

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.001.

赵晨光, 李鹏, 许焱涛, 等. 宁夏水土资源适宜性评价及时空分异的影响因子变化规律[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 432-440.

Zhao Chenguang, Li Peng, Xu Yaotao, et al. Suitability Evaluation of Water and Soil Resources and the Change Pattern of Influencing Factors of Spatial and Temporal Differentiation in Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 432-440.

# 宁夏水土资源适宜性评价及时空分异的影响因子变化规律

赵晨光<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1,2</sup>, 许焱涛<sup>1</sup>, 党小虎<sup>3</sup>, 张超雅<sup>1</sup>, 龚倪冰<sup>1</sup>

(1.西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2.旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048; 3.西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054)

**摘要:** [目的]揭示水土资源适宜性多体系综合评价对区域发展的贡献, 阐明宁夏地区水土资源协调发展的适宜性演变情况, 识别区域水土资源承载能力的影响因子。 [方法]通过构建宁夏资源-生态-社会-经济综合评价体系, 基于熵权 TOPSIS 模型、耦合协调度模型及灰色关联度模型, 评价了宁夏近 20 年(2001—2020 年)水土资源适宜性动态变化和协调发展水平, 并分析影响因子的变化规律。 [结果]宁夏水土资源适宜性呈现出从较差持续向好的发展态势, 目前为优质水平(0.883); 子体系之间的耦合协调程度由 2001 年的严重失调(0.159)上升至 2020 年的优质协调(0.946); 各子体系中对水土资源适宜性评价的关联度较高的是资源评价体系(0.729)和社会评价体系(0.721)。 [结论]子体系之间的协调发展反映出宁夏水土资源适宜性整体呈现向好态势, 未来需要更多关注资源和社会体系中的关键因子, 合理配置水土资源的开发利用。

**关键词:** 水土资源适宜性; 熵权 TOPSIS; 耦合协调度; 灰色关联度; 宁夏

**中图分类号:** F323.211; F323.213

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)06-0432-09

## Suitability Evaluation of Water and Soil Resources and the Change Pattern of Influencing Factors of Spatial and Temporal Differentiation in Ningxia

Zhao Chenguang<sup>1</sup>, Li Peng<sup>1,2</sup>, Xu Yaotao<sup>1</sup>, Dang Xiaohu<sup>3</sup>, Zhang Chaoya<sup>1</sup>, Gong Nibing<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.State Forestry Administration Key Laboratory of Eco-hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, Xi'an 710048, China; 3.College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** [Objective] This study reveals the contribution of multi-system comprehensive evaluation of water and soil suitability of water and soil resources to regional development, clarifies the suitability evolution of coordinated development of water and soil resources in Ningxia, and identifies the influence factors of regional carrying capacity of water and soil resources. [Methods] A comprehensive evaluation system of resources, ecology, and social economy in Ningxia was built up. An entropy weight TOPSIS model, a coupling coordination degree model and a gray correlation degree model were used to evaluate the dynamic changes and coordinated development of water and soil resources in Ningxia in the past 20 years (2001—2020) and analyze the change rules of influencing factors. [Results] The suitability of water and soil resources in Ningxia had a trend from poor to good level and is currently at a high-quality level (0.883). The degrees of coupling and coordination between the sub-systems had increased from a serious imbalance (0.159) in 2001 to a high-quality

收稿日期: 2022-07-25

修回日期: 2022-09-30

资助项目: 政府采购(GZ4-21-05-069/-ZC-F); 宁夏回族自治区水土保持监测总站宁夏流域水土保持生态-经济协同治理技术与发展模式研究(SBZZ-J-2021-13)

第一作者: 赵晨光(1998—), 女, 吉林松原人, 硕士研究生, 研究方向为水环境安全与治理。E-mail: zhao\_chenguang0117@163.com

通信作者: 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 主要从事旱区水文过程与生态响应关系研究。E-mail: lipeng74@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

coordination (0.946) in 2020. The resource evaluation system (0.729) had a higher correlation in the evaluation of the suitability of water and soil resources among the sub-systems and social evaluation system (0.721). [Conclusion] The coordinated development of sub-systems reflects the overall suitability of soil and water resources in Ningxia. In the future, more attention should be paid to the key factors in the social system, and the development and utilization of soil and water resources should be rationally allocated.

**Keywords:** suitability of soil and water resources; entropy weight TOPSIS; coupling coordination degree; grey correlation degree; Ningxia

水土资源是人类赖以生存的物质基础<sup>[1]</sup>,水土资源作为一个整体与经济社会相辅相成,共同影响着城市化的质量和发展<sup>[2]</sup>。水土资源适宜性主要关注:在自然或人类活动影响下,资源生态的演变与社会经济的进步是否协调,对水土资源开发利用现状进行客观评价,并根据经济社会的发展探求其影响因子的变化规律。

