1207. 684
一般控制区 (虎豹潜在恢复区)	12563. 090	12893. 214
总计	30049. 643	30775. 085

4.3 创新与局限

研究系统的探究了中国国家公园长时期土地类型的主要变化情况，并分析了各国家公园主要土地变化类型的驱动机制，基于此核算了相应国家公园生态系统服务的碳储量变化情况，得出了碳储量重点变化区域，为国家公园土地利用及分区管控，以及国家公园助力“双碳”目标下的实现贡献一定力量。研究仍然存在一定的局限性，研究主要基于土地利用分类数据，这具有一定的不确定性，同时研究主要基于 InVEST 模型进行开展，该模型在空间展现上具有优越性，但 Carbon 模块的碳池数据多数来自于前人经验所得，数据具有一定的不确定性，应进一步展开各国家公园区域内碳密度的精准核算，以提升研究的精准度。

5. 结论

基于 CLCD 数据集，结合 PLUS 模型和 InVEST 模型碳储量模块，研究首次对中国正式建立的五个国家公园进行了系统的碳储量估算，并明确了 1990 年至 2020 年的土地利用变化及其相应的碳储量变化情况。研究的核心结论如下：

- (1)30 年间国家公园土地利用情况，主要在自然条件与人类活动共同作用下发生变化，耕地及建设用地的扩张致使国家公园生态系统服务功能呈现不同程度的退化；
 - (2)近 10 年来，国家公园规划区内的碳储量不断减少，尤其是三江源国家公园。本研究以 1 公里网格为尺度，确定了各国家公园碳储量变化的热点和冷点，并根据国家公园的分区规划，制定了核心保护区和一般控制区的不同方案框架。
 - (3)根据设想的恢复框架，对东北虎豹国家公园进行了 2030 年生态系统恢复方案的研究。根据最优方案，公园的生态系统碳储量将恢复到过去 30 年的最高状态，与 2020 年的实际状态相比，将增加 7468250 吨。
- 结果表明，国家公园的建立为区域生态质量的改善奠定了良好的基础，国家公园的建设可以进一步促进中国碳峰值和碳中和目标的实现。

参考文献

1. Rayner, N. A. ;Parker, D. E. ;Horton, E. B. ;Folland, C. K. ;Alexander, L. V. ;Rowell, D. P. ;Kent, E. C. ;Kaplan, A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.* **2003**, 108, 4407.

2. Li, L. S. ;Hui, J. C. ;Quan, S. G. Will China achieve its 2060 carbon neutral commitment from the provincial perspective? *Advances in Climate Change Research.* **2022**, 13, 2, 169-178.

