DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.12.013
王显奇，吴丹，张世国，等. 固碳能力提升目标下自然生态空间保护研究——以喀斯特山区宁远县为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2023，45(12)：123-132.

固碳能力提升目标下自然生态空间保护研究
——以喀斯特山区宁远县为例

王显奇[1,2]，　吴丹[1,2]，　张世国[3]，　徐磊[1,2]

1. 湖南省第二测绘院，长沙 410000；2. 自然资源部南方丘陵区自然资源监测监管重点实验室，长沙 410000
3. 江西地源土地房地产评估规划测绘有限公司湖南分公司，长沙 410000

摘要：自然生态空间与碳汇空间高度重合，自然生态空间的保护和修复是固碳能力提升的必然举措. 以国家级生态功能区、南岭山区喀斯特地貌广泛分布的湖南省永州市宁远县为例，运用 MODIS NPP 数据、景观格局指数、最小累积阻力模型，识别县域碳汇空间、县域自然生态空间景观结构格局特征及生态安全格局，进而提出自然生态空间保护方案. 结果表明：① 宁远县固碳能力较强，年固碳量达 $1\,702.77\times10^4$ t，但空间分布差异大，最大固碳密度为 2.07 kg C/m^2，最小固碳密度为 0.32 kg C/m^2. ② 宁远县生态资源优越，森林资源丰富，受生产建设和石漠化侵蚀等因素影响，生态斑块破碎，生态廊道连通性不够. ③ 从保护目标设置、空间布局优化、用途管制、生态保护修复 4 个方面提出自然生态空间保护方案，符合县域自然生态空间格局的形成和优化，为南岭山区自然生态空间保护修复提供参考.

关　键　词：自然生态空间；生态安全格局；固碳；喀斯特山区
中图分类号：F205　　**文献标志码**：A
文 章 编 号：1673-9868(2023)12-0123-10　　开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

Natural Ecological Space Protection under the Aim of Enhancing Carbon Sequestration Capacity
——A Case Study of Ningyuan County in Karst Area

WANG Xianqi[1,2]，　WU Dan[1,2]，　ZHANG Shiguo[3]，　XU Lei[1,2]

1. *The Second Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha 410000, China;*
2. *Key Laboratory of Natural Resources Monitoring and Supervision in Southern Hilly Region, Ministry of Natural Resources, Changsha 410000, China;*
3. *Jiangxi Diyuan Land Real Estate Appraisal Planning and Mapping Co. Ltd. Hunan Branch, Changsha 410000, China*

收稿日期：2023-04-12
基金项目：湖南省自然资源领域推进碳达峰碳中和重大技术研究项目(湘自资科(2022)5 号).
作者简介：王显奇，高级工程师，主要从事基础测绘、国土空间规划研究.
通信作者：吴丹，工程师.

Abstract: The natural ecological space and the carbon sink space are highly overlapping so that the protection and restoration of natural ecological space is a necessary measure to improve the carbon sequestration capacity. This paper takes Ningyuan, Hunan Province, as an example, which is a national ecological functional area and widely distributed karst landform in the Nanling Mountains, with using MODIS NPP data, landscape pattern index and minimum cumulative resistance model to identify the carbon sink space, the characteristics of the county landscape structure pattern and the ecological security pattern, thus proposing a natural ecological space protection scheme. The results showed that: ① Ningyuan has strong carbon sequestration capacity, with an annual carbon sequestration of $1\ 702.77\times10^4$ t, while with significant spatial distribution differences, Ningyuan has a maximum carbon sequestration density of 2.07 kg C/m^2 as well as a minimum carbon sequestration density of 0.32 kg C/m^2; ② Ningyuan has superior ecological resources and abundant forest resources, but as it is affected by factors such as production and construction and rocky desertification erosion, the ecological patches are broken, and the connectivity of ecological corridors is insufficient; ③ The natural ecological space protection plan is proposed from the four aspects of protection goal setting, spatial layout optimization, use control, and ecological protection and restoration, which conforms to the formation and optimization of the natural ecological spatial pattern of the county, and provides reference for the protection and restoration of natural ecological space in Nanling Mountains.

