doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.10.015

融合时序遥感分析的国土空间生态保护修复关键区识别

陈元鹏[1]　周　旭[1]　陈　妍[1]　刘岩涛[2,3]　苏香燕[1]　张成鹏[1]

(1. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要: 国土空间生态保护修复是落实国家生态文明建设的重要措施,也是构建国家生态安全格局和统筹山水林田湖草沙系统治理的重要举措。而生态保护修复关键区识别,是生态保护修复规划编制、生态保护修复工程时空布局等系列工作的前置条件和基础保障,对国土空间生态保护修复至关重要。本文以河南省某生态保护修复工程为研究区域,开展融合时序遥感分析的生态保护修复关键区识别研究和实践,首先,基于 Google Earth Engine(GEE)云平台,采用 Mann-Kendall 方法对研究区 2011—2020 年时序归一化植被指数(NDVI)开展趋势分析,形成时序分析结果;其次,基于气象、地形、土壤、植被净初级生产力(NPP)等数据,开展基于生态系统服务协同和权衡计算的生态系统健康分析评估,选择生态源地;最后,基于时序分析结果和生态源地选择结果,采用叠置分析,开展生态保护修复关键区域识别。结果表明,提出的"基于生态系统服务协同权衡计算的生态系统健康评估——时序遥感趋势分析"的研究框架不仅顾及了研究区域内"静态"的生态系统服务、生态系统健康属性,同时衡量了"动态"的生态系统变化趋势,可以有效识别国土空间生态保护修复关键区。研究成果可为国土空间生态保护修复本底调查、问题识别、规划和工程布局等提供技术支撑。

关键词: 遥感; 时序分析; 国土空间; 生态保护修复; 关键区识别

中图分类号: TP79　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)10-0161-10　　**OSID**:

Identification of Key Areas for Ecological Protection and Restoration in National Land Space by Integrating Time-series Remote Sensing Analysis

CHEN Yuanpeng[1]　ZHOU Xu[1]　CHEN Yan[1]　LIU Yantao[2,3]　SU Xiangyan[1]　ZHANG Chengpeng[1]

(1. *Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing* 100035, *China*
2. *School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*
3. *School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*)

Abstract: Ecological protection and restoration of the national land space is an important grasp of implementation of national ecological civilization construction, as well as construction of national ecological security pattern and coordination of mountain, water, forest, lake, grass and sand system management important initiatives. The identification of ecological protection and restoration key areas is the precondition and basic guarantee for the preparation of ecological protection and restoration planning, spatial and temporal layout of ecological protection and restoration projects and other series of work, which is crucial to the ecological protection and restoration of the national land space. Therefore, taking an ecological protection and restoration project in Henan Province as the research area, the research and practice of ecological protection and restoration key area identification integrating time-series remote sensing analysis was carried out. Firstly, based on the Google Earth Engine (GEE) cloud platform, the Mann-Kendall method was used to carry out trend analysis of the study area from 2011 to 2020 time-series NDVI and form the time-series analysis results. Secondly, based on meteorological, soil, topographic and NPP data, an ecosystem health analysis and assessment based on ecosystem service synergy and trade-off calculation was carried out to select ecological source sites. Finally, based on the results of time-series analysis and ecological source site selection, superposition analysis was used to carry

收稿日期: 2023-06-30　修回日期: 2023-07-27

基金项目: 国家重点研究计划项目(2022YFF1303205)

作者简介: 陈元鹏(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事国土空间生态保护修复遥感监测技术研究,E-mail: cyp520918@163.com

通信作者: 周旭(1975—),男,正高级工程师,主要从事国土空间生态保护修复监测监管技术研究,E-mail: xtxfb@lcrc.org.cn

out the identification of key areas for ecological protection and restoration. The results showed that the proposed research framework of "ecosystem health assessment based on synergistic trade-off calculation of ecosystem services—time-series remote sensing trend analysis" proposed not only considered the "static" ecosystem services and ecosystem health attributes in the study area, but also measured the "dynamic" ecosystem change trends. It can effectively identify key areas for ecological protection and restoration in the national space. The results of the study can provide technical support for the background survey, problem identification, planning and engineering layout of ecological protection and restoration in the national land space.

Key words: remote sensing; time-series analysis; space of national land; ecological protection and restoration; identification of key areas

0 引言

国土空间生态保护修复是指遵循生态系统演替规律和内在机理,对生态功能退化、生态系统受损、空间格局失衡、自然资源开发利用不合理的生态、农业、城镇国土空间,统筹和科学开展山水林田湖草沙一体化保护修复的活动[1-3]。国土空间生态保护修复是落实国家生态文明建设的重要措施,也是构建国家生态安全格局和统筹山水林田湖草沙系统治理的重要举措[4-5]。作为提升生态系统结构和功能完整性的有效方案,国土空间生态保护修复已上升为国家战略工程[6]。

国土空间生态保护修复关键区识别至关重要,是国土空间生态保护修复规划编制、生态保护修复工程规划和时空布局、生态保护修复工程措施选取等系列工作的前置条件和基础保障,是国土空间生态保护修复工作的重点和难点[7-9]。

目前国土空间保护修复关键区的识别主要依赖于最小累积阻力模型[10-12]或电路理论[3,13-14]构建的生态安全格局。"识别生态源地-构建阻力面-提取生态廊道"的框架模式成为当前生态安全格局构建的基本范式[15],其中生态源地的提取是重要基础[16]。生态源地是物种或生态流向外扩散的起点,可以促进生态过程、维持系统完整性和提供高质量的生态系统服务,是保障区域生态安全的关键区域[17]。识别生态源地的方法可以分为直接法[18]与综合评价法[19]。现在研究和采用较多的方法,是基于多指标生态系统服务并考虑人为因素识别生态源地。然而,目前的方案虽然充分考虑了变量间的数值关系,但对变量间的生态关系考虑不足,较少考虑不同生态系统服务之间的权衡协同场景[20-22]。