3. Zhong, R.; He, Q.; Qi, Y. Digital Economy, Agricultural Technological Progress, and Agricultural Carbon Intensity: Evidence from China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. **2022**, 19, 6488.
4. 杨锐. 美国国家公园体系的发展历程及其经验教训[J]. 中国园林, 2001(1):62-64.
5. 杨锐. 试论世界国家公园运动的发展趋势[J]. 中国园林, 2003(7):10-15.
6. 彭杨靖, 樊简, 邢韶华等. 中国大陆自然保护区概况及分类体系构想[J]. 生物多样性, 2018, 26(3):315-325.
7. 唐小平, 栾晓峰. 构建以国家公园为主体的自然保护区体系[J]. 林业资源管理, 2017(6):1-8.
8. 马童慧, 吕偲, 雷光春. 中国自然保护区空间重叠分析与保护地体系优化整合对策[J]. 生物多样性, 2019, 27(7):758-771.
9. Pringle, R.M. Upgrading protected areas to conserve wild biodiversity. *Nature*. **2017**, 546, 91-99.
10. Hoffmann, S.; Irl, S.D.H.; Beierkuhnlein, C. Predicted climate shifts within terrestrial protected areas worldwide. *Nat Commun*. **2019**, 10, 4787.
11. Burkhard, B.; Kroll, F.; Nedkov, S.; Müller, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*. **2012**, 21, 17-29.
12. Chen, J.; Liao, A.; Cao, X.; Chen, L.; Chen, X.; He, C.; Han, G.; Peng, S.; Lu, M.; Zhang, W.; Tong, X., Mills, J. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. **2015**, 103, 7-27.
13. Posner, S.; Verutes, G.; Koh, I.; Denu, D.; Ricketts, T. Global use of ecosystem service models. *Ecosystem Services*. **2016**, 17, 131-141.
14. Gou, M.; Li, L.; Ouyang, S.; Wang, N.; La, L.; Liu, C.; Xiao, W. Identifying and analyzing ecosystem service bundles and their socioecological drivers in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Cleaner Production*. **2021**, 307.
15. Tang, L.; Ke, X.; Zhou, T.; Zheng, W.; Wang, L. Impacts of cropland expansion on carbon storage: A case study in Hubei, China. *J Environ Manage*. **2020**, 265, 110515.
16. Zhu, L.; Song, R.; Sun, S.; Li, Y.; Hu, K. Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050. *Ecological Indicators*. **2022**, 142.
17. Palomo, I.; Martín-López, B.; Zorrilla-Miras, P.; García Del Amo, D.; Montes, C. Deliberative mapping of ecosystem services within and around Doñana National Park (SW Spain) in relation to land use change. *Regional Environmental Change*. **2013**, 14, 237-251.
18. Muhammed, A.; Elias, E. Class and landscape level habitat fragmentation analysis in the Bale mountains national park, southeastern Ethiopia. *Heliyon*. **2021**, 7, e07642.
19. Lutz, J.A.; Matchett, J.R.; Tarnay, L.W.; Smith, D.F.; Becker, K.M.L.; Furniss, T.J.; Brooks, M.L. Fire and the Distribution and Uncertainty of Carbon Sequestered as Aboveground Tree Biomass in Yosemite and Sequoia & Kings Canyon National Parks. *Land*. **2017**, 6, 10.
20. Kangbéni Dimobe, Shem Kuyah, Zaïnabou Dabré, Amadé Ouédraogo, Adjima Thiombiano. Diversity-carbon stock relationship across vegetation types in W National park in Burkina Faso. *Forest Ecology and Management*. **2019**, 438, 243-254.
21. Chimner Rodney A.; Resh Sigrid C.; Hribljan John A.; Battaglia Michael; Bourgeau-Chavez Laura; Bowser Gillian; Lilleskov Erik A. Mountain wetland soil carbon stocks of Huascarán National Park, Peru. *Frontiers in Plant Science*. **2023**, 14.
22. Pache, R.-G.; Abrudan, I.V.; Niță, M.-D. Economic Valuation of Carbon Storage and Sequestration in Retezat National Park, Romania. *Forests*. **2021**, 12, 43.
23. Zou, W.T.; He, Y.J.; Ye, B., et al. Study on carbon storage of ecosystem in Qianjiangyuan national park based on InVEST model. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*. **2021**, 41, 3, 120-128. (in Chinese)
24. Deng, Z.; Ding, W.G.; Pu, X.T.; Lyu, Y.J.; Wang, Y.L. Spatial-temporal Distribution of Carbon Storage in Qilian Mountain National Park Based on InVEST Model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*. **2022**, 42, 3, 324-334, 396.
25. Xu, W.; Xiao, Y.; Zhang, J.; Yang, W.; Zhang, L.; Hull, V.; Wang, Z.; Zheng, H.; Liu, J.; Polasky, S.; Jiang, L.; Xiao, Y.; Shi, X.; Rao, E.; Lu, F.; Wang, X.; Daily, G.C.; Ouyang, Z. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proc Natl Acad Sci U S A*. **2017**, 114, 1601-1606.
26. Peng, Q.; Yang, R.; Cao, Y.; Wang, F.; Hou, S.; Tseng, T.H.; Wang, X.; Wang, P.; Zhao, Z.; Yu, L.; Locke, H. One-third of lands face high conflict risk between biodiversity conservation and human activities in China. *J Environ Manage*. **2021**, 299, 113449.
27. Ma, T.; Swallow, B.; Zhong, L.; Xu, K.; Sang, W.; Jia, L. Local perspectives on social-ecological transformation: China's Sanjiangyuan National Park. *Environment, Development and Sustainability*. **2022**.
28. Xu, Y.; Liu, R.; Xue, C.; Xia, Z. Ecological Sensitivity Evaluation and Explanatory Power Analysis of the Giant Panda National Park in China. *Ecological Indicators*. **2023**, 146.
29. Li, L.; Tang, H.; Lei, J.; Song, X. Spatial autocorrelation in land use type and ecosystem service value in Hainan Tropical Rain Forest National Park. *Ecological Indicators*. **2022**, 137.
30. He, S.; Su, Y.; Cheng, H. Coordinating community resource use and conservation: An institutional diagnostic practice in the Wuyishan National Park. *J Environ Manage*. **2022**, 317, 115508.
31. Zhu, H.; Zhang, Y.; Chen, Y.; Zhao, M.; Bo, C. Constructing a Model of Government Purchasing of Ecological Services: Evidence from China's Northeast Tiger and Leopard National Park. *Land*, **2022**, 11.
32. Yang, J.; Huang, X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*. **2021**, 13, 3907-3925.