Key words: natural ecological space; ecological security pattern; Carbon sequestration; karst mountain area

2021年9月，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》提出，要持续巩固提升碳汇能力，一方面要稳定现有森林、草原、湿地、海洋、土壤、冻土、岩溶等的固碳作用，巩固生态系统碳汇能力；另一方面实施山水林田湖草沙一体化保护修复重大工程，提升生态系统碳汇增量. 碳汇空间与自然生态空间是高度重合的关系，世界三大碳汇生态系统由海洋、土壤和森林组成[1]，重要的碳汇空间包括森林、草原、湿地、海洋等[2]. 森林是陆地生态系统的主体，年固碳量约占整个陆地生态系统的2/3[3]；草原是地球上最大的陆地生态系统之一[4]，草地生态系统的碳储量绝大部分集中在地下根系和土壤中，地上碳库不明显[5]；湿地是水陆综合作用形成的自然综合体，湿地具有较高的碳储存能力[6]；海洋是地球系统中最大的碳库，是大气的50倍，陆地生态系统的20倍[7]. 生态系统是指一定自然区域内，所有生物及其生活环境共同构成的生态系统. 自然生态系统类型包括森林、草原、河流、湖泊、湿地、海洋等[8]，生态系统基本功能包括生物生产、能量流动、物质循环、传递信息等，生态系统服务功能包括供给服务、调节服务、文化服务以及支撑服务[9]. 自然生态空间是指具有自然属性，以提供生态产品或生态服务为主导功能的国土空间，包括需要保护和合理利用的森林、草原、湿地、河流、湖泊、滩涂、岸线、海洋、荒地、荒漠、戈壁、冰川、高山冻原、无居民海岛等[10]. 当前关于碳汇与国土空间的研究，主要包括各类生态系统的碳汇现状、碳汇能力估算、碳汇时空演变、碳汇用地空间布局优化等；生态修复则是基于生态系统景观格局和生态安全格局识别问题，提出优化建议和生态修复方案. 在“双碳”目标和国土空间规划体系重构的大背景下，基于碳汇能力提升、山水林田湖草沙生命共同体一体化保护的目标，开展自然生态空间保护研究具有一定现实指导意义. 喀斯特地貌在我国广泛分布，喀斯特地区生态系统管理需了解其生态系统服务之间的权衡/协同关系[11]. 本研究以国家重点生态功能区、南岭喀斯特地貌山区宁远县为例，从碳汇空间与自然生态空间识别入手，基于MODIS GPP/NPP(净初级生产力)数据分析县域碳汇空间特征，并从斑块—廊道—基质角度分析县域生态安全格局与存在的问题，进而从自然生态空间保护目标设置、固碳能力提升目标下的自然生态空间布局优化、自然生态空间用途管制、生态保护修复4个方面制定面向固碳能力提升的自然生态空间保护方案.

1　研究区域概况及数据来源

1.1　研究区域概况

宁远县地处岭南中部褶皱带，地理位置为 110°42′—112°27′E，25°11′—26°08′N，总面积 2 500 km^2. 中亚热带季风气候区，气候温和，雨量充沛，阳光充足，多年平均降雨量为 1 510 mm，多年平均气温为 18.7 ℃，无霜期达 297 d. 属山地丘陵区，四面环山，中间为盆地. 山脉南北有九嶷山、阳明山，东西有雾云山、都庞岭，喀斯特地貌分布广. 属湘江流域，河流包括泠江、九嶷河、西春水、中河等. 土壤以砂岩为主，壤土、红黄壤土分布广泛，呈弱酸性. 宁远县是林业大县，林地面积为 1 664 km^2，占全县用地面积的 66.56%，森林覆盖率为 58.7%，林种包括马尾松、阔叶林、人工杉木林、竹林等.

1.2　数据来源与处理

本研究主要数据包括遥感数据、土地利用数据、林种数据. 遥感数据来自 NASA 官网(https://search.earthdata.nasa.gov/search)提供的 Terra 卫星 MODIS 传感器的中分辨率成像光谱仪所获取的遥感影像数据，即 MOD17A3HGF 提供的像素分辨率为 500 m 的年度净初级生产力；土地利用数据来自 2020 年国土变更调查成果、2020 年地理国情普查；林种数据来自林业保护一张图、森林资源调查.

2　研究方法

2.1　碳汇空间识别方法

基于 MODIS 净初级生产力(NPP)数据分析县域碳汇储量及空间分布情况[12]. 运用 ArcGIS 10.2 对获取的遥感数据进行数据地理坐标校正、裁剪、数据清洗等预处理，乘以 NASA 官网换算系数 0.000 1，计算出宁远县植被净初级生产力(NPP). 根据光合作用方程式($6CO_2+6H_2O \xrightarrow{\text{光合作用}} C_6H_{12}O_6+6O_2$)，1 kg 有机物能固定 1.63 kg CO_2，另根据相关研究 2.2 kg 有机物能固碳 1 kg[13]，因此碳汇空间固碳量可以通过植被净初级生产力(NPP)计算得到. 即 $W_C=n_{NPP}*1.63*2.2*0.27$[14].

