

DOI: 10.20103/j.stxb.202303010375

王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 杨红. 东北天然林资源保护工程成效评估及热点区域识别. 生态学报, 2024, 44(3): 1231-1241.

Wang J Q, Xing Y Q, Chang X Q, Yang H. Assessment of the effectiveness of the Northeast Natural Forest Protection Project and identification of hot spot areas. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1231-1241.

# 东北天然林资源保护工程成效评估及热点区域识别

王佳琪, 邢艳秋\*, 常晓晴, 杨红

东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 哈尔滨 150040

**摘要:** 东北地区天然林资源保护工程的实施, 改善了生态环境, 提高了生态系统服务能力, 对东北地区生态系统服务也起到了积极促进作用。为了更直观的反映东北地区天保工程的实施成效, 研究基于长时间序列的遥感监测数据集-土地利用数据, 采用 InVEST 模型和 RUSLE 模型对 1990—2020 年天保工程实施前后东北地区和天保工程区生态系统服务变化进行定量评估分析并采用 Getis-Ord  $G_i^*$  指数识别热点区域。结果表明: (1) 东北地区 1990—2020 年城乡/工矿居民用地和耕地面积分别增加 25.37%, 12.15%, 水域减少 21.42%, 草地减少 14.02%, 未利用土地和林地分别减少 8.41%, 5.34%。(2) 1990—2020 年东北地区和天保工程区土壤保持量分别增加了  $95.81 \times 10^6$  t、 $24.05 \times 10^6$  t, 碳储量分别减少了  $7.49 \times 10^8$  tC、 $3.92 \times 10^8$  tC, 水源涵养量分别增加了  $177.51 \times 10^9$  m<sup>3</sup>、 $58.65 \times 10^9$  m<sup>3</sup>。(3) 东北地区的极显著热点区域主要分布内蒙古地区东北部、黑龙江省北部、吉林省东部和辽宁省东部。随着天保工程的实施, 极显著热点区域显著增加, 且范围与天保工程高度重合。研究拟为后续东北地区林业政策和生态工程的实施提供科学的参考依据。

**关键词:** 生态系统服务; 天然林资源保护工程; 热点分析; InVEST; RUSLE

## Assessment of the effectiveness of the Northeast Natural Forest Protection Project and identification of hot spot areas

WANG Jiaqi, XING Yanqiu\*, CHANG Xiaoqing, YANG hong

Forest Operations and Environment Research Center, Northeastern Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract:** Implementation of the Natural Forest Protection Project (NFPP) in Northeast China has improved the ecological environment and enhanced the ecosystem service capability. It also contributed positively to ecosystem services in Northeast China. In order to more directly reflect the implementation effect of the NFPP in Northeast China, this study is based on the remote sensing monitoring data set of long time series-land use data. The InVEST and RUSLE models were used to quantitatively assess and analyze changes in ecosystem services in Northeast China and NFPP area before and after the implementation of the NFPP from 1990 to 2020. And this study used the Getis-Ord  $G_i^*$  index to identify hot spot areas. The results showed that (1) cropland and forest were the center of gravity land use types in Northeast China, accounting for more than 65% of the total land use in a year. From 1990 to 2020, urban/built-up and water body area in the study area changed the most, followed by cropland and grassland, and forest and unused land changed the least. The area of urban/built-up and cropland in the study area increased by 25.37% and 12.15%, respectively, while the area of water body decreased by 21.42% and the area of grassland decreased by 14.02%. The area of unused and forest decreased by 8.41% and 5.34%. (2) Soil conservation in the study area and the NFPP area increased by  $95.81 \times 10^6$  t and  $24.05 \times 10^6$  t respectively from 1990 to 2020, showing a trend of first decrease and then increase. Carbon storage decreased by  $7.49 \times 10^8$  tC and  $3.92 \times 10^8$  tC respectively, showing a continuous decrease. And water yield increased by  $177.51 \times 10^9$  m<sup>3</sup> and  $58.65 \times 10^9$  m<sup>3</sup>, showing a trend of first decrease and then increase. Since the implementation of the NFPP, the overall trend of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE011700-6); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J041)

收稿日期: 2023-03-01; 网络出版日期: 2023-11-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanqixing@nefu.edu.cn

ecosystem services in the study area has been positive, and the implementation of the NFPP has had a positive effect on the ecosystem in Northeast China. (3) The spatial distribution of the extremely significant hot spot areas in the study area from 1990 to 2020 was basically consistent, mainly in the northeastern Inner Mongolia, northern Heilongjiang Province, eastern Jilin Province, and eastern Liaoning Province. With the implementation of the NFPP, the number of highly significant hot spot areas increased significantly, and the scope overlapped highly with the NFPP, and the hot spot and significant hot spot areas were gradually transformed into highly significant hot spot areas. Based on remote sensing monitoring data to systematically quantify the ecosystem services of the NFPP in Northeast China on a long time scale, the Getis-Ord  $G_i^*$  index was applied to the identification of priority protected areas for ecosystem services, providing a scientific reference for the subsequent implementation of forestry policies and ecological projects in Northeast China.

**Key Words:** ecosystem services; Natural Forest Protection Project; hot spot analysis; InVEST model; RUSLE model

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[1]</sup>,不仅为人类提供食品、医药及其它生产生活原料,还创造与维持了地球生命支持系统,形成了人类生存所必需的环境条件<sup>[2]</sup>。随着全球气候变暖和人类活动的不断干扰,以资源耗竭、环境污染和生态胁迫为特征的区域生态服务问题日益凸显<sup>[3]</sup>,并成为了人类生存和区域经济可持续发展面临的现实问题。为了解决这个问题,我国在 2000 年实施了天然林资源保护工程<sup>[4]</sup>(Natural Forest Protection Project, NFPP),以期在生态恢复、保护与经济发展间寻求平衡点,经过近 20 年的生态保护和生态建设,天保工作成为全国林业中一项常态化、制度化的工作<sup>[5]</sup>,如何准确对 NFPP 实施成效进行评估以及进一步规划未来 NFPP 建设范围成为重要的科学问题。

