

基于自然保护区空间管控分区的生态服务价值精细化评估模型

A Refined Assessment Model of Ecological Service Value Based on Spatial Control Zoning of Protected Areas

宋啸 韩胜海 邓毅*

SONG Xiao, HAN Shenghai, DENG Yi*

基金项目: 广东省林业局《南岭国家公园生态廊道体系研究与建设方案编制》(编号: 199001)

摘要

生态服务价值评估被广泛应用于自然保护区的规划管理中, 探索与生态空间管控相关联的精细化评估方法具有重要意义。针对常规当量法生态价值评估模型计算方法复杂、结果粗略的不足, 以南岭国家公园为例进行方法优化和精细化评估模型建构: 基于生态空间管控分区, 以森林质量关键性评价指标——蓄积量为链接, 通过关联性分析识别蓄积量与生态服务价值、管控单元得分之间的回归关系, 构建与管控单元相结合的生态服务价值精细化评估模型。通过对比验证, 2 种模型计算结果高度一致, 占总面积 97.81% 的小班差值低于 5%; 在差值大于 10% 的区间中, 84% 的小班面积小于 1 hm², 表明 2 种模型的差值主要集中在小面积区域, 而研究提出的模型弥补了当量法小面积价值趋于 0 的不足, 结果更准确。

Abstract

Ecological service value assessment has been widely used in the planning and management of protected areas, and it is of great significance to explore the refined assessment methods related to ecological space management and control. The conventional equivalent method to calculate the ecological service value assessment model has shortcomings, such as complicated calculation processes and rough results. Taking Nanling National Park as an example, the method optimization and refined assessment model construction were carried out. Based on the ecological space management and control unit, the regression relationship between the forest stock and the value of ecological services and the scores of management and control units was identified by the correlation analysis method with the key evaluation index of forest quality -- stand volume as the link, so as to build a refined assessment model of ecological service value combined with the management and control units. Through comparison and verification, the calculation results of the two models are highly consistent, accounting for 97.81% of the total area of the slight class difference is less than 5%. In the interval where the difference is more significant than 10%, 84% of the small class area is less than 1 hm², which indicates that the difference between the two models is mainly concentrated in the small area class. The proposed model makes up for the deficiency of the equivalent method in that the value of ecological services of small area units tends to 0 and makes the calculation result more accurate.

文章亮点

1) 基于生态空间管控分区探究生态服务价值评估优化方法; 2) 以蓄积量为桥梁构建生态服务价值与生态空间管控单元回归模型; 3) 结合空间管控和生态质量能更好地提升生态服务价值计算的便捷性、高效性和准确性。

关键词

自然保护区; 空间管控; 生态服务价值; 森林蓄积量

Keywords

Protected areas; Space management and control; Ecological service value; Forest growing stock

收稿日期: 2024-06-17

修回日期: 2024-07-31

中国在生态文明建设的发展过程中,提出了树立自然价值和自然资本的理念以及完善生态补偿机制的目标^[1]。2019年6月中共中央办公厅、国务院办公厅发布的《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》,明确提出了实行自然资源有偿使用制度、健全生态保护补偿制度的要求,强调制定以生态服务价值为核心的考核评估指标体系。生态服务价值可以呈现出与生态结构和生态功能密切相关的时空动态变化特征,从而为生态环境保护、生态功能区划、环境经济核算和生态补偿决策提供重要依据和基础^[2]。在国家公园体制建设发展中,尤其是在当前南方地区国家公园内存在较多集体林地的情况下,自然保护地的差异化生态补偿成为迫切需求。为保障社区发展利益最大化,针对自然保护地开展生态服务价值关联性分析及优化评估方法尤为重要。

生态系统服务评价主要有价值系数评价与物质质量评价2种类型^[3],这2种类型在评价目的、尺度等应用方面具有不同的适用性和优势^[4]。物质质量评价通过反映生态系统结构、功能及生态过程,能对复杂的生态系统进行客观的可持续性评估^[5]。价值系数评价侧重反映生态服务的总体稀缺性,通过展示生态服务价值进行直观对比,可以更好地为生态环境保护、生态功能区划、环境效益量化、生态补偿决策等工作提供依据^[6]。以生态补偿核算为目标对自然保护地进行评价,是对生态系统进行生态效益的综合作价值权衡。对比物质质量评价侧重生态过程表达的复杂性,价值系数评价的直观性和易操作性更有利于实现生态服务价值最大化与满足公众利益需求之间的权衡和管控。

生态服务价值^[7]计算方法可分为基于单位服务功能价格法(功能价值法)和基于单位面积价值当量因子法(当量因子法)^[4]2种。功能价值法通过一系列生态方程,对关键的生态服务功能进行评估,如水土保持、固碳制氧和栖息地质量等,再通过具体的经济学方法将不同的物质质量单位转为

统一的货币价值。该方法能够较准确地衡量某些服务功能量的大小,但实践发现,功能价值法计算过程复杂,需要不同的生态方程和参数输入,且对每种服务价值的评价方法和参数标准难以统一,其实施成本也较高^[8]。当量因子法划分了不同土地生态系统和服务功能,基于可量化的标准构建不同类型生态系统的各种服务功能的价值当量,再结合分布面积进行生态服务价值估算。相对于功能价值法来说,当量因子法较为直观易用,数据需求少,能更有效地对各尺度区域生态服务价值进行评估,因而在研究中被广泛采用。张乐勤等^[9]通过在局部地区研究和对比2种方法后认为,当量因子法评估相对接近人们的支付意愿,在生态补偿领域若使用此方法,补偿方与受补方更易接受,可操作性强。

当量因子法最早由Robert Costanza等^[10]提出,他们通过核算全世界生态系统服务价值分布,制定了全球生态系统服务价值当量因子表。国内外许多生态服务价值研究在此基础上根据区域特点进行修正评估,如谢高地等^[11]基于Costanza等的方法提出了适合中国国情的单位面积价值当量,并采用当量因子法构建了中国陆地生态系统服务价值的动态评估方法,为中国生态服务价值的研究提供了相对全面的科学依据。随着对不同区域生态服务价值评估的深入探索,学者们在“全国14种生态系统类型及其11类服务功能”价值当量表的基础上,结合地域差异和空间异质性,修正了相关参数,以提高评估精度。在自然保护地生态服务价值评估方面,沈若兰等^[12]对当量因子表进行改进,将武夷山国家公园划分出6种生态系统类型及9类服务功能,并对研究区1个标准单位生态服务价值当量因子的价值量进行修订计算,从而评估出武夷山国家公园生态服务价值,并验证了其结果合理适用,为国家公园生态服务价值评估提供了有效的模式与经验。

