

DOI: 10.20103/j.stxb.202310142228

韩磊,高毅丰,常钰卿,曹鑫鑫,杨梅丽,李亚北,刘钊,康宏亮.黄土高原城镇化与生态系统服务脱钩关系.生态学报,2024,44(20):9108-9121.

Han L, Gao Y F, Chang Y Q, Cao X X, Yang M L, Li Y B, Liu Z, Kang H L. Decoupling relationship between urbanization and ecosystem services on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20):9108-9121.

黄土高原城镇化与生态系统服务脱钩关系

韩磊^{1,*}, 高毅丰¹, 常钰卿², 曹鑫鑫¹, 杨梅丽¹, 李亚北¹, 刘钊¹, 康宏亮¹

1 长安大学土地工程学院, 西安 710054

2 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

摘要:城镇化与生态系统之间相互影响、相互制约,二者的平衡关系对于区域可持续发展具有重要意义。目前,现有研究多集中于二者静态耦合关系,对于相对发展关系研究较少,将静态耦合协调度和动态脱钩模型相结合,可以有效揭示城镇化和生态系统服务的辩证关系,以期成为城镇化和生态系统服务协调发展提供有益的科学参考。以生态脆弱的黄土高原为研究区,测算 1990—2020 年其县域城镇化水平及生态系统服务价值,并借助耦合协调度和脱钩模型讨论二者协同与相对发展关系及演变过程,结果表明:(1)1990—2020 年,黄土高原城镇化水平稳步上升并且内部存在明显的空间差异,呈现以省会城市为中心向周边地区扩展的格局。(2)黄土高原生态系统服务价值总量在 30 年间持续升高,不同地类提供的生态系统服务价值为草地>林地>耕地>水域>未利用地>湿地,80%以上的生态系统服务价值由草地和林地提供。(3)黄土高原县域城镇化和生态系统服务价值耦合协调度不断提升,处于协调阶段的区县由 1990 年的 26.27%提升至 2020 年的 59.70%,但仍处于较低的等级;黄土高原 60%以上的区县表现为强脱钩或弱脱钩,城镇化发展的同时生态系统服务价值并未大幅衰退,生态压力得到有效的控制,二者之间的关系得到分离,但城镇化与生态系统服务价值的脱钩关系是一种动态的过程,近年来处于强负脱钩状态的区县数量有升高的趋势,城镇化发展对生境潜在威胁增加,黄土高原各地区应依据自然和社会经济条件的差异性,因地制宜走绿色高质量发展之路。

关键词:城镇化;生态系统服务;耦合协调度;脱钩模型;黄土高原

Decoupling relationship between urbanization and ecosystem services on the Loess Plateau

HAN Lei^{1,*}, GAO Yifeng¹, CHANG Yuqing², CAO Xinxin¹, YANG Meili¹, LI Yabei¹, LIU Zhao¹, KANG Hongliang¹

1 School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Urbanization and ecosystems interact and constrain each other, and the balanced relationship between the two is important for the sustainable development of the region. Most existing studies focus on the static coupling relationship between them, and there are fewer studies on the relative development relationship between them. Combining the static coupling coordination degree and the dynamic decoupling model can effectively reveal the dialectical relationship between urbanization and ecosystem services. This study aims to provide an effective scientific reference for the coordinated development of the Loess Plateau. Therefore, this paper took the counties on the Loess Plateau as the study area and measured the urbanization level and the ecosystem service value on the Loess Plateau from 1990 to 2020. With the help of the coupling coordination degree model and decoupling model, the synergistic and relative development relationship between

基金项目:国家自然科学基金项目(41871190);国家重点研发计划(2023YFF1305105);陕西省重点研发计划(2021SF-440);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102353201)

收稿日期:2023-10-14; **网络出版日期:**2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanshuanglei@chd.edu.cn,

them and the evolution of the process were analyzed. The results showed that the level of urbanization on the Loess Plateau increased steadily from 1990 to 2020. There were obvious spatial differences, showing a spatial distribution pattern of high in the east and low in the west, and expanding to the periphery with the provincial capital city as the center. Over the past 30 years, the total ecosystem service value of the Loess Plateau has been increasing, and the ecosystem service value provided by different land use types was grassland>forest land>arable land>water land>unused land>wetland, and more than 80% of the ecosystem service value was provided by grassland and forest land. The coupling coordination degree between urbanization and ecosystem service value on the Loess Plateau has been increasing, and the proportion of counties in coordination increased from 26.27% in 1990 to 59.70% in 2020, but it was still at a low level. More than 60% of the counties on the Loess Plateau exhibited strong decoupling and weak decoupling, which indicated that the ecosystem services value has not decreased while urbanization has developed. However, the decoupling relationship between urbanization and the ecosystem service value is a dynamic process. The number of counties in strong negative decoupling has been on the rise in recent years and urbanization has increased the potential threat to habitats. All regions of the Loess Plateau should follow a green and high-quality development path based on the differences in natural and socio-economic conditions, avoiding large-scale re-coupling and ensuring the stability and sustainability of the decoupling relationship between urbanization and ecosystem services.

Key Words: urbanization; ecosystem service value; coupling coordination degree; Tapio model; the Loess Plateau

黄土高原是我国重要的能源基地和生态屏障^[1]。自西部大开发开展以来,黄土高原城镇化发展迅速,城镇空间扩张显著^[2],脆弱的生态环境和高强度的资源开发,使得黄土高原长期处于巨大的压力之下^[3]。尽管随着小流域综合治理、治沟造地、退耕还林(草)等一系列生态保护措施的综合实施,黄土高原的生态环境明显改善^[4-5],但在城镇化加速发展的背景下,仍存在区域发展不平衡、生态环境与发展方式不协调、生态承载力与发展规模不匹配等问题^[6],区域可持续发展受到严重威胁^[7]。准确剖析黄土高原城镇化发展与生态系统服务之间的协调发展与相对发展程度,已成为落实黄河流域生态保护和高质量发展重大战略的迫切需求。

城镇化进程的快速推进引起土地利用程度和格局的变化^[8],对生态系统的结构和功能产生干扰,众多学者运用不同方法展开了大量的研究,揭示了城镇化与生态系统服务价值的密切关系^[9-10]。但现有研究多以国家^[11]、城市群^[12]、省域^[13]等区域尺度为研究对象,对于连接城乡的关键——县域尺度研究较少,不利于区县规划的制定与实施。研究方法主要包括耦合协调度模型^[14]、回归模型^[15]、相关性分析^[16]、匹配分析等^[17],其中耦合协调度模型运用较为广泛。但这些研究多集中于静态分析,注重二者在发展过程中“量”的一致程度,不能体现二者相对发展状况,同时单一过程的研究和单一方法的运用不利于深刻揭示区域城镇化和生态环境的矛盾^[18]。脱钩理论为解决上述问题提供了一条新的思路。“脱钩”概念最早源于物理学领域,20 世纪初经济合作与开发组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)将此概念引入到环境与经济领域,定义为阻断经济增长与环境冲击之间的关系或使两者的变化速度不同步^[19],现已成为最典型的基于速度标准的评估资源环境与经济增长之间关系的方法。目前国内学者主要将脱钩理论运用在碳排放^[20]、生态足迹^[21]、水资源利用^[22]、土地利用强度^[23]、生态健康^[24]与经济增长等方面的研究,对于生态环境与城镇化的脱钩研究较少。将耦合协调度和脱钩理论相结合,可以从“量”和“速”两个方面反映不同系统间的变化,更加科学准确地解释二者的关系^[25]。传统的城镇化水平分析主要基于统计数据,尽管可以从多角度测算城镇化水平,但耗费大量的人力物力,并且数据存在一定的滞后性,在小尺度研究中容易出现统计数据缺失的情况。夜间灯光数据可以从格网尺度反映人类活动和社会经济的发展状况,为量化黄土高原城镇化动态发展提供了新的途径,现已广泛应用于不同尺度的城镇化研究中^[26-27]。

基于此,本文以夜光灯光数据信息构建灯光指数表征黄土高原县域城镇化发展水平,以土地利用数据为基础通过当量法计算黄土高原县域生态系统服务价值,分析其时空演变特征,借助耦合协调模型和脱钩模型