目前生态系统服务已成为多学科领域的研究热点<sup>[6]</sup>。国内外学者从不同尺度上针对重大生态工程生态系统服务功能进行了大量的研究,Wang 等<sup>[7]</sup>采用遥感和建模技术分析了我国退耕还林还草工程对云南西北部生态系统服务的影响及引起的生态系统服务权衡。吴丹等<sup>[8]</sup>通过分析青海省三江源地区生态工程实施前后森林生态系统水源涵养服务的变化情况,客观评估了生态工程的效果。郭玉亭等<sup>[9]</sup>基于 InVEST 模型研究了浑春 NFPP 实施前后生态系统水源涵养功能的时空变化特征。在生态系统服务已有大量研究的基础上,为使生态系统服务评估结果直观可视化,生态系统服务空间制图尤为重要。最初识别区域生态系统服务较好的和较差的区域是直接将空间分布图分类,为了结果更具有科学性和可靠性,国内外学者开始把冷点和热点概念引入生态系统服务研究中<sup>[10-12]</sup>,生态系统服务冷热点识别的研究目的多为划定优先保护区。高会<sup>[13]</sup>等基于生态系统冷热点区域识别分析生态系统服务权衡与协同关系确定了太行山区在不同角度上的优先保护区,利用空间统计分析方法判别生态系统服务冷点(低值集聚)和热点(高值集聚)区域,结果更科学合理,可为生态系统服务保护区域的划分提供科学依据。目前关于重大生态工程实施成效的评估研究不胜枚举,然而多数仅停留在重大生态工程区生态系统服务时空变化分析,并未对生态工程的进一步范围规划提供科学的参考建议。因此将生态系统服务变化与热点区域结合起来评估重大生态工程成效并确定其后续规划范围是生态文明建设的重大现实需求。

目前 NFPP 的实施已经完成了第二阶段,取得了重要进展和一定的成效,因此对其实施成效进行评估是很有必要的。NFPP 的实施范围中,东北地区是我国乃至东北亚地区重要的生态屏障<sup>[14]</sup>,其中东北森林带是国家“两屏三带”生态安全战略格局的重要组成部分<sup>[15]</sup>,森林面积占全国的 27%<sup>[16]</sup>。以往针对东北地区生态系统服务的研究大多是基于中国森林生态系统连续观测与清查数据计算区域生态系统服务价值<sup>[17-18]</sup>,较少有基于遥感数据针对生态工程实施前后区域生态系统服务在长时间大尺度上的变化并识别其热点区域的研究。因此本研究基于长时间序列的遥感监测数据集-土地利用数据(China land use/cover change, CNLUCC),分析 1990—2020 年 NFPP 实施前后东北地区的土地利用时空变化特征,对东北地区和天保工程区土壤保持、水源涵养、碳储量等 3 种关键生态系统服务进行定量评估,利用统计学方法识别生态系统服务热点区域,对于

东北地区生态工程的实施和生态系统的可持续管理具有重要意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部<sup>[19]</sup>(简称“内蒙古地区”,下同),其地理位置范围为 112°—140° E, 40°—55° N, 东西跨度 1300 km, 南北距离 1400 km<sup>[20]</sup>(图 1)。东北地区自南向北横跨中温带与寒温带,属温带季风气候,夏季温热短暂,冬季干燥寒冷且漫长<sup>[21]</sup>,降水主要集中在 4—10 月,年降水量在 300—1000 mm 之间<sup>[20]</sup>。东北地区地质类型丰富,海拔在-277—2667 m 之间,研究区主要为平原和山地,平原以东北平原为主,山地主要为大小兴安岭和长白山脉<sup>[20]</sup>。

东北地区天然林资源保护工程于 2000 年开始实施,工程区主要分布在大、小兴安岭和长白山脉,是中国的重点林区,有广袤的原始森林,包含寒温带针叶林、温带针阔叶混交林、温带草原三大植被区域,野生动植物生存环境优越,生物多样性丰富<sup>[22]</sup>。

1.2 数据来源及数据处理

本研究所用到的基础数据包括土地利用数据、气象数据<sup>[23—26]</sup>、土壤属性数据<sup>[27]</sup>、归一化植被指数数据<sup>[28]</sup>、数字高程模型数据和碳密度数据<sup>[29—31]</sup>,其来源和空间分辨率如表 1 所示。东北地区 1990、2000、2010、2020 等 4 年土地利用数据依照中国科学院资源环境数据中心土地分类系统一级分类将其重分类为 6 类,分别为耕地、林地、草地、水域、城乡/工矿居民用地和未利用土地。所有数据利用 ArcGIS10.6 重采样为 1 km,坐标系为 Krasovsky\_1940\_Albers。

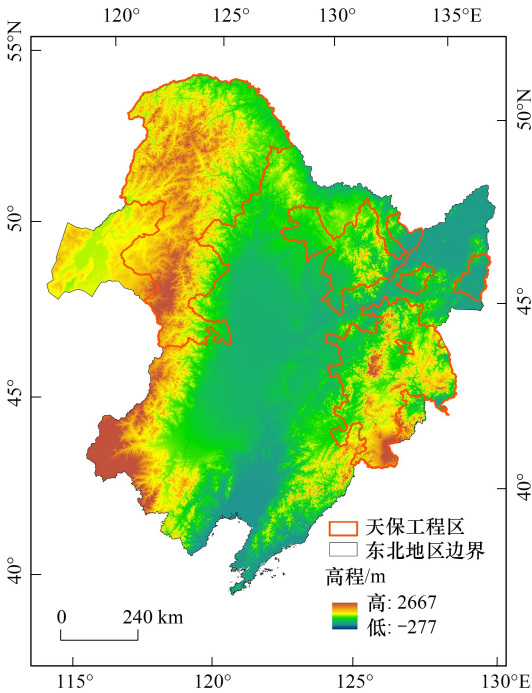


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

表 1 数据来源  
Table 1 Data source

| 数据集<br>Dataset                                                                         | 数据来源<br>Data source     | 分辨率<br>Resolution |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| 遥感监测数据集-土地利用数据<br>Remote sensing monitoring dataset-land use data                      | 资源环境科学与数据中心             | 1 km              |
| 逐月降水量数据集<br>Month-by-month precipitation dataset                                       | 国家地球系统科学数据中心            | 1 km              |
| 逐月平均气温数据集<br>Monthly average temperature data set                                      | 国家地球系统科学数据中心            | 1 km              |
| 中国陆地实际蒸散发数据集<br>Actual terrestrial evapotranspiration data set for China               | 国家青藏高原科学数据中心、MOD16A2/ET | 0.1°、500 m        |
| 数字高程模型数据<br>Digital elevation model                                                    | 地理空间数据云                 | 90 m              |
| 基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)<br>Chinese soil dataset based on the World Soil Database | 国家青藏高原科学数据中心            | 1:100 万           |
| 归一化植被指数数据集<br>Normalized vegetation index                                              | 国家生态科学数据中心、MOD13Q1      | 0.05°、250 m       |
| 碳密度 Carbon density                                                                     | 文献[29—31]               | —                 |