2.2　景观格局评价方法

景观格局评价主要集中于景观格局量化评估[15-16]，是通过建立景观分类系统，运用 Fragstats 4.2 计算景观格局指数，研究区域景观格局特征和空间分布格局. 本研究通过对宁远县自然生态空间中涉及的森林、湿地、河流、湖泊、滩涂、荒地等景观类型进行细分至二级类，选取斑块平均面积(MPS)、景观类型面积(CA)、平均形状(MSI)、斑块密度(PD)、多样性指数(SHDI)等指标评价景观格局的斑块类型、斑块形状、斑块类型水平异质性、景观水平异质性.

2.3　生态格局识别方法

自然生态空间具有功能空间特征，能否提供生态系统服务是甄别自然生态空间的核心准则[17]. 划定方法包括枚举法、要素评价为基础的叠加分析法、构建生态安全格局法、最小累积阻力模型统筹三生空间优化法等[18]. 本研究基于景观生态学斑块、廊道、基质，运用最小阻力模型统筹三生空间优化法识别县域生态安全格局. 具体步骤为确定源、识别生态廊道、划分生态功能区[19]. 确定源中的“源”即过程的源，包括生态重要性极重要和生态敏感性极敏感的生态源地[20]，包括水源保护地、自然保护地、重要公益林、地质灾害易发区、石漠化区；识别生态廊道即确定区域内能量和物质流动的载体[21]，包括缓冲区、连接廊道、战略点等. 生态廊道具有趋于高潜力空间进行相互联系的特征，符合最小累积阻力模型计算的前提，即以生态源为起点，结合生态潜力空间，得到生态源潜在廊道[22]；划分生态功能区中，生态功能区主要是生态服务功能重要区域，包括水源涵养、水土保持、生物多样性维护、防风固沙等生态保护重要区域以及水土流失、石漠化、土地沙化等生态敏感区域，具体划分方法参照自然资源部《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南》(试行)[23].

3 结果分析

3.1 县域固碳量及空间分布情况

研究表明，宁远县域年固碳量为1 702.77万t，平均年固碳密度为0.76 kg C/m^2，最大固碳密度为2.07 kg C/m^2，最小固碳密度为0.32 kg C/m^2. 从空间分布上看，呈南北两端低中部高的分布规律，植被固碳量高的区域主要分布在中西部的天堂—中和—棉花坪集中林、中北部的清水桥—鲤溪—桐木漯集中林、中东部的雾云山—冷水集中林以及中南部的水市—湾井集中林；植被固碳量较高区域主要是南部的九嶷山集中林、北部的五龙山集中林、柏家西—中和东、太平—保安—仁和一带；植被固碳量低的区域主要分布在中和西侧、九嶷山—五龙山高海拔区、东溪—禾亭—冷水石漠化区、水市南侧、四街道中心城区(图1). 从固碳量与自然生态空间分布情况来看，固碳量高的区域主要景观为林地、灌木，包括竹林地、乔木林地、灌木林地，此部分与高固碳空间重合度达80%以上，其次为草地、湿地和未利用地，具体包括其他草地、森林沼泽、灌丛沼泽、滩涂、耕地等，固碳能力最弱的为建设用地，尤其是城镇建设用地，固碳空间零星分布在公园绿地和城市道路. 结合宁远县森林资源调查情况看，相较成熟林，中幼林固碳能力更强. 植被固碳量高的区域主要林种为杉木中幼林、阔叶树中幼林、国外松中幼林以及特规灌木林地；植被固碳量相对较低的区域主要林种为杉木近成过熟林、阔叶树近成过熟林、柏木近成过熟林；植被固碳量低的区域主要林种为未成林地、无立木林地、宜林地、经济林、杉木及过熟林(表1).

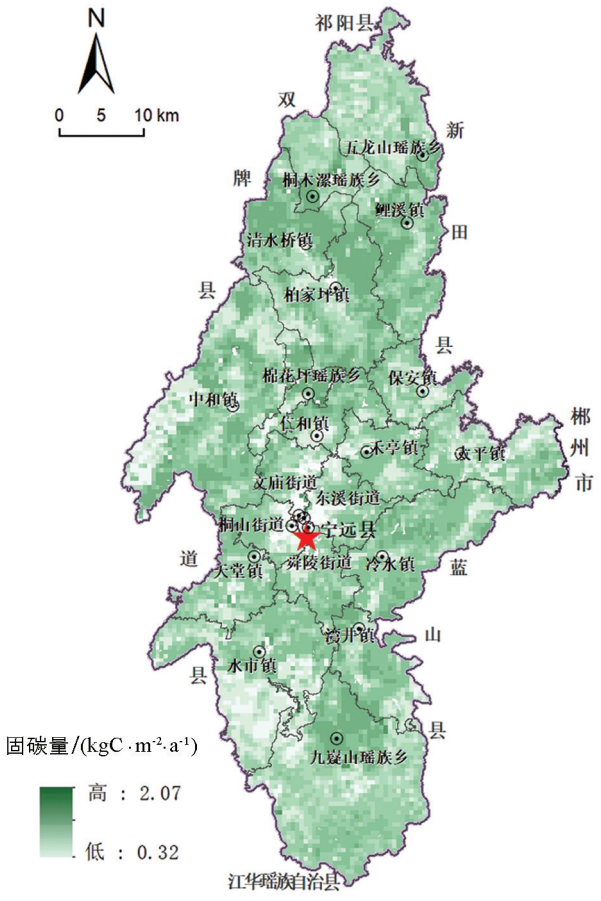

图1 宁远县域年固碳量分布图(2020年)

