北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

南湾库区森林生态系统服务时空变化特征及其权衡协同关系

扶欣然 王成雨 余世有 文毅 刘维妍 胡蕾 陈玲

Spatiotemporal variation characteristics and their trade-offs and synergies of forest ecosystem services in Nanwan Reservoir Area, Henan Province of central China

Fu Xinran, Wang Chengyu, Yu Shiyou, Wen Yi, Liu Weiyan, Hu Lei, Chen Ling

引用本文:
扶欣然, 王成雨, 余世有, 文毅, 刘维妍, 胡蕾, 陈玲. 南湾库区森林生态系统服务时空变化特征及其权衡协同关系[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):142–155. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240395
Fu Xinran, Wang Chengyu, Yu Shiyou, Wen Yi, Liu Weiyan, Hu Lei, Chen Ling. Spatiotemporal variation characteristics and their trade–offs and synergies of forest ecosystem services in Nanwan Reservoir Area, Henan Province of central China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):142–155. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240395

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240395

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于生态系统服务功能提升的暖温带半湿润地区城市森林营建研究

Urban forest construction based on ecosystem service function improvement in warm temperate semi–humid areas

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 127–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20180433

基于GWR模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究

Spatio–temporal evolution and driving factors of ecosystem services in Chengdu–Chongqing urban agglomeration of southwestern China based on GWR model

北京林业大学学报, 2020, 42(11): 118–129. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200217

基于LUCC追踪分析的生态系统服务价值时空变化研究

Spatio–temporal variation of ecosystem service value based on LUCC trajectories: a case study of Bosten Lake Watershed

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 88–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210017

基于生态系统服务功能模拟演算的绿色空间规划框架

Construction of green space planning framework based on ecosystem service function simulation: a case study of shallow mountain area in Beijing

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 125–136. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190149

基于LUCC的承德市域生态系统服务价值演变分析与优化研究

Evolution analysis and optimization research of ecosystem service value in Chengde City, Hebei Province of northern China based on land use/land cover change (LUCC)

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 106–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190480

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94–104. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180244

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240395

南湾库区森林生态系统服务时空变化特征及其权衡协同关系

扶欣然 王成雨 余世有 文 毅 刘维妍 胡 蕾 陈 玲
（北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】揭示森林生态系统的服务功能差异及服务间权衡协同关系的时空分异，为森林资源保护与可持续经营提供科学依据。**【方法】**以信阳市南湾库区森林为研究对象，基于 InVEST 模型和 CASA 模型对 2000—2020 年间的森林生态系统服务（固碳、水源涵养、土壤保持和生境支持）进行评估，并在分析其时空变化特征的基础上，采用空间叠置法探讨 4 项生态系统服务之间的权衡与协同关系。**【结果】**（1）南湾库区森林生态系统的多年平均固碳量为 587.41 g/m^2，多年平均水源涵养量为 361.71 mm，多年平均土壤保持量为 612.29 t/hm^2，多年平均生境质量指数为 0.9。（2）时间上，固碳量波动上升，水源涵养量和土壤保持量先下降后上升，生境质量指数呈轻微下降趋势；空间上，服务高值区主要位于西部低山丘陵乔木集中区，服务低值区主要位于水域下游与水域周边。（3）在 9 种林地类型中，4 项生态系统服务综合供给能力最强的林地类型为麻栎林。（4）4 项生态系统服务之间的关系以高协同和强权衡为主，且协同区域呈增加趋势，权衡区域呈减少趋势。（5）麻栎林、马尾松−麻栎混交林和竹林三者的高协同区域占比较大，马尾松林和杉木林普遍存在权衡关系，板栗林和茶叶林两类经济林也存在显著的权衡关系，灌木林和疏林的服务关系受环境影响较大。（6）南湾库区森林 4 项生态系统服务的主要驱动因素是年均降水、年均气温、归一化植被指数和人口密度。**【结论】**本研究揭示了不同林地类型的生态系统服务供给能力差异，明确了需要重点保护与修复的区域，为南湾库区森林综合效益提升奠定了科学依据。

关键词：森林生态系统服务；权衡与协同；InVEST 模型；CASA 模型；南湾库区
中图分类号：S718.55 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)05−0142−14
引文格式：扶欣然，王成雨，余世有，等. 南湾库区森林生态系统服务时空变化特征及其权衡协同关系［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：142−155. Fu Xinran, Wang Chengyu, Yu Shiyou, et al. Spatiotemporal variation characteristics and their trade-offs and synergies of forest ecosystem services in Nanwan Reservoir Area, Henan Province of central China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 142−155.

Spatiotemporal variation characteristics and their trade-offs and synergies of forest ecosystem services in Nanwan Reservoir Area, Henan Province of central China

Fu Xinran Wang Chengyu Yu Shiyou Wen Yi Liu Weiyan Hu Lei Chen Ling
(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aims to reveal the spatiotemporal variations in forest ecosystem service disparities and their trade-offs and synergies, thereby providing a scientific basis for forest resource conservation and sustainable management. ［**Method**］This study, conducted in the Nanwan Reservoir Area of Xinyang City, Henan Province of central China as the study area, provides a comprehensive assessment of four forest ecosystem services (i.e., carbon sequestration, water conservation, soil retention, and habitat

收稿日期: 2024−11−25 **修回日期:** 2025−01−06
基金项目: 国家自然科学基金面上项目（42371345）。
第一作者: 扶欣然。主要研究方向：森林生态系统服务。Email: fxr991211414@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 陈玲，博士，副教授。主要研究方向：林业遥感。Email: chenling_2012@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

support) over the period from 2000 to 2020 using the InVEST and CASA models. Based on the spatiotemporal patterns, we further employed spatial overlay methods to explore the trade-offs and synergies among these four ecosystem services. [**Result**] (1) The average annual carbon sequestration was 587.41 g/m^2, while the average annual water conservation, soil retention, and habitat quality index were 361.71 mm, 612.29 t/ha, and 0.9, respectively. (2) Temporally, carbon sequestration showed an overall increasing trend with fluctuations, whereas water conservation and soil retention initially declined before rising, and the habitat quality index exhibited a slight decreasing trend. Spatially, high-value ecosystem service areas were predominantly located in the western forested regions characterized by low mountains, whereas low-value areas were concentrated around downstream regions and surrounding water bodies. (3) Among the nine forest types, *Quercus acutissima* demonstrated the highest capacity for providing integrated ecosystem services. (4) The relationship among the four ecosystem services were characterized by high synergies and strong trade-offs, with synergistic areas increasing and trade-off regions decreasing over time. (5) High-synergy areas were predominantly found in *Quercus acutissima* forests, *Pinus massoniana-Quercus acutissima* mixed forests and bamboo forests, while trade-offs were commonly observed in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* forests. Economic forests, such as chestnut forests and tea plantations, exhibited significant trade-offs, whereas interactions in shrubland and sparse woodlands were more heavily influenced by environmental conditions. (6) The primary driving factors of forest ecosystem services were identified as average annual precipitation, average annual temperature, normalized difference vegetation index and population density. [**Conclusion**] This study highlights the differences in ecosystem service capabilities among various forest types and identifies key areas that require prioritized protection and restoration, which provides a scientific foundation for enhancing the comprehensive benefits of forests in the Nanwan Reservoir Area.

Key words: forest ecosystem services; trade-offs and synergies; InVEST model; CASA model; Nanwan Reservoir Area

森林是陆地生态系统的主体，对全球生态系统和人类社会经济发展至关重要[1]。森林生态系统提供了广泛的生态系统服务，包括固碳释氧、水源涵养、土壤保持、生物多样性保护和森林游憩等多个方面[2]。不同类型的生态系统服务相互作用，表现为同向变化或相互制约，即协同或权衡关系[3]。由于人类对森林生态系统的服务功能及其重要性缺乏充分认识，生态环境退化，进而减弱了森林生态系统服务的供给能力[4−5]。了解并量化森林生态系统服务有助于优化森林资源配置，提供合理的决策支持，对保护生态环境及实现可持续发展具有重要现实意义[6−7]。因此，科学评估生态系统服务功能并探究其相互关系，已成为生态学、环境学和地理学等领域的研究热点。

对于生态系统服务评估，国内外学者主要采用价值量法、物质量法和能值分析法，三者基于不同原理，各有优缺点[8]。早期生态系统服务评估主要集中于价值量，但随着研究技术的发展以及对服务生态过程和形成机理的研究需要，学者开始展开对生态系统服务物质量的动态评估[9]。3S 技术的发展也推动了国内外学者研发多种生态模型，常用的模型主要有 InVEST 模型[10]、ARIES 模型[11]、SolVES 模型[12]等。生态系统需要兼顾多种服务，追求综合效益的最大化，近年来生态系统服务权衡与协同关系已成为研究的重要课题。Gutsch 等[13]利用基于过程的 4C（FORESEE-forest ecosystems in a changing environment）森林模型量化不同气候情景下的生态系统服务，并基于中值斜率分析服务之间的权衡关系。Dai 等[6]通过空间显示方法量化并分析南方红壤丘陵区森林生态系统服务的协同与权衡效应，并从森林类型角度探讨可持续生态系统服务的主要提供者。周文春等[14]利用 InVEST 模型评估莲都区生态公益林的四类生态系统服务，并通过系统聚类和相关性分析研究各项服务的相互关系。张静静等[15]通过 InVEST 模型评估伏牛山地区森林生态系统服务，并运用空间叠置法从多个空间尺度探讨服务的权衡与协同效应。尽管现有的森林生态系统服务功能研究已从单一服务转向多种服务之间的相互关系，且研究尺度不断丰富[16]，但大多数研究仅考虑时间或空间尺度，缺乏对时空序列动态变化的综合分析。此外，森林生态系统评估对象的分类较为粗略，通常仅按针叶林和阔叶林区分。然而，森林生态系统是动态发展的，植被生长对气候响应具有明显的

