

基于熵权 TOPSIS 的河南省农业水土资源承载力 时空分异与关联分析

文 倩, 孙江涛, 范利瑶, 李小弯, 李青松

(河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450002)

摘 要:目前全球粮食生产面临巨大的挑战,作为我国重要的粮食输出大省,河南省的农业水土资源承载能力直接关系到我国的粮食安全。为客观反映河南农业水土资源承载力状况,通过构建熵权 TOPSIS 模型,对近 10 年河南省农业水土资源承载能力的时空动态变化做了定量研究,并对其影响因素进行了关联分析。结果表明:(1) 2006—2018 年,河南省农业水土资源承载力指数平均值 0.266,承载力水平总体上升但波动较大,承载力指数最高值与最低值相差近 1.26 倍,除 2018 年外,绝大多数年份处于稳定水平;濮阳、焦作、鹤壁农业水土资源承载力年均增长速率较快,均超过 9%;信阳和驻马店下降较多,年均分别下降 8.49% 和 2.77%;(2) 河南省农业水土资源承载力在空间上的分布规律为:豫北>豫南>豫东>豫西,其中郑州、新乡、信阳、商丘、许昌 5 市较高,开封、平顶山、漯河、鹤壁 4 市较低,研究时段内豫南农业水土资源承载力逐渐下降、豫北和豫东逐渐增高;(3) 农作物受灾面积比例、本年度农林水利工程投资比例、废水处理率、农业水土资源匹配系数以及森林覆盖率是影响河南省农业水土资源承载力的主要因素。可见,为提升农业水土资源承载力,河南省应加强高标准基本农田建设,提高耕地的防灾抗灾能力,同时加大生态环境保护投入力度。

关键词:农业水土资源;承载力;TOPSIS;时空分异;关联分析

中图分类号:F326.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0333-06

Evaluation of Agricultural Soil-Water Resources Carrying Capacity (ASWCC) and Relation Analysis Based on Entropy Weight TOPSIS in Henan Province

WEN Qian, SUN Jiangtao, FAN Liyao, LI Xiaowan, LI Qingsong

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Global food production is facing enormous challenges, as one of the major agricultural provinces in China, the agricultural soil-water carrying capacity (ASWCC) in Henan Province is closely related to national food security. To provide support and reference for the sustainable development of agriculture in Henan, we took the entropy weight method and TOPSIS model to analyze the spatial and temporal changes of the ASWCC in Henan Province. The results showed that: (1) from 2006 to 2018, the average value of Henan's ASWCC index was 0.266, and the overall level of carrying capacity showed the upward trend and fluctuated greatly; the highest value was nearly 1.26 times of the lowest value in terms of ASWCC; the most carrying capacity value was at the stable level except for 2018, the annual increasing rates of ASWCC in Puyang, Jiaozuo and Hebi were higher than 9%, and the ASWCC in Xinyang, Zhumadian decreased rapidly with annual decreasing rates of 8.49% and 2.77%; (2) during the study period, the distribution presented that the ASWCC decreased in the order: northern Henan>southern Henan>east Henan>western Henan; ASWCC in Zhengzhou, Xinyang, Xinxiang, Shangqiu and Xuchang were relatively high, while ASWCC in Luohe, Pingdingshan, and Kaifeng were relatively low; during the study period, the ASWCC in southern Henan was declining, and the ASWCC in northern and eastern Henan had gotten better and higher; (3) relation anal-

收稿日期:2020-11-11

修回日期:2021-01-07

资助项目:河南省哲学社会科学规划项目(2020BJJ038);河南省科协科技智库调研课题(HNKJZK-2020-22C)

第一作者:文倩(1974—),女,辽宁本溪人,博士,教授,主要从事水土资源利用与保护研究。E-mail:wenqian23@163.com

通信作者:李青松(1976—),男,河南扶沟人,博士,讲师,主要从事土地生态研究。E-mail:qs.li@henau.edu.cn

ysis showed that the ASWCC was strongly affected by the proportion of crop disaster area (C_9), the investment ratio of agricultural and forestry water conservancy projects(C_{11}), the wastewater treatment rate (C_6), and the matching coefficient of agricultural water and land resources(C_1). In order to improve and maintain the stability of food production level, agricultural disaster resistance and increase of the investment in agriculture and environmental protection in Henan should be strengthened.