但是,在以国家公园为主体的自然保护地体系中,森林生态系统作为

陆地生态系统的主体,具有地类单一但属性多样的特点,例如林地类型下,不同的树种、龄组等属性在森林质量上存在较大差异。另外,自然资源在空间上的广泛分布形成了丰富的区域差异和不同的林地质量。从自然保护地核心保护区和一般控制区来看,不同的空间区域对应了不同的保护和管理,长期发展会形成区域森林质量和效益的差距。而这些对生态服务价值评估结果影响显著的细化问题,尚无研究进行深入探索。

通过相关研究分析和实践发现,目前国家公园生态服务价值评估还存在3个方面问题:1)现有的当量因子法不能精确区分森林质量,在同一地类不同基质的自然保护地评估结果准确性上有所欠缺;2)国家公园生态服务价值计算无法与空间分布建立起有效联系,对于不同管理目标和管控强度的生态单元无法进行差异化测算;3)现有的生态服务价值计算过程繁杂,在实际应用中效率不高,不能快捷、准确地为自然保护地相关管理工作提供服务。因此,精细化区分林地质量、结合生态系统空间分布构建高效准确的生态服务价值评估方法势在必行。

1 研究方法

1.1 技术路线

针对上述问题,本研究提出将生态服务价值与空间分区、森林质量分别结合并进行关联性分析的策略(图1),以期构建更加高效、准确的生态服务价值评估方法。

空间分区管控被认为是发挥自然保护地和国家公园多重功效、协调利益各方需求的重要管理技术^[13-14]。目前,已有研究从管理目标的角度提出了生态空间管控分区的多层级、动态化管理思路^[15-16],结合空间生态基质对自然保护地进行评价并分区,形成层级化生态系统和差异化管理措施的空间单元,可以直观地反映空间单元的保护等级和管理强度,为自然保护地生态服务价值提供准确高效的评估依据。因此,本研究以生态空间管控分区成果为基础,探究生态服务价值

与其评价指标的关联性。

森林质量^[17-18]被认为具有反映森林所有生态、社会和经济效益的功能和价值^[19]，一方面包含森林本身的内在属性，如森林生产力、森林健康稳定程度和林分状态等指标因素，是进行生态空间管控的重要评价指标；另一方面也包括森林提供的服务效能，如森林生态、社会文化以及经济服务等，是计算生态服务价值的重要依据。蓄积量^[20]是影响这些因子的关键指标，可作为评价森林质量的主要量化指标^[21]和关联指标，来研究生态服务价值和生态空间管控分区的相关性。

研究包括资料收集、数据矫正、关联性分析与案例验证 4 个步骤（图 2）。首先，对已划分生态空间管控单元的自然保护区域进行基础资料和数据收集，选取实验案例和验证案例；其次，根据研究区域实际情况矫正森林蓄积量区间和生态服务价值当量数据；然后，以蓄积量作为联系生态空间管控分区与生态服务价值评估的桥梁^[22-24]，运用多元线性回归分析法和地理探测器指数分析法，对蓄积量与生态服务价值、生态空间管控单元之间的关系进行定量分析，探究生态服务价值与空间管控单元的关联。最后，通过案例进行关联验证，确立与生态空间管控分区相结合的自然保护地生态服务价值精细化评估模型。

1.2 研究对象

南岭国家公园作为广东自然保护地体系的重要主体，其生态补偿等相关工作亟待推动落实，对其进行生态服务价值评估尤为重要。本研究选取南岭国家公园南部石门台片区为实验

案例，以南岭国家公园北部大东山片区为验证案例（图 3）。石门台片区和大东山片区分别位于南岭国家公园南、北两端，其生态环境和社会经济环境整体相似度高，能适用于同一当量因子表和评价指标体系，便于进行对比实

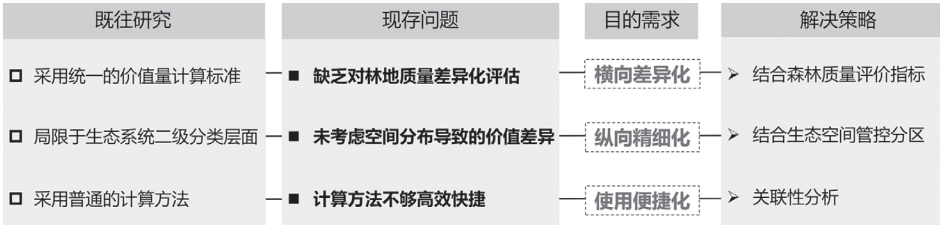


图 1 策略分析
Fig.1 Strategy analysis

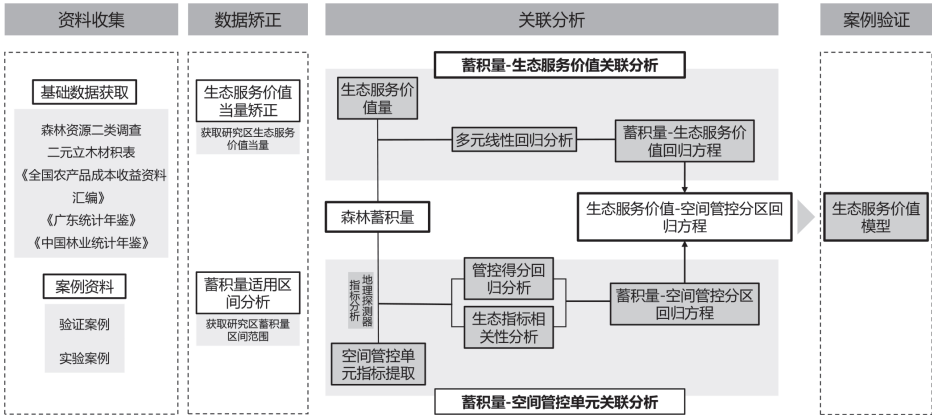
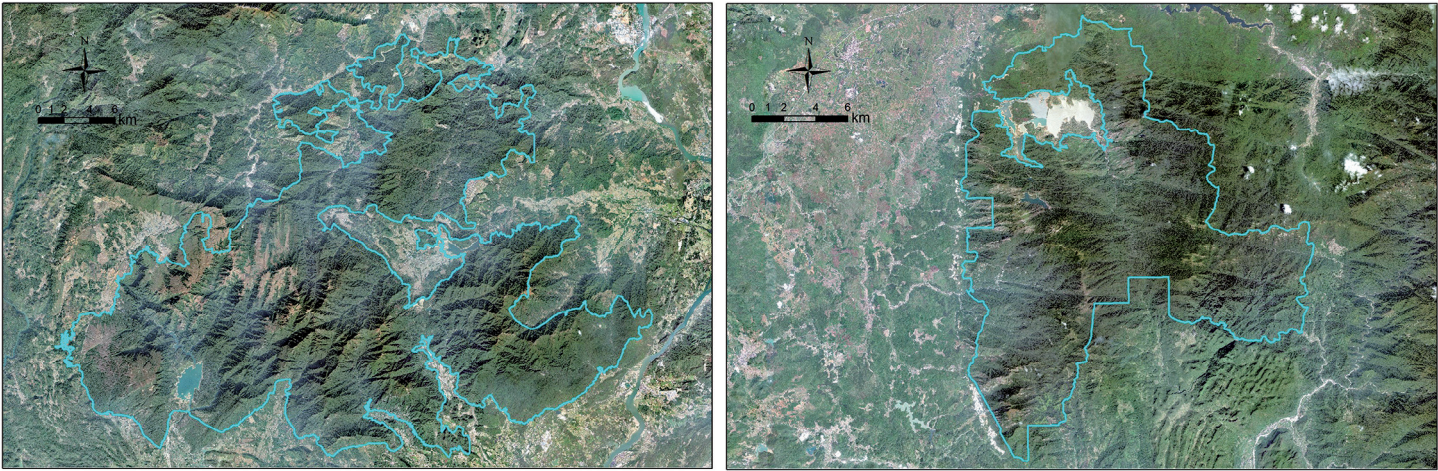


