

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0068

赵晨光,马军霞,左其亭,等.黄河河南段资源-生态-经济和谐发展水平及耦合协调分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):660-669,747. ZHAO C G, MA J X, ZUO Q T, et al. Resource-ecology-economy harmonious development and coupling coordination analysis of the Henan section of the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 660-669, 747. (in Chinese)

黄河河南段资源-生态-经济和谐发展水平 及耦合协调分析

赵晨光¹, 马军霞^{1,2}, 左其亭^{1,2}, 王骄阳¹, 符运友³

(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. 河南省豫北水利工程管理局, 河南 新乡 453002)

摘要:以黄河河南段15个地级市为研究区,基于2008—2019年各地级市的面板数据,从资源、生态、经济3个维度构建评价指标体系,通过基于最小二乘法的AHP-熵权法组合权重模型确定指标权重,采用“单指标量化-多指标综合-多准则集成”综合评价方法(SMI-P)评估研究区资源-生态-经济系统的和谐发展水平,将“SMI-P”方法与耦合协调度模型相结合,综合评价研究区资源-生态-经济系统的耦合协调关系。结果表明在2008—2019年期间:15个地级市和谐发展水平整体呈现波动增长趋势,但均未达到“和谐”阶段,其中最优为郑州市(0.68),最差为濮阳市(0.51);15个地级市耦合协调关系逐渐向优质协调阶段集聚,但多数还处于中级和良好协调阶段,其中濮阳市协调发展速度较落后。

关键词:资源-生态-经济; SMI-P; 和谐发展; 耦合协调; 黄河河南段

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



黄河流域是中华文明主要发源地之一,是重要的生态屏障和经济带,但黄河流域依旧存在生态脆弱、水资源短缺、水土流失严重、资源环境承载能力低等问题,沿黄河流域各省区发展不平衡、不充分^[1]。黄河河南段作为黄河流域中下游重要组成部分,评估其资源-生态-经济系统(The System of Resource, Ecology and Economic, REE系统)和谐发展水平及耦合协调关系,对推进黄河流域生态保护和高质量发展起着举足轻重的作用。

2017年以来,国内外关于系统和谐发展水平及耦合协调关系的研究成果比较丰富。在系统和谐发展水平评价方面,左其亭等^[2]提出“单指标量化-多指标综合-多准则集成(SMI-P)”及“单指标量化-多指标综合(SI-MI)”等定量研究方法,郭唯等^[3]从人

口、水资源、经济角度研究河南省三系统间的和谐发展时空变化,Zuo等^[4]提出一种基于和谐论的人水关系评估方法,并分析评价了河南省的人水和谐发展水平。在系统耦合协调关系分析方面,廖重斌^[5]提出协调发展度模型(即耦合协调度模型),王淑佳等^[6]基于传统耦合协调度模型提出其修正模型,谢永琴等^[7]探讨了黄河流域经济发展-科技创新-生态环境系统的耦合协调关系以及时空特征,Moll等^[8]对资源环境-经济发展系统关系进行分析并评价了其协调性。

综上所述,针对黄河流域高质量发展河南段战略实施区(以下简称“黄河河南段战略实施区”)资源-生态-经济系统和谐发展水平及耦合协调关系的研究较少,且多数相关研究仅采用熵权

收稿日期:2022-04-15 修回日期:2022-07-13 网络出版时间:2022-07-21

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220720.1941.004.html

基金项目:河南省重大公益科技专项项目(201300311500);国家重点研发计划项目(2021YFC3200201)

作者简介:赵晨光(1999—),男,河南新乡人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:zhaochenguang0413@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

法^[9]进行数据标准化处理及权重确定,受数据波动影响较大。因此,本文选择黄河河南段战略实施区 15 个地级市作为研究区,从资源、生态、经济 3 个方面构建评价指标体系,采用基于最小二乘法的 AHP-熵权法组合权重模型^[10]确定指标权重,通过“SMI-P”^[2]评估研究区 REE 系统的和谐发展水平,然后将“SMI-P”^[2]方法与耦合协调度模型^[11]相结合,综合分析研究区 REE 系统耦合协调关系,以助力推进黄河流域生态保护和高质量发展。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

黄河河南段战略实施区是指河南省境内黄河战略辐射到的所有地级市行政区域^[12],总面积为 10.66 万 km²,占河南省全省面积的 63.8%,涉及豫中(郑州市、平顶山市、许昌市、漯河市)、豫东(开封市、商丘市、周口市)、豫西(三门峡市、洛阳市)、豫北(济源市、焦作市、新乡市、鹤壁市、安阳市、濮阳市)4 个分区 15 个地级市,见图 1。



图 1 研究区位置及范围

Fig. 1 The location and scope of the study area

研究区地处黄河中下游,属于大陆性季风气候,是历史上黄河决口、改道危害最深地区,生态环境虽在日益改善,但还较为脆弱;其自然资源丰富,但开发强度较大;其经济虽处于稳步增长趋势,但人口基数较大,2019 年人均 GDP 为 6.19 万元,远低于全国平均水平 7.09 万元。其次,资源、生态、经济三系统间的协同发展尚不平衡。因此,笔者认为研究其 REE 系统和谐发展水平及耦合协调关系十分必要。

1.2 数据来源

研究区高程数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),为 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据;水系及河湖水域栅格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

指标体系数据来源于 2008—2019 年《中国环境统计年鉴》、《河南省统计年鉴》、《城市建设统计年鉴》、《河南省水资源公报》、《河南省环境统计年报》、

中国统计局最新能源数据修订版(2015 年)以及各地级市统计年鉴、水资源公报。其中,各地级市 2019 年人均耕地面积、2018—2019 年单位面积粮食产量、万元 GDP 废水排放量及二氧化碳排放量等缺失数据采用线性插值法进行补充。

2 研究方法

2.1 指标体系构建

基于科学性、时效性、代表性、完备性及数据可获得性等原则,在黄河流域目前已有的研究^[13-19]基础上,综合考虑资源、生态、经济均衡发展的多维因素,从资源、生态、经济 3 个维度选取 21 个评价指标,构建研究区 REE 系统和谐发展水平及耦合协调关系评价指标体系。资源系统指标用于反映人类在从事社会生产、生活活动时的资源条件及利用状况;生态系统指标用于反映区域污染状况及生态投资和建设水平;经济系统指标用于反映社会经济基础、发展、差距及效益状况。具体指标及其属性见表 1。

