

DOI: 10.5846/stxb202010202664

胡影, 冯晓明, 巩杰. 基于生态系统服务的宁夏回族自治区自然-社会经济协调性分析. 生态学报, 2022, 42(16): 6523-6533.

Hu Y., Feng X.M., Gong J. Coordination analysis of the nature and social-economic system of Ningxia Hui Autonomous Region based on ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6523-6533.

# 基于生态系统服务的宁夏回族自治区自然-社会经济协调性分析

胡 影<sup>1,2,3</sup>, 冯晓明<sup>2</sup>, 巩 杰<sup>1,\*</sup>

1 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100085

**摘要:**近年来,受全球气候变化和人类活动的双重影响,我国干旱半干旱区生态环境保护和社会经济发展面临着严峻挑战。生态系统服务是链接自然生态系统和人类福祉的桥梁,其持续供给对区域可持续发展具有重要意义。在具有生态重要性、脆弱性的地区,如何协调生态保护与社会经济发展的关系以达到可持续发展是重要的科学问题。以宁夏回族自治区为例,基于InVEST模型及相关地理图件,分析研究区生态系统服务变化及其权衡关系,通过耦合协调度模型分析生态系统服务与社会各项经济指标的耦合关系及空间差异,辨析区域耦合协调度的主要影响因素。结果表明:(1)研究区生态系统服务空间分异明显,土壤保持、水质净化、水资源供给和碳储存均呈现南高北低的特征。(2)县域尺度上各项生态系统服务之间显著正相关,呈现为协同关系;其中水质净化与水资源供给的相关性最高(相关系数是0.73),其次是碳储量和水资源供给(相关系数是0.60);而土壤保持与水质净化、水资源供给的相关性较低(相关系数均在0.50以下)。(3)宁夏回族自治区耦合协调度与城镇人口比重、城镇居民人均可支配收入负相关,与农村常住居民人均可支配收入正相关;产业分配模式与耦合协调度显著相关。(4)宁夏回族自治区约50%的县(区)处于勉强协调发展状态,其中73%的县(区)更注重经济发展;约41%的县(区)属于协调发展类,其中2/3的县区环境保护相对超前;中部地区的发展优势较强。研究结果对于准确把握经济社会发展过程中生态系统服务特征具有重要理论和实践意义,为促进宁夏生态保护与经济发展的统一协调提供科学辅助依据。

**关键词:**生态系统服务;空间格局;权衡协同关系;热点;耦合协调度;宁夏回族自治区

## Coordination analysis of the nature and social-economic system of Ningxia Hui Autonomous Region based on ecosystem services

HU Ying<sup>1,2,3</sup>, FENG Xiaoming<sup>2</sup>, GONG Jie<sup>1,\*</sup>

1 College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** Due to the dual impact of global climate change and human activities, the arid and semi-arid regions in China have faced severe challenges in ecological environmental protection and social-economic development in recent years. Ecosystem services (ESs) are a bridge linking natural ecosystems and human well-being, the continuous supply of ESs is of great significance to regional socio-economic development and ecological environmental protection. It is a very important scientific question that how to coordinate ecological protection with socio-economic development to achieve sustainable

基金项目:国家自然科学基金重大项目课题(41991231)

收稿日期:2020-10-20; 网络出版日期:2022-04-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jgong@lzu.edu.cn

development in the areas of ecological importance and vulnerability. Taking Ningxia Hui Autonomous Region as an example, this paper analyzed the changes of the ESs and their trade-off relationships based on the InVEST model and related geographic maps, as well as analyzed the coupling relationships and spatial differences between ESs and social-economic indicators by using the coupling coordination degree model to identify the main influencing factors. The results show that: (1) The ESs of Ningxia Hui Autonomous Region distributed with an obviously spatial heterogeneity with the characteristics of high-value area located in the south and low-value areas located in the north, including water purification, soil conservation, carbon storage, and water supply. (2) The correlation among various ESs at the county scale is significantly positive, showing a synergistic relationship; the correlation between water purification and water supply is the highest (0.73), followed by soil conservation and water supply (0.60); while the correlation between soil conservation and water purification, and water supply is low (below 0.50). (3) The coupling coordination degree of Ningxia Hui Autonomous Region is negatively correlated with the proportion of the urban population, negatively correlated with the per capita disposable income of urban residents, and positively correlated with the per capita disposable income of the rural residents; the industrial distribution model is significantly related to the coupling coordination degree. (4) The coupling coordination degree of half of the counties (districts) in the Ningxia Hui Autonomous Region is barely coordinated development, 73% of which focus more on economic development; the coupling coordination degree of 41% of the counties (districts) is coordinated development, with 2/3 of them relatively ahead in environmental protection; and the central regions show great development advantages. This study has a great theoretical and practical significance in accurately grasping the characteristics of ecosystem services in the process of economic and social development, and could provide a scientific basis for the unity and coordination of ecological protection and economic development in the Ningxia Hui Autonomous Region.

**Key Words:** ecosystem services; spatial pattern; trade-offs/synergies relationship; hot spots; coupling coordination degree; Ningxia Hui Autonomous Region

生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)是指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用<sup>[1]</sup>,为人类直接或间接从生态系统得到的所有效益<sup>[2]</sup>。以生态系统服务为主体构成的自然资本,是人类赖以生存和发展的资源与环境基础<sup>[3]</sup>,对人类社会福祉产生重要影响。20世纪以来,高强度的人类活动给生态系统带来了巨大的冲击和破坏,全球60%以上的生态系统服务产生明显的退化现象,各类生态系统服务相互影响<sup>[4]</sup>,表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系<sup>[5-6]</sup>,探究生态系统服务空间分布规律,揭示不同生态系统服务之间的权衡与协同关系的时空变化特征<sup>[7]</sup>,对实现区域经济社会与自然协调发展具有重要意义<sup>[8-10]</sup>。