深入解析二者之间的复杂关系,以期科学认识黄土高原城镇化与生态环境的演变过程,为推动黄土高原绿色、健康、高质量发展提供有益的科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地区位于我国中部偏北(32° — 41° N, 107° — 114° E),是连接黄河上下游流域的关键区域(图1),占国土面积的6.8%。全区气候以典型的大陆性季风气候为主,冬季严寒、夏季温暖,年平均降雨量410mm,年平均温度 3.6 — 14.3°C 。地势东南低、西北高,海拔高度72—4885m,平原、高原、丘陵、山地等多种地貌类型广泛分布,黄土覆盖厚度50—200m,是世界上最大的黄土堆积区。黄土高原生态环境脆弱,是我国乃至世界上水土流失最严重的地区,也是黄河流域水土流失防治和生态环境保护的重点区域^[28]。

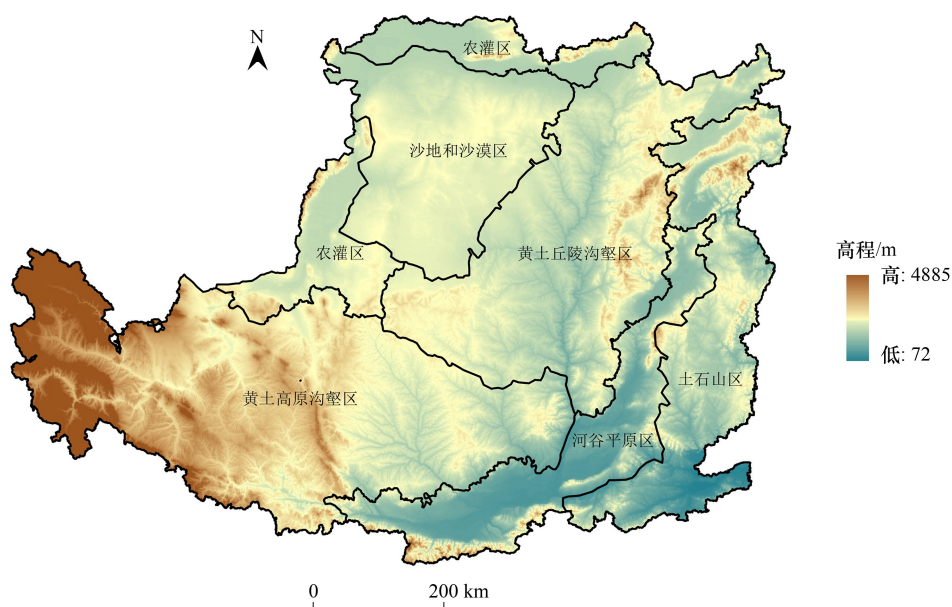


图1 黄土高原数字高程模型(DEM)

Fig.1 Digital elevation model (DEM) of the Loess Plateau

1.2 数据来源

夜间灯光数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集(1984—2020年)^[29],空间分辨率为 $1\text{km}\times 1\text{km}$,该数据集基于夜间灯光卷积长短期记忆网络生成,模型与原始图像的模型评估显示,平均均方根误差RMSE为0.73,决定系数 R^2 为0.95,像素级的线性斜率为0.99,与社会经济指标(建成区面积、国内生产总值、人口)的相关性优于其它现有数据集。土地利用数据^[30]来源于1985—2022年中国土地覆被数据集(CLCD)(<https://zenodo.org/records/8176941>),该数据集是基于谷歌地球引擎上所有可获取的Landsat数据,通过随机森林分类器得到的结果,空间分辨率为 $30\text{m}\times 30\text{m}$,已有研究表明,该数据集在黄河流域的总体精度为88.12%^[31],重分类为耕地、林地、草地、建设用地、水域、裸地、未利用地、湿地七类。

1.3 研究方法

1.3.1 夜间灯光数据预处理

考虑到灰度值 ≤ 6.5 的像元大多为冰川或水面的反射^[32],会对灯光指数的计算产生干扰,需剔除原始数据中的无效值,公式如下所示:

$$DN_i = \begin{cases} DN, & DN > 6.5 \\ 0, & DN \leq 6.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中, DN 表示原始数据中像元灰度值; DN_i 表示修正后像元的灰度值。

1.3.2 灯光指数 (Compounded night light index, CNLI)

CNLI 表示地区灯光面积比例和地区灯光强度均值的乘积, 相关研究表明, CNLI 与基于统计数据的城镇化水平在国家、省级、县级尺度上均显著相关^[33-36], 可以全面衡量区域城镇化发展水平, 其计算公式如下:

$$CNLI = I \times u \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{N \times D_x} \times \sum_{i=P}^{D_x} (D_i \times n_i) \quad (3)$$

$$u = \frac{\text{Area}_N}{\text{Area}} \quad (4)$$

式中, CNLI 为灯光指数, 可以反映区域城镇化综合水平; I 为区域内平均相对灯光强度; u 为区域灯光斑块面积与区域总面积之比; D_i 表示第 i 级像元的灰度值; n_i 为第 i 级像元总数; D_x 为像元最大灰度值; P 为去除误差的阈值; N 、 Area_N 分别为满足条件 $D_x \geq D_N \geq P$ 的像元总数和所占的面积; Area 为区域总面积。

1.3.3 生态系统服务价值

采用 Costanza 等^[37]提出的生态系统服务价值估算方法, 计算研究区不同地类的生态系统服务价值和单项功能的服务价值, 其计算公式为:

$$ESV = \sum (A_i \times ESV_i) \quad (5)$$

$$ESV_f = \sum (A_i \times ESV_{fi}) \quad (6)$$

式中, ESV 表示研究区内生态系统服务价值的总量 (元); A_i 表示研究区第 i 种地类的总面积 (hm^2); ESV_i 表示研究区第 i 种地类的单位面积生态服务价值 ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); ESV_f 为研究区生态系统单项服务功能的价值; ESV_{fi} 为第 i 种地类所对应的生态系统第 f 项功能的服务价值系数^[38]。

采用谢高地等^[39]提出的中国生态系统单位面积生态服务价值当量因子表, 并结合我国各省份农田系统生物量因子表^[40], 根据每个省份在黄土高原的面积权重计算得黄土高原生物量因子为 0.49, 对黄土高原的生态系统服务价值当量进行修正。受市场经济的影响, 黄土高原 30 年来粮食净利润变化很大, 若计算生态系统服务价值采用当年的粮食净利润, 则不能分辨是粮食净利润的变化还是生态系统服务的变化导致生态系统服务价值的变化, 因此, 在计算黄土高原各时期生态系统服务价值时, 采用 2010 年粮食净利润 3405 元/ hm^2 作为不变价格。

1.3.4 冷热点分析

为了反映城镇化和生态系统服务价值在空间上的集聚情况, 基于 ArcGIS 中热点分析 (Getis-Ord G_i^*) 工具, 得到黄土高原城镇化和生态系统服务价值的冷点和热点区域, 计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - X \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{(n-1)}}} \quad (7)$$

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

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2 - (X)^2}{n}} \quad (9)$$

式中, G_i^* 表示单元 i 的集聚指数; X 表示所有单元属性值的均值; S 表示所有单元属性值的标准差; n 表示空

间网格单元的数量; x_j 表示单元 j 的属性值; w_{ij} 表示基于空间 k 邻接关系建立的空间权重阵,当城镇化水平或生态系统服务价值较高时,则成为具有统计学意义的热点,称为城镇化或生态系统服务价值的热点区,反之则为城镇化或生态系统服务价值的冷点区。

1.3.5 耦合协调度

耦合度是指两个及以上的系统或要素之间相互影响程度的强弱^[41],但不能表征二者之间协调发展的水平,故引入耦合协调度,表示系统发展中的一致程度,计算公式如下:

$$C = \frac{2\sqrt{U_1+U_2}}{U_1+U_2} \quad (10)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (11)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (12)$$

式中, U_1 和 U_2 分别表示城镇化水平和生态系统服务价值,因其量纲不同,故采用极差法进行标准化处理; C 表示城镇化和生态系统服务价值之间的耦合度; α 和 β 相关系数, $\alpha+\beta=1$,表示生态系统服务价值和城镇化的重要程度,本文认为二者同样重要,故 α 和 β 均为0.5; D 表示耦合协调度,将其分为极度失调($0 \leq D \leq 0.2$)、中度失调($0.2 < D \leq 0.4$)、基本协调($0.4 < D \leq 0.6$)、中度协调($0.6 < D \leq 0.8$)、高度协调($0.8 < D \leq 1$)。