表 1 REE 系统和谐发展水平及耦合协调关系评价指标体系

Tab. 1 Evaluation indicator system for harmonious development level and coupling coordination relationship of REE system

| 准则系统 | 评价指标 | 指标属性 | 指标数据来源 |
|--------|--|------|----------------------------------|
| A 资源系统 | A ₁ 人均水资源量/m ³ | + | 《河南省水资源公报》、各地级市水资源公报 |
| | A ₂ 人均用水量/m ³ | - | 《河南省水资源公报》、各地级市水资源公报 |
| | A ₃ 人均耕地面积/hm ² | + | 《河南省统计年鉴》、各地级市统计年鉴 |
| | A ₄ 万元 GDP 用水量/m ³ | - | 《河南省水资源公报》、各地级市水资源公报 |
| | A ₅ 万元 GDP 能耗标准煤/t | - | 《河南省统计年鉴》、各地级市统计年鉴 |
| | A ₆ 万元 GDP 电耗(kW·h) | - | 《河南省统计年鉴》、各地级市统计年鉴 |
| | A ₇ 单位面积粮食产量/kg | + | 《河南省统计年鉴》、各地级市统计年鉴 |
| B 生态系统 | B ₁ 万元 GDP 废水排放量/t | - | 《中国环境统计年鉴》、《河南省环境统计年鉴》、《河南省统计年鉴》 |
| | B ₂ 万元 GDP 二氧化碳排放量/t | - | 中国统计局最新能源数据修订版(2015 年) |
| | B ₃ 人均公园绿地面积/m ² | + | 《城市建设统计年鉴》 |
| | B ₄ 建成区绿化覆盖率/% | + | 《城市建设统计年鉴》 |
| | B ₅ 污水处理率/% | + | 《河南省环境统计年鉴》、《河南省统计年鉴》 |
| | B ₆ 生活垃圾无害化处理率/% | + | 《城市建设统计年鉴》、《河南省环境统计年鉴》、《河南省统计年鉴》 |
| | B ₇ 环保支出占公共预算支出比重/% | + | 《河南省统计年鉴》 |
| C 经济系统 | C ₁ 人均 GDP/元 | + | 《河南省统计年鉴》 |
| | C ₂ 登记失业率/% | - | 《河南省统计年鉴》 |
| | C ₃ 城镇化率/% | + | 《河南省统计年鉴》、各地级市统计年鉴 |
| | C ₄ 进出口额占 GDP 比重/% | + | 《河南省统计年鉴》、各地级市统计年鉴 |
| | C ₅ 城乡居民人均可支配收入比值 | - | 《河南省统计年鉴》 |
| | C ₆ 人均公共财政预算收入/% | + | 《河南省统计年鉴》 |
| | C ₇ 第三产业产值占 GDP 比重/% | + | 《河南省统计年鉴》 |

注:表中“+”代表正向指标,“-”代表负向指标。

2.2 指标权重确定

指标赋权方法分为主观赋权、客观赋权及主客观综合赋权等 3 类。AHP 为主观赋权方法,计算过程简单易懂,且能够清楚呈现各准则层与指标的关系,但受人为因素的影响较大;熵权法为客观赋权方法,其精确性及适应性较高,但过度依赖样本数据。两种方法的单一赋权均会对指标权重及评价结果的准确性造成一定程度影响,而将主、客观赋权结合的 AHP-熵权法组合权重模型在避免个人主观赋权随意性的同时,又可兼顾样本数据的客观现实性,能够有效克服单一赋权方法的局限性,使指标权重及评价结果更加准确。因此,采用基于最小二乘法的 AHP-熵权法组合权重模型^[10],求解各指标组合权重 $W=[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$ 。计算公式为

$$\min F(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{[(s_j - \omega_j)z_{ij}]^2 + [(o_j - \omega_j)z_{ij}]^2\} \quad (1)$$

约束函数为

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad (2)$$

式中: $F(\omega)$ 为组合权重偏差; s_j, o_j, ω_j 分别为第 j 个

指标主观权重、客观权重、组合权重; z_{ij} 为具有 n 个评价对象、 m 个指标的标准化后的数据矩阵; $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ 。

构造拉格朗日函数,求解模型为

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{[(s_j - \omega_j)z_{ij}]^2 + [(o_j - \omega_j)z_{ij}]^2\} + 4\lambda \left(\sum_{j=1}^m \omega_j - 1 \right) \quad (3)$$

然后,将拉格朗日函数分别对 ω_j, λ 求偏导数可得

$$\frac{\partial L}{\partial \omega_j} = \sum_{i=1}^n 2(s_j + o_j - 2\omega_j)z_{ij}^2 + 4\lambda = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 4 \left(\sum_{j=1}^m \omega_j - 1 \right) = 0 \quad (5)$$

用矩阵形式可表示为

$$\begin{bmatrix} P & e \\ e^T & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中

$$P = \text{diag} \left[\sum_{i=1}^n z_{i1}^2, \sum_{i=1}^n z_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^n z_{im}^2 \right] \quad (7)$$

$$Q = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(s_1 + o_1)z_{i1}^2, \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}(s_2 + o_2)z_{i1}^2, \dots, \right]$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (s_m + o_m) z_{im}^2 \quad (8)$$

式中: \mathbf{P} 为 $m \times m$ 对角矩阵; $\mathbf{e}, \mathbf{W}, \mathbf{Q}$ 为 $m \times 1$ 向量; λ 是随机数。

解矩阵方程可得:

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} \times \left(\mathbf{Q} + \frac{1 - \mathbf{e}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{Q}}{\mathbf{e}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{e}} \times \mathbf{e} \right) \quad (9)$$