党的十九大提出“实施区域协调发展战略”,处理好发展与保护的关系,是推进生态文明建设、建设美丽中国必须解决好的重大课题。国内外学者们陆续开展了社会-生态研究,通过构建不同的评价指标、使用多样的统计分析方法<sup>[11-15]</sup>,将重点放在两者协调关系的评价、研究方法及相关衍生分析3个方面<sup>[16]</sup>。如Hanley等<sup>[17]</sup>对苏格兰的自然环境与社会经济之间的关系进行了时间序列分析;岳晓燕等<sup>[18]</sup>运用信息熵法对15个副省级城市经济、社会和环境协调系统发展进行了研究;段七零<sup>[19]</sup>、李春平等<sup>[20]</sup>运用分析法分别对江苏省、山东省县域社会-环境系统进行了定量评价;易平等<sup>[21]</sup>以嵩山世界地质公园为例,对地质公园的社会经济和生态环境效益进行耦合协调度的研究,结果表明两者耦合度越高越有利于可持续发展;关伟等<sup>[22]</sup>通过对辽宁沿海经济带经济与环境耦合协调情况的时空演变分析,得到整体协调度稳步上升的结论。总的来说,全球针对干旱半干旱地区生态系统服务特点的模式开发与应用仍然匮乏<sup>[23]</sup>,国内现有研究多集中在省级、地级城市或东部经济热点片区。我国西北干旱半干旱区生态系统服务空间异质性强,社会-生态系统匹配程度更加复杂。如何处理西北干旱半干旱区生态保护与社会经济发展矛盾,提升系统恢复力,成为该区生态系统管理的关键问题<sup>[24]</sup>。

基于景观生态学原理与生态系统服务科学理论,采用地理信息系统和数学模型等,本文运用生态系统服务功能与权衡综合评价模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff, InVEST)<sup>[25]</sup>和耦合协调度模型<sup>[26]</sup>等,评估宁夏回族自治区生态系统服务及其关系,并基于生态系统服务理念进行自然-社会经济系统协调性分析<sup>[26]</sup>,综合考虑生态系统服务的热点区与城市发展的耦合协调度类型,旨在提供区域尺度的可持续发展决策定量评估工具,为协调干旱半干旱区人地矛盾提供科学依据和借鉴参考。

## 1 研究区概况

宁夏回族自治区(104°17′—107°39′E, 35°14′—39°23′N)位于中国西部的黄河上中游地区,处于黄土高原、蒙古高原和青藏高原的交汇地带。行政区划上共包括10个县和12个市区(图1)。研究区是我国生态安全战略格局“两屏三带一区多点”中“黄土高原-川滇生态屏障”、“北方防沙带”和“其它点块状分布重点生态区域”的重要组成部分,保障着黄河上中游及华北、西北地区的生态安全<sup>[27]</sup>。它位于“丝绸之路”上,多民族社会可持续发展和生态文明建设对西北地区乃至中国具有重要的示范意义<sup>[28-29]</sup>。

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 生态系统服务计算

本文通过 InVEST 模型中的泥沙输移比例模型(SDR)、水质净化模块(NDR)、水量提供模块(Water Yield)、碳储存和固持模块(Carbon Model)等分别开展土壤保持、水质净化、水资源供给和固碳服务评估和制图。

#### 2.1.1 土壤保持服务

InVEST 模型中 SDR 模块基于修正通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)对不同土地利用类型的栅格单元进行统计。计算如下:

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (1)$$

式中,  $R_i$  为降水侵蚀性因子<sup>[30]</sup> ( $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ );  $K_i$  为土壤可侵蚀性因 ( $\text{t hm}^2 \text{ h MJ}^{-1} \text{ hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ),  $LS_i$  为坡度坡长因子,  $C_i$  为植被覆盖和作物管理因子,  $USLE_i$  为土壤侵蚀量。

#### 2.1.2 水质净化服务

水质净化养分滞留模型(Nutrient Delivery Ratio Model, NDR)计算每一个像素的养分元素的量,并总结每一个流域的养分输出和滞留。主要算法为:

$$ALV_x = HSS_x \times pol_x \quad (2)$$

$$HSS_x = \frac{\lambda_x}{\lambda_\omega} = \log\left(\sum_u Y_u\right) \quad (3)$$

式中,  $ALV_x$  是节点处  $x$  的修正负载价值,  $pol_x$  是养分流出系数,  $HSS_x$  是节点  $x$  处的水文敏感性得分,  $\lambda_x$  是节点  $x$  处的养分流出指数,  $\lambda_\omega$  是整个研究流域的平均养分流出指数。 $\sum_u Y_u$  是节点  $x$  及其上游全部节点的水量之和。

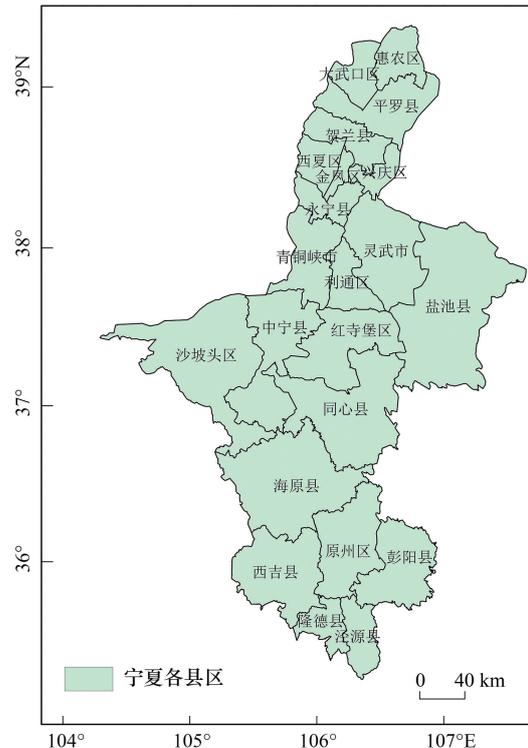


图1 研究区示意图宁夏回族自治区

Fig.1 Study area-Ningxia Hui Autonomous Region

### 2.1.3 水资源供给服务

产水量模型计算是根据水循环的原理,通过降水、植物蒸腾、地表蒸散发、根系深度、土壤深度(土层厚度)和植被可利用水等参数经过模型计算获得流域产水量。Water Yield 模块运行的基本计算公式如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (4)$$

