

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0021

杨振龙,左其亭,姜龙,等.黄河流域九省区城镇化与生态安全交互作用机制[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):191-200. YANG Z L, ZUO Q T, JIANG L, et al. Interaction mechanism between urbanization and ecological security in nine provinces of the Yellow River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 191-200. (in Chinese)

# 黄河流域九省区城镇化与生态安全交互作用机制

杨振龙<sup>1</sup>,左其亭<sup>1,2</sup>,姜龙<sup>1,2</sup>,张志卓<sup>1,2</sup>,邱梦<sup>3</sup>

(1. 郑州大学水利科学与工程学院,郑州 450001;2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室,郑州 450001;  
3. 天津大学环境科学与工程学院,天津 300000)

**摘要:**从人口城镇化、经济城镇化、社会城镇化、空间城镇化4个维度构建城镇化水平评价指标体系,从生态压力、生态治理、生态环境3个维度构建生态安全评价指标体系,依次计算黄河流域九省区城镇化水平指数(urbanization development level index, UDI)和生态安全指数(ecological security index, ESI),并采用灰色关联分析模型和解耦模型对2008—2018年黄河流域九省区城镇化水平与生态安全交互作用机制进行分析研究。结果表明:黄河流域九省区城镇化水平与生态安全整体呈上升趋势,UDI由0.24升至0.58,ESI由0.30升至0.41,但增幅逐渐减缓;城镇化水平与生态安全系统间关联度均高于0.6,处于中等关联与极强关联之间,具有较强的相互作用,人口城镇化对生态安全胁迫作用最大,关联度值高达0.741,生态治理对城镇化发展的约束作用最强,关联度值为0.726;黄河流域九省区城镇化水平与生态安全之间存在着较强的解耦作用,未来生态安全对城镇化发展的约束作用逐渐变强。

**关键词:**城镇化水平;生态安全;交互作用机制;解耦模型;黄河流域

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



黄河流域作为我国重要的生态屏障,近年来生态环境有恢复趋势。2019年9月,黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略<sup>[1]</sup>,为流域探索生态保护和高质量发展协同模式提供了新契机。因此,明确城镇化水平与生态安全系统间的交互作用机制,探讨黄河流域经济发展与生态保护协同模式,对推动黄河流域高质量发展具有重要意义。

国内外对城镇化发展的相关研究较为丰富,一些学者采用多种模型对城镇化水平进行评价,如Theil指数分解<sup>[2]</sup>、动力机制模型<sup>[3]</sup>、Lotka-Volterra模型<sup>[4]</sup>等。目前,对于城镇化水平的研究多集中在城市化与经济增长关系研究分析<sup>[5]</sup>、城市化区间格局研究<sup>[6]</sup>、城市化与资源承载力研究<sup>[7]</sup>、城市群博

弈研究<sup>[8]</sup>等方面,基本形成了系统的理论和方法体系。对于生态安全的研究也渐有雏形,国内外学者从生态系统健康评价<sup>[9]</sup>、生态风险评价<sup>[10]</sup>等方面对区域生态安全开展定量化评价。随着全球发展趋势的转变,越来越多的学者将研究重心转向城镇化与生态安全关联研究,如匹配分析<sup>[11]</sup>、协同发展研究<sup>[12]</sup>、耦合分析<sup>[13-14]</sup>等。本文构建多维度的城镇化与生态安全指标体系,用城镇化水平发展指数和生态安全指数量化表征黄河流域城镇化和生态安全水平,并分析其动态演变趋势,定量识别黄河流域城镇化水平与生态安全系统间的交互作用机制,探讨近年来两系统间解耦状态演变特征,识别关键制约因素。

收稿日期:2021-05-16 修回日期:2021-08-26 网络出版时间:2021-09-01

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210901.1036.002.html

基金项目:河南省重大公益性科技专项(201300311500);中国工程院重大咨询研究项目(2021-149-1)

作者简介:杨振龙(1998—),男,河北魏县人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:yangzhenlong9@163.com

通信作者:左其亭(1967—),男,河南固始人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河位于东经  $96^{\circ}\sim 119^{\circ}$ 、北纬  $32^{\circ}\sim 42^{\circ}$ ,是我国第二长河,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东省,全长 5 464 km,流域总面积 75.2 万  $\text{km}^2$ ,见图 1。黄河流域是我国重要的经济带,流域人口约占比全国总人口的

24.1%,地区经济生产总值约占比全国 26.5%,但是由于黄河流域生态较为脆弱,经济的快速发展对生态环境造成了较大的影响,生态系统退化、水土流失、湿地面积萎缩等问题已经成为影响黄河流域健康绿色发展的重要制约因素。因此,探求城镇化与生态安全交互影响因素,对黄河流域经济发展和生态环境协同治理具有重要的参考价值。



图 1 黄河流域九省区地理位置

Fig. 1 Geographical location map of nine provinces in the Yellow River basin

### 1.2 数据来源

选取 2008—2018 年的指标数据,城镇人口比重、人均 GDP 等经济社会指标数据来源于《中国统计年鉴》和各省《统计年鉴》,污水排放量、污水处理率等水资源指标数据来源于各省《水资源公报》和各省《统计年鉴》,森林覆盖率、人均公园绿地面积等生态环境指标数据来源于《中国生态环境状况公报》和各省《生态环境状况公报》。

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标体系

城镇化系统与生态安全系统各要素之间存在着紧密的联系,构建科学的指标体系是分析城镇化系统与生态安全系统作用关系的基础。参考相关文献<sup>[15-16]</sup>,统计出现频率较高的指标,并遵循科学性、通用性、层次性、易收集性等原则,对指标进行筛选,最终从目标层、准则层和指标层等 3 个层次构建了