1.3.6 Tapio 脱钩模型

Tapio^[42]引入弹性系数计算脱钩指数,其结果不受统计量纲的影响,可以更加真实地反映经济增长与环境压力之间不同方向的变化趋势。由于生态压力的含义与生态系统服务价值相反,故采用生态系统服务价值变化量的相反数来表示。计算公式如下所示:

$$\omega_{i2-i1} = \frac{\Delta \text{ESVI}}{\Delta \text{AN}} = \frac{-(\text{ESV}_{i2} - \text{ESV}_{i1}) / \text{ESV}_{i1}}{(\text{AN}_{i2} - \text{AN}_{i1}) / \text{AN}_{i1}} \quad (13)$$

式中, i 为年份; ω_{i2-i1} 为 $i2$ 和 $i1$ 年间的脱钩指数; ESV_{i1} 和 ESV_{i2} 分别为 $i1$ 年和 $i2$ 年的生态系统服务价值, ΔESVI 为两年间生态系统服务价值的变化率的相反数; AN_{i1} 、 AN_{i2} 分别为第 $i1$ 年和 $i2$ 年各区域城镇化水平; ΔAN 表示这一时期城镇化的变化率,将0.8和1.2作为脱钩的临界值,共分为八种脱钩类型(图2)。仅有强脱钩和弱脱钩属于理想的脱钩状态,其余类型均不是绿色经济发展状态,强负脱钩是最不理想的状态。

2 结果与分析

2.1 黄土高原城镇化发展时空变化特征分析

黄土高原1990年—2020年的总体城镇化水平呈增长趋势,1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2020年黄土高原县域CNLI均值分别为0.077、0.082、0.085、0.119、0.120、0.142、0.144,年均增长约 2.23×10^{-3} ,城镇空间拓展明显(图3)。受水土资源与地形地貌条件的约束,黄土高原城镇化高的地区呈现沿河分布特征,汾渭平原所处的河谷平原区与宁夏平原、后套平原所处的农业灌溉区由于其地势平坦、水源充足、交通便利等自然本底条件较好,城镇化水平远高于中部地区,呈现以省会城市为中心向周边扩展的空间分布格局。1990—2020年,CNLI总体变化最快的区域集中在省会城市,如银川市金凤区,西安市未央区、高陵区、雁塔区、灞桥区,西宁市城西区、城北区等地区CNLI均增加0.3以上,城镇化水平发展最快的是咸阳市渭城

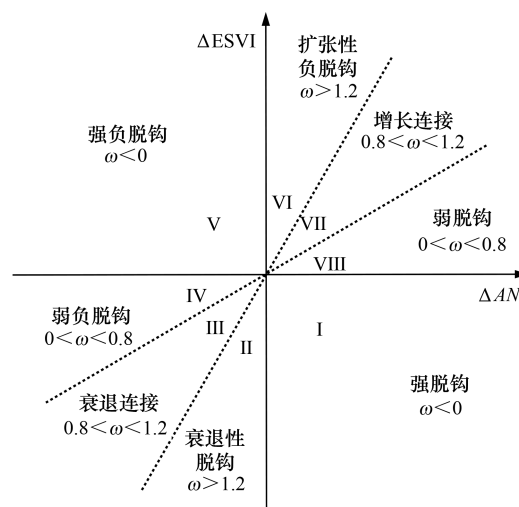


图2 脱钩状态判断标准

Fig.2 Judgment criteria for decoupling status

ω :脱钩指数; ΔESVI :生态系统服务价值变化率的相反数; ΔAN :城镇化水平变化率;I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII:脱钩类型划分区域

分布特征,汾渭平原所处的河谷平原区与宁夏平原、后套平原所处的农业灌溉区由于其地势平坦、水源充足、交通便利等自然本底条件较好,城镇化水平远高于中部地区,呈现以省会城市为中心向周边扩展的空间分布格局。1990—2020年,CNLI总体变化最快的区域集中在省会城市,如银川市金凤区,西安市未央区、高陵区、雁塔区、灞桥区,西宁市城西区、城北区等地区CNLI均增加0.3以上,城镇化水平发展最快的是咸阳市渭城

区,CNLI增加了0.413,全区仅有10个地区城镇化水平降低。

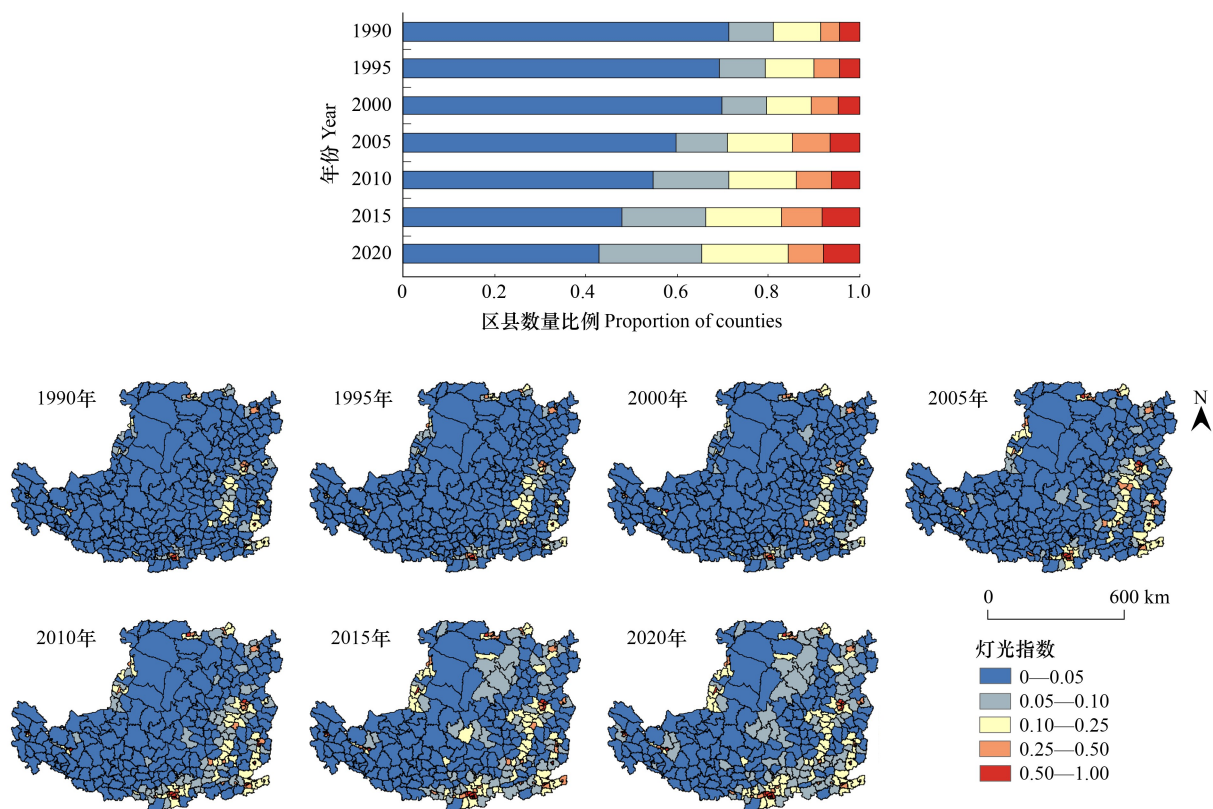


图3 黄土高原城镇化的空间分布

Fig.3 The spatial distribution of urbanization on the Loess Plateau

1990年,黄土高原城镇化水平较低,大部分区县的CNLI处于0.05以下,CNLI高于0.1的地区仅零星分布在兰州市、西安市、太原市、包头市和洛阳市,这些城市作为黄土高原中心城市,工业基础好,人口基数大,生产生活强度高于其他地区,灯光指数高;1995年,黄土高原城镇化水平整体提升较小,城镇化水平提升迅速的区县主要集中在第二产业发展较快的陕西省西安市和能源矿产资源丰富的山西省临汾市、晋城市和运城市等地区;2000年,黄土高原城镇化格局相较于上一时期变化不大,整体以缓慢升高为主;2005年,黄土高原县域城镇化扩张显著,CNLI在0.1以上的地区在黄河及其支流沿线的银川、乌海、太原、临汾、吕梁、西安、郑州、洛阳等地扩张,逐渐显露以关中平原城市群、宁夏沿黄城市群、兰西城市群、呼包城市群、洛阳都市圈为中心的发展格局,该时期成为黄土高原城镇化发展的重要节点;2010年,黄土高原城镇化水平整体变化不大,仅有较低水平的城镇化在汾渭平原地区扩张,城镇化呈降低趋势的区县主要分布在陕北黄土高原、陕晋蒙交界、山西中部、鄂尔多斯高原南部以及河湟谷地等地区;2015年,黄土高原城镇化发展加快,大量人口向城市聚集而土地资源有限,城市向外围扩张的速度加快,省会城市和地级市的周边地区城镇化水平提升迅速,但城镇化水平降低的地区多为分布于山西省;2020年,黄土高原城镇化水平持续向好发展,呈减速增长,71.34%的地区城镇化水平有所升高,仅有山西省长治市潞城区CNLI增长超0.05,但城市群中心如西安市、银川市、包头市、洛阳市的城镇化发展水平有所降低。

