

# 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化

赵雪雁, 杜昱璇, 李 花, 王伟军

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** 城镇化是影响区域生态安全格局的重要因素,厘清城镇化与生态系统服务之间的关系,可为促进黄河流域生态保护与高质量发展提供决策参考。在分析2000—2018年黄河中游城镇化与生态系统服务时空格局的基础上,采用耦合协调度模型剖析了二者耦合关系的时空变化特征。研究发现:2000—2018年间,黄河中游地区综合城镇化水平提高72.24%,空间分布总体呈“南高北低”、以经济发达县区或城市群为中心向外递减的趋势;粮食生产、水源涵养、土壤保持和固碳服务量均呈增加趋势,且呈不同的空间分布态势;粮食生产、水源涵养、土壤保持和固碳服务与综合城镇化水平的耦合协调度总体呈上升趋势,但汾渭平原的耦合协调度普遍较低,而经济发达县区的耦合协调度普遍较高。

**关键词:** 城镇化;生态系统服务;耦合关系;时空变化;黄河中游

进入21世纪以来,随着全球城市化进程的不断加快,世界上已有超过半数的人口生活在城市地区。尽管城镇化推动了社会、经济、文化等的快速发展,但也引发了环境质量下降、耕地资源紧张、生态系统功能降低等一系列问题<sup>[1,2]</sup>,对资源环境保护带来巨大压力和挑战。如何降低快速城镇化对生态系统的负面影响,推进城镇化与生态系统服务协同发展,已成为全社会广泛关注的热点话题。未来地球计划、联合国《2030年可持续发展议程》、人居三会议等都强调城市化进程要与生态环境协调发展、与资源环境承载力相适应。当前,中国正处于快速城镇化进程中,如何促进城镇化高质量发展与生态环境保护相协调,因地制宜地将城镇化的高质量发展建立在区域资源环境承载力的基础上,不仅是当前新型城镇化战略的要求<sup>[3]</sup>,更是建设美丽中国的重要举措。

城镇化与生态系统服务之间存在着复杂的关系,目前国内外已就二者关系开展了大量研究。从研究内容来看,生态系统服务评估多是在Costanza<sup>[4]</sup>等人开发的价值量表基础上,通过不断改进价值当量因子来确定生态系统服务的价值量<sup>[5]</sup>,而城镇化水平多是基于土地利用/覆被变化<sup>[6-9]</sup>、夜间灯光数据<sup>[10]</sup>或城镇化率<sup>[11-13]</sup>等单一维度进行评价;从研究方法来看,已有研究主要利用数理统计模型或空间分析模型<sup>[14]</sup>探究城镇化水平与生态系统服务之间的关系,发现城镇化与各类生态系统服务之间存在负相关<sup>[15]</sup>、正相关<sup>[16]</sup>及“倒U型”等多种关系<sup>[17-19]</sup>,且两者空间耦合协调程度普遍较低。总体来看,虽有学者分析了城镇化与生态系统服务之间的关系,但多从城镇化的单一维度出发,较少从多维度综合考察城镇化水平及其与生态系统服务之间的耦合协调关系;此外,以往对黄河流域的研究主要集中在

收稿日期: 2020-06-27; 修订日期: 2020-10-19

基金项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19040502); 国家自然科学基金项目(41971268, 41661115, 41901150)

作者简介: 赵雪雁(1971-),女,甘肃武都人,博士,教授,主要从事生态经济研究。E-mail: zhaoxy@nwnu.edu.cn

水沙变化、生态保护、气候与土地覆被变化等方面,对城镇化与生态系统服务耦合关系的研究较少。当前,亟需从更综合的视角出发厘清黄河流域城镇化对生态系统服务的影响。

黄河流域是中国重要的生态屏障、粮食基地和经济地带,具有极为重要的战略地位。然而,受自然环境、资源禀赋、粗放式发展模式和快速城镇化进程的影响,该区的人地矛盾日益尖锐。尤其黄河中游地区城市密集、人口众多、经济基础相对薄弱,且正处于城镇化高速发展阶段,城镇化对生态环境的影响尤为显著,使该区成为中国资源环境压力最大且增长最快的地区<sup>[20]</sup>。当前,亟需揭示城镇化对生态系统服务的影响,制定合理的城镇化发展战略。鉴于此,本文以黄河流域中游为例,在建立城镇化水平综合评价指标体系的基础上,采用InVEST模型评估生态系统服务,分析2000—2018年黄河流域中游城镇化与生态系统服务的时空演化特征,并利用耦合协调度模型分析城镇化与生态系统服务之间的关系,旨在为黄河流域生态保护和高质量发展提供决策参考。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河中游地区位于内蒙古河口镇至河南郑州桃花峪,流域面积为 $3.44\times 10^5\text{ km}^2$ ,占黄河流域总面积的43.27%(图1),涉及蒙、宁、甘、晋、陕、豫6省(自治区)的30个地级市228个县。该区分属鄂尔多斯高原、晋中盆地、陕北高原、陇东高原、关中平原、晋南盆地以及豫西盆地等7个地貌类型区,并涉及呼包鄂榆、晋中、关中以及中原等4个城市群。黄河中游地区植被稀疏,61%的流域面积处于黄土高原区,水土流失严重,是黄河泥沙和下游洪水的主要来源区。同时,泾河、北洛河、渭河及汾河等流域汇聚于此。其中,渭河所在的汾渭平原是我国重要的粮食主产区,承担着重要的粮食生产服务功能(<http://www.yrcc.gov.cn/hhyl/hhgk/>)。2018年黄河中游地区人口为7723.6万人,占黄河流域总人口的23.03%;GDP为47205.5亿元,占黄河流域的25.62%;人均GDP为55830.7元,与全流域人均GDP大体一致,约占全国平均水平的85.14%;该区城镇化率为51.92%,与2000年相比,增幅达108.93%,但仍滞后于全国水平7.66%,目前正处于城镇化快速发展阶段<sup>[21]</sup>。

### 1.2 数据来源

研究数据包括黄河中游地区的土地利用数据、气象数据、植被指数(NDVI)数据、土壤属性数据、数字高程模型(DEM)数据以及社会经济统计数据。其中,土地利用数据和植被指数数据、年降雨量数据分别来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的《中国土地覆被栅格数据》《中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集》《年降雨

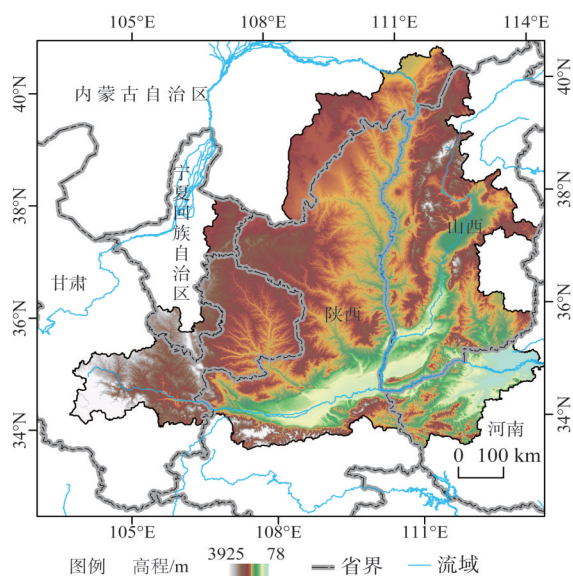


图1 研究区

Fig. 1 Location of the study area

量空间插值数据集》；DEM数据来自地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn/>），分辨率为90 m；土壤数据来自世界土壤数据库（HWSD）的《中国土壤数据集》；根系深度、蒸散系数参考相似地区文献<sup>[22]</sup>。社会经济统计数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》《中国县市经济统计年鉴》以及黄河中游地区6省（自治区）30市的统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 城镇化水平测度