城镇化和生态安全系统的评价指标体系,见表 1。

城镇化准则层包含人口城镇化、经济城镇化、社会城镇化、空间城镇化 4 个方面。人口城镇化是城镇化兴起和存在的前提,包括城镇人口比重和二、三产业就业人口比重 2 个指标;经济城镇化是城镇化发展的目的,包括人均 GDP 和城镇居民人均可支配收入 2 个指标;社会城镇化是城镇化过程中社会资源的发展,包括每万人卫生机构床位数和教育科学支出占地方财政比例 2 个指标;空间城镇化反映了城镇化进程中基础设施的建设,包括建设用地占行政区面积比重和人均道路面积 2 个指标。

生态安全准则层包括生态压力、生态治理、生态状况等 3 个方面。生态压力反映地区现存环境问题,包括人均污水排放量和每万人二氧化硫排放量 2 个指标;生态治理反映了相关部门对生态安全的修复,包括污水处理率、生活垃圾无害化处理率、环境污染治理占 GDP 比重 3 个指标;生态状况表明了

生态安全的现状,包括建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积、森林覆盖率 3 个指标。

表 1 城镇化与生态安全指标体系  
Tab. 1 Urbanization and ecological security index system

目标层	准则层	指标层	指标属性
城镇化	人口城镇化 $U_A$	城镇人口比重 $U_1/\%$	正
		二、三产业就业人口比重 $U_2/\%$	正
	经济城镇化 $U_B$	人均 GDP $U_3/\text{元}$	正
		城镇居民人均可支配收入 $U_4/\text{元}$	正
	社会城镇化 $U_C$	每万人卫生机构床位数 $U_5/\text{张}$	正
		教育科学支出占地方财政比重 $U_6/\%$	正
	空间城镇化 $U_D$	建设用地占行政区划面积比重 $U_7/\%$	正
		人均道路面积 $U_8/\text{m}^2$	正
生态安全	生态压力 $E_A$	人均污水排放量 $E_1/\text{t}$	负
		每万人二氧化硫排放量 $E_2/\text{t}$	负
	生态治理 $E_B$	污水处理率 $E_3/\%$	正
		生活垃圾无害化处理率 $E_4/\%$	正
		环境污染治理占 GDP 比重 $E_5/\%$	正
	生态状况 $E_C$	建成区绿化覆盖率 $E_6/\%$	正
		人均公园绿地面积 $E_7/\text{m}^2$	正
		森林覆盖率 $E_8/\%$	正

## 2.2 城镇化水平与生态安全指数计算

### 2.2.1 计算综合指数

标准化处理。由于所选指标类型不同,为避免指标量纲不同导致计算结果出现偏差,首先要对指标进行标准化处理,具体操作为

$$\text{正向指标 } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

$$\text{负向指标 } x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

式中: $x'_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  项指标标准化后的数值; $x_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  项指标的实际数值。

$$\xi_{ab}(t) = \frac{\min_a \min_b |Z_a^U(t) - Z_b^E(t)| + \rho \max_a \max_b |Z_a^U(t) - Z_b^E(t)|}{|\min_a \min_b |Z_a^U(t) - Z_b^E(t)| + \rho \max_a \max_b |Z_a^U(t) - Z_b^E(t)|} \quad (5)$$

式中: $\xi_{ab}(t)$  为  $t$  时期的灰色关联系数; $Z_a^U(t)$  为  $t$  时期各城市的城镇化系统指标的标准化值; $Z_b^E(t)$  为  $t$  时期各城市生态安全系统指标的标准化值; $a, b$  分别表示所求关联系数的两个指标; $\rho$  为分辨系数,本文取 0.5。

计算关联度值。将 2008—2018 年各关联系数求均值,求得各指标间的关联度值。

$$\gamma_{ab} = \frac{1}{k} \sum_{t=1}^k \xi_{ab}(t) \quad (6)$$

式中: $\gamma_{ab}$  为指标  $a$  与指标  $b$  的关联度; $k$  为样本数

计算系统综合指数  $S$  来表示城镇化发展水平指数(urbanization development level index, UDI)和生态安全指数(ecological security index, ESI),计算公式<sup>[17]</sup>为

$$S = \sum_{j=1}^m \omega_j x'_{ij} \quad (3)$$

式中: $S$  为系统综合指数; $\omega_j$  为第  $j$  项指标的权重。

### 2.2.2 确定指标权重

确定指标权重的方法可分为主观确权法和客观确权法。主观权重更多依赖于决策者的意识,具有较强的主观性;客观权重则完全取决于数据自身特征,可能会导致权重结果偏离实际。本文选取的指标数量较多,涉及多个方面,为使结果更精准,采用层次分析法(主观确权法)与熵权法(客观确权法)相结合确定权重,2 种方法的具体计算过程详见文献[18-19]。计算出主观、客观 2 种权重后,采用公式(4)计算组合权重,即为最终权重。

$$\omega_j = \frac{\omega'_j + \omega''_j}{2} \quad (4)$$

式中: $\omega_j$  为第  $j$  项指标的最终权重, $\omega'_j$  和  $\omega''_j$  分别表示第  $j$  项指标的主观权重和客观权重。

### 2.3 灰色关联模型

灰色关联理论是邓聚龙教授于 1982 年提出的研究不确定性问题的理论,灰色关联分析是该理论中最常用的一种分析方法<sup>[20]</sup>。该方法根据系统中各因素间的发展趋势的趋同或趋异程度来反映各因素之间的关联程度,灰色关联度值越大,说明两因素间的变化趋势越相近,关联程度越高,反之亦然。城镇化与生态安全 2 个系统之间具有复杂的关系,为了深入分析其内部因素影响,明确指标和准则层间的交互作用,构建灰色关联模型<sup>[21]</sup>。