表1 宁远县森林资源分布情况

序号	固碳量	区域	主要林种
1	高	中西部的天堂—中和—棉花坪集中林	杉木中幼林、阔叶树中幼林、桉树中幼林以及经济林
2	高	中北部的清水桥—鲤溪—桐木漯集中林	国外松中幼林、阔叶树中幼林、特规灌木林地以及经济林
3	高	中东部的雾云山—冷水集中林	杉木中幼林、阔叶树中幼林、特规灌木林地
4	高	中南部的水市—湾井集中林	杉木中幼林、阔叶树中幼林
5	较高	南部的九嶷山集中林	阔叶树近成过熟林、马尾松近成过熟林、柏木近成过熟林、特规灌木林地
6	较高	北部的五龙山集中林	阔叶树近成过熟林、杉木近过熟林、阔叶中幼林
7	较高	柏家西—中和东	未成林地、疏林地、杉木中幼林、国外松中幼林
8	较高	太平—保安—仁和	宜林地、经济林、特规灌木林地
9	低	中和西侧	未成林地、竹林地、无立木林地、杉木近过熟林
10	低	九嶷山—五龙山高海拔区	未成林地、阔叶树近成过熟林、无立木林地、杉木近过熟林
11	低	东溪—禾亭—冷水石漠化区	未成林地、无立木林地、宜林地、经济林
12	低	水市南侧	疏林地、未成林地、阔叶树近成过熟林
13	低	四街道中心城区	人工林

3.2　县域自然生态空间景观格局分析

宁远县域自然生态空间总面积为 1 708.11 km^2，占县域总面积的 68.32%，生态资源丰富. 从具体景观上看，主要包括森林、草地、湿地、河流、水面、荒地，其中森林景观面积最大，为 1 645.44 km^2，占自然生态空间的 96.33%，主要分布在南部的九嶷山集中林、北部的五龙山集中林和西部的棉花坪—中和集中林，其次是草地，面积为 27.82 km^2，占比 1.63%，主要分布在中部喀斯特地貌分布区，再次是河流，面积为 20.97 km^2，占比 1.23%，贯穿县域南北(图 2). 从各类景观看，森林平均斑块面积较大，斑块密度较小. 从景观指数看，宁远县域自然生态空间平均斑块面积为 30.82 hm^2，平均形状指数分布为 1.70，多样性指数为 0.20，由此可见宁远县自然生态空间景观相对单一，主要以森林为主，稳定性较好. 具体到各类景观，森林规模最大、最完整，斑块数量少、密度小，景观最稳定，但受人类活动干扰大，平均形状指数为 1.85，是各类景观中的最大值，主要因为中部地势破碎程度大，与草地、河流、村落、城区等景观交融. 草地、荒地平均斑块面积较大，主要因为宁远县属于喀斯特地貌，受石漠化影响，土壤厚度薄，土肥条件差. 湿地、河流景观较为破碎，斑块密度远超其他景观，且两者关系密切，湿地主要分布在河流附近，呈此消彼长的态势，主要由于宁远县域河流上游支流部分不连续，出现中途截断的情况. 总体而言，从景观类型上看，宁远县生态资源较好，主要景观为森林，稳定性较好，但森林受人为干扰大；湿地、河流景观破碎程度高. 从地域分布上看，县域南北区域较为稳定，景观最完整；受生产建设、农业活动和喀斯特地貌影响，中部地区自然生态景观多样性更好，但相对较为破碎. 具体各项指标详如表 2 所示.