城镇化具有多维性，包含人口迁移、城镇用地扩张、产业结构调整、资本集聚和消费习惯转变等一系列复杂的演化过程<sup>[23]</sup>。通常，采用单一指标法和综合指数法测量城镇化水平，与单一指标法相比，综合指数法更能反映城镇化的总体特征和水平<sup>[24]</sup>。因此，基于已有研究<sup>[25,26]</sup>，本文采用综合指数法，从人口、经济、社会、土地四个维度出发评估综合城镇化水平。其中，人口城镇化是指农村人口向城市流动或农业人口转变为非农业人口的过程，选取城镇人口比例和非农就业人口比例来测度人口城镇化水平<sup>[27]</sup>；经济城镇化是指劳动力、资本和技术等向城市集中的过程，选取人均GDP和非农产业产值占GDP比例来测度经济城镇化水平<sup>[28,29]</sup>；社会城镇化是指农村人口流入城市时消费习惯、行为选择和生活方式等的改变，选取人均社会消费品零售总额和城镇居民人均可支配收入来测度社会城镇化水平<sup>[30]</sup>；土地城镇化指土地利用由农村形态向城市形态转化的过程，选取人均道路铺设面积与建成区面积占城市土地总面积比例来测度土地城镇化水平<sup>[31]</sup>。为消除不同量纲数据对综合评价的影响，采用极差标准化法对上述指标进行归一化处理；采用熵值法确定各指标权重，最后采用加权求和法计算综合城镇化水平。具体评价指标及其权重见表1。

表1 城镇化水平评价指标体系  
Table 1 Urbanization evaluation index system

目标	维度（权重）	指标	权重
综合城镇化水平	人口城镇化（0.25）	城镇人口比例/%	0.594
		非农就业人口比例/%	0.406
	经济城镇化（0.25）	人均GDP/元	0.861
		非农产业产值占GDP比例/%	0.139
	社会城镇化（0.25）	人均社会消费品零售总额/元	0.758
		城镇居民人均可支配收入/元	0.242
	土地城镇化（0.25）	人均道路铺设面积/m <sup>2</sup>	0.165
		建成区面积占城市土地总面积比例/%	0.835

1.3.2 生态系统服务评估

利用InVEST模型评价黄河中游地区的水源涵养、固碳、土壤保持以及粮食生产服务。该模型因在一定程度上解决了生态系统服务功能形成机制不明确、评估结果实用性差等问题，而成为当前应用最为广泛的生态系统服务评估模型。本文选择具有普遍适用性的水源涵养、固碳以及土壤保持等模块，对黄河中游地区的生态系统服务进行估算。

（1）水源涵养服务

黄河中游地区作为调节黄河流域水沙关系的重要区域，其保有淡水以及生产水力资源的能力至关重要。使用InVEST模型中的产水模块计算水源涵养服务，具体计算公式如下：

$$Y_{jx} = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中:  $Y_{jx}$  为年产水量 (mm);  $P_x$  为年平均降雨量 (mm);  $AET_x$  为年平均蒸散量 (mm)。

#### (2) 土壤保持服务

土壤侵蚀是黄河中游地区面临的最严重生态问题, 严重阻碍该区可持续发展。通过 InVEST 模型中的土壤保持模块计算土壤保持量, 计算公式如下:

$$SEDRET_x = RKLS_x - USLE_x \quad (2)$$

式中:  $SEDRET_x$  为栅格单元  $x$  的土壤保持量 (t),  $RKLS_x$ 、 $USLE_x$  分别表示土壤潜在侵蚀量 (t)、实际土壤侵蚀量 (t) 以及栅格单元  $x$  自身拦截的沉积物保留量 (t)。具体计算公式如下:

$$RKLS_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (3)$$

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (4)$$

式中:  $R_x$  为降雨侵蚀力 [ $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ];  $K_x$  为土壤可蚀性;  $LS_x$  为坡长—坡度因子;  $C_x$  为植被覆盖因子;  $P_x$  为管理因子。

#### (3) 粮食生产服务

黄河中游地区作为中国粮食主产区之一, 对维护国家粮食安全具有重要意义。已有研究表明农作物与  $NDVI$  之间具有显著的线性关系<sup>[32]</sup>。因此, 基于土地利用/覆被类型, 将粮食产量按照栅格  $NDVI$  值与耕地总  $NDVI$  值的比值进行分配, 得到研究区粮食生产服务的供给量, 公式如下:

$$G_i = G_{sum} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \quad (5)$$

式中:  $G_i$  为  $i$  栅格中的粮食产量 (t);  $G_{sum}$  为研究区粮食总产量 (t);  $NDVI_i$  为  $i$  栅格的归一化植被指数;  $NDVI_{sum}$  为研究区耕地  $NDVI$  之和。

#### (4) 固碳服务

固碳服务能够通过碳储量和碳汇功能对陆地生态系统进行评估, 对分析研究区气候变化和可持续发展具有重要意义。采用 InVEST 模型中四个碳库 (地上生物量、地下生物量、土壤有机物、枯落物) 的平均碳密度乘以不同土地利用/土地覆被类型的面积来计算生态系统碳储量<sup>[33]</sup>, 具体计算公式如下:

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

式中:  $C_{total}$ 、 $C_{above}$ 、 $C_{below}$ 、 $C_{soil}$ 、 $C_{dead}$  分别表示总碳储量、地上部分、地下部分、土壤以及枯落物碳储量 (t)。

### 1.3.3 城镇化与生态系统服务的耦合关系

为了更好地阐明黄河中游地区城镇化与生态系统服务之间的关系, 本文首先利用 Pearson 相关分析法, 分析城镇化水平与水源涵养服务、土壤保持服务、粮食生产服务及固碳服务之间的相关性; 然后, 利用耦合协调度模型分析四类生态系统服务与城镇化的耦合协调度, 计算公式如下:

$$C_i = 2 \times \sqrt{\frac{w_i \times u}{(w_i + u)^2}} \quad (7)$$

$$T = \alpha w_i + \beta u \quad (8)$$



$$D = \sqrt{C \times T}$$

(9)

式中： $C_i$ 为生态系统服务与城镇化水平的耦合度，且 $C \in [0, 1]$ 。当 $C=1$ 时，耦合度最大，城镇化水平与生态系统服务达到高度协调发展，表明两个系统趋于有序发展；反之，两个系统趋于无序发展。 $w_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )、 $u$ 分别为四类生态系统服务、城镇化发展水平的综合评价价值； $T$ 为生态系统服务子系统与城镇化子系统综合评价指数； $\alpha$ 和 $\beta$ 为权重值，由于城镇化发展水平和生态系统服务水平同等重要，因此取 $\alpha=0.5$ ， $\beta=0.5$ ； $D$ 为生态系统服务与城镇化水平的耦合协调度。参考相关研究<sup>[34-37]</sup>，将耦合协调度划分为五种类型：严重失调（0.0~0.2）、中度失调（0.2~0.4）、基本协调（0.4~0.6）、中度协调（0.6~0.8）和高度协调（0.8~1.0）。

为进一步厘清失调状态下城镇化与生态系统服务的内在联系，利用相对发展指数，将城镇化与生态系统服务失调区分为生态系统服务滞后型、城镇化与生态系统服务共损型以及城镇化滞后型三个具体类型（表2）。

2 结果分析

2.1 黄河中游城镇化水平的时空变化

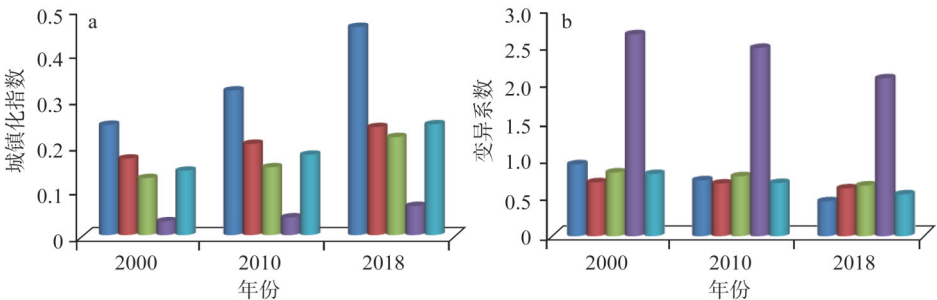
2.1.1 人口城镇化的时空变化

2000—2018年黄河中游人口城镇化水平呈显著增加趋势（图2a）。人口城镇化指数由0.25增至0.48，增幅为88.86%。从变异系数来看（图2b），人口城镇化水平的区域差异呈缩小趋势，由0.96降至0.46，降幅为51.54%。从全局自相关来看，Moran's  $I$ 均大于0.35，均通过显著性检验，且Moran's  $I$ 总体呈波动上升趋势，表明黄河中游人口城镇化水平的空间集聚性仍趋于增强。

