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

黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估

王金凤 徐洁 徐基良 安丽丹

Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin

Wang Jinfeng, Xu Jie, Xu Jiliang, An Lidan

引用本文:
王金凤, 徐洁, 徐基良, 安丽丹. 黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):90–100. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230047
Wang Jinfeng, Xu Jie, Xu Jiliang, An Lidan. Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):90–100. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230047

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230047

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

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

贵州赤水桫椤国家级自然保护区植物群落特征
Characteristics of plant community in the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve, southwestern China
北京林业大学学报, 2019, 41(1): 19–31. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180165

基于MaxEnt模型的赛罕乌拉国家级自然保护区斑羚生境适宜性评价
Habitat suitability assessment based on MaxEnt modeling of Chinese goral in Saihanwula National Nature Reserve, Inner Mongolia of northern China
北京林业大学学报, 2019, 41(1): 102–108. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180176

广东南岭国家级自然保护区华南五针松种内和种间关系研究
Interspecific and intraspecific competitions of *Pinus kwangtungensis* in Nanling National Nature Reserve, Guangdong Province of southern China
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 25–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20180436

基于ROI–CNN的赛罕乌拉国家级自然保护区陆生野生动物自动识别
Automatic identification method for terrestrial wildlife in Saihanwula National Nature Reserve in Inner Mongolia of northern China based on ROI–CNN
北京林业大学学报, 2018, 40(8): 123–131. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180141

南滚河国家级自然保护区典型植被类型土壤有机碳及全氮储量的空间分布特征
Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen stocks across the different typical vegetation types in Nangunhe National Nature Reserve, southwestern China
北京林业大学学报, 2019, 41(11): 104–115. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180319

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230047

黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估

王金凤[1] 徐 洁[1] 徐基良[1] 安丽丹[2]
（1. 北京林业大学生态与自然保护学院，北京 100083；2. 国家林业和草原局国家公园（自然保护地）发展中心，北京 100714）

摘要:【目的】研究黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能的时空变化特征，为制定有效的生态保护策略提供科学依据。**【方法】**以黄河流域国家级自然保护区为研究对象，采用 InVEST 模型，分析并评估其水源供给、土壤保持、碳储存和生境质量 4 项生态系统服务功能。**【结果】**(1)2000—2020 年，黄河流域国家级自然保护区的水源供给量和平均生境质量指数呈现出先减少后增加的变化，土壤保持量表现为逐期下降，碳密度随着时间的推移先增加后减少。降水和土地覆被变化是影响生态系统服务功能变化的主要因素。(2)受黄河流域地区城市化快速发展的影响，国家级自然保护区的综合生态系统服务功能随时间推移逐渐减弱，在空间上表现为从黄河流域上游向下游逐渐增强。**【结论】**面对黄河流域的复杂生态环境风险问题，建议强化全流域的水资源管理，合理开发利用土地资源以提高土地利用效益。注重植被保护和自然恢复，完善全流域的生态补偿机制，并采取因地制宜的保护措施。通过这些措施，以促进区域生态环境和经济社会协调可持续发展。

关键词：生态系统服务功能；国家级自然保护区；黄河流域；InVEST 模型
中图分类号：S759.93 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)07−0090−11
引文格式：王金凤，徐洁，徐基良，等. 黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估［J］. 北京林业大学学报，2024，46(7)：90−100. Wang Jinfeng, Xu Jie, Xu Jiliang, et al. Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 90−100.

Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin

Wang Jinfeng[1] Xu Jie[1] Xu Jiliang[1] An Lidan[2]
(1. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. National Park Development Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper studies the spatiotemporal variation characteristics of ecosystem service functions in national nature reserves in the Yellow River Basin so as to provide scientific basis for formulating effective ecological protection strategies. ［**Method**］This study took the national nature reserves in the Yellow River Basin as the research object and evaluated its four ecosystem service functions of water supply, soil conservation, carbon storage, and habitat quality through InVEST model analysis, and proposed targeted conservation recommendations on this basis. ［**Result**］(1) From 2000 to 2020, the water supply and average habitat quality index of national nature reserves in the Yellow River Basin showed a change of first decreasing and then increasing, while the change of soil conservation showed a period-by-period decrease, and the carbon density showed a change of first increasing and then decreasing over time. Precipitation and land cover change were the main factors affecting the change of ecosystem service function. (2) Influenced by the rapid development of urbanization in the Yellow River Basin, the comprehensive ecosystem service function of national nature reserves showed a gradual decrease over time, and the spatial distribution characteristics showed a gradual increase from the upstream to the downstream of the Yellow River Basin.

收稿日期: 2023−03−06 **修回日期:** 2024−04−30
基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目（2022xjkk1200）。
第一作者: 王金凤。主要研究方向：生态系统服务功能、自然保护地管理。Email: wangjinfeng1103@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护学院。
责任作者: 安丽丹，工程师。主要研究方向：国家公园管理。Email: 360657201@qq.com 地址：100714 北京市东城区和平里东街 18 号。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

［**Conclusion**］Based on the complex ecological and environmental risk problems in the Yellow River Basin, it is recommended to strengthen the basin-wide coordination mechanism of water resources, pay attention to the rational development and utilization of land resources, improve the efficiency of land use, focus on vegetation protection and natural restoration, improve the basin-wide ecological compensation mechanism, and adopt locally appropriate protection measures. These measures aim to promote the coordinated and sustainable development of regional ecological environment and economy and society.

Key words: ecosystem service function; national nature reserve; the Yellow River Basin; InVEST model

生态系统服务是自然与社会的桥梁，连接了整个生态系统的基本结构、运转过程、生态功能以及人类福祉。它能够反映出生态系统运转的健康状态，为生态系统的科学管理、可持续发展和生态保护提供重要参考[1−2]。自 Holdren 等[3]于 1974 年首次深入探讨了生态系统服务功能与人类活动的关系以来，社会对这一领域的关注逐渐上升。生态系统服务功能评估技术的不断发展，开展了许多不同方向和尺度的研究，包括生态系统服务功能的价值[4]、评估方法[5]、指标和有效性[6]，以及自然地理单元[7]、地区[8]和国家层面[9]的研究。评估结果也越来越多地被纳入到决策制定过程。

自然保护区是具有特殊生态功效和经济价值的结构复杂生态系统[10]。自然保护区的主要任务是就地保护生物多样性，并提高生态系统和物种的保护水平[11−13]。充分发挥自然保护区的示范作用，合理利用自然保护区的自然资源，可以促进人类社会的可持续发展。黄河流域不仅是我国经济发展的重点区域，也是生态安全与社会经济可持续发展的关键区域[14]。作为生态安全屏障的重要组成部分，黄河流域国家级自然保护区的生态健康状况关系到全流域的生态安全和社会经济的高质量发展[15]。然而，目前对该区域的研究多聚焦于流域[16]、地区[17]或单个自然保护区尺度[18−19]的生态系统服务功能评估，仍然缺乏对区域自然保护区网络生态系统服务功能整体性的深入理解。

通过对黄河流域国家级自然保护区水源供给、土壤保持、碳储存及生境质量等生态系统服务功能的定量研究，并分析这些服务功能的时空变化，有助于深入了解该区域的生态系统服务功能现状，揭示生态保护工作的重点和难点。这将为黄河流域的生态协同保护工作提供顶层设计思路，并为黄河流域的生态保护与高质量发展奠定基础。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