国际上最早进行水资源和土地资源同时评价是在1932年,Raup<sup>[3]</sup>指出扩张用地会导致在水资源供应方面存在不确定性。早期的研究多为概念框架建立和物理机制描述,目前国外学者们将RCC创新方法、耦合指数改进评价方法、结合速度特征等多种方法或角度利用起来,以研究与水土资源相关的复杂系统问题。国内学者在定量分析方面,通过构建基尼系数进行区域水土资源匹配状态评价方面的研究;定性分析方面则是从资源管理和政策制定的角度出发,阐明区域资源优化调控的战略意见。经过多方学科融合和发展,针对水土资源适应性的评价方法如熵权可拓物元模型、投影寻踪模型、改进的三维生态足迹模型等手段仍在不断优化,可以有针对性地对目标层、准则层的结果进行分析。熵权TOPSIS模型对样本数据没有限制,能较为精准地评价准则层或指标层间的优劣程度,同时可以避免主观因素的影响,有学者在土地利用绩效理论研究和方法改进上进行积极探索,为土地利用实践提供多方面的指导,进一步丰富土地利用评价研究<sup>[4]</sup>;通过耦合协调度模型整合多体系数据以应对复杂多线的体系网络结构,可以运用其与社会网络分析探究大流域尺度生态保护与经济高质量发展耦合协调联动效应和网络结构特征<sup>[5]</sup>;灰色关联度模型通过对数据进行相似度的对比分析,能够对后期水土资源的管理措施采取给予一定的指导作用。

宁夏属于西北部欠发达地区,由于生态资源禀赋和社会经济结构等方面的特殊性<sup>[6]</sup>,在全国生态安全战略格局中具有重要地位。因此,本文在生态文明建设背景下尝试结合3种数学物理模型,对宁夏水土资源适宜性评价体系和指标进行数据处理和分析,阐述在研究时段内宁夏水土资源协调发展情况并归纳其

影响因子,以期为宁夏生态建设与社会经济协调发展提供理论基础,从而引领全方位、多层次、宽领域的高质量发展。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

宁夏回族自治区地处我国黄河流域上游(北纬 $35^{\circ}14'$ — $39^{\circ}23'$ ,东经 $104^{\circ}17'$ — $107^{\circ}39'$ ),全区面积 $6.64$ 万 $\text{km}^2$ ,属于典型的大陆性气候,地势北低南高,海拔范围在 $956\sim 3\,525\text{ m}$ ;地形上从北向南分为三大板块,分别为北部引黄灌区、中部干旱带和南部山区<sup>[7]</sup>。全区中北部受腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙漠三面夹击,植被稀疏、沙化严重;南部沟壑纵横,水力侵蚀严重,是我国水土流失最为严重的省区之一<sup>[8]</sup>。全区跨3个气候区,从暖温带半湿润区至温带干旱区;气象上总体是干旱少雨,蒸发强烈,是全国水资源最少的省区之一。

### 1.2 数据来源

宁夏水土资源适宜性评价指标基础数据主要来源于《中国统计年鉴》《宁夏统计年鉴》《宁夏水资源公报》,选取2001—2020年共20 a作为研究时段。

## 2 研究方法

水土资源适宜性评价首先构建评价体系,选取合适的评价指标;根据熵权TOPSIS模型对评价指标进行数据处理,并结合权重评价水土资源适宜性动态变化;再应用耦合协调度模型分析协调发展水平;最后采用灰色关联度模型对准则层和指标层分别进行排序,针对与评价结果关联度较高的指标进行分时段整合。根据宁夏全区评价指标的灰色关联度排名,选取部分有代表性的指标进行市级水土资源适宜性评价和协调发展水平分析。

### 2.1 水土资源适宜性评价体系构建

“水土资源适宜性评价体系”涵盖资源、生态、社会、经济等诸多方面,是一个多维度的复杂系统。从资源角度,开发利用得越少,越有承载潜力;从生态角度,通过污染治理与防护,降低污染损失,推动高质量

的可持续发展;从社会角度,高质量的水土资源可以满足人类各种社会生活需求,从而提高人民的生活质量;从经济角度,追求低投入带来高收益;综合考虑上述4个角度对促进自然环境与经济社会的可持续发展具有重要意义。鉴于此,在构建水土资源适宜性评价指标体系过程中要考虑水土资源与生态、社会、经济之间的相互关系,在遵循指标体系建立的综合性、可比性、区域性等原则,满足指标的连续性和可获取性基础上,尽可能体现指标的系统性和多样性。

表1 水土资源适宜性评价指标体系及权重

Table 1 Index system and weight of water and soil resources suitability evaluation