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用变化幅度

为了更清晰的了解 1990—2010 年东北地区的土地利用变化,本研究对东北地区进行了土地利用变化幅度分析。土地利用变化幅度可以很好的表征土地利用变化,计算方法<sup>[20]</sup>如式(1)所示:

$$K_t = \frac{Y_b - Y_a}{Y_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $K_t$ 为土地利用变化幅度指标, $Y_a$ 与 $Y_b$ 分别为某种土地利用类型在研究初期 $a$ 和研究末期 $b$ 的面积。

### 2.2 生态系统服务评估方法

本研究依照森林生态系统服务评价指标选取原则<sup>[32]</sup>,分析比较国内外已有的生态系统服务功能评估指标<sup>[20,33-34]</sup>结合东北地区生态系统特点选取了土壤保持、水源涵养、碳储量等 3 种关键生态系统服务物质质量进行定量评估。

#### 2.2.1 土壤保持量模型

土壤保持量是指生态系统中潜在土壤侵蚀与实际土壤侵蚀之差。土壤保持量采用在国内取得较好适应性的 RUSLE 模型计算。RUSLE 模型计算方法<sup>[35]</sup>如式(2)—(4)所示。

$$X = X_2 - X_1 \quad (2)$$

$$X_1 = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (3)$$

$$X_2 = R \times K \times L \times S \quad (4)$$

式中, $X$ 为单位面积土壤保持量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $X_1$ 为单位面积实际土壤侵蚀量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $X_2$ 为单位面积潜在土壤侵蚀量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $R$ 为降雨侵蚀力因子( $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),采用简易算法<sup>[36]</sup>计算; $K$ 为土壤可蚀性因子( $\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ),采用 Williams<sup>[37]</sup>提出的 EPIC 模型进行修正计算; $LS$ 为坡长坡度因子,采用地形因子测算公式<sup>[38]</sup>计算; $C$ 为植被覆盖因子,采用蔡崇法的研究结果<sup>[39]</sup>计算; $P$ 为工程措施因子,采用 Lufafa 的研究结果<sup>[40]</sup>计算。 $LS$ 、 $C$ 和 $P$ 均无量纲。

#### 2.2.2 水源涵养量模型

基于水量平衡方程,水源涵养量表示为降水量与实际蒸散发量的差值。水量平衡方程计算方法<sup>[7]</sup>如式(5)所示。

$$WY(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (5)$$

式中, $WY(x)$ 为单位栅格含水量( $\text{mm}$ ); $P(x)$ 为单位栅格降水量( $\text{mm}$ ); $AET(x)$ 为单位栅格实际蒸散量( $\text{mm}$ )。

#### 2.2.3 碳储量模型

InVEST 模型碳储量模块依据各土地利用类型空间分布及其对应的碳密度来计算生态系统碳储量。InVEST 模型计算方法<sup>[41]</sup>如式(6)所示。

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (6)$$

式中, $C_{\text{tot}}$ 为总的碳储量; $C_{\text{above}}$ 为地上部分的碳储量; $C_{\text{below}}$ 为地下部分的碳储量; $C_{\text{soil}}$ 为土壤碳储量; $C_{\text{dead}}$ 为枯落物碳储量。单位均为  $\text{tC}/\text{hm}^2$ 。

不同土地利用类型的碳密度参考文献<sup>[29-31]</sup>结合 1:400 万中国植被分布图得到,其结果如表 2 所示。水域,未利用土地表面几乎没有植被,本研究认为其碳密度为 0,城乡、工矿居民用地的碳密度非常小,可以忽略不计,本研究认为其碳密度也为 0。

### 2.3 生态系统服务热点区域识别

为消除不同生态系统服务之间的量纲影响,本研究利用极差标准化法对生态系统服务进行归一化处理,

使生态系统服务的值介于 0—1 之间。Moran's *I* 指数可以判断研究区生态系统服务的总体集聚情况,通过计算 Moran's *I* 指数发现研究区生态系统服务具有集聚现象(全局 Moran's *I* 指数均大于 0.78)。除了判断总体集聚情况以外,还需要识别研究区生态系统服务显著高于其他区域的热点区域作为优先保护区,为后续 NFPP 范围的规划提供科学参考。采用 Getis-Ord *G\_i^\** 统计指数计算研究区的冷/热点区域的集聚,Getis-Ord *G\_i^\** 指数能较准确地探测出聚集区域<sup>[42]</sup>,该方法的冷热点区域斑块破碎化程度低,具有连续成片性<sup>[14]</sup>。参考国内外学者<sup>[13,43—44]</sup>研究,可以发现冷热点分级方式受研究区域以及生态系统特征的影响不大。因此,本研究将生态系统服务冷/热点分为七个区域,该分级方式目前应用十分广泛,具体分区如表 3 所示。

表 2 不同土地利用类型的碳密度/(tC/hm<sup>2</sup>)  
Table 2 Carbon intensity of different land use types

| 土地利用类型<br>Land use type  | 地上碳密度<br>C_above | 地下碳密度<br>C_below | 土壤碳密度<br>C_soil | 死亡有机物碳密度<br>C_dead |
|--------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| 耕地 Cropland              | 4.70             | 0.00             | 33.46           | 0.00               |
| 林地 Forest                | 38.37            | 15.87            | 153.38          | 1.61               |
| 草地 Grassland             | 3.71             | 1.53             | 92.90           | 23.24              |
| 水域 Water body            | 0.00             | 0.00             | 0.00            | 0.00               |
| 城乡、工矿居民用地 Urban/Built-up | 0.00             | 0.00             | 0.00            | 0.00               |
| 未利用土地 Unused             | 0.00             | 0.00             | 0.00            | 0.00               |

C\_above:地上碳密度 Above-ground carbon density;C\_below:地下碳密度 Below ground carbon density;C\_soil:土壤碳密度 Soil carbon density;C\_dead:死亡有机物碳密度 Carbon density of dead organic materials

表 3 生态系统服务冷热点分区  
Table 3 Ecosystem services cold hotspot zoning

| Z 值 Z-value | ≤ -2.58 | -2.58—-1.96 | -1.96—-1.65 | -1.65—1.65 | 1.65—1.96 | 1.96—2.58 | ≥ 2.58 |
|-------------|---------|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|--------|
| 分区 Zoning   | 极显著冷点   | 显著冷点        | 冷点          | 不显著        | 热点        | 显著热点      | 极显著热点  |

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化分析

耕地和林地是东北地区的重心土地利用类型(图 2),常年占比 65%以上,耕地、城乡/工矿居民用地以及未利用土地主要分布在黑龙江省西南部和东部、吉林省西部以及辽宁省中部和北部,林地和草地主要分布在内蒙古地区、黑龙江省北部和中部、吉林省东部以及辽宁省东部和西南部,水域主要为呼伦湖、兴凯湖、嫩江以及松花江等。