图 2 技术路线
Fig.2 Technical flowchart



a. 石门台片区

b. 大东山片区

图 3 研究区域卫星影像图
Fig.3 Satellite images of study areas

验和验证分析。在南岭国家公园范围内，石门台和大东山案例片区所包含的生态系统类型完整，自然基质属性多样，能较为全面地代表南岭国家公园生态系统整体情况；2个片区均存在核心保护区和一般控制区，包含完整的生态空间管控单元等级（图4~5），但在管理目标和管控强度上具有一定差别，适宜进行精细化评价探索；案

例片区各项基础数据较为完备，其中实验案例范围面积约 70 298 hm²，验证区域范围面积约 28 683 hm²。

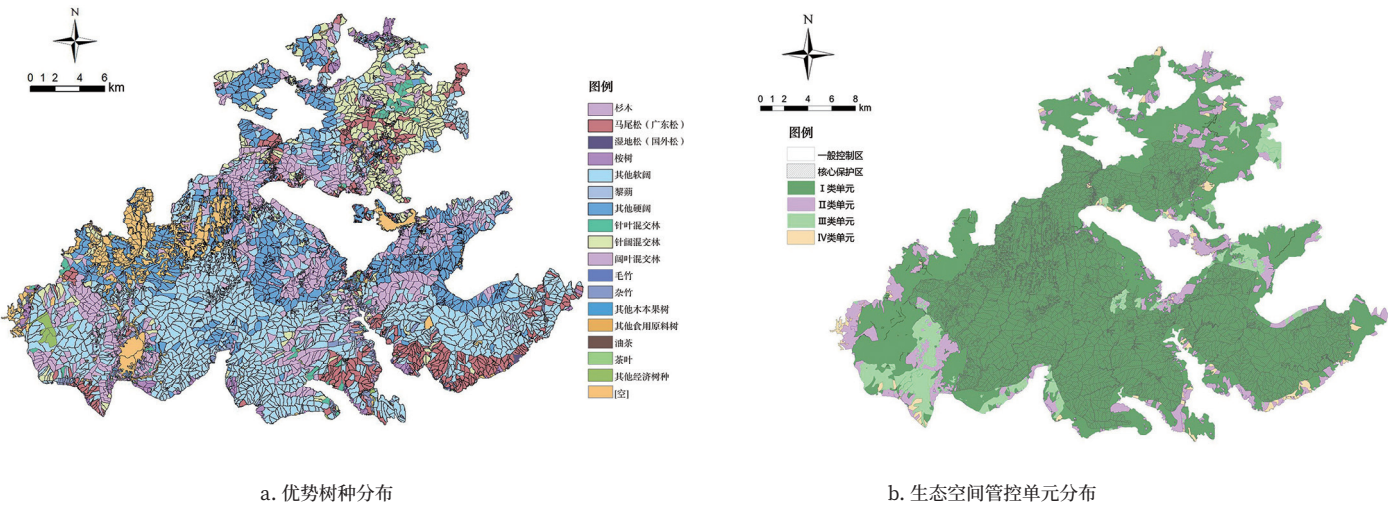
1.3 数据处理

研究基于 2020 年森林资源二类调查数据，结合林业及森林质量等文献资料^[25]，汇总二元立木材积表的林分蓄积量，分析绘制适用于广东省自然保护区林地的蓄积量区间及平均

值。生态服务价值矫正数据以《全国农产品成本收益资料汇编》（2020—2022）、《广东统计年鉴 2022》及《中国林业统计年鉴 2021》等资料为准。其他数据及资料均来源于案例及文献分析。