黄河流域地理坐标为 95°53′～119°05′E，32°10′～42°50′N，流域面积约为 79.5 万 km^2（包括内流区 4.2 万 km^2）。黄河起源于青藏高原地区的巴颜喀拉山北麓，跨越了青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元，最后于山东省垦利县注入渤海，全长 5 464 km，高程落差为 4 480 m。黄河流域总体上表现为西部干旱，东部湿润，具体包含干旱、半干旱、半湿润等气候类型。截至 2018 年底，黄河流域共建立国家级自然保护区 60 处，总面积 22.3 万 km^2，占黄河流域自然保护区总数的 34%（图 1）。

1.2　数据来源及处理

黄河流域国家级自然保护区的数据资料主要来源于中华人民共和国生态环境部（https://www.mee.gov.cn/）公布的 2017 年全国自然保护区名录。课题组参考新建国家级自然保护区的信息，并利用 ArcGIS 10.4 进行矢量化处理，以获取黄河流域国家级自然保护区的矢量边界。对于部分区域位于黄河流域范围内的自然保护区，为保证国家级自然保护区生态系统服务功能核算的完整性，将整个自然保护区纳入研究区范围。同时，鉴于自 1998 年起我国启动自然保护工程，尤其是野生动植物保护与自然保护区建设工程的推进，一些在 2000 年和 2010 年尚未被列为国家级的自然保护区已经实施严格管理。因此，在统计分析时，这些保护区也被视为国家级自然保护区进行统一分析。

本研究使用的土地覆被类型数据来源于国家基础地理信息中心（http://www.globeland30.org/），选择黄河流域国家级自然保护区 2000、2010 和 2020 年 3 期的土地覆被栅格图像，综合考虑黄河流域土地资源开发利用的基本现状，并依据我国《土地利用现状分类》（GB/T21010—2017）中的一类划分标准，对黄河流域国家级自然保护区内的土地覆被类型做重分类处理（表 1）。InVEST 模型需要大量基础数据和模型参数作为输入变量，因此研究采用多源数据集，包括气象数据集、土壤数据集和相关重要参数。针对 4 个子模块的特点，总体数据需求及来源见表 2。

1.3　研究方法

1.3.1　水源供给

产水模块的基本原理是水量平衡原理，以年降

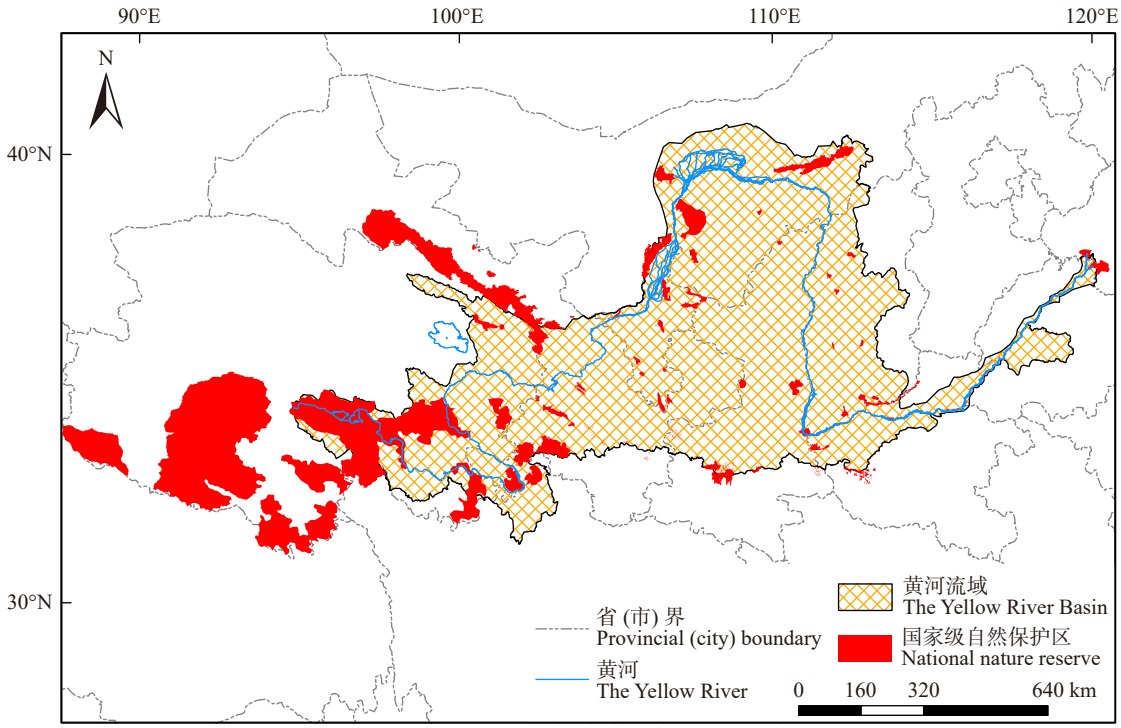


图 1 黄河流域国家级自然保护区分布(2018 年)

Fig. 1 Distribution of national nature reserves in the Yellow River Basin (2018)

表 1 黄河流域国家级自然保护区土地覆被重分类明细表

Tab. 1 Detailed list of land cover reclassification in the national nature reserves of the Yellow River Basin

地类代码 Land type No.	地类 Land type	原代码 Source code	原地类 Source type
1	耕地 Cultivated land	10	耕地 Cultivated land
2	林地 Forest land	20、40	林地、灌木地 Forest land, shrub land
3	草地 Grassland	30	草地 Grassland
4	水域 Waters	50、60	湿地、水体 Wetland, waters
5	建设用地 Built-up land	80	人造地表 Artificial surface
6	未利用地 Unused land	90、100	裸地、冰川和永久积雪 Bare land, glaciers and permanent snow
7	海域 Sea area	255	海域 Sea area

水量和 Budyko 曲线[25]为基础来测算该研究区的水源供给量。

$$Y_{xj}=\left(1-\frac{E_{xj}}{P_x}\right)P_x \tag{1}$$

式中：Y_{xj}为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量(mm)；E_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年实际蒸散量(mm)；P_x为栅格单元 x 的年降水量(mm)。

1.3.2 土壤保持

土壤保持模块使用通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation，RUSLE)分别计算潜在土壤侵蚀量(A_p)和实际土壤侵蚀量(A_r)，二者之差即为土壤保持量(A_c)。

$$A_r=RKL_SCP \tag{2}$$

$$A_p=RKL_S \tag{3}$$

$$A_c=A_p-A_r=RKL_S(1-CP) \tag{4}$$

式中：R 为降雨侵蚀力因子(MJ·mm/(hm^2·h·a))；K 为土壤可蚀性因子(t·hm^2·h/(hm^2·MJ·mm))；L_S 为坡长坡度因子；C 为覆盖与管理因子；P 为土壤保持措施因子。

1.3.3 碳储量

碳储量模块的基本原理是，总碳储量为不同地类的各项碳储量之和。

$$C=C_1+C_2+C_3+C_4 \tag{5}$$

式中：C 为总碳储量(t/hm^2)；C_1是以地上部分植被为单元的碳储量(t/hm^2)；C_2是以植被地下部分为单元的碳储量(t/hm^2)；C_3为植物枯落物的碳储量(t/hm^2)；C_4为土壤碳储量(t/hm^2)。