在目前生态安全格局构建的范式下,国土空间生态保护修复关键区识别的方法通常从单一时间节点出发,在识别生态源地的基础上提取生态廊道与生态战略点进而实现目标,但缺少对生态系统时间序列变化的考虑[23]。因此,本文在生态系统健康评估中考虑生态系统服务权衡协同的场景,更加科学合理地提取生态源地;另一方面在生态源地提取的基础上,增加对长时间序列植被指数变化趋势的分析,融合国土空间生态安全格局的动态和静态因素,提出一种更全面、准确、合理的生态保护修复关键区域的识别技术方法,为国土空间生态保护修复本底调查、问题识别、空间规划以及工程布局等提供技术支撑。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

研究区为河南省某生态保护修复工程所在地,位于秦岭山脉东段北部、河南省西部,地理坐标为33°38′33″~35°04′50″N、110°21′50″~113°36′57″E。该区域地形地貌变化剧烈,由西向东形成秦岭中低山地、黄土丘陵台塬、伊洛山间盆地、黄河滩区湿地的过渡带地貌,第1级地貌为西部小秦岭、伏牛山等中山区,平均海拔1 000~2 000 m,部分山峰海拔超过2 000 m;第2级地貌为中部崤山、嵩山等低山丘陵一带,平均海拔200~1 000 m;第3级地貌为东北部伊洛盆地和黄河滩区,平均海拔200 m以下。研究区地形地貌如图1所示。

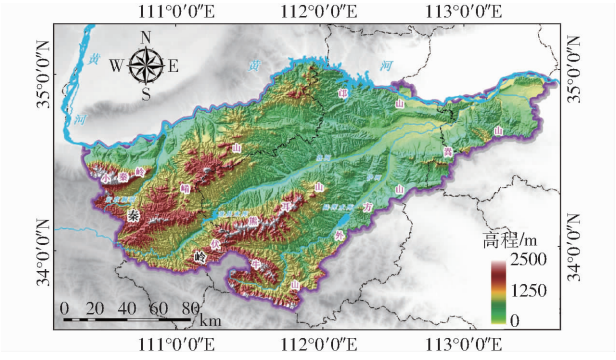


图1 研究区地形地貌图

Fig. 1 Topographic of study area

特有的区域气候和地貌特征奠定了实施区森林、湿地、河湖、农田、城镇等5类陆地生态系统发育与演变的自然基础,以及社会经济发展的空间格局。

研究区域主要为暖温带季风型气候，四季分明，年平均气温 14.7℃，1 月最冷，月平均气温 0.3℃，7 月最热，月平均气温 27.5℃。年平均降水量 606.9 mm，降水主要集中在 6—9 月，占全年降水量的 62.4%。多年平均蒸发量为 1 829.10 mm。

1.2　数据来源及处理

本文所用数据包括气象数据、遥感数据、土地覆被数据等。气象数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心网站，中国气象要素年度空间插值数据集，包括 2020 年气温、降水量、蒸发量等，空间分辨率为 1 km。土壤数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心网站 1∶1 000 000 土壤数据库。地形数据为地面数字高程模型数据（DEM），来源于地理空间数据云 SRTMDEM，空间分辨率为 90 m。遥感数据为基于 MOD13A1 构建的时序（2011—2020 年）归一化植被指数（NDVI）数据集，共计 230 景，空间分辨率为 500 m。土地覆被数据为 MODIS 数据产品 MCD12Q1 土地覆被类型（Land cover），选择其中 2010、2015、2020 年 3 期，空间分辨率为 500 m。植被净初级生产力（NPP）来源于 MODIS 数据产品 MOD17A3HGF 数据集，时间序列为 2011—2020 年，空间分辨率为 500 m。其中，时序 NDVI、NPP、土地覆被类型数据均通过 Google Earth Engine（GEE）云平台获取并批量处理计算。

GEE 是当前世界上较为先进的处理卫星影像等地理空间观测数据的云计算平台。GEE 云端数据库中集成了近 40 年的 Landsat 系列卫星的历史存档数据，给个人用户提供了强大的算力和云存储空间，同时提供了方便快捷的 JavaScript 语言 API 接口进行数据处理、算法实现以及结果分析[24-25]。本研究中，通过 GEE 云计算平台对研究所需的遥感、土地覆被、NPP 数据进行了批量处理，减少了前期大量数据的准备工作，有效提升了工作效率，降低了数据处理与算法实现过程中对本地硬件设备的依赖。

2　研究方法

本文研究方法框架主要包括 3 部分：首先，基于 GEE 云平台、MOD13A1 数据，采用 Mann－Kendall 方法对研究区 2011—2020 年时序 NDVI 开展趋势分析，形成时序分析结果；其次，基于气象、地形、土壤、NPP 等数据，开展基于生态系统服务协同和权衡计算的生态系统健康分析评估，选择生态源地；最后，基于时序分析结果和生态源地选择结果，采用叠置分析，开展生态保护修复关键区域识别。具体技术路线如图 2 所示。

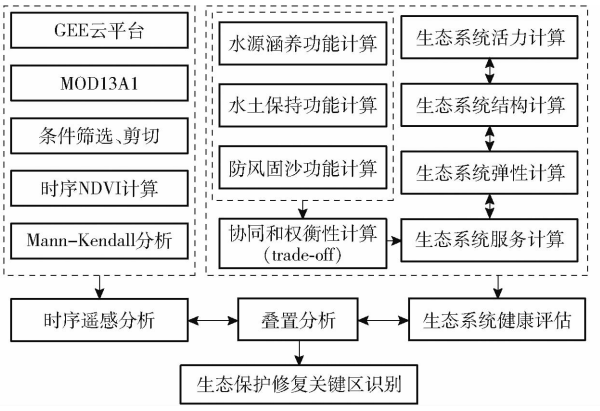


图 2　技术流程图

Fig. 2　Workflow of this study

2.1　Mann－Kendall 趋势分析（时序遥感趋势分析）

Theil－Sen Median（TSM）趋势分析[26]和 Mann－Kendall（MK）非参数检验法[27]常用来分析 NDVI 空间演变特征。本文采用 Theil－Sen Median 趋势分析方法并结合 MK 检验方法判断 Sen 趋势的显著性，与一元线性回归趋势分析方法相比，其可以规避时间序列数据分布和数据缺失对分析结果的影响[28]，同时可以降低异常值对结果影响[29]。TSM 计算公式为

