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

三北防护林生态工程建设对可持续发展目标的影响

常亚楠 郝蕊芳 薛兆磊 张亚辉

Effects of the Three-North Shelter Forest Program construction on sustainable development goals

Chang Yanan, Hao Ruifang, Xue Zhaolei, Zhang Yahui

引用本文:
常亚楠, 郝蕊芳, 薛兆磊, 张亚辉. 三北防护林生态工程建设对可持续发展目标的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):12–22. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260041
Chang Yanan, Hao Ruifang, Xue Zhaolei, Zhang Yahui. Effects of the Three–North Shelter Forest Program construction on sustainable development goals[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):12–22. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260041

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260041

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于InVEST模型云南省生态系统服务功能综合评估
Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 103–112. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240123

北京大兴区典型生态系统服务评价及其权衡协同关系
Typical ecosystem service assessment and its trade–off synergy relationship in Daxing District, Beijing
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 142–151. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240362

黑龙江丰林国家级自然保护区生态系统服务价值评估与分析
Evaluation and analysis on ecosystem service value of Fenglin National Nature Reserve in Heilongjiang Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 100–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210041

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

基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化
Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200272

不同土地利用情景下天津市生态系统服务及权衡与协同分析
Ecosystem services, trade–offs and synergy analysis in Tianjin under different land use scenarios
北京林业大学学报, 2022, 44(5): 77–85. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210008

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260041

三北防护林生态工程建设对可持续发展目标的影响

常亚楠 郝蕊芳 薛兆磊 张亚辉
（北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘要:【目的】三北防护林生态工程（TNSFP）是国家级重大林业生态工程，实现了发展理念从改造自然到人与自然和谐共生的转型。工程显著改善区域生态、增进民生福祉，但工程建设对区域可持续发展目标（SDGs）的具体贡献与作用机制尚不明确。**【方法】**本研究以 1985—2022 年为研究时段，以 TNSFP 工程区为研究对象，选取植被覆盖度（FVC）和碳储量、产水量、土壤保持、防风固沙、生境质量 5 种生态系统服务为生态建设指标，结合社会经济数据，构建面板数据模型，系统分析 TNSFP 实施期间生态系统服务与 SDGs 的关联特征及其空间异质性。**【结果】**（1）1985—2022 年间，TNSFP 地区 SDGs 综合水平整体提升，空间上呈现显著的东南高、西北低分布格局，区域差异明显；（2）15 个 SDGs 指标间以协同关系为主（占比 84.76% ~ 87.62%），各指标之间的关系随时空动态波动；（3）面板数据模型结果显示，不同生态系统服务与 SDGs 指标的关联特征存在显著差异：碳储量与 80% 的 SDGs 指标存在显著相关，其中 46.67% 的指标呈正相关，关联最为广泛；产水量与 40% 的 SDGs 指标呈显著正相关；土壤保持与清洁饮水目标（SDG6）呈负相关，但与气候行动（SDG13）和土地保护（SDG15）呈正相关；防风固沙与 3 个 SDGs 指标协同。这种差异化关联模式提示，生态工程优化需针对不同服务类型的功能特征进行精准调控。**【结论】**本研究揭示了 TNSFP 通过提升生态系统服务供给与 SDGs 协同改善存在显著关联，表明该工程对区域可持续发展具有积极的支撑作用，可为生态脆弱区生态工程建设提供科学参考。

关键词：碳储量；脆弱区；生态系统服务；InVEST 模型；面板数据分析
中图分类号：S727.2；S714.7 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)07−0012−11
引文格式：常亚楠，郝蕊芳，薛兆磊，等. 三北防护林生态工程建设对可持续发展目标的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(7)：12−22. Chang Yanan, Hao Ruifang, Xue Zhaolei, et al. Effects of the Three-North Shelter Forest Program construction on sustainable development goals［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 12−22.

Effects of the Three-North Shelter Forest Program construction on sustainable development goals

Chang Yanan Hao Ruifang Xue Zhaolei Zhang Yahui
(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］The Three-North Shelter Forest Program (TNSFP) is China's longest-lasting and largest-scale forestry ecological initiative, representing a paradigm shift from the traditional concept of conquering nature to one of harmonious coexistence between humans and nature. Although the program has substantially improved regional ecosystems and enhanced human well-being, its specific contributions to the sustainable development goals (SDGs) within the project area and the underlying mechanisms remain unclear.［**Method**］Focusing on the TNSFP region during 1985–2022, this study selected fractional vegetation cover (FVC) and five ecosystem services, i.e. carbon storage, water yield, soil conservation, wind erosion prevention, and habitat quality as ecological indicators. Combined with socio-economic data, we constructed panel data models to systematically analyze the relationships between ecosystem services and

收稿日期: 2026−01−26 **修回日期:** 2026−04−01
基金项目: 国家自然科学基金（青年基金）项目（42001260）。
第一作者: 常亚楠。主要研究方向：生态系统服务。Email: changyanan1998@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 郝蕊芳，副教授。主要研究方向：生态系统服务。Email: hrf@mail.bnu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

SDGs and their spatial heterogeneity. [**Result**] (1) From 1985 to 2022, overall SDG performance in the TNSFP region improved significantly, exhibiting a distinct southeast-northwest gradient with pronounced spatial heterogeneity; (2) synergistic interactions prevailed among the 15 SDG indicators (accounting for 84.76%–87.62%), with relationships fluctuating spatiotemporally; (3) panel data models revealed significant differences in how ecosystem services relate to SDGs: carbon storage showed significant correlations with 80% of the SDG indicators, with 46.67% of the total indicators exhibiting positive correlations, demonstrating the most extensive associations; water yield was significantly and positively correlated with 40% of the SDG indicators; soil conservation was negatively correlated with clean water and sanitation (SDG6) but positively correlated with climate action (SDG13) and life on land (SDG15); and wind erosion prevention showed synergistic relationships with three SDG indicators. This differentiated correlation pattern suggests that optimizing ecological projects require precise regulation based on the functional characteristics of different service types. [**Conclusion**] This study demonstrates that the TNSFP is significantly associated with synergistic improvements in SDGs by enhancing ecosystem service supply, indicating that the program plays a positive supporting role in regional sustainable development. These findings provide scientific insights for ecological restoration initiatives in environmentally fragile regions.

Key words: carbon storage; fragile region; ecosystem services; InVEST model; panel data analysis

联合国《2030 年可持续发展议程》提出了 17 项可持续发展目标（sustainable development goals, SDGs），旨在统筹社会、经济与环境维度的全球行动[1]。为推动 SDGs 实现，加拿大、德国、日本和印度等国家制定了专门针对实现 SDGs 的政策，中国把 SDGs 纳入“十四五”规划，并通过“一带一路”倡议加强国际合作[2]。目前，距离 2030 年实现 SDGs 的最后期限仅剩 5 年时间，当前的进展远未达到 2030 年议程中要求的水平。新冠疫情的遗留影响、不断升级的冲突、地缘政治紧张局势以及日益严重的气候变化正在对 SDGs 进展造成沉重打击。目前，只有 17% 的 SDGs 进展顺利，其中近一半目标只取得了微小或适度进展，超过 1/3 的目标陷入停滞或出现倒退。作为负责任大国，中国高度重视 2030 年可持续发展议程的落实。2016 年，中国政府发布《中国落实 2030 年可持续发展议程国别方案》，明确了 17 项 SDGs 的中国化实施方案，将可持续发展目标与国家中长期发展战略有机衔接[3]。2017 年，中国发布《中国落实 2030 年可持续发展议程进展报告》，系统评估了各项目标的实施进展，并建立了一套涵盖经济、社会、环境维度的本土化指标体系[4]。在国家层面，中国成立了由外交部牵头的落实 2030 年可持续发展议程部际协调机制，统筹推进 SDGs 纳入国民经济和社会发展规划、国土空间规划等重大政策体系。