1.3.4 生境质量

生境质量模块综合考虑研究区内景观类型的敏感性程度以及外界威胁强度，通过相关公式得出生

表 2　InVEST 模型数据需求及来源

Tab. 2　InVEST model data requirements and sources

模块 Module	数据类型 Data type	数据来源 Data source
基础数据 Basic data	DEM数据 DEM (digital elevation model) data	国家地球系统科学数据中心 National Earth System Science Data Center（http://www.geodata.cn/）
	土地覆被数据 Land-cover data	国家基础地理信息中心 National Basic Geomatics Center of China（http://www.globeland30.org/）
	土壤数据（土壤沙粒、粉粒、黏粒、有机碳含量、土壤最大根系深度，等）Soil data (soil sand, silt, clay, organic carbon content, max. soil root depth, etc.)	世界土壤数据库（HWSD）中的中国土壤数据集（v1.1） Chinese soil dataset based on the World Soil Database (HWSD) (v1.1)（http://westdc.westgis.ac.cn/data/）
水源供给 Water supply	年降水量 Annual precipitation	国家气象科学数据中心的地面逐日观测资料 Ground-based day-by-day observations from the National Weather Science Data Center（http://data.cma.cn）
	年均潜在蒸散发 Annual mean potential evapotranspiration	Penman-Monteith公式 The Penman-Monteith formula
	植物可利用含水率 Plant available water content	SPAW模型 SPAW (soil-plant-air-water) model
	季节性因子 Seasonal factor (Z)	Z = 3.6; 文献[20] Reference [20]
	生物物理系数表 Biophysical coefficient table	文献[21] Reference [21]
土壤保持 Soil conservation	降雨侵蚀力因子 Rainfall erosivity factor (R)	降水插值 Precipitation interpolation
	土壤可蚀性因子 Soil erodibility factor (K)	EPIC模型 EPIC（environmental policy integrated climate）model
	生物物理系数表 Biophysical coefficient table	文献[21−22] Reference [21−22]
碳储存 Carbon storage	碳库（地上、地下、土壤以及死亡有机物碳密度） Carbon pool (carbon densities of aboveground, belowground, soil and dead organic matter)	国家生态科学数据中心（www.nesdc.org.cn）; 文献[21,23] National Ecosystem Science Data Center（www.nesdc.org.cn）; reference [21,23]
生境质量 Habitat quality	威胁源数据（耕地、农村居民点、建设用地、及未利用地） Threat source data (cultivated land, rural settlements, built-up land, and unused land)	地理监测云平台 Geographical Information Monitoring Cloud Platform（http://www.dsac.cn/）
	生境敏感性数据 Habitat-sensitivity data	文献[21,24] Reference [21,24]
	威胁因子数据 Threat-factor data	文献[21,24] Reference [21,24]

境质量指数。

$$Q_{xj} = H_j\left[1-\left(\frac{D^a{}_{xj}}{D^a{}_{xj}+k^2}\right)\right] \quad (6)$$

式中：Q_{xj}为表示土地覆被类型 j 中的栅格 x 的生境质量指数；H_j为表示土地覆被类型 j 的生境适宜性，D_{xj}表示土地覆被类型 j 中的栅格 x 所受到的总胁迫水平；k为半饱和系数，默认值为 0.05；a为归一化常量，通常取 2.5[7]。

2　结果与分析

2.1　生态系统服务功能年际变化

在 2000 年、2010 年和 2020 年，黄河流域国家级自然保护区的水源供给量总体呈现先减少后增加的变化（图 2）。3 期的水源供给量分别为 11.30×10^{11}、7.68×10^{11} 和 9.08×10^{11} m^3，单位面积的水源供给量分别为 5.03×10^6、3.43×10^6 和 4.05×10^6 m^3/km^2。总体上，2000—2020 年间，水源供给量共减少了 2.22×10^{11} m^3，单位面积水源供给量共减少了 0.98×10^6 m^3/km^2，多年平均水源供给量为 9.35×10^{11} m^3。

同期，土壤保持量分别为 16.46×10^{10}、6.22×10^{10} 和 4.50×10^{10} t，单位面积土壤保持量分别为 7.34×10^5、2.77×10^5 和 2.01×10^5 t/km^2（图 2）。整体上，土壤保持量和单位面积土壤保持量在减少。2000—2020 年间，土壤保持量共减少了 11.96×10^{10} t，单位面积土壤保持量共减少了 5.33×10^5 t/km^2。相比于 2000—2010 年土壤保持量的急速下降，2010—2020 年的土壤保持量的降低速度较平缓。

同期，碳储量分别为 3.06×10^{12}、3.21×10^{12}、2.85×10^{12} t，表现为先增加后减少的变化（图 2）。2000—2010 年的碳储量增加了 0.15×10^{12} t，2000—2020 年共减少了 0.21×10^{12} t。单位面积碳储量分别为 1.37×10^7、1.43×10^7 和 1.27×10^7 t/km^2，总体减少了 0.10×10^7 t/km^2，与碳储量总值的变化一致。