1990—2020年黄土高原县域城镇化热点区的空间分布格局基本保持不变(图4),主要围绕西安市、太原市、洛阳市等中心城市集聚分布;1995—2005年冷点区主要分布六盘山山区,包括宁夏回族自治区的固原市、甘肃省的平凉市的部分区县;2010年之后,城镇化的冷点区呈扩张的发展态势,并沿陕北黄土高原向东北部延伸至忻州盆地。

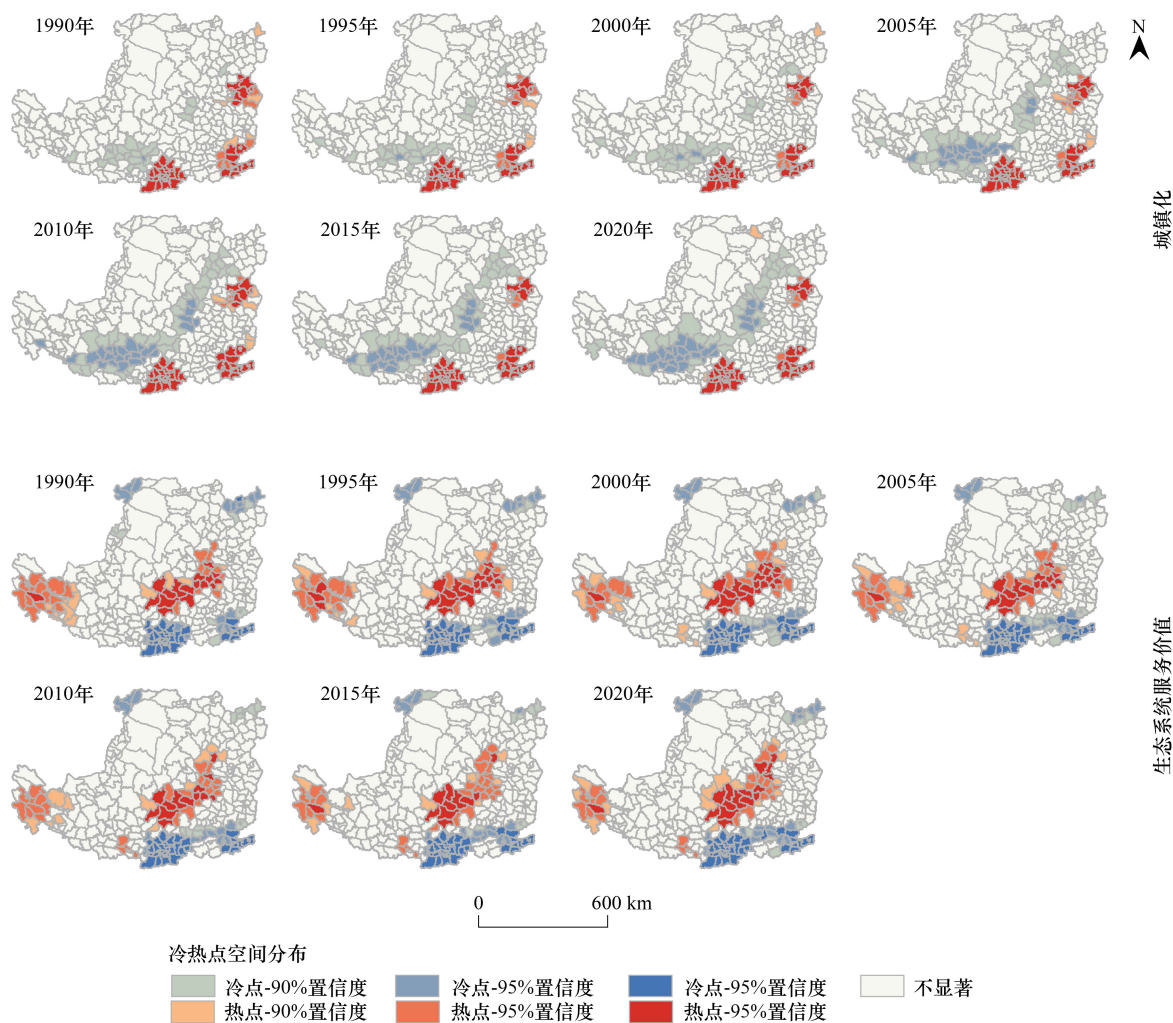


图4 黄土高原城镇化和生态系统服务价值冷热点空间分布

Fig.4 The spatial distribution of cold hotspots of ecosystem service value and urbanization on the Loess Plateau

2.2 黄土高原土地利用变化特征分析

1990—2020年,草地和耕地是黄土高原的主要土地利用类型,分别约占研究区面积的50%、30%,林地次之,约占总面积的15%,未利用地、建设用地、水域及湿地占地面积均较小(表1)。耕地和林地的面积变化最大,耕地面积由32.79%减少至29.09%,减少面积约23102.09km²,在2000—2005年的动态度最大;草地面积先升高后降低,整体增加了9178.46km²,在2000—2005年期间变化最大,增加约8149.99km²;林地面积由12.47%提高至15.15%,增加面积约16767.44km²,且动态度持续增加,林地成林需要时间,导致林地面积变化相对于耕地和草地具有滞后性,所以林地动态度逐年增加;建设用地面积由1.07%提高至3.06%,动态度仅次于湿地,但动态度在2010年之后开始减小;未利用地面积由5.43%减少至2.89%,减少面积约15836.00km²;水域面积整体呈增加的趋势,增加面积约552.48km²;湿地面积占比小,但其变化波动大,整体增加0.31km²。

结合土地利用变化转移特征(图5)可知,1990—2020年期间,面积转化最大的是草地和耕地,耕地以流向草地为主(>80%),其次为建设用地和林地,转入面积大部分来源于草地(>90%),耕地面积在2015年之后开始增加,主要依靠草地的转入(17077.45km²);草地以向耕地迁移为主(>60%),其次为林地和未利用地,草地面积的增加主要来源于耕地(70.16%—76.98%)和未利用地(19.23%—26.62%);林地面积不断增加,主要依靠草地(72.28%—87.49%)和耕地(12.45%—27.55%)的供给,说明退耕还林(草)、“三北”防护林、天然林

资源保护等生态保护措施取得成效显著,但林地向耕地的迁移面积在 2010 年之后有所升高(760.25—964.58km²),同时草地面积在开始减少,主要是向耕地转移(66.02%—68.15%),说明存在一定的复耕现象;建设用地的转入面积明显高于转出面积,主要来源于耕地(63.09%—83.67%)。

表 1 黄土高原土地利用
Table 1 Table of land use on the Loess Plateau

	年份 Year	耕地 Arable land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Waterland	未利用地 Unused land	建设用地 Built-up land	湿地 Wetland
面积占比/% Area proportion	1990	32.79	12.47	47.82	0.43	5.43	1.07	0.00
	1995	32.33	12.76	47.83	0.43	5.29	1.36	0.00
	2000	31.79	13.12	48.51	0.39	4.58	1.61	0.00
	2005	30.30	13.46	49.82	0.46	4.03	1.93	0.00
	2010	29.45	13.97	50.37	0.49	3.37	2.36	0.00
	2015	28.79	14.49	50.34	0.5	3.11	2.77	0.00
	2020	29.09	15.15	49.29	0.51	2.89	3.06	0.00
动态度/% Dynamic attitude	1990—1995	-0.28	0.48	0.00	0.33	-0.51	5.44	6.03
	1995—2000	-0.33	0.56	0.29	-2.18	-2.70	3.80	-8.60
	2000—2005	-0.93	0.52	0.54	3.69	-2.40	3.91	-0.26
	2005—2010	-0.57	0.75	0.22	1.30	-3.28	4.41	-7.71
	2010—2015	-0.45	0.75	-0.01	0.61	-1.52	3.50	31.70
	2015—2020	0.21	0.91	-0.42	0.50	-1.39	2.08	25.51