式中,研究区每个栅格单元  $x$  的年产水量为  $Y(x)$ ,  $P(x)$  是栅格单元  $x$  的年降水量。AET( $x$ ) 表示栅格单元  $x$  的年实际蒸散量。

### 2.1.4 碳储存服务

碳储量模块(Carbon Model)利用四个碳库的碳储量,估算当前景观下的碳储量,或者是一个时间段的碳固持。计算公式为:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (5)$$

式中,  $C_{\text{tot}}$  为区域总碳储量(t),  $C_{\text{above}}$  为地上部分碳储量(t),  $C_{\text{below}}$  为地下部分碳储量(t),  $C_{\text{soil}}$  为土壤碳储量(t),  $C_{\text{dead}}$  为死亡有机碳储量(t)。

## 2.2 生态系统服务热点分析

基于 Getis-Ord  $G_i^*$  统计指数的热点分析工具,计算各个斑块之间的  $Z$  得分,直接在空间中反映高值区与低值区的集聚。Getis-Ord 局部统计可表示为<sup>[31]</sup>:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{i,j} x_j - X \sum_{j=1}^n \omega_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n \omega_{i,j}\right)^2}{n-1}}} \quad (6)$$

$$X = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - X^2} \quad (8)$$

式中,  $x_j$  是  $j$  县的生态系统服务值;  $X$  是全区生态系统服务的平均值;  $S$  是生态系统服务的标准差;  $\omega_{i,j}$  是  $i$  县与  $j$  县之间的空间权重,若  $i$  县  $j$  与县相邻为 1,不相邻则为 0;  $n$  为县总数。 $G_i^*$  统计是  $Z$  得分<sup>[32]</sup>。

本文利用 ArcGIS 10.6 软件中的“采样-创建渔网”工具创建宽度、高度均为 3km 的格网,将研究区分为 24125 个规则格网;然后利用“分区统计”计算各项生态系统服务在各格网内的平均值;最后利用热点分析判断各项服务的热点区和冷点区。

### 2.3 生态系统服务空间权衡关系分析-相关性分析

$Z$ -score 中心标准化后数据的 Kolmogorov-Smirnov 检测结果表明,变量呈现非正态分布,因此使用 R 语言软件选用 Spearman 相关系数定量化分析不同生态系统服务间的相关关系<sup>[33]</sup>。

### 2.4 耦合协调度模型

定义环境与经济协调发展的定量评判指标如下:

$$K = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (10)$$

$$C = \left[ \frac{f(x) \times g(y)}{(\alpha f(x) + \beta g(y))^2} \right]^k \quad (11)$$

式中,  $C$  为耦合度, 表征系统间相互影响的强弱程度;  $T$  为环境与经济效益(或发展水平)的综合评价指标, 它反映环境与经济的整体效益或水平,  $K$  为耦合协调度, 是耦合度与综合得分的几何平均数, 综合评估耦合度的强弱大小和协调水平的健康程度, 可更好地表征生态系统服务与居民收入相互作用、良性耦合的程度<sup>[26,34]</sup>。其中,  $f(x)$  和  $g(y)$  分别是环境效益函数和经济效益函数。 $\alpha$ 、 $\beta$  为待定系数, 表示生态与经济系统在评价指标中的权重。本文认为社会经济发展与保护生态环境一样重要<sup>[26]</sup>, 所以  $\alpha$ 、 $\beta$  均取值为 0.5。 $k$  为调节系数,  $k \geq 2$ , 结合宁夏地区实际情况及经济指标特征, 经过计算验证, 保证  $T \in (0, 1)$ , 本文  $k = 4$ 。共选取宁夏地区 22 个县区的 16 个居民福祉评价指标, 具体见表 1。

表 1 宁夏区经济系统评价指标

Table 1 Evaluation indices of economic system in Ningxia Region

| 系统<br>System             | 评价指标<br>Evaluation indicators | 单位<br>Units     | 指标方向<br>Direction |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|
| 经济系统<br>Economic systems | 人均地区生产总值                      | 元/人             | 正向                |
|                          | 第一产业                          | %               | 正向                |
|                          | 第二产业                          | %               | 负向                |
|                          | 第三产业                          | %               | 正向                |
|                          | 人均耕地面积                        | hm <sup>2</sup> | 正向                |
|                          | 城镇人口比重                        | %               | 正向                |
|                          | 人均地方财政收入                      | 元               | 正向                |
|                          | 人均财政支出                        | 元               | 正向                |
|                          | 人均固定资产投资                      | 元               | 正向                |
|                          | 人均社会消费品零售额                    | 元               | 正向                |
|                          | 城镇非私营单位在岗职工平均工资               | 元               | 正向                |
|                          | 城镇常住居民人均可支配收入                 | 元               | 正向                |
|                          | 城镇人均生活消费支出                    | 元               | 正向                |
|                          | 农村常住居民人均可支配收入                 | 元               | 正向                |
|                          | 农民人均生活消费支出                    | 元               | 正向                |
|                          | 能源消费总量                        | 吨标准煤            | 负向                |

## 2.5 数据来源

本文涉及数据包括:(1)土地利用类型数据:从 GlobeLand 30 数据集获取 30m 全球地表覆盖数据;(2)DEM 数据:从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)对 30m 分辨率的 GDTM 数据进行 DEM 高程数据切割、融合拼接;(3)气象数据:从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)下载宁夏 10 个站台自 1990—2019 年的逐月降水量数据、1990—2010 年每月的平均降水量、辐射日温数据和总辐射年总量数据;(4)全国 1:400 万土壤类型数据(中国土壤系统分类系统)(2000);(5)社会经济数据:来自《宁夏统计年鉴—2018》等。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统服务的空间分布格局