1.3.1 蓄积量适用区间分析

在广东省森林资源现状分析基础上，根据广东省林业调查二元立木材



注：本图中优势树种分类与名称按2020年森林资源二类调查中小班调查因子代码进行表述；[空]表示数据缺失，为空值。图5同。

图4 石门台片区现状

Fig.4 Current situation of Shimentai Area

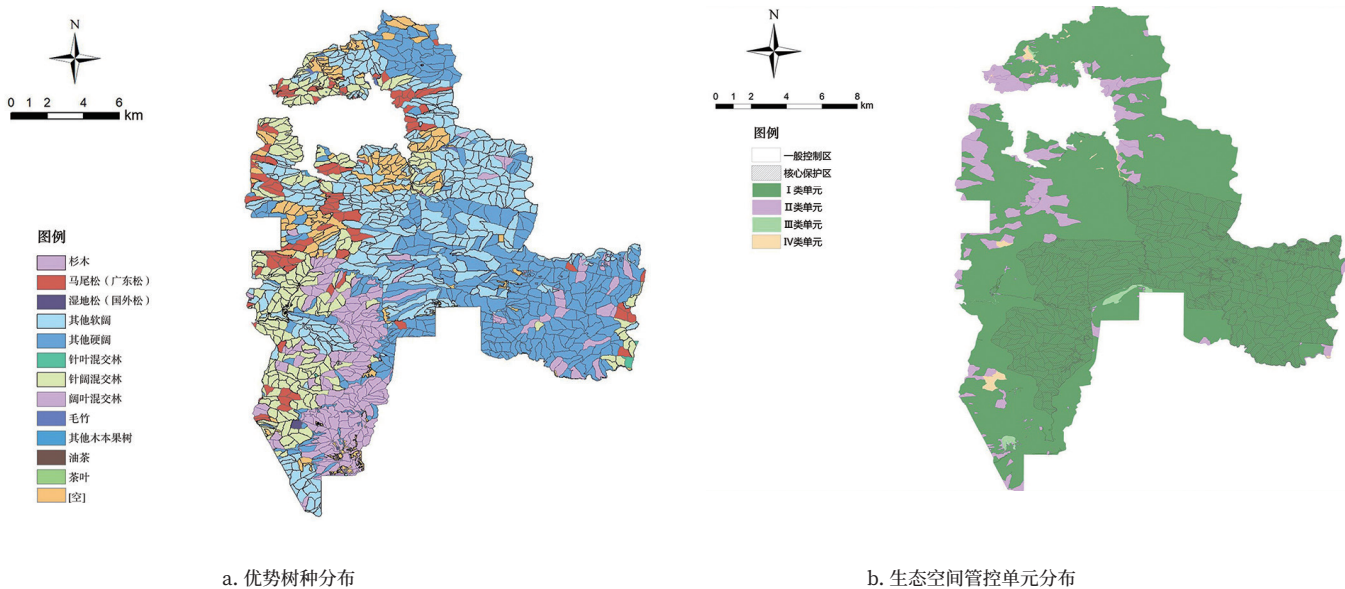


图5 大东山片区现状

Tab.5 Equivalent scale of ecological services value for Nanling National Park

积表统计和国家林业局发布的《主要树种龄级与龄组划分》(LY/T 2908—2017)中划定龄组的方法标准,结合相关文献汇总分析,构建广东省森林不同林种各龄组蓄积量区间模型(表1~3)。由模型可知,在方程评估检验时,阔叶混交林蓄积量数值越接近平均区间60.91~161.02 m³/hm²,其准确性越高;针阔混交林蓄积量数值越接近平均区间67.44~184.45 m³/hm²,其准确性越高;其他硬阔和软阔混交林蓄积量数值越接近平均区间85.33~134.96m³/hm²,其准确性越高。

由上述分析得知自然保护区中各龄组林分蓄积量的分类和取值区间,通过文献分析及专家咨询对各龄组蓄积量进行评价,确定各龄组蓄积量权重系数(表4)。其中,自然保护区近熟林蓄积量平均值最高,为121.69 m³/hm²,幼龄林蓄积量平均值最低,为94.26 m³/hm²,与相关研究中龄组与森林质量的相关性相同。因此,此模型可较为简便地分析概括自然保护区森林小班蓄积量区间,并对其森林质量进行评估分析。

1.3.2 生态服务价值当量矫正

谢高地等^[2]学者基于单位面积价值当量因子法,首次测算了全国尺度生态系统服务功能价值,构建了包含农田、森林、草地、湿地、荒漠、水域等14类生态系统的生态服务价值当量表,反映了全国当年各生态系统类型服务功能价值相对于农田类功能价值的大小。但生态系统服务功能价值具有明显的空间异质性,忽略地域差异直接据表赋值,将直接影响到评估结果的精度^[26]。因此,本研究根据南岭国家公园自然保护区植被类型,对谢高地等人2015年修订的基础当量表^[2]进行修正,并将南岭国家公园划分为7个植被类型(表5)。

根据研究区域的实际情况,选取稻 *Oryza sativa*、花生 *Arachis hypogaea* 和玉蜀黍 *Zea mays* 3种主要农作物为代表进行价值量修正,计算出研究区域1个标准生态服务系统经济价值等效系数为2 554.50 元/hm²,构建实验区生态服

表1 阔叶混交林各龄组公顷蓄积量
Tab.1 Hectare stock of broad-leaved mixed forest at different ages
单位: m³/hm²

指标	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	平均值
平均蓄积量	74.19	120.62	110.86	109.47	110.20	105.07
最大值	94.48	179.68	209.66	179.96	141.34	161.02
最小值	59.75	75.73	41.29	63.20	64.56	60.91

表2 针阔混交林各龄组公顷蓄积量
Tab.2 Hectare stock of coniferous and broad-leaved mixed forest at different ages
单位: m³/hm²

指标	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	平均值
平均蓄积量	120.49	125.37	135.60	124.82	120.86	125.43
最大值	166.24	206.55	174.93	187.35	187.20	184.45
最小值	70.12	62.52	98.86	60.66	45.05	67.44

表3 其他硬阔和软阔混交林各龄组公顷蓄积量
Tab.3 Hectare stocks of other hard-broad and soft-broad mixed forests at different ages
单位: m³/hm²

指标	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	平均值
平均蓄积量	88.09	95.80	118.60	110.23	130.92	108.73
最大值	118.04	120.84	130.64	154.19	151.10	134.96
最小值	58.13	59.80	106.71	100.92	101.09	85.33

表4 自然保护区森林各龄组公顷蓄积量区间分类
Tab.4 Range classification of hectare stock of forests in natural reserves by age groups
单位: m³/hm²

指标	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
阔叶混交林	74.19	120.62	110.86	109.47	110.20
针阔混交林	120.49	125.37	135.60	124.82	120.86
其他硬阔和软阔混交林	88.09	95.80	118.60	110.23	130.92
平均值	94.26	113.93	121.69	114.84	120.66
权重系数	0.20	0.40	1.00	0.60	0.80

务价值量表(表6)。由量表可知每类植被的单位面积生态服务价值量总和,与对应小班面积叠加计算后可得到自然保护区生态服务价值总量,为后续数据分析及模型构建提供基础数据。

2 数据分析与模型建构

2.1 蓄积量-生态服务价值回归分析
在对南岭国家公园蓄积量区间构建及单位面积生态服务价值矫正的基础上,本研究针对实验区域森林小班

进行各小班蓄积量及生态服务价值计算，应用 SPSS 26 对石门台片区共 3 773 组小班数据进行指标数据回归分析。由结果（表 7）可知，石门台片区各小班蓄积量与生态服务价值解释力显著，达到 90.4%；因参考样本均处于同一生态系统，生态多样性及生态地理单元相同或相似性高，故德宾－沃森系数较高，各样本间独立性弱，但此特征正好符合自然保护区集群化

管控保护的特点。因此，蓄积量与生态服务价值具有良好相关性，且符合自然保护区客观事实（因下文分析样本组相同，故不再进行德宾－沃森系数分析及解释）。通过线性回归分析对二者关系进行构建，由结果（表 8）可知，自然保护区小班蓄积量与生态服务价值显著相关（ $P<0.05$ ），蓄积量与生态服务价值呈正相关线性回归关系，构建回归方程为：

$$P_{st} = 634.268 + 486.856 J_{xb} \quad (1)$$

式（1）中， P_{st} 为各小班生态服务价值（元）， J_{xb} 为各小班蓄积量（ m^3 ）。

据上述结果可知，自然保护区小班蓄积量和生态服务价值具有良好的相关性，且二者可构成线性回归关系；筛选 100 组不同类型的小班数据进行验算，得到生态服务价值取值区间误差较小，因此能建立连续型变量回归方程。