从空间分布来看（图3），2000—2018年黄河中游人口城镇化水平总体呈“北高西低”的分布特征。其中，高水平区县比例由15.79%增长到30.26%，主要集中在黄河中游各省市的中心县区，且逐渐扩张，形成以呼包鄂榆城市群和晋中城市群为主的双核心模式。而低水平区县比例由42.98%减至17.11%，主要分布在黄河中游各省份的交界区域，且明显收缩至甘肃省境内部分县区。究其原因主要在于，中心县区通常是城镇发展的核心区，城镇人口比例和二产业就业人口比例均高于周边县区，同时，呼包鄂榆城

表2 城镇化与生态系统服务失调区具体类型划分标准  
Table 2 Classification criteria for coupling and coordination types of urbanization and ecosystem services

类型	相对发展指数	具体分类
失调型	$0 < \beta = w_i/u \leq 0.9$	生态系统服务滞后型失调
	$0.9 < \beta = w_i/u \leq 1.1$	城镇化与生态系统服务共损型失调
	$\beta = w_i/u > 1.1$	城镇化滞后型失调



图例 ■ 人口城镇化 ■ 经济城镇化 ■ 社会城镇化 ■ 土地城镇化 ■ 综合城镇化

图2 黄河中游城镇化发展指数及城镇化水平的变异系数

Fig. 2 Urbanization development index and coefficient of variation of urbanization in the Middle Yellow River

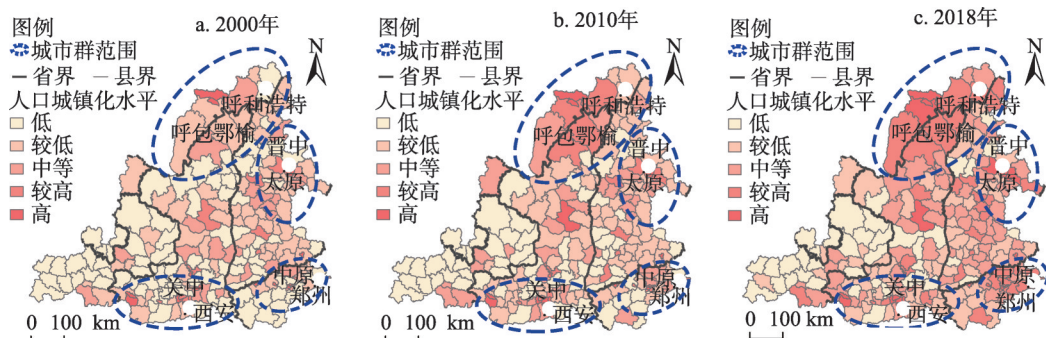


图3 黄河中游人口城镇化水平的空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of population urbanization level in the Middle Yellow River

市群和晋中城市群的快速发展进一步吸引人口集聚，从而在中游地区形成了双核心分布模式。而地处黄河中游的甘肃部分县区则因山大沟深的地形条件限制，人口城镇化发展水平始终处于滞后状态。

### 2.1.2 经济城镇化的时空变化

2000—2018年黄河中游经济城镇化水平呈显著增加趋势（图2a）。经济城镇化指数由0.18增长为0.25，增幅为41.29%。从变异系数来看（图2b），经济城镇化水平的区域差异趋于缩小，变异系数由0.72降至0.64，降幅为11.29%。从全局自相关来看，Moran's  $I$ 均大于0.380，均通过显著性检验，且呈上升趋势，表明经济城镇化表现出显著的空间集聚态势，且空间集聚性逐渐增强。

从空间分布来看（图4），2000—2018年黄河中游经济城镇化水平总体呈“北高西低”的分布特征。其中，高水平区区县比例由10.09%增至19.30%，且由鄂尔多斯的东胜区逐渐扩张至呼包鄂榆城市群，而低水平区区县比例由35.96%减至22.37%，主要分布在黄河中游中部以及西南部的陕西、宁夏、甘肃部分县区，且大幅收缩，尤其是黄河中游中部地区收缩显著。总体来看，2000—2018年经济城镇化水平整体有所提升，并呈较低水平区向较高水平区的转移态势。自2000年西部大开发战略实施以来，黄河中游西北部地区的经济城镇化始终处于最高水平，而甘肃省境内县区以及距各省中心地区较远的部分县区，因受自然条件、资源禀赋等要素的制约，经济城镇化水平整体处于滞后状态。

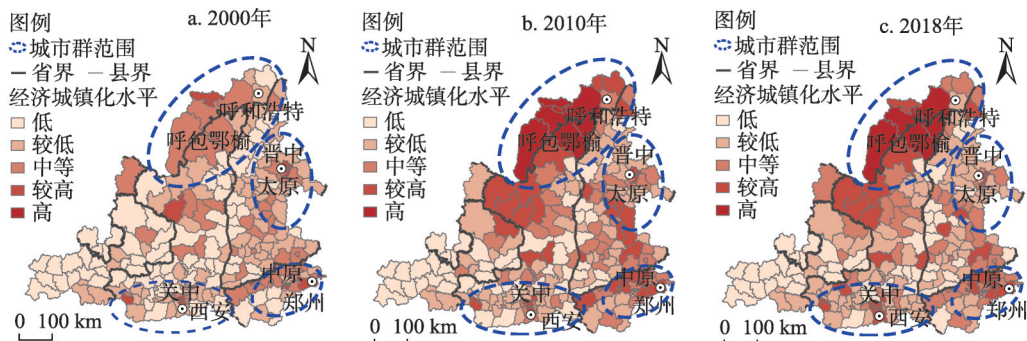


图4 黄河中游经济城镇化水平的空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution pattern of economy urbanization level in the Middle Yellow River

### 2.1.3 社会城镇化的时空变化

2000—2018年黄河中游社会城镇化水平呈显著增加趋势(图2a)。社会城镇化指数由0.13增至0.23,增幅达到72.06%。从变异系数来看(图2b),社会城镇化水平的区域差异趋于缩小,变异系数由0.85降至0.68,降幅为20.48%。从全局自相关来看,县域尺度的Moran's  $I$ 均大于0.44,均通过显著性检验,且Moran's  $I$ 总体呈上升趋势,表明黄河中游社会城镇化水平空间集聚性趋于增强。

从空间分布来看(图5),2000—2018年黄河中游社会城镇化水平总体呈现出“北高西低”的分布特征。其中,高水平区县占比基本保持不变,主要分布于鄂尔多斯市和郑州市中心县区;低水平区县占比由35.96%降至27.19%,并由陇东、陕北高原的连片分布收缩至甘肃、宁夏部分县区。总体来看,黄河中游社会城镇化水平主要以低水平区向较低水平区转移为主。鄂尔多斯市和郑州市作为呼包鄂城市群的中心城市和中原城市群的核心城市,其社会城镇化水平显著高于其他地区,其中,城镇居民人均可支配收入约为低水平区的2倍。

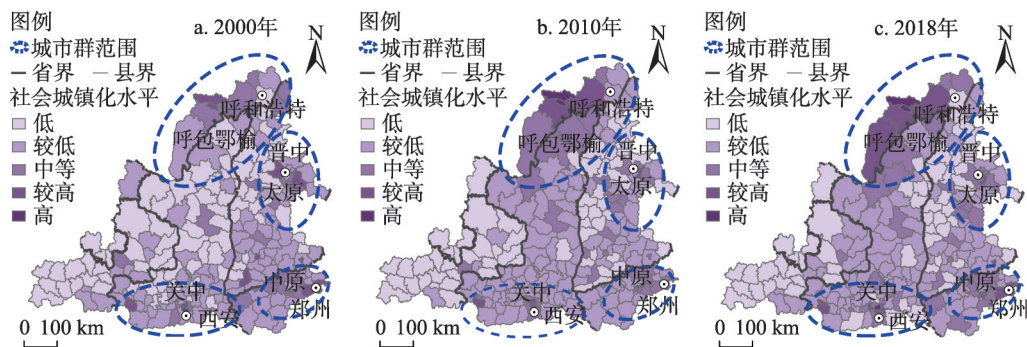


图5 黄河中游社会城镇化水平的空间分布格局

Fig. 5 Spatial distribution pattern of social urbanization level in the Middle Yellow River