当前研究从 SDGs 间复杂相互作用、影响因素、优先次序以及未来趋势[5]等方面已有大量发现，并指出生态系统服务（ecosystem services，ES）与 SDGs 之间存在密切联系，直接或间接促进多个 SDGs 的实现。比如，供给服务有助于 SDG2（零饥饿）、SDG3（良好健康和人类福祉）、SDG6（清洁饮水和卫生设施）的实现[6–8]。SDGs 涵盖经济、社会和环境 3 个维度，实现这些目标从根本上依赖于健康的生态环境和稳定持续的生态系统产出。因此，有必要更深入并广泛地探究 ES 对实现 SDGs 的贡献。然而，现有研究对中国生态工程与 SDGs 实现之间关系的定量研究仍显不足。尽管国家尺度的 SDGs 进展评估表明中国多项指标优于全球平均水平，但在区域和工程尺度上，大型生态工程如何通过生态系统服务供给促进 SDGs 协同实现，其内在机制与空间异质性尚缺乏深入解析，限制了生态工程效果的精准评估，难以为后续工程的优化布局提供科学支撑。

中国作为生态工程规模最大的国家，实施了三北防护林工程（Three-North Shelter Forest Program, TNSFP）、退耕还林等一系列生态工程，旨在改善区域生态环境、防治沙漠化，促进可持续发展。作为中国历史上最大规模的造林工程，TNSFP 地区涵盖范围包括东北、西北以及华北，覆盖 725 个县和 13 个省，面积 4.07×10^8 hm^2，占国土总面积的 42.40%，也是迄今为止世界上最大的林业生态工程[9]。该工程规划时间从 1978 年开始，到 2050 年结束，计划历时 73 年。其建设分 3 个阶段、8 期工程进行。第一阶段时间为 1978—2000 年，3 期工程完成；第二阶段时间为 2001—2020 年，2 期工程完成；第三阶段时间为 2021—2050 年，3 期工程完成。预期到 2050 年该工程结束时，三北地区的森林覆盖率将由 1977 年的 5.05% 提高到 15.95%。

本研究以 TNSFP 为研究对象，评估其建设期间

(1985—2022 年)碳储量、产水量、防风固沙、土壤保持等生态系统服务的时空分布，结合社会经济发展情况，构建包含社会、生态、环境多维度的面板数据模型，揭示 TNSFP 建设与 SDGs 的关联路径及其空间异质性，为全国甚至全球相似生态工程的规划与可持续发展政策的制定提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

三北防护林工程(TNSFP)位于 33°30′～50°12′N、73°26′～127°50′E，东端起黑龙江宾县，西抵新疆乌孜别里山口，北至中外国界线；南界自东向西沿天津、汾河、渭河、洮河、布尔汗布达山、喀喇昆仑山一线分布。区域东西全长 4 480 km，南北宽 560～1 460 km，涵盖东北、西北、华北 13 个省(自治区、直辖市)的 551 个县。

区域地势西高东低，海拔−160～5 000 m。地貌类型包含山地、高原、平原、沙漠、戈壁，分布有我国 8 大沙漠、4 大沙地，区内风沙化土地面积约占全国风沙化土地总面积的 85%。气候以温带大陆性气候与温带季风气候为主，西部高山及青藏高原边缘地带为高原高寒气候，年降水量整体自东向西、自南向北递减。

1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据包括土地利用数据、数字高程模型、气象数据、社会经济数据等，数据来源及介绍见表 1，所有数据空间分辨率重采样为 1 km。相关研究表明，8 月植被生物量达到年度峰值，且云层干扰最小，数据质量最高，因此本研究使用 8 月份 NDVI 数据分析植被变化。

1.3 生态系统服务评估

1.3.1 碳储量

本研究使用 integrated valuation of ecosystem services and trade-offs(InVEST)模型的碳储量模块评估 TNSFP 工程区范围的碳储量，包括地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量 4 个碳库。地上碳储量包括土壤表面所有生长的植物的碳储量(例如树皮、树干、树枝、树叶)，死亡有机碳储量包括枯枝落叶以及死亡树木的碳储量[10]。计算公式如下。

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dead}} + C_{\text{soil}} \tag{1}$$

式中：C_{total}代表碳储量的总量，C_{above}、C_{below}、C_{dead}和C_{soil}依次为地上碳储量、地下碳储量、死亡有机碳储量、土壤碳储量。

1.3.2 产水量

InVEST 模型产水量模块基于水量平衡原理，通过 Budyko 曲线，将年均降水量减去不同土地利用类型的蒸散发，得到计算单元的产水量，最终在流域尺度汇总得到整个区域的产水量。计算公式如下。

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x \tag{2}$$

$$\frac{\text{AET}_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_x}{1 + \omega_x R_{xj} + \dfrac{1}{R_x}} \tag{3}$$

$$\omega_x = Z \times \frac{\text{AWC}_x}{P_x} \tag{4}$$

$$R_x = Z \times \frac{k_x \times \text{ET}_{ox}}{P_x} \tag{5}$$

式中：x 代表任意栅格，Y 代表年均产水量，AET_x为实际蒸散量，R 表示干燥度指数(无量纲)。ω是一个用来描述土壤属性和气候的经验参数；Z 代表季节性降水分布参数，反映了降雨特征，为经验常数；k 表示蒸散系数，由土地利用类型决定[10−11]；AWC表示植被可利用含水量；ETox 为栅格年均潜在蒸散发(大气理论最大蒸发能力)，o 为定义蒸散类型(潜在蒸散基准值)，x 为空间单元标识(栅格 x)。

1.3.3 土壤保持

InVEST 模型中泥沙输移比模块(sediment delivery

表 1 数据来源表

Tab. 1 Data source table

数据	数据介绍	数据来源
数字高程模型(DEM)	GEBCO 全球地形数据集(网址：https://www.gebco.net/)	GEBCO Data(https://www.gebco.net/)
土地利用	1990—2019 年全国30 m年度土地覆被数据集及其动态变化数据集	China Land Cover Dataset(CLCD)[6]
土壤数据	世界协调土壤数据库(HWSD V1.2)，空间分辨率 1 km	https://iiasa.ac.at/models-tools-data
蒸散发	1901—2024年中国1 km分辨率逐月潜在蒸散发数据集[7]	国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)
降水	中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2023)[8]	国家青藏高原数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)
NDVI	1981—2023 年中国逐日无缝归一化植被指数数据集[9]	Scientific Data(https://www.nature.com/sdata/)
社会经济数据	三北地区相关社会经济数据	中国统计年鉴

ratio model）基于修正的土壤流失方程 USLE，将像元的潜在土壤流失量（假设地表为裸地）与实际土壤流失量之差表征为土壤保持量。计算公式如下。

$$SR = RKLS - USLE = RKLS(1 - CP) \tag{6}$$

式中：SR 为实际土壤保持量（t/km^2），RKLS 为裸地条件下潜在土壤侵蚀量（t/km^2），USLE 为实际土壤侵蚀量（t/km^2），C 为植被覆盖因子，P 为水土保持措施因子。