时空异质性[17]，且不同植被类型对气候的响应也不尽相同[18]。这些局限性导致研究结果缺乏细致性，难以准确评估不同森林类型的生态系统服务能力及其提升措施。与城市生态系统相比，森林生态系统的主体是植被。因此，提升森林生态系统服务的研究应重点厘清不同气候条件下各林地类型服务功能的时空差异，并尽可能细分森林生态系统的林地类型，以便根据理论结果制定更具实践意义的森林经营方案。对此，本研究从以下两个方面进行改进。(1)从时间和空间两个维度分析各个林地类型的森林生态系统服务；(2)将森林生态系统的评估对象细化到树种级别。以期更准确地揭示森林生态系统服务变化规律，为直观了解森林生态系统的状态及问题提供可视化参考数据，从而为制定与环境相协调的森林管理计划并最大化发挥生态系统服务功能提供科学依据。

南湾水库位于信阳市西郊，是淮河上游的大型水库，地处北亚热带向暖温带的过渡地区，位于大别山和桐柏山交界地带，同时也是淮河上游国家重点生态功能区[19]。南湾库区森林主要属于国有信阳市南湾林场，并且是南湾国家森林公园的一部分，在生态修复和建设中发挥着重要作用。库区自然条件优越，适宜多种林木生长，但不合理的土地利用和人为活动破坏了森林资源的健康发展[20]。为了促进库区森林生态系统达到生态、社会和经济效益的平衡，有必要对其生态系统服务进行综合定量评估。基于此，本研究以南湾库区森林生态系统为研究对象，结合森林资源调查数据、遥感影像、气象和土壤等多源数据，利用 CASA 模型、InVEST 模型和 ArcGIS 软件，评估并量化 4 个关键生态系统服务(固碳、水源涵养、土壤保持和生境支持)的时空变化，探讨它们之间的权衡与协同关系，明确不同林地类型服务功能的差异，并通过相关性分析揭示生态系统服务差异与驱动因素的关系，从而为增强南湾库区森林生态系统服务功能提供科学指导，并为优化该区森林可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南湾库区位于河南省信阳市西部，地理位置 113°43′ ~ 114°05′E，31°45′ ~ 32°10′N，总面积约 79 900 hm^2。库区地处北亚热带向暖温带的过渡地带，属北亚热带季风湿润气候，雨热同季，气候温和，四季分明。地势西高东低，东北部平缓，西南部起伏较大，属于低山丘陵地带。该流域年均气温 15.2 ℃，年平均降水量 1 277 mm，海拔 59 ~ 841 m。库区自然条件良好，适宜森林植被的恢复、发育和演替[20]。

1.2 数据来源与处理

本文的森林类型图主要数据来源于 2021 年度信阳市森林资源管理一张图。辅助数据源包括来自中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)的土地利用数据及谷歌历史影像，根据优势树种进行分类，共 9 种林地类型，分别为马尾松(*Pinus massoniana*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、麻栎(*Quercus acutissima*)林、马尾松−麻栎(*Pinus massoniana-Quercus acutissima*)混交林、竹林、板栗(*Castanea mollissima*)林、茶叶林、灌木林、疏林；数字高程模型数据(digital elevation model，DEM)来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)，高程、坡度和坡长均由 DEM 数据计算得到，空间分辨率为 30 m；气象数据包括气温、降水、太阳辐射和潜在蒸发，数据集来自国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/)和国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)，空间分辨率为 1 km；土壤数据来源于中国土壤深度图[21]和国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/)，包括土壤深度、土壤质地、土壤有机质等数据；归一化植被指数(normalized difference vegetation index，NDVI)通过 GEE 平台调用 MODIS NDVI 数据集得到；人口密度和 GDP 密度数据集来自资源与环境数据云平台(http://www.resdc.cn/Default.aspx)。所有数据的坐标系统一定义为 WGS_1984_UTM_Zone_50N，空间分辨率为 30 m。

2 研究方法

2.1 生态系统服务计算

2.1.1 固碳服务

采用光能利用率(carnegie-ames-stanford approach，CASA)模型计算森林生态系统净初级生产力。植被净初级生产力是评估植被固碳能力和响应气候变化的重要指标[22]。研究表明，固定时段内植被光合作用所产生的净初级生产力与有机物质量之间存在 2.2 倍的关系[23]，结合绿色植物光合作用化学方程式($6CO_2 + 6H_2O = C_6H_{12}O_6 + 6O_2$)，可得到每 1 kg 有机物质能固定 1.63 kg 二氧化碳，每 1 kg 二氧化碳包含 0.27 kg 碳元素，据此关系可通过植被 NPP 总量计算森林生态系统固碳量[24]。

$$C = N_{PP} \times 2.2 \times 1.63 \times 0.27 \quad (1)$$

式中：C为固碳量，N_{PP}为净初级生产力。

2.1.2 水源涵养服务

采用 InVEST 模型的年产水量模块基于 Budyko

水热耦合平衡假设[25]计算得出产水量（Y_{ij}），再利用地表径流流速系数、地形指数和土壤饱和导水率对模型结果进行修正，从而得出水源涵养量（W_{ij}）。

$$Y_{ij}=\left(1-\frac{A_{ij}}{P_i}\right)\times P_i \tag{2}$$

$$W_{ij}=\min\left(1,\ \frac{249}{V}\right)\times\min\left(1,\ \frac{0.9\times T}{3}\right)\times \min\left(1,\ \frac{K_{\mathrm{sat}}}{300}\right)\times Y_{ij} \tag{3}$$

式中：P_i 为像元 i 的年降水量，A_{ij} 为植被类型 j 中像元 i 的年实际蒸散量，均由前文气象数据提供；T 为地形指数，由 DEM 计算得到，K_{sat} 为土壤饱和导水率，V 为流速系数。

2.1.3　土壤保持服务

采用 InVEST 模型的泥沙输送比模块计算土壤保持服务。该模块使用修正土壤流失方程[26]，根据潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量之间的差异来计算土壤保持量（S_{C}）。

$$S_{\mathrm{C}}=RKL(1-CP) \tag{4}$$

式中：R 为降水侵蚀性因子，采用章文波等[27]提出的公式进行计算；K 为土壤侵蚀性因子，采用 EPIC 模型公式[28]进行计算；L 为坡度坡长因子，通过 DEM 数据计算得到；C 为植被覆盖与管理因子，根据蔡崇法等[29]的计算公式得到；P 为土壤保持措施因子，通过参考韩晶等[30]的研究成果获得。

2.1.4　生境支持服务

采用 InVEST 模型的生境质量模块计算生境质量指数（Q_{ij}），不同林地类型具有不同生境适宜性，其威胁因子与敏感性设置参照相关研究[31−33]。

$$Q_{ij}=H_j\left[1-\frac{D_{ij}^{z}}{\left(D_{ij}^{z}+K^{z}\right)}\right] \tag{5}$$

式中：H_j 为植被类型 j 的生境适宜性，D_{ij} 为植被类型 j 中像元 i 的生境胁迫水平，z 为归一化常量，K 为半饱和参数，一般设置为 0.5。

2.2　生态系统服务分析

2.2.1　距平百分比

采用距平百分比衡量森林生态系统服务的时间变化以及与平均水平的偏离程度。

$$P=\frac{X_i-\overline{X}}{\overline{X}}\times 100\% \tag{6}$$

式中：P 为距平百分比，X_i 为某一年的数值，$\overline{X}$ 为多年平均值。

2.2.2　生态系统服务综合指数

将 4 种生态系统服务标准化到 0 ~ 1 范围后相乘，得到生态系统服务综合指数（comprehensive ecosystem services index，CESI）[34]，表示生态系统服务的总体水平。

$$\mathrm{CESI}=\prod_{i=1}^{n} f(x,e_i,t) \tag{7}$$

式中：$f(x,e_i,t)$ 为像元 x 在 t 时段的第 i 种生态系统服务。$n=4$，包括固碳服务、水源涵养服务、土壤保持服务和生境支持服务。

2.2.3　空间叠置分析

空间叠置法根据不同生态系统服务在空间上的组合能力，定义了生态系统服务之间的协同与权衡关系，能够进一步揭示不同服务之间的空间变化规律[35]。本文采用该方法对研究区内不同类型生态系统服务之间的权衡/协同关系进行分析和制图，以便更有针对性地制定和实施服务权衡管理决策，促进生态系统服务的可持续利用与有效管理。具体步骤如下。（1）对各项生态系统服务进行标准化处理，并采用自然断点法将各服务能力分为低、中、高 3 个等级，对应编号 1、2、3；（2）将 4 项标准化并分级后的生态服务栅格数据进行叠置，按 $\mathrm{CODE}=1\,000C+100W+10S+H$（$C$、$W$、$S$、$H$ 分别代表固碳、水源涵养、土壤保持和生境支持服务，CODE 是 4 位数代码），得到不同等级组合的生态系统服务空间分布结果；（3）根据权衡与协同关系的定义[36]，参考分级标准对 4 种服务叠置结果进行分类，将协同关系划分为高协同和低协同，权衡关系划分为强权衡和弱权衡（表 1）。高协同表示 4 种服务能力均处于中等以上水平，属于最协调状态，低协同则表示 4 种服务能力均处于中等以下水平，属于最不理想状态。强权衡表示一种服务能力较高而其他服务较低，弱权衡则表示 2 种或 3 种服务能力较高而其他服务较低。