目标层	准则层	指标层	指标代号	指标属性	指标层权重	准则层权重
水土资源 适宜性 评价体系 (A)	资源评价 体系(B <sub>1</sub> )	垦殖率(%)	C <sub>1</sub>	—	0.3299	0.1644
		农业用水比例(%)	C <sub>2</sub>	—	0.2624	
		水资源总量(亿 m <sup>3</sup> )	C <sub>3</sub>	+	0.2270	
		水资源利用效率(%)	C <sub>4</sub>	+	0.1169	
		农作物播种面积(万 hm <sup>2</sup> )	C <sub>5</sub>	+	0.0639	
	生态评价 体系(B <sub>2</sub> )	工业污染治理投资总额(万元)	C <sub>6</sub>	+	0.3253	0.2528
		生态用水(亿 m <sup>3</sup> )	C <sub>7</sub>	+	0.2311	
		工业废水排放总量(万 t)	C <sub>8</sub>	—	0.2055	
		城镇生活污水排放量(万 t)	C <sub>9</sub>	—	0.1629	
		自然保护区面积(万 hm <sup>2</sup> )	C <sub>10</sub>	+	0.0752	
	社会评价 体系(B <sub>3</sub> )	一次能源生产量(万 t 标准煤)	C <sub>11</sub>	+	0.2477	0.3096
		人口密度(人/hm <sup>2</sup> )	C <sub>12</sub>	—	0.2236	
		人口自然增长率(%)	C <sub>13</sub>	—	0.1947	
		城镇化率(%)	C <sub>14</sub>	+	0.1805	
		粮食产量(万 t)	C <sub>15</sub>	+	0.1535	
	经济评价 体系(B <sub>4</sub> )	经济密度(元/hm <sup>2</sup> )	C <sub>16</sub>	+	0.2662	0.2702
		人均 GDP(元)	C <sub>17</sub>	+	0.2501	
		单位 GDP 能耗(t 标准煤/万元)	C <sub>18</sub>	—	0.2101	
		单位 GDP 电耗[(kW·h)/万元]	C <sub>19</sub>	—	0.1860	
		第一产业 GDP 占比(%)	C <sub>20</sub>	—	0.0876	

## 2.2 基于熵权 TOPSIS 模型的指标权重及水平划分标准

熵权 TOPSIS 即利用选取的指标数据与计算所得权重相乘。TOPSIS 即为逼近于理想解的计算方法,其基本思想是通过确定决策标准的正理想解和负理想解,进而比较待评价方案与正、负理想解的距离远近;核心是运用熵值法进行子体系和各项指标权重(表1)的计算<sup>[10]</sup>。

首先对数据采用归一化进行标准化处理,公式如下:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

$$X_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

式中: $X_{ij}$ 为标准化后数据; $x_{ij}$ 为原数据。

本文研究时段为2001—2020年,选取共20个指标<sup>[9]</sup>。根据宁夏全区评价指标灰色关联度排序和社会发展基本情况,选取5个地级市在2005年、2010年、2015年、2020年的4个时期10个指标进行市级水土资源适宜性评价分析,分别为资源生态体系中 $C_3, C_4, C_5, C_8, C_9$ 和社会经济体系中 $C_{12}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{20}$ ,上述指标组成宁夏2001—2020年水土资源适宜性综合评价体系(表1),其中指标属性分为正向指标(+)和逆向指标(—)。

表1 水土资源适宜性评价指标体系及权重

Table 1 Index system and weight of water and soil resources suitability evaluation

目标层	准则层	指标层	指标代号	指标属性	指标层权重	准则层权重
水土资源 适宜性 评价体系 (A)	资源评价 体系(B <sub>1</sub> )	垦殖率(%)	C <sub>1</sub>	—	0.3299	0.1644
		农业用水比例(%)	C <sub>2</sub>	—	0.2624	
		水资源总量(亿 m <sup>3</sup> )	C <sub>3</sub>	+	0.2270	
		水资源利用效率(%)	C <sub>4</sub>	+	0.1169	
		农作物播种面积(万 hm <sup>2</sup> )	C <sub>5</sub>	+	0.0639	
	生态评价 体系(B <sub>2</sub> )	工业污染治理投资总额(万元)	C <sub>6</sub>	+	0.3253	0.2528
		生态用水(亿 m <sup>3</sup> )	C <sub>7</sub>	+	0.2311	
		工业废水排放总量(万 t)	C <sub>8</sub>	—	0.2055	
		城镇生活污水排放量(万 t)	C <sub>9</sub>	—	0.1629	
		自然保护区面积(万 hm <sup>2</sup> )	C <sub>10</sub>	+	0.0752	
	社会评价 体系(B <sub>3</sub> )	一次能源生产量(万 t 标准煤)	C <sub>11</sub>	+	0.2477	0.3096
		人口密度(人/hm <sup>2</sup> )	C <sub>12</sub>	—	0.2236	
		人口自然增长率(%)	C <sub>13</sub>	—	0.1947	
		城镇化率(%)	C <sub>14</sub>	+	0.1805	
		粮食产量(万 t)	C <sub>15</sub>	+	0.1535	
	经济评价 体系(B <sub>4</sub> )	经济密度(元/hm <sup>2</sup> )	C <sub>16</sub>	+	0.2662	0.2702
		人均 GDP(元)	C <sub>17</sub>	+	0.2501	
		单位 GDP 能耗(t 标准煤/万元)	C <sub>18</sub>	—	0.2101	
		单位 GDP 电耗[(kW·h)/万元]	C <sub>19</sub>	—	0.1860	
		第一产业 GDP 占比(%)	C <sub>20</sub>	—	0.0876	

计算得到加权决策矩阵:

$$V = X \cdot W = [v_{ij}]_{m \cdot n} \quad (3)$$

式中: $V$ 为加权决策矩阵; $X$ 为标准化数值; $W$ 为各项指标权重。

确定正、负理想解:

$$V^+ = \{\max V_{ij} | i = 1, 2, \dots, m\} = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_m^+\} \quad (4)$$

$$V^- = \{\min V_{ij} | i = 1, 2, \dots, m\} = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_m^-\} \quad (5)$$