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j-i}\right) \quad (1 < i < j < n) \tag{1}$$

式中　i、j——时间序列数

$NDVI_i$、$NDVI_j$——第 i、j 时间序列的 NDVI 值

Median——多年 NDVI 中位数函数

n——时间序列长度

MK 是一种非参数统计检验方法，用来判断趋势的显著性，其计算公式为

$$Z_c = \begin{cases} \dfrac{\tau - 1}{\sqrt{\mathrm{Var}(\tau)}} & (\tau > 0) \\ 0 & (\tau = 0) \\ \dfrac{\tau + 1}{\sqrt{\mathrm{Var}(\tau)}} & (\tau < 0) \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\tau = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sign}(NDVI_j - NDVI_i) \tag{3}$$

本文使用显著性水平 $\alpha = 0.05$，对应的 $u_{1-\alpha/2}$ 为 1.96[30]。

2.2　基于生态系统健康的生态源地识别

本文在生态系统服务权衡与协同框架下开展生态系统健康评估，进而开展生态源地识别。

2.2.1　生态系统健康评估体系

生态源地是对区域生态过程和功能起决定性作用的生境斑块，提供必要的生态系统服务，对区域生态系统健康安全具有重要意义。生态系统健康（Ecosystem health，EH）评估是生态源地识别的基

础[31],本文从生态系统活力(Ecosystem vigor)、生态系统结构(Ecosystem organization)、生态系统弹性(Ecosystem resilience)、生态系统服务(Ecosystem service,ES)4 个维度构建评估框架体系[32]。计算公式分别为

$$EH = \sqrt{PHES} \tag{4}$$

其中

$$PH = \sqrt[3]{OVR} \tag{5}$$

式中 EH——生态系统健康水平

PH——生态系统物理健康水平

ES——生态系统服务

V——生态系统活力

O——生态系统结构

R——生态系统弹性

ES、V、O 和 R 计算结果均进行归一化处理。

V 可用 NPP 表征,因为 NPP 能够很好地反映植物固定和转化光合产物的效率,并表征可供人类使用的物质和能量。

O 表示区域生态系统结构的稳定性,主要包括景观异质性和连通性。为进一步描述景观异质性和连通性,选择景观格局指数(包括面积加权平均斑块分维数(AWMPFD)、香农多样性指数(SHDI)、景观聚集度指数(CONT)、景观破碎化指数(FN))用以表征 O,公式为

$$O = 0.3SHDI + 0.2AWMPFD + 0.25FN + 0.25CONT \tag{6}$$

式(6)中,景观格局指数采用 Fragstats 软件计算。

R 表示生态系统在面对人为扰动时保持自身结构稳定性的能力,反映一个区域在生态系统过程中抵御和适应外部干扰的能力,因此包括两方面,即抵抗力和恢复力[33],本研究中为抵抗力和恢复力分别赋值 0.6 和 0.4[34],为反映同一土地覆被类型不同生态系统的弹性,采用 NDVI 进行校正,公式为

$$R_i = \frac{NDVI_m}{NDVI_{meanj}} \times 0.4Resil_j \times 0.6Resis_j \tag{7}$$

式中 R_i——第 i 个像元总弹性系数

$NDVI_m$——第 m 个像元的 NDVI 值

$NDVI_{meanj}$——第 j 类土地覆被类型的 NDVI 均值

$Resil_j$、$Resis_j$——第 j 类土地覆被类型的恢复力系数和抵抗力系数(表 1)

表 1 生态系统弹性系数

Tab.1 Ecological resilience coefficient of land use types

土地覆被类型	耕地	林地	草地	水面	不透水面	其他
恢复力系数	0.4	0.9	0.7	0.8	0.2	0.1
抵抗力系数	0.6	1.0	0.6	0.8	0.3	0.2

生态系统服务是自然系统和社会经济系统之间的桥梁[35],反映了人与自然之间的耦合关系,是生态系统健康的重要组成部分。针对研究区的自然特征和生态环境状况,本文选取水源涵养、水土保持、防风固沙 3 类生态系统服务作为区域关键生态系统服务功能进行定量评估。3 类生态系统服务按照净初级生产力(NPP)定量指标评估法计算,计算公式分别为

$$WR = NPP_{mean}F_{sic}F_{pre}(1 - F_{slo}) \tag{8}$$

$$S_{pro} = NPP_{mean}(1 - K)(1 - F_{slo}) \tag{9}$$

$$S_{ws} = NPP_{mean}KF_qD \tag{10}$$

其中

$$F_q = \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{12} u^3\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i}d$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2(1 - r_i)$$

$$D = 1/\cos\theta$$

式中 WR——生态系统水源涵养服务能力指数

NPP_{mean}——多年植被净初级生产力平均值

F_{sic}——土壤渗流因子

F_{pre}——多年平均降水量因子

F_{slo}——坡度因子

S_{pro}——生态系统水土保持服务能力指数

K——土壤可蚀性因子

S_{ws}——生态系统防风固沙服务能力指数

F_q——多年平均气候侵蚀力

u——高度 2 m 的月平均风速

ETP_i——月潜在蒸发量

P_i——月降水量

d——当月天数

T_i——月平均气温

r_i——月平均相对湿度

D——地表粗糙度因子

θ——坡度

2.2.2 生态系统服务权衡与协同

在生态系统服务的背景下,生态源地的选择过程必须充分考虑生态系统服务的权衡和协同关系。目前,有序加权平均模型(Ordered weighted average model,OWA)已有效用于量化生态系统服务之间的权衡和协同关系[36],因此基于 OWA 可量化不同场景下的生态系统服务供给,反映不同生态系统服务之间的权衡和协同效应[34,37],其公式为

$$OWA(a_{xj}) = \sum_x^N \omega_x S_{xj}$$

$$\left(\omega_x \in [0,1] \text{且} \sum_x^N \omega_x = 1;\ j = 1,2,\cdots,N\right) \tag{11}$$