1.3.4　生境质量

生境质量指生态系统提供的、能够使生物持续生存、繁殖和保持种群的能力。InVEST 模型生境质量模块通过考虑不同土地利用类型的敏感性和威胁源强度计算生境质量指数，取值范围为 0~1，指数越高，表示生境质量越好[12]。计算公式如下。

$$HSI = \sum_{i=1}^{n} w_i f_i \tag{7}$$

式中：HSI为生境质量，n 为指标因子个数，w_i为权重，f_i为指标因子计算值。

1.3.5　防风固沙

防风固沙是 TNSFP 建设的主要目标之一。在本研究中，不同土地利用类型单位面积防风固沙量参考表 2[13−16]。通过土地利用类型赋值评估 TNSFP 的防风固沙效果。

1.3.6　植被覆盖度

植被覆盖度（fractional vegetation cover，FVC）是衡量生态环境质量的一个重要指标，通常用百分比或小数表示（0 表示无植被覆盖，1 或 100% 表示完全植被覆盖），计算公式如下。

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \tag{8}$$

式中：NDVI 为归一化植被指数，$NDVI_{soil}$为无植被覆盖区域的 NDVI 值，通常取研究区域内 NDVI 的最小值或低百分位数。$NDVI_{veg}$为完全被植被覆盖区域的 NDVI 值，通常取最大值或高百分位数。

1.4　SDGs 量化

SDGs 共包含 17 个 SDGs 和 169 个可持续发展指标，本研究基于以下 3 个原则选择其中部分 SDGs 指标进行深入分析：（1）紧扣 TNSFP 的核心目标与多重效益；（2）直接关联优先；（3）数据的可得性及连续性。本文在上述 3 个原则的基础上结合前人的研究[17]，构建了包含 11 个目标和 15 个指标的体系（表 3），评估 TNSFP 建设地区的可持续发展情况。其中，基于“直接关联优先”原则，选取碳储量作为对应 SDG12.2 的主要指标，因其反映自然资源的可持续管理和生态效率提升[1]，选取防风固沙作为对应 SDG13.1 的指标，主要考虑其通过增强干旱区生态系统韧性以适应气候变化[18]。此外，本研究旨在探讨生态系统服务对 SDGs 的关联路径，而非健康效益的终极表现，并基于数据的连续性及可获得性，对 11 个 SDGs 赋予相同权重，使用公式 10 将所有指标归一化为 0 ~ 100，以计算 SDGs 总分。

$$X = \frac{(X_i - X_{max})}{(X_{max} - X_{min})} \times 100 \tag{9}$$

式中，X 表示指标的归一化值，X_{min}和X_{max}分别代表某一可持续发展指标的最小值和最大值，X_i 代表可持续发展指标值。可持续发展指标的数值越高，代表可持续发展实现水平越高。

1.5　SDGs 相互作用

SDGs 之间存在复杂的权衡协同关系[19]，本研究采用斯皮尔曼相关系数分析不同 SDGs 之间的关系。计算公式如下。

$$r_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2 - 1)} \tag{10}$$

表 2　不同土地利用类型单位面积防风固沙

Tab. 2　Wind erosion prevention per unit area for different land use types

土地利用类型	基础固沙量/(t·a^{-1})	参考文献
林地	15	韩永伟等[13]
灌木林地	3	程皓等[14]
草地	2	王洋洋等[15]、脱登峰等[16]

表 3　本研究选择的 SDGs 指标

Tab. 3　SDGs indicators selected in this study

SDGs	目标	指标
SDG1：无贫穷	1.1	农村居民收入
SDG2：零饥饿	2.1	粮食产量
SDG3：良好的健康与福祉	3.9	医疗机构卫生床数
SDG6：清洁水和卫生设施	6.1	产水量
	6.6	降雨量
SDG7：经济适用的新能源	7.1	木材产量
SDG8：经济增长和促进就业	8.9	人均GDP
SDG11：防御灾害	11.1	城市人口
	11.7	城市绿地面积
SDG12：可持续消费和生产模式	12.2	碳储量
SDG13：气候行动	13.1	防风固沙
SDG15：陆地生物	15.1	FVC
	15.2	NDVI
	15.3	土壤保持
	15.4	生境质量

式中：r_s 表示斯皮尔曼相关系数，d_i 是第 i 对观测值的排名，$\sum_{i=1}^{n} d_i^2$ 是所有排名差平方的总和，n 代表样本大小。

1.6 生态系统服务与 SDGs 的关联分析

本研究采用面板数据模型分析 TNSFP 生态系统服务与 SDGs 的统计关联及工程效应，与传统线性回归模型相比，面板数据模型不仅考虑了横截面数据的共性，还分析了横截面因素的个体特定影响。在本研究中，将 SDGs 指标作为因变量（被解释变量），碳储量、土壤保持等生态系统服务作为自变量（解释变量），控制年均降水量、GDP 等为协变量，识别 TNSFP 与 SDGs 的关联特征，所有分析使用 Stata 实现。考虑到生态系统服务与 SDGs 之间可能存在双向因果关系（如经济发展水平较高的地区可能投入更多生态建设资金，同时较好的生态系统服务也可能促进经济发展），本研究采用以下策略处理内生性问题：（1）在面板数据模型中控制省份固定效应和时间固定效应，以消除不随时间变化的个体异质性和共同时间趋势的影响；（2）引入工具变量—年均降水量和地形起伏度作为生态系统服务的外生工具变量，进行两阶段最小二乘法（2SLS）估计，检验结果的稳健性[20]。Hausman 检验结果表明，固定效应模型在大多数情况下优于随机效应模型（$p < 0.05$），且工具变量检验拒绝了弱工具变量假设（F 统计量 > 10），说明模型设定合理，内生性得到有效控制。最终确定可持续发展目标 SDG1.1、SDG2.1、SDG3.8、SDG6.1、SDG6.6、SDG7、SDG8、SDG11.1、SDG11.7、SDG12.2、SDG13.1、SDG15.2、SDG15.3 采用固定效应模型，SDG15.1、SDG15.4 采用随机效应模型，在每个模型中，使用对数变换消除异方差和不同数量级数据的影响。

2 结果与分析

2.1 TNSFP 地区 SDGs 的时空变化

1985—2022 年期间，TNSFP 地区 SDGs 整体呈现上升趋势（图 1），但 2022 年 SDGs 整体分值为 41.12，表明该地区可持续发展水平仍有待提高（图 1a）。从各 SDGs 指标的平均得分可以看出，得分最高的 SDG15.1，分值为 51.65，是全区的优势 SDGs。SDG7.1 和 SDG8.1 的得分分别为 11.77 和 12.76，分值较低，未来有很大的进步空间。其余发展目标，包括 SDG1.1，SDG2.2，SDG11.7 虽然不是最低分值，但平均得分均在 20 分以下（图 1b）。具体地，在 1985—2022 年期间，TNSFP 地区除 SDG15.3 和 SDG15.4 整体呈下降趋势外，各项 SDGs 指标的得分均呈现上升趋势（图 2）。SDG1.1、SDG3.8、SDG8.1、SDG11.1、SDG11.7、SDG15.2 分值提升均在 20 分以上。其中，SDG1.1（0.44→55.25）、SDG8.9（0.67→41.99）、SDG11.1（12.49→39.94），SDG11.7（0.77→47.68）、SDG12.2（50.91→52.15）、SDG13.1（26.96→30.47）呈稳定上升趋势，而 SDG2.1、SDG3.8、SDG15.1、SDG15.2 等指标在 2000 年短暂下降后又呈现上升趋势，其 2022 年分值均大于 1985 年（图 2）。但是，SDG6.1 和 SDG6.6 在 2000 年下降后呈现上升趋势，其 2022 年分值小于 1985 年。2022 年得分最高的指标是 SDG15.1，达到了 62.1，而 SDG7.1 得分最低，分值为 16.95。