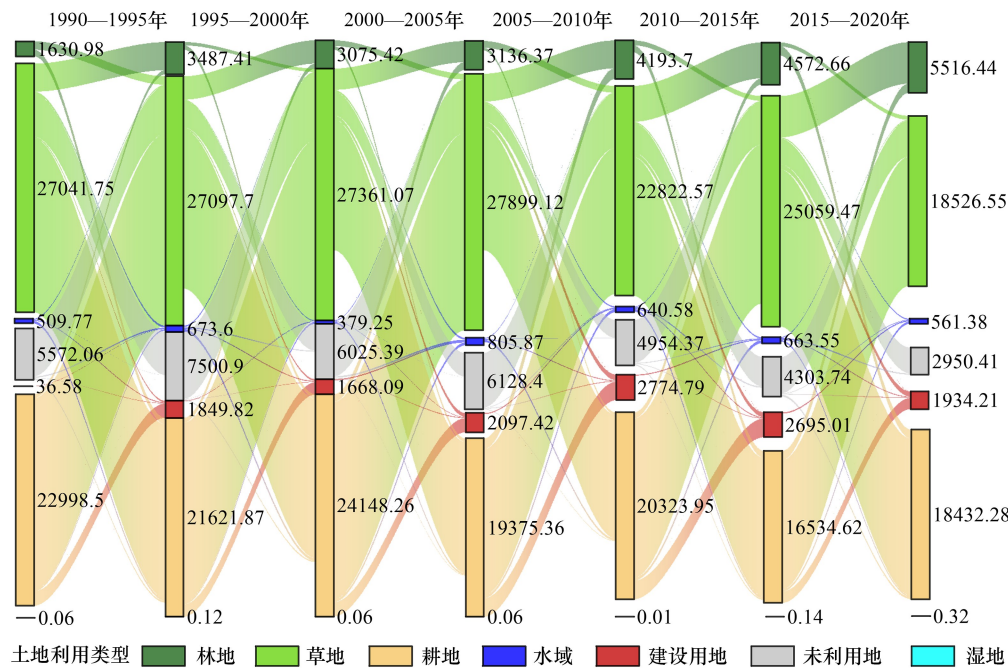


图 5 黄土高原土地利用面积转移图/km²
Fig.5 Land use area transfer map of the Loess Plateau

2.3 黄土高原生态系统服务价值时空变化特征分析

黄土高原在 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2015 年、2020 年的生态系统服务价值总量分别为 5029.29 亿元、5052.32 亿元、5100.97 亿元、5208.52 亿元、5284.62 亿元、5325.99 亿元、5337.50 亿元,增幅约 6.13%。黄土高原县域生态系统服务价值的空间分布变化不大(图 6),表现为东南高、西北低的空间分布格局,生态系统服务价值高的地区集中在黄河及其支流渭河、汾河沿岸和延河南段等流水系区域,如延安、吕梁、临汾、西安南部、晋城、海东、兰州市等地,该区域多为森林,森林的生态系统服务功能强于其他土地利用类型,因此,该区

域生态系统服务价值相对较高;关中平原、汾河平原、河套平原和宁夏平原地区的城市聚集区生态系统服务价值较低,如西安、咸阳、渭南、洛阳、固原、运城、大同、长治、巴彦淖尔市等地,该地区交通便利,城镇化水平高,能够提供的生态系统服务价值低于其他地区。

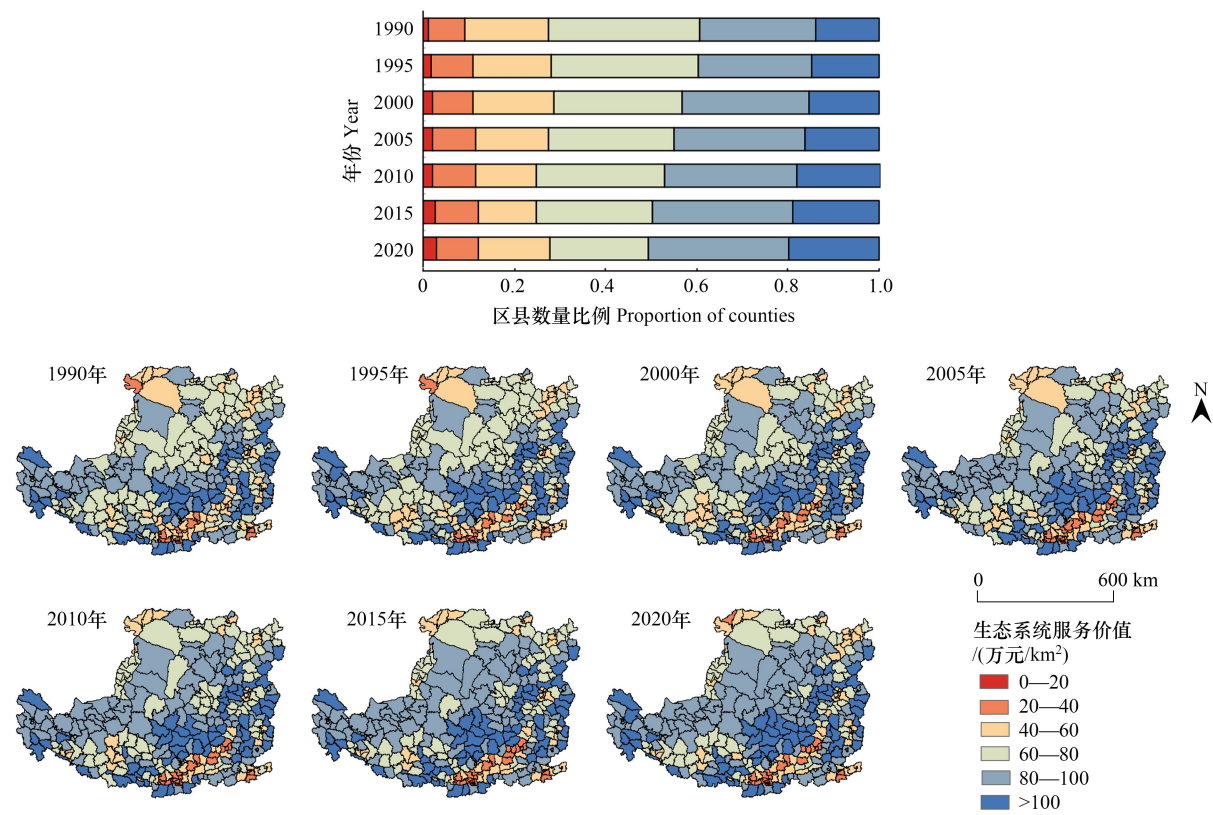


图 6 黄土高原各区县平均生态系统服务价值空间分布

Fig.6 The spatial distribution of average ecosystem service value in each county of the Loess Plateau

1990—2020 年,黄土高原不同地类提供的生态系统服务价值为草地>林地>耕地>水域>未利用地>湿地,超 80%的生态系统服务价值由草地和林地提供(表 2),耕地提供的生态系统服务价值呈下降的趋势,贡献率由 1990 年的 13.16%下降至 2020 年的 11.00%,降低约 75 亿元,而林地所提供的生态系统服务价值持续增加,贡献率由 24.94%上升至 28.56%,共增加约 270 亿元,草地所提供的生态系统服务价值先升高后降低,贡献率由 58.60%下降至 56.91%,但整体仍增加约 91 亿元。水域和湿地虽能提供较高的单位生态系统服务价值,但由于其面积较小,对研究区整体生态系统服务价值的影响很小;未利用地面积单位生态系统服务价值较低,能提供的生态系统服务价值不足 1%。

表 2 1990—2020 年黄土高原不同土地利用类型提供的生态系统服务价值/%

Table 2 Ecosystem service value of different land use types on the Loess Plateau from 1990 to 2020

土地利用类型 Land use type	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地 Arable land	13.16	12.91	12.57	11.74	11.25	10.91	11.00
林地 Forestland	24.94	25.42	25.89	26.01	26.60	27.38	28.56
草地 Grassland	58.60	58.34	58.61	58.95	58.74	58.25	56.91
水域 Waterland	2.94	2.97	2.63	3.05	3.20	3.27	3.34
未利用地 Unused land	0.36	0.35	0.30	0.26	0.21	0.19	0.18
湿地 Wetland	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1990—2020 年黄土高原县域生态系统服务价值热点区的空间分布格局基本保持不变(图 4),主要围绕黄土高原中部延安市的黄龙山、梁山,山西省的吕梁山脉以及西部的河湟谷地等森林草地聚集分布区,但在 2005 年之后黄土高原西部生态系统服务价值热点区明显向西缩减;黄土高原县域生态系统服务价值冷点区主要围绕西安市、洛阳市、大同市和巴彦淖尔市等中心城市及其周边地区聚集分布。