式中 a_{xj}——第 x 栅格数据中第 j 个像元的属性值

S_{xj}——重新赋权后的栅格数据

ω_x——S_{xj}的权重

N——参与计算的生态系统服务栅格数据数量

此外，采用风险值（risk）和权衡值（trade-off）两个参数作为 OWA 的约束和优化条件，公式为

$$risk = (N-1)^{-1}\sum_{x}^{N}(N-x)\omega_x \quad (0 \leqslant risk \leqslant 1) \tag{12}$$

$$\max trade\text{-}off = 1 - \sqrt{\frac{N\sum_{x}^{N}\left(\omega_x - \frac{1}{N}\right)^2}{N-1}} \quad (0 \leqslant trade\text{-}off \leqslant 1) \tag{13}$$

$$\sum_{x}^{N}\omega_x = 1 \quad (\omega_x \in [0,1]) \tag{14}$$

通过计算风险值和权衡值，可以得出不同场景模式下的最优化的生态系统服务权重系数组合。计算最大权衡值和相应的权重，共设定 11 个场景。

2.2.3　生态源地识别

为有效集约地选择生态源地，对于不同的场景模式，选择生态系统健康值前 60% 的区域作为优先保护区域，并采用生态系统保护效率公式在优先保护区域中进一步筛选生态源地。公式为[38]

$$E_i = \frac{\overline{EH}_{ic}}{\overline{EH}_{is}} \tag{15}$$

式中　$\overline{EH}_{ic}$——优先保护区域内第 i 类生态系统健康均值

$\overline{EH}_{is}$——整体研究区域内的第 i 类生态系统健康均值

2.3　生态保护修复关键区识别

以时序遥感趋势分析中 NDVI 的下降趋势、保持稳定和轻微上升趋势，以及生态系统健康评估和生态源地识别结果为基础，采用叠置分析，进一步识别生态保护修复关键区[39]。

3　结果与分析

3.1　时序遥感趋势

基于 GEE 云平台得到了研究区域 2011—2021 年的 NDVI 时间序列数据，共计 230 景，从统计描述看，230 景 NDVI 数据的均值在 0.16 ~ 0.76 范围内波动，波动周期符合年度季相特征。标准差在 0.06 ~ 0.23 范围内波动，稳定性较好，数据质量较好，时序 NDVI 数据构建结果符合预期。研究区数据统计见图 3。

基于 TSM 趋势分析，结合 Mann - Kendall 非参数检验法，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下，形成时序 NDVI 趋势变化统计数据和空间分布（图 4）。首先，

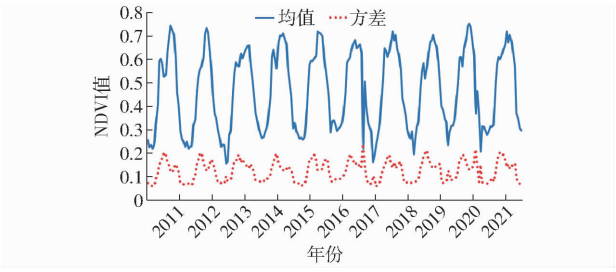


图 3　时序 NDVI 数据的均值和方差

Fig. 3　Mean and variance of time-series NDVI data

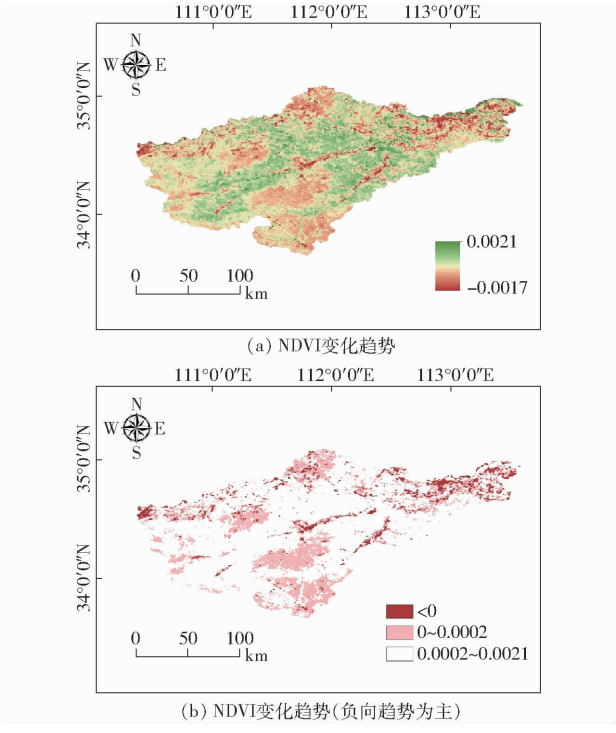


图 4　时序 NDVI 变化趋势

Fig. 4　Trend of time-series NDVI data

从 NDVI 趋势变化统计数据结果看，研究区域内时序 NDVI 的斜率变化范围为 -0.001 7 ~ 0.002 1，均值为 0.000 3，其中斜率为负值的像元 6 136 个，占比 5.33%，说明 2011—2020 年间，研究区域内少数局部区域 NDVI 呈下降趋势，但整体 NDVI 变化呈上升趋势，一定程度反映出研究区域内的生态系统质量稳中向好。其次，叠加土地覆被类型（图 5）看 NDVI 趋势变化空间分布可知，2011—2020 年间研究区域内 NDVI 呈下降趋势的区域主要分布在中部洛河、伊河沿线的不透水面集中地区及周边缓冲区域，东北侧黄河沿线的不透水面集中地区及周边缓冲区域，以及西北角小秦岭北侧的山前平原，其余区域还有些零星分布。NDVI 呈上升趋势主要分布在中部黄土丘陵和东部山间盆地区域，主要土地覆被类型为耕地、草地和少量灌木林地等。NDVI 变化趋势不显著的区域主要分布在秦岭中低山地区域，包括崤山、熊耳山、伏牛山等山脉，其土地覆被类型以林地为主。