式中: $V^+, V^-$ 分别为正负理想解。

计算正负理想解距离:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_i^+ - V_{ij})^2} \quad (6)$$

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

式中: $D_j^+$ 、 $D_j^-$  分别为距正负理想解的距离。  
得到的贴进度( $T_j$ )作为水土资源适宜性的评价价值,将水土资源适应性水平划分 4 个水平标准<sup>[11]</sup>(表 2)。

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-}$$
 (8)

表 2 水土资源适宜性水平划分标准  
Table 2 Criteria for judging land use performance

贴进度	水土资源适宜性水平
0~0.25	较差水平
>0.25~0.50	中级水平
>0.50~0.75	良好水平
>0.75~1.00	优质水平

2.3 水土资源耦合协调度模型与等级划分

运用耦合协调度模型分析水土资源适宜性 4 个子体系之间协调发展的水平,参考相关研究成果<sup>[12]</sup>,可以将水土资源适宜性 4 个子体系之间的耦合协调度分为 10 级程度(表 3)。

$$C = 4 \times \left[ \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4}{(T_1 + T_2 + T_3 + T_4)^4} \right]^{1/4}$$
 (9)

$$T = \beta_1 \cdot T_1 + \beta_2 \cdot T_2 + \beta_3 \cdot T_3 + \beta_4 \cdot T_4$$
 (10)

$$D = \sqrt{C \cdot T}$$
 (11)

式中: $C$  为耦合度值; $T$  为协调指数; $D$  为耦合协调度。其中  $T_1, T_2, T_3, T_4$  分别为资源、生态、社会和经济体系评价的贴进度; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  分别为资源、生态、社会和经济体系评价的权重。

表 3 水土资源适宜性资源-生态-社会-经济评价  
耦合协调度等级划分

Table 3 Water and soil resources suitability resource-ecological-social-economic evaluation coupling coordination degree type

耦合协调度 $D$ 值区间	协调等级	耦合协调程度
(0.0~0.1)	1	极度失调
[0.1~0.2)	2	严重失调
[0.2~0.3)	3	中度失调
[0.3~0.4)	4	轻度失调
[0.4~0.5)	5	濒临失调
[0.5~0.6)	6	勉强协调
[0.6~0.7)	7	初级协调
[0.7~0.8)	8	中级协调
[0.8~0.9)	9	良好协调
[0.9~1.0)	10	优质协调

2.4 水土资源灰色关联度模型

为了进行较优方案筛选,基于水土资源适宜性评价指标复杂、涵盖模糊的特点,本文采用灰色关联法

分别进行准则层和指标层对综合评价的关联度计算<sup>[13]</sup>,依据关联系数得到关联度  $R_i (i = 1, 2, \dots, m)$  判断单个年度与最优值的联系紧密程度,从而分析各体系指标对评价价值的影响<sup>[14]</sup>。

$$R_i = E_i \times W = [\epsilon_{i1} \quad \epsilon_{i2} \quad \dots \quad \epsilon_{in}] \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$
 (12)

式中: $E_i$  为关联系数行向量; $W$  为各子指标权重向量。

3 结果与分析

3.1 宁夏全区水土资源适宜性评价结果

3.1.1 宁夏全区水土资源适宜性综合评价分析 根据宁夏水土资源适宜性综合评价(图 1),2002 年水土资源适宜性评价价值最低(0.177),处于较差水平;2020 年达到最高值(0.883),达到优质水平。总体来看,宁夏水土资源适宜性评价自 2001—2020 年经历了从较差水平—中等水平—良好水平—优质水平共 4 个阶段。结合宁夏社会经济发展阶段特征,可以按照 5 a 为时间段进行划分,分 4 个时段对宁夏水土资源适宜性评价进行综合分析。

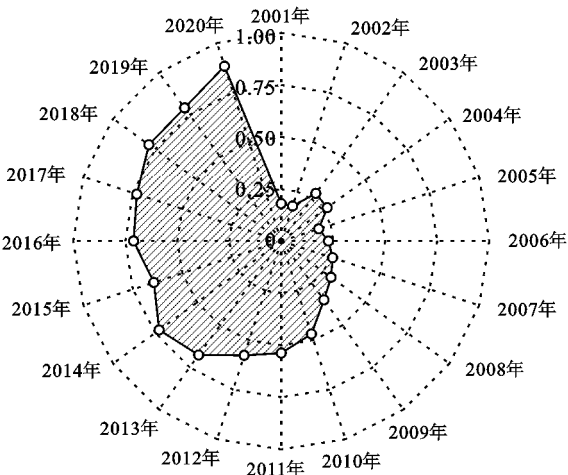


图 1 宁夏水土资源适宜性综合评价

Fig. 1 Comprehensive evaluation on the suitability of water and soil resources in Ningxia

2001—2005 年,宁夏水土资源适宜性的综合评价有小幅波动,基本处于较差水平(0.177~0.283)。刚刚进入 21 世纪,资源开发和经济发展的双向失衡无法满足整体协调发展的脚步,对经济发展投入大量的社会关注和资金支持,一定程度上忽略了资源生态的社会经济价值。2006—2010 年,综合评价保持稳定增长,处于中等水平(0.227~0.469)。这一阶段,宁夏大力推进城市化,带来不同程度上不可忽视的环境污染和生态破坏问题,水土资源开发利用和社会经济的矛盾显