2.2 蓄积量及各指标相关性分析及筛选

根据相关研究^[27]，生态空间管控单元主要由森林的保护等级、郁闭度、更新等级等 12 项指标构成，从中筛选出数值型指标 10 项，应用地理探测器对实验区域 3 773 组小班数据进行运算。通过对管控单元 10 项指标与各小班单位面积蓄积量的运算，分析管控单元指标与森林质量的相关性，以及各指标对单位面积蓄积量的解释力（表 9）。

地理探测器结果表明，生态空间管控单元指标中的地类、起源、更新等级 3 项指标与蓄积量不存在显著相关（ $P>0.05$ ），其余 7 项指标均与蓄积量显著相关。这 7 项指标按对蓄积量的解释力（ q 值）从大到小排列依次

表 5 南岭国家公园生态服务价值当量表
Tab.5 Equivalent scale of ecological service value for Nanling National Park

生态系统分类		供给服务		调节服务			支持服务				文化服务	
一级分类	二级分类	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
森林	暖性针叶林	0.22	0.52	0.27	1.70	5.07	1.49	3.34	2.06	0.16	1.88	0.82
	针阔叶混交林	0.31	0.71	0.37	2.35	7.03	1.99	3.51	2.86	0.22	2.60	1.14
	常绿阔叶林	0.29	0.66	0.34	2.17	6.50	1.93	4.74	2.65	0.20	2.41	1.06
	常绿、落叶阔叶混交林	0.26	0.59	0.31	1.95	5.85	1.74	4.27	2.39	0.18	2.17	0.95
	竹林	0.20	0.46	0.24	1.52	4.55	1.35	3.32	1.86	0.14	1.69	0.74
	灌草丛	0.38	0.56	0.31	1.97	5.21	1.72	3.82	2.40	0.18	2.18	0.96
湿地	沼泽和水生植被	0.51	0.50	2.59	1.90	3.60	3.60	24.23	2.31	0.18	7.87	4.73

表 6 南岭国家公园单位面积生态服务价值
Tab.6 Ecological service value per unit area in Nanling National Park

单位：元 /hm²

生态系统分类		供给服务		调节服务			支持服务				文化服务		总和
一级分类	二级分类	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观	
森林	暖性针叶林	561.99	1 328.34	689.71	4 342.65	12 951.30	3 806.20	8 532.02	5 262.27	408.72	4 802.46	2 094.69	44 780.35
	针阔叶混交林	791.89	1 813.69	945.16	6 003.07	17 958.12	5 083.45	8 966.29	7 305.86	561.99	6 641.69	2 912.13	58 983.36
	常绿阔叶林	740.80	1 685.97	868.53	5 543.26	16 604.24	4 930.18	12 108.32	6 769.42	510.90	6 156.34	2 707.77	58 625.73
	常绿、落叶阔叶混交林	666.72	1 517.37	781.68	4 988.93	14 943.81	4 437.16	10 897.49	6 092.48	459.81	5 540.71	2 436.99	52 763.15
	竹林	518.56	1 180.18	607.97	3 880.28	11 622.97	3 451.13	8 475.82	4 738.59	357.63	4 309.44	1 895.44	41 038.01
	灌草丛	970.71	1 430.52	791.89	5 032.36	13 308.93	4 393.74	9 758.18	6 130.79	459.81	5 568.81	2 452.32	50 298.06
湿地	沼泽和水生植被	1 302.79	1 277.25	6 616.15	4 853.55	9 196.19	9 196.19	61 895.48	5 900.89	459.81	20 103.90	12 082.77	132 884.98

是植被类型、龄组、郁闭度、生态功能等级、保护等级、森林健康度和森林景观等级。植被类型和龄组是蓄积量的重要影响因子，解释力分别是 0.474 和 0.237，这与蓄积量区间计算时，以龄组和植被类型作为关键指标有关；其余指标的解释力为 0.016~0.038，较为相近但均不高，这是由于客观影响自然保护地森林质量的要素繁多，各项指标解释力均值降低。鉴于该研究中分析的自然保护地数据量大，其评估结果依然有较好的统计学意义。

根据上述分析结果，结合自然保护地管理体制的上位规划管控目标、各地区管控提升需求以及各指标优化提升的实践性和可检测性，筛选出保护等级、郁闭度、森林健康度、森林景观等级、生态功能等级 5 项主要指标作为森林质量及生态服务价值模型的重点检测和优化指标。通过对 5 项指标的重点检测和优化，加强生态价值评估与管控单元贴合度，使该模型对自然保护地生态价值评估的操作更为灵活，结论更为直观。

2.3 蓄积量 - 管控单元回归分析

前文确定了此模型管控单元的 5 项关键指标，这些指标均为分类变量，因此先对其进行虚拟化处理，再进行变量参照。分析发现，变量参照结果虽满足统计学要求，但无法与蓄积量构建客观的具有实践意义的关系。不过，在构建生态空间管控单元评分指标体系过程中，5 项指标的打分权重均为 0.094，因此分析管控单元构建得分与蓄积量之间的关系更为准确和客观。利用 SPSS 26 对实验区域 3 773 组小班管控单元构建得分与各小班单位面积蓄积量进行相关性分析，由结果（表 10）可知，小班管控单元构建得分对其单位面积蓄积量解释力达到 7.8%。由于影响森林质量因子复杂，且本研究涉及数据类型较多，解释力 7.8% 符合统计学相关性规律，因此管控单元构建得分与单位面积蓄积量具有良好相关性。利用回归分析对二者进行关系构建，结果（表 11）显示，2 个指标间具有良好的相关性（ $P<0.05$ ），因此二者呈正相关性回归关系，其

表 7 小班蓄积量 - 生态服务价值相关性分析（模型摘要^b）
Tab.7 Correlation analysis of small class stock volume and ecological service value (Model summary^b)

模型	<i>R</i>	<i>R</i> 方	调整后 <i>R</i> 方	标准估算的错误	德宾 - 沃森
1	0.972 ^a	0.904	0.904	9 223.372	1.843

注：a. 预测变量：(常量)，小班蓄积量；b. 因变量：总生态服务价值。

表 8 小班蓄积量 - 生态服务价值线性回归分析（系数^a）
Tab.8 Linear regression analysis of small class stock volume and ecological service value (Coefficient^a)

模型	未标准化系数		标准化系数 Beta	<i>t</i>	显著性 <i>P</i>	共线性统计	
	<i>B</i>	标准错误				容差	VIF
1	(常量)	634.268	1 138.043	0.557	0.577		
	小班蓄积量	486.856	1.848	0.972	263.414	0	1.000