### 2.1.4 土地城镇化的时空变化

2000—2018年黄河中游土地城镇化水平呈显著的增加趋势(图2a),土地城镇化指数由0.03增至0.07,增幅为112%。从变异系数来看(图2b),土地城镇化水平的区域差异趋于缩小趋势,变异系数由2.69降至2.10,降幅为21.86%。从全局自相关来看, Moran's  $I$ 均大于0.28,均通过显著性检验,且Moran's  $I$ 总体呈上升趋势,表明黄河中游土地城镇化水平空间集聚性趋于增强。

从空间分布来看(图6),2000—2018年黄河中游土地城镇化总体处于低水平,且呈由中心城市以及经济发达地区向外围递减的分布特征。其中,低水平区县比例从81.14%减至74.56%,分布于黄河中游大部分地区,且范围略有收缩;较低水平区、较高水平区以及高水平区的区县比例虽有所提升,但增幅均较小,整体仍以低水平区为主。

### 2.1.5 综合城镇化水平的时空变化

2000—2018年黄河中游综合城镇化水平呈显著增加趋势(图2a)。综合城镇化指数由0.15增长至0.26,增幅为72.24%。从变异系数来看(图2b),综合城镇化水平的区域差异均呈缩小趋势,由0.83降至0.56,降幅为32.75%。从全局自相关来看, Moran's  $I$ 均大于0.44,均通过显著性检验,且Moran's  $I$ 总体呈上升趋势,表明黄河中游综合城镇化水平空间集聚性趋于增强。





图6 黄河中游土地城镇化水平的空间分布格局

Fig. 6 Spatial distribution pattern of land urbanization level in the Middle Yellow River

从空间分布来看(图7), 2000—2018年黄河中游综合城镇化水平总体呈现出“北高西低”的分布特征。其中, 高水平区县比例由2.63%增至5.7%, 主要分布在呼包鄂榆城市群, 且呈扩张趋势; 而低水平区县比例由39.03%减至26.32%, 主要分布在甘肃、山西、陕西等经济发展水平较低的部分区县, 且范围趋于收缩。总体来看, 黄河中游地区综合城镇化水平以较低水平和中等水平区为主, 且表现出以低水平区向较低水平区的递次转移和向中等水平区的跳跃转移态势。高水平区主要分布在人口集聚能力强、经济发展水平高、公共服务及基础设施较完善的区县; 而低水平区主要分布在自然条件差、经济基础薄弱的区县。

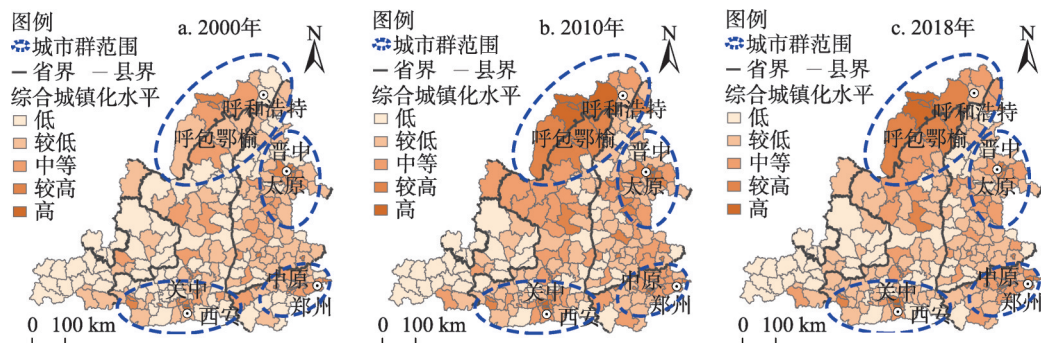


图7 黄河中游综合城镇化水平的空间分布格局

Fig. 7 Spatial distribution pattern of comprehensive urbanization level in the Middle Yellow River

## 2.2 黄河中游生态系统服务的时空变化

### 2.2.1 水源涵养服务的时空变化

2000—2018年黄河中游地区水源涵养服务量呈先增后减趋势, 总体增幅为49.23%。单位面积水源涵养服务(图8a)由 $270.21 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 增至 $380.53 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 增幅为40.83%。从变异系数来看(图8b), 水源涵养服务的区域差异趋于扩大, 变异系数由1.301增至1.317, 增幅为1.20%。从全局自相关来看, 2000—2018年水源涵养服务的Moran's  $I$ 均大于0.48, 均通过显著性检验, 且Moran's  $I$ 总体呈显著上升趋势, 表明黄河中游水源涵养的空间集聚性趋于增强。

从空间分布来看(图9), 2000—2018年, 黄河中游的水源涵养服务量总体呈“南高



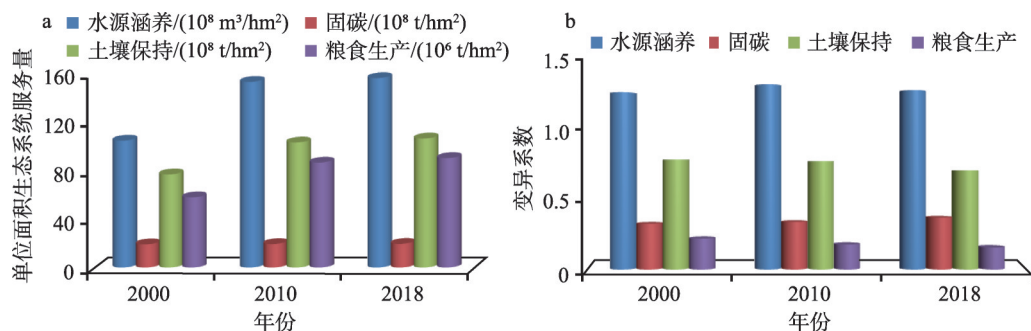


图8 单位面积生态系统服务量及生态系统服务变异系数

Fig. 8 Unit area and coefficient of variation of ecosystem services

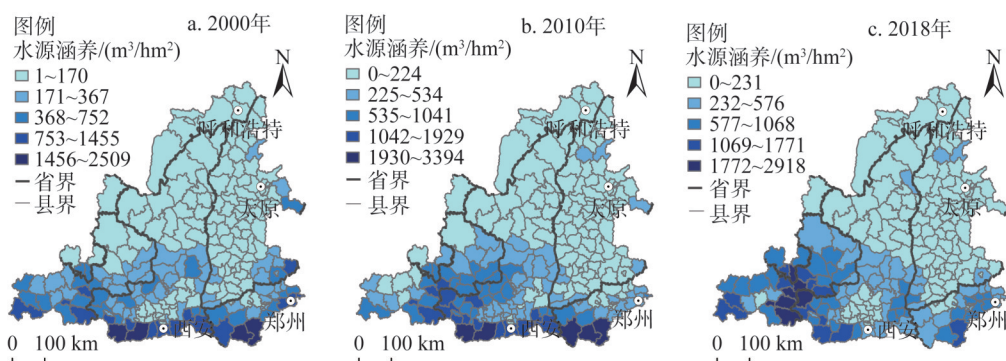


图9 黄河中游水源涵养服务的空间分布格局

Fig. 9 Spatial distribution pattern of water conservation service in the Middle Yellow River

北低”的分布态势。其中，高值区区县比例变化较小，在空间上呈现出由南部的豫西盆地一带向陇东高原转移的态势。这是因为2016年以来，陇东高原大力实施退耕还林、荒山造林等工程，该区森林覆盖率得到了显著提升，致使水源涵养能力大幅提高。低值区主要位于鄂尔多斯高原、陕北高原及晋中盆地等，且范围略有收缩。其中，鄂尔多斯高原和陕北高原植被相对稀疏、降雨偏少，而晋中盆地及晋南盆地人口密度大且耕地集中连片，故这些区域的水源涵养能力普遍较低。