30 年间研究区和工程区土地利用变化趋势基本一致,不同土地利用类型均发生了一定程度的相互转化(图 3、表 4)。

表 4 1990—2020 年土地利用变化幅度  
Table 4 Magnitude of land use change from 1990 to 2020

| 土地利用类型<br>Land use type     | 土地利用变化幅度 Land use change/% |       |           |        |           |        |           |        |
|-----------------------------|----------------------------|-------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|                             | 1990—2000                  |       | 2000—2010 |        | 2010—2020 |        | 1990—2020 |        |
|                             | 研究区                        | 工程区   | 研究区       | 工程区    | 研究区       | 工程区    | 研究区       | 工程区    |
| 耕地 Cropland                 | 9.40                       | 13.55 | 0.95      | 1.85   | 2.11      | 3.37   | 12.15     | 18.01  |
| 林地 Forest                   | -3.03                      | -1.83 | 1.64      | 0.73   | -3.96     | -3.35  | -5.34     | -4.48  |
| 草地 Grassland                | -5.92                      | -3.75 | -25.30    | -60.30 | 14.07     | 32.15  | -14.04    | -12.84 |
| 水域 Waterbody                | -4.56                      | -0.91 | -5.06     | 10.77  | -10.54    | -30.07 | -21.42    | -17.12 |
| 城乡/工矿居民用地<br>Urban/Built-up | 2.73                       | 2.39  | 14.97     | -6.57  | 9.76      | 16.52  | 25.37     | 13.15  |
| 未利用土地 Unused                | -7.39                      | -9.02 | 32.61     | 62.96  | -26.56    | -55.95 | 8.41      | 37.03  |

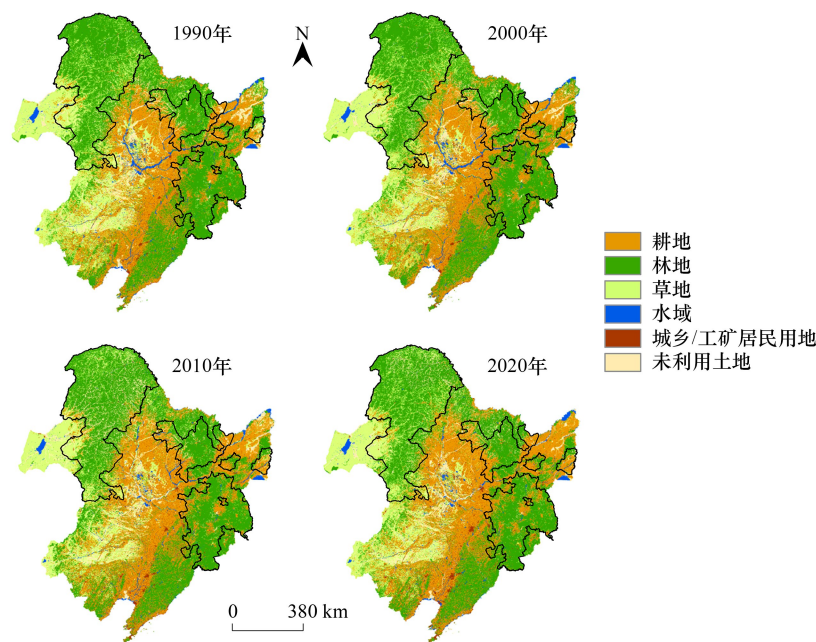


图 2 1990—2020 年土地利用类型空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of land use types from 1990 to 2020

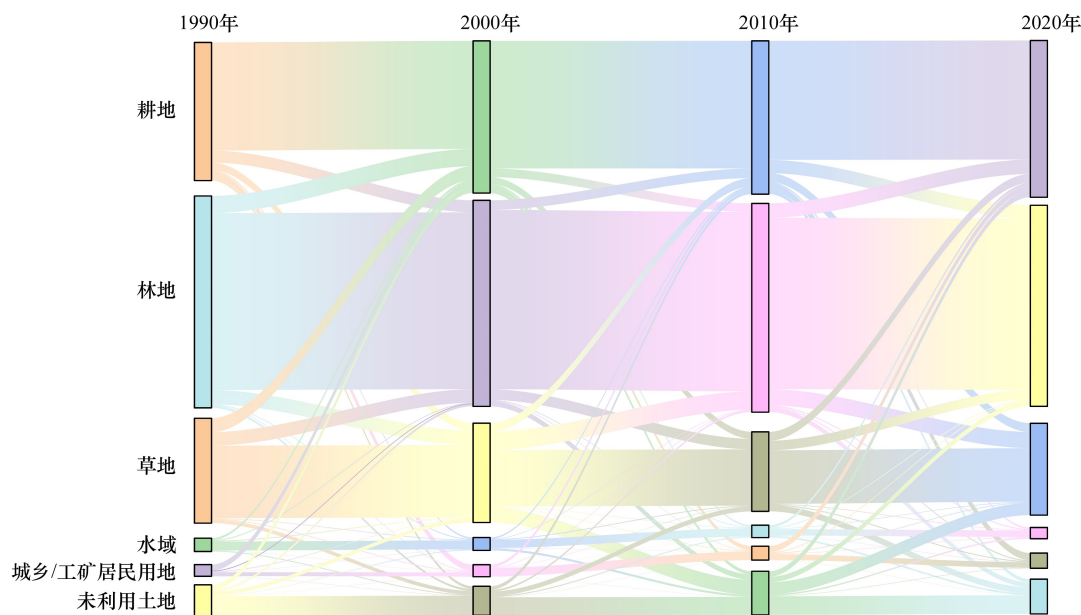


图 3 1990—2020 年土地利用转移桑基图

Fig.3 Sankey diagram of land use transfer from 1990 to 2020

整个研究时段内,研究区城乡/工矿居民用地和水域面积变化幅度最大,耕地和草地次之,林地和未利用土地最小。(1)城乡/工矿居民用地面积增加 25.37%,新增城乡/工矿居民用地主要是由耕地转化而来。工程区 2000—2010 年城乡/工矿居民用地减少 6.57%,表明森林受人类活动的干扰情况得到缓解。(2)水域面积减少 21.42%,水域主要转化为耕地和未利用土地。(3)耕地面积增加 12.15%,1982 年我国提出的土地政策,充分调动了农民耕种的积极性,导致耕地面积增加 9.4%,后续 NFPP 和退耕还林工程 (Grain for Green Project, GFGP) 的实施,减缓了耕地增加的幅度,新增耕地主要由林地、草地和未利用土地转化而来。(4)草