Keywords: agricultural soil-water resources; carrying capacity; TOPSIS; spatial-temporal differentiation; relation analysis

随着新冠疫情在全球的持续和蔓延,粮食生产与供应体系正遭受多重挑战,世界对粮食安全的担忧亦日益增加^[1]。作为粮食生产的关键核心要素,区域耕地和水资源及对应的农业水土资源承载能力是粮食稳产与高产、国家粮食安全的基础与保障,也是人口、资源与环境可持续发展评价的重要指标^[2]。随着我国经济快速发展和城镇化的持续推进,农业水土资源短缺和区域性结构破坏等问题日益突出^[3],土壤与水体污染也增加了国家粮食安全的风险和不确定性^[4]。同时,因人口顶峰的到来及社会主义现代化目标的实现,预计 2022—2030 年我国粮食需求将达到峰值、年均增加约 656.6 万 t^[5]。因此,为满足我国社会不断增长的粮食总量需求,必须强化粮食生产能力建设、提高农业水土资源的承载能力。

目前学界对农业水土资源承载力尚无统一定义^[3],早期相关研究主要侧重于土地或水资源承载力的独立评价^[6-7],由于未综合考虑农业水土资源的复杂作用与耦合关系,而不利于其整体效能的充分发挥^[8]。近年来,越来越多的学者将农业用水与耕地资源二者相结合以开展综合研究,如王国强等^[9]研究了水土资源匹配系数与河南粮食产量的关系,发现二者空间分布错位明显,粮食高产区普遍过度利用水资源;任守德等^[8]采用微观和宏观两种模型研究了三江平原的农业水土资源承载力,认为其能较好的反映区域水土资源的实际情况;李慧等^[10]研究表明延安市农业水土资源匹配程度较差,农业水土资源承载力水平整体偏低;杨剑等^[11]采用 DPSIR 模型和熵权 TOPSIS 方法对湖北省农业水土资源承载力做了定量研究,发现不同地区差异较大;安全承载与超载区域各占约 50%。可以看出,目前农业水土资源承载力的研究取得了一定进展,但统一、综合的时空动态研究仍然较为缺乏。

自 2013 年以来,河南省粮食产量平均每年增加 100 万 t,对国家粮食安全做出了重要贡献。但河南人地矛盾尖锐、耕地质量偏低,近 1/7 耕地存在退化、农田面源污染等问题突出^[12],同时水资源极度紧缺、水土资源匹配较差^[13],其农业水土资源承载能力直

接影响到了粮食有效供给与粮食产能稳定。因此,本研究采用熵权 TOPSIS 模型与灰色关联分析方法,对河南省近 13 年来区域农业水土资源承载力的变化特征与影响因素进行动态分析与定量诊断,以期筑牢河南农业根基、强化和提高粮食生产能力并增强粮食供给保障提供科学依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

河南省地理位置北纬 31°23′—36°22′、东经 110°21′—116°39′,土地总面积 16.7 万 km²,耕地总面积 811.2 万 hm²,人均耕地面积 0.075 hm²。为暖温带—亚热带、湿润—半湿润季风气候,年均气温 13~16℃,年均降水 500~900 mm。地势西高东低,平原和盆地、山地、丘陵分别占总面积的 55.7%、26.6%和 17.7%。主要土壤类型为棕壤、黄褐土、褐土和潮土,质地以粘质、砂质和壤质为主。河南是我国粮食主产区,2018 年粮食种植面积 1 476.9 万 hm²,其中小麦 574.0 万 hm²,玉米 391.9 万 hm²,全年粮食产量 1 329.8 亿 kg。2018 年全省 GDP4.8 万亿元,三次产业结构为 9:46:45;2018 年末全省总人口 1.1 亿人、城镇化率 51.7%,森林覆盖率 24.5%。