注：a. 因变量：小班生态服务价值。

表 9 小班蓄积量 - 生态空间管控单元指标影响因子探测结果
Tab.9 Detection results of small class stock volume and ecospace control unit index influence factors

指标类型	地类	保护等级	起源	龄组	郁闭度	更新等级	森林健康度	植被类型	森林景观等级	生态功能等级	得分
<i>q</i> 值	0.006	0.018	0.016	0.237	0.038	0	0.017	0.474	0.015	0.021	0.012
<i>P</i>	1.000	0	0.819	0	0	0.921	0.018	0	0	0	0

表 10 单位面积蓄积量 - 管控单元构建得分相关性分析（模型摘要^b）
Tab.10 Correlation analysis of stock volume per unit area and control unit construction score (Model summary^b)

模型	<i>R</i>	<i>R</i> 方	调整后 <i>R</i> 方	标准估算的错误	德宾 - 沃森
1	0.195 ^a	0.078	0.038	13.555 01	1.633

注：a. 预测变量：(常量)，管控单元构建得分；b. 因变量：单位面积蓄积量。

表 11 单位面积蓄积量 - 管控单元构建得分线性回归分析（系数^a）
Tab.11 Linear regression analysis of stock volume per unit area and control unit construction score (Coefficient^a)

模型	未标准化系数		标准化系数 Beta	<i>t</i>	显著性 <i>P</i>	共线性统计	
	<i>B</i>	标准错误				容差	VIF
1	(常量)	95.608	1.159	82.465	0.000		
	得分	2.506	0.197	0.195	12.694	0.000	1.000

注：a. 因变量：单位面积蓄积量。

回归方程如下：

$$J_d = 95.608 + 2.506 F \quad (2)$$

式(2)中, J_d 为各小班单位面积蓄积量 (m^3/hm^2) ; F 为生态空间管控单元构建得分。

据上述分析可知, 自然保护区小班单位面积蓄积量和管控单元构建得分具有良好的相关性, 且二者构成线性回归关系。另外在实验区筛选出 100 组不同类型的小班数据代入回归方程进行验算, 得到蓄积量取值区间误差在矫正区间范围内, 可以确定建立回归方程。

2.4 基于管控分区的生态服务价值评估模型建构

综上所述, 蓄积量与生态服务价值和管控单元构建得分均存在较好的相关性, 并且呈线性回归关系, 说明蓄积量作为森林质量的关键评价指标, 为生态服务价值和管控单元构建得分二者建立链接。将前文 2 个回归公式统一单位后合并同类项, 构建自然保护区管控单元分区下生态服务价值评估模型:

$$P_s = \sum_{k=1}^n 634.3 + 46\,547.4 S_k + 1\,220.1 F_k \quad (3)$$

式(3)中, P_s 为自然保护区生态服务价值量 (元), n 为自然保护区小班数量, S_k 为自然保护区各个小班的面积 (hm^2), F_k 为自然保护区各个小班生态空间管控单元构建得分。

自然保护区生态服务价值与管控强度存在二元回归关系, 利用自然保护区面积及管控单元得分可客观计算其生态服务价值。随着管控强度和等级的提高, 森林质量得到改善, 自然保护区对环境和人的服务价值也得以提升, 从而促进了地区生态与经济的可持续发展。

3 结果验证与讨论

为保障研究的客观性和严谨性, 选取已构建生态空间管控单元区域(南岭国家公园北部大东山片区, 共 2 993 组小班范围)作为验证案例, 对结果模型进行检验。首先, 采用当量因子法计算各小班原始生态服务价值, 通过自然断点法分类得到当量法生态服

务价值分类(图 6); 其次, 在生态空间管控单元的基础上, 利用本研究模型计算生态服务价值, 通过自然断点法分类后得到本研究模型生态服务价值分类(图 7); 最后, 将 2 个结果进行对比分析, 计算出 2 组数据每公顷生态服务价值的差值百分比(图 8),

得到各小班在模型校验前后的生态服务价值差异, 对比其差值大小及空间分布情况。

对比图 6 和图 7 可知, 本研究模型计算的生态服务价值量与当量法计算结果在空间分布上高度一致。对 2 个结果进行差值分析可以看出, 占总

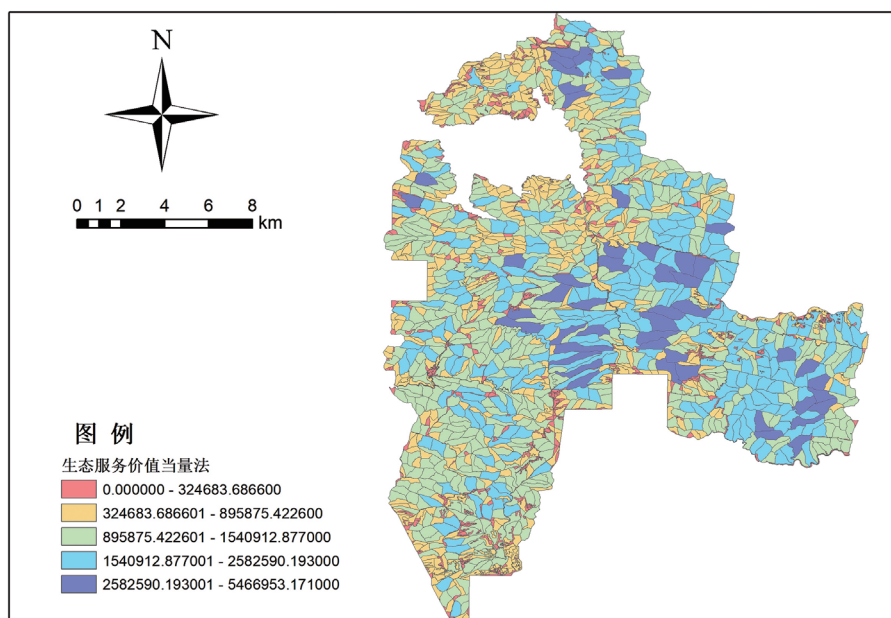


图 6 基于当量法的验证区生态服务价值分布

Fig.6 Distribution of ecological service value in the verification area based on equivalence method