地面积减少 14.04%, 主要转化为耕地和林地。前期土地政策的实行, 导致大量草地被毁坏, 随着 NFPP 和 GFPP 的实施, 草地向耕地的转化减少, 向林地和未利用土地的转化增加, 本研究认为造林是造成草地减少的第一个原因, 草地处于幼草时期被错误分类为未利用土地是第二个原因。(5) 林地减少 5.34%, 林地主要转化为耕地和草地。早期人们滥砍滥伐、毁林造田, 导致林地面积减少 3.03%, 大量转化为耕地。NFPP 实施后, 林地向耕地和草地的转化减少, 林地面积增加 1.64%。2010—2020 年, 林地主要转化为草地, 林地面积减少 3.96%。(6) 未利用土地增加 8.41%, 新增未利用土地主要由耕地和草地转化而来。

### 3.2 东北地区生态系统服务时空变化特征

1990—2020 年研究区生态系统服务空间分布上存在异质性(图 4), 碳储量高值主要分布在内蒙古地区、黑龙江省北部、吉林省东部和辽宁省东部。由于受东南季风从海洋中带来丰富水分的影响<sup>[45]</sup>, 水源涵养服务空间分布上呈现由北到南、由西到东逐渐增加的趋势, 东北地区森林虽主要分布在高海拔地区, 受人类活动干

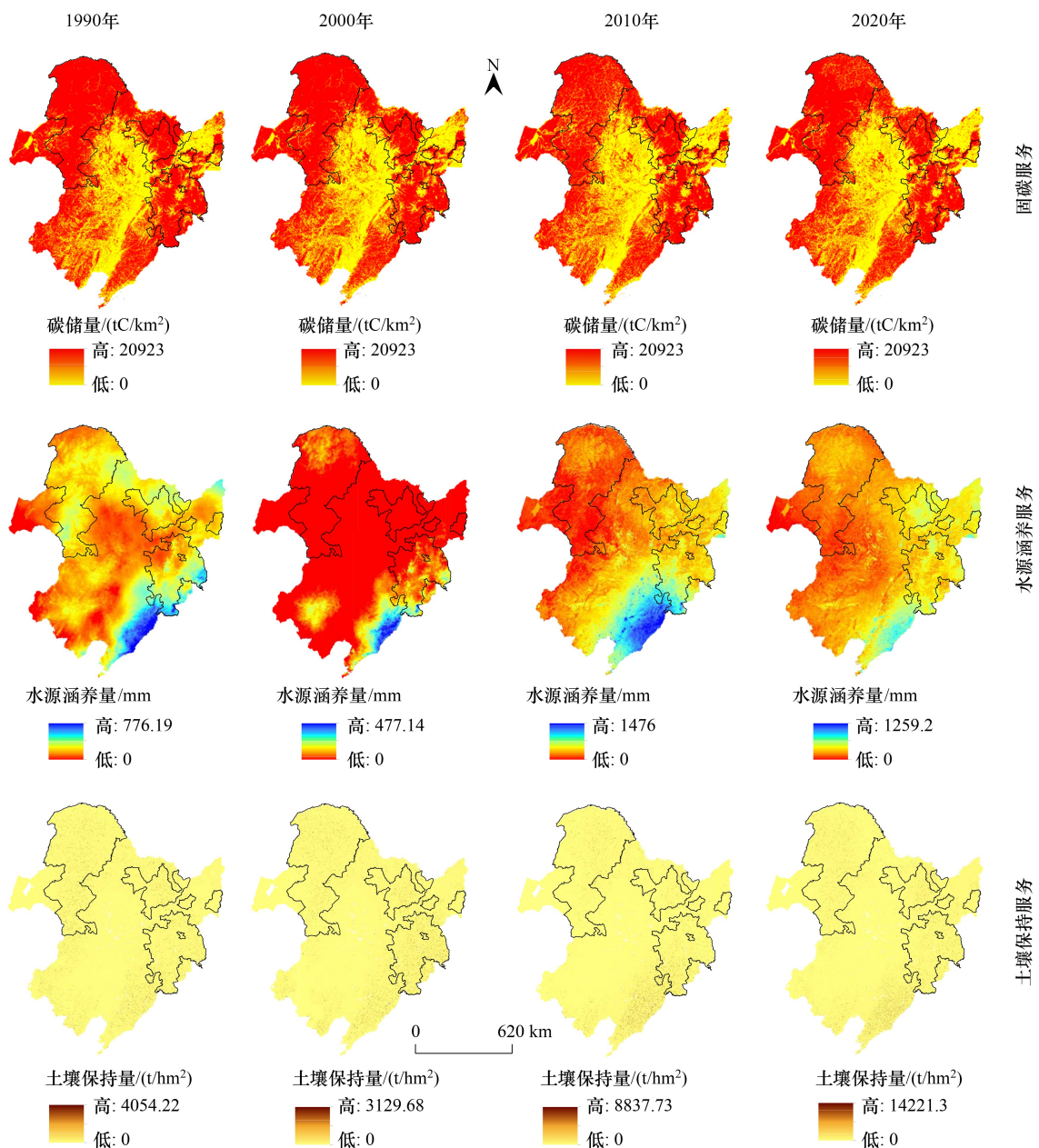


图 4 1990—2020 年生态系统服务空间分布图

Fig.4 Spatial Distribution of Ecosystem Services from 1990 to 2020

扰相对较少,但该区域降雨量相对较低且植被蒸散量大,水源涵养能力因此相对一般<sup>[20]</sup>。土壤保持量高值主要分布在内蒙古地区东北部、黑龙江省东部、吉林省东部和辽宁省东部林地占比高的区域。

如表 5 所示,1990—2020 年研究区碳储量和单位面积碳储量分别减少  $7.49\times 10^8$  tC 和  $6.08\times 10^2$  tC/km<sup>2</sup>,呈持续减少趋势,人类对森林的过度砍伐以及大范围的干旱导致研究区碳储量损失严重。土壤保持量和单位面积土壤保持量分别增加  $95.81\times 10^6$  t 和 78.48 t/km<sup>2</sup>,呈先减后增趋势。水源涵养量和单位面积水源涵养量分别增加  $177.51\times 10^9$  m<sup>3</sup>和 126.45 mm,呈先减后增趋势。由水源涵养公式可以看出,降雨量将直接影响水源涵养量。2000 年我国出现大范围干旱,其中北方地区受旱范围广,持续时间长,年降雨量均值仅为 418.64 mm,远远小于 1990 年降雨量均值 612.13 mm,加上东北地区气温暖干化趋势明显<sup>[46]</sup>,气温升高导致地面蒸散作用增加,导致 1990—2000 年水源涵养量和单位面积水源涵养量减少数十倍。