2.3 SMI-P 方法

2.3.1 单指标量化

采用分段线性隶属函数量化方法^[20]对指标数据进行无量纲化处理,并假定各指标均有 5 个特征值:最差值 a 、较差值 b 、及格值 c 、较优值 d 和最优值 e ;正向指标为和谐度随指标值增大而增大的指标,负向指标为和谐度随指标值增大而减小的指标,二者计算公式为

$$H_j(\text{正向指标}) = \begin{cases} 0, x_j \leq a_j \\ 0.3 \left(\frac{x_j - a_j}{b_j - a_j} \right), a_j < x_j \leq b_j \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{x_j - a_j}{c_j - b_j} \right), b_j < x_j \leq c_j \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{x_j - x_j}{d_j - c_j} \right), c_j < x_j \leq d_j \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{x_j - d_j}{e_j - d_j} \right), d_j < x_j \leq e_j \\ 1, e_j < x_j \end{cases} \quad (10)$$

$$H_j(\text{逆向指标}) = \begin{cases} 1, x_j \leq e_j \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{d_j - x_j}{d_j - e_j} \right), e_j < x_j \leq d_j \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{c_j - x_j}{c_j - d_j} \right), d_j < x_j \leq c_j \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{b_j - x_j}{b_j - c_j} \right), c_j < x_j \leq b_j \\ 0.3 \left(\frac{a_j - x_j}{a_j - b_j} \right), b_j < x_j \leq a_j \\ 0, a_j < x_j \end{cases} \quad (11)$$

式中: H_j 为第 j 个指标的和谐度; m 为指标个数, $j=1, 2, \dots, m$, 为了区分系统, 分别用 m_1, m_2, m_3 表示各系统指标个数; a_j, b_j, c_j, d_j, e_j 分别为第 j 个指标的最差值、较差值、及格值、较优值和最优值。

2.3.2 多指标综合计算

通过多指标加权方法计算各系统综合得分, 计算公式为

$$I_R = \sum_{p=1}^{m_1} \omega_p H_p \quad (12)$$

$$I_{E,1} = \sum_{q=1}^{m_2} \omega_q H_q \quad (13)$$

$$I_{E,2} = \sum_{r=1}^{m_3} \omega_r H_r \quad (14)$$

式中: $I_R, I_{E,1}, I_{E,2}$ 分别为资源指数、生态指数、经济指数; m_1, m_2, m_3 分别为资源、生态、经济系统的指标个数; H_p, H_q, H_r 分别为资源、生态、经济系统中第 p, q, r 个指标的和諧度; $\omega_p, \omega_q, \omega_r$ 为权重。

2.3.3 多准则集成计算

将 $I_R, I_{E,1}, I_{E,2}$ 加权平均计算得出 REE 系统和諧发展指数, 其值大小反映 REE 系统和諧发展水平, 计算公式为

$$I_{REE} = \mu_1 \times I_R + \mu_2 \times I_{E,1} + \mu_3 \times I_{E,2} \quad (15)$$

式中: I_{REE} 为 REE 系统和諧发展指数; μ_1, μ_2, μ_3 分别为资源、生态、经济系统对应权重, 三者之和为 1, 因各系统对和諧发展水平同等重要, 故均取 1/3。

2.3.4 和諧发展水平评价标准

参考相关研究^[20-21], 根据 I_{REE} 数值大小, 将 REE 系统和諧发展水平划分为 5 个等级, 见表 2。出于对研究区 REE 系统和諧发展水平客观评价, 没有绝对和諧与不和諧, 因此, 未考虑 0 和 1 相应等级的划分。

表 2 REE 系统和諧发展水平等级划分标准

Tab. 2 Classification standard for harmonious development level of REE system

| I_{REE} 取值范围 | 和諧程度 |
|----------------|-------|
| (0.80, 1) | 和諧 |
| (0.60, 0.80] | 较为和諧 |
| (0.40, 0.60] | 接近不和諧 |
| (0.20, 0.40] | 较不和諧 |
| (0, 0.20] | 严重不和諧 |

2.4 REE 系统耦合协调度模型

耦合协调度是表征系统间在发展过程中由无序走向有序的趋势^[22-23]。采用“SMI-P”方法^[2]中的“单指标量化-多指标综合”(SI-MI)方法^[2]进行数据标准化处理及各系统综合得分的计算, 再将“多准则集成计算”与耦合度模型^[11]相结合, 以期构建 REE 系统耦合协调度模型来计算 REE 系统耦合协调度。

2.4.1 耦合协调度模型

耦合度模型为

$$Y = 3 \times \frac{\sqrt[3]{I_R \times I_{E,1} \times I_{E,2}}}{I_R + I_{E,1} + I_{E,2}} \quad (16)$$

式中: Y 为 REE 系统耦合度。

耦合协调度模型为

$$Z = \sqrt{Y \times I_{REE}} \quad (17)$$

式中: Z 为 REE 系统耦合协调度。

2.4.2 耦合协调度评价标准

为了更清晰地分析研究区 REE 系统耦合协调关系,参考相关研究成果^[24-27]并结合研究区相关概况划分了研究区 REE 系统耦合协调度等级,见表 3。

表 3 REE 系统耦合协调度等级划分标准

Tab. 3 Classification standard for coupling coordination level of REE system

| 耦合协调度范围 | 耦合协调等级 | 耦合协调度范围 | 耦合协调等级 |
|--------------|--------|--------------|--------|
| [0, 0.10] | 极度失调 | (0.50, 0.60] | 勉强协调 |
| (0.10, 0.20] | 严重失调 | (0.60, 0.70] | 初级协调 |
| (0.20, 0.30] | 中度失调 | (0.70, 0.80] | 中级协调 |
| (0.30, 0.40] | 轻度失调 | (0.80, 0.90] | 良好协调 |
| (0.40, 0.50] | 濒临失调 | (0.90, 1.00] | 优质协调 |