图 2　宁远县域自然生态景观分布情况

表 2　宁远县域自然生态景观分析

参数	总面积 TA/hm^2	斑块密度 PD	平均斑块面积 MPS/hm^2	平均形状指数分布 MSI	多样性指数 SHDI
自然生态空间	170 811.28	3.245 1	30.82	1.702 0	0.202 9
森林	164 544.44	1.513 3	66.08	1.853 1	—
草地	2 782.56	21.994 1	4.55	1.744 3	—
湿地	191.44	98.725 4	1.01	1.734 7	—
河流	2 097.12	96.561 0	1.04	1.516 6	—
水面	966.60	14.690 7	6.80	1.734 6	—
荒地	233.84	23.948 0	4.18	1.768 3	—

3.3 县域自然生态空间格局与存在的问题

宁远县处于南岭山区水源涵养与生物多样性保护区，同时又是喀斯特地貌发育区，主要生态功能为水源涵养区、生物多样性保护区以及石漠化敏感区. 因此生态源和节点主要综合考量森林公园、自然保护区、湿地公园、水源地、集中林、石漠化区等，共17个因子(表3). 生态功能区往往高度集中生态保护极重要区，参照“双评价”生态保护重要性等级和主要的生态功能，宁远县生态功能区为“两区两屏”，“两区”即以九嶷山国家森林公园—湿地公园—自然保护区为核心的南岭水源涵养与生物多样性保护区、五龙山集中林—双龙水库为核心的生物多样性保护区；“两屏”即西部的中和集中林—凤仙桥水库—大坝口生态屏障、西春水东侧集中林—牛形坝水库—雾云山林场生态屏障. 生态廊道以生态源和生态节点为起点，叠加生态保护重要性等级为极重要和重要的图斑，得到具有高潜力的生态空间，识别主要生态廊道和次要生态廊道. 宁远县主要生态廊道包括“两横三纵”，“两横”包括凤仙桥—棉花坪—永佳—冷水、中和—天堂—雾云山—冷水—谢家；“三纵”包括中和—凤仙桥—大坝口—双龙—五龙山、九嶷河—天堂—棉花坪—大坝口、九嶷山—雾云山—永佳—牛形坝—五龙山. 因此，宁远县域为“两区两屏两横三纵多点”的生态格局，如图3、表3所示.

图3 宁远县域生态格局图

从景观格局和生态安全格局上看，宁远县生态资源优越，森林资源丰富，但县域自然生态空间存在一定的问题. 一是生态斑块破碎，尤其是湿地、河流景观较为破碎，平均斑块面积仅为1 hm^2 左右，远低于其他景观；县域自然生态空间主要集中在南部和北部的生态涵养区，景观最完整，森林景观面积达164 544.44 hm^2，占县域总面积的65.82%，斑块密度仅为1.51，平均斑块面积达到了66.08 hm^2；中部受生产建设和石漠化侵蚀等因素影响，生态斑块比较破碎，生态服务功能有限. 二是受建设用地侵占，部分生态廊道连通性不够，主要体现在中部横轴和东侧纵轴生态廊道不连续或廊道过窄，潜在的生态廊道受各方面侵蚀，其中河流平均形状指数仅为1.52. 三是生态屏障受石漠化影响，生态退化严重，根据石漠化调查结果，县域东侧受石漠化侵蚀严重，严重影响到西春水东侧集中林—牛形坝水库—雾云山林场生态屏障和九嶷山—雾云山—永佳、牛形坝—五龙山生态廊道，县域东侧潜在的生态风险大. 最后从固碳能力上看，宁远县固碳能力较强，但空间分布差异大、巨大的提升潜力. 得益于丰富的森林资源，规模性的水源涵养和生物多样性维护功能的自然生态系统，宁远县年固碳量达1 702.77万t，平均年固碳密度为0.76 kg C/m^2；同时，在空间上存在一定差异，宁远县最大固碳密度为2.07 kg C/m^2，最小固碳密度为0.32 kg C/m^2，固碳能力在空间上差异明显，尤其是中部地区，由于其独特的自然地貌和人为活动影响，整体固碳能力不强，仍有一定的提升潜力.

表 3　宁远县生态源与生态节点一览表

序号	生态源	分类	源/节点
1	九嶷山国家森林自然公园	森林公园	生态源
2	九嶷山国家森林自然公园	森林公园	生态源
3	九嶷河国家湿地自然公园	湿地公园	生态源
4	九嶷山国家级自然保护区	自然保护区	生态源
5	冷水重度石漠化区	石漠化区	生态节点
6	潇水泠江河饮用水水源保护区	水源地	生态源
7	谢家水库	水库	生态节点
8	永佳水库	水库	生态节点
9	凤仙桥水库	水库	生态节点
10	双龙水库	水库	生态节点
11	牛形坝水库	水库	生态节点
12	大坝口水库	水库	生态节点
13	棉花坪集中林	集中林	生态源
14	五龙山集中林	集中林	生态源
15	中和集中林	集中林	生态源
16	天堂集中林	集中林	生态源
17	雾云山林场	集中林	生态源

4　自然生态空间保护方案

4.1　自然生态空间保护目标

自然生态空间保护目标主要聚焦于区域所在的生态区位和主导生态功能，基于生态安全格局确定保护目标，进一步巩固提升生态空间固碳能力. 宁远县自然生态空间保护目标为构建南岭山地带国家重要生态屏障、湘江源重点生态功能区. 具体突出九嶷山、雾云山、五龙山、九嶷河、泠江、宁远河、西春水等山脉、水系生物多样性与水源涵养功能；加强生态公益林、天然林和林地、湿地的“两林两地”重点生态功能区保护；实施生态廊道建设，对高速、干线公路，四河两岸进行封山育林及人工促进植补；开展石漠化、重金属污染土壤、生态退化等区域治理，构建县域“两区两屏两横三纵多点”的多维网络化生态安全格局.