同期，生境质量指数分别为 0.86、0.85 和 0.91，平均生境质量指数为 0.87（图 2）。为便于比较说明，

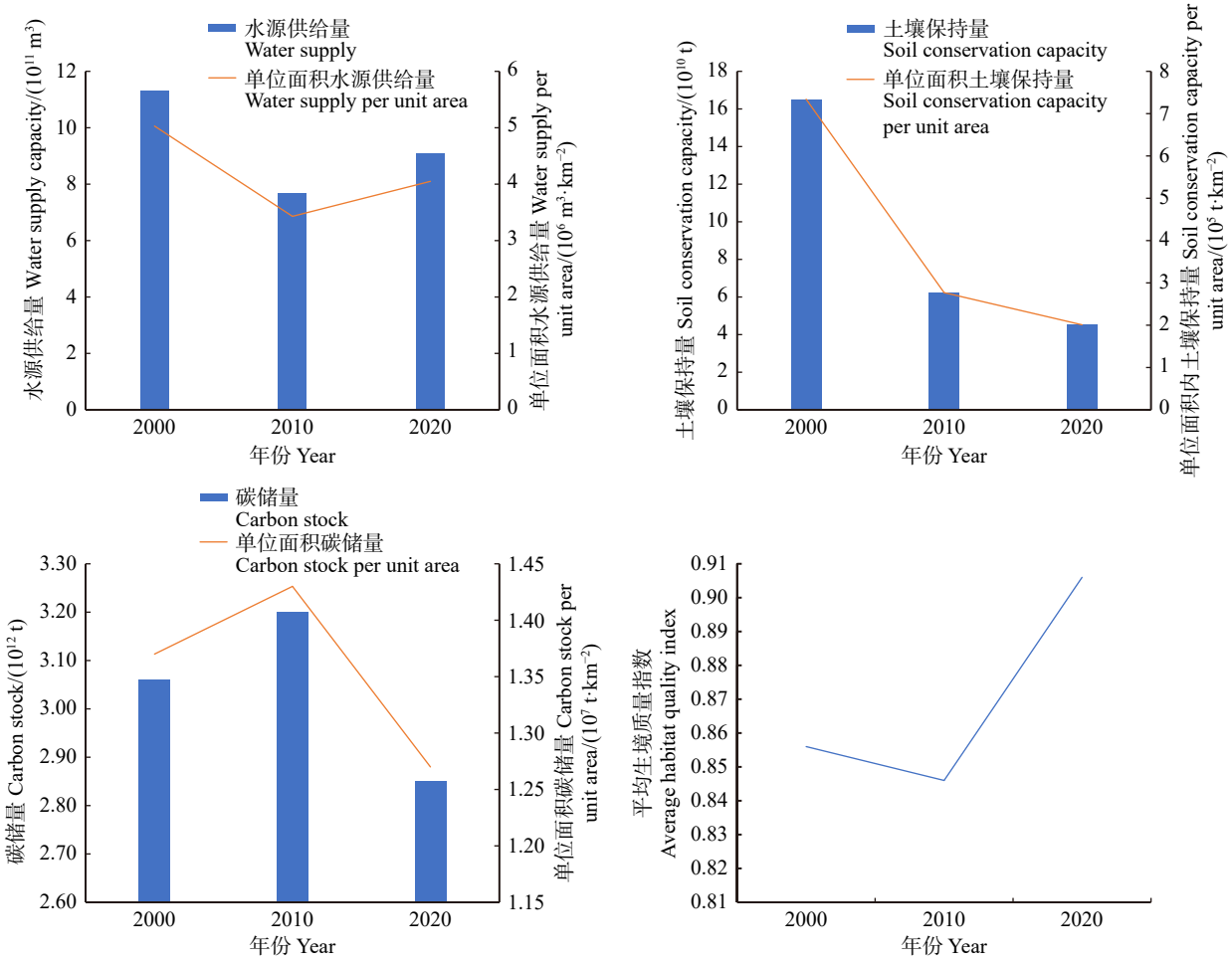


图 2 黄河流域国家级自然保护区 4 项生态系统服务功能量年际变化

Fig. 2 Interannual variation of four ecosystem service functions in national nature reserves of the Yellow River Basin

将 3 期平均生境质量指数划分为 0 ~ 0.2，0.2 ~ 0.4，0.4 ~ 0.6，0.6 ~ 0.8，0.8 ~ 1.0 共计 5 个区间，并据此将生境质量划分为低、较低、中、较高和高共 5 个级别。结果表明，黄河流域国家级自然保护区的整体生境质量水平较高，并在 2000—2020 年间整体有所提升。因此，该区域的生态环境状况总体较好。

2.2 生态系统服务功能空间变化

在 2000 年、2010 年和 2020 年，黄河流域国家级自然保护区的水源供给量在空间上呈现从上游向下游逐渐增加的态势（图 3）。水源产水量的高值主要集中在黄河流域下游的自然保护区内，包括青海三江源国家级自然保护区的东南部、甘肃尕海–则岔国家级自然保护区、四川若尔盖国家级自然保护区等地；中等值大多分布在黄河流域的中游区域，如青海三江源国家级自然保护区的中部区域、甘肃太子山国家级自然保护区等地；低值则分布在黄河流域的上游区域，主要为青海三江源国家级自然保护区的东北部区域、甘肃祁连山国家级自然保护区等地。研究期内，黄河流域国家级自然保护区的土壤保持量的空间分布由低到高呈现出离散的“点状”分布。土壤保持量的高值集中在黄河流域中游地区，如甘肃祁连山国家级自然保护区的南部、青海三江源国家级自然保护区的东部、宁夏六盘山国家级自然保护区、陕西老县城国家级自然保护区。

从空间来看，碳储量高值整体呈现“片状”分布，碳储量中间值和低值则呈现“点状”分布。在研究期内的碳储量空间变化幅度相对较小，其中碳储量较高的地区主要分布于黄河流域上游和中部区域，而下游的碳储量则相对较低（图 3）。在 2000 年、2010 年和 2020 年，生境质量指数空间分布高值较为集中，呈“片状”分布，各保护区均有大面积分布；生境质量指数的中值同样也呈现“片状”分布，主要集中在青海三江源国家级自然保护区、甘肃祁连山国家级自然保护区等地；而生境质量低值则为“点状”分布，在各保护区中分布较为均匀（图 3）。3 期生境质量总体空间格局变化较小，即 2000—2020 年间，该区域的生物多样性维护功能整体维持较好。