### 2.2.2 土壤保持服务的时空变化

2000—2018年黄河中游土壤保持服务量呈现先增后减趋势（图8a），总体增幅为38.53%。单位面积土壤保持服务由 $191.70 \text{ t}/\text{hm}^2$ 增至 $248.17 \text{ t}/\text{hm}^2$ ，增幅达29.46%。从变异系数来看（图8b），土壤保持服务的区域差异整体呈缩小趋势，变异系数由0.807降至0.728，降幅为9.83%。从全局自相关来看，土壤保持服务的Moran's  $I$ 均大于0.39，均通过显著性检验，且Moran's  $I$ 总体呈上升趋势，表明黄河中游土壤保持服务的空间集聚性趋于增强。

从空间分布来看（图10），2000—2018年黄河中游土壤保持服务总体呈由“南高北低”的分布态势。其中，高值区区县比例变化不大，主要由东南部的晋南盆地和豫西盆地向西南部的关中平原和陇东高原一带转移，并由点状分布转变为较为集中的连片分布；而中值区区县比例由31.14%减至25.88%，主要分布在陇东高原和关中平原，且分布

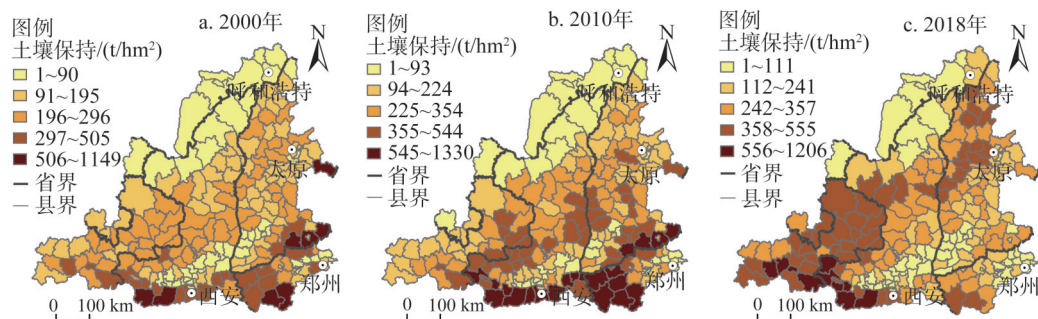


图10 黄河中游土壤保持服务的空间分布格局

Fig. 10 Spatial distribution pattern of soil conservation service in the Middle Yellow River

范围略有收缩, 主要向较高值区转移。究其原因, 主要在于2000年以来, 黄河中游地区大力开展以退耕还林、小流域治理为主的生态治理项目, 该区植被覆盖度大幅提升, 故使其土壤保持能力增强。

### 2.2.3 粮食生产服务的时空变化

2000—2018年黄河中游粮食生产服务量总体呈增加趋势(图8a), 增幅高达56.04%。单位面积粮食生产服务由 $1.64 \text{ t/hm}^2$ 增加至 $2.38 \text{ t/hm}^2$ , 增幅为44.70%。从变异系数来看(图8b), 粮食生产服务的区域差异趋于缩小, 变异系数由0.228降至0.161, 降幅为29.14%。从全局自相关来看, 粮食生产服务的Moran's  $I$ 均大于0.59, 且均通过显著性检验, 但Moran's  $I$ 总体呈下降趋势, 表明黄河中游粮食生产服务的空间集聚性趋于减弱。

从空间分布来看(图11), 2000—2018年黄河中游粮食生产服务整体呈“东南高、西北低”的分布特征。其中, 高值区县区比例由14.47%增至27.19%, 且由晋南盆地、豫西盆地扩展至关中平原、陇东高原及陕北高原。而低值区县区比例由14.04%减至5.26%, 主要分布在鄂尔多斯高原, 且范围明显收缩。汾渭平原作为黄河中游地区的粮食主产区, 拥有丰富的耕地资源和水热条件, 其粮食生产能力相对较强; 尽管鄂尔多斯高原粮食生产能力相对较弱, 但近年来该区持续开展“三农三牧”工作, 该区粮食生产服务得到了有效提升。

### 2.2.4 固碳服务的时空变化

2000—2018年黄河中游固碳服务量总体呈微弱的增加趋势(图8a), 增幅为2.00%。

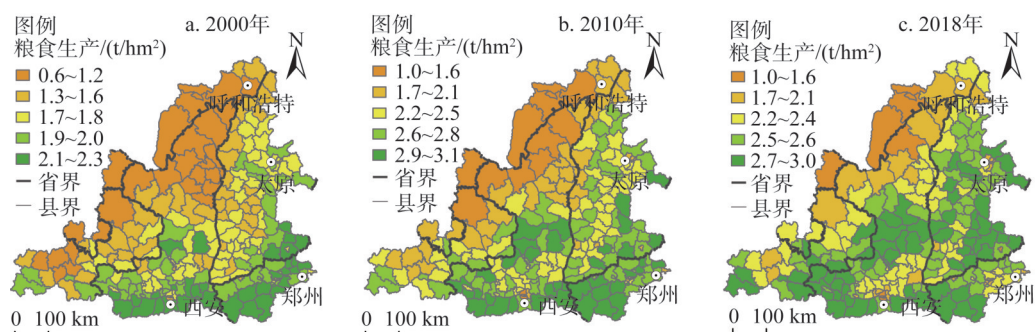


图11 黄河中游粮食生产服务的空间分布格局

Fig. 11 Spatial distribution pattern of grain production service in the Middle Yellow River

单位面积固碳服务由  $47.69 \text{ t/hm}^2$  下降至  $47.35 \text{ t/hm}^2$ ，降幅为  $0.72\%$ 。从变异系数来看（图 8b），固碳服务的区域差异呈扩大趋势，变异系数由  $0.336$  增至  $0.382$ ，增幅为  $13.62\%$ 。从全局自相关来看，Moran's  $I$  均大于  $0.43$ ，均通过显著性检验，且 Moran's  $I$  总体呈上升趋势，表明黄河中游固碳服务的空间集聚性趋于增强。

从空间分布来看（图 12），2000—2018 年黄河中游固碳服务能力整体较强，呈“东南高、西北低”的分布特征。其中，高值区主要分布在东部的晋中盆地和晋南盆地，低值区主要分布在西北部的鄂尔多斯高原，且空间分布格局整体变化较小。但相较于 2000 年，2018 年固碳服务的高值区范围有所收缩，主要表现为高值区向较高值区的递次转移。黄河中游固碳服务整体变幅不大。

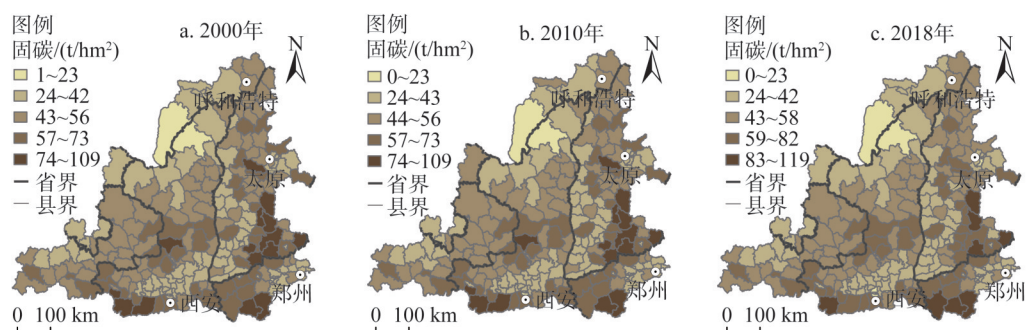


图 12 黄河中游固碳服务的空间分布格局

Fig. 12 Spatial distribution pattern of carbon sequestration service in the Middle Yellow River