计算城镇化与生态安全指标间关联系数。计算公式为

( $k=11$ )。

参考文献[22]和黄河流域实际情况,本文将关联度识别标准进行了分级, $\gamma_{ab} \in [0, 0.35)$ ,关联性弱; $\gamma_{ab} \in [0.35, 0.65)$ ,关联性中等; $\gamma_{ab} \in [0.65, 0.85)$ ,关联性强; $\gamma_{ab} \in [0.85, 1]$ ,关联性极强。

### 2.4 解耦模型

经济合作与发展组织(OECD)首次提出解耦理论<sup>[23]</sup>,用其量化经济增长和环境资源消耗耦合关系的破裂程度。为探究城镇化与生态安全两系统间的

解耦程度,构建解耦模型为

$$\epsilon_{t_k} = \frac{\Delta E_{t_k}}{\Delta U_{t_k}} = \frac{(E_{t_{ks}} - E_{t_{ke}}) / E_{t_{ks}}}{(U_{t_{ks}} - U_{t_{ke}}) / U_{t_{ks}}} \quad (7)$$

式中: $\epsilon_{t_k}$  为第  $t_k$  时期的解耦度值; $\Delta E_{t_k}$  为第  $t_k$  时期的 ESI 变化率; $\Delta U_{t_k}$  为第  $t_k$  时期的 UDI 变化率; $E_{t_{ks}}$  和  $E_{t_{ke}}$  分别为第  $t_k$  时期末期和初期的 ESI; $U_{t_{ks}}$  和  $U_{t_{ke}}$  分别为第  $t_k$  时期的 UDI。

结合黄河流域实际情况并参考文献[24],对城镇化与生态安全的解耦程度进行分级,具体细分标准见图 2。

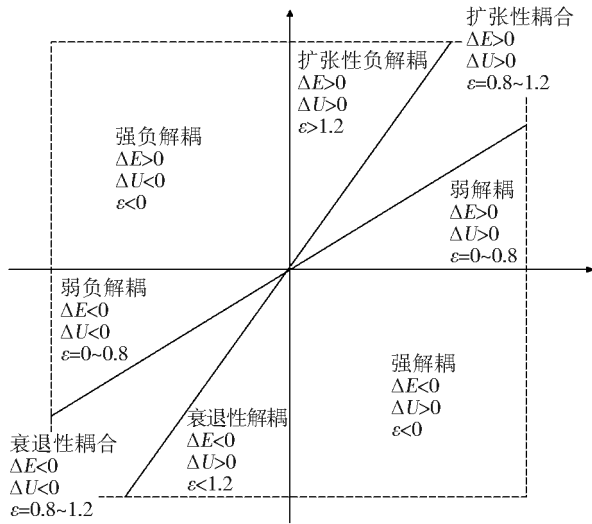


图 2 解耦等级划分标准

Fig. 2 Decoupling classification criteria

根据解耦模型对解耦等级进行细分,以 0.8 和 1.2 为阈值,将黄河流域九省区城镇化水平与生态安全的动态解耦关系划分为 8 种类型:强解耦,表征生态安全随着城镇化水平的发展而降低;弱解耦,表征生态安全与城镇化水平双向提升;衰退性解耦,表

征生态安全与城镇化水平同时衰退;扩张性耦合,表征生态安全与城镇化水平同时提升且增幅相当;衰退性耦合,表征生态安全与城镇化水平双向降低且降幅相当;扩张性负解耦,表征生态安全随着城镇化水平的升高而升高,且增速大于城镇化水平;弱负解耦,表征生态安全与城镇化水平同时降低,但前者降低速度更慢;强负解耦,表征生态安全在城镇化水平的降低中有所提升。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城镇化水平时空演变趋势分析

通过对城镇化水平时间特征分析,近 10 年来黄河流域 UDI 整体呈上升趋势(图 3);通过对原始指标数据分析发现,二、三产业从业人口占比上升,人均 GDP 提升幅度较大,实现经济跳跃式增长;这是九省区全力建设“以人为核心”的新型城镇化的成果。九省区 UDI 整体呈现增长趋势,部分省份增长率较为明显,其中,四川省增幅最大,为 214.29%,原因是四川省在遭受了“5·12”汶川大地震后,全力推进灾后的基本公共服务设施建设,国家和政府部门积极进行政策引导,为四川省新型城镇化建设提供了大力支持<sup>[25]</sup>。2015—2018 年,黄河流域九省区 UDI 增幅减缓,其中,山东省城镇化水平基本处于停滞状态,宁夏、内蒙古、甘肃 UDI 不升反降,结合各省区发展实际情况,发现其原因是上述省区加大了生态环境修复力度,提高了对污染产业的治理投入,导致经济增长放缓,这与相关研究<sup>[26]</sup>中宁夏、甘肃等省区同时期生态保护指数明显增高具有一致性。