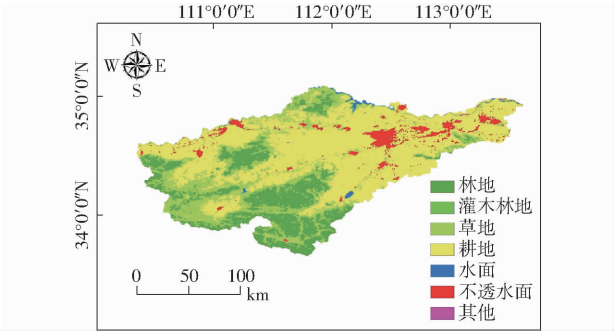


图 5 2020 年土地覆被类型

Fig. 5 Spatial distribution of land cover types in 2020

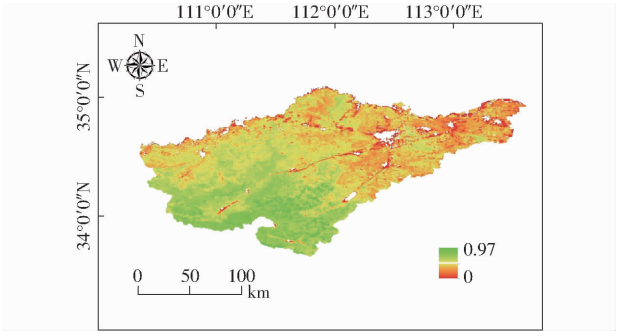


图 6 生态系统物理健康(PH)评估结果和空间分布

Fig. 6 Evaluation result and spatial distribution of ecosystem physical health

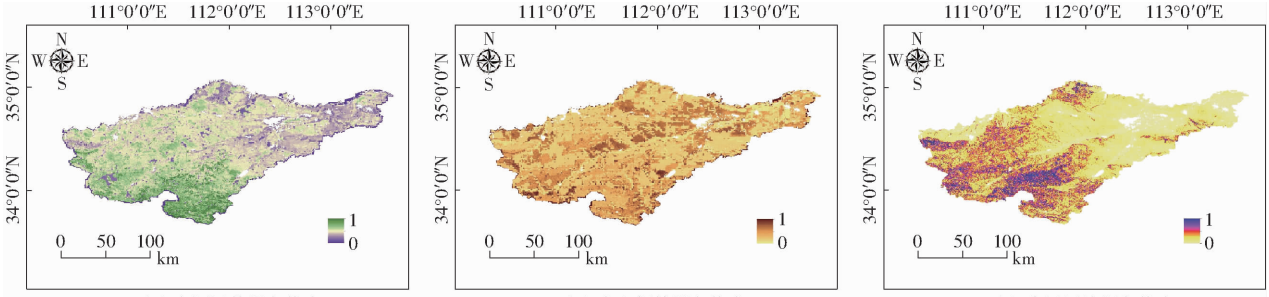
3.2 生态系统健康评估结果

3.2.1 生态系统物理健康(PH)

根据式(5)~(7),分别计算生态系统活力(V)、生态系统结构(O)、生态系统弹性(R),并经归一化处理,进一步计算得到生态系统物理健康(PH)评估结果及其空间分布(图 6)。如图 6 所示,生态系统物理健康均值为 0.592,研究区域内高值区主要分布在西侧秦岭中低山地区域,如小秦岭、熊耳山、伏牛山等,中低山地区域植被总体生长良好,生态系统健康程度高。由西向东,生态系统物理健康值逐渐下降,低值区域主要分布在伊洛山间盆地、河流滩区等土壤侵蚀严重、水土流失严重的区域。此外,城市化程度较高的地区,由于人类活动的干扰较大,生态系统物理健康水平较低。

3.2.2 生态系统服务(ES)

根据式(8)~(10)净初级生产力(NPP)定量指标评估算法,并经归一化处理,计算得到生态系统服务(ES)评估结果及其空间分布(图 7)。不同生态系统服务能力之间存在空间异质性,反映了生态系统服务能力之间的权衡性,也揭示了不同生态过程对于研究区整体生态安全格局的影响和作用。如图 7 所示,研究区域内水源涵养服务能力由西南向东北逐步减弱,水源涵养能力较强的区域主要分布在中低山区,但并非区域内所有中低山区都具有较强的水源涵养服务能力,较强区域主要集中在伏牛山-熊耳山-外方山区域。较于水源涵养能力,水土保持能力分布相对均衡,重要区域主要分布在中低



(a) 水源涵养服务能力 (b) 水土保持服务能力 (c) 防风固沙服务能力

图 7 生态系统服务(ES)评估结果和空间分布

Fig. 7 Evaluation result and spatial distribution of different ecosystem services

山、黄土丘陵区以及陆浑水库周边区域。防风固沙能力与水源涵养能力存在一定协同性,较强区域主要集中在中低山区,其中最强的区域主要分布在小秦岭、熊耳山、伏牛山区域,次强区域为崤山、青要山、外方山和嵩山区域。从单一生态系统服务空间格局看,研究区域内生态系统服务能力较强的区域主要分布在中低山区、黄土丘陵区等海拔较高且植被覆盖较强的区域。

3.2.3 生态系统服务协同与权衡

根据式(11)~(14)生态系统服务权衡与协同算法,通过改变决策风险和协同权衡值,可以生成一系列场景。结合工作实际,以 0 为起始、0.1 为间隔设置风险值,计算最大协同权衡值及其相应的权重,经计算共得到 11 个场景(表 2)。

表 2 不同风险场景及权衡水平下的最优系数

Tab. 2 Optimal order weights for different decision risk scenarios and trade-off levels

场景	风险值	协同权衡值	系数 1	系数 2	系数 3
1	0	0.423	0	0	1
2	0.1	0.584	0	0.200	0.800
3	0.2	0.700	0.033	0.333	0.633
4	0.3	0.800	0.133	0.333	0.533
5	0.4	0.900	0.233	0.333	0.433
6	0.5	1	0.333	0.333	0.333
7	0.6	0.900	0.433	0.333	0.233
8	0.7	0.800	0.533	0.333	0.133
9	0.8	0.700	0.633	0.333	0.033
10	0.9	0.584	0.800	0.200	0
11	1	0.423	1	0	0

3.2.4 生态系统健康(EH)评估和生态源地识别结果

根据生态系统物理健康(PH)和生态系统服务(ES)计算结果，结合生态系统服务权衡与协同的 11 个场景，按照式(4)计算得出 11 个生态系统健康(EH)评估结果及其空间分布特征(图 8)。