2.3 综合生态系统服务功能分区

通过在 ArcGIS10.4 中，叠加 4 项生态系统服务功能得到 2000 年、2010 年和 2020 年黄河流域国家

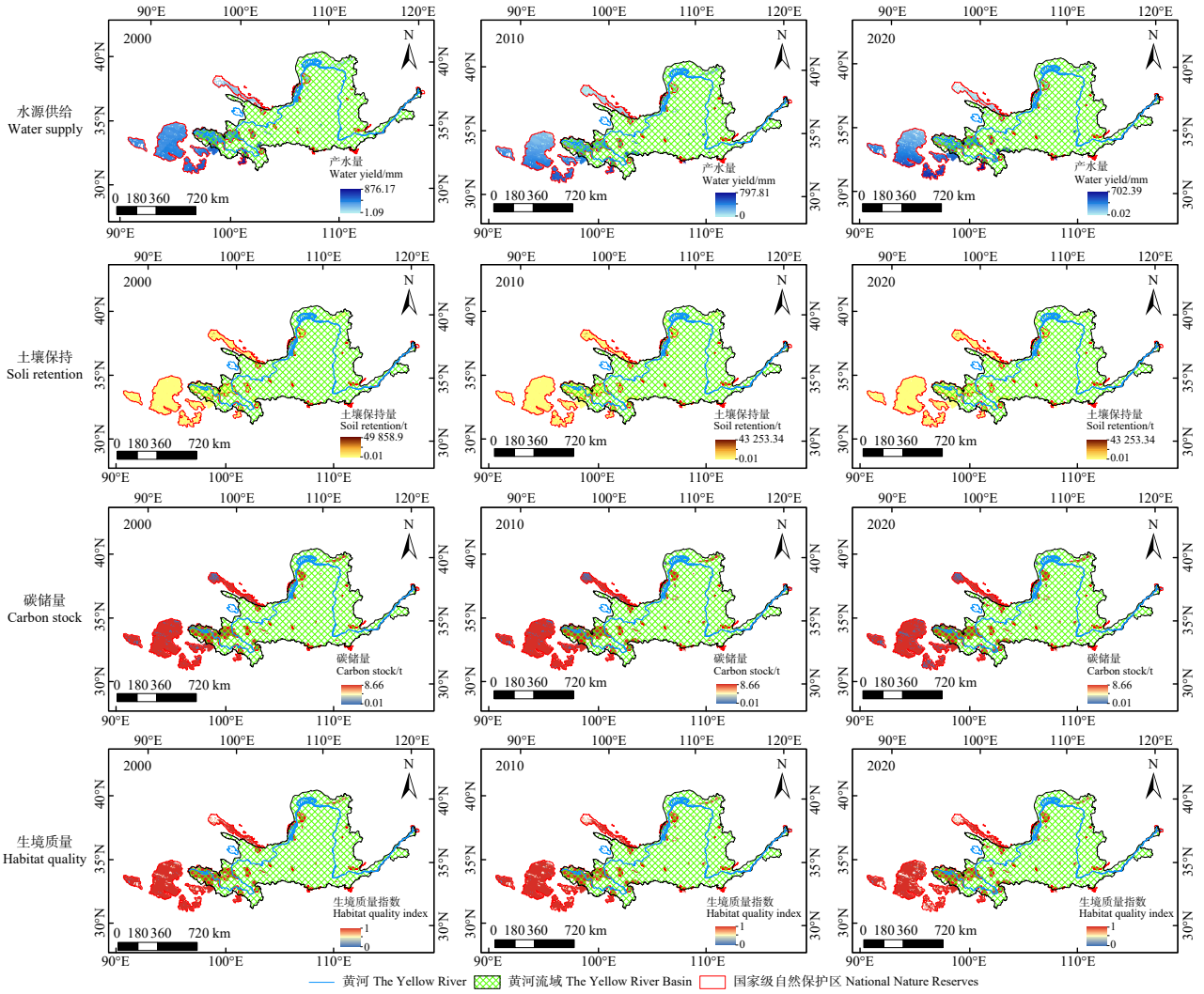


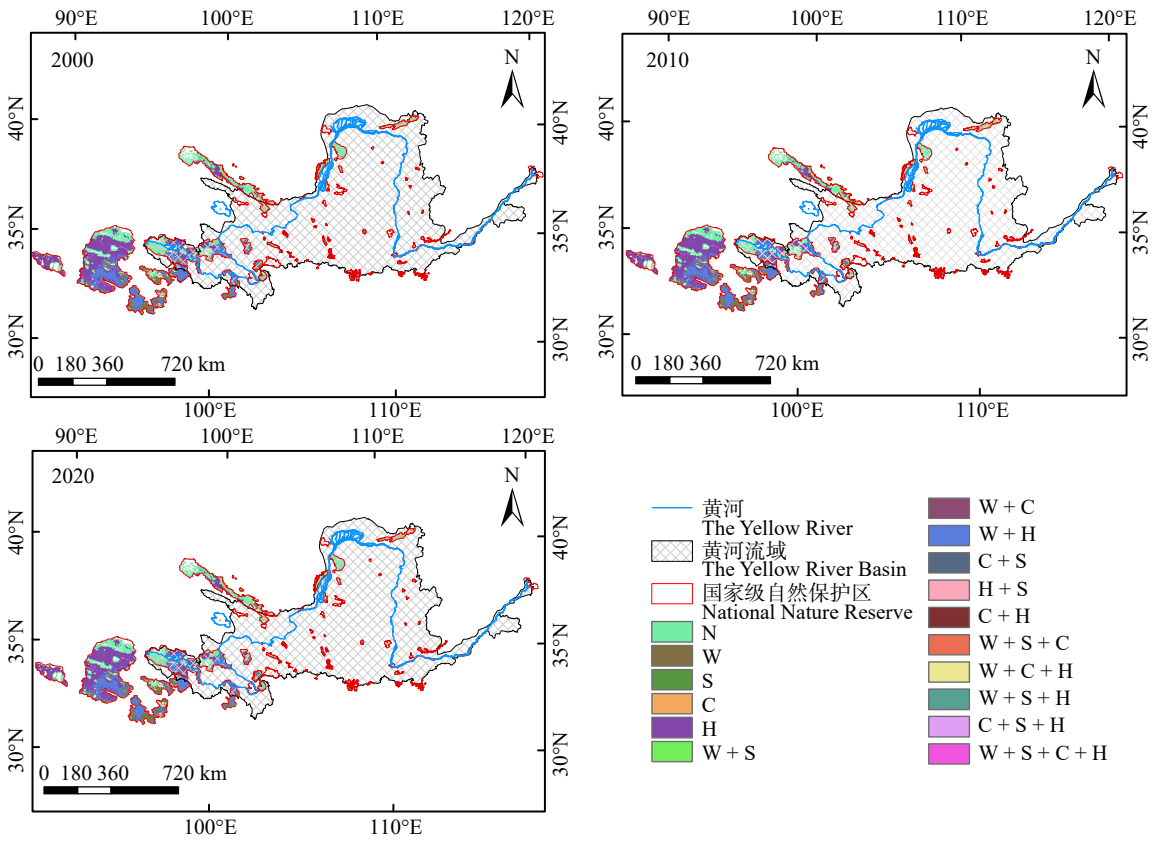
图 3　黄河流域国家级自然保护区 4 项生态系统服务功能空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of four ecosystem service functions in the Yellow River Basin National Nature Reserves

级自然保护区的综合生态系统服务功能区(图 4)。

黄河流域国家级自然保护区的综合生态系统服务功能总体的空间变化特征为由西北向东南重要等级逐渐增强。黄河流域西北部的国家自然保护区内以生境质量和碳储量为主要的生态系统服务功能，也存在大片生态服务功能一般区，如甘肃祁连山国家级自然保护区的西北部、青海三江源国家级自然保护区的北部地区、内蒙古鄂尔多斯国家级自然保护区以及宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区等地；中部地区有许多生态系统服务功能比较丰富的自然保护区，如四川长沙贡玛国家级自然保护区、宁夏六盘山国家级自然保护区、陕西太白山国家级自然保护区等地；南部则主要以水源供给、土壤保持和生境质量为主(如河南伏牛山国家级自然保护区)。

经 ArcGIS 10.4 的统计与分析，结果表明黄河流域国家级自然保护区内水源供给、土壤保持、碳储量和生境质量等功能区的面积分布及占比在不同年份间存在一定的变化(表 3)。首先，水源供给功能区和土壤保持功能区的面积表现为先减少后增加，碳储量功能区的面积则持续增加，生境质量功能区的面积先增加后减少。其次，水源供给 + 碳储量功能区(W + C)的面积逐步上升，2020 年相较于 2000 年增加了 2 345.64 km^2；水源供给 + 土壤保持功能区(W + S)、土壤保持 + 碳储量功能区(S + C)的 3 期面积也表现为先减少后增加的特点，至 2020 年分别增加了 578.94 km^2 和 57.50 km^2。然后，水源供给 + 土壤保持 + 碳储量功能区(W + S + C)的面积则逐期减少，2020 年相较于 2000 年减少了 255.34 km^2。而水源供给 + 土壤保持 + 生境质量功能区(W + S + H)的面积先增加后减少，2020 年相较于 2000 年共减少了 608.89 km^2。综合来看，虽然土壤保持 + 碳储量 + 生境质量功能区(S + C + H)的面积整体有所增加，但变化幅度较小。水源供给 + 土壤保持 + 碳储量 + 生境质量功能区(W + S + C + H)的面积则呈现逐期减少的趋势，从 2000—2020 年，这一类型的生态系统服务功能区面积共减少了 126.20 km^2。



N.无功能区分布；W.水源供给；S.土壤保持；C.碳储量；H.生境质量。下同。N, distribution of non-functional area; W, water supply; S, soil conservation; C, carbon storage; H, habitat quality. The same below.