2.2.4　驱动因素分析

生态系统服务的变化既受服务之间直接相互作用的影响，也受驱动因素变化的影响[37]。生态系统主要受到人类活动和气候变化的双重作用，这些因素包括自然、社会和经济因素[38]。考虑到数据的可获得性，本研究选取了 6 个自然因素（年均降水量、年均气温、蒸散发、归一化植被指数、高程和土壤深度）；以及 2 个社会经济因素（人口密度和生产总值）。基于 R 软件 corr 包 spearman 函数计算各驱动因素与生态系统服务的相关系数，并通过 P 值检验相关性的显著性，分析驱动因素与各项生态系统服务的相关性，以进一步探讨驱动因素对生态系统服务的影响。同时利用 relaimpo 包对驱动因素的相对重要性进行分析，进一步科学准确地剖析生态系统服务差异的驱动机制。

表 1 生态系统服务权衡/协同划分标准

Tab. 1 Standards for classification of trade-offs and synergies between the ecosystem services

服务关系	亚类	供给能力组合	样例
协同	高协同	4高	3333
		3高1中	3233、3332
		2高2中	3322、3232
		4中	2222
	低协同	3中1低	2122、2221
		2中2低	2211、2121
		1中3低	1211、1112
		4低	1111
权衡	强权衡	1高3低	3111、1131
		1高1中2低	3211、3112
		1高2中1低	3221、3122
	弱权衡	2高2低	3311、3131
		2高1中1低	3321、3312
		3高1低	3133、3331

注：样例中的1、2、3代表自然断点法将各服务能力划分的低、中、高3个等级。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务评估

3.1.1 生态系统服务时空演变

南湾库区森林生态系统的各项服务在时空演变上存在明显差异（图 1、2）。固碳方面，2000—2020 年南湾库区森林固碳量呈波动上升趋势，从 559.2 g/m^2 增至 620.3 g/m^2。2005 年及以前呈负距平值，2010 年及以后呈正距平值，表明研究区良好的水热条件及合理的森林经营措施促进了净初级生产力的提升。固碳服务高值区主要位于水域西部的低山丘陵地带，这些地区海拔较高，是天然阔叶林的主要连片分布区，植被的固碳释氧作用较强。水域西侧及丘陵西南部为低值区域，主要为乔木林和其他林地类型的交错过渡区，植被以茶叶、灌木、疏林等为主，可能由于管理措施较差且受到严重的人为干扰，这些区域的固碳能力较弱。

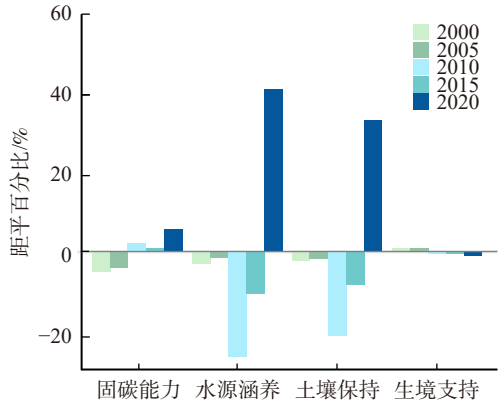


图 1 2000—2020 年南湾库区森林生态系统服务距平百分比

Fig. 1 Anomaly percentages of forest ecosystem services in the Nanwan Reservoir Area from 2000 to 2020

水源涵养方面，2000—2020 年南湾库区森林水源涵养量呈先下降后上升的趋势，变化幅度较大，从 350.9 mm 下降至 268.6 mm，再回升至 506.9 mm。2015 年及以前呈负距平值，2020 年呈正距平值。水源涵养量的最低负距平值出现在 2010 年，最高正距平值出现在 2020 年，主要原因是信阳地区在 2009—2014 年连续发生干旱，降水量大幅度减少，并且持续高温使水源涵养量下降，而 2020 年降水量处于高值，所以水源涵养量达到多年内最高值。水源涵养高值区主要位于西部低山丘陵地带，其次是南部低山区域。这些区域降水量充沛，水源供给能力强，同时乔木覆盖广泛且植被覆盖度高，能够有效截留降水。低值区主要位于水域周边平原地区，这些区域降水量较少，植被类型以灌木为主，由于冠层密度和根系深度的限制，水源涵养能力较弱。

土壤保持方面，2000—2020 年南湾库区森林土壤保持量呈先下降后上升的趋势，从 600 t/hm^2 降至 485.7 t/hm^2，再回升至 810.1 t/hm^2。2015 年及之前呈负距平值，2020 年呈正距平值。这一变化主要是由于中间年份的持续干旱导致降水侵蚀力下降，土壤保持量也因而出现低值。整体而言，土壤保持量和水源涵养量均受到降水的显著影响，因此变化趋势相似。土壤保持高值区集中在西部丘陵地区，该区域海拔高坡度陡，土壤潜在侵蚀量大，同时乔木覆盖度较高，根系能够较好地固持改良土壤。低值区位于水域周边地形平坦区域，这些区域经济作物开垦强度大，土质疏松，易受降水侵蚀，因此土壤保持量较小。

生境支持方面，2000—2020 年南湾库区森林生境质量指数整体呈轻微下降趋势，从 0.909 降至 0.893。2005 年及之前呈正距平值，而 2010 年及以后呈负距平值。这表明尽管开发建设区域略有增加，影响了南湾库区的生境质量，导致其轻微下降，但由于良好的环境基底和较强的抗干扰能力，整体生境质量仍保持在较高水平。生境支持高值区位于西部低山丘陵地带，这些区域拥有大面积的天然阔叶林和针叶林，且远离耕地、城镇、建设用地等威胁因子，几乎不受人为活动的干扰，因此生境适宜度最佳。低值区分布较为分散，位于水域边界及非林地周围，这些区域靠近威胁因子，人为活动较为密集。