从空间上看，TNSFP 地区 SDGs 得分呈东南高西北低的格局，得分最高的省份分布于东部，包括北京、河北、天津，得分较低的 3 个省份分布于西北部，包括新疆、青海、甘肃（图 3）。在 1985—2022 年期间，北京市和河北省 SDGs 平均值一直保持在 40 分

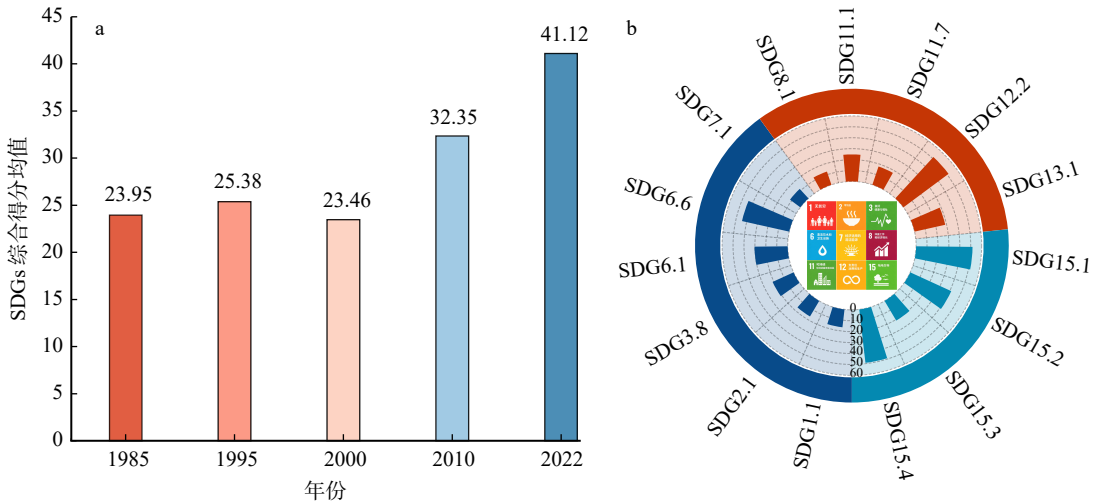


图 1 TNSFP 地区 1985—2022 年 SDGs 指标年平均值（a）及各指标年平均值（b）

Fig. 1 Annual average values of SDGs indicators (a) and each indicator (b) in TNSFP from 1985 to 2022

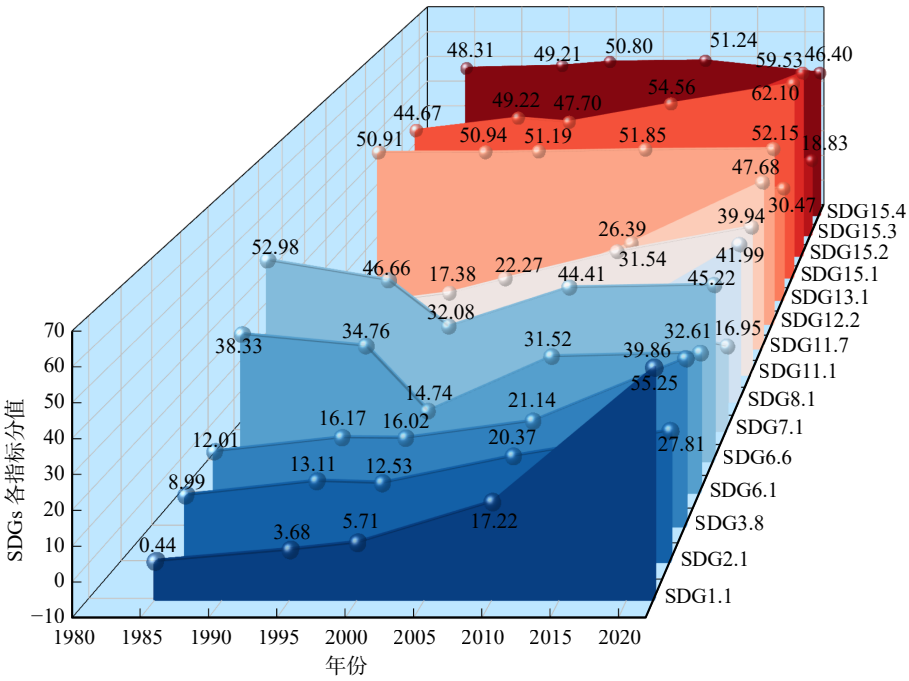


图 2　TNSFP 地区 1985—2022 年期间各 SDGs 各指标得分

Fig. 2　Scores of each SDGs indicator in the TNSFP region from 1985 to 2022

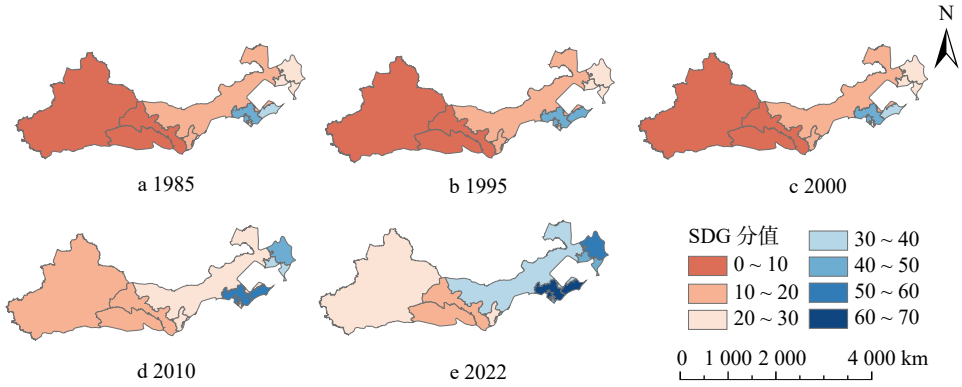


图 3　1985—2022 年期间 TNSFP 地区 SDGs 分值空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of SDGs scores in the TNSFP region from 1985 to 2022

以上。河北省在 2022 年达到了所有省份 SDGs 得分的最高值(68.26 分)，该省也是涨幅最大的省份，从 1985 年到 2022 年增长了 25.24 分。涨幅最小的省份为青海省，只增长了 8.08 分。