宁夏自治区土壤保持表现为“南-中-北”逐渐递减的三级梯度特征(图 2), 土壤保持能力最高的区域位于南部, 南部山区相较于北部川区植被覆盖度更高, 因而土壤保持量南北部差距较大。氮输出量从南到北、从西到东呈现递减的空间分布规律, 这与当地人类活动密切相关。在景观分析法中, 农田、城镇用地等具有较高的非点源污染风险, 而林地、草地等景观则可以对非点源污染物起到一定的截留作用<sup>[35]</sup>。这可能由宁夏地势、农田扩张、城镇化等导致, 河流中汇入的营养物质增多, 造成水环境污染<sup>[35]</sup>。产水量的空间分布格局表现为由南向北, 由东向西逐渐递减的趋势, 这与宁夏的降雨空间分布基本一致, 南部山区降雨量全区最大, 而蒸发量又相对较小, 因而产水量最高; 北部中温带荒漠地带气候干燥, 降水量小, 蒸发量大, 因而产水量最低。碳储量的空间分布主要表现为由东向西逐渐递减的三级梯度特征, 东南部山地、平原地区相对来说更靠近东部海域, 植被覆盖度较高, 灌溉条件较好, 土壤有机质含量高, 所以碳储量较高。

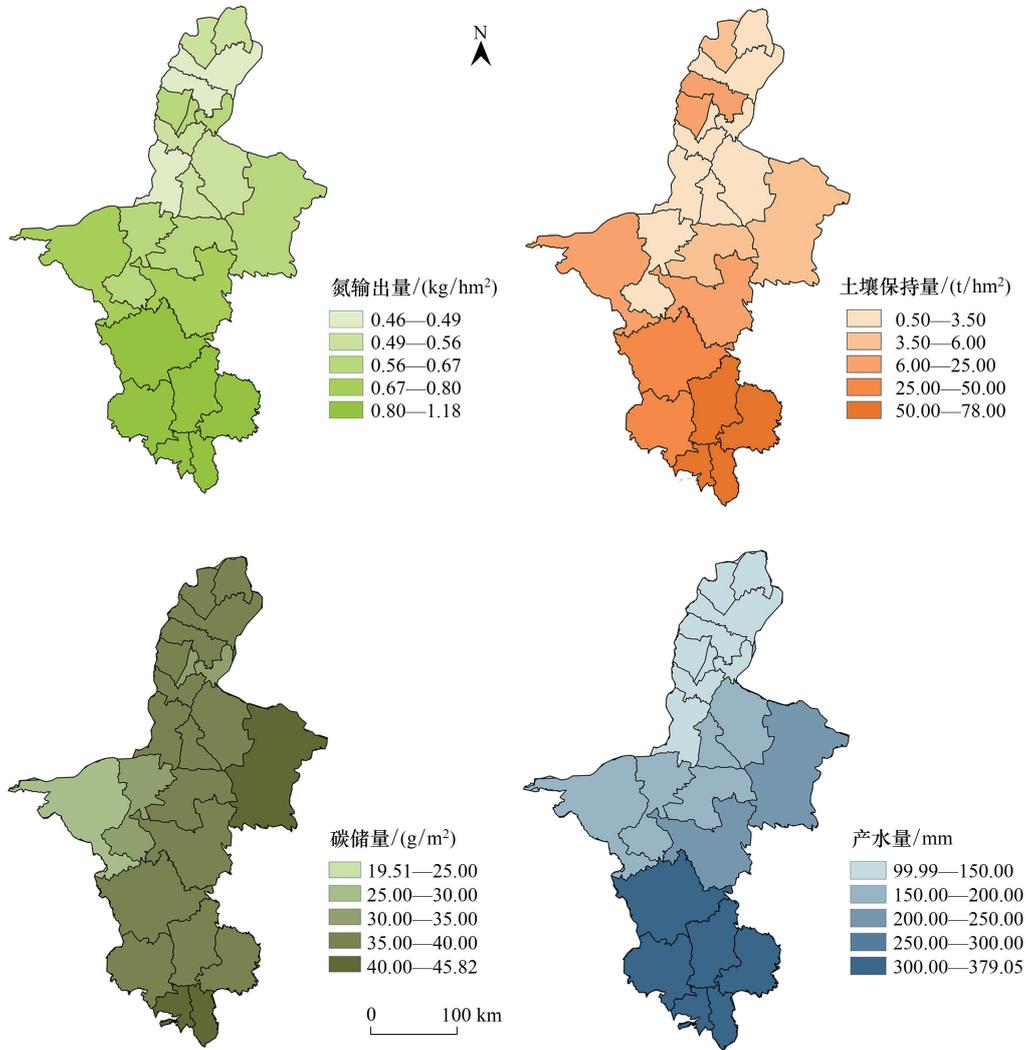


图2 宁夏生态系统服务空间格局

Fig.2 Spatial patterns of ecosystem services in Ningxia

### 3.2 生态系统服务热点分析

在空间格局分析基础上,进一步通过热点分析研究生态系统服务供给能力的空间差异和集聚特征(图3)。参考王蓓等<sup>[36]</sup>研究工作,依据  $G_i^*$  数值分为5个等级: $G_i^* > 2.58$  为热点区; $2.58 \geq G_i^* > 1.65$  为次热点区; $1.65 \geq G_i^* > -1.65$  为不显著; $-1.65 \geq G_i^* > -2.58$  为次冷点区; $-2.58 \geq G_i^*$  为冷点区<sup>[37]</sup>。统计各项服务冷热点的个数和比例可得表2。

表2 生态系统服务热点统计

Table 2 Hot spot statistics of ecosystem services

| 生态系统服务<br>Ecosystem services | 热点及次热点<br>Hot spots and sub-hot spots |       | 冷点及次冷点<br>Cold spots and sub-cold spots |       |
|------------------------------|---------------------------------------|-------|---|-------|
|                              | 个数                                    | 比例/%  | 个数                                      | 比例/%  |
| 土壤保持 Soil conservation       | 2546                                  | 28.02 | 1695                                    | 18.66 |
| 水质净化 Water purification      | 2575                                  | 28.63 | 2339                                    | 26.01 |
| 水资源供给 Water supply           | 2589                                  | 28.49 | 2002                                    | 22.03 |
| 碳储存 Carbon storage           | 1599                                  | 17.77 | 1526                                    | 16.96 |