3.1.2 不同林地类型单项与综合生态系统服务功能对比分析

由于不同林地类型的面积存在差异，本研究采

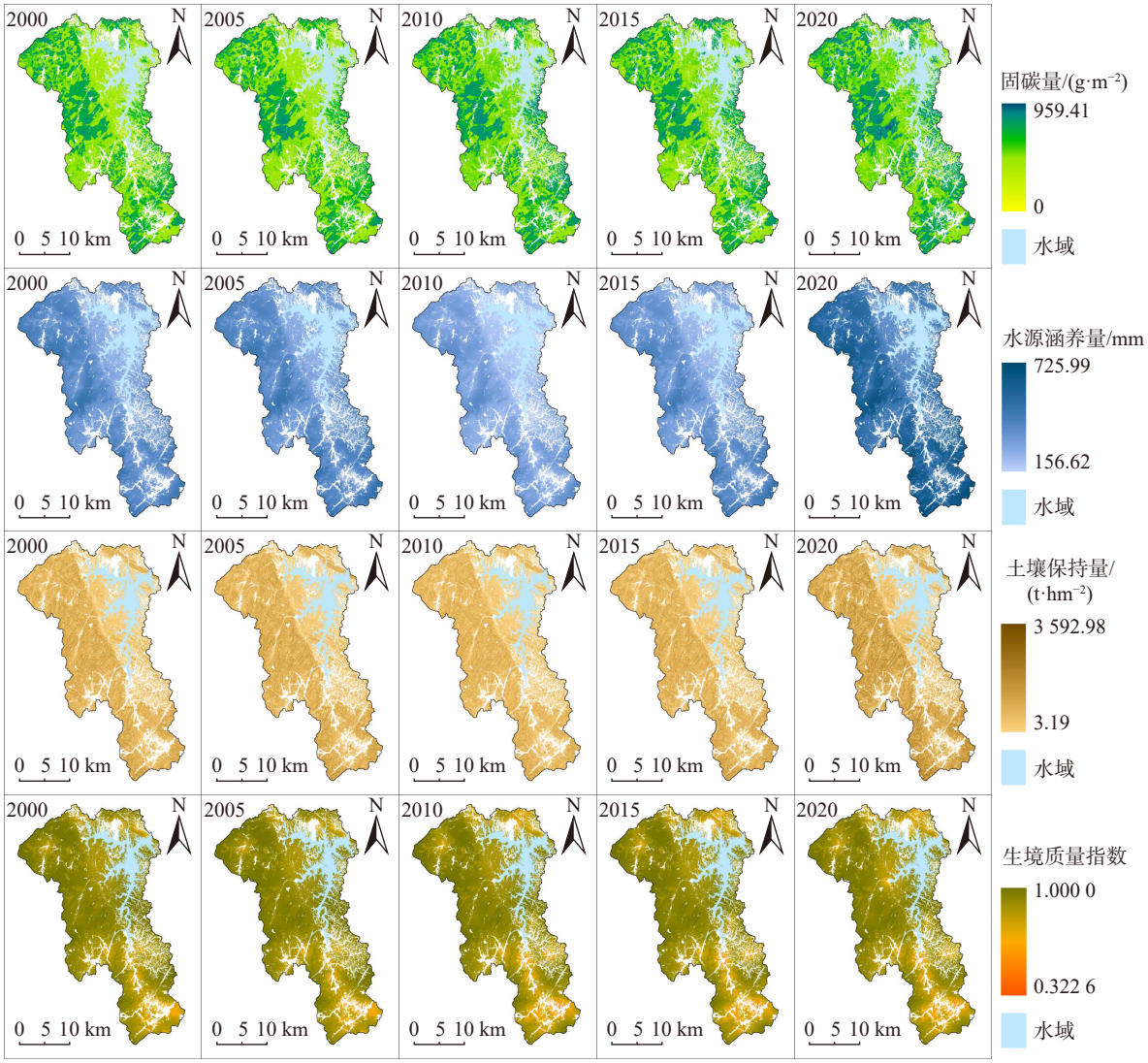


图 2　2000—2020 年南湾库区四大主要生态系统服务的时空分布

Fig. 2　Spatiotemporal distribution of the four key ecosystem services in the Nanwan Reservoir Area from 2000 to 2020

用单位面积的生态系统服务量进行对比。通过空间统计工具计算各林地类型生态系统服务的单位面积平均值。利用标准化处理将生态系统服务数据调整到统一范围，以便进行比较，并使用玫瑰图可视化 9 种林地类型中单项生态系统服务的变化情况（图 3）。对单项生态服务进行归一化处理，得到多年平均值，利用乘法计算得到生态系统服务综合指数，评估综合生态系统服务功能（表 2）。

2000—2020 年各林地类型固碳能力呈波动增强的趋势。不同林地类型的多年平均固碳能力由高到低依次为麻栎林（754.25 g/m^2）、板栗林（700.45 g/m^2）、竹林（622.79 g/m^2）、疏林（519.05 g/m^2）、马尾松−麻栎混交林（509.39 g/m^2）、灌木林（480.72 g/m^2）、茶叶林（473.29 g/m^2）、杉木林（450.02 g/m^2）和马尾松林（417.35 g/m^2）。南湾库区的麻栎林大面积分布在低山区域，具有良好的自然条件且大部分为天然林，因此其固碳能力最强；灌木林和茶叶林几乎全部为人工林，经营强度高，受人为影响较大；杉木林和马尾松林大多分布在海拔较高的地区或水域周边，温度较低同时降水量较少，尽管马尾松大部分为天然林，但由于择伐和过度人为修枝，长势不良；杉木林全部为人工林，林层单一，生长受限于较差的自然条件和薄弱的管理措施，固碳能力较弱。

2000—2020 年各林地类型水源涵养能力呈先减弱后增强的趋势。不同林地类型的多年平均水源涵养能力由高到低依次为杉木林（422.63 mm）、竹林（406.71 mm）、麻栎林（390.80 mm）、板栗林（371.16 mm）、马尾松−麻栎混交林（371.13 mm）、马尾松林（361.14 mm）、灌木林（344.58 mm）、疏林（333.38 mm）和茶叶林（290.82 mm）。杉木林和麻栎林区域产水量大且植被郁闭度高，枯枝落叶层深厚，土壤饱和导水率高，植被截留降水的能力最强，因此水源涵养能力较强；此外，竹林作为研究区的乡土树种，生长状况良好，其发达的根系可以改善土壤结构，提高

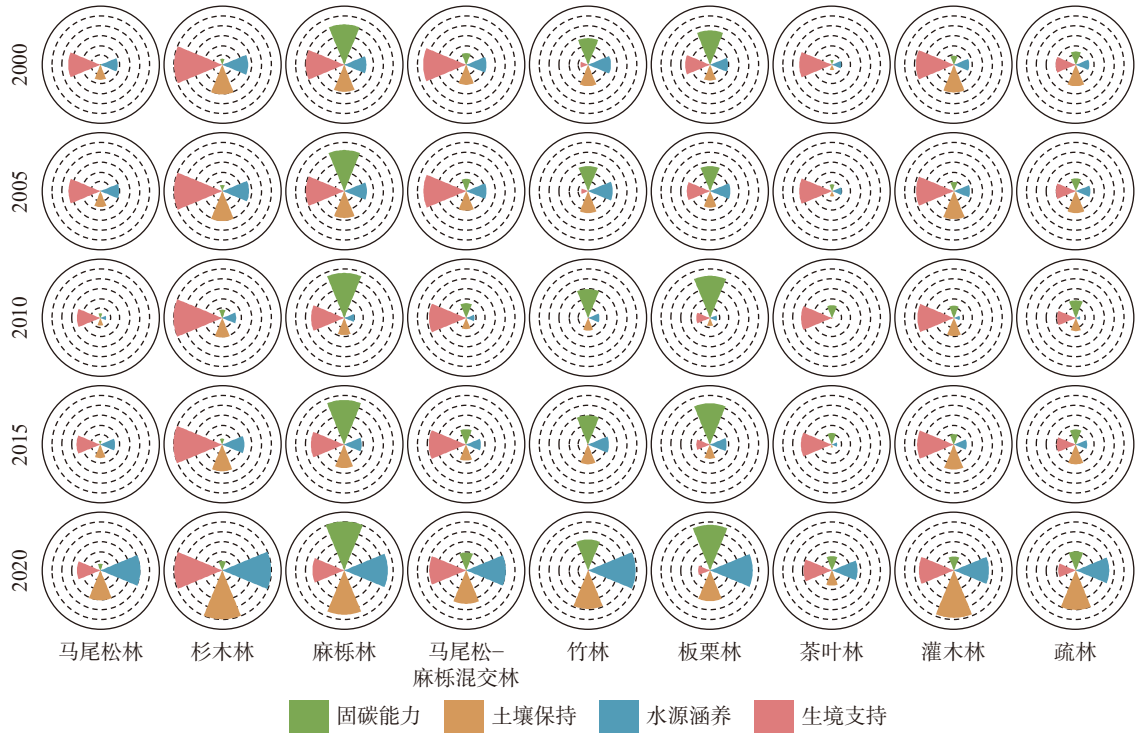


图 3 南湾库区不同林地类型生态系统服务玫瑰图

Fig. 3 Rose map of ecosystem services in different land use types in the Nanwan Reservoir Area

表 2 不同林地类型生态系统服务多年平均值与综合指数

Tab. 2 Annual mean value and comprehensive index of ecosystem services in different forest land types

林地类型	固碳量/(g·m^{-2})	水源涵养量/mm	土壤保持量/(t·hm^{-2})	生境支持量	生态系统服务综合指数
马尾松林	417.35	361.14	545.31	0.887	0.004 9
杉木林	450.02	422.63	738.27	0.947	0.052 2
麻栎林	754.25	390.80	695.80	0.910	0.174 8
马尾松–麻栎混交林	509.39	371.13	593.47	0.922	0.041 4
竹林	622.79	406.71	630.32	0.821	0.008 5
板栗林	700.45	371.16	551.74	0.862	0.041 3
茶叶林	473.29	290.82	404.34	0.899	0.003 2
灌木林	480.72	344.58	716.26	0.915	0.035 1
疏林	519.05	333.38	637.47	0.866	0.018 7

土壤蓄水能力；相比之下，马尾松林、灌木林、疏林及茶叶林分布区域植被覆盖度低，特别是茶叶林，因周边群众开垦，容易造成水土流失。

2000—2020 年各林地类型土壤保持能力呈先减弱后增强的趋势。不同林地类型的多年平均土壤保持能力由高到低依次为杉木林（738.27 t/hm^2）、灌木林（716.26 t/hm^2）、麻栎林（695.80 t/hm^2）、疏林（637.47 t/hm^2）、竹林（630.32 t/hm^2）、马尾松–麻栎混交林（593.47 t/hm^2）、板栗林（551.74 t/hm^2）、马尾松林（545.31 t/hm^2）和茶叶林（404.34 t/hm^2）。杉木林、灌木林及麻栎林所在区域坡度较大，降水强度大，但土壤抗侵蚀性较强，有效防止了土壤流失，因此土壤保持能力较高；疏林、竹林、马尾松–麻栎混交林土壤保持能力相当，处于中等水平，这些区域的降水侵蚀力相对较弱；板栗林、马尾松林及茶叶林的土壤保持能力较低，马尾松林下植被欠缺且枯落物稀少，导致土壤流失较严重，板栗林和茶叶林两种经济作物的采摘活动频繁，造成土壤表层被反复践踏，土壤板结紧实，不能有效缓解降水侵蚀，土壤结构较差[39]。