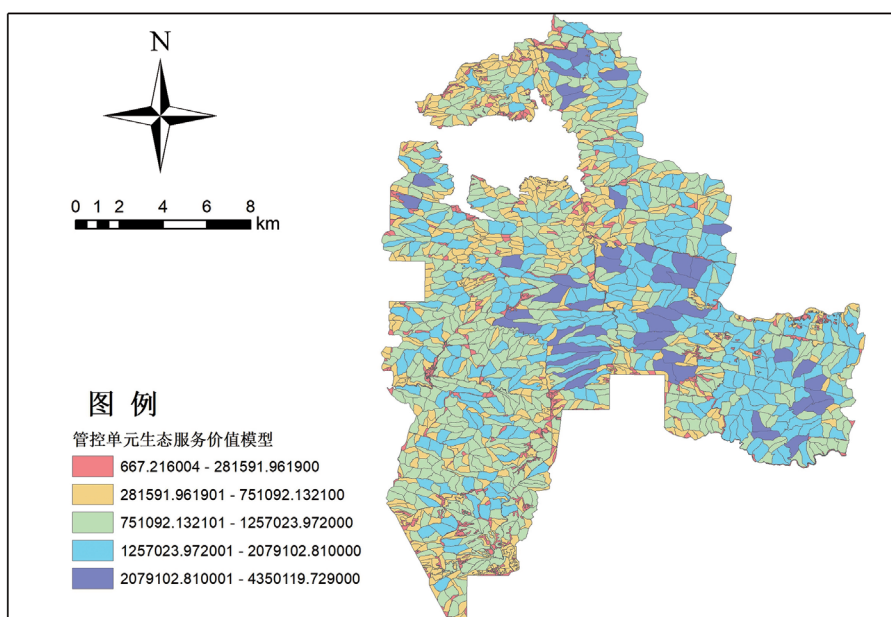


图 7 基于研究模型的验证区生态服务价值分布

Fig.7 Distribution of ecological service value error verification

面积 97.81% 的小班单位面积差值低于 5% (图 9), 且占总面积 91.61% 的小班差值低于 2% (图 10), 表明本模型与当量法计算结果吻合度高, 大面积区域的生态服务价值计算结果准确; 在大于 10% 的差值区间中, 小班数量较多, 但面积最小, 仅占总面积的 0.65%, 而且在 1 147 组差值大于 10% 的小班中, 有 1 091 组小班面积不超过 0.6 hm^2 , 小于等于 1 hm^2 的小班面积占该区间总面积的比例高达 83.54% (图 11), 直观地反映了差值主要集中在小面积区域。对比发现, 在当量因子法计算过程中, 部分小班面积过小或为空值, 导致无法准确计算, 这也解释了 2 种结果的差值主要集中在小面积区域和当量法计算结果中含有 0 值的现象。而本研究模型的计算结果没有 0 值, 证明了本研究模型可以不受限于小班面积大小, 其计算结果更为准确。

通过对比分析, 本研究模型与生态空间管控单元构建得分直接关联, 不仅增加了森林质量与管控强度等影响因子, 使生态服务价值能更加精确、便捷地描述不同自然属性和不同空间分区的林地, 还解决了当量法中生态服务价值仅与地类和面积有关而导致小面积区域生态服务价值可能趋近于 0 的缺陷, 提高了评估的客观现实性。

4 结语

研究针对自然保护区生态服务价值评估面临的 3 个问题, 基于生态空间管控分区, 以森林质量关键性评价指标——蓄积量为链接, 通过关联性分析识别蓄积量与生态服务价值、管控单元得分之间可行的回归关系, 构建了与管控单元相结合的生态服务价值精细化评估模型。对研究区域采用原始当量因子法和本研究模型法进行价值评估对比, 验证显示 2 种方法的计算结果具有高度一致性, 且本研究模型完善了当量因子法中仅以面积为自变量而导致小面积区域难

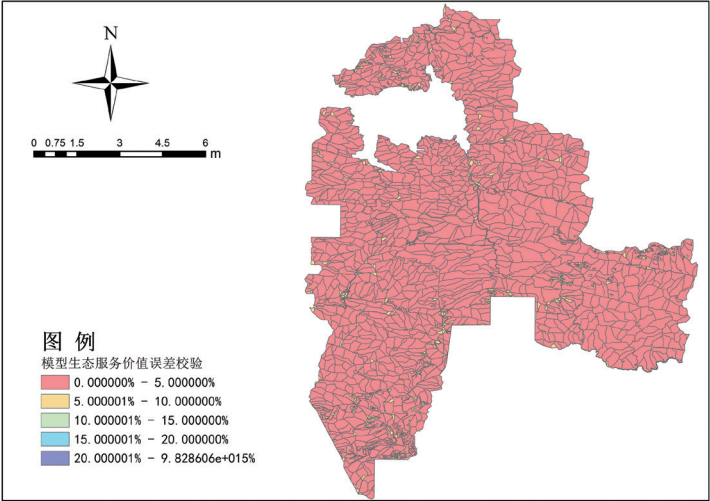


图 8 生态服务价值差校验分布
Fig.8 Distribution of ecological service value error verification

以评估的不足, 因此本研究模型结果更为准确。研究在自然保护区生态服务价值评估过程中提出了新的思路, 反映了单一地类下不同自然属性之间的价值差异, 弥补了原有方法中

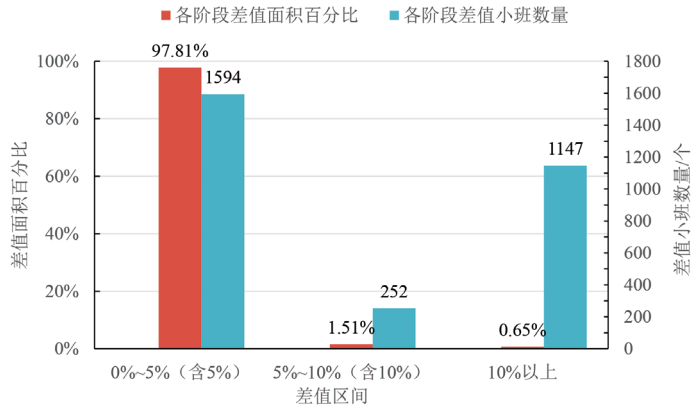


图 9 各差值区间内小班面积和数量
Fig.9 Area and quantity of small classes in each difference interval

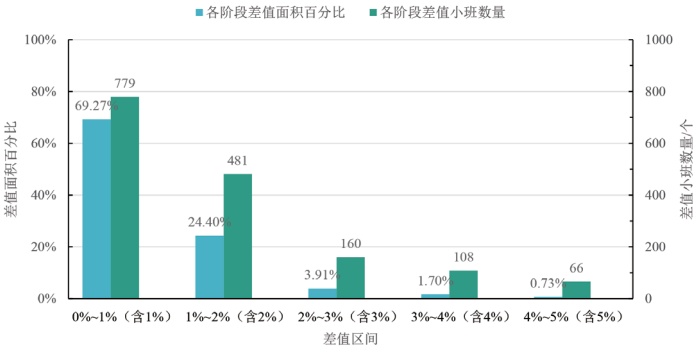


图 10 5% 差值内各区间小班面积和数量
Fig.10 Area and quantity of small classes in each interval within 5% difference