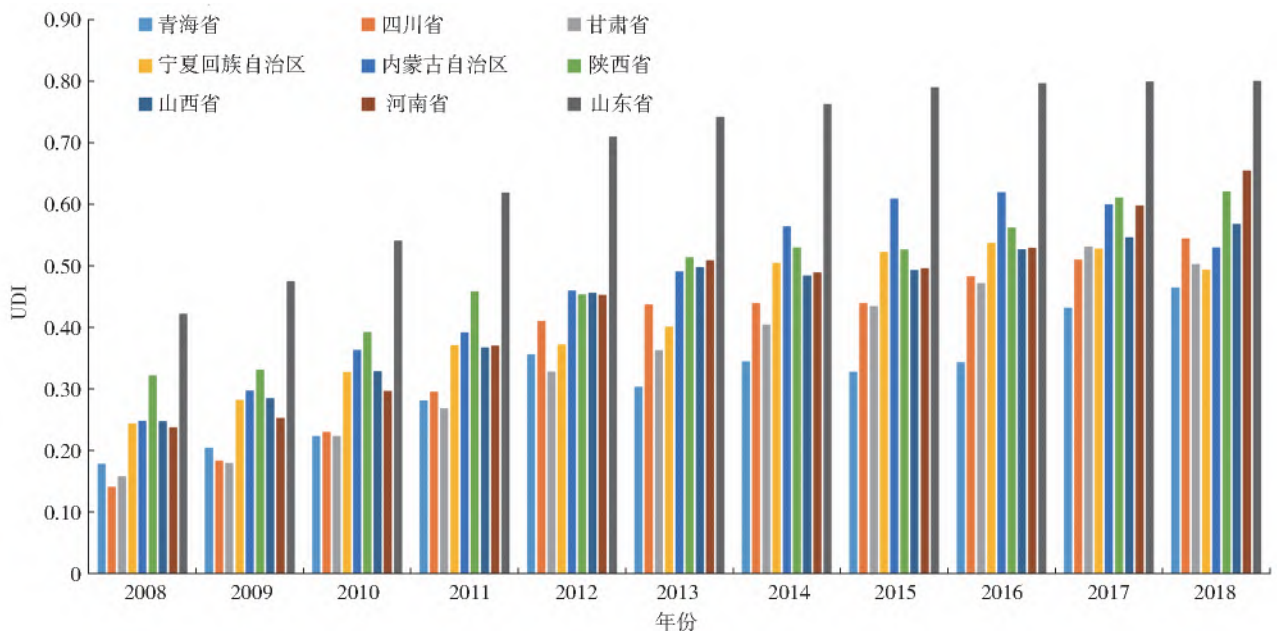


图 3 2008—2018 年黄河流域城镇化发展水平指数

Fig. 3 Urbanization development level index of the Yellow River basin from 2008 to 2018

通过空间维度对比分析可知,九省区之间的UDI区域性差异显著。山东、河南、山西、内蒙古、陕西等中下游地区UDI较高,这与长江经济带“流域下游城镇化发展指数大于上中游”趋势具有一致性。青海省地处我国西北内陆,交通等基础设施不完善,二、三产业占比较小,导致UDI较其他省份低,但是近些年在西部大开发政策<sup>[27]</sup>引领下,青海省积极发展高新技术产业,升级产业结构,其UDI也有了明显提升,与其他省份差距逐渐缩小。

### 3.2 生态安全时空演变特征分析

九省区ESI整体呈波动上升趋势,但山东省的ESI却呈现持续降低趋势,见图4。2008—2011年,山东省的ESI处于领先地位,但由于该时间段极力推进城镇化建设,原始指标数据显示二氧化硫等污

染气体排放量骤增,绿化面积逐渐降低,大量生态用地被开发为建筑用地,破坏了原有土地利用结构,导致ESI逐渐降低。与上文结果综合对比分析,山东省的发展侧重点由2008年的城镇化建设转变为2015年的生态保护优先,这也表征了城镇化水平与生态安全之间存在一定的相互制约作用。相反,2008—2015年内蒙古在追求经济发展的同时,坚持生态保护与绿色产业结合,加强废水废气排放检测,坚决打好污染防治攻坚战,ESI持续上升,并于2014年达到黄河流域领先地位,这与冯琰玮等<sup>[28]</sup>的研究结论具有一致性。2016年前后,九省区ESI波动较大,这是因为部分省份对于环境治理重视度下降,污染治理投资占GDP比重逐渐降低,且大量人口聚集城镇,导致污水排放量有所增加。