1.2 数据来源

本研究采用的耕地资源、农业水资源以及社会经济等数据主要来自于《中国统计年鉴》、《河南统计年鉴》、《河南省水资源公报》、《中国水资源公报》等资料,选取资料数据的时段间为 2006—2018 年。

2 河南省农业水土资源承载力评价方法

2.1 农业水土资源承载力指标体系

基于绿色、协调、生态环保、高质量发展的原则以及农业水土资源承载力内涵与相关研究成果^[3,10],本文从资源、环境、经济、社会 4 个方面选取了 15 项指标构建河南农业水土资源承载力评价指标体系,各指标具体名称及其性质详见表 1。

2.2 数据标准化处理与权重确定

本文采用熵权法计算指标权重,熵权法具有客观、

定量的特点,能较好地反映各指标的实际贡献。计算步骤为:首先,用极差标准化法对原始数据进行处理;其次,确定各指标的信息熵(H_i)以及信息效用值,信息熵越大则该指标越重要;熵权计算方法见式(1,2)。

$$W_i=1-H_i/(m-\sum_{i=1}^m H_i)$$
 (1)

$$H_i=-1/\ln n \sum_{j=1}^n (r_{ij}/\sum_{j=1}^n r_{ij})\ln(r_{ij}/\sum_{j=1}^n r_{ij})$$
 (2)

式中: W_i 为指标权重; H_i 为信息熵; f_{ij} 为指标特征比重; r_{ij} 为第*i*年第*j*个指标的原数值; m 为指标个数; n 为年份。

表 1 河南省农业水土资源承载力评价指标体系

目标	影响要素	指标(单位)	指标属性
A ₁ 农业 水土 资源 承载 力	B ₁ 资源	C ₁ 农业水土资源匹配系数(m ³ /hm ²)	+
		C ₂ 高耗水作物种植面积比例(%)	+
		C ₃ 人均耕地面积(hm ² /人)	+
		C ₄ 森林覆盖率(%)	+
		C ₅ 农田有效灌溉面积比例(%)	+
		C ₆ 废水处理率(%)	+
	B ₂ 环境	C ₇ 单位耕地面积化肥使用量(t/10 ³ hm ²)	—
		C ₈ 单位耕地面积农药使用量(t/10 ³ hm ²)	—
		C ₉ 农作物受灾面积比例(%)	—
		C ₁₀ 农机化水平(kW/hm ²)	+
	B ₃ 经济	C ₁₁ 农林水利工程投资比例(%)	+
		C ₁₂ 单位耕地面积耗电量(kW/hm ²)	+
		C ₁₃ 主要粮食作物单位面积产量(kg/hm ²)	+
	B ₄ 社会	C ₁₄ 人口的自然增长率(‰)	—
		C ₁₅ 第一产业的比重(%)	+

注:“+”表示指标属性为正;“—”表示指标属性为负。

2.3 农业水土资源承载力评价模型构建

本文采用 TOPSIS 模型对河南省农业水土资源承载力水平进行定量分析。该方法通过对有限评价对象与理想目标接近程度的排序来计算目标与正负理想解的距离,并在此基础上计算区域农业水土资源承载力水平,主要步骤如下:

(1) 构建标准化评价矩阵。首先采用熵权法计算各指标的权重 w ,再加权构建标准化评价矩阵 Y 。

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} r_{11} \times w_{11} & r_{12} \times w_{12} & \cdots & r_{1n} \times w_{1n} \\ r_{21} \times w_{21} & r_{22} \times w_{22} & \cdots & r_{2n} \times w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} \times w_{m1} & r_{m2} \times w_{m2} & \cdots & r_{mn} \times w_{mn} \end{bmatrix}$$
 (3)

式中: Y 为评价矩阵; y_{mn} 表示第*i*个指标第*j*年的加权后的数值; r_{mn} 表示第*i*个指标第*j*年的原数值; w_{mn} 表示第*m*个指标第*n*年的权重。