2000 年左右,国家在东北地区实施了 NFPP 和 GFPP 等重大生态工程,各省和地方政府也分别实施了生态保护和恢复措施。随着工程的实施,研究区土壤保持量和水源涵养量明显增加,土壤保持能力和水源涵养能力也显著提升,碳储量虽然仍呈减少趋势,但其减少趋势变缓,碳储存能力的下降趋势也有所变缓。

表 5 1990—2020 年东北地区生态系统服务变化表

Table 5 Changes in ecosystem services in Northeast China from 1990 to 2020

| 年份<br>Year | 土壤保持服务<br>Soil conservation  |                                  | 碳储存服务<br>Carbon storage     |                                                | 水源涵养服务<br>Water yield                      |                |
|------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
|            | 土壤保持量/<br>( $\times 10^6$ t) | 单位土壤保持量/<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 碳储量/<br>( $\times 10^8$ tC) | 单位碳储量/<br>( $\times 10^2$ tC/km <sup>2</sup> ) | 水源涵养量/<br>( $\times 10^9$ m <sup>3</sup> ) | 单位水源涵养量/<br>mm |
| 1990       | 202.35                       | 164.16                           | 151.22                      | 121.95                                         | 209.62                                     | 154.21         |
| 2000       | 160.18                       | 129.80                           | 147.78                      | 119.18                                         | 28.29                                      | 20.81          |
| 2010       | 255.47                       | 208.54                           | 143.73                      | 115.67                                         | 384.87                                     | 281.52         |
| 2020       | 298.16                       | 242.64                           | 143.74                      | 115.87                                         | 387.13                                     | 280.66         |

3.3 东北天保工程区生态系统服务时空变化特征

1990—2020 年天保工程区生态系统服务空间分布基本保持一致(图 4)。如表 6 所示,1990—2020 年工程区碳储量和单位面积碳储量分别减少  $3.92\times 10^8$  tC 和  $8.59\times 10^2$  tC/km<sup>2</sup>,呈持续减少趋势。水源涵养量和单位面积水源涵养量分别增加  $58.65\times 10^9$  m<sup>3</sup>和 112.98 mm,呈先减后增趋势。土壤保持量和单位面积土壤保持量分别增加  $23.86\times 10^6$  t 和 60.08 t/km<sup>2</sup>,呈先减后增趋势。NFPP 实施后,碳储量虽然减少,但是减少趋势下降,这意味着东北地区碳损失得到了缓解,工程区单位面积碳储量高于研究区约 1.5 倍,表明着工程区生态系统的固碳能力高于东北地区,水源涵养量的增加意味着工程区水土流失得到改善,单位面积水源涵养量的增加意味着工程区水源涵养能力的提高,土壤保持量的增加意味着工程区土壤流失得到改善,单位面积土壤保持量的增加意味着工程区土壤保持能力有所提高,表明 NFPP 的实施对区域生态系统服务有持续提升作用。

表 6 1990—2020 年天保工程区生态系统服务变化

Table 6 Changes in ecosystem services in the NFPP from 1990 to 2020

| 年份<br>Year | 土壤保持服务<br>Soil conservation  |                                  | 碳储存服务<br>Carbon storage     |                                                | 水源涵养服务<br>Water yield                      |                |
|------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
|            | 土壤保持量/<br>( $\times 10^6$ t) | 单位土壤保持量/<br>(t/km <sup>2</sup> ) | 碳储量/<br>( $\times 10^8$ tC) | 单位碳储量/<br>( $\times 10^2$ tC/km <sup>2</sup> ) | 水源涵养量/<br>( $\times 10^9$ m <sup>3</sup> ) | 单位水源涵养量/<br>mm |
| 1990       | 97.26                        | 204.42                           | 75.88                       | 165.42                                         | 87.04                                      | 172.58         |
| 2000       | 84.60                        | 177.67                           | 74.66                       | 162.67                                         | 9.24                                       | 18.34          |
| 2010       | 104.73                       | 221.79                           | 70.80                       | 154.25                                         | 108.61                                     | 215.06         |
| 2020       | 121.13                       | 264.50                           | 71.96                       | 156.83                                         | 145.69                                     | 285.56         |

### 3.4 生态系统服务冷热点区域空间变化特征

1990—2020 年研究区的极显著热点在空间分布上基本保持一致(图 5),主要分布内蒙古地区东北部、黑龙江省北部和中部、吉林省东部以及辽宁省东部这些林地占比高的地区,极显著冷点分布在黑龙江省南部和东部、吉林省西部以及辽宁省北部和中部等耕地占比高的地区。1990—2000 年研究区的热点区域(包括极显著热点、显著热点和热点)面积减少,随着 NFPP 的实施,极显著热点显著增加,热点和显著热点逐渐转变为极显著热点,2010 年热点区域面积虽然较 2000 年有所增加,但却仍然低于 1990 年热点区域面积,2020 年热点区域面积为四期最高,说明生态系统的恢复是漫长的。

研究区的热点区域与天保工程区高度重合,分布集中,区域板块破碎化程度低,从提升生态系统服务的角度,应对该区域进行优先集中保护,未来 NFPP 可以以本研究热点区域为参考依据进行范围规划。

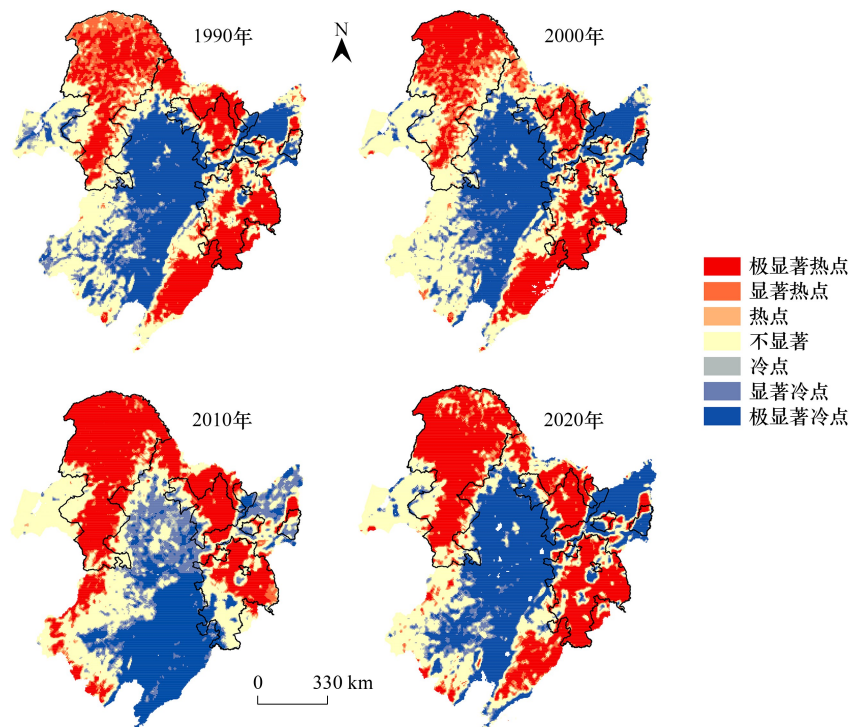


图 5 1990—2020 年生态系统服务冷/热点区域空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of cold/hotspot areas for ecosystem services from 1990 to 2020