图 4 2000 年、2010 年和 2020 年黄河流域国家级自然保护区综合生态系统服务功能区分布

Fig. 4 Distribution of integrated ecosystem service functional areas in the Yellow River Basin national nature reserves in 2000, 2010 and 2020

表 3 黄河流域国家级自然保护区综合生态系统服务功能区面积及占比

Tab. 3 Area and proportion of ecosystem service functional areas in the Yellow River Basin national nature reserves

生态系统服务功能区 Ecosystem service functional area	2000		2010		2020		面积变化 Change in area/km²
	面积 Area/km²	占比 Proportion	面积 Area/km²	占比 Proportion	面积 Area/km²	占比 Proportion	
N	84 284.06	0.38	91 774.41	0.41	107 175.93	0.48	22 891.87
W	24 558.51	0.11	23 321.12	0.10	29 887.56	0.13	5 329.05
S	880.26	0.00	289.00	0.00	736.46	0.00	−143.80
C	5 584.75	0.02	7 030.66	0.03	9 093.68	0.04	3 508.93
H	60 134.85	0.27	65 406.57	0.29	51 116.72	0.23	−9 018.13
W + S	857.82	0.00	226.63	0.00	1 436.76	0.01	578.94
W + C	4 940.12	0.02	5 609.12	0.03	7 285.76	0.03	2 345.64
W + H	38 411.47	0.17	26 830.21	0.12	15 000.97	0.07	−23 410.50
S + C	48.85	0.00	42.82	0.00	106.35	0.00	57.50
S + H	99.48	0.00	113.92	0.00	80.48	0.00	−18.99
C + H	974.60	0.00	1 094.94	0.00	827.46	0.00	−147.14
W + S + C	699.84	0.00	628.87	0.00	444.50	0.00	−255.34
W + S + H	795.73	0.00	1 546.82	0.01	186.84	0.00	−608.89
W + C + H	1 720.80	0.01	127.67	0.00	734.24	0.00	−986.57
S + C + H	4.02	0.00	0.31	0.00	7.65	0.00	3.63
W + S + C + H	192.95	0.00	145.04	0.00	66.75	0.00	−126.20

3　结论与讨论

系统、全面定量分析和评估区域生态系统服务功能及其空间格局，是进行区域生态系统管理、生态环境保护和可持续发展工作的首要前提[26]。黄河流域既是我国重要的生态屏障，同时也是重要的经济地带，国家级自然保护区更是流域生态屏障的重要基础[27]。对其开展生态系统服务功能定量评估研究，有利于该区域重点生态功能区针对性保护措施的制定和生态补偿机制的建立。近年来，黄河流域城市化进程的加快导致人类活动对生态环境的胁迫愈加显著，使得该地区水源供给、土壤保持、碳储存以及生境质量等生态系统服务功能正在发生显著变化[19,28−29]。

大量研究证明[30−32]，气候变化、人类活动以及政策措施等是生态系统服务功能变化的主要驱动因素。黄河流域国家级自然保护区地理环境条件十分复杂，具有集水区大、生态环境脆弱、水资源匮乏等特点，其水资源主要来源于该地区的降水[33]。研究表明气候和地理因子是影响水源供给量时空分异性的主要因素[34]。在气候变化的影响下，黄河流域的降水减少、气温上升、蒸散和下渗增加[35−37]，使得该区域主要的土地覆被类型——草地（图 5），呈现斑块化、破碎化的退化特征，从而降低了水源涵养能力，导致地下水位降低，减少了该区域的水源供给量[34]。黄河流域国家级自然保护区内部的降水分布存在“由北向南增多”的趋势[38]，加之全流域存在“蒸散悖论”现象[37]，造成黄河流域国家级自然保护区水源供给量空间分布具有明显的空间差异性，具体表现为水源供给量呈现“南高北低”的分布。

土壤保持量空间分布不均的特征是地形地貌、土壤质地、降水以及植被等共同作用的结果，由于地形地貌和土壤质地基本不会发生变化，故而降水和植被覆盖是影响土壤保持的重要因素[22]。有研究表明，降水量一旦低于某一阈值时，将不足以维持良好植被的覆盖，导致植被土壤保持功能降低，进一步造成严重的水土流失[39]，而植被恢复可使蒸散发明显增加，且植被恢复会对区域降水产生显著影响[40]。受到气候变化的影响，2000 年以来黄河流域的年降水量总体呈下降趋势[39]。黄河流域国家级自然保护区内主要的土地覆被类型为草地，降水侵蚀潜力大，土壤侵蚀量较高[22]，且 2000—2020 年间该区域的土地覆被类型变化主要为草地向未利用地转化（图 5），一系列的因素最终导致黄河流域国家级自然保护区的土壤保持功能也在逐渐减弱。近年来，随着相关政策以及法规体系的不断完善，黄河流域国家级自

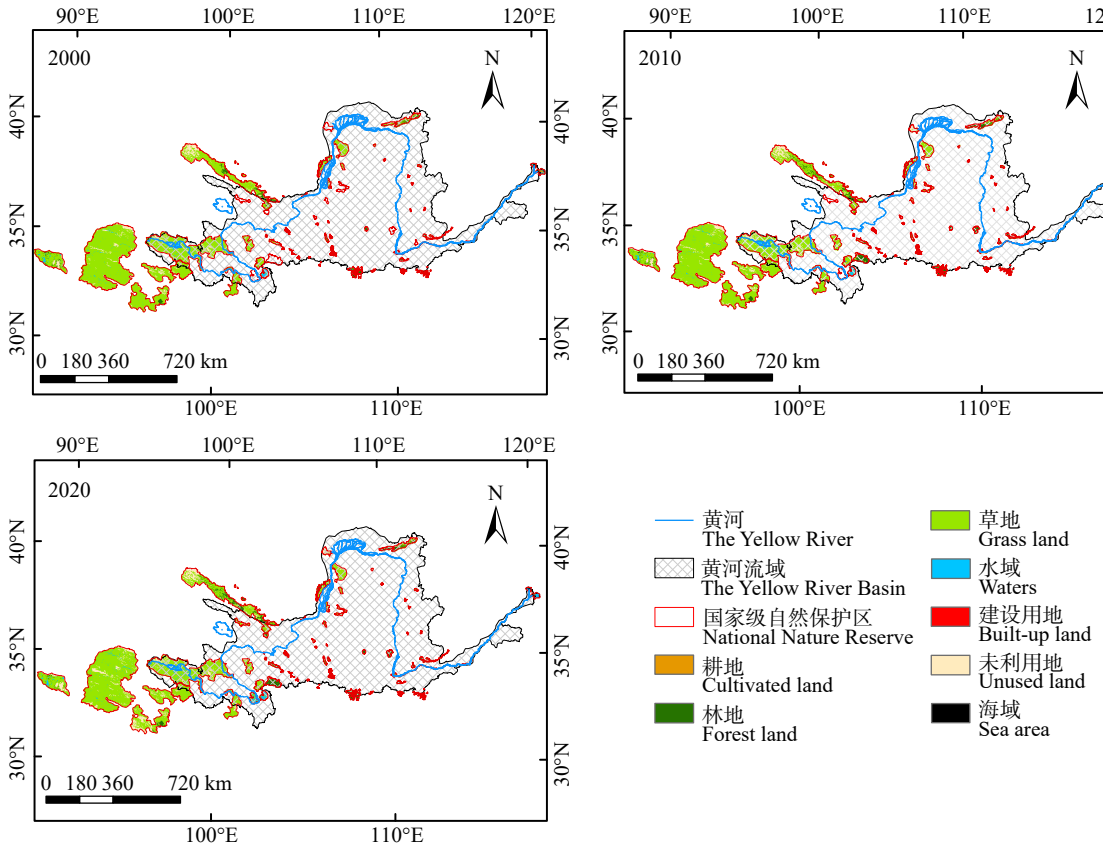


图 5　2000 年、2010 年和 2020 年黄河流域国家级自然保护区土地覆被变化

Fig. 5　Land cover changes in the Yellow River Basin national nature reserves in 2000, 2010 and 2020