4.2　固碳能力提升目标下的自然生态空间布局优化

自然生态系统固碳能力提升是公认的最经济、绿色、具有规模效益的技术途径. 当前，联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)认可的自然生态系统固碳能力提升人为管理措施主要包括造林、退耕还林、退耕还草、退田还湖等，技术措施主要是实施山水林田湖草一体化生态保护修复工程，增加森林面积和积蓄量[24]. 自然生态空间固碳能力提升策略主要为将固碳能力与生态安全格局构建融为一体，将固碳量低的区域与生态源、生态廊道、生态斑块修复结合，开展综合治理提升，将疏林地、未成林地、无立木林地、宜林地、特规灌木林地等低碳汇区域，与修复生态源、培育生态节点、联通生态廊道、修复区域生态有机结合在一起[25]，按照宜乔则乔、宜灌则灌、宜草则草的原则，开展山水林田湖草一体化系统修复，科学划定绿化造林空间，打造乔—灌—草立体生态系统，巩固提升生态空间固碳能力. 结合实地勘察及海拔、土壤质地、土层厚度、石漠化程度等自然条件，在疏林地、未成林地、迹地以及其他土地选取绿化造林空间，宁远县域绿化造林空间主要分布在中部生态断裂点，总面积为 38.76 km^2；通道绿化主要分布在高速、干线公路和四河两岸，共 12 条通道绿化(图 4).

4.3　自然生态空间用途管制

从景观学看，自然生态空间包含基质、节点、廊道. 基质即生态空间内生态要素，如山水林田湖草；节

点即生态空间内关键生态源或生态节点，如森林公园、湿地公园、集中分布公益林、水源地、重要湖泊水库等；廊道即生态空间内保障物质流、能量流、信息流等在国土空间流动的重要生态通道[17]. 以上3个要素组成的生态空间构成了整个生态系统，提供包括供给、支持、调节、社会文化等生态服务. 因此生态空间用途管制应从生态要素、生态格局、生态功能3个方面，同时兼顾固碳能力与行政管理职能，划分用途管制分区和制定用途管制规则. 在生态空间用途管制分区上延续现行自然保护地—生态保护红线—生态空间管制分区，并在此基础上叠加固碳能力分区，分为高、较高、低3档(图5). 在用途管制规则上延续当前自然生态空间管制规则，采取分区管控和准入清单制，自然保护地核心区原则上禁止一切人为活动；自然保护地核心区以外生态保护红线仅允许有限人为活动；生态保护红线以外生态空间严格控制农业、城镇等空间占用[10]. 除此之外加强高、较高固碳能力区域管控，严格限制高、较高固碳空间占用，对固碳空间进行分类差异化管理，进一步巩固高、较高固碳空间的固碳能力，封山育林，严格限制该区域树木砍伐；科学确定低固碳空间造林绿化地块，加强石漠化治理，提升低固碳空间固碳能力.