33. Li, C.;Yang, M.; Li, Z.;Wang, B.How Will Rwandan Land Use/Land Cover Change under High Population Pressure and Changing Climate? *Applied Sciences* .**2021**,11.
34. Amundson, R.; Berhe, A.A.;Hopmans, J.W.; Olson, C.; Szein, A.E.; Sparks, D.L. Soil science. Soil and human security in the 21st century. *Science*. **2015**,348, 1261071.
35. Liang, X.; Guan, Q.;Clarke, K.C.;Liu, S.;Wang, B.;Yao, Y.Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*. **2021**,85.
36. Han, P.;Xiang, J.; Zhao, Q. Spatial differentiation and scenario simulation of cultivated land in mountainous areas of Western Hubei, China: a PLUS model. *Environ Sci Pollut Res Int*. **2023**.
37. Nelson, E.; Mendoza, G.; Regetz, J.; Polasky, S., Tallis, H.;Cameron, D.; Chan, K.M.A.;Daily, G.C.; Goldstein, J.;Kareiva, P.M.; Lonsdorf, E.;Naidoo, R.; Ricketts, T.H.; Shaw, M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*.**2009**, 7, 4–11.
38. Zhao, M.; He, Z.;Du, J.; Chen, L.; Lin, P.;Fang, S.Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models. *Ecological Indicators* . **2019**,98, 29–38.
39. Jiang, W.; Deng, Y.; Tang, Z.; Lei, X.; Chen, Z.Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models. *Ecological Modelling*.**2017**,345, 30–40.
40. Ord, J.K., Getis, A.Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geogr. Anal*.**1995**,27,4, 286 – 306.
41. Xu, H.;Croot, P.;Zhang, C.Discovering hidden spatial patterns and their associations with controlling factors for potentially toxic elements in topsoil using hot spot analysis and K-means clustering analysis. *Environ Int*.**2021**,151, 106456.
42. Xu, H.;Demetriades, A.; Reimann, C.;Jimenez, J.J.; Filser, J.; Zhang, C.; Team, G.P.Identification of the co-existence of low total organic carbon contents and low pH values in agricultural soil in north-central Europe using hot spot analysis based on GEMAS project data. *Sci Total Environ*.**2019**, 678, 94–104.
43. Tran, D.X.; Pla, F.;Latorre-Carmona, P.; Myint, S.W.; Caetano, M.; Kieu, H.V.Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.**2017**,124, 119–132.
44. Chen, C.; Park, T.; Wang, X.;Piao, S.; Xu, B.; Chaturvedi, R.K.;Fuchs, R.;Brovkin, V.;Ciais, P.; Fensholt, R.; Tommervik, H.; Bala, G., Zhu, Z., Nemani, R.R., Myneni, R.B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sustain*. **2019**, 2, 122–129.