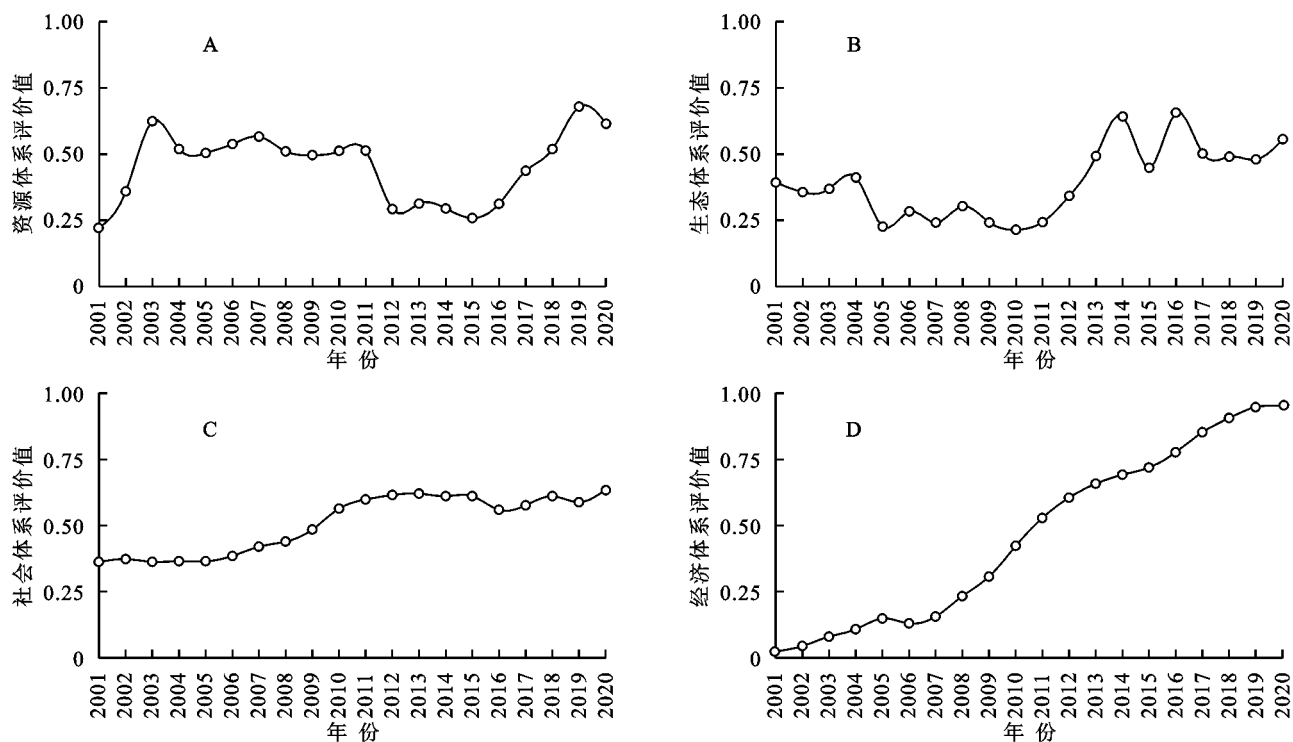
现出来,这些因素共同作用下限制了宁夏水土资源适宜性综合评价的进一步提升。2011—2015年,宁夏水土资源适宜性得到迅速发展,等级普遍达到良好水平(0.538~0.726)。该阶段宁夏水土资源利用日趋合理,水土资源和社会经济发展的关系日益协调,促进土地资源可持续发展能力持续提高。2016—2020年,宁夏水土资源适宜性综合评价在这一阶段基本达到优质水平(0.710~0.883)。综合以上发展趋势,宁夏在未来继续落实绿色发展理念,可以实现更高质量、更有效率、更可持续的发展。

### 3.1.2 宁夏全区水土资源适宜性子体系评价分析

从宁夏水土资源适宜性评价子体系(资源、生态、社会、经济体系)评价结果(图2)来看,4个子体系的评价变化趋势存在一定的差异。其中2001—2003年,资源体系评价快速上升达到良好水平(0.624),随后进入平台期再降为中级水平,直到2015年又开始重新增长,2019年达到最高值(0.679)。生态体系评价

在2000—2011年处于波动的较差水平,在2010年出现最低值(0.214),2013年起增长呈现较起伏的良好水平,2016年达到最高值(0.656)。社会体系评价在2001—2009年缓慢增长保持在中级水平,随后2010年起保持的良好水平,2020年达到最高值(0.634)。变化趋势最明显的是经济体系评价,在2001—2020年总体上呈稳定增长趋势,由时段初的0.024上升至时段末的0.951,从较差水平提升至优质水平,这一时期人均GDP和经济密度逐年攀升,且第一产业GDP占比逐年减少,由时段初的0.024上升至时段末的0.951,从较差水平提升至优质水平。