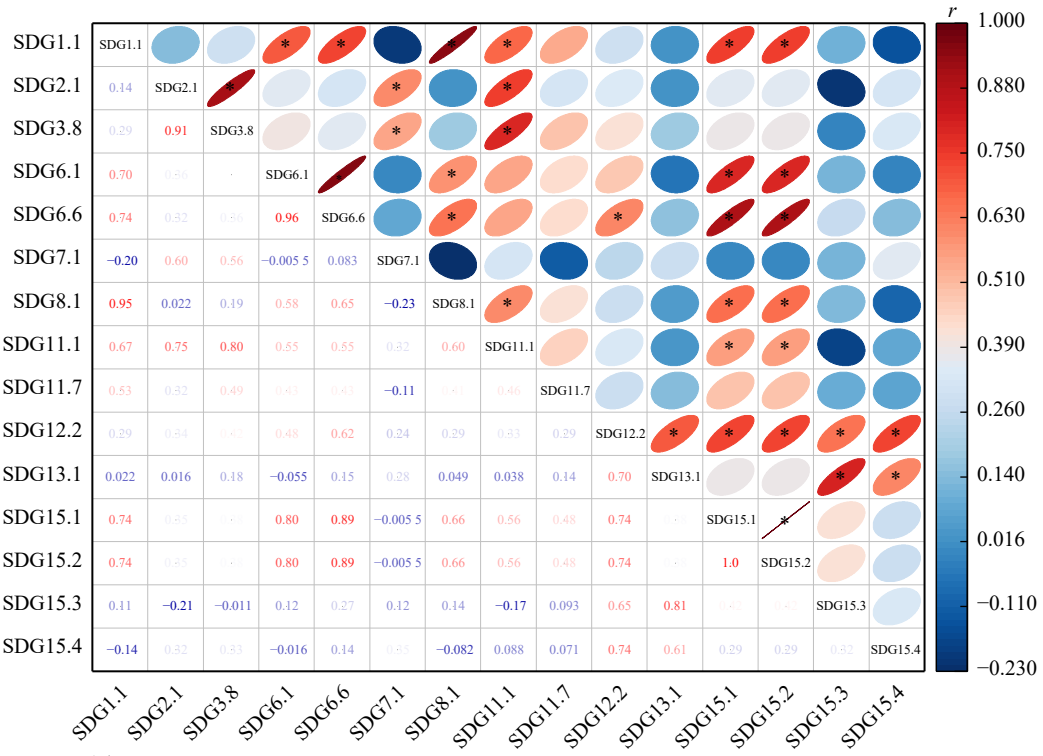
2.2　SDGs 的相互作用

在 105 个 SDGs 对中，TNSFP 地区 SDGs 以协同关系为主，占 87.62%～84.76%，权衡关系占 15.24%～12.38%（图 4、5）。1985 年共观察到 95 对协同，其中 32 对表现出显著的协同关系。SDG1.1 与 SDG8.1、SDG2.1 与 SDG3.8、SDG6.1 与 SDG6.6 这 3 对协同关系表现最强，SDG2.1、SDG3.8 和 SDG7.1 这两对协同关系表现相对较弱(图 4)。2022 年共观察到 89 对协同关系，其中，显著协同关系只有 31 对，SDG1.1 和 SDG6.1、SDG1.1 和 SDG8.1 等目标对的协同关系从显著变为不显著，但 SDG7.1 和 SDG11.7 由不显著相关转变为显著相关，SDG6.1 和 SDG6.6 协同关系稳定维持在最强水平(图 5)。

相比 1985 年，2.86% 的 SDGs 指标从协同转向权衡效应，且权衡效应增加，从−0.23 下降到−0.51。在 1985 年，SDG7.1 与 6 个指标都表现为权衡效应。在 2022 年，与 7.1 相关的权衡关系大部分转变为协同关系，SDG8.1 与 6 个指标新增为权衡关系。特殊地，SDG8.1 与 SDG15.4 从权衡转向协同。

2.3　生态系统服务与 SDGs 的关联特征

TNSFP 地区各类生态系统服务与 15 个 SDGs 的关联特征差异显著。其中，碳储量与 SDGs 的关联最为广泛，与 SDG1.1、SDG3.8、SDG8.9、SDG11.1、SDG12.2、SDG15.1、SDG15.2 呈显著正相关，与 SDG6.6、SDG13.1、SDG15.3、SDG15.4 呈显著负相关(图 6)。产水量与 SDGs 指标的正相关数量最多，



* 表示 $p < 0.05$。下同。

图 4 1985 年 SDGs 各指标斯皮尔曼相关系数(r)

Fig. 4 Spearman correlation coefficients (r) of various SDGs indicators in 1985

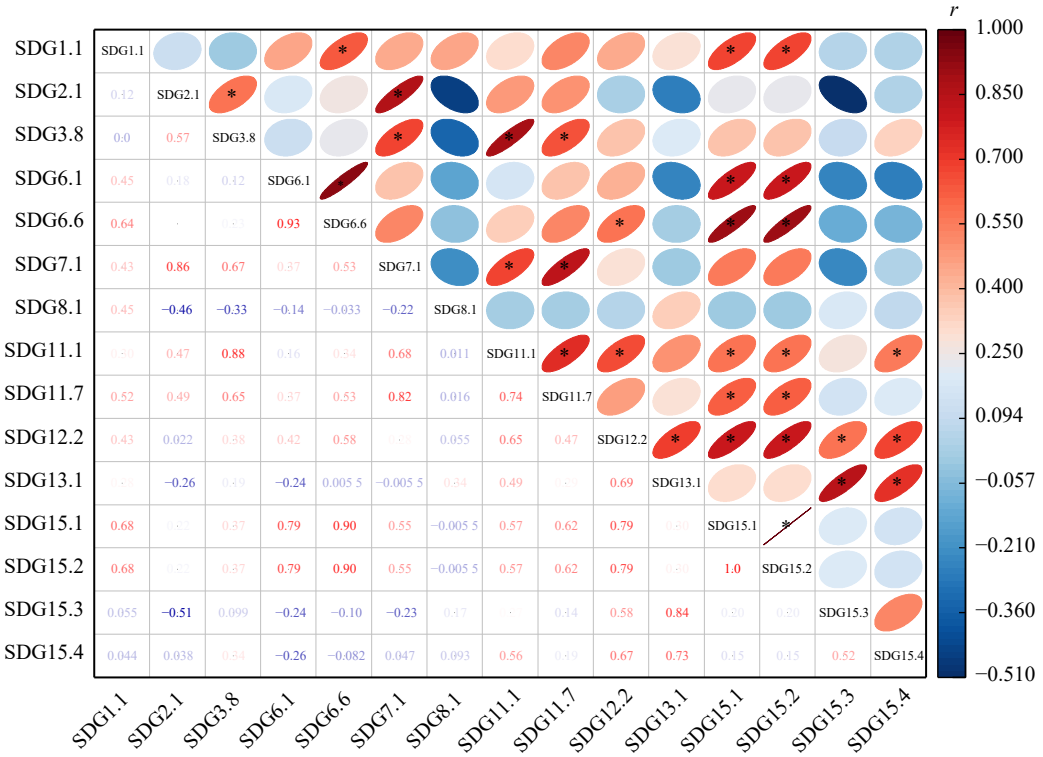
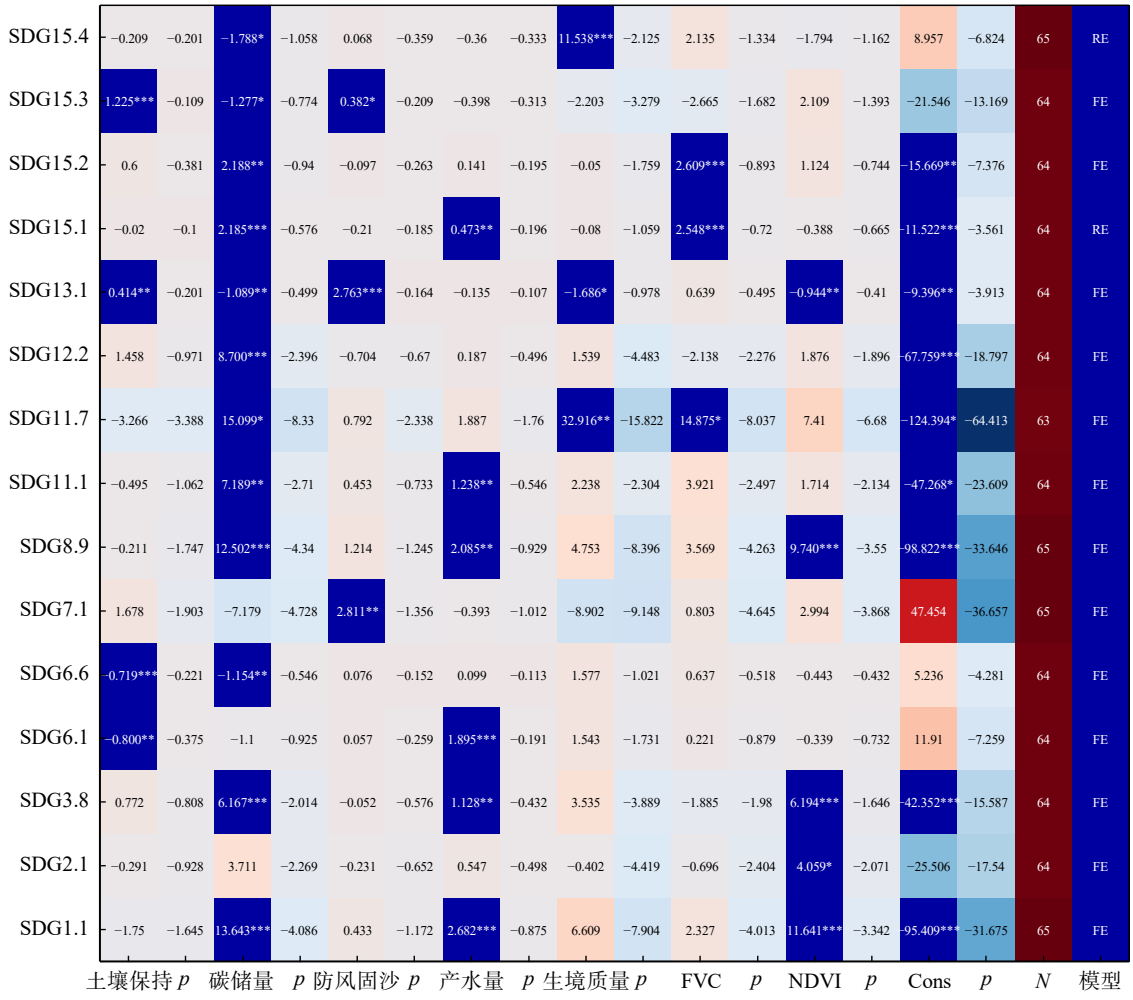