## 4 讨论

从生态系统服务评估方法视角看,本研究的碳储存、水源涵养采用 InVEST 模型计算,该模型所需数据少且获取简单,估算准确性高,被广泛应用于生态系统服务功能估算研究中。土壤保持服务采用 RUSLE 模型计算,该模型是目前预测土壤侵蚀应用最为广泛的方法,根据研究区实际情况校正 RUSLE 模型参数。从结果视角看,本研究土壤保持量多年均值  $229.04 \times 10^6$  t 与张斯屿<sup>[20]</sup>针对 1992—2015 年 NFPP 实施前后东北地区土壤保持服务多年均值  $253.05 \times 10^6$  t 基本一致,本研究工程区碳储量多年均值  $73.33 \times 10^8$  tC 与相恒星<sup>[22]</sup>估算的 1990—2015 年天保工程区碳储量多年均值  $102.77 \times 10^8$  tC 大体上一致。但由于研究中参数确定和时间序列的不同所以导致结果有一定的差距。水源涵养量与其他研究差距较大,可能是因为本研究中实际蒸散发量采用的是遥感数据,与 InVEST 模型计算出的实际蒸散发量差距较大。

从生态系统服务影响因素视角来看,降雨和温度是影响生态系统服务的两个重要气候因子,适宜的温度和降雨量是促进林木生长的重要条件。林冠和林下植被可以截留 20%—30% 的降水量,减少水土流失。森林

在进行光合作用时吸收二氧化碳释放氧气,固碳能力强。2000 年因为干旱,导致植物在其生长季节中水分严重亏损,生长受到抑制甚至衰亡,从而导致各项生态系统服务功能均下降。此外,生态系统服务还受到人类活动的影响。20 世纪 80 年代以来,人口压力导致农垦与山林垦伐的加剧<sup>[47]</sup>,大约有 70% 的森林被砍伐改为农业用地,而且大多数为永久性的改变,林地面积的急剧减少,导致了一系列生态问题。为了改变这种现状,我国经过 60 多年的努力,已建立了数量众多、类型丰富、功能多样的各级各类自然保护地<sup>[48]</sup>,自然保护地体系建设有效保护了自然生态系统和生物多样性,改善了生态环境质量,提高了生态系统服务功能,但仍然存在保护与发展矛盾突出的问题。2000 年左右,国家先后出台了多项生态保护政策,其中禁止天然林商业性采伐政策的出台有效遏制了乱砍滥伐现象的进一步发生,局部地区自然生态系统得到恢复,生态系统服务能力得到提升,土壤流失和水资源短缺问题在一定程度上得到解决,但由于林地生长需要周期,林区内中幼林比例大,因此,碳储量先是减少而后缓慢增加。生态恢复是漫长的且生态影响具有滞后性<sup>[49]</sup>,我国生态文明建设仍处于关键并长期发展时期,因此,为后续生态政策的提出和生态工程的实施提供科学的规划建议具有重要的现实意义。

未来应在促进林地恢复的同时减少对其他土地利用类型的破坏例如草地等,在发展农业和城市化的过程中,加强生态工程的实施,以防止过度开发造成的退化,真正贯彻“宜林则林,宜草则草,宜灌则灌,宜荒则荒”原则,做到以保护自然和科学实施为前提推进生态工程建设。

本研究仅对三种关键生态系统服务进行分析并不能完全反映东北地区的生态系统服务格局和东北地区 NFPP 实施成效。在长时间尺度上获取高精度的数据是有限的,这导致本研究基础数据的重采样方法和分辨率相关的不确定性,根据文献数据或经验公式确定个别模型参数增加了结果的不确定性。未来将会选取更全面的生态系统服务指标,采用更高精度的数据对东北地区其他重大生态工程的实施成效进行定量评估。

## 5 结论

本研究基于长时间序列的遥感监测数据集-土地利用数据,分析 1990—2020 年 NFPP 实施前后东北地区的土地利用时空变化特征,对东北地区水土保持、水源涵养、碳储量等 3 种生态系统服务进行定量评估,利用 Getis-Ord  $G_i^*$  指数识别生态系统服务热点区域。本研究主要结论如下:

(1) 耕地和林地是东北地区重心土地利用类型,常年占研究区总面积的 65% 以上。城乡/工矿居民用地面积变化幅度最大,增加 25.37%,其次分别为水域减少 21.42%,草地减少 14.02%,耕地增加 12.15%,未利用土地和林地分别减少 8.41%、5.34%。

(2) 研究区和天保工程区生态系统服务变化趋势保持一致。1990—2020 年研究区和工程区水土保持量分别增加了  $95.81 \times 10^6$  t、 $24.05 \times 10^6$  t,碳储量分别减少了  $7.49 \times 10^8$  tC、 $3.92 \times 10^8$  tC,水源涵养量分别增加了  $177.51 \times 10^9$  m<sup>3</sup>、 $58.65 \times 10^9$  m<sup>3</sup>。研究区和工程区单位面积水土保持量分别增加了 78.48 t/km<sup>2</sup>、60.08 t/km<sup>2</sup>,单位面积碳储量分别减少  $6.08 \times 10^2$  tC/km<sup>2</sup>、 $8.59 \times 10^2$  tC/km<sup>2</sup>,单位面积水源涵养量分别增加了 126.45 mm、112.98 mm。

(3) 研究区的极显著热点主要分布内蒙古地区东北部、黑龙江省北部和中部、吉林省东部以及辽宁省东部,极显著冷点主要分布在黑龙江省南部和东部、吉林省西部以及辽宁省北部和中部,随着 NFPP 的实施,极显著热点显著增加。

## 参考文献 (References):

- [1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997:120-121.
- [2] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, (05): 635-640.
- [3] 王如松,欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. 中国科学院院刊, 2012, 27(03): 337-345,403-404.
- [4] 徐国劲,谢永生,骆汉,孟敏. 重大生态工程规划设计的理论探讨. 自然资源学报, 2018, 33(07): 1139-1151.
- [5] 李世东,金旻. 世界著名生态工程——中国“天然林资源保护工程”. 浙江林业, 2021(10): 16-18.
- [6] 晋鹏欣. 陕西省生态系统服务权衡与协同关系时空特征分析. 农业与技术, 2022, 42(07): 28-31.
- [7] Wang J, Peng J, Zhao M, Liu Y, Chen Y. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China. Science of the Total Environment, 2017, 574: 57-64.
- [8] 吴丹,邵全琴,刘纪远,曹巍. 三江源地区林草生态系统水源涵养服务评估. 水土保持通报, 2016, 36(03): 206-210.