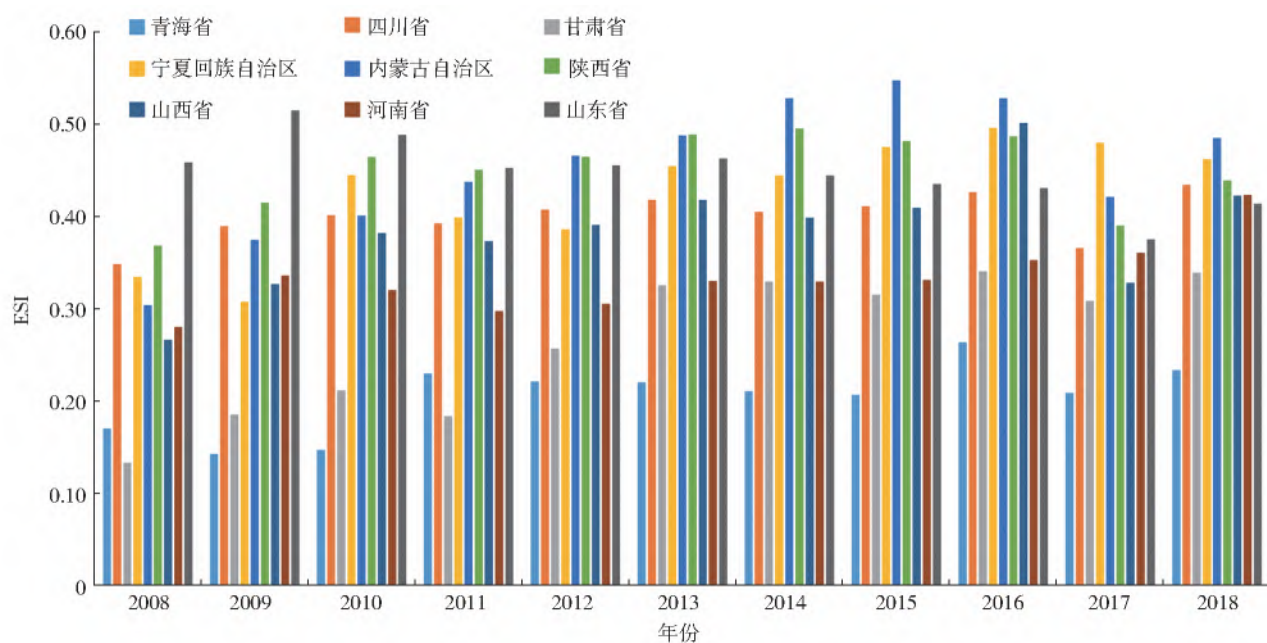


图4 2008—2018年黄河流域生态安全指数

Fig. 4 Ecological security index of the Yellow River basin from 2008 to 2018

依据ESI空间分布数据可知,青海和宁夏的ESI在流域中处于较低水平。2016年是黄河流域九省区ESI最高的一年,但整体仅达到0.43。这一年ESI排序为:内蒙古(0.530)、山西(0.502)、宁夏(0.496)、陕西(0.491)、山东(0.432)、四川(0.428)、河南(0.357)、甘肃(0.341)、青海(0.260)。由此可知,黄河流域ESI存在明显的地区性差异,内蒙古ESI是青海省的2.04倍。在此后两年,全流域ESI逐渐降低,依据原始指标数据分析造成这一现象的原因是:第一,部分省区人口密度大,人类生产和生活活动频繁,对环境造成一定的压力;第二,经济快速发展,各省区大力发展工业,导致废弃物排放量增加,对生态安全造成了一定的影响。

### 3.3 城镇化水平与生态安全交互作用分析

城镇化发展水平与生态安全有着错综复杂的关系,见图5。黄河流域UDI不断升高,但是增长趋势逐渐放缓,由2008年的0.24上升到2018年的0.58,年均增幅为9.23%;ESI由2008年的0.30升至2018年的0.41,年均增幅为3.2%,上升速度较前者更慢。UDI与ESI增长趋势的变化表明两系统在动态发展中逐渐出现了相互抑制的作用。为识别两系统之间的具体障碍因素,通过式(5)和(6)计算得出两系统间各因素的关联度值,具体矩阵数据见表2。研究时段内UDI与ESI关联度范围为[0.60,0.88],均处于中等关联与极强关联之间,说明两系统存在较强的相互作用。

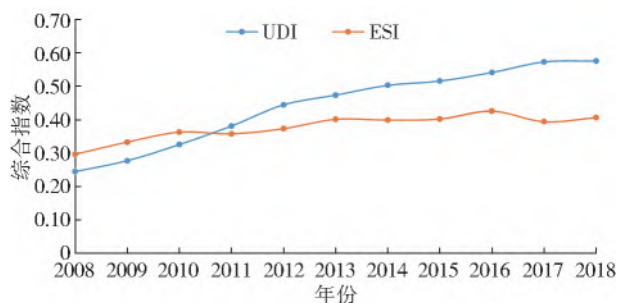


图 5 2008—2018 年城镇化与生态安全指数变化趋势

Fig. 5 The trend of urbanization and ecological security index from 2008 to 2018

### 3.3.1 城镇化水平对生态安全的胁迫作用

城镇化水平对生态安全的胁迫作用比较明显，

各准则层对生态安全的关联度分别为人口城镇化(0.741)、经济城镇化(0.713)、社会城镇化(0.726)、空间城镇化(0.718)。人口城镇化对生态安全的胁迫作用最强,深入分析指标间关联度可以看出,城镇人口比重(0.77)、万人医疗床位数(0.76)、建设用地占行政区比重(0.73)这 3 个指标对生态安全关联程度较高。依据结果数据可知,人口聚集、建设用地面积扩张、产业废弃物排放量增加是对生态安全胁迫的主要因素,因此,流域相关部门应适当疏散城镇人口,增强对环境治理的资金投入,限制建筑面积的持续扩张,修复土地利用结构,减少城镇化进程中对生态环境的破坏。

表 2 城镇化水平与生态安全指标间关联度矩阵

Tab. 2 Correlation degree matrix between urbanization level and ecological security index

因素	$U_A(0.741)$		$U_B(0.713)$		$U_C(0.726)$		$U_D(0.718)$		$\bar{U}$	
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$		
$E_A(0.713)$	$E_1$	0.75	0.68	0.69	0.73	0.75	0.68	0.71	0.66	0.71
	$E_2$	0.64	0.73	0.76	0.69	0.78	0.76	0.70	0.71	0.72
	$E_3$	0.77	0.68	0.62	0.73	0.77	0.67	0.73	0.70	0.71
$E_B(0.726)$	$E_4$	0.88	0.66	0.60	0.70	0.73	0.63	0.74	0.74	0.71
	$E_5$	0.87	0.70	0.65	0.75	0.73	0.65	0.74	0.73	0.73
	$E_6$	0.72	0.73	0.68	0.75	0.72	0.73	0.76	0.71	0.73
$E_C(0.722)$	$E_7$	0.77	0.70	0.66	0.69	0.78	0.71	0.75	0.71	0.72
	$E_8$	0.79	0.66	0.65	0.80	0.79	0.71	0.74	0.66	0.72
$\bar{E}$		0.77	0.69	0.67	0.73	0.76	0.69	0.73	0.70	

### 3.3.2 生态安全对城镇化水平的约束作用

生态安全各准则层对城镇化水平的关联度由大到小依次为生态治理(0.726)、生态环境(0.722)、生态压力(0.713)。生态治理准则层对城镇化水平形成较强约束,高强度发展导致了污染物的排放量剧增,为达到生态安全标准需支出相当一部分财政用于治理污染,导致流域各省区减少产业资金投入,成为约束城镇化水平发展的主要因素。分析指标间因素可以看出,污染环境治理投入占 GDP 比重和建成区绿化覆盖率对城镇化进程的影响最为严重:污染治理投入占比过高,导致其他产业经济投入受到限制,不利于城镇化水平的提高;建成区绿化覆盖率增高可以发挥自然净化功能,进而降低污染治理投入。因此,流域相关部门应注重恢复地区生态功能,增加绿化面积,限制污染排放,发展绿色产业。