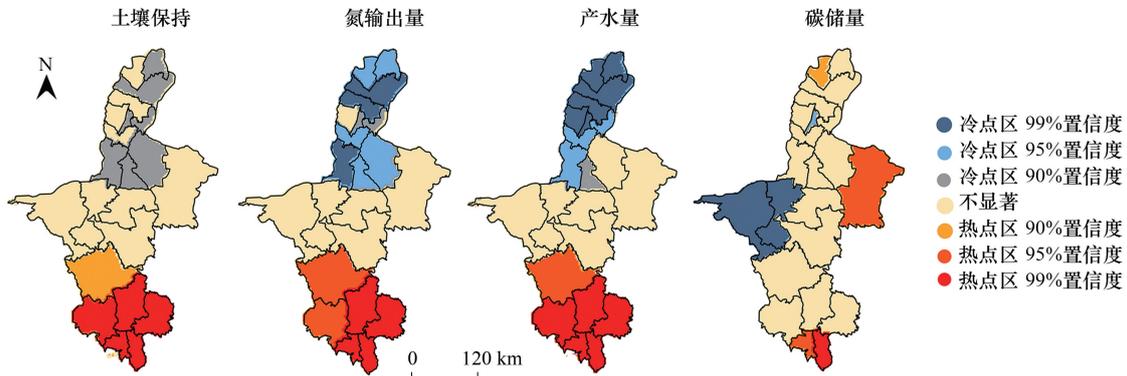


图3 宁夏生态系统服务热点分布区

Fig.3 Hotspot distribution of ecosystem services in Ningxia

土壤保持的冷、热点区集中分布在宁夏北、南部的狭长区域。冷点及次冷点区分布在“青铜峡市-利通区-灵武市”界限以北(置信度均在90%),热点及次热点共有2546个,主要在“西吉县-原州区”以南(图3、表2)。水质净化的冷点区显著性部分达到95%—99%,热点及次热点的分界线在“海原县-原州区”的交界处。水资源供给的热点和次热点分布与土壤保持的分布情况基本一致,主要分布在南部山丘,包括泾源县和彭阳县等,这些区域降雨量大而蒸发量相对较小;冷点区位于永宁县以北地区,该区发育风蚀地貌,植被类型是荒漠草原,气候干燥(图3、表2)。碳储量冷热点空间分布表现为明显的东西分异,东部盐池县是主要的次热点集中区(显著性达到95%);而相对地势高差较大的西部由于植被覆盖度低,土壤有机质含量低,成为碳储量较低的冷点区(图3、表2)。

综合来看,四项生态系统服务的空间分布冷热点区主要在宁夏的南北狭长区域,而中部,包括中宁县、同心县和红寺堡等地区大面积不显著,这可能与复杂多样的地貌地形有关,其间有广泛分布丘陵、山地、台地和沙丘等<sup>[38]</sup>。

### 3.3 生态系统服务空间权衡与协同关系

在R中经分析得到宁夏地区生态系统服务散点图矩阵(图4),其中主对角线上是4种服务的直方图及核

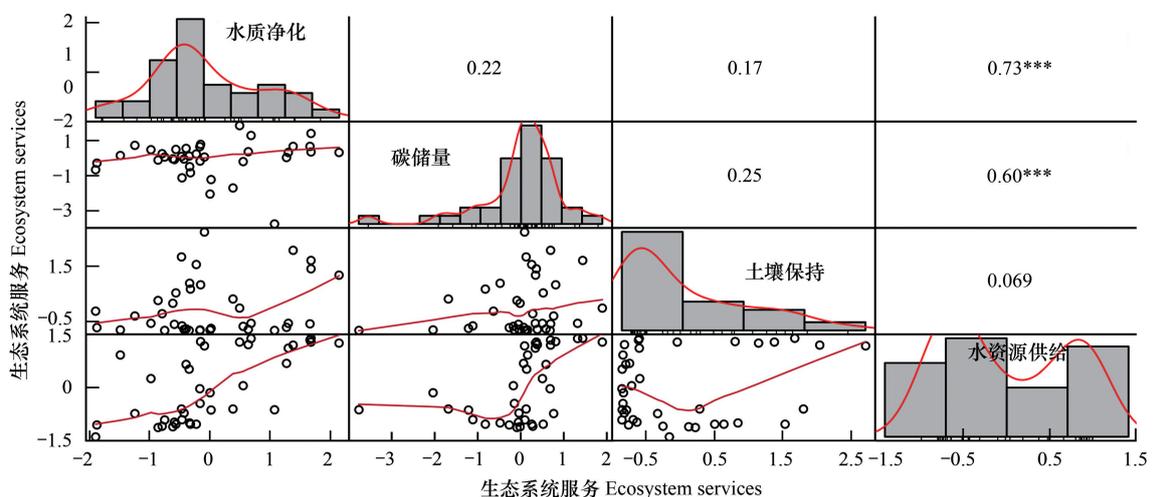


图4 宁夏生态系统服务散点图矩阵

Fig.4 Scatter plot matrix of ecosystem services in Ningxia

\*\*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关;主对角线以上部分图中是各类服务间的相关系数;主对角线以下部分是标准化后的各类服务;轴值是标准化处理后的各类服务数值;各类服务单位:水质净化(kg/hm<sup>2</sup>)、碳储存(g/m<sup>2</sup>)、土壤保持(t/hm<sup>2</sup>)、水资源供给(mm)

密度曲线,核密度曲线反映横轴数据分布集中程度;主对角线以上部分是各类服务间的相关系数;主对角线以下部分是各类服务间的散点图及平滑拟合曲线<sup>[39-40]</sup>。在分布特征上,碳储存的数据点分布较为集中,而水质净化、土壤保持和水资源供给的分布则较为分散;从相关性来看,在县级尺度上,各项生态系统服务之间显著正相关(协同关系),其中水质净化与水资源供给的相关性最高(相关系数是 0.73),其次是碳储量和水资源供给(相关系数是 0.60);而土壤保持与水质净化、水资源供给的相关性较低(相关系数均在 0.50 以下)(图 4)。