2.4 黄土高原城镇化与生态系统服务价值耦合协调度与脱钩分析

由图 7 可知,1990—2020 年,黄土高原县域城镇化和生态系统服务价值的耦合协调度有一定程度的提高,从东部汾河流域的太原、吕梁、临汾市向四周延伸,逐渐形成洛阳-西安-包头-大同连线的中部基本协调区,耦合协调类型从以极度失调、中度失调、基本协调为主向以中度失调、基本协调为主转变,处于基本协调及以上阶段的区县占比由 1990 年的 26.27% 上升至 2020 年的 59.70%。整个研究期间,仅有甘肃省安宁区达到高度协调阶段;处于极度失调阶段的区县数量大幅下降,由 1990 年的 91 个下降至 2020 年的 4 个区县,降幅约 95.60%;处于中度失调阶段的区县数量先上升后下降,在 2000 年达到 178 个,2020 年下降至 131 个区县;基本协调区县数量由 1990 年的 76 个上升至 2020 年的 174 个;处于中度协调的区县数量由 12 个上升至 25 个,零星分布在西安市、太原市、兰州市等城市的部分区县。由此可见,黄土高原城镇化与生态系统服务价值已经达到了一定程度的协调发展,但耦合协调等级较低。

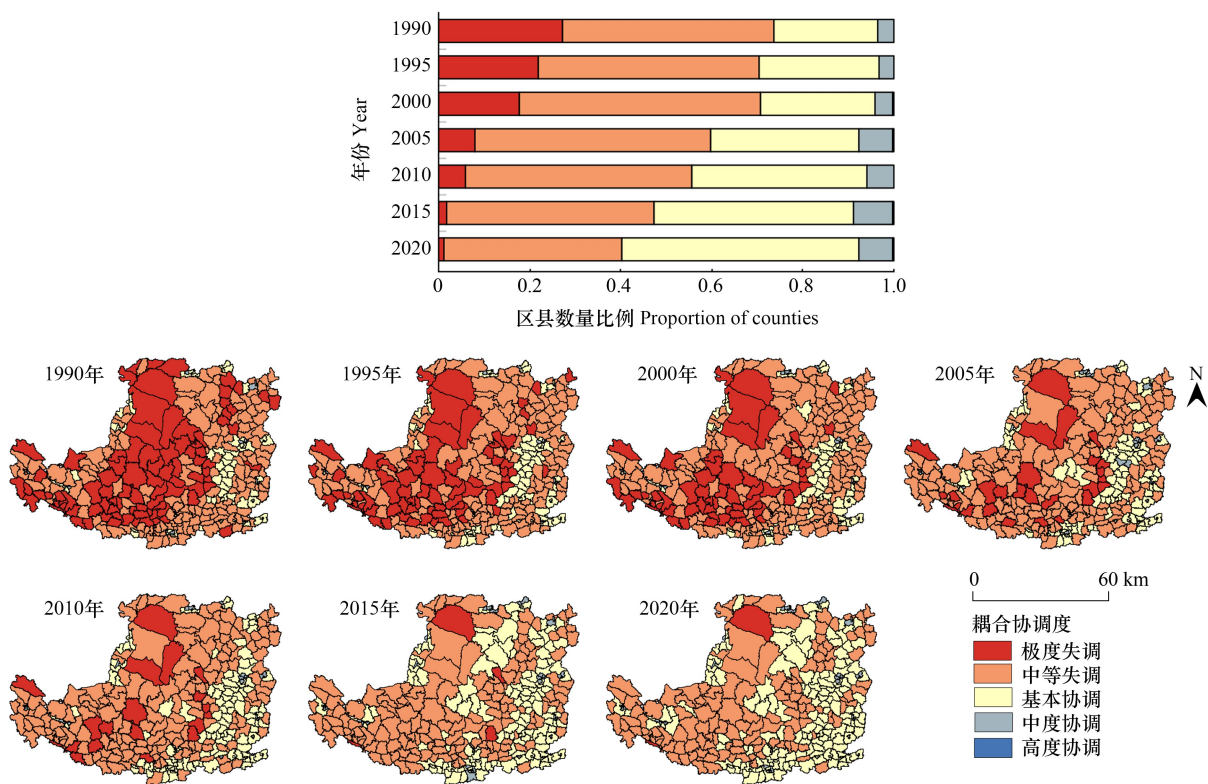


图 7 黄土高原城镇化与生态系统服务价值耦合协调度空间分布

Fig.7 The spatial distribution of coupling coordination degree between urbanization and ecosystem service value on the Loess Plateau

耦合协调度是表征静态的城镇化与生态系统服务价值相互协调关系的外部表现,但不能反映二者之间动态的相对发展程度,故采用脱钩模型划分两者之间的脱钩类型。黄土高原城镇化与生态系统服务价值之间的关系整体始终以强脱钩和弱脱钩为主(图 8),二者之和超黄土高原区县数量的 60%,处于连接状态的区县比例不超 2%。1990—1995 年,有 114 个区县处于最不理想的强负脱钩状态(表 3),主要集中分布在宁夏市和甘肃省的交界处和零星分布在山西省;1995—2000 年,处于强脱钩的区县数量增加,占比 40.30%,弱脱钩和强负脱钩的数量有所下降,处于弱负脱钩状态的区县在山西省连片分布,这些区县的城镇化衰减速度大于生态

压力的衰减速度,城市发展模式不理想;2000—2005 年是黄土高原城镇化与生态环境之间的关系处于最和谐的状态,占黄土高原地区全部区县数量的 95.82%,强脱钩状态的区县持续增加,共有 219 个区县,这一时期城镇化发展对环境损害较小,处于健康的发展状态,仅有山西省临汾市乡宁县和汾西县处于强负脱钩的状态;2005—2010 年,强负脱钩区县数量大幅上升至 48 个,在山西省临汾盆地和太原盆地中多个区县集中成片分布,弱负脱钩数量上升至 65 个,在黄土高原中部成片分布,这一时期城镇化发展与生态环境之间存在一定的冲突,在发展经济的同时对于生态保护的意识有所下降。2010—2015 年,强脱钩数量下降至 144 个区县,弱脱钩数量上升至 123 个,两者之和占黄土高原区县总数的 79.70%,河流水系沿岸以弱脱钩状态为主,而强负脱钩区县数量有所下降,主要分布于山西省;2015—2020 年,强脱钩和弱脱钩的区县数量均下降,两者共占 67.16%,强负脱钩区县数量上升至 62 个,零星分布在中心城市及其周边区县。

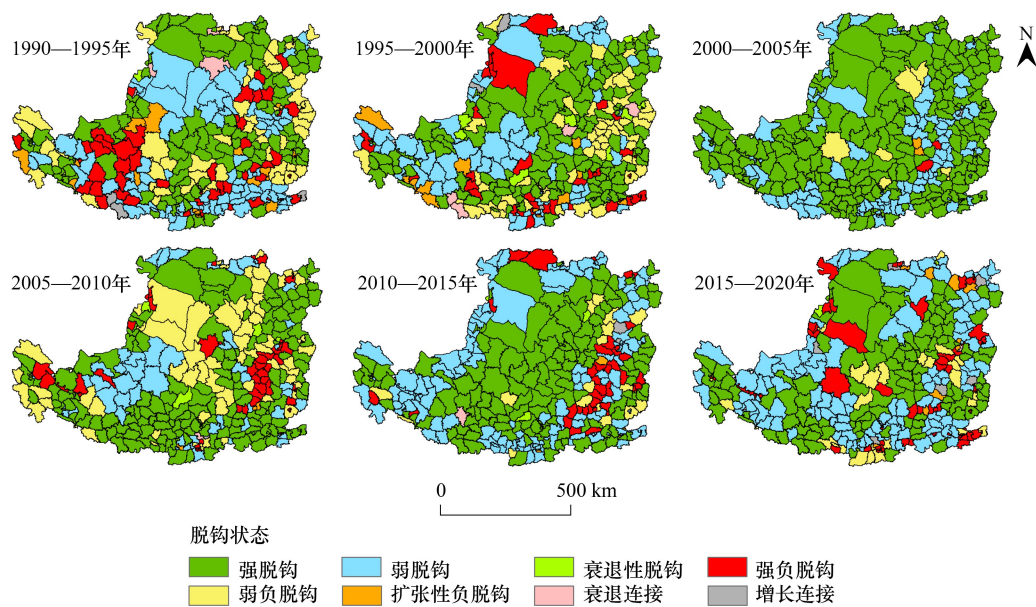


图 8 黄土高原各区县脱钩状态空间分布

Fig.8 The spatial distribution of the decoupling status between urbanization and ecosystem service value on the Loess Plateau