### 3.4 城镇化水平与生态安全解耦分析

为了深入分析黄河流域九省区城镇化与生态安全的相互作用关系,采用式(7)分别计算出 2008—2018 年城镇化和生态安全综合得分较上一年的变

化率  $\Delta U$ 、 $\Delta E$  和两系统的解耦弹性系数值。计算结果依据图 2 进行分级,分级结果见表 3。

表 3 2008—2018 年黄河流域九省区城镇化与生态安全解耦程度

Tab. 3 Decoupling degree of urbanization and ecological security in nine provinces and regions of the Yellow River basin from 2008 to 2018

时期	$\Delta U$	$\Delta E$	$\epsilon$	解耦程度
2008—2009	0.137	0.123	0.926	扩张性耦合
2009—2010	0.175	0.090	0.513	弱解耦
2010—2011	0.170	-0.014	-0.079	强解耦
2011—2012	0.168	0.043	0.257	弱解耦
2012—2013	0.065	0.075	1.154	扩张性耦合
2013—2014	0.062	-0.006	-0.092	强解耦
2014—2015	0.026	0.008	0.303	弱解耦
2015—2016	0.050	0.059	1.188	扩张性耦合
2016—2017	0.059	-0.075	-1.268	强解耦
2017—2018	0.005	0.031	6.630	扩张性负解耦

2008—2018 年黄河流域九省区城镇化与生态安全的解耦程度存在较大差异;2009—2010、2011—

2012、2014—2015年城镇化与生态安全呈现弱解耦关系,城镇化水平增长速度大于生态安全提升速度,说明此时城镇化水平对生态安全具有胁迫作用但并不显著;2010—2011、2013—2014、2016—2017年城镇化与生态安全呈现强解耦关系,解耦关系显著,在城镇化水平提升的同时,生态安全水平下降,表明此时城镇化对生态安全具有很强的胁迫作用;2008—2009、2012—2013、2015—2016年城镇化与生态安全呈现扩张性耦合状态,说明此时城镇化水平与生态安全同步提升,具有动态协同性;2017—2018年为扩张性负解耦,说明此时生态安全在一定程度上约束了城镇化水平的提升。

总体而言,黄河流域九省区城镇化与生态安全呈现了扩张性耦合与强弱解耦交替的循环演变状态,前几年主要表现为城镇化水平对生态安全的胁迫作用,随着近几年国家政策对环境的重视,已经有了生态安全约束城镇化发展水平的迹象,这也为相关部门制定流域生态保护与高质量发展相关政策提供了侧重点。

## 4 讨论

2008—2018年黄河流域 UDI 不断提升,但2008—2015年的 UDI 的年平均增长率(16.67%)远高于2015—2018年(3.85%),表明黄河流域近年来城镇化水平在一定程度上受到生态安全的制约,未来可能存在生态安全约束城镇化水平的风险。因此,不能以牺牲生态环境来换取经济的高速发展,要协调保护与发展的关系,加强生态治理投入,严格限制企业污染物排放,发展绿色可持续产业。结合地区实际打造绿色、可持续的生态产业链,建立健全生态补偿机制,打破生态保护对城镇化进程的制约瓶颈。

本文对城镇化水平的评价结果与刁艺璇等<sup>[13]</sup>的研究有部分差异,原因是本文构建城镇化指标体系更为全面,综合考虑人口、经济、医疗、公共设施等维度,而后者研究重心为城镇化水平与水资源利用水平的耦合协调分析,并未深入对城镇化水平评价。近10年来黄河流域生态安全水平呈上升趋势,但是增幅逐渐变缓,本文研究结果与孙继琼等<sup>[29]</sup>的研究成果一致显示黄河流域生态安全指数不断提升,但后者认为部分省区增幅仍较大,原因是本文计算ESI时侧重考虑生态环境的压力与治理投入等维度,而后者更侧重于计算单位GDP的污染物排放量,较少考虑环境治理投入。分析发现城镇化发展与生态安全两系统间存在较强的交互作用,与张瑾

青等<sup>[30]</sup>的研究成果基本一致,说明城镇化发展与生态保护息息相关,良好的生态环境是经济发展的基础,因此在城镇化的各个阶段都应该有针对性地对生态环境进行保护和修复。

城镇化水平与生态安全交互作用是一个涉及多方面的复杂的系统问题,本文从城镇化水平与生态安全两系统构建指标体系,通过灰色关系模型分析系统间交互作用机制,有助于深入分析两系统间的制约因素分析,为黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。然而,影响流域城镇化水平与生态安全系统发展的因素是复杂多变的,需进一步考虑多系统间的交互作用机制,全面、深入地剖析制约因素。此外,城镇化水平与生态安全的定义是动态变化的,本文所选取的指标仅考虑了部分维度,需不断引入新的指标完善指标体系,增强结果的科学性和全面性。本文仅从省级尺度对城镇化水平与生态安全两系统间的交互作用进行初步分析,未来应对流域各地市进行深入分析研究。

## 5 结论

城镇化水平与生态安全水平近些年持续增长,城镇化水平增长率大于生态安全水平,但两系统增长趋势都有所降低。教育科学支出占地方财政比重降低是城镇化水平增势减缓的主要原因,污水排放量的增加和环境污染治理占GDP比重减少影响生态安全水平的良序增长。

城镇化水平与生态安全系统间存在着较强的交互作用,人口城镇化对生态安全的胁迫作用最强,生态治理投入是城镇化水平的主要约束,未来主要以生态安全约束城镇化水平发展为主。

从城镇化水平与生态安全系统之间的相关关系来看,黄河流域九省区存在着扩张性耦合与强弱解耦循环交替现象,主要是以解耦为主。

### 参考文献(References):

- [1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, 2019(20): 1-3. (XI J P. Speech at the forum on ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin[J]. China Water Resources, 2019(20): 1-3. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2019.20.006.
- [2] ZHONG L, LIU X S, YANG P. Regional development gap assessment method based on remote sensing images and weighted Theil index[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(22): 1-14. DOI: 10.1007/s12517-020-06043-w.