2000—2020 年各林地类型生境支持能力呈轻微减弱的趋势。不同林地类型的多年平均生境支持能力由高到低依次为杉木林（0.947）、马尾松–麻栎混交林（0.922）、灌木林（0.915）、麻栎林（0.910）、茶叶林（0.899）、马尾松林（0.887）、疏林（0.866）、板栗林

(0.862)和竹林(0.821)。杉木、麻栎林、马尾松−麻栎混交林和灌木林主要分布在海拔较高的低山地区，远离威胁因子，受人为活动干扰较少；马尾松林分布于海拔较低、靠近居民点的区域，受到居民捡拾枯死松枝的影响，生境支持能力相对较弱；茶叶林、板栗林及竹林与人类生产生活联系密切，通常分布在耕地、城镇及居民用地附近，受人为干扰较大，因此生境质量较差。

根据生态系统服务综合指数，9 种林地类型的生态系统综合供给能力由高到低依次为麻栎林、杉木林、马尾松−麻栎混交林、板栗林、灌木林、疏林、竹林、马尾松林和茶叶林。综合来看，麻栎林在固碳服务方面具有明显优势，杉木林和马尾松−麻栎混交林则在各项服务的分配上较为均衡。因此，应重视这 3 类森林植被的经营管理，以提升南湾库区森林生态系统服务的整体效益。

3.2　生态系统服务权衡/协同关系

3.2.1　权衡/协同关系时空演变

南湾库区森林不同生态系统服务之间主要表现为协同关系，占比约 60%，但协同比例呈波动下降趋势。协同关系中，高协同占主导地位，在 20 年间，高协同区域与低协同区域的比例先上升后下降，2010 年高协同区域的占比达到最高。高协同区域的比例在 20 年间从 34.8% 降至 33.6%，这些区域主要集中在海拔较高的低山丘陵地带(图 4)。4 种服务同时达到高值的区域约占 5%，大部分森林区域的协同关系未达到最优水平。低协同区域的比例在 20 年间从 25.4% 降至 21.5%，这些区域主要分布在上游河流两岸、下游水面西岸及西侧低山山麓，2020 年分布较 2000 年更加分散破碎。尽管权衡关系占比较小，但呈上升趋势。权衡关系中强权衡占主导地位，20 年间强权衡区域与弱权衡区域的比例先下降后上升，2015 年强权衡区域的占比达到最高。强权衡区域主要集中在河流中上游及非林地周边区域，弱权衡区域则零星分布在低山区域及水域周边的乔木林内，并呈现由西向东迁移的趋势。总体来看，在研究时段内南湾库区森林 4 项生态系统服务中，高协同和低协同区域的比例分别减少了 1.2% 和 3.9%，强权

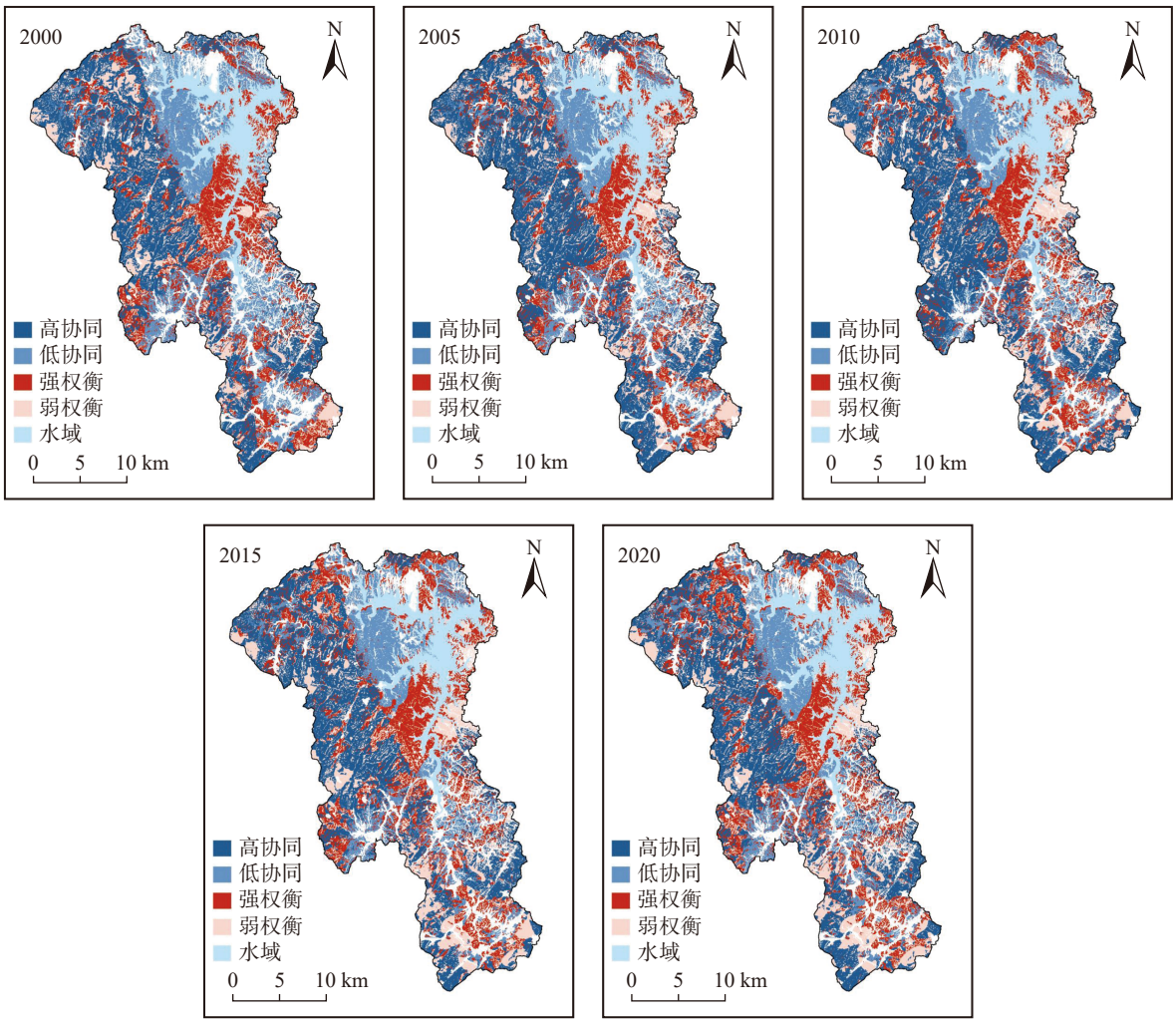


图 4　生态系统服务之间的权衡/协同关系空间格局

Fig. 4　Spatial patterns of he trade-offs and synergies between ecosystem services

衡和弱权衡区域的比例分别增加了 2.2% 和 2.9%。生态系统服务权衡/协同效应空间变化较小，表明库区森林生态系统整体协同强度略有减弱，仍存在作用关系不理想的森林区域，需引起重视。

3.2.2 不同林地类型的生态系统服务权衡/协同关系

由于不同林地类型的生态系统服务能力不同，不同林地类型的生态系统服务在权衡/协同关系上也会存在差异(图 5)。高协同关系是麻栎林、马尾松−麻栎混交林、竹林和板栗林的典型生态系统服务关系，而权衡关系在马尾松林和杉木林中占主导地位。通过对不同类型服务关系组合细分统计，可以进一步确定各林地类型的主导服务关系(图 6)，这有助于森林的分类经营和精细化管理。

在马尾松林分布区，低协同和强权衡类型占主导地位，其中低协同区域的面积达到 35.08%。生境支持服务和水源涵养服务作为单一主导的强权衡区域占比为 29.68% 和 7.03%，而水源涵养和生境支持服务共同主导的弱权衡区域占比 8.41%。因此，超过三分之一的马尾松林处于低协同状态，面临严峻挑战，亟需对这些低产低效区域进行优化与改造。同时，针对存在权衡关系的区域，也应实施生态补偿措施。杉木林分布区的生态系统服务以强权衡和弱权衡为主。水源涵养和生境支持服务共同主导的区域占比为 30.41%，水源涵养、土壤保持与生境支持服务共同主导的区域占比为 14.85%。生境支持服务单一主导的区域占比为 15.75%，同时还有 13.94% 的