(2) 确定正负理想解。即用规范化加权评价矩阵各列的最大最小值构成最优、最劣向量,正、负理想解分别记为:

$$Y^+ = \{\max_{1 \leq i \leq m} y_{ij} | i=1,2,\cdots,m\} = \{y_1^+, y_2^+, \cdots, y_m^+\}$$
 (4)

$$Y^- = \{\min_{1 \leq i \leq m} y_{ij} | i=1,2,\cdots,m\} = \{y_1^-, y_2^-, \cdots, y_m^-\}$$
 (5)

式中: Y^+ 表示正理想解; Y^- 表示负理想解; y_m^+ 表示不同指标的最优解; y_m^- 表示不同指标的最差解。

(3) 计算距离。采用欧氏距离方法计算评价对象与正、负理想解的距离,详见式(6,7):

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^+ - y_{ij})^2}$$
 (6)

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^- - y_{ij})^2}$$
 (7)

式中: D_j^+ 为指标距离正理想解的距离; D_j^- 为指标距离负理想解的距离; y_i^+ 为第*i*个指标的正理想解; y_i^- 为第*i*个指标的负理想解; y_{ij} 为第*i*个指标第*j*年加权后数值。

(4) 农业水土资源承载力计算。采用贴程度表示第*i*个评价对象与本地区最优承载力间的接近程度并以此计算区域农业水土资源承载力水平,详见式(8):

$$E_j = D_j^- / (D_j^+ + D_j^-)$$
 (8)

式中: E_j 为农业水土资源承载力水平,取值范围[0,1]; D_j^+ 表示距离正理想解的距离; D_j^- 表示距离负理想解的距离。

2.4 农业水土资源承载力等级划分

Jenks 最佳自然断裂法是将数据划分为多个类别,在数据值的差异相对较大的位置处设置其边界^[14]。本文依据河南实际,采用类内差异最小,类间差异最大的 Jenks 最佳自然断裂法将河南省农业水土资源承载力指数划分为良好、稳定、敏感、薄弱 4 个等级,进行空间分析,评价级别及对应承载力水平具体见表 2。

表 2 河南省农业水土资源承载力分级标准

农业水土资源承载力指数	评价等级	承载力水平
$0.3 < E_j$	I 级	良好
$0.25 < E_j \leq 0.3$	II 级	稳定
$0.2 < E_j \leq 0.25$	III 级	敏感
$0.1 < E_j \leq 0.2$	IV 级	薄弱

2.5 灰色关联分析

灰色关联分析具有原理简单、运算方便、易于挖

掘数据规律的特点,计算公式为:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |r_{oj} - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |r_{oj} - r_{ij}|}{|r_{oj} - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |r_{oj} - r_{ij}|} \quad (9)$$

$$T_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \xi_{ij} \quad (10)$$

式中: ξ_{ij} 为关联系数; r_{oj} 与 r_{ij} 分别为评价指标的最优值及其标准化值; ρ 为分辨系数, $\rho = 0.50$; $\min_i \min_j |r_{oj} - r_{ij}|$ 和 $\max_i \max_j |r_{oj} - r_{ij}|$ 为两级极小差和两级极大差; T_i 为关联度; m 为评价指标个数; n 为评价年份($n=12$)。

3 结果与分析

3.1 农业水土资源承载力时间动态变化

2006—2018 年,河南省农业水土资源承载力总体呈增长趋势,承载力指数均值为 0.266,承载力指数由 2006 年的 0.226 上升至 2018 年的 0.336,增加了 48.67%,但承载力不够稳定、围绕趋势线上下波动且幅度较大,最高值与最低值相差近 1.26 倍(图 1)。2018 年,河南农业水土资源承载力达良好水平,其余年份(不含 2006 年)属于稳定水平。农业水土资源承载力自 2014 年起出现较大幅度下降,与极端干旱气候导致耕地水土资源系数降低有关;2014 年农作物受灾面积较 2013 年增加了 61%;同时频繁的大风天气也对粮食产量造成了一定影响^[15]。