## 2.3 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化

### 2.3.1 城镇化水平与生态系统服务的相关性

首先，利用 Pearson 相关分析法检验城镇化水平与生态系统服务之间的关系（图 13）。结果显示，2000—2018 年黄河中游城镇化水平与生态系统服务之间存在较强的负相关关系；在城镇化水平与生态系统服务之间的 60 对相关关系中，有 54 对在  $0.05$  水平上表现出显著的负相关关系；人口城镇化水平、综合城镇化水平与四类生态系统服务之间始终存在显著的负相关关系。其中，综合城镇化水平、人口城镇化水平与水源涵养服务的负相关性均趋于增强，而与另外三类生态系统服务的负相关性呈先减弱后增强的“U”型趋势。经济城镇化水平与水源涵养服务和土壤保持服务主要表现为负相关关系，而社会城镇化水平、土地城镇化水平则始终与土壤保持、粮食生产和固碳服务呈高度负相关，且土地城镇化水平与这三类生态系统服务的负相关关系均呈现不断增强态势。总体而言，随着城镇化水平的提高，黄河中游水源涵养服务以及土壤保持服务趋于下降，而粮食生产服务以及固碳服务有所增加，说明城镇化水平提高在一定程度上促进了经济增长和粮食产量提高，但同时也对生态环境造成了破坏。

### 2.3.2 城镇化水平与生态系统服务耦合关系的时空变化

随着城镇化的快速推进，人口密度增长、产业结构变化、建设用地扩张等共同导致的资源消耗与环境污染会使生态系统面临更为严峻的压力。只有实现城镇化与生态环境协调发展，才能确保黄河流域生态保护和高质量发展。2000—2018 年间，黄河中游水源涵养服务与综合城镇化水平的耦合协调度整体呈上升趋势，协调度由  $0.24$  上升到  $0.28$ ，



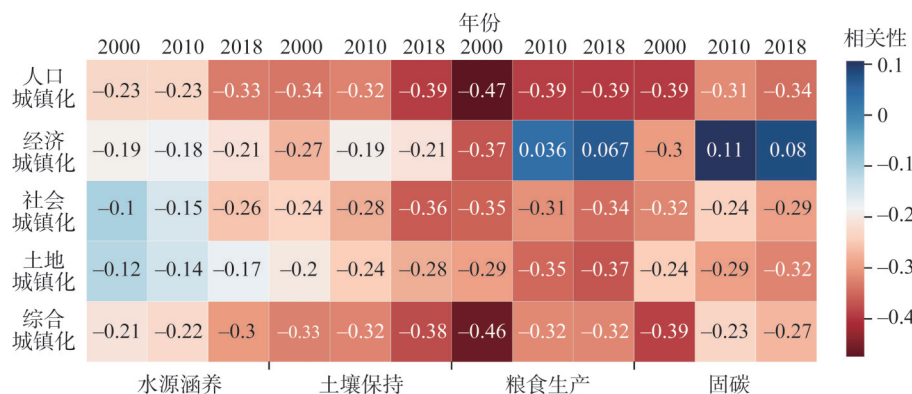


图 13 2000—2018 年黄河中游城镇化水平与生态系统服务的相关性

Fig. 13 Correlation between the urbanization level of the Middle Yellow River and ecosystem services from 2000 to 2018

增幅为 17.54%。但耦合协调水平整体仍较低, 尚有 85.09% 的区域处于失调状态。从空间分布来看 (图 14a), 黄河中游耦合协调度呈“南高北低, 由西向东逐渐增高”的分布格局。北部的严重失调区大幅收缩, 所占比例减少了 26.25%, 主要由鄂尔多斯市以及陕西北部县区的面状分布向东收缩至汾河平原一带, 且由严重失调提高至中度失调或基本协调; 而基本协调区大幅扩张, 增幅高达 126.67%, 主要由鄂尔多斯高原的严重失调区和陇东高原的中度失调区向基本协调区转变。

2000—2018 年间, 黄河中游水土保持服务与综合城镇化水平的协调度值由 0.31 上升到 0.35, 增幅为 13.25%, 总体呈现向基本协调转移的态势, 但从耦合协调度平均水平来看, 仍处于中度失调状态。从空间分布来看 (图 14b), 水土保持服务与综合城镇化水平的耦合协调度呈以陕北高原为中心向外围降低的态势。其中, 失调区所占比例由 82.02% 减至 62.72%, 其中陇东高原和关中平原主要由城镇化滞后型失调区向协调区转变; 鄂尔多斯高原部分县区则是从水土保持服务滞后型失调区向协调区转变; 渭河流域一带则始终处于水土保持服务滞后型失调状态; 而协调区所占比例由 17.98% 增至 37.18%, 主要以陕甘边界县区为中心呈条带状扩张。

2000—2018 年间, 黄河中游粮食生产服务与综合城镇化水平的耦合协调度由 0.39 上升到 0.43, 增幅为 10.86%, 耦合协调度平均水平由中度失调型转变为基本协调型。从空间分布来看 (图 14c), 耦合协调度总体呈“北高南低”的分布格局。其中, 中度协调区由 0.88% 增至 4.39%, 且由鄂尔多斯市向外扩张至呼包鄂榆城市群; 中度失调区所占比例由 56.14% 下降到 35.09%, 且大幅收缩至渭河流域一带, 主要是由陇东高原和陕北高原的中度失调区转移为基本协调区所引起的。其中, 陇东高原和陕北高原的县区粮食生产服务与城镇化总体协调程度虽不断提高, 但城镇化发展水平仍较低。

2000—2018 年间, 黄河中游固碳服务与综合城镇化水平的耦合协调度由 0.35 上升到 0.41, 增幅为 17.66%, 耦合协调度平均水平由中度失调型转变为基本协调型, 基本协调区占比由 28.95% 上升至 46.93%。从空间分布来看 (图 14d), 固碳服务与综合城镇化水平的耦合协调度呈以汾渭平原为中心向外逐渐升高的分布格局。其中, 中度失调区比例由 67.98% 减至 45.18%, 尤其在陇东高原和陕北高原明显缩减, 且转化为基本协调区; 而中度协调区所占比例由 0.44% 增至 4.39%, 主要分布于鄂尔多斯高原, 且逐渐向外扩张。