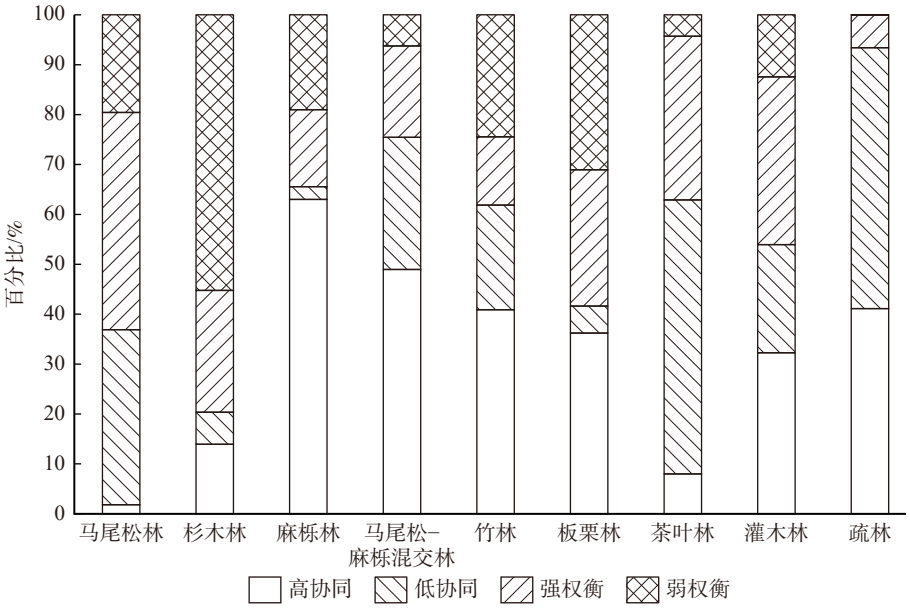
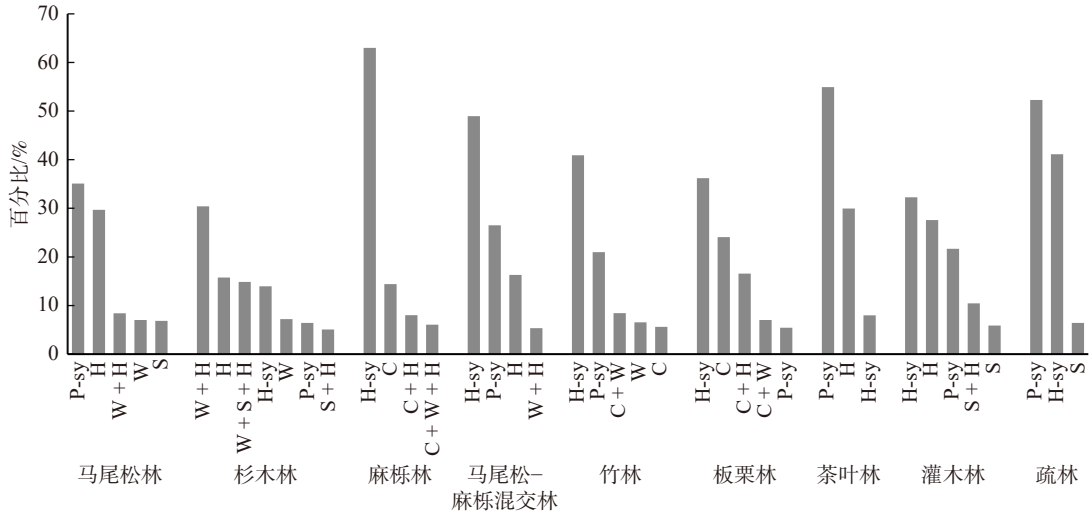


图 5 南湾库区各林地类型生态系统权衡/协同占比

Fig. 5 Proportions of ecosystem service trade-offs and synergies in different forest land types of the Nanwan Reservoir Area



C. 固碳能力；W. 水源涵养；S. 土壤保持；H. 生境支持；H-sy. 高协同；P-sy. 低协同。+ 表示多种服务能力共同主导的权衡关系。

图 6 不同林地类型之间的主要权衡/协同关系

Fig. 6 Typical trade-offs and synergies between different forest land types

区域属于高协同类型。杉木林和马尾松林的固碳能力较低，这对不同服务之间的协同关系产生了不良影响，应结合两种林地分布区域的自然条件，采取相应的森林经营措施进行改善。

相较于其他林地类型，高协同区域主要分布在麻栎林区，区域占比达到 62.99%，这些区域 4 项生态系统服务供给能力都处于中等及以上水平。其次，固碳服务主导的区域占 14.42%；固碳与生境支持服务共同主导的区域占 8%；固碳、水源涵养与生境支持服务共同主导的区域占 6%。总体而言，麻栎林的整体服务能力较强，但仍有近 40% 的区域存在土壤保持能力偏低的问题。采用科学管理方法提升这些区域的土壤保持能力，将有助于更多区域达到高协同状态。

在马尾松−麻栎混交林分布区内，高协同状态和低协同状态占主导地位，高协同区域占比 48.96%，低协同区域占比 26.49%。尽管高协同区域占比最大，但其他区域仍面临严峻挑战，若不加以管理将会加剧土壤流失问题。高协同区域主要分布于高海拔地段，低协同区域则集中于低海拔地段，因此，既需保持并扩大高海拔地区的混交林面积，也需优化低海拔地区混交林的管理，以充分释放其生态服务潜力。竹林分布区内，各项服务关系同样以高协同和低协同为主，面积占比分别为 40.90% 和 20.97%。固碳和水源涵养服务共同主导的区域占比 8.43%，水源涵养服务和固碳服务分别作为单一主导的区域占比为 6.54% 和 5.61%，这些区域的土壤保持服务和生境支持服务水平较低。

板栗林区域中，高协同区域占比为 36.21%，但权衡关系同样较为普遍。固碳服务单一主导的区域占 24.06%，固碳与生境支持服务共同主导及固碳与水源涵养服务共同主导的区域占比分别为 16.57% 和 7.00%。板栗林作为阔叶树种，尽管固碳能力较强，但其与水源涵养、土壤保持及生境支持服务之间的协同性较弱。茶叶林中以低协同和强权衡关系为主，其中低协同区域占比最大，为 54.93%。而生境支持服务单一主导的区域占 29.94%。板栗林和茶叶林作为经济林，虽经济效益显著，但整体生态效益偏低。因此，对于自然条件差、产量低的生态脆弱区域，应实施改造还林措施。灌木林分布区的服务关系较为复杂，高协同区域占比 32.27%，生境支持服务单一主导的强权衡区域占比 27.58%，低协同区域占比 21.68%，土壤保持和生境支持服务共同主导的弱权衡区域占比 10.43%。疏林分布区域的主要服务关系类型同样为高协同和低协同，面积占比分别为 52.28% 和 41.13%。疏林生态系统自身调节能力较弱，对环境变化高度敏感，不同的自然条件对其服务关系影响显著。

3.3　森林生态系统服务的驱动因素

4 种生态系统服务与 8 种驱动因素之间，除了年均降水量与生境支持服务之间没有相关性外，其余均存在显著相关性（表 3）。除生境支持服务外，其他 3 种生态系统服务与年均降水量之间均存在显著正相关关系。降水量的增加促进植物生长，提升生产力，增强水源供给，从而提高水源涵养能力；同时，增加的潜在土壤侵蚀量也促进了土壤保持。4 种生态系统服务与归一化植被指数之间均呈显著正相关关系。归一化植被指数反映了植物的生长状态，良好的植物状态对固碳释氧、减少水土流失、维持生物多样性等方面具有积极作用[40]。除生境支持服务外，其他 3 种生态系统服务与高程之间存在显著正相关关系，研究区高程较大的丘陵地带，立地条件较好，生态系统服务能力较强；而生境支持服务与高程之间则呈负相关关系，研究区低海拔地区多为茶园，居民多居住于丘陵间，因此高海拔区域的威胁因素较多，降低了生境质量。4 种生态系统服务与年均气

表 3　生态系统服务与驱动因素的相关关系

Tab. 3　Correlations between ecosystem services and driving factors

驱动因素	固碳	水源涵养	土壤保持	生境支持
年均降水量	0.171**	0.779**	0.582**	0.023
年均气温	−0.284**	−0.743**	−0.759**	−0.343**
蒸散发	−0.022*	−0.087**	−0.14**	−0.368**
归一化植被指数	0.245**	0.719**	0.706**	0.335**
高程	0.179**	0.323**	0.388**	−0.045**
土壤深度	−0.015**	−0.146**	−0.544**	−0.127**
人口密度	−0.016**	−0.461**	−0.527**	−0.482**
生产总值密度	−0.086**	−0.245**	−0.344**	−0.403**

注：**表示差异极显著（$P < 0.01$），*表示差异显著（$P < 0.05$）。

温、土壤深度和蒸散发之间均呈显著负相关关系。温度升高和蒸散发加剧，导致环境水热条件不均衡，土壤深度不足则降低蓄水能力，最终限制植被生长。人口密度和生产总值这两项社会经济因素与 4 种生态系统服务之间均呈负相关关系。社会发展导致人口密度增加，人类活动的影响也加剧了这一趋势。同时，经济价值较高的经济林木受到青睐，虽然提升了生产总值密度，但也破坏了生态系统服务功能。

对于固碳服务，主要驱动因素为归一化植被指数、年均气温和生产总值密度。年均降水对水源涵养服务的重要性最大，其次为年均气温和归一化植被指数。年均气温对土壤保持服务的影响最大，其次为归一化植被指数和年均降水。人口密度和年均气温是影响生境支持服务的重要因素，并具有较强的解释能力。总体而言，年均降水、年均气温、归一化植被指数和人口密度是影响南湾库区森林生态系统服务差异的主要驱动因素(图 7)。