然保护区内植被不断恢复[41−43]，土壤流失情况有所缓解，表明黄河流域国家级自然保护区的生态保护工作在过去 20 年里取得了成效。

不同地类的碳密度不同，因此不同区域的碳储量必然会存在差异[44]。陆地生态系统作为世界上最大的碳库[45]，其中森林、湿地和草地的储存能力比其他生态系统更大[46]。然而，受不同土地覆被类型相互转移的影响，黄河流域国家级自然保护区 2000—2020 年的碳储量变化表现为先增加后减少。黄河流域国家级自然保护区的碳储量有所上升得益于近年来我国推行的一系列保护生态用地、增绿造林等生态保护政策的积极影响[23,28]。而 2010 年后黄河流域国家级自然保护区碳储量的减少则是由于研究区域内大面积的草地转移为未利用地（图 5），使得地上、地下碳储量减少，进而减少了总碳储量。

研究表明，土地覆被类型是影响生境质量最重要的原因之一[47]。生境质量指数的高低取决于生境适宜度，相较于未利用地和耕地，草地和林地的生境适宜度更具优势[24]。黄河流域上游地区的国家级自然保护区内土地覆被类型以林地和草地为主，而耕地集中分布在中下游国家级自然保护区内（图 5），黄河流域国家级自然保护区生境质量分布整体呈现西高东低的特征，与该区域的土地覆被类型分布格局相似。黄河流域国家级自然保护区 2000—2020 年的平均生境质量指数为 0.87，整体生境质量水平较高，但略有下降。该结果与其他学者的研究结论一致[24,48]。

研究生态系统服务功能的重要性可以明确识别自然保护区内生态系统服务功能的关键区域，并为有关职能部门拟定生态保护措施及制定针对性的保护策略提供科学依据。黄河流域国家级自然保护区的类型丰富，不仅保护了黄河流域的自然生态系统、野生生物种群及其栖息地，还起到了涵养水源、保持水土、防风固沙、稳定区域气候等重要作用。总体来看，2000—2020 年黄河流域国家级自然保护区综合生态系统服务功能的变化为先增强后减弱。自 2000 年以来，随着一系列国家重大生态工程的实施，黄河流域的植被覆盖度和绿地生产状况得到了极大地改善，生态系统服务功能得到了明显的提高[29]。然而，近些年来黄河流域国家级自然保护区内土地覆被类型的变化，尤其是草地、林地向未利用地类型的转移，导致该区域生态系统服务能力出现下降。

由于黄河流域上、中、下游的生态环境特点不同，其所面临的生态环境风险也不同。因此，在具体的保护策略上，要因地制宜地开展相关保护工作。上游地区的国家级自然保护区主要位于水源涵养重点生态功能区，重点任务在于加强水源涵养功能，提高产水能力，加大对山区森林、湿地等关键水源涵养生态系统的保护力度，扩大森林植被有效覆盖率，从源头上有效控制水土流失问题，建立生态系统趋势性变化监测和风险预警体系[34,49]。中游地区的国家级自然保护区主要位于水土保持重点生态功能区，重点任务在于增强水土保持能力，通过实施天然林保护、人工林抚育等措施加强生态修复，全面调节流域水沙关系，强化污染治理，提高水土保持能力[36,50]。下游地区的国家级自然保护区主要位于黄河三角洲湿地生物多样性保护重要区，该区域的重点任务在于通过实施天然林保护、人工林抚育、退耕还林还草还湿等生态修复措施，提高生态承载力，依托科技新产业来优化该区域的生产用水方式，提高下游地区的水资源利用率[49−50]。针对黄河流域的生态环境特殊性，应当强化全流域的水资源协调机制，注意合理开发利用土地资源，提高土地利用效益，注重植被保护与自然恢复，防止草地退化，完善全流域的生态补偿机制，并适当实施生态移民工程，以促进区域生态环境和经济社会协调可持续发展。

本文在对黄河流域国家级自然保护区的生态系统服务功能评估的过程中，充分考虑了该区域自然保护区的建设历史，较为全面地评估了黄河流域国家级自然保护区的生态系统服务功能时空变化情况。评估结果与先前的研究成果相比，具有较高一致性。然而，由于研究所需基础数据庞大，且模型相关参数较难获得，可能导致评估结果存在一定的偏差。为了消除系统性误差，使评估结果更加科学，需进一步提高基础数据的精确性和模型参数的本地化修正程度。国家级自然保护区作为黄河流域生态安全屏障的核心区域，该地区的其他生态系统服务功能也同样具有重要意义，未来有必要进一步深入研究。

参 考 文 献

[1] Schägner J P, Brander L, Maes J, et al. Mapping ecosystem services' values: current practice and future prospects[J]. Ecosystem Services, 2013, 4: 33−46.

[2] Folke C. Resilience (Republished)[J]. Ecology and Society, 2016, 21(4): 44.

[3] Holdren J P, Ehrlich P R. Human population and the global environment[J]. American Scientist, 1974, 62(3): 282.

[4] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3−15.

[5] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911−919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911−919.

[6] Millennium E A. Millennium ecosystem assessment: ecosystems

and human well-being: synthesis[M]. Washington: Island Press, 2005.

[7] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(19): 7565−7570.

[8] Vergílio M, Fjøsne K, Nistora A, et al. Carbon stocks and biodiversity conservation on a small island: Pico (the Azores, Portugal)[J]. Land Use Policy, 2016, 58: 196−207.

[9] Xu W, Xiao Y, Zhang J, et al. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(7): 1601−1606.

[10] 缪建群, 孙松, 王志强, 等. 江西高天岩自然保护区生态系统服务功能价值评估 [J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6422−6430.
Miao J Q, Sun S, Wang Z Q, et al. Evaluating the ecosystem services of Gaotianyan Nature Reserve in Lianhua County, Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6422−6430.

[11] Timko J A, Innes J L. Evaluating ecological integrity in national parks: case studies from Canada and South Africa[J]. Biological Conservation, 2009, 142(3): 676−688.

[12] Dudley Nigel. IUCN 自然保护地管理分类应用指南 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
Nigel D. IUCN nature reserve management classification application guide [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016.

[13] 王伟, 辛利娟, 杜金鸿, 等. 自然保护地保护成效评估: 进展与展望 [J]. 生物多样性, 2016, 24(10): 1177−1188.
Wang W, Xin L J, Du J H, et al. Evaluating conservation effectiveness of protected areas: advances and new perspectives [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(10): 1177−1188.

[14] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 875−883.
Xu Y, Wang C S. Ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin: framework, path, and countermeasure[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(7): 875−883.

[15] 杨东阳, 张骞, 苗长虹, 等. 黄河流域省区生态系统服务价值时空演变研究 [J]. 黄河文明与可持续发展, 2021(1): 88−101.
Yang D Y, Zhang Q, Miao C H, et al. The spatiotemporal change of ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Yellow River Civilization and Sustainable Development, 2021(1): 88−101.

[16] 陈心盟. 黄河流域生态系统服务时空变化及其权衡关系分析 [J]. 农业与技术, 2020, 40(20): 122−125.
Chen X M. Spatiotemporal changes and trade-offs of ecosystem services in the Yellow River Basin[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(20): 122−125.

[17] 孙梦华, 牛文浩, 张蚌蚌, 等. 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应: 以陕甘宁地区为例 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3913−3922.
Sun M H, Niu W H, Zhang B B, et al. Spatial-temporal evolution and responses of ecosystem service value under land use change in the Yellow River Basin: a case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia region, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3913−3922.