从生态系统服务类型来看,调节服务(土壤保持、碳储存、水质净化)之间表现为协同关系,供给服务与调节服务为明显的协同关系。

### 3.4 自然-社会经济系统耦合协调性分析

根据耦合协调度模型,可计算得到研究区 22 个县(市、区)的协调度、环境与经济效益的综合评价指数和耦合协调度(图 5)。

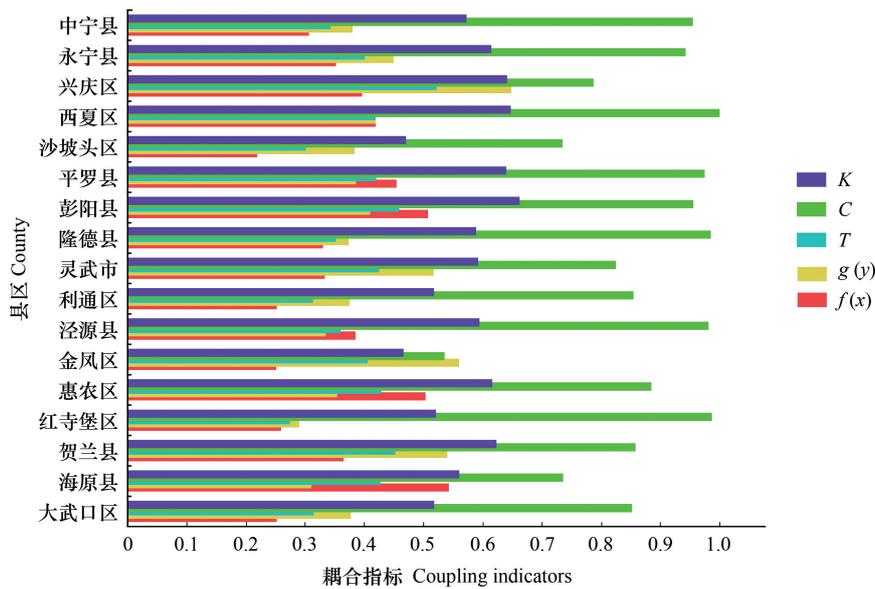


图 5 宁夏各县区耦合协调度

Fig.5 Coupling Coordination Degree of Counties and Districts in Ningxia

K:耦合协调度(系数);C:耦合度(或耦合系数);T:环境与经济效益的综合评价指标,即综合得分;g(y):经济效益函数得分;f(x):环境效益函数得分

参考廖重斌<sup>[41]</sup>、曹诗颂等<sup>[42]</sup>的研究成果及宁夏自治区实际情况,将耦合协调度分为 4 类,即衰退失调类、濒临衰退失调类、勉强协调发展类和协调发展类<sup>[26]</sup>,相应的分类区间分别是 $[0, 0.4]$ 、 $(0.4, 0.5]$ 、 $(0.5, 0.6]$ 、 $(0.6, 1.0]$ ,具体划分如表 3。利用 ArcGIS 10.6 软件绘制宁夏自治区各县(区)耦合协调度的空间分布图,并对不同协调度等级的县(区)数量进行统计(图 6)。

从不同协调度等级县(区)数量统计情况来看(图 6),宁夏自治区环境经济协调度处于濒临衰退失调状态的县(区)有 2 个,均为环境滞后型;处于勉强协调发展状态的县(区)有 11 个,其中 73%的县区更注重经济发展,生态系统服务与居民收入还不能做到较好的良性循环;处于协调发展状态的县(区)有 9 个,其中 2/3 的县区环境保护相对超前;全区没有处于衰退失调发展状态的县(区)。

从空间分布上看(图 7),除金凤区和沙坡头区属于濒临衰退失调外,宁夏自治区内大部分县(区)耦合协调度呈现勉强协调发展状态。具体来看,处于勉强协调发展的县(区)主要分布在宁夏自治区中部,这些县(区)面积共  $3.64 \times 10^6 \text{hm}^2$ (面积占比为 59.98%);处于协调发展的县(区)主要分布在宁南、宁北的西吉县、原州区、彭阳县和惠农区、平罗县、贺兰县、西夏区、兴庆区、永宁县,县(区)面积共  $1.78 \times 10^6 \text{hm}^2$ (面积占比为

29.31%);而西部和北部的沙坡头区和金凤区是 2 个濒临衰退失调类的县(区),县(区)面积共  $0.65 \times 10^6 \text{hm}^2$ , (面积占比为 10.70%),表明宁夏自治区中部的耦合协调度好于宁南、宁北,宁南、宁北地区好于西部地区。

表 3 环境与经济协调发展的分类体系及其判别标准

Table 3 Classification system of coordinated development of environment and economy and its criteria

| 第一层次 The first level           |         | 第二层次 The second level |                |
|--------------------------------|---------|-----------------------|----------------|
| 耦合协调度<br>Coupling Coordination | 类型      | $f(x)$ 与 $g(y)$ 的对比关系 | 基本类型           |
| 0.60—1.00                      | 协调发展类   | $f(x) > g(y)$         | 协调发展类经济滞后型     |
|                                |         | $f(x) = g(y)$         | 协调发展类环境经济同步型   |
|                                |         | $f(x) < g(y)$         | 协调发展类环境滞后型     |
| 0.50—0.59                      | 勉强协调发展类 | $f(x) > g(y)$         | 勉强协调发展类经济滞后型   |
|                                |         | $f(x) = g(y)$         | 勉强协调发展类环境经济同步型 |
|                                |         | $f(x) < g(y)$         | 勉强协调发展类环境滞后型   |
| 0.40—0.49                      | 濒临衰退失调类 | $f(x) > g(y)$         | 濒临衰退失调类经济滞后型   |
|                                |         | $f(x) = g(y)$         | 濒临衰退失调类环境经济同步型 |
|                                |         | $f(x) < g(y)$         | 濒临衰退失调类环境滞后型   |
| 0—0.39                         | 衰退失调类   | $f(x) > g(y)$         | 衰退失调类经济滞后型     |
|                                |         | $f(x) = g(y)$         | 衰退失调类环境经济同步型   |
|                                |         | $f(x) < g(y)$         | 衰退失调类环境滞后型     |