4 结论与讨论

4.1 结 论

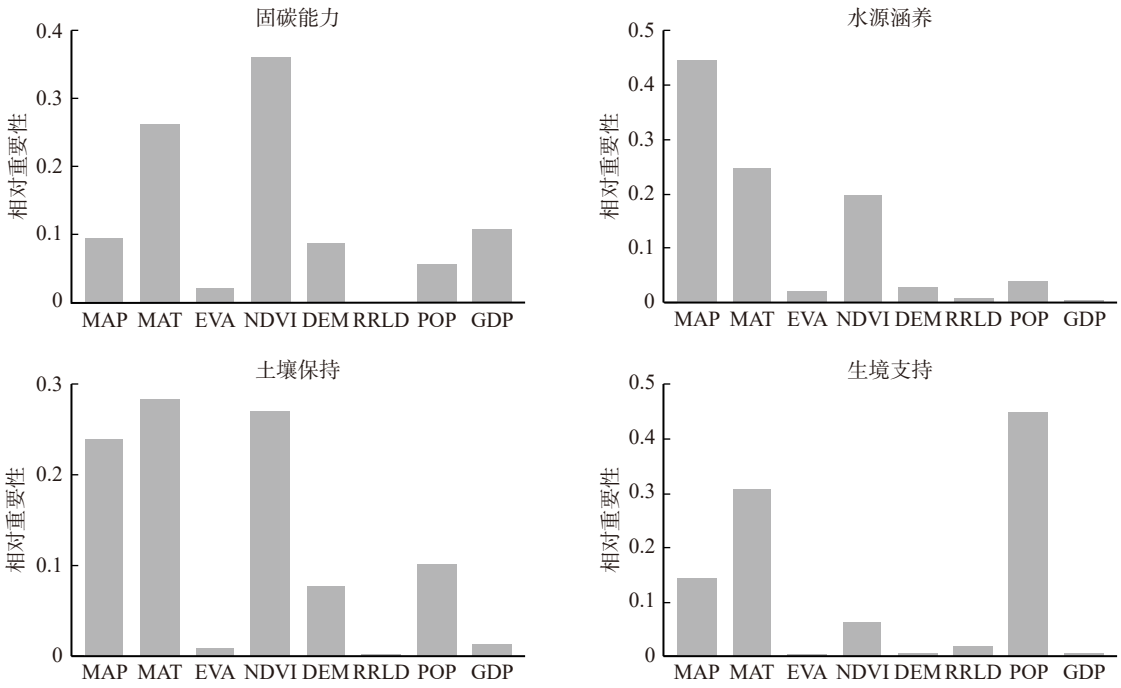
本文以信阳市南湾库区森林生态系统为研究对象，基于 InVEST 模型和 CASA 模型评估了 2000—2020 年的固碳、水源涵养、土壤保持和生境支持服务，从整体和各林地类型两个角度分析了该区森林生态系统服务的时空变化格局，并利用空间叠置法研究了生态系统服务权衡/协同关系。本研究不仅对南湾库区森林生态系统服务功能进行了综合定量评估，还为其他小流域森林生态系统服务的时空变化及其权衡/协同关系的分析提供了方法借鉴。

(1)在时间尺度上，南湾库区森林生态系统的固碳量呈波动上升趋势，水源涵养量和土壤保持量先下降后上升，生境质量指数略有下降；在空间分布上，生态系统整体服务功能呈现西高东低的格局。

(2)不同林地类型的生态系统服务能力存在显著差异，且时间波动较小。综合比较后发现，在 9 种林地类型中，麻栎林、杉木林和马尾松−麻栎混交林的综合生态系统服务供给能力最强。

(3)南湾库区森林生态系统的 4 项服务之间主要表现为高协同和强权衡。时间变化上，协同区域呈减少趋势，权衡区域呈增加趋势；空间分布上，高协同区域主要集中在海拔较高的低山丘陵地带，低协同和强权衡区域集中在水域及非林地周边。弱权衡区域零星分布在低山和平原交界处及水域周边的乔木林中。

(4)不同林地类型的生态系统服务关系中，阔叶林、针阔混交林和竹林主要呈现高协同关系，表现为较协调的状态；马尾松林和杉木林普遍存在权衡关系，服务之间效益分配不平衡；板栗林和茶叶林两类经济林地也表现出显著的权衡关系；灌木林和疏林自我调节能力较弱且受环境影响强烈，生态系统服务关系复杂多变。



MAP. 年均降水量；MAT. 年均气温；EVA. 蒸散发；NDVI. 归一化植被指数；DEM. 高程；RRLD. 土壤深度；POP. 人口密度；GDP. 生产总值密度。

图 7 驱动因素的相对重要性分析

Fig. 7 Analysis of the relative importance of driving factors

（5）南湾库区森林生态系统服务差异的主要驱动因素包括年均降水、年均气温、归一化植被指数和人口密度。

4.2 讨　论

从结果的可靠性看，本研究基于 InVEST 模型估算的 2000—2020 年南湾库区森林生态系统的固碳量的基础数据 NPP 时空分布与 MOD17A3 的 NPP 产品时空分布较为接近，水源涵养量（361.71 mm）与杨英等[41]在河南省淅川县森林资源的估算结果（300 mm）较为一致，土壤保持量的估算结果（612.29 t/hm^2）与弓悦[42]对豫南乡村地区的估算结果（563.12 t/hm^2）较为吻合，生境质量指数（0.9）则与来晓会[43]的研究结果（0.79）较为相符，以上结果的一致性为本文模型估算结果的可靠性提供了间接验证，故在此基础上进行生态服务功能的时空变化及其权衡/协同关系分析是合理的。2000—2020 年间南湾库区的水源涵养能力和土壤保持能力上升最明显并呈现先下降后上升趋势，主要由于二者同时与降水量有着密切的关系，生境支持能力下降主要受到建设发展带来的威胁因素的影响。各项森林生态系统服务具有不同的空间分布格局，整体而言，高值区集中在西部低山丘陵的乔木区，低值区主要位于水域下游的湖区水面周边，水域上游河流周边的生态系统服务能力处于中等水平。森林生态系统服务的空间异质性与林地类型的分布并不完全一致，表明生态系统服务的空间异质性不仅与林地类型的空间异质性有关，还与环境的空间异质性关系紧密。对驱动因素的分析表明，气候因子在自然因素中对植物生长的影响较大，植物的生长周期越长，生物量和生态系统服务功能通常越强。然而，植物生长的旺盛程度与特定的水热条件密切相关。年均降水量和年均气温直接影响植物的光合作用和呼吸作用[44]，是影响植物生长的关键因素，而较高的归一化植被指数则意味着更好的生长状态。尽管社会经济因素的影响力不如自然因素，但其影响同样不可忽视。随着城市化进程的推进，人口增加导致耕地和建设用地的扩张，经济植被也常常受到市场价格波动的影响，从而引发开垦与废弃的交替。因此，其生态服务功能远不如生态林稳定。为了更好地发挥南湾库区的生态效益和社会效益，应根据不同区域的同种林地类型采取差异化的管理措施，整合环境和林地类型的空间异质性，以更有效地实现森林经营管理。基于本研究的结论，提出以下建议以提升南湾库区的森林生态系统服务。（1）南湾库区的森林植被多为公益林，具有较高的生态和社会效益，但经济效益较低。这与库区内村民的生产需求及库区的旅游开发计划存在冲突，因此维持并提升南湾库区生态系统服务功能必须依赖社会支持。政府和林业部门应以生态建设为首要前提，适度发展生态旅游，并积极推广绿色产业。（2）针对库区内生态效益较高的西部低山区域，应减少人为干扰，防止有林地逆向转化，提高森林覆盖率，以更好利用优良立地条件。首先要坚决制止毁林开荒和乱砍滥伐等破坏行为，其次应提升林业部门的森林防火响应能力，并加强社会防火意识，最后利用森林群落种间互补与空间互补的特点，实施混交改造与林下补植。（3）针对库区生态效益较低的水域周边，应当加强次生林的改造，对于生态效益较低的针叶林，可通过补植阔叶树种、抚育间伐、封山育林等人工手段促进更新，提高林分质量，保护森林资源。对于水土流失严重的坡地，以及无人管理或产能低下的茶园和栗园区域，可采取分批恢复计划实现退耕还林，并在其余经济林地进行套种以实现林农和林药的适宜经营模式。（4）针对库区内少部分宜林地，由于受人为活动和立地条件的限制，应加强监管并开展生态补偿机制，结合区域气候和立地条件改善限制因素，统一规划，优先选择生态系统服务供给能力强的树种，分批进行造林绿化。

本研究量化了南湾库区森林生态系统服务，并分析了其时空变化特征，明确了不同林地类型生态系统服务能力之间的差异，探讨了不同区域和不同林地类型服务之间的权衡与协同关系。研究结果为研究区森林生态保护与可持续发展提供建议，但也存在一些局限性。（1）在 InVEST 模型的参数设定上，虽然参考了模型用户手册和相关文献，并进行了修正与验证，但仍可能与真实值存在差距，后续研究可通过地面调查进一步本地化改进这些参数。（2）在分析生态系统服务功能和权衡关系的差异原因时，本文从自然因素和社会经济因素两个角度，针对驱动因素影响进行了初步讨论，但所选社会经济因素不够细化，缺乏针对当地具体政策措施因素的分析。（3）本文选取森林的 4 种主要生态系统服务进行研究，未来可以扩展到其他类型的研究项目，以探讨其对服务量化和相关关系评估的不同影响，从而进行更深入的研究。

参　考　文　献

[1] 刘世荣, 代力民, 温远光, 等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望 [J]. 生态学报, 2015, 35(1): 1−9.
Liu S R, Dai L M, Wen Y G, et al. A review on forest ecosystem management towards ecosystem services: status, challenges, and future perspectives[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 1−9.