综合来看,虽然在研究时段内各子体系的评价水平都在发生变化,但到研究时段末期都可以达到良好水平及以上,这说明近年来宁夏全区整体的水土资源适宜性不断优化,4个子体系各自的评价情况与综合评价的结果有必然的关联性,子体系评价结果的变动与综合评价持续向好的发展结果相匹配。



注:0~0.25 为较差水平;0.25~0.5 为中等水平;0.50~0.75 为良好水平;0.75~1.00 为优质水平。

图2 2001—2020年宁夏水土资源适宜性的资源、生态、社会、经济体系评价

Fig. 2 Resource, ecological, social and economic system evaluation of the suitability of water and soil resources in Ningxia from 2001 to 2020

3.1.3 宁夏市级水土资源适宜性综合评价分析 根据各市2005年、2010年、2015年、2020年的资源生态-社会经济体系综合评价值变化(图3),可以看出,各市的水土资源适宜性评价水平整体趋势向好,这与宁夏全区的综合评价水平基本一致。其中,银川市一度从中等水平发展至良好水平又降回中等水平,这是由于伴随着城镇化的推进,降雨量较少,加之银川的能源消耗水平较

高,对生态环境的影响较大;石嘴山市和中卫市从2005年的良好水平退化到中等水平,之后呈回升态势;吴忠市和固原市从中等水平发展到良好水平。2010年,各市发展水平基本和宁夏全区整体相适应,略有波动但整体还算平稳向好发展。至2020年,银川市(0.435)、石嘴山市(0.486)和中卫市(0.464)处于中等水平,吴忠市(0.620)和固原市(0.686)处于良好水平。

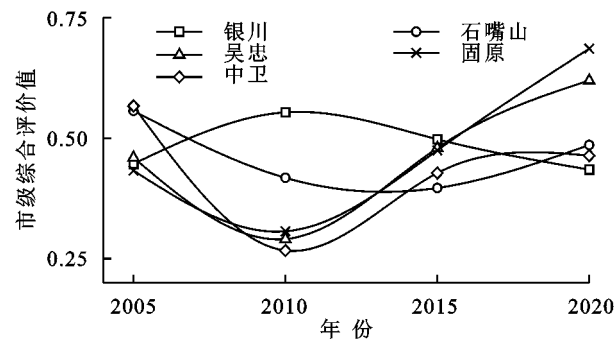


图 3 市级水土资源适宜性综合评价

Fig. 3 Comprehensive evaluation of the suitability of municipal water and soil resources

3.2 宁夏全区及市级水土资源适宜性体系耦合协调度结果

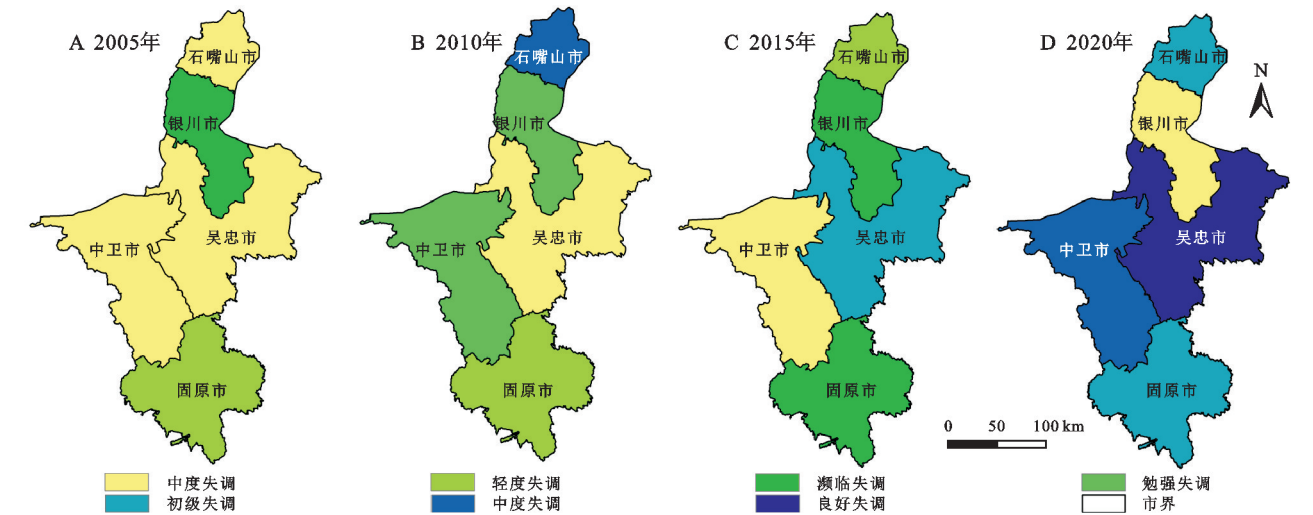
3.2.1 宁夏全区水土资源适宜性体系耦合协调度分析 根据 2001—2020 年宁夏水土资源适宜性的资源-生态-社会-经济体系评价价值计算耦合协调度,并进行等级划分(表 4)。总体来看,2001—2020 年宁夏水土资源适宜性的资源-生态-社会-经济评价 4 个子体系间的耦合协调程度逐年提高,由 2001 年的严重失调优化至 2020 年的优质协调,并在 2013—2020 年连续保持中级协调及更好的协调状态,说明各个阶段的相关政策都得到了有效实施。同时,耦合协调度和协调指数也表现为逐年增大,进一步印证了前文宁夏水土资源适宜性综合评价分析结果。其中,2005 年和 2010 年出现耦合协调等级降低的情况,这是由于在评价体系中,这两个年份的生态体系评价都处在较差水平,且同期的其他子体系仅仅保持在中等水平左右,未能很好中和生态体系中有关评价指标的不足。