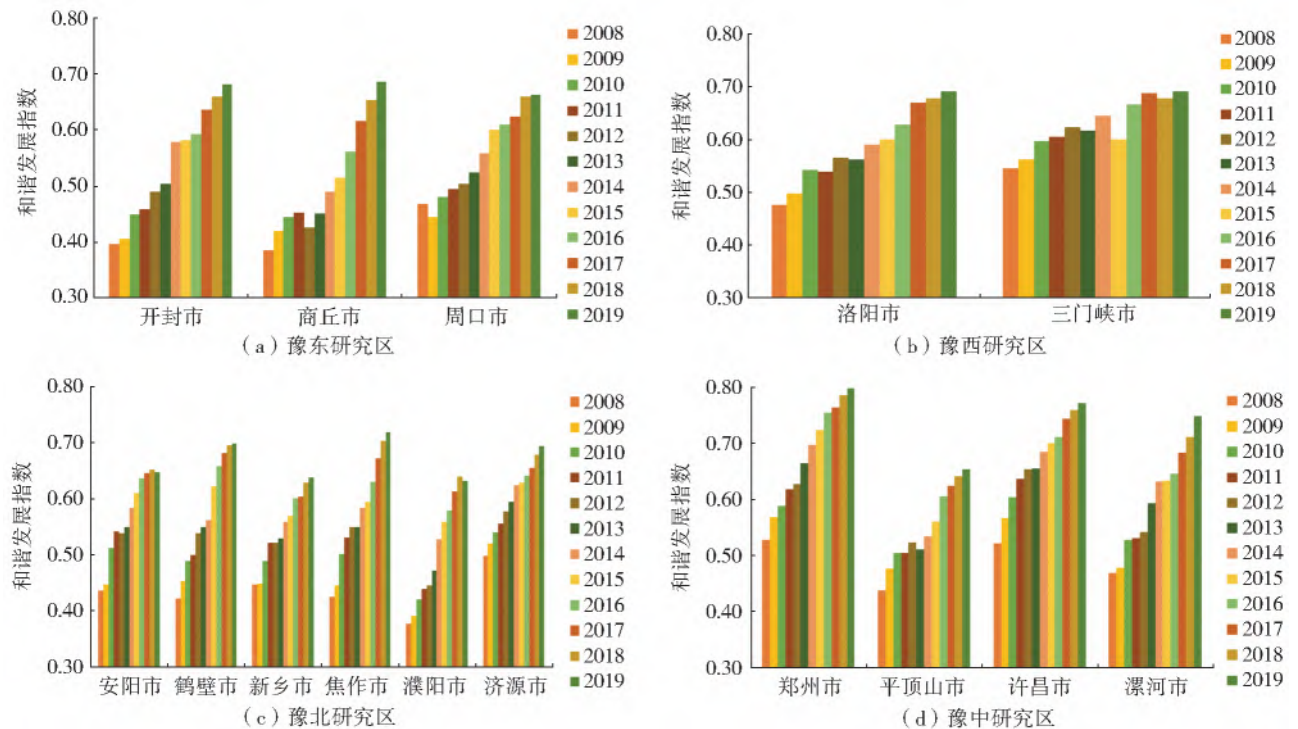


图 2 黄河河南段各地级市的 I_{REE}

Fig. 2 The I_{REE} of prefecture-level administrative region in Henan section of the Yellow River

豫东地区:周口市和谐发展水平较平稳且为最先达到较为和谐水平的地级市,其人均水资源量(A_1)、人均耕地面积(A_3)、人均 GDP(C_1)等指标直线上升,同时当地政府提倡绿色发展^[28]。豫西地区:洛阳市和谐发展速度高于三门峡市,但整体和谐发展水平落后于三门峡市,其归因于洛阳市人均水资源量(A_1)、人均公园绿地面积(B_3)、人均公共财政预算收入(C_6)、城镇化率(C_3)等指标较低,拉低了其和谐发展水平。豫北地区:焦作市 I_{REE} 在 2019 年达到区域时空最优值 0.72;濮阳市 I_{REE} 在 2008

3 结果分析

3.1 REE 系统和谐发展水平

3.1.1 各地级市 REE 系统和谐发展水平

2008—2019 年黄河河南段豫东、豫西、豫北、豫中 4 个地区 15 个地级市的 I_{REE} 见图 2。总体上,研究区 15 个地级市 I_{REE} 值均处于上升趋势,说明随着当地居民综合素质的提升、政府政策的不断调整,和谐发展水平正在逐年提高,系统整体发展向好。其中,整体和谐发展水平最优为郑州市($I_{REE}=0.68$),最差为濮阳市($I_{REE}=0.51$)。15 个地级市在研究时段内均未达到和谐水平,说明当地政府对黄河流域生态保护和高质量发展重视程度还不够,管理制度及监管力度尚有欠缺。

年为区域时空最差值 0.39,这与其当时人均水资源量(A_1)、建成区绿化覆盖率(B_1)、城镇化率(C_3)及第三产业产值占 GDP 比重(C_7)较低,万元 GDP 二氧化碳排放量(B_2)及城乡居民人均可支配收入比值(C_5)较高有关。豫中地区:郑州市和谐发展水平一直处于领先地位,除资源系统中的人均水资源量(A_1)、人均耕地面积(A_3)及单位面积粮食产量(A_7)指标值较差外,其他 18 个指标的值均接近于较优值或最优值,这说明其作为国家中心城市,对资源-生态-经济系统的均衡发展较为重视^[29-30];平顶山市和

谐水平最差,在 2008—2015 年一直处于接近不和谐水平,但到 2016 年达到了较为和谐水平,这与其进出口额占 GDP 比重(C_4)、人均公共财政预算收入(C_6)、第三产业产值占 GDP 比重(C_7)等指标逐渐提升有关。

3.1.2 各分区 REE 系统和谐发展水平

豫东、豫西、豫北、豫中及 15 个地级市区域平均 I_{REE} 值见图 3, 2008—2019 年研究区和谐发展水平总体呈现上升趋势。2013 年之前,豫西地区和谐发

展水平在各地区中排名最优,主要得益于其明显的区位优势、丰富的生物和矿产资源以及快速发展的旅游业^[31-33];2013 年以后,豫中地区和谐发展水平稳步上升且处于领先地位;豫东、豫北地区和谐发展水平一直低于 15 个地级市平均水平,主要由于豫东地区地处黄河泛滥区,其生态环境急剧恶化,一直以来对其经济造成一定影响;豫北地区随着资源型城市发展的衰落,省内经济重心的转移,其经济发展受到阻碍、比重明显下降。