- [9] 郭玉亭, 王英伟, 杨成江. 基于 InVEST 模型的珲春天保工程区水源涵养功能时空动态变化研究. 广东农业科学, 2022, 49(04): 54-63.
- [10] Cao Y, Cao Y, Li G Y, Tian Y H, Fang X Q, Li Y, Tan Y Z. Linking ecosystem services trade-offs, bundles and hotspot identification with cropland management in the coastal Hangzhou Bay area of China. Land Use Policy, 2020, 97: 104689.
- [11] 欧维新, 王宏宁, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. 生态学报, 2018, 38(17): 6337-6347.
- [12] 范逸凡, 王珂, 黄璐. 乡村地区生态系统服务权衡与协同关系——以湖州市为例. 生态学报, 2022, 42(17): 6875-6887.
- [13] 高会, 付同刚, 梁红柱, 刘金铜. 太行山区生态系统服务冷热点区域识别及其权衡/协同关系分析. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(07): 1045-1053.
- [14] 齐麟, 张月, 许东, 朱琪, 周旺明, 周莉, 王庆伟, 于大炮. 东北森林屏障带生态系统服务权衡与协同关系. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3401-3411.
- [15] 孙滨峰. 东北森林带生态系统格局、质量、服务功能和胁迫十年变化研究(2000—2010)[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015:12-14.
- [16] 张占贞, 王兆君. 东北国有林区林业产业集聚水平实证研究. 林业科学, 2011, 47(05): 112-116.
- [17] 杨师帅, 逯非, 张路. 天然林资源保护工程综合效益评估. 环境保护科学, 2022, 48(05): 18-26.
- [18] 任平, 陈文斌. 小兴安岭森林生态系统服务价值评估. 林业科技情报, 2020, 52(02): 1-4.
- [19] 王绍强, 周成虎, 刘纪远, 李克让, 杨晓梅. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. 地理学报, 2001(04): 390-400.
- [20] 张斯屿. 东北天然林保护工程森林生态系统服务功能变化评估(1992—2015)[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019:13-15.
- [21] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报, 2013, 33(02): 519-531.
- [22] 相恒星, 王宗明, 毛德华. 东北地区天然林资源保护工程生态保护成效分析. 中国科学院大学学报, 2021, 38(03): 314-322.
- [23] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [24] Sun W, Mu X, Song X, Wu D, Cheng A, Qiu B. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960-2013 under global warming. Atmospheric Research, 2016, 168: 33-48.
- [25] Ma N, Szilagyi J, Zhang Y, Liu W. Complementary-relationship-based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982—2012: Validations and spatiotemporal analyses. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(8): 4326-4351.
- [26] Ma N, Szilagyi J. The CR of evaporation: A calibration-free diagnostic and benchmarking tool for large-scale terrestrial evapotranspiration modeling. Water Resources Research, 2019, 55(8): 7246-7274.
- [27] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, Van Velthuizen H T, Verelst L, Wiberg D. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008, 10.
- [28] Wang Z. Satellite-Observed effects from Ozone pollution and climate change on growing-season vegetation activity over China during 1982—2020. Atmosphere, 2021, 12(11): 1390.
- [29] 包玉斌. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2015:30-31.
- [30] 王治良. 嫩江流域湿地自然保护区空缺(GAP)分析[D]. 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2016:105-107.
- [31] Lai L, Huang X, Yang H, Chuai X, Zhang M, Zhong T, Chen Z, Chen Y, Wang X, Thompson J R. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063.
- [32] 张永利, 杨锋伟, 王兵. 中国森林生态系统服务功能研究. 北京: 科学出版社, 2010: 16-17.
- [33] 刘永杰, 王世畅, 彭皓, 李镇清. 神农架自然保护区森林生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2014, 25(05): 1431-1438.
- [34] 王启名, 杨昆, 李立晓, 朱彦辉, 樊贤. 滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析. 生态学报, 2023(12): 1-16.
- [35] 张路, 肖赓, 郑华, 徐卫华, 逯非, 江凌, 饶恩明, 肖洋, 吴炳方, 曾源, 欧阳志云. 2010 年中国生态系统服务空间数据集. 中国科学数据, 2018, 3(04): 11-23.
- [36] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, Jia Z W. Slope length effects on soil loss for steep slopes. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [37] Williams J R. EPIC: The erosion-productivity impact calculator. 1989.
- [38] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [39] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 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(02): 19-24.
- [40] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, Majaliwa M J G, Woomer P L. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. Agricultural systems, 2003, 76(3): 883-894.
- [41] Zhu W, Zhang J, Cui Y, Zhu L. Ecosystem carbon storage under different scenarios of land use change in Qihe catchment, China. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9): 1507-1522.
- [42] 张松林, 张昆. 空间自相关局部指标 Moran 指数和 G 系数研究. 大地测量与地球动力学, 2007(03): 31-34.
- [43] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 李益敏, 黄佩. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区. 地理学报, 2022, 77(03): 736-756.
- [44] Li G, Fang C, Wang S. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. Science of the Total Environment, 2016, 545: 609-620.
- [45] Li J, Dong S, Li Y, Wang Y, Li Z, Li F. Effects of land use change on ecosystem services in the China-Mongolia-Russia economic corridor. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132175.
- [46] 孙风华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响. 生态学杂志, 2005(07): 751-755+762.
- [47] 汪志国. 20 世纪 80 年代以来生态环境史研究综述. 古今农业, 2005(03): 89-102.
- [48] 徐菲菲, 钟雪晴, 王丽君. 中国自然保护区研究的现状、问题与展望. 自然资源学报, 2023, 38(04): 902-917.
- [49] Block S, Maechler M J, Levine J I, Alexander J M, Pellissier L, Levine J M. Ecological lags govern the pace and outcome of plant community responses to 21st-century climate change. Ecology letters, 2022, 25(10): 2156-2166.