[18] 孙孝平, 李双, 余建平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统服务价值评估: 以钱江源国家公园体制试点区为例 [J]. 生物多样性, 2019, 27(1): 51−63.
Sun X P, Li S, Yu J P, et al. Evaluation of ecosystem service value based on land use scenarios: a case study of Qianjiangyuan National Park pilot[J]. Biodiversity Science, 2019, 27(1): 51−63.

[19] 薛健, 李宗省, 冯起, 等. 1980-2017 年祁连山水源涵养量时空变化特征 [J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 1−13.
Xue J, Li Z X, Feng Q, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water conservation amount in the Qilian Mountains from 1980 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 1−13.

[20] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701−708.

[21] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST 3.2. 0 User's guide[EB/OL]. (2015−12−30)[2023−02−21]. https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html.

[22] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡, 等. 基于 InVEST 模型的黄河流域土壤侵蚀评估及其时空变化 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2021, 57(5): 650−658.
Yang J, Xie B P, Zhang D G, et al. Soil erosion and its temporal-spatial variation in the Yellow River Basin based on the InVEST model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(5): 650−658.

[23] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(6): 1018−1029.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018−1029.

[24] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素 [J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 12−22.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatial-temporal evolution of habitat quality and its influencing factors in the Yellow River Basin based on InVEST model and GeoDetector[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 12−22.

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

[26] 张晗. 基于 GIS 和 InVEST 模型的安远县生态系统服务功能评价 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
Zhang H. Comprehensive assessments of ecosystem service functions in Anyuan County based on GIS and InVEST model[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2019.

[27] 国家林业和草原局. 黄河流域国家级保护区管理成效优良率超过九成 [EB/OL]. (2022−04−04)[2023−05−20]. http://www.forestry.gov.cn/c/www/zrzrbhq/23851.jhtml.
National Forestry and Grassland Administration. Yellow River Basin national protected area management effectiveness excellent rate over 90%[EB/OL]. (2022−04−04)[2023−05−20]. http://www.forestry.gov.cn/c/www/zrzrbhq/23851.jhtml.

[28] 杨小琬, 张丽君, 秦耀辰, 等. 1995 年以来黄河下游碳储量时空变化及驱动因素 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2022, 52(1): 20−33.
Yang X W, Zhang L J, Qin Y C, et al. Temporal and spatial variation and driving factors of carbon storage in the lower Yellow River since 1995[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2022, 52(1): 20−33.

[29] 计伟, 刘海江, 高吉喜, 等. 黄河流域生态质量时空变化分析 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1700−1709.
Ji W, Liu H J, Gao J X, et al. Spatial-temporal variations of ecological quality in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1700−1709.

[30] Schroter D, Cramer W, Leemans R, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe[J]. Science, 2005, 310: 1333−1337.

[31] Shaw M R, Pendleton L, Cameron D R, et al. The impact of climate change on California's ecosystem services[J]. Climatic Change, 2011, 109(S1): 465−484.

[32] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(2): 672−683.
Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 672−683.

[33] 马佳宁, 高艳红. 近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析 [J]. 高原气象, 2019, 38(1): 124−135.
Ma J N, Gao Y H. Analysis of annual precipitation and extreme precipitation change in the upper Yellow River Basin in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 38(1): 124−135.

[34] 王艳芬, 陈怡平, 王厚杰, 等. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应 [J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 520−528.
Wang Y F, Chen Y P, Wang H J, et al. Ecosystem change and its ecohydrological sffect in the Yellow River Basin[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 520−528.

[35] 朱春霞, 钟绍卓, 龙宇, 等. 黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2502−2513.
Zhu C X, Zhong S Z, Long Y, et al. 2023. Spatiotemporal variation of ecosystem services and their drivers in the Yellow River Basin, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2502−2513.

[36] Jiang C, Zhang H Y, Zhang Z D, et al. Model-based assessment soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration[J]. Global and Planetary Change, 2019, 172: 396−413.

[37] 王有恒, 谭丹, 韩兰英, 等. 黄河流域气候变化研究综述 [J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 235−246.
Wang Y H, Tan D, Han L Y, et al. Review of climate change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 235−246.

[38] 贺俊平, 贺振. 近 53 年黄河流域降水时空分布特征 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 95−100.
He J P, He Z. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation event in Yellow River Basin in recent 53 years[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 95−100.

[39] 王胜杰, 赵国强, 王旻燕, 等. 1961—2020 年黄河流域气候变化特征研究 [J]. 气象与环境科学, 2021, 44(6): 1−8.
Wang S J, Zhao G Q, Wang M Y, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River Basin from 1961 to 2020[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021, 44(6): 1−8.

[40] 杨泽龙, 李艳忠, 梁康, 等. 植被恢复背景下黄河中游及 6 个典型流域蒸散发及其组分变化格局 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 816−828.
Yang Z L, Li Y Z, Liang K, et al. Variation patterns of evapotranspiration and its components in the Middle Yellow River and six typical basins under the background of vegetation restoration[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 816−828.

[41] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化 [J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849−858.
Zhang Z Q, Liu H, Zuo Q T, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000−2019[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 849−858.

[42] 黄河水利委员会水土保持局. 依法强化水土保持监管 扎实推进黄河流域水土保持专项整治行动 [J]. 中国水土保持, 2021(4): 15−18.
Soil and Water Conservation Bureau of the Yellow River Water Conservancy Commission. Strengthening the supervision of soil and water conservation according to law and promoting the special rectification action of soil and water conservation in the Yellow River Basin[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(4): 15−18.

[43] 字豪翠, 张芝艳, 席武俊. 黄河流域植被覆盖度变化 [J]. 自然科学, 2023, 11(4): 634−640.
Yu H C, Zhang Z Y, Xi W J. Vegetation coverage change in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Science, 2023, 11(4): 634−640.

[44] 彭玺, 张亚威. 湘乡市林地森林碳储量及碳密度研究 [J]. 中南林业调查规划, 2019, 38(1): 62−67.
Peng X, Zhang Y W. Study on carbon storage and carbon density of forest land in Xiangxiang[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2019, 38(1): 62−67.

[45] Krogh L, Noergaard A, Hermansen M, et al. Preliminary estimates of contemporary soil organic carbon stocks in Denmark using multiple datasets and four scaling-up methods[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2003, 96(1−3): 19−28.

[46] Pagiola S. Payments for environmental services in Costa Rica[J]. Ecological Economics, 2008, 65(4): 712−724.

[47] Newbold T, Hudson L N, Hill S L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J]. Nature, 2015, 520: 45−50.

[48] Yang W, Jin Y, Sun T, et al. Trade-offs among ecosystem services in coastal wetlands under the effects of reclamation activities[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 354−366.

[49] 邓小云. 整体主义视域下黄河流域生态环境风险及其应对 [J]. 东岳论丛, 2020, 41(10): 150−155.
Deng X Y. Ecological and environmental risks in the Yellow River Basin from the perspective of holism and their responses[J]. Dongyue Tribune, 2020, 41(10): 150−155.

[50] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划 [ROL]. 2015 [2023−01−05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xzgfxwj/202301/W020151126550511267548.pdf.
Ministry of Environmental Protection, Chinese Academy of Sciences. National ecological function zoning[R/OL]. 2015 [2023−01−05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xzgfxwj/202301/W020151126550511267548.pdf.

（责任编辑 范 娟
责任编委 臧润国）