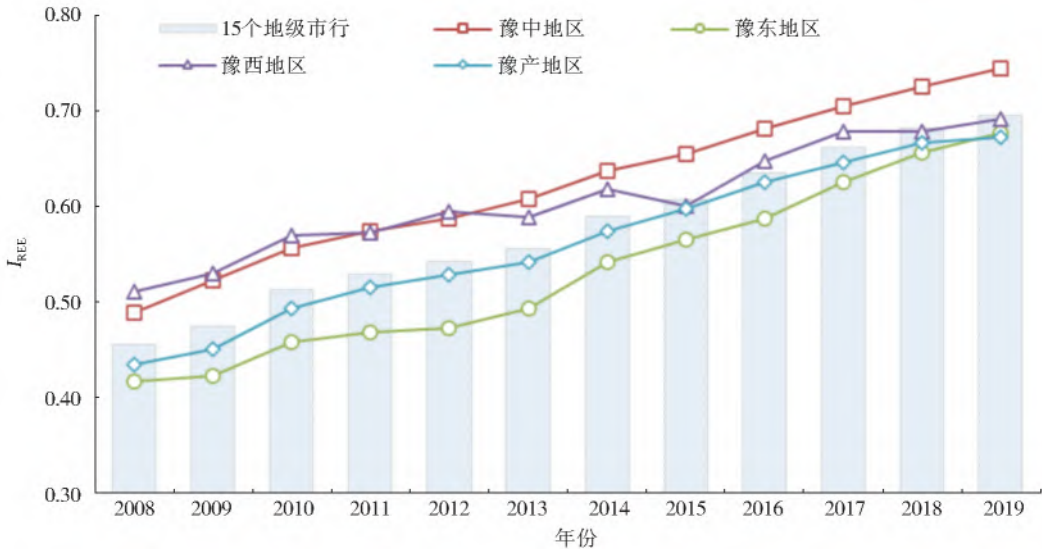


图 3 区域平均 I_{REE} 变化趋势

Fig. 3 The variation trend of regional average I_{REE}

3.2 REE 系统耦合协调关系时空演变特征

根据耦合协调度模型计算得出 2008—2019 年

研究区 15 个地级市 REE 系统耦合协调度,其时空演变趋势见图 4、5。

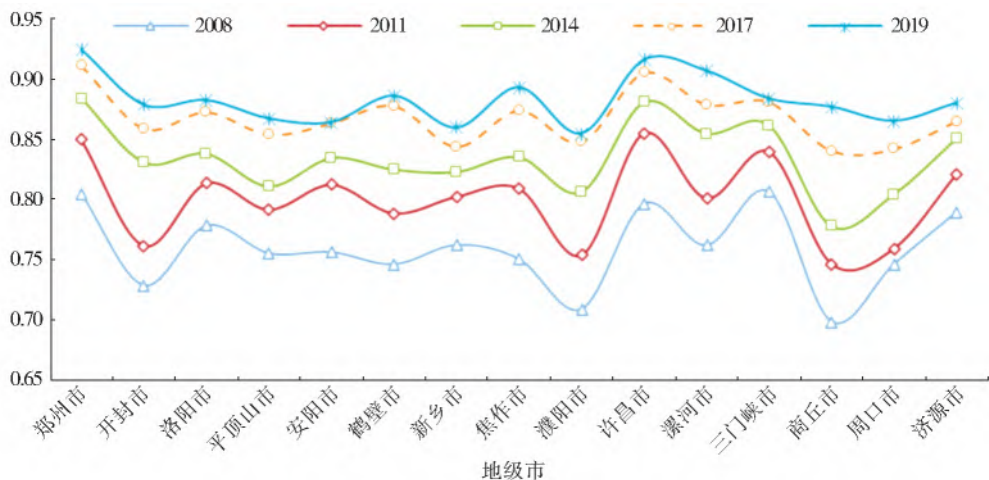


图 4 REE 系统耦合协调度时间演变趋势

Fig. 4 Temporal evolution trend of coupling coordination degree of REE system

3.2.1 时间演变特征

15 个地级市 REE 系统耦合协调等级进入优质协调阶段的数量在逐年增多。2008—2011 年,除周口市外,其他地级市协调发展速度均呈现显著增长,

说明 14 个地级市 REE 系统正处于相互促进发展局面,其归因于当地政府进一步完善社会主义市场经济体制,并逐步提高对资源节约利用及生态环境保护工作的重视程度,充分发挥资源、生态对

全省经济社会发展的宏观调控作用^[34]; 2011—2014 年, 开封市协调发展增速最高, 其他地级行政区协调发展速度较为平稳, 说明 REE 系统仍在向相互促进的状态发展; 2014—2017 年, 各地级市基本保持稳定增速, 其归因于各地级市坚持贯彻落实

“大力推进生态文明建设及经济结构战略性调整”等相关政策^[35]的实施; 2017—2019 年, 各地级行政区 REE 系统耦合协调发展关系均为良好及优质协调型, 协调发展增速虽较前几年减缓, 但仍然呈现稳步提高的趋势。