表 3 黄土高原城镇化与生态系统服务价值脱钩类型区县数量

Table 3 Quantity of urbanization and ecosystem service value decoupling types of counties in the Loess Plateau

脱钩类型 Decoupling type	1990—1995 年	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
强脱钩 Strong decoupling	114	135	219	163	144	112
弱脱钩 Weak decoupling	87	74	102	50	123	113
衰退性脱钩 Recessive decoupling	2	8	—	4	3	5
强负脱钩 Strong negative decoupling	53	40	2	48	36	62
弱负脱钩 Weak negative decoupling	54	55	6	65	17	26
扩张性负脱钩 Expansive negative decoupling	18	14	5	3	9	9
增长连接 Expansive coupling	4	5	1	1	2	6
衰退连接 Recessive coupling	3	4	—	1	1	2

3 讨论

黄土高原是中国人口、资源、环境矛盾最为集中的地区之一,城镇化发展与生态环境保护关系复杂,从静态耦合协调和动态脱钩角度理清二者之间的辩证关系,有助于推动黄河流域生态保护和高质量发展的“双赢”目标。

3.1 CNLI 与建设用地率的相关性分析

城镇化的本质是人口向城市聚集的过程^[43],城镇化发展必然导致建设用地空间扩张,建设用地率是基于统计数据估算城镇化水平的重要指标之一^[44],将 CNLI 与建设用地率进行 Pearson 相关性分析,结果如表 4 所示,表明黄土高原各时期 CNLI 与建设用地率均存在显著的正相关关系($P<0.01$),这也从土地利用角度验证了利用夜间灯光数据估算城镇化水平的可靠性。本文研究发现黄土高原建设用地扩张主要来源于耕地,且建设用地扩张趋势未减,在未来城镇化开发中应根据城镇的实际情况科学进行城市空间规划,科学划定生态保护红线和城镇开发边界,合理配置土地资源,保持耕地占补平衡,保障区域粮食安全。

表 4 灯光指数(CNLI)与建设用地率 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis between compounded night light index(CNLI) and building land rate

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Pearson 相关系数	0.901 **	0.909 **	0.898 **	0.886 **	0.915 **	0.906 **	0.907 **
Pearson correlation coefficient							

** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关

3.2 耦合协调度和脱钩关系的变化原因与决策启示

整体来看,黄土高原县域城镇化与生态系统服务价值之间的协调度虽然持续增加,但其协调水平仍较低,这与黄土高原其它地区的研究相一致^[45],从空间分布来看,城镇化发展水平较高的西安市、兰州市、太原市、鄂尔多斯市的部分区县率先达到中度协调状态,随着城镇化水平的提高,建设用地扩张、资源开采等一系列人类活动使地表覆被状况发生巨变,导致生境质量降低,制约着区域的绿色发展^[10];同时,人们对于美好环境的需求不断提升,城镇化积累的资金用于环境治理与生态修复,生态环境得到改善,自然承载力不断提升,因此率先实现耦合协调发展^[46],通过二者之间相互胁迫和不断磨合,推动城镇化与生态系统的关系从低水平失调向高水平协调的方向演化^[47]。但黄土高原西部黄土高原沟壑区与沙地和沙漠区依旧以中等失调为主要类型,受制于复杂的地形条件和恶劣的自然条件,导致城镇发展与生态系统服务价值很难保持一致^[48]。

黄土高原地区综合治理与生态保护受到高度重视,黄土高原城镇化和生态系统服务价值之间以强脱钩和弱脱钩为主,与李思雅等^[49]对于黄河流域经济发展与生态环境的研究结果相一致。不同区县城镇化与生态系统服务价值的脱钩关系因其地理位置、自然资源、地方政策、经济基础等因素的综合作用而存在差异。强负脱钩多出现在黄土高原东部河谷平原区,其中多个时期在山西省连片分布,究其原因在于山西省是国家能源重化工基地,确立了建成全国煤炭能源重化工基地的发展战略,煤炭产业推动了地区发展,使得这一时期山西省多个区县城镇化水平较高,但较为单一的产业结构导致城镇化发展后续动力不足^[50],可持续性、稳定性和抗干扰性较差,同时长期的粗放式开采导致区域生态绿色空间严重不足,人地矛盾和生态问题突出^[51]。多个中心城区在近年来表现为强负脱钩的状态,周边城区多表现为弱脱钩和强脱钩,原因在于城镇化发展具有空间依赖性,即中心城区城镇化水平的提高将通过空间溢出促进周边城区的发展^[52],中心城镇的城镇化水平增长缓慢甚至有所下降,而其附近区域及周边城镇的人类活动强度增加,城镇化水平提升。此外,脱钩关系是一种动态的过程^[53],需要注意不同时期的城镇化与生态系统之间的关系,如 2000—2005 年期间,黄土高原正处于西部大开发和退耕还林(草)项目的初期,城镇化水平与生态系统服务价值呈双增长的发展态势,95.82%的区县实现有效脱钩,但近年来处于强负脱钩的区县数量有所增加,仍然存在生态恶化和城镇化倒退并行的风险,城镇化发展对生态系统的潜在威胁增加。

对于生态环境脆弱的黄土高原西部和中部,应保持生态优先的原则,以实现稳强脱钩为目标,因地制宜地根据其山水特色资源、民俗文化等优势,推动小城镇特色发展,并根据其资源承载能力和调度能力,科学合理规划城镇规模,满足区域生态安全的稳定和可持续发展的需要,实现城镇化的有序推进,平衡区域发展与生态保护的矛盾,避免陷入牺牲生态环境而导致与城镇化水平趋同的“低水平协调陷阱”。对于城镇化水平较高但易出现强负脱钩的东部河谷平原区,应大力推动产业转型,积极推进新能源产业体系建设,充分发挥区域特

色,加快城市群建设,对于中心城区应重视城市湿地、绿地及生态廊道的建设和保护,避免出现大范围复钩的现象。此外,省会城市应注重城镇化的绿色高质量发展,不应过分追求纯粹的强脱钩,通过产业转移等方式带动周边城区的协同发展,缓解生态压力,同时增强都市圈的产业分工与合作,构建都市圈之间绿色生态网,通过协同共治共建,形成黄土高原绿色发展格局。

3.3 研究展望

耦合协调度和脱钩模型尽管可以从静态耦合和动态脱钩两个角度分析黄土高原城镇化与生态系统服务价值的关系,但并未涉及二者关系变化的内在机理、驱动机制的深刻探讨,未来可考虑从人口城镇化、土地城镇化、经济城镇化等多角度对黄土高原城镇化与生态系统脱钩状态转变原因进行更全面的解析,为促进生态系统与人口、资源、经济的多赢,实现区域良性协调发展格局提出更加灵活有效的措施。

4 结论

本研究从县域视角分析了黄土高原城镇化和生态系统服务价值的时空变化特征,并借助耦合协调度和脱钩模型揭示了二者之间的关系。主要结论如下:1990—2020 年黄土高原城镇化和生态系统服务价值整体呈现双增长的态势,但其空间分布存在明显的差异性,受地形地貌等条件的约束,黄土高原城镇化表现出沿河分布特征,以省会城市为中心向周边扩展,热点区围绕西安市、洛阳市、太原市集聚分布,而生态系统服务价值表现出东南高、西北低的分布格局,中部陕西省和山西省的森林草地分布区成为生态系统服务价值的热点区,草地和林地提供了黄土高原 80% 以上的生态系统服务价值,二者面积的增加也是导致黄土高原生态系统服务价值在城镇化快速扩张时期保持增加趋势的主要原因。从静态耦合视角来看,虽然黄土高原城镇化与生态系统服务价值的耦合协调得到了一定的提升,59.70% 的地区已经处于基本协调以上,但耦合协调的等级较低且空间分布不平衡,受制于恶劣的自然条件,西部地区的耦合协调水平明显低于东部地区。从动态脱钩视角上来看,虽然各时期黄土高原城镇化和生态系统服务价值的关系均以强脱钩和弱脱钩为主,但脱钩关系是一种动态的过程,处于动态变化中,近年来处于强负脱钩状态的区县数量波动增加,城镇化的发展对生态环境的潜在威胁增加,应及时防范城镇化倒退和生态恶化并行的风险。研究黄土高原这一典型地区城镇化与生态系统服务价值的耦合协调和脱钩关系的时空变化,可以有效揭示城镇化和生态环境之间的深刻矛盾,对促进区域绿色健康高质量发展具有科学的示范价值。