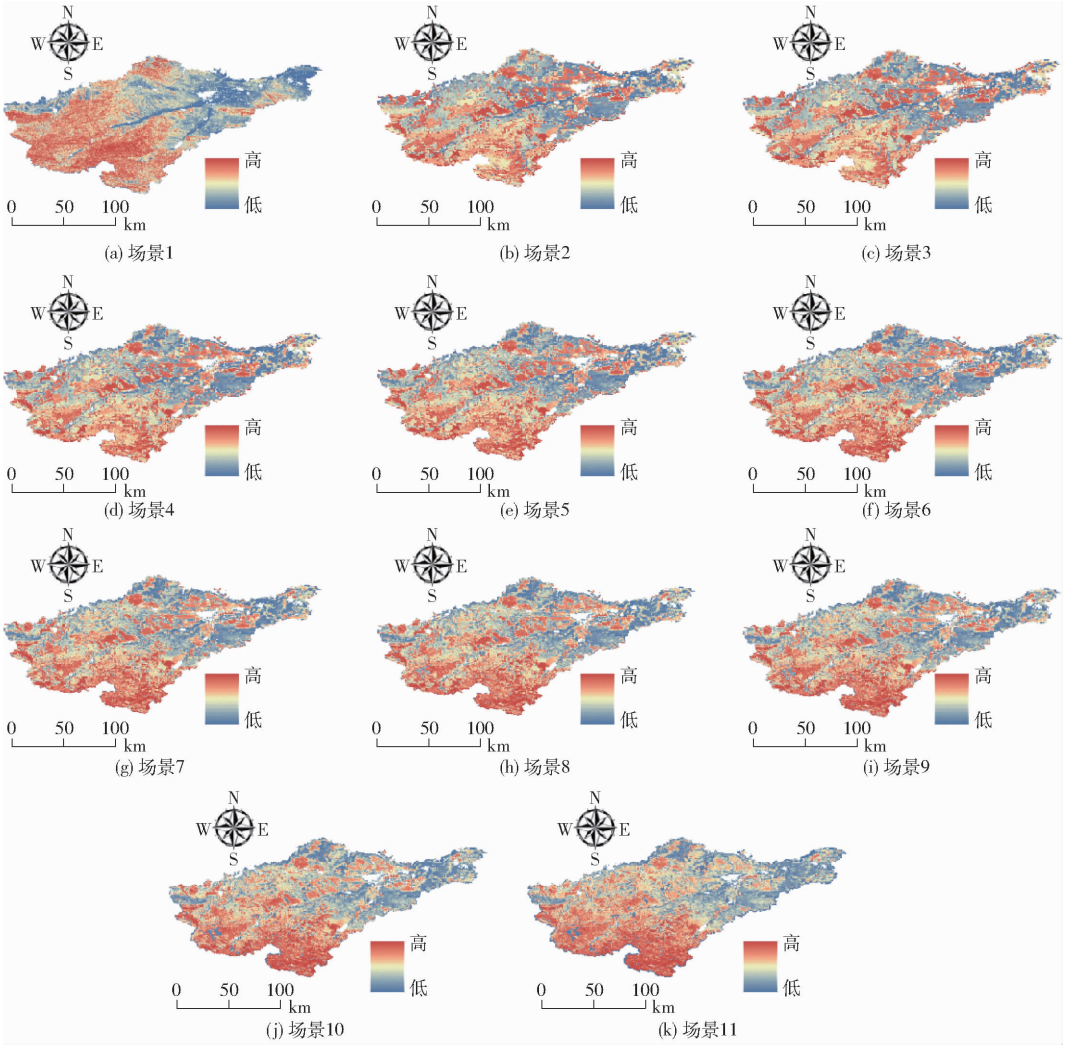


图 8　生态系统健康(EH)评估结果及其空间分布

Fig. 8　Evaluation result and spatial distribution of ecosystem health in different scenarios

如图 8 所示，生态系统健康(EH)的高值和低值空间分布呈一致趋势，但局部的高值区和低值区也存在一定差异，这是由于不同的场景、不同的生态系统服务权衡与协同水平下，权重等次不同，一定程度上说明了简单的加权求和不能充分反映区域生态系统健康(EH)的空间分布，因此，有必要将生态系统服务协同权衡效应纳入生态系统健康评估。

基于 11 个场景的生态系统健康评估结果，按照高值的前 60% 筛选了不同场景下的优先保护区域，并根据式(15)测量了其保护效率(表 3)。如表 3 所示，场景 9 的保护效率最高，为 3.02，因此选择场景 9 的高值前 60% 区域作为生态源地，其空间分布如图 9 所示。研究区域内生态源地约 1 386.11 km^2，主要分布在西南部的伏牛山-熊耳山-外方山区域，少量分布在小秦岭区域，涉及的土地覆被类型主要为林地和草地。

表 3　不同场景下的优先保护区域保护效率 E_i

Tab. 3　Protection efficiency of priority protected areas in different scenarios

场景	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E_i	1.02	1.37	1.78	1.85	2.21	2.18	2.23	2.41	3.02	2.96	1.87

3.3　生态保护修复关键区

以时序遥感趋势分析结果(图 4)为基础，选取 NDVI 下降趋势(斜率小于 0)、NDVI 保持稳定和轻微上升趋势(斜率在 0 ~ 0.000 2 之间)的区域，与生态源地选择结果(图 9)进行叠置分析。

将 NDVI 保持稳定和轻微上升的区域和生态源地合并为生态保护关键区，用以表征研究区域内需生态保护的关键区域，其中：①将 NDVI 保持稳定和轻微上升区与生态源地重合的区域划定为一级生态保护区，因为该区域既是保持生态系统健康的重要