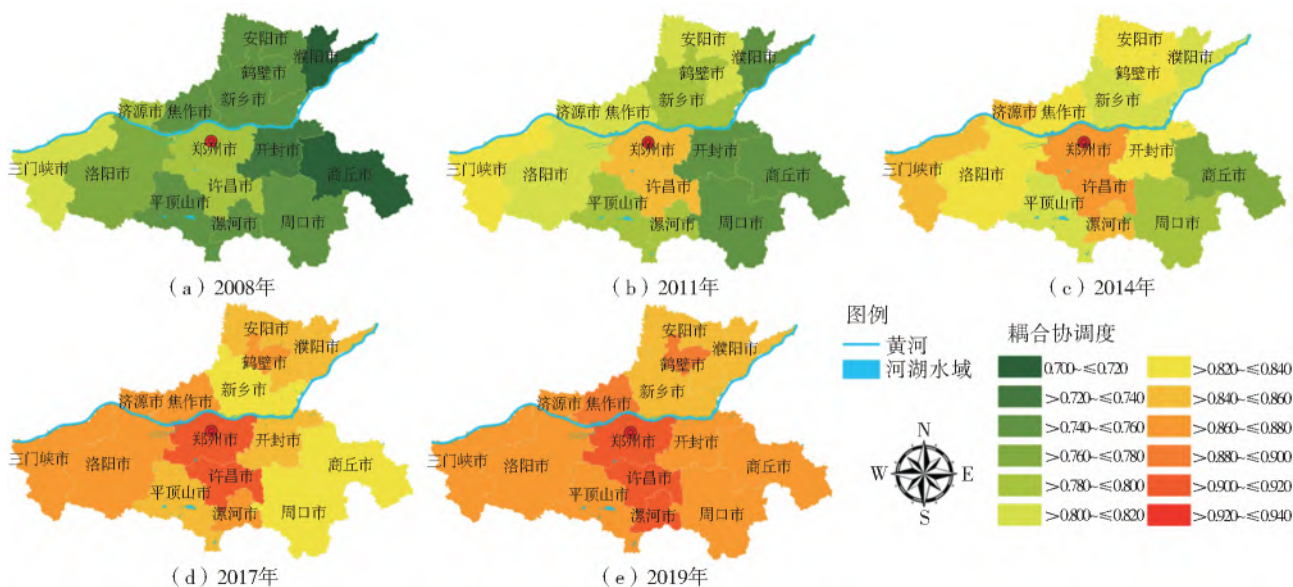


图 5 REE 系统耦合协调度空间演变趋势

Fig. 5 Spatial evolution trend of coupling coordination degree of REE system

3.2.2 空间演变特征

各地级市 REE 系统耦合协调关系空间分布情况为“中部优, 周围劣”, 存在显著差异。从整体来看: 良好协调型地级市于 2011 年明显增多, 中级协调型地级市与其数量相当, 且已减少至 8 个; 2017 年, 15 个地级市均达到良好协调及以上阶段, 主要得益于国家“十二五”“十三五”规划^[34-35]的实施, 河南省进行深入贯彻落实, 推进资源节约集约利用, 加强生态文明建设, 加快经济发展方式转变, 更加注重资源-生态-经济的协调发展。从局部来看: 除 2008 年外, 郑州市、许昌市一直处于领先地位, 且于 2017 年优先进入优质协调阶段, 说明两个地级市 REE 系统协调发展水平较高, 系统间相互作用关系较强, 其归因于当地资源、生态、经济各系统发展水平均较高, 且当地政府对三系统间的均衡发展较为重视; 三门峡一直处于良好协调阶段, 是由于其地处黄河河南段入口, 具有得天独厚的区位优势, 自然资源基础相对较好, 这在很大程度上提高了当地资源利用和经济发展水平, 进一步促进了生态建设的发展速度及当地政府对生态保护的重视; 濮阳市协调发展速度相对缓慢且落后于其他 14 个地级市, 主要原因是其处黄河河南段尾段, 地理区位优势, 经济发展支撑力不足且发展滞慢^[36], 这在一定程度上减弱了当地

政府及其他企业对资源开发及生态保护的投资力度, 削弱了其资源利用及生态环境改善程度, 致使其 REE 系统耦合协调关系较弱。

4 结 论

以黄河河南段战略实施区 15 个地级市作为研究区, 基于 2008—2019 年各地级市的面板数据, 采用“SMI-P”方法评估研究区 REE 系统的和谐发展水平, 进一步将“SMI-P”方法与耦合协调度模型相结合对研究区 REE 系统的耦合协调关系进行综合分析评价, 得出如下结论:

15 个地级市资源-生态-经济系统和谐发展水平呈现波动增长趋势, 但均未达到和谐水平; 因此, 需要综合运用智能化设备升级资源技术, 增强生态法制支撑、加大生态环境保护及治理力度, 优化调整经济结构、推进区域经济发展, 进一步提高 REE 系统和谐发展水平。从 4 个分区来看: 豫北和豫东和谐发展水平较落后; 豫北地区需调整宏观政策, 优化产业结构, 加大重大基础设施建设力度; 豫东地区需提高黄河泛滥灾害预警反应能力, 同时做好生态环境保护及治理工作, 减少地理劣势影响。从各地级市来看: 整体和谐发展水平最优地级市为郑州市 (0.68)、最差为濮阳市 (0.51), 濮阳市需提高水资源管理水平、优化用水结构以提升水资源综合利用效

率,加大绿化资金投入及环境保护监督力度。

15个地级市REE系统耦合协调关系多数为中级和良好协调,且存在显著差异,空间分布情况为“中部优,周围劣”,需要统筹区域发展规划,综合制定协调发展方案,增强三系统间相互作用关系。从时间维度来看:2008—2017年耦合协调度较低地级市逐渐减少并向优质协调阶段集聚。从空间维度来看:所有地级市均于2017年达到良好协调,但达到优质协调的地级市只有郑州市、许昌市和漯河市;濮阳市协调发展水平较落后,应坚持生态保护优先、经济发展及资源利用水平并进,统筹城乡规划以提高城镇化水平及减小城乡收入差距、优化产业结构以实现产业协调发展,加强资源节约集约利用,以期增强三系统间的协调发展关系。

参考文献(References):

- [1] 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N]. 人民日报, 2021-10-09(1). (An outline document on the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin[N]. People's Daily, 2021-10-09(1)(in Chinese)) DOI: 10. 28655/n. cnki. nrmrb. 2021. 010575.
- [2] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008(4): 440-447. (ZUO Q T, ZHANG Y, LIN P. Index system and quantification method for human-water harmony[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(4): 440-447. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:0559-9350. 2008. 04. 008.
- [3] 郭唯,左其亭,马军霞. 河南省人口-水资源-经济和谐发展时空变化分析[J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2251-2260. (GUO W, ZUO Q T, MA J X. Spatial and temporal change analysis of harmony development among population-water resources-economics in Henan, China [J]. Resources Science, 2015, 37(11): 2251-2260. (in Chinese))
- [4] ZUO Q, LI W, ZHAO H, et al. A harmony-based approach for assessing and regulating human-water relationships: A case study of Henan Province in China [J]. Water, 2020, 13(1): 32. DOI: 10. 3390/w13010032.
- [5] 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[J]. 热带地理, 1999(2): 76-82. (LIAO C B. Quantitative judgement and classification system for coordinated development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta [J]. Tropical Geography, 1999(2): 76-82. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5221. 1999. 02. 013.
- [6] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810. (WANG S J, KONG W, REN L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20210319.
- [7] 谢永琴,刘莉. 黄河流域经济发展-科技创新-生态环境耦合协调研究[J]. 科技促进发展, 2021, 17(7): 1311-1322. (XIE Y Q, LIU L. Research on the coupling coordination of economic development, technology innovation and ecology environment in the Yellow River basin [J]. Science & Technology for Development, 2021, 17(7): 1311-1322. (in Chinese)) DOI: 10. 11842/chips. 20210107004.
- [8] MOLL S, ACOSTA J. Environmental implications of resource use: Environmental input-output analyses for Germany [J]. Journal of Industrial Ecology, 2006, 10(3): 25-40. DOI: 10. 1162/jiec. 2006. 10. 3. 25.
- [9] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005(4): 552-556. (ZOU Z H, SUN J N, REN G P. Study and application on the entropy method for determination of the weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005(4): 552-556. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2005. 04. 022.
- [10] 毛定祥. 一种最小二乘意义下主客观评价一致的组价评价方法[J]. 中国管理科学, 2002(5): 96-98. (MAO D X. A combinational evaluation method resulting in consistency between subjective and objective evaluation in the least squares sense [J]. Chinese Journal of Management Science, 2002(5): 96-98. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1003-207X. 2002. 05. 019.
- [11] 姜磊,柏玲,吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析-兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 788-799. (JIANG L, BAI L, WU Y M. Coupling and coordinating degrees of provincial economy, resources and environment in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 788-799. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 20160512.
- [12] 左其亭,张志卓,李东林,等. 黄河河南段区域划分及高质量发展路径优选研究框架[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 209-216. (ZUO Q T, ZHANG Z Z, LI D L, et al. Regional division and research framework for high quality development path optimization in the Henan section of the Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 209-216. (in Chi-