3.2.2 宁夏市级水土资源适宜性体系耦合协调度分析 根据市级耦合协调度结果(图 4)可以看出,宁夏

城市的水土资源协调等级总体上与宁夏全区评价协调等级演变规律相适应,最大跨度从中度失调发展到良好协调。其中,银川市作为宁夏首府,社会发展比较突出,研究时段内有所波动到 2020 年降至中度失调,是唯一适宜性协调发展不佳的城市;石嘴山市同样在 2010 年度经历最好协调程度为中度协调,至 2020 年再次回升至初级协调;吴忠市、固原市、中卫市随时间推进都呈发展向好趋势。

表 4 宁夏水土资源适宜性体系耦合协调度(2001—2020 年)

Table 4 Coupling coordination degree of water and soil resources suitability system in Ningxia (2001—2020)					
年份	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调度 D 值	协调 等级	耦合协调 程度
2001	0.232	0.109	0.159	2	严重失调
2002	0.623	0.177	0.332	4	轻度失调
2003	0.371	0.326	0.348	4	轻度失调
2004	0.492	0.302	0.386	4	轻度失调
2005	0.425	0.203	0.294	3	中度失调
2006	0.705	0.266	0.433	5	濒临失调
2007	0.685	0.296	0.450	5	濒临失调
2008	0.901	0.338	0.552	6	勉强协调
2009	0.774	0.357	0.526	6	勉强协调
2010	0.468	0.453	0.460	5	濒临失调
2011	0.730	0.528	0.621	7	初级协调
2012	0.811	0.500	0.637	7	初级协调
2013	0.874	0.613	0.732	8	中级协调
2014	0.824	0.687	0.752	8	中级协调
2015	0.741	0.567	0.648	7	初级协调
2016	0.860	0.679	0.764	8	中级协调
2017	0.973	0.696	0.823	9	良好协调
2018	0.982	0.780	0.875	9	良好协调
2019	0.981	0.850	0.913	10	优质协调
2020	0.994	0.900	0.946	10	优质协调



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)3266 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 4 市级水土资源适宜性耦合协调度

Fig. 4 City-level coupling coordination degree of water and soil resources suitability system

### 3.3 宁夏水土资源适宜性评价影响体系及影响因子

3.3.1 准则层灰色关联度排序 在上文分析评价宁夏水土资源适宜性动态变化和4个子体系之间的耦合协调性基础上,通过灰色关联法得到宁夏水土资源适宜性综合评价水平影响体系和影响因子的排序,找出可持续发展潜力突出的体系与因子。

根据关联度数值大小,将4个子体系进行排序(表5),可以看出20a的研究期内,资源-生态-社会-经济综合体系中各子体系对水土资源适宜性关联度的数值相对接近,其中资源体系和社会体系对水土资源适宜性综合评价关联度较高且接近,说明自然资源禀赋与社会活动开发消耗相互制约,人类的社会行为及其在生态环保上的建设与应用对水土资源体系都会产生不容忽视的影响。

表5 宁夏水土资源适宜性评价子体系灰色关联度排序

Table 5 Evaluation suitability of water and soil resources in Ningxia index grey relational degree ranking

评价体系	关联度	排名
资源评价体系	0.729	1
社会评价体系	0.721	2
经济评价体系	0.640	3
生态评价体系	0.600	4

从子评价体系2001—2020年灰色关联度热点图(图5)可以看出,在研究时段初期,资源评价体系(0.953)和生态评价体系(1.000)的关联度相对突出,说明宁夏在处于实现全面建成小康社会的建设过程中在资源利用与生态环境保护方面都有所局限;2009年起,社会评价体系(0.746)开始占据突出位置,城镇化的持续推进带动当地经济快速发展;2015年起,经济评价体系(0.727)对综合评价的关联也越来越明显,之后资源评价体系(0.593)与生态评价体系(0.533)也再次显现

表6 宁夏水土资源适宜性评价指标分时段灰色关联度排序

Table 6 Evaluation suitability of water and soil resources in Ningxia index ranking by period of grey correlation

排名	2001—2005年		2006—2010年		2011—2015年		2016—2020年		2001—2020年	
	评价项	关联度	评价项	关联度	评价项	关联度	评价项	关联度	评价项	关联度
1	$C_8$	0.754	$C_{10}$	0.857	$C_{15}$	0.720	$C_9$	0.765	$C_{10}$	0.873
2	$C_1$	0.719	$C_5$	0.801	$C_2$	0.699	$C_2$	0.758	$C_5$	0.718
3	$C_{10}$	0.705	$C_4$	0.682	$C_{17}$	0.670	$C_{10}$	0.668	$C_{18}$	0.652
4	$C_{11}$	0.654	$C_{20}$	0.670	$C_{18}$	0.660	$C_{19}$	0.647	$C_{20}$	0.651
5	$C_{13}$	0.653	$C_3$	0.616	$C_8$	0.645	$C_{17}$	0.630	$C_{19}$	0.633