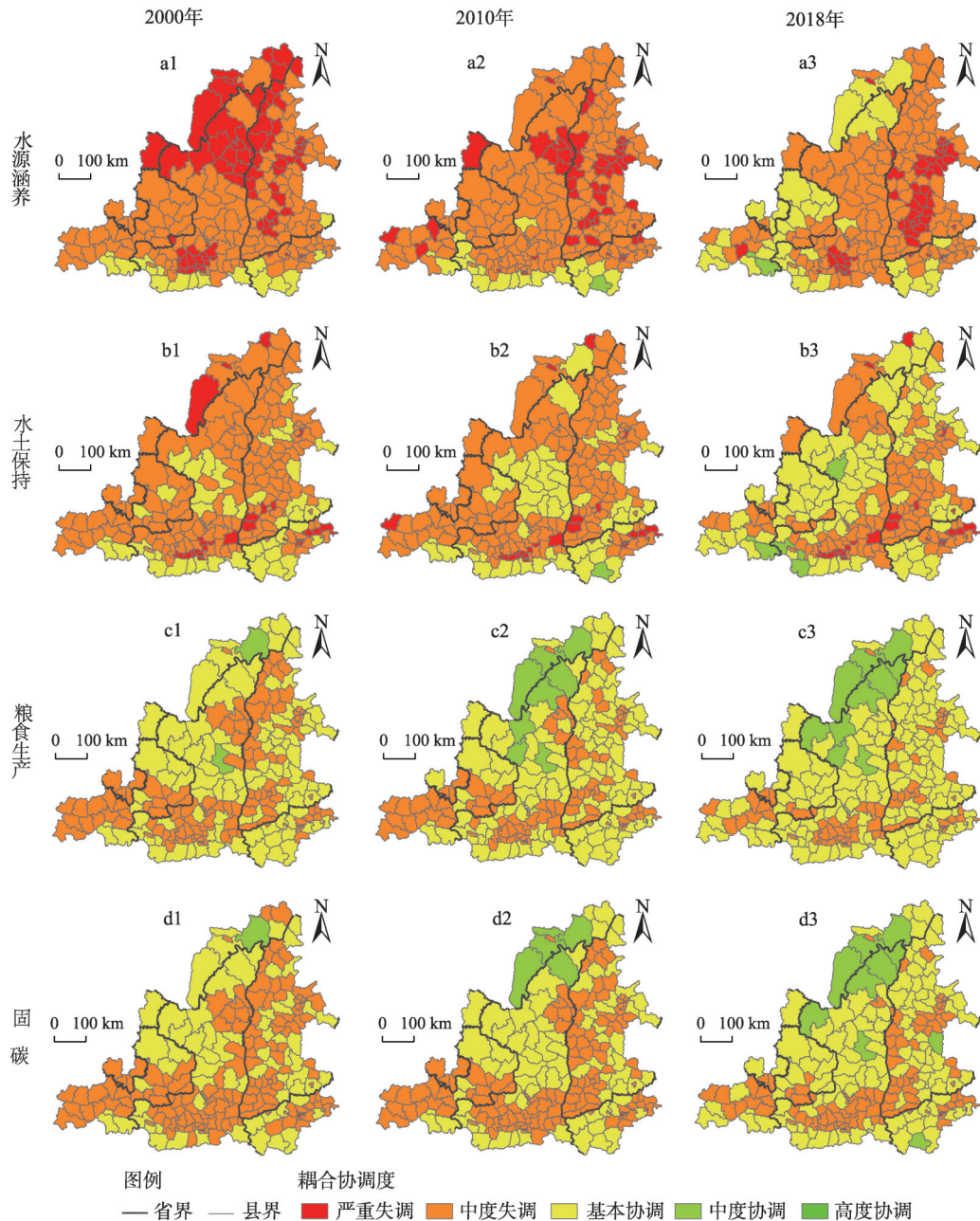


图 14 黄河中游综合城镇化水平与水源涵养服务、土壤保持服务、粮食生产服务、固碳服务耦合关系的时空变化

Fig. 14 Spatial distribution of coupled coordination degree of comprehensive urbanization level with water conservation service, soil conservation service, food production service, and carbon sequestration service at county scale in 2000, 2010, and 2018

与2000年相比，黄河中游城镇化水平与各类生态系统服务的耦合协调度均有所上升，其中，水源涵养服务与综合城镇化水平的耦合协调度虽然最低，但其增幅较大；粮食生产服务与综合城镇化水平的耦合协调度虽然最高，但增幅较小。总体来看，增强水源涵养服务与城镇化水平的耦合协调度是黄河中游地区需重点关注的问题。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

辨明黄河中游城镇化与生态系统服务的耦合关系,对于促进黄河流域生态环境保护与高质量发展具有重要的推动作用。本文利用InVEST模型、Pearson相关系数以及耦合协调度模型等,分析了黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化,得出以下结论:

(1) 2000—2018年黄河中游城镇化水平总体呈上升趋势。其中,人口城镇化水平最高,经济城镇化水平和社会城镇化水平次之,土地城镇化水平最低,但增幅最大。从空间分布来看,城镇化水平呈现以经济发达县区和呼包鄂榆、中原城市群为中心向外部扩散的态势,且区域总体差异趋于缩小。

(2) 2000—2018年黄河中游四类生态系统服务总体呈上升趋势。其中,水源涵养服务量增幅为49.23%,总体呈由南向北递减的分布态势;土壤保持服务量增幅为38.53%,且由“南高北低”转变为“中间高、南北低”的分布态势;粮食生产服务量增幅为56.04%,总体呈由东南向西北递减的分布态势;固碳服务量变化幅度较小,增幅仅为2%,总体呈东南向西北递减的分布态势。

(3) 2000—2018年黄河中游城镇化水平与生态系统服务的耦合协调度总体呈增长趋势,但增幅较小,呈现出由中度失调型向基本协调型转变的态势。具体来看,粮食生产服务与综合城镇化水平的耦合协调度最高,固碳服务、土壤保持服务与综合城镇化水平的耦合协调度次之,水源涵养服务与综合城镇化水平的耦合协调度最低。空间分布上,水源涵养服务与综合城镇化水平的耦合协调度呈由“南高北低,由西向东逐渐增高”的分布格局转变为沿汾渭平原向外递增的分布态势;土壤保持服务与综合城镇化水平的耦合协调度呈以陕北高原为中心向外围降低的态势;粮食生产服务与综合城镇化水平的耦合协调度总体呈“北高南低”的分布格局;固碳服务与综合城镇化水平的耦合协调度呈以汾渭平原为中心向外逐渐升高的分布格局。总体来看,汾渭平原生态系统服务与综合城镇化水平的耦合协调度普遍较低,而高耦合协调度区大多位于经济发达县区。

本文仅基于县域尺度探究了黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化,未来将从多尺度视角出发,进一步探究不同尺度下城镇化水平与生态系统服务的耦合关系及其尺度效应。此外,本文基于生态环境状况相似地区的监测数据,设置了InVEST模型中的部分参数,未来将进一步结合黄河中游的实地监测数据,增强参数的精确性,从而提高模型的解释力。

#### 3.2 讨论

为促进黄河中游城镇化与生态系统服务协调发展,应根据城镇化与生态系统服务的耦合协调类型分类施策。

针对城镇化滞后型地区,要加快转变经济发展模式,摒弃高排放、低效率的粗放型城镇化发展模式,在提升资源环境承载力基础上推进城镇化高质量发展。应加强基础设施建设,完善交通运输网、信息网等,促进区域间的协同发展,同时突出自身优势。此外,在湿地生态示范区、粮食主产区等应建立健全针对性的生态补偿机制。

针对生态系统服务滞后型地区,应健全生态保护补偿机制,加快完善公益林保护补偿、草畜平衡补偿等多元化补偿办法,形成符合黄河中游的生态保护补偿制度体系<sup>[38]</sup>。同时,应推进高标准农田建设,开展坡耕地平整以及农田基础设施建设,打造保障国家

和区域粮食安全、重要农产品有效供给的核心区。应加快推进山水林田湖草生态保护与修复工程,积极开展化肥、农药施用零增长行动。同时,应加快实施黄土高原地区固沟保塬工程,重点开展塬面径流调控、坡面植被恢复、沟道水沙集蓄等的综合治理,不断提升生态系统服务功能。

针对生态系统服务与城镇化共损型失调地区,要加快“三线”规划,科学划定生态保护红线、永久基本农田以及城镇开发边界三条引导线。积极推进兴林富民工程,加大低产、低质和低效经济林改造力度,保障农户经济收益;在加强基础设施建设的同时,进一步完善社会经济、住房保障等公共服务体系,加强县域城镇化的分类指导,推进就近就地城镇化<sup>[39]</sup>。