参考文献 (References):

- [1] 胡胜,邱海军,王宁练,崔一飞,曹明明,王家鼎,王新刚. 地形对黄土高原滑坡的影响. 地理学报, 2021, 76(11): 2697-2709.
- [2] 傅伯杰,刘彦随,曹智,王壮壮,武旭同. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117.
- [3] 李宗善,杨磊,王国梁,侯建,信忠保,刘国华,傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [4] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,焦骄,李俐蓉,车应弟. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析. 干旱区地理, 2018, 41(1): 99-108.
- [5] 赵安周,张安兵,刘海新,刘焱序,王贺封,王冬利. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 449-460.
- [6] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略. 改革, 2019(11): 33-39.
- [7] 姚士谋,张平宇,余成,李广宇,王成新. 中国新型城镇化理论与实践问题. 地理科学, 2014, 34(6): 641-647.
- [8] 李硕硕,李汝资,刘耀彬,邓伟凤,刘澄浩,魏国恩. 环鄱阳湖区县城城镇化对碳收支平衡的影响. 地理研究, 2023, 42(8): 2245-2263.
- [9] 张佳田,焦文献,韩宝龙. 城镇化与生态系统服务的协调演化特征及空间耦合关系. 生态学报, 2020, 40(10): 3271-3282.
- [10] 陈万旭,刘志玲,李江凤,冉端,曾杰. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究. 生态学报, 2020, 40(15): 5137-5150.
- [11] Tretyakova E A. Assessing sustainability of development of ecological and economic systems: a dynamic method. Studies on Russian Economic Development, 2014, 25(4): 423-430.
- [12] 陈睿,杨灿,童晶,蒋晓娉,简向宇,欧阳姝. 长株潭城市群新型城镇化对生态系统服务价值空间分异的影响. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(6): 158-167.
- [13] 毕国华,杨庆媛,刘苏. 中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展. 经济地理, 2017, 37(1): 50-58.
- [14] 冯俊华,张路路. 陕西省新型城镇化与生态环境协调度研究. 生态学报, 2022, 42(11): 4617-4629.
- [15] 白立敏,冯兴华,孙瑞丰,高嵩. 生境质量对城镇化的时空响应——以长春市为例. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1267-1277.

- [16] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249-256.
- [17] 曹玉华, 夏永祥, 毛广雄, 蔡安宁, 刘传明. 淮河生态经济带区域发展差异及协同发展策略. 经济地理, 2019, 39(9): 213-221.
- [18] Liang W, Zhang W B, Jin Z, Yan J W, Lü Y H, Li S, Yu Q. Rapid urbanization and agricultural intensification increase regional evaporative water consumption of the Loess Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(23): e2020jd033380.
- [19] 陈田田, 陈果, 王强. 贵州省碳吸收/碳排放时空变化特征及与经济的脱钩效应. 生态学报, 2024, 43(3): 1-15.
- [20] 侯丽朋, 王琳, 钱瑶, 唐立娜. “双碳”目标下闽三角碳排放脱钩状态及驱动机制分析. 生态学报, 2022, 42(23): 9663-9676.
- [21] 李坦, 王静, 张庆国, 崔玉环, 姚佐文. 合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析. 生态学报, 2019, 39(5): 1735-1747.
- [22] 李汝资, 白晔, 周云南, 黄淑琪, 晏振宁, 李英姿, 赵宏波. 黄河流域水资源利用与经济增长脱钩及影响因素分解. 地理科学, 2023, 43(1): 110-118.
- [23] 孟庆香, 刘祺, 李保路, 郑燕娜, 蔡恩香. 2000—2020 年河南省土地利用强度与碳排放脱钩关系. 水土保持通报, 2023, 43(3): 421-429.
- [24] 陆琳忆, 胡森林, 何金廖, 曾刚. 长三角城市群绿色发展与经济增长的关系——基于脱钩指数的分析. 经济地理, 2020, 40(7): 40-48.
- [25] Yu Y D, Zhou L, Zhou W J, Ren H T, Kharrazi A, Ma T J, Zhu B. Decoupling environmental pressure from economic growth on city level: the Case Study of Chongqing in China. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 27-35.
- [26] 赵安周, 张向蕊, 相恺政, 刘宪锋, 张靓涵. 基于夜间灯光和统计数据的黄土高原城镇化水平时空格局分析. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 253-263.
- [27] 王一航, 吕彩凤, 潘鑫豪, 刘志锋. 青藏高原城镇化水平时空动态及影响因素——基于长时间序列夜间灯光数据的分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2023, 59(1): 163-174.
- [28] Song Y Y, Xue D Q, Dai L H, Wang P T, Huang X G, Xia S Y. Land cover change and eco-environmental quality response of different geomorphic units on the Chinese Loess Plateau. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 29-43.
- [29] 张立贤, 任浙豪, 陈斌, 宫鹏, 付昊桓, 徐冰. 中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集 (1984-2020). 国家青藏高原科学数据中心. 国家青藏高原科学数据中心, 2021.
- [30] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [31] 吴宗洋, 蔡卓雅, 郭英, 王彦芳. 黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析. 中国生态农业学报: 中英文, 2023, 31(6): 917-927.
- [32] Koen E L, Minnaar C, Roevers C L, Boyles J G. Emerging threat of the 21st century lightscape to global biodiversity. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2315-2324.
- [33] 李苏, 刘浩南. 干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析——以宁夏为例. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1281-1290.
- [34] Gao B, Huang Q X, He C Y, Ma Q. Dynamics of urbanization levels in China from 1992 to 2012: perspective from DMSP/OLS nighttime light data. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 1721-1735.
- [35] 孙金欣, 韩美, 孔凡彪, 魏帆. 黄河下游生境质量与城市化的耦合研究. 山东大学学报(理学版), 2023, 58(5): 1-16.
- [36] Xu Z Y, He X J, Chen L, Hu X X, Tang W M, Li J H. How does the urbanization level change in the Yangtze River economic belt, China? A multi-scale evaluation using DMSP/OLS nighttime light data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 675(1): 012112.
- [37] 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.
- [38] 罗琳, 杨璐, 谢红彬, 关钊, 魏平. 生态修复背景下矿山公园生态系统服务价值研究——以福建紫金山为例. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2171-2179.
- [39] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [40] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. 中国生态农业学报, 2005, (3): 10-13.
- [41] Shi T, Yang S Y, Zhang W, Zhou Q. Coupling coordination degree measurement and spatiotemporal heterogeneity between economic development and ecological environment —Empirical evidence from tropical and subtropical regions of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118739.
- [42] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151.
- [43] 简新华, 黄锬. 中国城镇化水平和速度的实证分析与前景预测. 经济研究, 2010, 45(3): 28-39.
- [44] 秦尊文, 聂夏清. 长江经济带城镇化效率与水资源效率协调发展时空演变及驱动因素. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2237-2253.
- [45] 张扬, 师海猛. 黄河流域城镇化高质量发展与生态环境耦合协调度评价. 统计与决策, 2022, 38(10): 71-75.
- [46] 陈佳锐, 李佳滔, 马仁锋, 张文忠. 青藏高原区域开发强度与生态安全的时空耦合演进. 生态学报, 2023, 43(10): 4039-4053.
- [47] 张青峰, 吴发启, 王力, 王健. 黄土高原生态与经济系统耦合协调发展状况. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1531-1536.
- [48] 宋永永, 薛东前, 马蓓蓓, 杨凯悦, 米文宝. 黄土高原城镇化过程及其生态环境响应格局. 经济地理, 2020, 40(6): 174-184.
- [49] 李思雅, 梁伟, 吕一河, 纪秋磊, 严建武, 兰志洋. 黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及其驱动效应分析. 生态学报, 2023, 43(13): 5417-5431.
- [50] 赵连荣, 葛建平. 山西省煤炭资源依赖型产业结构转型效果研究——基于 2002—2012 年投入产出表的动态分析. 生态经济, 2018, 34(1): 57-60.
- [51] 郭少东, 王晓军, 王宁, 董秀丽, 付勇勇. 山西省沿黄地区生态综合指数评价及时空变化. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3385-3392.
- [52] 吴一凡, 刘彦随, 李裕瑞. 中国人口与土地城镇化时空耦合特征及驱动机制. 地理学报, 2018, 73(10): 1865-1879.
- [53] 黄木易, 岳文泽, 何翔. 长江经济带城市扩张与经济增长脱钩关系及其空间异质性. 自然资源学报, 2018, 33(2): 219-232.