- nese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0022.
- [13] 刘建华,黄亮朝,左其亭.黄河下游经济-人口-资源-环境和谐发展水平评估[J].资源科学,2021,43(2):412-422. (LIU J H, HUANG L C, ZUO Q T. Evaluation of harmonious development of economy-population-resource-environment in the lower reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 412-422. (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2021.02.18.
- [14] 左其亭,姜龙,马军霞,等.黄河流域高质量发展判断准则及评价体系[J].灌溉排水学报,2021,40(3):1-8,22. (ZUO Q T, JIANG L, MA J X, et al. Judgment criteria and evaluation system for high-quality development of the Yellow River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 1-8, 22. (in Chinese)) DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2020465.
- [15] LUO Z, ZUO Q. Evaluating the coordinated development of social economy, water, and ecology in a heavily disturbed basin based on the distributed hydrology model and the harmony theory[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 226-241. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.04.042.
- [16] 石涛.黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调度及空间网络效应[J].区域经济评论,2020(3):25-34. (SHI T. Spatial correlation network and regional connected effect of coupling coordination degree between ecological protection and high-quality economic development in the Yellow River Regions[J]. Regional Economic Review, 2020(3): 25-34. (in Chinese)) DOI:10.14017/j.cnki.2095-5766.2020.0048.
- [17] 张力隽,王余枫,夏永波,等.黄河流域资源-环境-经济耦合协调发展研究[J].人民黄河,2022,44(3):11-15. (ZHANG L J, WANG Y F, XIA Y B, et al. Research on the coordinated development of resources, environment, and economy in the Yellow River basin [J]. Yellow River, 2022, 44(3): 11-15. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2022.03.003.
- [18] 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.
- [19] 韩春辉,左其亭,张修宇,等.河南省引黄受水区资源-生态-经济系统安全评价与耦合协调分析[J].人民黄河,2022,44(1):61-66,93. (HAN C H, ZUO Q T, ZHANG X Y, et al. Safety evaluation and coupling coordination analysis of resource-ecology-economy system of the Yellow River water supply area in Henan Province[J]. Yellow River, 2022, 44(1): 61-66, 93. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2022.01.013.
- [20] 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))
- [21] 史树洁,左其亭,王亚迪.襄阳市河湖水系-经济社会发展和谐量化分析[J].水电能源科学,2017,35(3):35-39. (SHI S J, ZUO Q T, WANG Y D. Quantitative analysis of harmony between river-lake water system and socio-economic development in Xiangyang City [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(3): 35-39. (in Chinese))
- [22] 吴跃明,张翼,王勤耕,等.论环境-经济系统协调度[J].环境污染与防治,1997(1):20-23,46. (WU Y M, ZHANG Y, WANG Q G, et al. On environment-economy coordinated degree[J]. Environmental Pollution & Control, 1997(1): 20-23, 46. (in Chinese)) DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.1997.01.008.
- [23] 高楠,马耀峰,李天顺,等.1993—2010年中国入境旅游与进口贸易耦合关系时空分异研究[J].经济地理,2012,32(11):143-148,161. (GAO N, MA Y F, LI T S, et al. Study on spatio-temporal differences in coupling relationship between chinese inbound tourism and import trade during 1993 to 2010[J]. Economic Geography, 2012, 32(11): 143-148, 161. (in Chinese)) DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2012.11.025.
- [24] 韩冬.国家中心城市高质量发展与生态环境耦合协调度及空间格局演进研究[J].生态经济,2021,37(6):158-164. (HAN D. Research on the coupling coordination degree and spatial pattern evolution of high-quality development and ecological environment of national central cities[J]. Ecological Economy, 2021, 37(6): 158-164. (in Chinese))
- [25] 许进龙,谢凌凌,黄天能.资源枯竭城市“经济-社会-生态”复合系统耦合协调度时空演变研究[J].中国矿业,2021,30(6):57-64. (XU J L, XIE L L, HUANG T N. Research on the evolution of coupling coordination degree of the "economy-society-ecology" compound system in resource exhausted cities[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 57-64. (in Chinese)) DOI:10.12075/i.issn.1004-4051.2021.06.020.
- [26] ZHAO G, LIANG R, LI K, et al. Study on the coupling model of urbanization and water environment with basin as a unit: A study on the Hanjiang basin in China[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108130.