图4 宁远县域生态格局优化图

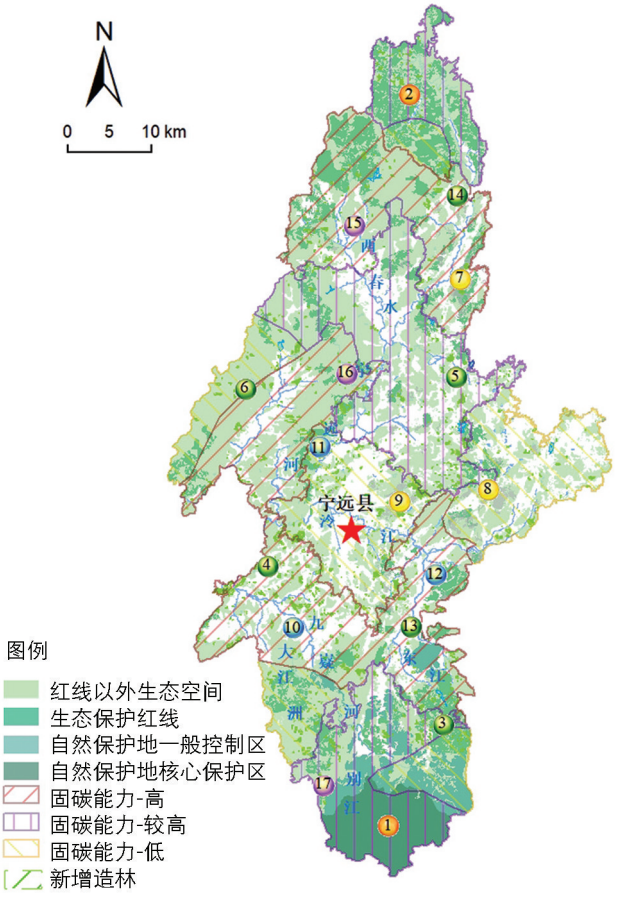

图5 宁远县自然生态空间管制分区与生态修复工程图

4.4 生态保护修复

生态保护修复应基于区域自然生态空间格局现状与存在的问题，对区域山水林田湖草开展系统治理[26]. 宁远县属南岭山区，同时也是喀斯特地貌发育区，具有岭南生物多样性保护和湘江水源涵养多重功能. 主要存在3个方面问题，一是中部受生产建设和石漠化侵蚀等因素影响，生态斑块破碎，生态服务功能有限；二是中部横轴和东侧纵轴生态廊道不连续或廊道过窄，潜在的生态廊道受各方面侵蚀，生态环境极为脆弱；三是生态屏障受石漠化影响，生态退化严重，主要分布在县域东侧，严重影响到西春水东侧公益林—牛形坝水库—雾云山林场和九嶷山—雾云山—永佳生态屏障. 按照“宜林则林、宜草则草、宜湿则湿”、生态修复与固碳能力结合的原则，从生物多样性与水源涵养生态功能、自然生态空间存在的问题、自然生态空间固碳能力潜力空间分布特征等方面提出宁远县生态修复重点工程，系统修复山水林田湖草生态

景观，构建高固碳能力的自然生态空间格局. 具体包括生物多样性、绿化造林、石漠化治理、水环境治理、生态廊道修复、矿区修复六大类工程，如表 4 所示.

表 4　宁远县生态修复工程一览表

编号	修复工程	分类	修复策略
1	九嶷山生态系统和生物多样性保护工程	生物多样性	加强九嶷山、五龙山生态功能区保护，建立天然林保护体系，推进野生动植物资源保护，开展生态多样性保护工程. 加强九嶷山森林公园保护，以自然保护修复为主，巩固区域固碳能力，增强水源涵养、生物多样性维护功能，构筑生态安全屏障.
2	五龙山生态系统和生物多样性保护工程	生物多样性	
3	九嶷山绿化造林生态修复工程	绿化造林	科学评估宜林国土空间，重点修复水土流失严重，生态环境破碎，生态功能脆弱区域. 严格实施“三线一单制度”，限制农业、城镇等人为活动，采取封山育林、国土绿化、退耕还林等措施，修复区域生态环境，进一步提升区域固碳能力.
4	天堂绿化造林生态修复工程	绿化造林	
5	牛形坝绿化造林生态修复工程	绿化造林	
6	中和绿化造林生态修复工程	绿化造林	
7	鲤溪石漠化综合治理工程	石漠化治理	开展石漠化综合治理，严格限制高强度人为活动. 因地制宜，选取特规灌木林等耐旱林种开展生态修复，提升区域植被覆盖度，同时加强土壤综合治理，增强水土保持功能[27].
8	冷水石漠化综合治理工程	石漠化治理	
9	雾云山石漠化综合治理工程	石漠化治理	
10	九嶷河流域水环境综合治理工程	水环境治理	保护湘江源，加强饮用水源保护和水生态修复. 严格限制人为活动，开展两岸生态防护林建设，构建水环境缓冲带，推进湿地生态环境修复和水体污染防治.
11	宁远河流域水环境综合治理工程	水环境治理	
12	泠江流域水环境综合治理工程	水环境治理	
13	九嶷山—雾云山—永佳生态廊道修复工程	生态廊道修复	构建完整区域生态安全网络，依托四河两岸、高速、国省道开展国土绿化，在生态廊道不连续、过窄区域开展生态廊道修复.
14	牛形坝—五龙山生态廊道修复工程	生态廊道修复	
15	清水桥矿区生态修复工程	矿区修复	加强矿山生态环境治理和恢复，对铅锌锑冶炼厂尾矿库等重金属污染开展土壤综合治理，加强污染地块二次利用管理.
16	新开锑矿地质环境修复工程	矿区修复	
17	癞子山矿区地质环境修复工程	矿区修复	

5　结论

自然生态空间涉及森林、草原、湿地、河流等自然生态系统，与碳汇空间高度重合，自然生态空间保护是固碳能力提升的必然举措. 同时，自然生态空间保护是系统综合工程，需从生态安全格局、生态景观入手，识别存在的问题，保护分区，进而优化空间布局，开展保护修复工程. 本研究以国家级生态功能区、南岭喀斯特地貌分布山区宁远县为例，基于景观生态学斑块—廊道—基质理论基础，运用最小累积阻力模型，识别自然生态空间和县域生态安全格局，并运用 MODIS 净初级生产力数据分析县域碳汇储量及空间

分布情况. 研究发现，县域自然生态空间格局存在生态斑块破碎、重要生态廊道不连续、生态屏障退化严重等问题；基于固碳能力提升的目标，从自然生态空间保护目标、空间布局优化、用途管制、生态保护修复4个方面提出自然生态空间保护方案，符合县域自然生态空间格局的形成和优化.