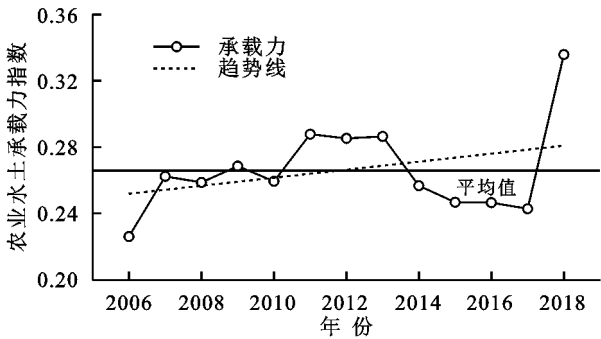


图 1 2006—2018 年河南省农业水土资源承载力

2006—2018 年,河南省内新乡、郑州、信阳、商丘、许昌等市农业水土资源承载力平均水平较高,漯河、平顶山、鹤壁、开封相对较低(图 2)。除信阳、驻马店、三门峡、郑州外大部分地市农业水土资源承载力都有所增加,其中濮阳、焦作、鹤壁年均增长速率较快,均超过 9%;其次是安阳和新乡,年均增长约 7%~8%;农业水土资源承载力下降较快的是信阳和驻马店,年变化率为-8.49%和-2.77%,这些地市在很大程度上降低了河南省的总体承载力水平。

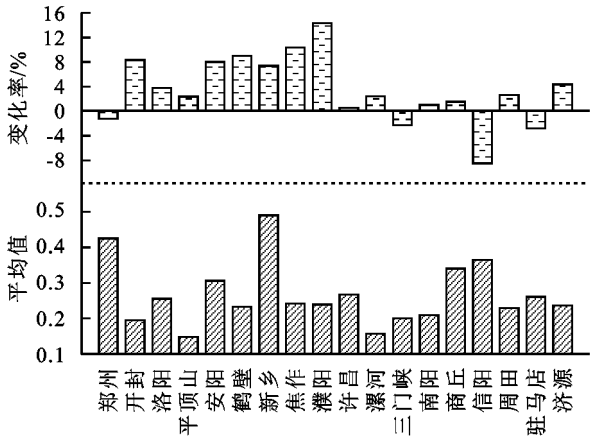


图 2 2006—2018 年河南省各市农业水土资源承载力均值及变化率

2006—2018 年,河南省各市间农业水土资源承载力水平变化差异明显(表 3),依据其变化特点,河南各市农业水土资源承载力大体可分为 4 类:第一类包括新乡、信阳 2 个地市,农业水土资源承载力 2007—2013 年呈缓慢上升;2014 年迅速上升,随后进入相对稳定阶段,至 2018 年又有所下降;第 2 类包括郑州、许昌、南阳和周口 4 市,农业水土资源承载力在 2006—2010 年相对较高,其余年份比较平稳;第 3 类包括安阳、漯河、三门峡、商丘和驻马店 5 市,其农业水土资源承载力变化趋势大体呈“几”字形,前期和后期平稳,中间阶段(2011—2013 年)高;开封、洛阳、平顶山等 7 市属第 4 类,其农业水土资源承载力总体平稳,仅在 2018 年有所上升。

3.2 农业水土资源承载力空间动态变化

为研究河南省农业水土资源承载力的空间分布情况,首先将承载力水平分为良好(I 级)、稳定(II 级)、敏感(III 级)和薄弱(IV 级)4 个等级,再选取 2006 年、2012 年、2018 年农业水土资源承载力进行空间分析(图 3)。2006—2018 年,总体上河南农业水土资源承载力在空间上的分布规律为豫北>豫南>豫东>豫西;其在时间与空间两个维度上的变化规律为:2006 年,豫南>豫西、豫中>豫北>豫东;2012 年,豫北>豫东>豫南>豫西;2018 年,豫北>豫东>豫南>豫西。可以看出,随着时间变化,承载力良好区域逐渐向豫北和豫东集中。

3.3 农业水土资源影响因素分析

灰色关联系数能够客观体现各评价指标对河南省农业水土资源承载力的贡献程度,图 4 可见各指标与农业水土资源承载力指数的关联系数都高于 0.5。其中,农作物受灾面积比例(C_9)、本年度农林水利工程投资比例(C_{11})、废水处理率(C_6)、农业水土资源匹配系数(C_1)、森林覆盖率(C_4)、单位耕地面积的耗