[2] 雷相东. 森林生态系统服务多功能性: 概念、指标和经营模拟模型 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5): 1−11.

Lei X D. Forest ecosystem service multi-functionality: definitions, indicators and simulation models for forest management[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 1−11.

[3] Rodríguez J P, Beard T D, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. Ecology and Society, 2006, 11(1): 14.

[4] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1531−1536.
Jin F, Lu S W, Yu X X, et al. Forest ecosystem service and its evaluation in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1531−1536.

[5] Estoque R C, Myint S W, Wang C Y, et al. Assessing environmental impacts and change in Myanmar's mangrove ecosystem service value due to deforestation (2000−2014)[J]. Global Change Biology, 2018, 24(11): 5391−5410.

[6] Dai E F, Wang X L, Zhu J J, et al. Quantifying co-benefits and trade-offs between forest ecosystem services in the Gan River Basin of South China[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 19.

[7] 宋庆丰, 牛香, 王兵. 基于大数据的森林生态系统服务功能评估进展 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2914−2921.
Song Q F, Niu X, Wang B. Review on forest ecosystem services assessment based on big data[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(10): 2914−2921.

[8] Fu B J, Su C H, Wei Y P, et al. Double counting in ecosystem services valuation: causes and countermeasures[J]. Ecological Research, 2011, 26(1): 1−14.

[9] 卢奕妃, 李鑫豪, 赵洪贤, 等. 北京森林类型生态系统服务空间异质性及其影响因素分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2024, 60(3): 350−357.
Lu Y F, Li X H, Zhao H X, et al. Spatial heterogeneity of forest ecosystem services and influencing[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60(3): 350−357.

[10] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 等. 基于 InVEST 模型的森林生态系统服务功能评估研究进展 [J]. 世界林业研究, 2020, 33(4): 19−24.
Zou W T, He Y J, Ye B, et al. Research advances in forest ecosystem services evaluations based on the InVEST model[J]. World Forestry Research, 2020, 33(4): 19−24.

[11] Bagstad K J, Semmens D J, Ancona Z H, et al. Evaluating alternative methods for biophysical and cultural ecosystem services hotspot mapping in natural resource planning[J]. Landscape Ecology, 2017, 32(1): 77−97.

[12] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services[J]. Applied Geography, 2011, 31(2): 748−760.

[13] Gutsch M, Lasch-Born P, Kollas C, et al. Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change[J]. Environment Research Letter, 2018, 13(4): 045012.

[14] 周文春, 张超. 基于 InVEST 模型的莲都区公益林生态系统服务功能研究 [J]. 华东森林经理, 2019, 33(1): 75−80.
Zhou W C, Zhang C. Study on the ecosystem service functions of the public welfare forest in Liandu District based on InVEST model[J]. East China Forest Management, 2019, 33(1): 75−80.

[15] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 等. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析 [J]. 地理学报, 2020, 75(5): 975−988.
Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, et al. Multi-scale analysis of trade-off/synergy effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 975−988.

[16] 殷格兰, 邵景安, 郭跃, 等. 林地资源变化对森林生态系统服务功能的影响: 以南水北调核心水源地淅川县为例 [J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6973−6985.
Yin G L, Shao J A, Guo Y, et al. Effects of forest resource changes on ecosystem function: a case study of Xichuan County, the main source of water for south-to-north water transfer in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6973−6985.

[17] 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应 [J]. 高原气象, 2021, 40(2): 292−301.
Zhao Q Q, Zhang J P, Zhao T B, et al. Vegetation changes and its response to climate change in China since 2000[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 292−301.

[18] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71−78.
Liu G H, Fu B J. Impacts of global climate change on forest ecosystems[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 71−78.

[19] 董卉卉, 张学顺, 冯万富, 等. 信阳市森林生态系统固碳释氧生态效益评估 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2014, 27(2): 232−234.
Dong H H, Zhang X S, Feng W F, et al. Evaluation of ecological benefit of carbon fixation and oxygen released of forest system in Xinyang[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2014, 27(2): 232−234.

[20] 王光军, 罗坤, 陈光禄, 等. 信阳市南湾水库库区森林植被调查分析 [J]. 河南林业科技, 1999, 19(3): 17−20.
Wang G J, Luo K, Chen G L, et al. Survey and analysis on forest vegetation of surrounding areas of Nanwan Reservoir in Xinyang City[J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 1999, 19(3): 17−20.

[21] Yan F P, Wei S G, Zhang J, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 2.

[22] Li Y, Luo H F. Trade-off/synergistic changes in ecosystem services and geographical detection of its driving factors in typical karst areas in southern China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110811.

[23] 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.
Wen Y Y, Sun Q, Yan Y C, et al. Impacts of the terrestrial ecosystem changes on the carbon fixation and oxygen release services in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8482−8493.

[24] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413−424.
Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413−424.

[25] Budyko M I. Climate and life [M]. New York : Academic Press, 1974.

[26] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington D C: Agricultural Handbook, 1978.

[27] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705−711.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705−711.

[28] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history[J]. Philosophical Transactions Biological Sciences, 1990, 329(1255): 421−428.

[29] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19−24.
Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 19−24.

[30] 韩晶, 崔金芳, 杨威, 等. 基于 InVEST 模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 32−39.
Han J, Cui J F, Yang W, et al. Analysis of soil erosion change and driving factors in low hilly areas based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 32−39.

[31] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析 [J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2895−2906.
Huang M Y, Yue W Z, Feng S R, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui Province based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2895−2906.

[32] 张静静, 穆艳华. 伏牛山地区森林生态系统生境质量多视角评价 [J]. 生态科学, 2021, 40(5): 116−121.
Zhang J J, Mu Y H. Multi-perspective evaluation on habitat quality of forest ecosystem in Funiu Mountain Region[J]. Ecological Science, 2021, 40(5): 116−121.

[33] 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 等. 大别山区生境质量时空特征及自然−人为因素驱动机制 [J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2268−2279.
Zheng Y P, Zhang J H, Tian H W, et al. Spatio-temporal characteristics of habitat quality and natural-human driven mechanism in Dabie Mountain Area[J]. Environmental Science, 2024, 45(4): 2268−2279.

[34] 张秀, 张璇, 崔磊, 等. 金沙江中游水电开发区生态系统服务综合功能时空变化与归因 [J]. 环境科学, 2024, 46(3): 1585−1596.
Zhang X, Zhang X, Cui L, et al. Comprehensive ecosystem service changes and their drivers in the middle reaches of Jinsha River[J]. Environmental Science, 2024, 46(3): 1585−1596.

[35] Ronald C, Francisco E, Daniel M L, et al. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliotii* forests in southeastern USA[J]. Forests, 2014, 5(6): 1409−1431.

[36] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 生态系统服务竞争与协同研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5219−5229.
Li P, Jiang L G, Feng Z M, et al. Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: an overview[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5219−5229.

[37] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. Ecology Letters, 2010, 12(12): 1394−1404.

[38] Liu W, Zhan J, Zhao F, et al. Spatio-temporal variations of ecosystem services and their drivers in the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 337: 130466.

[39] 艾彪, 黄云, 朱元皓, 等. 赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 197−205.
Ai B, Huang Y, Zhu Y H, et al. Evaluation of water conservation capacity of litter and soil layer in typical forest stands in hilly region of southern Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 197−205.

[40] 王培家, 章锦河, 杨良健, 等. 典型旅游城市生态系统服务时空演变及其影响因素: 以黄山市为例 [J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3897−3910.
Wang P J, Zhang J H, Yang L J, et al. Spatio-temporal evolution of ecosystem services in a typical tourist city and its influencing factors: a case study of Huangshan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3897−3910.

[41] 杨英, 王立新, 任卫华, 等. 基于 InVEST 模型的河南淅川县森林资源水源涵养功能评估 [J]. 林业资源管理, 2017(3): 51−55.
Yang Y, Wang L X, Ren W H, et al. Headwater conservation evaluation of forest resources in Xichuan County based on InVEST model[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2017(3): 51−55.

[42] 弓悦. 豫南乡村地区生态系统服务时空演变及多情景模拟研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Gong Y. Study on spatiotemporal evolution and multi-scene simulation of ecosystem services in rural areas of southern Henan[D]. Harbin: Northeast Forstry University, 2023.

[43] 来晓会. 基于 InVEST 模型的大别山地区生态系统服务评估及预测 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
Lai X H. Assessment and prediction of ecosystem services in the Dabie Mountains based on the InVEST model[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2024.

[44] 孙枫, 章锦河, 王培家, 等. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例 [J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2476−2493.
Sun F, Zhang J H, Wang P J, et al. Research on the construction and evaluation of urban ecological security pattern: a case study of Suzhou urban area[J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2476−2493.

（责任编辑　孟　瑶　李　契
责任编委　臧润国）