参考文献：

[1] 段晓男，王效科，逯非，等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报，2008，28(2)：463-469.

[2] 周宏春，霍黎明，管永林，等. 碳循环经济：内涵、实践及其对碳中和的深远影响[J]. 生态经济，2021，37(9)：13-26.

[3] 方精云，郭兆迪，朴世龙，等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑：地球科学)，2007，37(6)：804-812.

[4] 王清奎，田鹏，孙兆林，等. 森林土壤有机质研究的现状与挑战[J]. 生态学杂志，2020，39(11)：3829-3843.

[5] 田海静，王林，石俊华. 近20年中国北方草原植被长势动态监测[J]. 草业科学，2020，37(11)：2165-2174.

[6] 陈小花，陈宗铸，雷金睿，等. 清澜港红树林湿地典型群落类型沉积物活性有机碳组分分布特征[J]. 生态学报，2022，42(11)：4572-4581.

[7] 杨元合，石岳，孙文娟，等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学：生命科学，2022，52(4)：534-574.

[8] 欧阳志云，林亦晴，宋昌素. 生态系统生产总值(GEP)核算研究——以浙江省丽水市为例[J]. 环境与可持续发展，2020，45(6)：80-85.

[9] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and Buman Well-Being：Synthesis[M]. Washington，DC：Island Press，2005.

[10] 自然资源部. 自然生态空间用途管制办法(试行)[EB/OL]. (2017-03-24)[2023-03-12]. http://www.360doc.com/content/17/0525/18/7293128_657217382.shtml.

[11] 王秋红，王勇，李维杰，等. 喀斯特山地城市生态系统服务变化及关系研究——以贵阳市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2022，44(5)：158-168.

[12] 张继平，刘春兰，郝海广，等. 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J]. 生态环境学报，2015，24(1)：8-13.

[13] 王艳艳，杨明川，潘耀忠，等. 中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算[J]. 生态环境，2005，14(4)：455-459.

[14] 温宥越，孙强，燕玉超，等. 粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响[J]. 生态学报，2020，40(23)：8482-8493.

[15] 李彦华. 黄土丘陵区小流域生态防护型景观格局及固碳效益研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2015.

[16] 蔡剑英，王烜，李春晖，等. 湿地景观格局研究前沿热点及发展趋势[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2022，44(10)：127-139.

[17] 陈阳，岳文泽，张亮，等. 国土空间规划视角下生态空间管制分区的理论思考[J]. 中国土地科学，2020，34(8)：1-9.

[18] 邹晓云，邓红蒂，宋子秋. 自然生态空间的边界划定方法[J]. 中国土地，2018(4)：9-11.

[19] 韩俊宇，余美瑛. 全域全要素统筹背景下生态安全格局识别与优化建议——以衢州市常山县为例[J]. 地理研究，2021，40(4)：1078-1095.

[20] 彭建，赵会娟，刘焱序，等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究，2017，36(3)：407-419.

[21] 李卫锋，王仰麟，彭建，等. 深圳市景观格局演变及其驱动因素分析[J]. 应用生态学报，2004，15(8)：1403-1410.

[22] 徐威杰，陈晨，张哲，等. 基于重要生态节点独流减河流域生态廊道构建[J]. 环境科学研究，2018，31(5)：805-813.

[23] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)[EB/OL]. (2020-01-19)[2023-03-12]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html.

[24] 于贵瑞，朱剑兴，徐丽，等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径：基于自然解决方案[J]. 中国科学院院刊，2022，37(4)：490-501.

[25] 宋苑震，覃盟琳，袁倩文，等. 碳平衡导向下北部湾城市群碳汇用地布局优化研究[J]. 广西大学学报(自然科学版)，2020，45(5)：1071-1082.

[26] 邵上，汪光，廖磊，等. 广东粤北南岭山区山水林田湖草生态保护修复研究与实践[J]. 环境工程技术学报，2020，10(5)：779-785.

[27] 何霄嘉，王磊，柯兵，等. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. 生态学报，2019，39(18)：6577-6585.

责任编辑 包颖