电量(C_{12})等指标与农业水土资源承载力的关联度高于 0.6,是主要的影响因素。特别是农作物受灾面积比例(C_9)与农业水土资源承载力的关联度最高、达到了 0.834,表明河南应大力提高农业防灾、减灾能力。

表 3 2006—2018 年河南省各市农业水土资源承载力

地市	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
郑州	0.306	0.736	0.733	0.742	0.72	0.333	0.296	0.32	0.269	0.266	0.279	0.269	0.264
开封	0.164	0.179	0.173	0.188	0.181	0.196	0.193	0.193	0.163	0.162	0.159	0.159	0.429
洛阳	0.236	0.242	0.246	0.25	0.249	0.266	0.263	0.257	0.243	0.243	0.229	0.223	0.369
平顶山	0.146	0.145	0.131	0.148	0.149	0.161	0.151	0.147	0.138	0.139	0.142	0.137	0.193
安阳	0.17	0.224	0.227	0.233	0.225	0.446	0.439	0.45	0.285	0.286	0.287	0.278	0.429
鹤壁	0.161	0.236	0.237	0.24	0.222	0.263	0.265	0.264	0.142	0.144	0.144	0.134	0.453
新乡	0.218	0.307	0.31	0.332	0.342	0.445	0.444	0.445	0.764	0.758	0.757	0.745	0.512
焦作	0.211	0.189	0.182	0.194	0.128	0.224	0.219	0.227	0.254	0.215	0.215	0.204	0.689
濮阳	0.112	0.231	0.236	0.241	0.234	0.146	0.147	0.155	0.264	0.264	0.265	0.258	0.561
许昌	0.238	0.454	0.453	0.457	0.45	0.211	0.216	0.211	0.147	0.134	0.128	0.121	0.253
漯河	0.132	0.126	0.131	0.129	0.111	0.244	0.247	0.246	0.128	0.123	0.127	0.125	0.176
三门峡	0.188	0.186	0.182	0.204	0.183	0.255	0.214	0.214	0.216	0.184	0.218	0.221	0.142
南阳	0.212	0.205	0.2	0.23	0.249	0.217	0.218	0.201	0.185	0.194	0.181	0.196	0.239
商丘	0.201	0.223	0.219	0.225	0.226	0.683	0.692	0.693	0.271	0.252	0.249	0.248	0.242
信阳	0.685	0.281	0.283	0.283	0.293	0.25	0.272	0.281	0.471	0.473	0.471	0.47	0.236
周口	0.183	0.257	0.255	0.262	0.268	0.274	0.278	0.275	0.182	0.167	0.168	0.167	0.251
驻马店	0.251	0.265	0.251	0.246	0.259	0.332	0.337	0.332	0.247	0.237	0.231	0.235	0.179
济源	0.256	0.237	0.208	0.23	0.181	0.235	0.244	0.245	0.252	0.201	0.188	0.182	0.428