- DOI:10.1016/j.ecolind.2021.108130.
- [27] 谭兴坤,何如海,赵敏,等. 湖南经济发展-生态环境-旅游产业耦合协调关系分析[J]. 西南林业大学学报(社会科学),2021,5(3):27-31,49. (TAN X K, HE R H, ZHAO M, et al. Analysis on the coupled coordination relations among economic development, ecological environment and tourism industry in Hunan Province [J]. Journal of Southwest Forestry University(Social Sciences),2021,5(3):27-31,49. (in Chinese))
- [28] 屈冰冰,徐晓霞. 河南省低碳生态城市评价研究[J]. 绿色科技,2015(8):315-318. (QU B B, XU X X. Evaluation of low-carbon eco-city in Henan Province [J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(8):315-318. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-9944.2015.08.135.
- [29] 徐立毅. 加快郑州国家中心城市建设 发挥好高质量发展区域增长极作用[N]. 河南日报,2020-07-01(004). (XU L Y. Accelerating the construction of Zhengzhou as a national central city and giving full play to the role of high-quality development regions as poles of growth[N]. Henan Daily,2020-07-01(004). (in Chinese)) DOI:10.28371/n.cnki.nhnr.2020.003548.
- [30] 原春芬. 黄河流域环境保护中郑州经济高质量发展探析[J]. 合作经济与科技,2020(16):26-27. 2020. 16. 009. (YUAN C F, Analysis of high quality development of Zhengzhou economy in environmental protection of the Yellow River basin [J]. Co-operative Economy & Science,2020(16):26-27. 2020. 16. 009. (in Chinese)) DOI:10.13665/j.cnki.hzjyjkj.
- [31] 关于学习贯彻《国务院关于支持河南省加快建设中原经济区的指导意见》的通知[N]. 洛阳日报,2011-10-10(004). (Notice on studying and implementing the guiding opinions of The State Council of the PRC on supporting Henan Province to accelerate the construction of central plains economic zone [N]. Luoyang Daily,2011-10-10(004). (in Chinese)) DOI:10.28549/n.cnki.nlybr.2011.001598.
- [32] 李少民. 河南三门峡:“四大一高”促资源型城市转型[J]. 中国财政,2012(11):61-62. (LI S M. Sanmenxia, Henan: "Great customs clearance, great traffic, great trade, great tourism construction and high-tech industry" development strategy promotes the transformation of resource-based cities[J]. China State Finance, 2012(11):61-62. (in Chinese)) DOI:10.14115/j.cnki.zgcz.2012.11.015.
- [33] 张慧霞,张萌. 晋陕豫黄河金三角地区跨省区域旅游合作研究[J]. 科技创新与生产力,2013(12):36-39. (ZHANG H X, ZHANG M. Study on inter-provincial regional tourism cooperation in the Yellow River golden triangle region of Shanxi, Shaanxi and Henan Province[J]. Technology Innovation and Productivity,2013(12):36-39. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-9146.2013.12.036.
- [34] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[N]. 人民日报,2011-03-17(001). (The twelfth five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China[N]. People's Daily,2011-03-17(001). (in Chinese)) DOI:10.28655/n.cnki.nrmrb.2011.015717.
- [35] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[N]. 人民日报,2016-03-18(001). (The thirteenth five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China [N]. People's Daily,2016-03-18(001). (in Chinese)) DOI:10.28655/n.cnki.nrmrb.2016.003765.
- [36] 王丹. 资源型城市产业转型的问题研究:以河南省濮阳市为例[J]. 产业创新研究,2018(5):98-100. (WANG D. The issues related to industrial transformation of resource-based cities: A case study of Puyang City in Henan Province[J]. Industrial Innovation, 2018(5):98-100. (in Chinese))

Resource-ecology-economy harmonious development and coupling coordination analysis of the Henan section of the Yellow River

ZHAO Chenguang¹, MA Junxia^{1,2}, ZUO Qiting^{1,2}, WANG Jiaoyang¹, FU Yunyou³

(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. Henan Yubei Water Conservancy Engineering Administration Bureau, Xinxiang 453002, China)

Abstract: The problem of unbalanced and inadequate development among resource, ecology and economic systems in the Yellow River basin is becoming more and more prominent. Quantitative evaluation of the harmonious development level and analysis of the coupling and coordination relationship among them are of great significance to the high-quality development of the Yellow River basin. The 15 prefecture-level administrative regions in the Henan section of the Yellow River are taken as the research area and an evaluation indicator system from the three aspects of resources, ecology and economy is constructs based on the panel data

(下转第 747 页)

of NDVI between annual average and growing season. The spatial heterogeneity of vegetation cover change was obvious, and most NDVI changes were within ± 0.1 . Vegetation coverage in Daxing'an mountains increased to a high degree; Vegetation cover change is not obvious in high altitude areas; Reduction of NDVI in the southeast of Sanjiang Plain and some areas of Xiaoxing'an mountains is obvious. In different land use types, woodland in mountainous areas is higher than that in plain farmland and urban areas. During the growing season, NDVI in cropland and grassland showed a significant increasing trend, while NDVI in woodland showed a slight decreasing trend. According to the prediction of the future trend of NDVI change, there were many areas where the future change trend of vegetation cover index showed a good trend, and there were also many areas where the future change was uncertain, and vegetation cover index showed a degeneration phenomenon in the southern region. Regions of uncertain about NDVI future changes were mainly distributed in Songnen Plain, central Region and southern Sanjiang Plain of Heilongjiang Province. In different periods, NDVI future variation trend was obviously different, and the spatial variability was obvious. NDVI future variation trend showed continuous degradation and continuous improvement mainly due to changes in geographic location and climate factors. The positive correlation between NDVI and temperature was weak, and the negative correlation between NDVI and precipitation was weaker, so NDVI response to air temperature is more pronounced. Compared with forest land, cities had weaker self-regulation ability, so NDVI located in cities was more responsive to climate factors. NDVI changes were significantly consistent with changes in air temperature and precipitation in the southwestern urban areas of Heilongjiang Province. About NDVI response to temperature and precipitation, spatial heterogeneity was obvious. Especially in the vegetation growing season, its growth was mostly influenced by precipitation. However, in the Suihua area of Songnen Plain, there was no obvious difference in vegetation cover change affected by temperature and precipitation.

Key words: vegetation cover; GIMMS NDVI3g; climate response; Hurst index; correlation analysis

(上接第 669 页)

of each region from 2008 to 2019. The combined weight model of AHP-entropy based on least square method is adopted to determine the weight of each indicator. It uses "SMI-P" evaluation method to evaluate the harmonious development level of resource-ecology-economy system. The "SMI-P" method is further combined with the coupling coordination model to comprehensively appraise the coupling coordination relation of resource-ecology-economy system in the study area. The results show that between 2008 and 2019; The harmonious development level of the fifteen prefecture-level administrative regions shows a trend of fluctuating growth on the whole, but none of them reached the "harmony" stage, and among them, Zhengzhou is the best (0.68), and Puyang is the worst (0.51); The coupling coordination relation of the fifteen prefecture-level administrative regions is gradually gathering to the stage of high-quality coordination, but most of them are still in the intermediate and good coordination stage, and the coordinated development speed of Puyang is relatively backward among them.

Key words: resources-ecology-economy; SMI-P; harmonious development; coupling coordination; the Henan section of the Yellow River