结合宁夏社会发展情况,通过相关性分析得到,地区耦合协调度与城镇人口比重、城镇常住居民人均可支配收入负相关,与农村常住居民人均可支配收入正相关。宁夏山区自然增长率较高,生态移民、劳务移民人数逐渐减少,但是农业转移人口市民化步伐加快,进城落户人口增加;由“乡”到“城”的转变虽然促进社会经济发展,但对环境效益综合得分有消极影响,体现在青铜峡、灵武和红寺堡区等为勉强协调发展类。

区域产业分配模式明显影响着耦合协调度。近年来宁夏大力实施创新驱动战略,改善科研基础条件,促进科技成果转化,全区研发经费支出增速位居全国第 9 位,银川市和石嘴山市对经济高质量发展的支撑作用更加有力,同时对惠农区、平罗县、贺兰县、西夏区、兴庆区、永宁县等区的协调发展起到重要作用。新中国成立初期,农业生产结构基本上停留在“农业以种植业为主,种植业以粮食为主”的单一结构阶段,近几十年来,该区产业结构不断趋向优化合理,农业、工业和服务业的内部结构也由单一向多元化发展,对南部的西吉县、原州区和彭阳县的耦合协调发展具有积极影响。

濒临衰退失调类的区域,如沙坡头区,应重点发展特色农业产业,如硒砂瓜、设施蔬菜等,但这些作物连年种植,加上近年环境愈加干旱,土壤肥力下降明显,农村经济基础较差,财政用于农业的投入较少,不能满足现代化农业建设的需求。

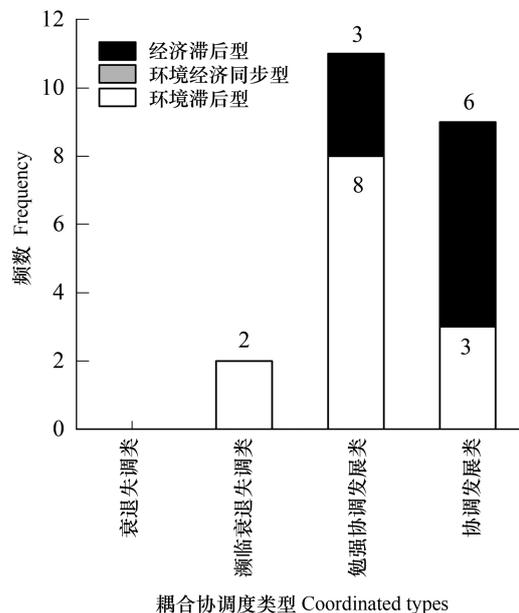


图 6 耦合协调度类型频数

Fig.6 Frequency of coordinated types

#### 4 讨论与结论

以“绿洲-山地-荒漠”并存的宁夏回族自治区为研究对象,基于 InVEST 模型和相关数据资料等,从空间和数量上定量分析了典型生态系统服务(土壤保持、水质净化、水资源供给和碳储存)的时空变化及其权衡关系,构建了耦合协调度模型,探讨了典型生态系统服务与自然-社会经济要素的协调性,取得以下主要认知。

(1) 宁夏回族自治区生态系统服务空间分异明显:土壤保持、水质净化、水资源供给和碳储存均呈现南高北低特征。

(2) 生态系统服务类型上,调节服务(土壤保持、碳储存和水质净化)之间表现为协同关系,供给服务与调节服务为明显的协同关系;县域尺度上各项生态系统服务之间呈现为协同关系。

(3) 地区耦合协调度与城镇人口比重、城镇居民人均可支配收入负相关,与农村常住居民人均可支配收入正相关。产业分配模式与耦合协调度有显著相关关系。

(4) 宁夏回族自治区各县区的协调发展度总体较好,耦合协调度存在空间分异。数量上,50%的县区属于勉强协调发展类,约 41.00%的县区属于协调发展类,金凤区和沙坡头区则为濒临衰退失调类的县(区)(9.00%);空间上,宁夏回族自治区形成了中部地区具有显著发展优势的空间格局。

本研究对于宁夏区生态系统服务变化及其与社会经济协调发展认知具有重要作用,可为实现兼顾经济发展和生态保护建设提供决策依据<sup>[43]</sup>,但由于受基础数据的限制,对生态系统服务空间分异的形成机理分析不够深入。后期应在考虑生态过程与机理的基础上进一步评估生态系统服务,以便更科学地认知生态系统服务间权衡/协同关系及其空间异质性。此外,由于生态系统结构和格局在不断发生变化,单一时期生态系统服务与社会经济要素耦合分析结果虽可揭示自然-社会经济的协调关系,但必然会存在一定的误差和偏差。未来应开展多时段、多时空尺度生态系统服务与社会经济要素耦合关系研究,进一步提升研究发现的科学性和应用性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] DAILY G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems (1997) The Future of Nature: Documents of Global Change [M]// ROBIN L, SÖRLIN S, WARDE P. Yale University Press. 2013: 454-464.
- [ 2 ] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [ 3 ] 徐建宁. 基于 InVEST 模型的小江流域生态系统服务评估[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [ 4 ] Fridman D, Kissinger M. An integrated biophysical and ecosystem approach as a base for ecosystem services analysis across regions. Ecosystem Services, 2018, 31: 242-254.
- [ 5 ] Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, Hacker S D, Wolanski E, Primavera J, Granek E F, Polasky S, Aswani S, Cramer L A, Stoms D M, Kennedy C J, Bael D, Kappel C V, Perillo G M E, Reed D J. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values. Science, 2008, 319(5861): 321-323.
- [ 6 ] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology Letters, 2009, 12(12):