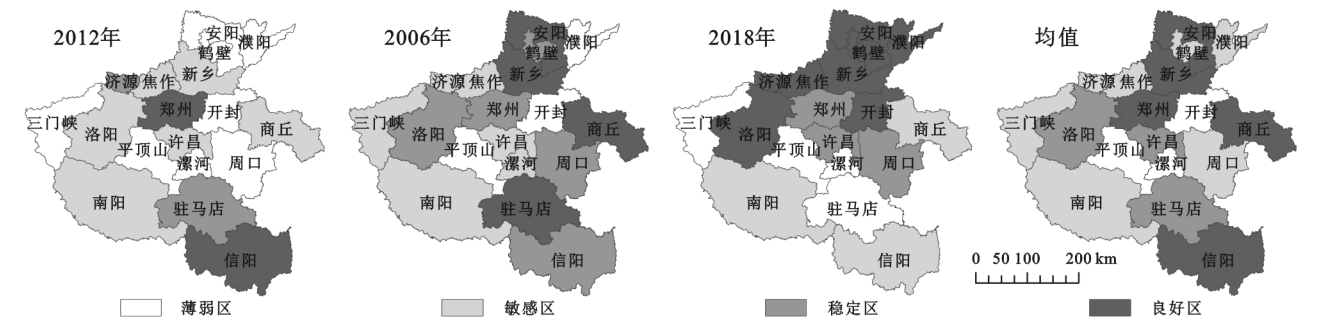


图 3 河南省农业水土资源承载力空间分异

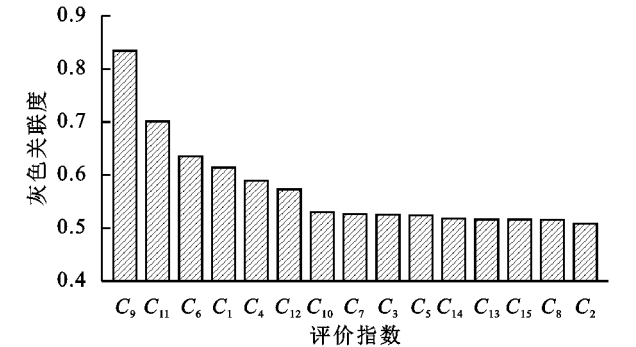


图 4 评价指标与农业水土资源承载力指数的灰色关联度排序

4 讨论与结论

4.1 讨论

良好的农业水土资源承载力是实现粮食增产与安全的基石,研究期内河南省农田水利投资金额、有效灌溉面积以及森林覆盖率持续增长^[16];因此,农业水土资源承载能力总体有所提高。但与此同时,快速的城镇化与经济增长对区域农业水土资源的压力也在持续增加^[17];研究期内河南单位耕地面积化肥与

农药施用量^[18]、极端天气与农业灾害^[19]都有所增加,不仅给河南粮食生产带来了隐患,也可能是承载力大幅波动的原因之一。研究期内,河南农业水土资源承载力空间差异逐渐增大,豫南农业水土资源承载力下降、承载良好区域逐渐向豫北和豫东集中,这与豫北各市普遍增加了对农田水利设施的投入、农业水土资源匹配程度有所好转有关^[16];也反应出豫南地区亟需加强对农业水土的保护及农业投入。同时,关联分析表明农作物受灾面积比例、农林水利工程投资比例与废水处理率、农业水土资源匹配系数是影响水土资源承载力的重要因素。为筑牢粮食生产根基、提高粮食生产水平,河南应重点增强农业抗灾能力、提高水资源利用效率,增加生态环境、农业资金和技术投入、优化农业种植结构,从而实现农业水土资源持续利用和社会经济可持续发展。

4.2 结论

(1) 2006—2018 年,河南省农业水土资源承载力指数平均值 0.266,承载力水平总体上升但波动较大,承载

力指数最高值与最低值相差近 1.26 倍,除 2018 年外,绝大多数年份处于稳定水平;濮阳、焦作、鹤壁农业水土资源承载力年均增长速率较快,均超过 9%;信阳和驻马店下降较快,年均分别下降 8.49% 和 2.77%。

(2) 2006—2018 年,河南省农业水土资源承载力在空间上的分布规律为:豫北>豫南>豫东>豫西,其中郑州、新乡、信阳、商丘、许昌等 5 市较高,开封、平顶山、漯河、鹤壁等 4 市较低,研究时段内豫南农业水土资源承载力逐渐下降、豫北和豫东逐渐增高。

(3) 对河南省农业水土资源承载力影响较大的因子主要有农作物受灾面积比例、本年度农林水利工程投资比例、废水处理率、农业水土资源匹配系数以及森林覆盖率。

参考文献:

- [1] 程国强,朱满德.新冠肺炎疫情冲击粮食安全:趋势、影响与应对[J].中国农村经济,2020(5):13-20.
- [2] 哈斯巴根,李百岁,宝音,等.区域土地资源人口承载力理论模型及实证研究[J].地理科学,2008,28(2):189-194.
- [3] 任守德,付强,王凯,等.基于 RAGA-PPPCA 模型的区域农业水土资源承载力综合评价[J].水土保持研究,2011,18(1):116-120.
- [4] 谢文明,于飞,冯晓宇,等.太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J].土壤,2014,46(4):613-617.
- [5] 陈郁,周琳,陈广燕.中国粮食总量需求 2030 年将达到峰值[N].中国经济时报,2016-12-01(5).
- [6] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90.