### 参考文献(References):

- [1] MENDOZA-GONZÁLEZ G, MARTÍNEZ M L, LITHGOW D, et al. Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecological Economics*, 2012, 82: 23-32.
- [2] TIM M. D, CHRISTINA C H, KATRINA B, et al. Elasticity in ecosystem services: exploring the variable relationship between ecosystems and human well-being. *Ecology and Society*, 2016, 21(2): 11, Doi: 10.5751/ES-08173-210211.
- [3] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向. *地理研究*, 2019, 38(1): 13-22. [FANG C L. Basic rules and key paths for high-quality development of the new urbanization in China. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 13-22.]
- [4] COSTANZA R, ARGE, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290-292. [ZHAO J Z, XIAO H, WU G. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 290-292.]
- [7] 李孝永, 匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响研究. *生态学报*, 2020, 40(16): 1-9. [LI X Y, KUANG W H. Urban land use/cover change and its impact on urban flood regulation ecosystem service in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (16): 1-9.]
- [8] 国家. 基于土地利用变化的红壤丘陵区生态系统服务价值分析. *生态经济*, 2019, 35(4): 210-213. [GUO J. Analysis of ecosystem service value in red soil hilly region based on land use change. *Ecological Economy*, 2019, 35(4): 210-213.]
- [9] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1172-1189. [ZHANG Y S, WU D T, LYU X. A review on the impact of land use/land cover change on ecosystem services from a spatial scale perspective. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1172-1189.]
- [10] ZHOU Z X, LI J, ZHANG W. Coupled urbanization and agricultural ecosystem services in Guanzhong-Tianshui Economic Zone. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 15407-15417.
- [11] 叶延琼, 李逸勉, 章家恩. 城市化过程中广州市农业生态系统服务价值的变化. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1523-1530. [YE Y Q, LI Y M, ZHANG J E. Changes of a groecosystem service value during urbanization of Guangzhou city, South China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1523-1530.]
- [12] 李惠梅, 张安录, 高泽兵, 等. 青海湖地区生态系统服务价值变化分析. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1747-1754. [LI H M, ZHANG A L, GAO Z B, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate and socio-economic driving factors of land use change on the ecosystem services value in the Qinghai Lake Area. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1747-1754.]
- [13] HOU X H, LIU J M, ZHANG D J, et al. Impact of urbanization on the eco-efficiency of cultivated land utilization: A case study on the Yangtze River Economic Belt, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117916>.
- [14] ROCES-DÍAZ J, VAYREDA J, BANQUÉ-CASANOVA M. The spatial level of analysis affects the patterns of forest ecosystem services supply and their relationships. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1270-1283.
- [15] YUAN Y J, CHEN D X, WU S H, et al. Urban sprawl decreases the value of ecosystem services and intensifies the supply scarcity of ecosystem services in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134170, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134170>.
- [16] LIU W, ZHAN J Y, ZHAO F. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of



- the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [17] FU B J, ZHUANG X L, JIANG G B, et al. Environmental problems and challenges in China. *Environmental Science & Technology*, 2014, 41(22): 7597, Doi: 10.1021/es072643l.
- [18] 程琳, 李锋, 邓华锋. 中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变. *生态学报*, 2011, 31(20): 6194-6203. [CHENG L, LI F, DENG H F. Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6194-6203.]
- [19] WANG J L, ZHOU W Q, PICKETT A, et al. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. *The Science of the Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [20] 戴铁军, 王婉君, 刘瑞. 中国社会经济系统资源环境压力的时空差异. *资源科学*, 2017, 39(10): 1942-1955. [DAI T J, WANG W J, LIU R. Spatio-temporal variation of resource and environmental pressure in China. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1942-1955.]
- [21] 黄河年鉴社. 黄河年鉴. 郑州: 水利部黄河水利委员会黄河年鉴社, 2019. [Yellow River Yearbook Press. Yellow River Yearbook. Zhengzhou: Yellow River Yearbook Press, Yellow River Conservancy Commission of Ministry of Water Resources.]
- [22] 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. 西安: 西北大学, 2015. [BAO Y B. Temporal and spatial change of ecological services on Loess Plateau of Shaanxi by InVEST model. Xi'an: Northwest University, 2015.]
- [23] CHEN A, GAO J. Urbanization in China and the coordinated development model: The case of Chengdu. *Fuel & Energy Abstracts*, 2011, 48(3): 500-513.
- [24] 李海波, 陈政, 欧沙. 县域城镇化与人口回流耦合关系研究: 基于湖南省88个县(市)数据的分析. *经济地理*, 2019, 39(11): 25-32. [LI H B, CHEN Z, OU S. The coupling relationship between county urbanization and population reflux: Analysis based on data of 88 counties (county-level cities) in Hunan province. *Economic Geography*, 2019, 39(11): 25-32.]
- [25] LI W F, HAI X, HAN L J, et al. Does urbanization intensify regional water scarcity?: Evidence and implications from a megaregion of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118592, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118592.
- [26] 郭莎莎, 陈明星, 刘慧. 城镇化与资源环境的耦合过程与解耦分析: 以北京为例. *地理研究*, 2018, 37(8): 1599-1608. [GUO S S, CHEN M X, LIU H. Coupling procedure and decoupling analysis of urbanization and resource environment: The study of Beijing. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1599-1608.]
- [27] WANG Y. Urban land and sustainable resource use: Unpacking the countervailing effects of urbanization on water use in China, 1990-2014. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104307, Doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104307.
- [28] 刘润佳, 把多勋. 中国省会城市紧凑度与城镇化水平关系. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 586-600. [LIU R J, BA D X. The relationship between urban compactness and urbanization level in capital cities of China. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 586-600.]
- [29] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 105-112. [LIU Y B, LI R D, SONG X F. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 105-112.]
- [30] LIANG L W, WANG Z B, LI J X. The effect of urbanization on environmental pollution in rapidly developing urban agglomerations. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117649, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117649.
- [31] 童彦, 潘玉君, 张梅芬, 等. 云南人口城市化与土地城市化耦合协调发展研究. *世界地理研究*, 2020, 29(1): 120-129. [TONG Y, PAN Y J, ZHANG M F, et al. Analysis on coupling and coordination between population urbanization and land urbanization in Yunnan province. *World Regional Studies*, 2020, 29(1): 120-129.]
- [32] 赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 基于MODIS-NDVI的河南省冬小麦产量遥感估测. *地理研究*, 2012, 31(12): 2310-2320. [ZHAO W L, HE Z, HE J P, et al. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on the MODIS-NDVI data. *Geographical Research*, 2012, 31(12): 2310-2320.]
- [33] 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. *生态学报*, 2019, 39(11): 4002-4010. [LIU Y C, GAO X L, FU C, et al. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on national forest resources inventory. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4002-4010.]
- [34] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114. [WANG C, TANG N. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural production-living-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1100-1114.]
- [35] 赵雪雁, 高志玉, 马艳艳, 等. 2005—2014年中国农村水贫困与农业现代化的时空耦合研究. *地理科学*, 2018, 38(5): 717-726. [ZHAO X Y, GAO Z Y, MA Y Y, et al. Spatio-temporal coupling between rural water poverty and agricultural



- modernization in China from 2005 to 2014. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 717-726.]
- [36] 刘丹丽, 汪侠, 吴小根, 等. 全球贫困国家旅游竞争力与经济协调度及时空变化. *地理科学进展*, 2018, 37(10): 1381-1391. [LIU D L, WANG X, WU X G, et al. Coupling coordination between tourism competitiveness and economic development in global poverty-stricken countries and spatiotemporal changes. *Progress in Geography*, 2018, 37(10): 1381-1391.]
- [37] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用. *经济地理*, 2019, 39(4): 18-25. [CONG X N. Expression and mathematical property of coupling model, and its misuse in geographical science. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 18-25.]
- [38] 毛齐正, 黄甘霖, 邬建国. 城市生态系统服务研究综述. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1023-1033. [MAO Q Z, HUANG G L, WU J G. Urban ecosystem services: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1023-1033.]
- [39] 陈明星, 周园, 汤青, 等. 新型城镇化、居民福祉与国土空间规划应对. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1273-1287. [CHEN M X, ZHOU Y, TANG Q, et al. New-type urbanization, well-being of residents, and the response of land spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1273-1287.]

## Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River

ZHAO Xue-yan, DU Yu-xuan, LI Hua, WANG Wei-jun

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Urbanization is an important factor affecting the pattern of regional ecological security. Clarifying the relationship between urbanization and ecosystem services can provide decision-making references for promoting ecological protection and high-quality development in the Middle Yellow River. Based on the analysis of the spatio and temporal patterns of urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River from 2000 to 2018, the study uses the coupling coordination degree model to analyze the spatio-temporal characteristics of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the study area. The results show that between 2000 and 2018, the comprehensive urbanization level increased by 72.24%, and the spatial distribution was generally "high in the south and low in the north", with economically developed counties decreasing outward. Grain production, water resource conservation, soil conservation and carbon sequestration services all showed an increasing trend in different spatial distribution trends. Generally, the degree of coupling coordination between grain production, water resource conservation, soil conservation and carbon sequestration services and comprehensive urbanization level is on the rise, but the degree of coupling coordination in the Fenhe-Weihe Plain is low, while that in economically developed counties is high.

**Keywords:** urbanization; ecosystem services; coupling relationship; temporal and spatial changes; Middle Yellow River