图 5 2022 年 SDGs 各指标 r 值

Fig. 5 r values of various SDGs indicators in 2022

与 SDG1.1、SDG3.8、SDG6.1、SDG8、SDG11.1、SDG15.1 等 6 个指标呈显著正相关(图 6)。防风固沙与 3 个 SDGs 指标之间表现出显著的正相关。NDVI 与 5 个 SDGs 指标显著相关，其中 NDVI 与 SDG1.1、SDG2.1、SDG3.8、SDG8.9 之间呈现显著正相关，与 SDG13.1 呈显著负相关。土壤保持与 4 个 SDGs 指标显著相关，其中，与 SDG6.1 和 SDG6.6 呈负相关，与 SDG13.1 和 SDG15.3 呈正相关，表明



N 代表样本数量，FE 表示固定效应模型，RE 表示随机效应模型。图中单元格数值为面板回归系数，各生态服务末尾列的 *p* 值为该变量回归系数对应的显著性值。* 表示 $p < 0.1$，** 表示 $p < 0.05$，*** 表示 $p < 0.01$。

图 6　面板数据分析结果

Fig. 6　Panel data analysis results

TNSFP 对土壤的保持效应能够显著推进 SDGs13.1 和 15.3 的实现。生境质量和 FVC 对 SDGs 指标的影响较低，各自影响 3 个 SDGs 指标（图 6）。综上，碳储量与 SDGs 的关联最广，产水量与 SDGs 均呈正向相关。从上述结果可以看出，不同生态系统服务与同一 SDGs 指标的关联性存在差异，这种差异源于生态系统服务供给与人类社会需求之间的复杂相互作用。以碳储量为例，其与 SDG13（气候行动）存在直接正相关，通过增强碳汇功能可以减缓气候变化。然而，碳储量增加却与 SDG6（清洁水）呈现负相关，这正揭示了生态工程实施中的关键权衡机制——碳–水权衡[21−22]。三北防护林工程通过大规模造林提升碳储量，但人工林（尤其是杨树等速生树种）蒸腾耗水量大，导致区域水分消耗增加，可能减少河流径流量和地下水补给[23−24]，这种权衡在干旱半干旱区尤为突出。土壤保持与 SDG6 正相关（减少泥沙淤积、改善水质）和负相关（地表水截留）并存，体现了生态系统服务供给与 SDGs 关系的时空异质性[25]。此外，NDVI 与 SDG13（防风固沙）的负相关关系揭示了植被覆盖度提升虽改善生态环境，但在风沙源区，过度密集的植被可能改变地表粗糙度，干扰风沙流的自然输移过程，反而降低防风固沙效率。

3　讨论与结论

3.1　讨　论

TNSFP 建设以来，多种生态系统服务提升，SDGs 指标得分整体呈波动上升趋势。TNSFP 地区的 SDGs 间协同关系占比达 84.76% ~ 87.62%，尤以同目标下的指标对（如 SDG6.1 与 SDG6.6）最为稳定，表明生态工程通过生态系统修复可同步提升多维人类福祉，实现同目标下指标的协同提升。同样地，有研究发现，生态环境的改善和生态系统服务供给能力增加对支撑 SDGs 的多维度实现具有积极贡献[17, 26]。

TNSFP 通过植树造林，封山育林等方式，改善了生态环境，带动了相关产业发展，为当地居民创造

了更多就业机会，居民收入增加，从而同时促进了经济增长与减贫目标的实现，这与联合国《2030 年可持续发展议程》所倡导的发展方向高度契合[27−28]。通过增强碳汇能力、减少土壤侵蚀、提高生境质量等，有效缓解了气候变化压力，提供了丰富的林业资源，显著推动了 SDG13、SDG15 和 SDG2 等多个 SDGs[29]。研究结果显示，各类生态系统服务与 SDGs 之间存在着广泛且复杂的关联。其中，碳储量对 12 项 SDG 指标具有显著相关，其关联的范围最广且方向各异，碳储量对 SDG13 相关的目标有直接促进作用，对 SDG1、SDG8 等诸多目标有间接影响[30]。这表明，TNSFP 的建设带来碳汇效益的同时，碳储量的增加带动了木材加工、林下经济等产业发展，从而使农村居民收入增加，促进了区域经济增长，实现了多目标协同路径[31]。产水量与多个 SDGs 指标呈现显著的正相关，这是因为水资源是干旱区农业生产的关键限制因子，产水量增加能够直接提升农业灌溉保证率，促进作物增产和畜牧业发展，进而有助于农民收入（SDG1.1）[32]、粮食安全（SDG2.1）和经济增长（SDG8.9）的协同改善，由于水资源约束是干旱半干旱区贫困的主要自然成因，产水量与 SDG1.1 的正向关联在这些地区尤为显著。