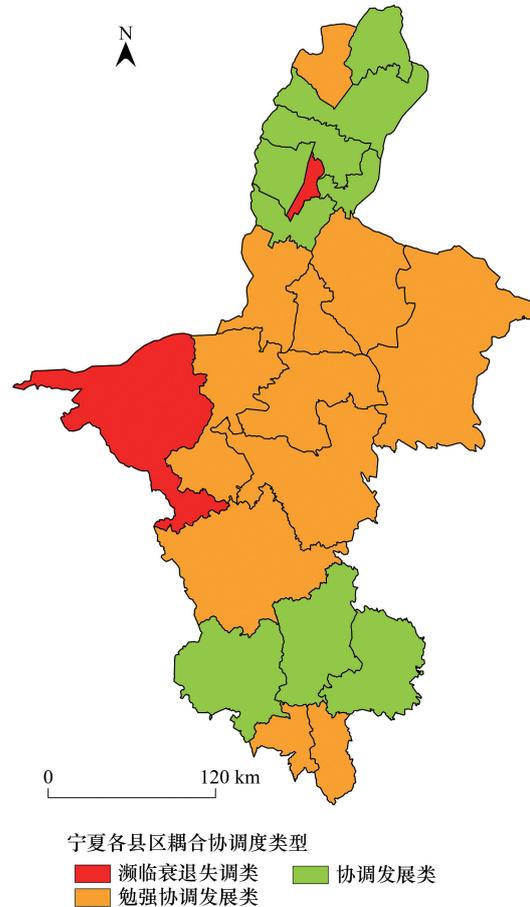


图 7 耦合协调度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of coordinated types

- 1394-1404.
- [ 7 ] Tian Y C, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Xu Y. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1297-1308.
- [ 8 ] 孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 周浪, 刘栩位, 彭春花. 三峡库区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系研究. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 566-575.
- [ 9 ] Tammi I, Mustajärvi K, Rasinmäki J. Integrating spatial valuation of ecosystem services into regional planning and development. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 329-344.
- [ 10 ] Lautenbach S, Kugel C, Lausch A, Seppelt R. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 676-687.
- [ 11 ] 王昭, 刘建红, 李同昇, 阮征, 武凤奇. 秦巴特困区生态脆弱性与经济贫困的耦合关系——以陕西省山阳县为例. *生态学报*, 2019, 39(11): 3908-3917.
- [ 12 ] 王大尚, 李屹峰, 郑华, 欧阳志云. 密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系. *生态学报*, 2014, 34(1): 70-81.
- [ 13 ] 李静怡, 王艳慧. 吕梁地区生态环境质量与经济贫困的空间耦合特征. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1715-1724.
- [ 14 ] Cruz-Garcia G S, Sachet E, Blundo-Canto G, Vanegas M, Quintero M. To what extent have the links between ecosystem services and human well-being been researched in Africa, Asia, and Latin America?. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 201-212.
- [ 15 ] Fisher J A, Patenaude G, Giri K, Lewis K, Meir P, Pinho P, Rounsevell M D A, Williams M. Understanding the relationships between ecosystem services and poverty alleviation: a conceptual framework. *Ecosystem Services*, 2014, 7: 34-45.
- [ 16 ] 吴艳霞, 陈步宇, 张磊. 黄河流域社会经济与生态环境耦合协调态势及动力因素. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 240-249.
- [ 17 ] Hanley N, Moffatt I, Faichney R, Wilson M. Measuring sustainability: a time series of alternative indicators for Scotland. *Ecological Economics*, 1999, 28(1): 55-73.
- [ 18 ] 岳晓燕, 周军. 城市经济、社会与环境系统协调发展研究——以 15 个副省级城市为例. *江淮论坛*, 2011, (5): 37-41.
- [ 19 ] 段七零. 江苏省县域经济-社会-环境系统协调性的定量评价. *经济地理*, 2010, 30(5): 829-834.
- [ 20 ] 李春平, 张二勋, 段艺芳, 卢俊方. 山东省县域经济—社会—环境系统协调性评价. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 37(3): 67-71.
- [ 21 ] 易平, 方世明. 地质公园社会经济与生态环境效益耦合协调度研究——以高山世界地质公园为例. *资源科学*, 2014, 36(1): 206-216.
- [ 22 ] 关伟, 刘勇凤. 辽宁沿海经济带经济与环境协调发展度的时空演变. *地理研究*, 2012, 31(11): 2044-2054.
- [ 23 ] 王爱辉, 龙海丽, 彭健. 县域绿洲城市经济、社会与环境协调发展评价. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 235-241.
- [ 24 ] 王俊, 张向龙, 杨新军, 刘文兆, 汪兴玉. 半干旱区社会-生态系统未来情景分析——以甘肃省榆中县北部山区为例[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(06): 1143-1148.
- [ 25 ] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [ 26 ] 胡蕾, 吴健, 李海萍. 生态系统服务与居民收入的耦合关系及影响因素——以丽江拉市海流域为例. *生态学报*, 2018, 38(18): 6402-6411.
- [ 27 ] 郭小凡. “海绵城市”理论下的河渠改造研究——以银川市唐徕渠改造计划为例[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [ 28 ] 黄越. 宁夏投资环境评价与优化研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [ 29 ] 柳冬青. 流域生态系统服务时空权衡与协同关系研究——以甘肃白龙江流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [ 30 ] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1958, 39(2): 285-291.
- [ 31 ] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [ 32 ] 范新生, 应龙根. 中国 SARS 疫情的探索性空间数据分析. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 282-291.
- [ 33 ] Jopke C, Kreyling J, Maes J, Koellner T. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 46-52.
- [ 34 ] 孙语泽. 陕西水环境与经济耦合协调发展研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [ 35 ] 龚溪. 基于土地利用变化情景的武夷山市生态系统服务评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [ 36 ] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [ 37 ] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834.
- [ 38 ] 彭月, 李昌晓, 李健. 2000—2012 年宁夏黄河流域生态安全综合评价. *资源科学*, 2015, 37(12): 2480-2490.
- [ 39 ] 王川, 刘春芳, 乌亚汗, 刘宥延. 黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系——以榆中县为例. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 521-531.
- [ 40 ] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [ 41 ] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例. *热带地理*, 1999, 19(2): 171-177.
- [ 42 ] 曹诗颂, 王艳慧, 段福洲, 赵文吉, 王志恒, 房娜. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系——基于连片特困区 714 个贫困县的实证分析. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2614-2622.
- [ 43 ] 吕荣芳. 宁夏沿黄城市带生态系统服务时空权衡关系及其驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.