- [7] 岳晓燕,宋伶英.土地资源承载力研究方法的回顾与展望[J].水土保持研究,2008,15(1):254-257.
- [8] 任守德,付强,王凯.基于宏观尺度的三江平原区域农业水土资源承载力[J].农业工程学报,2011,27(2):8-14.
- [9] 王国强,毋黎明.河南省农业水土资源空间匹配格局对产能的影响[J].河南理工大学学报:自然科学版,2012,31(2):225-231.
- [10] 李慧,周维博,庄妍,等.延安市农业水土资源匹配及承载力[J].农业工程学报,2016,32(5):156-162.
- [11] 杨剑,丁玲玲,李新尧,等.基于熵权 TOPSIS 的湖北省农业水土资源承载力时空动态研究[J].土壤,2019,51(6):1246-1252.
- [12] 李明薇,陈伟强,鄢雨早,等.基于投影寻踪模型的河南省耕地生态安全评价[J].水土保持研究,2018,25(4):257-263,269.
- [13] 邓炯,高树青.河南省耕地后备资源现状与开发复垦分析[J].河南国土资源,2003(4):32-35.
- [14] 李乃强,徐贵阳.基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J].测绘通报,2020(4):106-110.
- [15] 文倩,孟天醒,鄢雨早.河南省农业水土资源时空分异与匹配格局[J].水土保持研究,2017,24(5):233-239.
- [16] 河南省统计局.河南统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.
- [17] 高超,程永政.“十二五”期间河南粮食发展的水土资源保障研究[J].中国农业资源与区划,2011,32(1):14-18.
- [18] 高明国.河南省耕地安全状况及综合性保护研究[J].创新科技,2017,17(4):18-20.
- [19] 杨娟,王帅,骆云中.基于主成分分析的河南省粮食产量影响因素研究[J].湖北农业科学,2017,56(13):2587-2592.

(上接第 332 页)

- [33] 葛玉娟,赵宇鸾,李秀彬.山区耕地细碎化对土地利用集约度影响:以贵州省亚鱼村为例[J].地理科学进展,2020,39(7):1095-1105.
- [34] 高阳,刘慧芳,毕如田,等.矿农复合区农户耕地利用集约度影响因素分析:以晋城市泽州县 22 个村为例[J].中国农业资源与区划,2018,39(1):131-139.
- [35] 张新焕,杨德刚,王昌燕,等.基于地块尺度的耕地集约利用与环境压力关系:以塔里木河流域 780 个地块为例[J].中国生态农业学报,2012,20(5):635-642.
- [36] 王秀圆,阎建忠.山区农户耕地利用集约度及其影响因素:以重庆市 12 个典型村为例[J].地理研究,2015,34(5):895-908.
- [37] 廖仕梅,刘卫平,魏朝富,等.基于 PSR 模型典型山区耕地

集约利用及其驱动力研究:以四川凉山彝族自治州为例[J].西南大学学报:自然科学版,2018,40(5):150-159.

- [38] 宋佳楠,金晓斌,周寅康.基于多层线性模型的耕地集约利用对粮食生产力贡献度分析:以内蒙古自治区为例[J].资源科学,2010,32(6):1161-1168.
- [39] 何坚坚,庞博,张鹏岩,等.耕地集约利用的变化、态势与驱动力分析:以河南省为例[J].河南大学学报:自然科学版,2018,48(4):404-414.
- [40] 邢璐平,方斌,向梦杰.基于 GWR 模型的江苏省耕地集约利用水平时空变化特征及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):376-386.
- [41] 宋利利,秦明周,陈瑜琦,等.基于县级面板数据的河南省耕地利用集约度区域差异及其影响因素[J].水土保持研究,2016,23(4):239-244.