然而，土壤保持与 SDG6.1 和 SDG6.6 呈负相关，这与 Fu 等[25]研究结果一致，反映了水土保持工程的水文效应。TNSFP 工程实施的水土保持措施（如梯田、鱼鳞坑、淤地坝等）通过拦截坡面径流、增加入渗，有效减少了土壤侵蚀，但同时也截留了本应汇入河道和下游的地表水资源。在干旱半干旱区，蒸发强烈，被拦截的径流大部分通过蒸散发返回大气，未能形成有效的水资源补给，导致下游可利用水量减少。大规模的植树造林可能在区域尺度上长期导致土壤缺水危机，同时植被恢复增加的地表粗糙度延长了径流汇集时间，增加了蒸发损失，从而对区域水资源供给产生负面影响[23]。因此，在生态工程建设过程中，应统筹流域尺度水循环平衡[33]。除此之外，碳储量对 SDG6.6、SDG13.1、SDG15.3、SDG15.4 等指标也呈现负相关，可能原因是，造林固碳消耗大量水资源，导致区域水分循环改变。在干旱区，人工林蒸腾耗水可能减少区域降水量，或改变降水分配格局，从而与 SDG6.6 呈现出负相关关系[34]。TNSFP 工程早期大面积种植杨树等速生树种，虽快速增加碳储量，但纯林生态系统结构简单，抗逆性差，易发生病虫害，反而降低生态系统稳定性和防风固沙功能[24]。当林分退化时，地表裸露度增加，风蚀加剧，导致碳储量与防风固沙、土壤保持功能背离[35]。此外，大面积单一树种人工林替代天然草原或灌丛，虽增加碳储量，但降低了生境异质性，不利于本地物种生存。已有研究表明，人工纯林的生物多样性往往低于天然植被，导致碳储量增加与生境质量下降并存。碳储量在区域尺度上增加，但局部可能因造林密度过高导致土壤水分亏缺，植被生长受限，形成土壤干层，反而加剧土地退化风险[36]。这些原因共同导致碳储量与 SDG15.3 在特定区域呈现负相关。

此外，TNSFP 建设对 SDGs 的推进有时空异质性，本研究发现的“东南高、西北低”的空间格局与已有研究一致[37]。其原因可能是，生态系统服务供给与社会经济需求的匹配程度以及生态产品价值实现能力的区域差异，TNSFP 建设区东部经济基础雄厚，通过生态补偿机制平衡保护与发展，而西部地区受限于水资源，生态系统服务供给本底薄弱，且生态产品价值实现机制不健全，SDG6 与 SDG15 冲突明显。例如，河北省 SDGs 在 1985 年到 2022 年期间得分增长 25.24 分，该地区通过发展林下经济和生态旅游，将生态系统服务价值转化为经济收益[38]，证明了“生态产业化”路径的有效性；然而，青海省涨幅仅 8.08 分，说明了高海拔地区生态工程对环境效益带来的局限性，其经济发展缓慢，生态产品价值难以实现，生态建设投入难以转化为可感知的人类福祉改善，导致 SDGs 提升缓慢。另一方面，2022 年 SDG8.9 与 SDG15.1 之间的关系从协同转为权衡或目标之间的权衡效应加剧，表明经济快速发展可能挤占生态空间，需要警惕“重造林轻保护”的不可持续模式[39]。值得关注的是，SDG7.1 的权衡关系在 2022 年显著减少，这可能与 TNSFP 后期强调“生态优先、自然恢复”有关，说明政策调整可缓解目标冲突[40]。这种空间异质性提示生态工程的 SDGs 效应不仅取决于生态成效，更受制于区域发展阶段的调节作用和制度环境的支撑能力。

本研究系统评估了 TNSFP 对 SDGs 的影响，但仍存在一些局限性。首先，本研究仅选取了 11 个 SDGs 和 15 个指标，无法全面反映 TNSFP 对所有 SDGs 的影响。在未来研究中将进一步扩大指标体系，涵盖更多 SDGs 和指标。其次，本研究采用的面板数据模型可能无法完全捕捉到生态系统服务与 SDGs 之间的复杂非线性关系。需要特别说明的是，面板数据模型主要揭示生态系统服务与 SDGs 之间的统计关联，而非严格的因果关系。尽管本研究通过固定效应模型和工具变量法处理了部分内生性问题，但由于生态工程政策实施往往具有空间自相关性，相邻地区的生态建设存在策略互动，未来研究可引入空间计量模型捕捉这种空间溢出效应。此外，1985—2022 年间中国经历了从计划经济到市场经济

的转型，生态补偿政策、土地权属等制度变迁可能对生态系统服务与 SDGs 关系产生结构性影响，这种制度转型的非线性效应在本研究未能充分捕捉。因此，在未来的研究中可以尝试采用机器学习模型、系统动力学模型等，更全面深入地揭示生态系统服务与 SDGs 之间的复杂关系。

3.2 结　论

本研究以 TNSFP 作为研究对象，估算了 1985—2022 年 TNSFP 可持续发展目标的得分情况，分析了 SDGs 之间的相互作用，并揭示了七种关键生态系统服务对可持续发展目标的影响，研究结果能够为面向可持续发展目标实现的生态脆弱区生态工程建设提供科学支撑，研究结论如下。

（1）1985—2022 年 TNSFP 地区 SDGs 水平整体提升，TNSFP 工程与 SDGs 协同提升存在显著关联，对区域可持续发展具有支撑作用。得分最高的可持续发展目标为 SDG15.1（51.41 分），是全区的优势可持续发展目标，其次为 SDG1.1、SDG3.8、SDG8.1、SDG11.1、SDG11.7、SDG15.2，分值提升均在 20 分以上，是 TNSFP 地区潜力目标。空间上 SDGs 得分表现为东南高，西北低的趋势，TNSFP 东南部可持续发展水平较高。

（2）不同生态系统服务与 SDGs 的关联呈现差异化特征：碳储量与 SDGs 的关联最为广泛（与 80% 指标相关），说明碳储量可能是支撑区域可持续发展目标实现的关键生态系统服务类型，其多重关联路径反映了生态系统服务的复杂权衡与协同特征；产水量与 40% 的 SDGs 指标呈正相关；土壤保持与清洁饮水目标负相关，但与气候行动和土地保护正相关，体现了“保土”与“耗水”的结构性矛盾；防风固沙与 3 个 SDGs 指标协同，但在风沙源区需警惕过度植生的潜在风险。这种差异化关联模式提示，生态工程优化需针对不同服务类型的功能特征进行精准调控。

（3）TNSFP 地区 SDGs 之间以协同关系为主，且协同关系明显多于权衡关系。此外，SDGs 各指标之间关系随时空波动，1985—2022 年协同关系占比由 84.76% 增长至 87.62%，这表明 TNSFP 在整体上促进了 SDGS 之间的协同共进，有助于形成良性的发展态势。

参　考　文　献

[1] 联合国. 变革我们的世界: 2030 年可持续发展议程 [R]. 纽约: 联合国, 2015.
United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development [R]. New York: United Nations, 2015.

[2] Cheng Y, Liu H, Wang S, et al. Global action on SDGs: policy review and outlook in a post-pandemic era [J]. Sustainability, 2021, 13(11): 6106.

[3] 傅伯杰, 张军泽. 全球及中国可持续发展目标进展与挑战 [J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 804−812.
Fu B J, Zhang J Z. Progress and challenges of global and Chinese sustainable development goals [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 804−812.