- [3] 罗奎,方创琳,马海涛.基于生产函数视角的城镇化动力机制研究[J].地理科学,2017,37(3):394-399. (LUO K,FANG C L,MA H T. Dynamic mechanism of urbanization based on production function[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(3):394-399. (in Chinese)) DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2017.03.009.
- [4] YANG C Y,HUANG J,LIN Z B,et al. Evaluating the symbiosis status of tourist towns:The case of Guizhou Province, China [J]. Annals of Tourism Research,2018,72:109-125. DOI:10.1016/j.annals.2018.07.008.
- [5] 陈明星,唐志鹏,白永平.城市化与经济发展的关系模式:对钱纳里模型的参数重估[J].地理学报,2013,68(6):739-749. (CHEN M X,TANG Z P,BAI Y P. Relational pattern of urbanization and economic development:The parameter revaluation of Chenery's model [J]. Acta Geographica Sinica,2013,68(6):739-749. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:DLXB.0.2013-06-006.
- [6] YANG W Y,WANG X L,ZHANG K K,et al. COVID-19,urbanization pattern and economic recovery:An analysis of Hubei, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(24):9577. DOI:10.3390/ijerph17249577.
- [7] 宋运良,韩国才,王翠华,等.基于一定经济发展水平的水资源承载能力量化法探讨:以迁安市为例[J].南水北调与水利科技,2009,7(5):118-120. (SONG Y L,HAN G C,WANG C H,et al. Carrying capacity of water resources based on certain economic development by quantifying method: Taking Qian'an City as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2009,7(5):118-120. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2009.05.034.
- [8] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J].地理学报,2014,69(8):1130-1144. (FANG C L. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China[J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(8):1130-1144. (in Chinese)) DOI:10.1360/972009-1551.
- [9] 温家华,徐征和,武玮,等.大汶河流域水生生态系统健康评价研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):118-124. (WEN J H,XU Z H,WU W,et al. Study on water ecosystem evaluation in Dawen River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(3):118-124. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0077.
- [10] WANG D,JI X,LI C,et al. Spatiotemporal variations of landscape ecological risks in a resource-based city under transformation [J]. Sustainability,2021,13:5297. DOI:10.3390/sul13095297.
- [11] 荣慧芳,方斌.基于重心模型的安徽省城镇化与生态环境匹配度分析[J].中国土地科学,2017,31(6):34-41. (RONG H F,FANG B. Measurement of the matching degree between urbanization and ecology in Anhui based on barycenter model[J]. China Land Sciences,2017,31(6):34-41. (in Chinese)) DOI:10.11994/zgtdkx.20170622.134014.
- [12] 曹玉华,夏永祥,毛广雄,等.淮河生态经济带区域发展差异及协同发展策略[J].经济地理,2019,39(9):213-221. (CAO Y H,XIA Y X,MAO G X,et al. Research on regional development difference and collaborative development strategy of the Huaihe River eco-economic belt[J]. Economic Geography,2019,39(9):213-221. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:JJDL.0.2019-09-027.
- [13] 刁艺璇,左其亭,马军霞.黄河流域城镇化与水资源利用水平及其耦合协调分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):326-333. (DIAO Y X,ZUO Q T,MA J X. Urbanization, water use level and their coupled coordination in the Yellow River basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2020,56(3):326-333. (in Chinese)) DOI:10.12202/j.0476-0301.2020166.
- [14] YI L,LI Y Y,WEI J. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality: A case study from Nansi Lake catchment, China[J]. Ecological Indicators,2020,119:106870. DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106870.
- [15] 赵雪雁,杜昱璇,李花,等.黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(1):131-147. (ZHAO X Y,DU Y X,LI H,et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the middle Yellow River[J]. Journal of Natural Resources,2021,36(1):131-147. (in Chinese)) DOI:10.31497/zrzyxb.20210109.
- [16] 郭恒亮,刘如意,赫晓慧,等.基于PSR模型的南水北调中线主干渠沿线区域生态环境评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):65-70,135. (GUO H L,LIU R Y,HE X H,et al. Eco-environmental evaluation of regions along middle route of South-to-North Water Transfer Project based on PSR model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(4):65-70,135. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.04.012.
- [17] 龚艳冰,巢妍.基于不确定正态云组合权重的综合评价方法研究[J].统计与信息论坛,2020,35(5):3-8. (GONG Y B,CHAO Y. Research on comprehensive