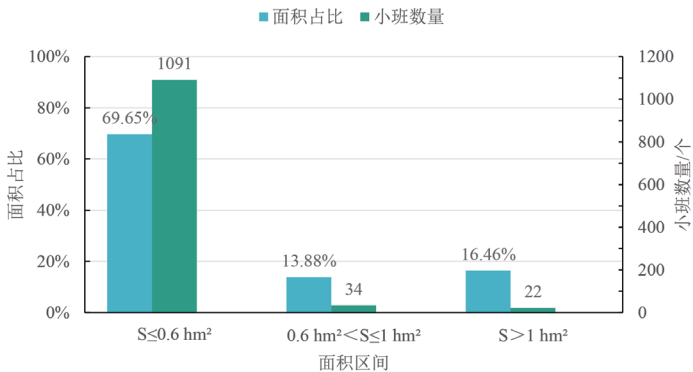


图 11 各面积区间内差值大于 10% 的小班面积和数量
Fig.11 Area and quantity of small classes with difference greater than 10% within each interval

仅以生态系统二级分类当量因子为统一评价标准而导致评价结果较为粗略的缺陷,提高了以森林生态系统为主的自然保护地生态服务价值测算的准确度。同时,本研究模型增加了对不同管理目标和管控强度等影响的考虑,对自然保护地进行精细化区分,提升了不同空间分布下生态服务价值测算的精细度。另外,本研究模型通过建立便捷的回归方程,提高了计算过程的高效性。

本研究模型结合了森林蓄积量和生态空间区域分布等影响因素,因此更适用于以森林生态系统为主的自然保护地。但研究是在案例区域生态服务功能具有一致性的条件下,基于同一当量因子表和评价指标体系展开的生态服务价值评估,而未来借鉴和推广该评价模型,还需结合研究区域生态系统的实际情况进行相关调整。此外,研究仍存在一定的局限性,如在进行生态服务价值当量矫正和相关性分析过程中,为便于对比验证,仅采用了单一年份的农作物种植数据和相邻年份的经济数据,在对于同一空间区域在较长时间跨度内进行生态服务价值对比时,可能会造成一定误差。未来研究应从周期性生态服务价值评估等更加广泛的角度出发,进一步考虑生态补偿标准设立、生态服务价值动态监测及自然保护与管理成效考核等现实需求,采用更加全面的数据进行均值计算,加强评估结果的科学性和实用性,更好地为自然保护地实施发展决策和管控措施提供有力依据。

注:图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 新华社.中共中央 国务院印发《生态文明体制改革总体方案》[EB/OL]. (2015-09-21) [2024-03-01]. http://www.xinhuanet.com/politics/2015-09/21/c_1116632159_2.htm.
- [2] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [3] 杜金鸿,刘方正,周越,等.自然保护地生态系统服务价值评估研究进展[J].环境科学研究,2019,32(9):1475-1482.
- [4] 赵景柱,肖寒,吴刚.生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析[J].应用生态学报,2000(2):290-292.
- [5] 陈东军,钟林生.生态系统服务价值评估与实现机制研究综述[J].中国农业资源与区划,2023,44(1):84-94.
- [6] 张占忠,施俊美,瞿林,等.基于单位面积价值当量因子的云南省森林生态系统服务功能价值评估[J].林业调查规划,2022,47(4):67-73.
- [7] FISHER B, TURNER K R, MORLING P. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. Ecological Economics, 2009, 68(3):643-653.
- [8] 赵祖伦,罗军华,李威,等.喀斯特山地城市群生态系统服务价值演变及影响因素[J].水土保持研究,2024,31(5):410-420.
- [9] 张乐勤,荣慧芳,曹先河.两种森林生态系统价值评估方法实证评述[J].水土保持通报,2011,31(1):169-174.
- [10] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630):253-260.
- [11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):

1243-1254.

- [12] 沈若兰,肖桂荣.武夷山国家公园生态系统服务价值评估[J].生态科学,2023,42(2):58-65.
- [13] MARIA S C D, ADRIANA V, RICARDO M R I, et al. A quantitative method for zoning of protected areas and its spatial ecological implications[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(2):198-206.
- [14] 何思源,苏杨,罗慧男,等.基于细化保护需求的保护地空间管制技术研究——以中国国家公园体制建设为目标[J].环境保护,2017,45(Z1):50-57.
- [15] 邓毅,毛子一,邢成玥,等.国家公园的生态空间管控单元:概念、构建与应用[J].风景园林,2023,30(10):34-41.
- [16] 邓毅,邢成玥,黄金玲.国家公园中地役权保护模式及支撑体系研究[J].广东园林,2022,44(1):2-6.
- [17] 胡彦,聂艳,于雷,等.基于空间聚类法的鄱阳区林地资源质量评价研究[J].湖北农业科学,2022,61(11):27-31.
- [18] 陆禹,潘登,罗改改.浏阳市林地生境质量空间格局研究[J].中南林业调查规划,2022,41(4):17-23.
- [19] DUDLEY N, SCHLAEPFER R, JACKSON W, et al. Forest quality: Assessing forests at a landscape scale[M]. New York: Earthscan, 2006.
- [20] 牛香,陈波,郭珂,等.中国森林生态系统质量状况[J].陆地生态系统与保护学报,2022,2(5):32-40.
- [21] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006.
- [22] 韩景.历城区森林资源分布与质量评价[D].泰安:山东农业大学,2019.
- [23] 张珂华.基于森林生态功能评价研究下的新时期森林经营规划[D].合肥:安徽农业大学,2020.
- [24] 黄莉雅,罗敦,蒋燦,等.区域森林质量评价指标体系构建及等级划分[J].广西林业科学,2023,52(2):262-267.
- [25] 叶璇.石门国家森林公园森林质量精准提升技术研究[D].广州:华南农业大学,2019.
- [26] 郭玉琬.合肥都市圈土地生态系统服务价值与城镇化耦合关系研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [27] 邢成玥.基于生态空间管控单元的国家公园地役权保护模式研究——以南岭国家公园为例[D].广州:广州大学,2023.

作者简介:

宋啸/1995年生/女/河南济源人/广州大学建筑与城市规划学院,广州大学国家公园研究中心(广州510006)/在读硕士研究生/专业方向为自然保护地规划

韩胜海/1997年生/男/云南大理人/广州大学建筑与城市规划学院,广州大学国家公园研究中心(广州510006)/在读硕士研究生/专业方向为自然保护地规划

(*通信作者) 邓毅/1974年生/男/湖南桂阳人/博士/广州大学建筑与城市规划学院,广州大学国家公园研究中心(广州510006)/教授/研究方向为景观生态规划和国家公园规划与设计/E-mail: dengyi@gzhu.edu.cn