[4] Qiu J, Yu D, Huang T. Influential paths of ecosystem services on human well-being in the context of the sustainable development goals [J]. Science of the Total Environment, 2022, 852: 158443.

[5] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究 [J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5847−5856.
Wang Y, Zhang C S, Liu C L, et al. Research on the changes of forest water conservation pattern in the Three-North Shelter Forest System construction project area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5847−5856.

[6] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907−3925.

[7] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931−1946.

[8] 彭守璋. 中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集 (1901—2024) [DS]. 国家地球系统科学数据中心, 2025. DOI: 10.12041/geodata.192891852410344.ver1.db.
Peng S Z. 1 km monthly precipitation dataset for China (1901−2024) [DS]. National Earth System Science Data Center, 2025. DOI: 10.12041/geodata.192891852410344.ver1.db.

[9] Li H, Cao Y, Xiao J, et al. A daily gap-free normalised difference vegetation index dataset from 1981 to 2023 in China [J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 527.

[10] 李小军, 车良革, 胡宝清. 基于 FLUS-InVEST 模型的北海市生态系统碳储量时空差异分析 [J]. 测绘通报, 2023,47(6): 117−123, 83.
Li X J, Che L G, Hu B Q. Analysis of spatio-temporal differences in ecosystem carbon storage in Beihai City based on FLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023,47(6): 117−123, 83.

[11] 王绍业。基于 InVEST 模型的黄河流域生态系统服务功能评估 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
Wang S Y. Evaluation of ecosystem service functions in the Yellow River Basin based on InVEST model [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.

[12] 胥丽, 国朝胜, 罗绍龙. 于 PLUS 模型和 InVEST 模型的昆明市生境质量研究 [J]. 三峡生态环境监测, 2023, 8(1): 102−112.
Xu L, Guo C S, Luo S L. Research on habitat quality in Kunming based on PLUS model and InVEST model [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2023, 8(1): 102−112.

[13] 韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 等. 河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益 [J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5185−5193.
Han Y W, Tuo X S, Gao J X, et al. Radiation benefits of windbreak and sand fixation functions in important ecological function areas of the lower reaches of the Heihe River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5185−5193.

[14] 程皓, 李霞, 侯平, 等. 里木河下游不同覆盖度灌木防风固沙功

能野外观测研究 [J]. 中国沙漠, 2007(6): 1022−1026.
Cheng H, Li X, Hou P, et al. Field observation and study on windbreak and sand fixation functions of shrubs with different coverage degrees in the lower reaches of the Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 2007(6): 1022−1026.

[15] 王洋洋, 肖玉, 谢高地, 等. 于 RWEQ 的宁夏草地防风固沙服务评估 [J]. 资源科学, 2019, 41(5): 980−991.
Wang Y Y, Xiao Y, Xie G D, et al. Evaluation of grassland windbreak and sand fixation services in Ningxia based on RWEQ [J]. Resources Science, 2019, 41(5): 980−991.

[16] 脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 等. 国北方草地生态系统服务评估 [J]. 生态学报, 2024, 44(2): 455−462.
Tuo D F, Lu Q, Que X E, et al. Evaluation of grassland ecosystem services in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 455−462.

[17] Xu Z, Peng J. Recognizing ecosystem service's contribution to SDGs: ecological foundation of sustainable development [J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(4): 511−525.

[18] IPCC. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[R/OL]. Geneva: IPCC, 2019[2024−03−24]. https://www.ipcc.ch/srccl/.

[19] Pradhan P, Costa L, Rybski D, et al. A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions [J]. Earth's Future, 2017, 5(11): 1169−1179.

[20] Stock J H, Watson M W. Introduction to econometrics[M]. 3rd ed. Boston: Pearson Education, 2015: 312−358.

[21] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration [J]. Science, 2005, 310: 1944−1947.

[22] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019−1022.

[23] 武海岩, 赵媛媛, 杜林芳, 等. 津风沙源治理工程区土地利用 / 覆盖变化对生态系统水源涵养服务的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(4): 88−97.
Wu H Y, Zhao Y Y, Du L F, et al. Impacts of land use and cover change on ecosystem water conservation service in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(4): 88−97.

[24] Cao S, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 104(4): 240−245.

[25] Fu H, Liu J, Dong X, et al. Evaluating the sustainable development goals within spatial planning for decision-making: a major function-oriented zone planning strategy in China [J]. Land, 2024, 13(3): 366.

[26] Liu Y, Lu Y, Fu B, et al. Landscape pattern and ecosystem services are critical for protected areas' contributions to sustainable development goals at regional scale [J]. Science of the Total Environment, 2023, 881: 163535.

[27] 纪平, 邵全琴, 王敏, 等. 国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价 [J]. 林业科学, 2022, 58(11): 31−48.
Ji P, Shao Q Q, Wang M, et al. Comprehensive evaluation of ecological benefits of the second phase of the Three-North Shelter Forest Program in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(11): 31−48.

[28] Zhai J, Wang L, Liu Y, et al. Assessing the effects of China's Three-North Shelter Forest Program over 40 years [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857(Pt 1): 159354.

[29] Liang C, Wei X, Meng J, et al. How to improve forest carbon sequestration output performance: an evidence from state-owned forest farms in China [J]. Forests, 2022, 13(5): 714.

[30] Yin C, Zhao W, Ye J, et al. Ecosystem carbon sequestration service supports the sustainable development goals progress [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 330: 117155.

[31] Zhang D, Zuo X, Zang C. Assessment of future potential carbon sequestration and water consumption in the construction area of the Three-North Shelterbelt Programme in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 303: 108391.

[32] Wood S L, Jones S K, Johnson J A, et al. Distilling the role of ecosystem services in the sustainable development goals [J]. Ecosystem Services, 2018, 29: 70−82.

[33] Cai M, An C, Guy C, et al. Assessment of soil and water conservation practices in the loess hilly region using a coupled rainfall-runoff-erosion model [J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1123.

[34] Zhang X, Yuan R, Wang Y, et al. Irrigation-induced potential evapotranspiration decrease in the Heihe River Basin, Northwest China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(8): e2019JD031058.

[35] Li J, Fu B, Feng X, et al. Ecological restoration enhances dryland carbon stock by reducing surface soil carbon loss due to wind erosion [J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1): 572.

[36] Jia X, Shao M. A meta-analysis of soil moisture dynamics under different land uses in China's Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2014, 534: 713−722.

[37] Dai E, Zhao Z, Jia L, et al. Contribution of ecosystem services improvement on achieving sustainable development goals under ecological engineering projects on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Ecological Engineering, 2024, 199: 107590.

[38] Li Y, Fan J, Yu H. Grazing exclusion, a choice between biomass growth and species diversity maintenance in Beijing-Tianjin Sand Source Control Project [J]. Sustainability, 2019, 11(7): 1974.

[39] 翟俊, 金点点, 陈妍, 等. 河三角洲高效生态经济区生态变化、问题与对策 [J]. 资源科学, 2020, 42(3): 517−526.
Zhai J, Jin D D, Chen Y, et al. Ecological changes, problems and countermeasures in the Yellow River Delta High-Efficiency Ecological Economic Zone [J]. Resources Science, 2020, 42(3): 517−526.

[40] Ren M, Chen W, Wang H. Ecological policies dominated the ecological restoration over the core regions of Kubuqi Desert in recent decades [J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5150.

（责任编辑 李 契
责任编委 赵秀海）