- evaluation method based on uncertain normal cloud combination weight[J]. *Statistics & Information Forum*, 2020, 35(5): 3-8. (in Chinese) DOI: CNKI: SUN; TJLT. 0. 2020-05-001.
- [18] 左其亭. 和谐论:理论·方法·应用[M]. 北京:科学出版社, 2012. (ZUO Q T. *Harmony Theory: Theory, Method and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 1-7. (ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River basin based on combined weight TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2020. 02. 001.
- [20] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J]. *统计研究*, 1995(3): 46-48. (TAN X R, DENG J L. Grey correlation analysis: A new method of multivariate statistical analysis [J]. *Statistical Research*, 1995 (3): 46-48. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; TJYJ. 0. 1995-03-010.
- [21] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 长三角地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制研究[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(2): 220-231. (YANG Q K, DUAN X J, WANG L, et al. Mechanism of interaction between urban land expansion and ecological environment effects in the Yangtze River delta [J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(2): 220-231. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlxjz. 2021. 02. 004.
- [22] 尚海龙, 蒋焕洲. 西藏新型城镇化与生态环境耦合演进及解耦分析[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 118-126. (SHANG H L, JIANG H Z. Coupling procedure and decoupling analysis of new-type urbanization and eco-environment system in Tibet [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(4): 118-126. (in Chinese)) DOI: 10. 16783/j. cnki. nwnuz. 2019. 04. 018.
- [23] GUPTA, SHILPI. Decoupling: A step toward sustainable development with reference to OECD countries [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2015, 22(6): 510-519. DOI: 10. 1080/13504509. 2015. 1088485.
- [24] 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[J]. *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 [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1599-1608. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlyj201808010.
- [25] 邓元杰, 潘洪义, 蒋贵国, 等. 四川省人口城镇化与土地城镇化协调发展时空演变研究[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(3): 375-384. (DENG Y J, PAN H Y, JIANG G G, et al. Research on the spatial and temporal evolution of coordinated development between population urbanization and land urbanization in Sichuan Province [J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*. 2017, 40(3): 375-384. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-8395. 2017. 03. 018.
- [26] 刘琳珂, 梁流涛, 高攀, 等. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 176-195. (LIU L K, LIANG L T, GAO P, et al. Coupling relationship and interactive response between ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin [J]. *Journal of Natural Resources*. 2021, 36(1): 176-195. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20210112.
- [27] 任保平, 张倩. 西部大开发 20 年西部地区经济发展的成就、经验与转型[J]. *陕西师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2019, 48(4): 46-62. (REN B P, ZHANG Q. Achievements, experiences and transition of economic development in the western region in 20 years of development of western China [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*. 2019, 48(4): 46-62. (in Chinese)) DOI: 10. 15983/j. cnki. sxss. 2019. 0721.
- [28] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J]. *地理研究*, 2021, 40(4): 1096-1110. (FENG Y W, ZHEN J H, MA C Y. Evaluation of ecological carrying capacity and optimization of ecological security pattern in Inner Mongolia [J]. *Geographical Research*. 2021, 40(4): 1096-1110. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlyj020200132.
- [29] 孙继琼. 黄河流域生态保护与高质量发展的耦合协调:评价与趋势[J]. *财经科学*, 2021(3): 106-118. (SUN J Q. Evaluation and trend prediction of coupling coordination between ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin [J]. *Finance & Economics*. 2021(3): 106-118. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-8306. 2021. 03. 010.
- [30] 张瑾青, 罗涛, 徐敏, 等. 闽三角洲地区城镇空间扩张对区域生态安全格局的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5113-5123. (ZHANG J Q, LUO T, XU M, et al. Influence of urban spatial expansion on the regionally ecological security pattern in Min-Delta region [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2020, 40(15): 5113-5123. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201901080071.

## Interaction mechanism between urbanization and ecological security in nine provinces of the Yellow River basin

YANG Zhenlong<sup>1</sup>, ZUO Qiting<sup>1,2</sup>, JIANG Long<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhizhuo<sup>1,2</sup>, QIU Meng<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2 Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Since the 21st century, economic globalization and technological reform have promoted the deep integration of population flow, capital flow, resource flow, and technology flow among countries around the globe. The ecological and environmental problems brought by economic development and population pressure have gradually become global problems. Since China's reform and opening up, with the rapid urbanization process, China realizes the jumping development of the economy, lacks of enough attention to the ecological environment protection in urbanization, and faces enormous pressure of ecological security, excessive consumption of resources, vegetation degeneration, water pollution and ecological deterioration problems. The Yellow River basin is an important economic belt and grain base in China. With the rapid economic development, the ecological environment has been damaged and the ecological habitat of the river basin has been seriously damaged. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin was upgraded to a major national strategy in 2019, providing a new opportunity for the basin to explore a synergistic model of ecological protection and high-quality development.

To find a new way of high-quality development under urbanization development and ecological protection, it is urgent to clarify the interaction between urbanization and ecological security. The evaluation index system of urbanization level from four dimensions of population urbanization, economic urbanization, social urbanization and spatial urbanization is constructed. The urbanization level and ecological security index of nine provinces of Yellow River basin was calculated using analytic hierarchy process and entropy weight method to determine index. The comprehensive weight and grey correlation model was used to calculate urbanization level and ecological safety criterion layer and index correlation from 2008 to 2018 to clarify the influence of internal factors between the two systems. Finally, a decoupling model is constructed to explore the degree of decoupling between the two systems.

The urbanization level and ecological security of the nine provinces and regions in the Yellow River basin showed an upward trend. UDI increased from 0.24 to 0.58, with an average annual increase of 9.23%. ESI increased from 0.30 to 0.41, with an annual growth rate of 3.2%. The correlation between urbanization level and ecological security system is higher than 0.6, between medium correlation and strong correlation, and has a strong interaction. Population urbanization exerts the greatest stress on ecological security, and the correlation value is 0.741. Ecological governance exerts the strongest constraint on urbanization development, and the correlation value is 0.726.

The conclusions through an analysis were: 1) Urbanization level and ecological security level continue to grow, but the growth rate gradually decreases, indicating that the development level of the two systems is hindered to different degrees. 2) There is a strong interaction between urbanization level and ecological security system, and the constraint effect of ecological security on urbanization development may be stronger in the future. 3) There is a cyclic alternating phenomenon of expansionary coupling and strong and weak decoupling, mainly with decoupling. Therefore, it is necessary to coordinate the relationship between protection and development, strengthen the investment in ecological management, strictly limit the pollutant discharge of enterprises, and develop green and sustainable industries. A green and sustainable ecological industry chain will be built based on local conditions, the ecological compensation mechanisms will be established and improved, and the constraints and bottlenecks of ecological protection on the urbanization process will be broken.

**Key words:** urbanization level; ecological security; interaction mechanism; decoupling model; the Yellow River basin