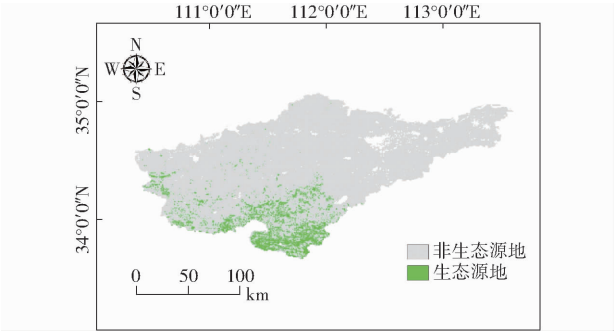


图 9 生态源地选择结果及其空间分布

Fig. 9 Select result and spatial distribution of ecological sources

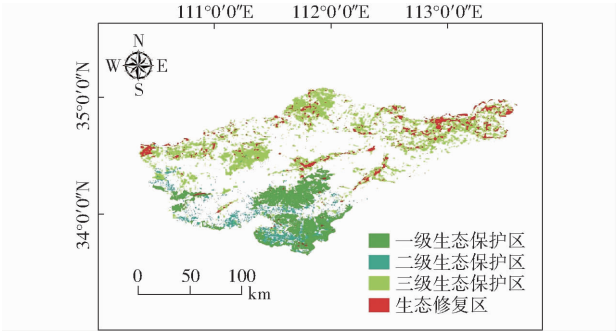


图 10 生态保护修复关键区识别结果及其空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of ecological protection and restoration key areas identification results

区域,但从时序上看,近 10 年间该区域可以表征生态系统的 NDVI 指数并未形成显著变化趋势,一直属临界状态,如不作为重点保护区域则可能出现生态系统退化或破坏情况,因此该区域有必要作为一级生态保护区,以逐步形成生态系统稳定性较强、NDVI 指数稳中有升的区域。②将 NDVI 上升区与生态源地重合的区域划定为二级生态保护区,二级生态保护区同样是保持生态系统健康的重要区域,但与一级生态保护区相比,近 10 年间区域内 NDVI 已形成上升趋势,生态系统已稳中向好,故此作为二级生态保护区。③将未与生态源地重合的 NDVI 保持稳定和轻微上升区划定为三级生态保护区,与一、二级生态保护区相比较,三级生态保护区未包含生态源地,其对于保持区域内生态系统完整、提供高质量生态系统服务的贡献度相对不强,但近 10 年间该区域内生态系统未遭到明显破坏,因此有必要进行保护以维持现状或将其逐步转化成为生态系统稳定性较强、NDVI 指数稳中有升的区域。④将 NDVI 下降区划定为生态修复区,采取适当的措施实施生态修复。形成的生态保护修复关键区识别结果及其空间分布如图 10 所示。

由图 10 可知,一、二级生态保护区主要分布在西部和西南部小秦岭、熊耳山和伏牛山等区域,主要为中山森林生态系统,承担了生物多样性保护、固碳释氧等生态系统服务功能;三级生态保护区主要分布在邙山、崤山区域,在伊洛盆地和黄河滩区也有零星分布,主要为低山丘陵森林生态系统、山间盆地农田生态系统、河流生态系统,承担了水源涵养、水土保持、固碳释氧、矿产资源提供、农林产品提供生态系统服务功能;生态修复区主要分布在中部洛河、伊河沿线和下游不透水面集中地区及周边缓冲区域,东北侧黄河沿线的不透水面集中地区及周边缓冲区域,以及西北角小秦岭北侧的山前平原,主要为盆地区城镇、农田、河流生态系统,承担了农产品提供、城镇生态涵养生态系统服务功能。

4 结束语

基于时序遥感分析、生态系统服务协同权衡计算、生态系统健康评估、生态源地识别和空间叠置分析等方法,对研究区的生态保护修复关键区进行了有效识别。结果表明,提出的“基于生态系统服务协同权衡计算的生态系统健康评估——时序遥感趋势分析”的研究框架,对于识别构建区域生态保护修复关键区尤为重要。结合生态系统服务协同权衡的生态系统健康评估能够更有效地选择关键生态源地,在此基础上创新性地结合时序遥感分析进一步识别生态保护修复关键区,不仅顾及了研究区域内“静态”的生态系统服务、生态系统健康属性,同时衡量了“动态”的生态系统变化趋势,更全面、准确地识别了研究区的生态保护修复关键区域。研究成果可为国土空间生态保护修复本底调查、问题识别、规划和工程布局等提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 64 - 69.
FU Bojie. Several key points in territorial ecological restoration[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(1): 64 - 69. (in Chinese)

[2] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复:概念思辨与理论认知[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7): 1 - 10.
CAO Yu, WANG Jiayi, LI Guoyu. Ecological restoration for territorial space: basic concepts and foundations[J]. China Land Science, 2019, 33(7): 1 - 10. (in Chinese)

[3] 方莹, 王静, 黄隆杨, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190 - 203.
FANG Ying, WANG Jing, HUANG Longyang, et al. Determining and identifying key areas of ecosystem preservation and

restoration for territorial spatial planning based on ecological security patterns: a case study of Yantai City[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 190 - 203. (in Chinese)

[4] 张惠远, 李圆圆, 冯丹阳, 等. 明确内容标准 强化实施监管——山水林田湖草生态保护修复的路径探索[J]. 中国生态文明, 2019(1): 66 - 69.

[5] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理[J]. 中国土地科学, 2019, 33(2): 1 - 11.
BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Overall protection, systematic restoration and comprehensive management of land space[J]. China Land Science, 2019, 33(2): 1 - 11. (in Chinese)

[6] 李红举, 宇振荣, 梁军, 等. 统一山水林田湖草生态保护修复标准体系研究[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8771 - 8779.
LI Hongju, YU Zhenrong, LIANG Jun, et al. Study on the unified standard system of ecological protection and rehabilitation of mountain-river-forest-farmland-lake-grass[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8771 - 8779. (in Chinese)

[7] 周旭, 彭建, 翟紫含. 国土空间生态修复关键技术初探[J]. 中国土地, 2021(8): 30 - 33.

[8] 黄丽萍, 向芳芳, 陈荣清. 基于生态安全格局的县域国土空间生态保护修复关键区域识别——以抚州市宜黄县为例[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1334 - 1344.
HUANG Liping, XIANG Fangfang, CHEN Rongqing. Identification of key areas for ecological protection and restoration of county territorial space based on ecological security pattern: a case study in Yihuang County of Fuzhou City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1334 - 1344. (in Chinese)

[9] 付风杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3406 - 3414.
FU Fengjie, LIU Zhenhuan, LIU Hai. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: a case study in Hezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3406 - 3414. (in Chinese)

[10] 吴健生, 马洪坤, 彭建. 基于"功能节点-关键廊道"的城市生态安全格局构建——以深圳市为例[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1663 - 1671.
WU Jiansheng, MA Hongkun, PENG Jian. Improving urban ecological security pattern based on functional nodes - key corridors: a case study of Shenzhen City[J]. Progress in Geography, 2018, 37(12): 1663 - 1671. (in Chinese)

[11] 张美丽, 李智, 张益琛, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以河北省阜平县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 299 - 307.
ZHANG Meili, LI Zhi, ZHANG Yichen, et al. Identification of key areas of ecological restoration of land and space based on ecological security pattern—taking Fuping Country of Hebei Province as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 299 - 307. (in Chinese)

[12] 温雪静, 周智, 张美丽, 等. 太行山区国土空间生态修复关键区域识别——以唐县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(12): 2093 - 2106.
WEN Xuejing, ZHOU Zhi, ZHANG Meili, et al. Identification of key areas of territorial ecological restoration in Taihang Mountains — a case study of Tang County[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 2093 - 2106. (in Chinese)

[13] 曹秀凤, 刘兆顺, 李淑杰, 等. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以吉林省松原市为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2779 - 2787.
CAO Xiufeng, LIU Zhaoshun, LI Shujie, et al. Identification of key areas of ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security: a case of Songyuan City, Jilin Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2779 - 2787. (in Chinese)

[14] 闫玉玉, 孙彦伟, 刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3369 - 3378.
YAN Yuyu, SUN Yanwei, LIU Min. Identification and restoration strategy of key areas for territorial space ecological restoration in Shanghai, China based on ecological security pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3369 - 3378. (in Chinese)

[15] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 701 - 710.
PENG Jian, LI Huilei, LIU Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 701 - 710. (in Chinese)

[16] PENG J, YANG Y, LIU Y, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 781 - 790.

[17] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 等. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4720 - 4731.
WU Maoquan, HU Mengmeng, WANG Tao, et al. Recognition of urban ecological source area based on ecological security pattern and multi-scale landscape connectivity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4720 - 4731. (in Chinese)

[18] XU W, WANG J, ZHANG M, et al. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286:125523.

[19] 苏冲, 董建权, 马志刚, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例

[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8948 - 8956.
SU Chong, DONG Jianquan, MA Zhigang, et al. Identifying priority areas for ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on ecological security patterns: a case study in Huaying Mountain, Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8948 - 8956. (in Chinese)
[20] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1379 - 1390.
LI Shuangcheng, ZHANG Yucai, LIU Jinlong, et al. The tradeoffs and synergies of ecosystem services: research progress, development trend, and themes of geography[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1379 - 1390. (in Chinese)
[21] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 1 - 9.
FU Bojie, YU Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 1 - 9. (in Chinese)
[22] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3102 - 3111.
CAO Qiwen, WEI Xiaomei, WU Jiansheng. A review on the tradeoffs and synergies among ecosystem services[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 3102 - 3111. (in Chinese)
[23] 王力, 赵思妍, 陈元鹏, 等. 基于 GEE 云平台的黄土高原生态修复区植被变化与归因[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 210 - 223.
WANG Li, ZHAO Siyan, CHEN Yuanpeng, et al. Vegetation change and attribution in ecological restoration area of Loess Plateau based on GEE cloud platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 210 - 223. (in Chinese)
[24] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18 - 27.
[25] PRASAI R, SCHWERTNER T W, MAINALI K, et al. Application of Google Earth Engine python API and NAIP imagery for land use and land cover classification: a case study in Florida, USA[J]. Ecological Informatics, 2021, 66: 101474.
[26] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379 - 1389.
[27] ZUO D, HAN Y, XU Z, et al. Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an alpine river basin of the Tibet Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126532.
[28] 章维鑫, 曹建华, 吴秀芹. 基于 Landsat 影像的石漠化区植被动态监测及治理效益研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 221 - 229.
ZHANG Weixin, CAO Jianhua, WU Xiuqin. Dynamic monitoring and control benefits of vegetation in rocky desertification areas based on Landsat images[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 221 - 229. (in Chinese)
[29] 田海静, 王林, 石俊华. 近 20 年中国北方草原植被长势动态监测[J]. 草业科学, 2020, 37(11): 2165 - 2174.
TIAN Haijing, WANG Lin, SHI Junhua. Vegetation dynamics of the north Chinese grassland in the past 20 years[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(11): 2165 - 2174. (in Chinese)
[30] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].生态学报, 2013, 33(24): 7798 - 7806.
YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7798 - 7806. (in Chinese)
[31] WU J, CHENG D, XU Y, et al. Spatial-temporal change of ecosystem health across China: urbanization impact perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: 129393.
[32] HE J, PAN Z, LIU D, et al. Exploring the regional differences of ecosystem health and its driving factors in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673: 553 - 564.
[33] XIE X, FANG B, XU H, et al. Study on the coordinated relationship between urban land use efficiency and ecosystem health in China[J]. Land Use Policy, 2021, 102: 105235.
[34] LI C, WU Y, GAO B, et al. Construction of ecological security pattern of national ecological barriers for ecosystem health maintenance[J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109801.
[35] FU B. Promoting geography for sustainability[J]. Geography and Sustainability, 2020, 1(1): 1 - 7.
[36] YU Y, LI J, ZHOU Z, et al. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: how to respond, and where should be priority conservation? [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123264.
[37] ZHANG L, FU B, LU Y, et al. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(3): 535 - 546.
[38] ZHANG Y, HU Z, QI W, et al. Assessment of effectiveness of nature reserves on the Tibetan Plateau based on net primary production and the large sample comparison method[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(1): 27 - 44.
[39] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 等. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6486 - 6494.
MAO Chengrui, DAI Limin, QI Lin, et al. Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: a case study in Liaohe River Basin, Liaoning Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6486 - 6494. (in Chinese)