可以看出,2001—2005年,工业废水排放量( $C_8$ )与垦殖率( $C_1$ )对水土资源适宜性综合评价具有明显关联性;2006—2010年,自然保护区面积( $C_{10}$ )与农作物播种面积( $C_5$ )的关联度上升,与前一研究时段的指标也相适应;2011—2015年,随着经济的发展,社会评价体系中粮食产量( $C_{15}$ )逐渐与水土资源适宜性整体协调发展有密

切关联,工业废水排放量( $C_8$ )再次凸显;2016—2020年,在水土资源合理开发利用和生态环境不断改善的大环境下,城镇生活污水排放量( $C_9$ )和农业用水量( $C_2$ )对水土资源适宜性的关联明显,宁夏更多关注在水土资源可持续开发和经济社会发展的协同推进,从评价结果看已经取得一定程度的进展。

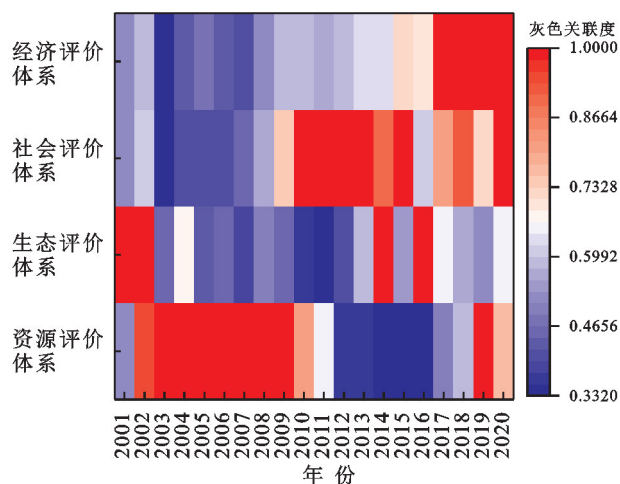


图5 子评价体系灰色关联度热点图(2001—2020年)

Fig. 5 Heat map of grey relational degree of evaluation subsystems (2001–2020)

3.3.2 分时段指标层灰色关联度排序 通过灰色关联度模型分4个时段2001—2005年、2006—2010年、2011—2015年、2016—2020年应用于评价指标,得到影响宁夏水土资源适宜性综合水平的评价指标排序前五名(表6),在时间尺度上对比并评价宁夏水土资源适宜性综合水平。

可以看出,2001—2005年,工业废水排放量( $C_8$ )与垦殖率( $C_1$ )对水土资源适宜性综合评价具有明显关联性;2006—2010年,自然保护区面积( $C_{10}$ )与农作物播种面积( $C_5$ )的关联度上升,与前一研究时段的指标也相适应;2011—2015年,随着经济的发展,社会评价体系中粮食产量( $C_{15}$ )逐渐与水土资源适宜性整体协调发展有密切关联,工业废水排放量( $C_8$ )再次凸显;2016—2020年,在水土资源合理开发利用和生态环境不断改善的大环境下,城镇生活污水排放量( $C_9$ )和农业用水量( $C_2$ )对水土资源适宜性的关联明显,宁夏更多关注在水土资源可持续开发和经济社会发展的协同推进,从评价结果看已经取得一定程度的进展。



总体而言,在 20 a 的研究期内,自然保护区面积( $C_{10}$ )与农作物播种面积( $C_5$ )对宁夏水土资源适宜性有着显著的关联影响,这说明宁夏自然资源禀赋限制突出;单位 GDP 能耗( $C_{18}$ )和单位 GDP 电耗( $C_{19}$ )的关联度逐渐增加,说明经济产业的改革与升级对水土资源适宜性有明显作用。整体来看,经济评价体系中的指标关联度较高,这与前文经济体系评价增长趋势稳定相一致,说明宁夏在 20 年间始终坚持经济发展,努力推动社会进步,在此基础上不断对资源生态等方面给予关注与扶持,综合配置水土资源,坚定不移走绿色低碳发展道路,积极突破资源局限性,促进各个体系间不断协同发展以推动整体进步。

为探求宁夏生态保护和高质量发展的理论依据,本研究对于分时空对宁夏水土资源适宜性动态变化及其与社会经济协调发展进行梳理工作,可为实现兼顾经济发展和生态保护建设提供决策基础。当前条件下,宁夏想要进一步实现高质量发展,就要持续推动经济产业结构变革与生态环境禀赋相协调,此外,持续开展多时段、多时空尺度生态资源禀赋与社会经济要素耦合关系研究,有助于进一步提升研究发现的科学性和应用性<sup>[15]</sup>。

## 4 结论

(1) 基于熵权 TOPSIS 模型评估宁夏 2001—2020 年 20 a 间水土资源适宜性综合评价,结果表明,宁夏水土资源适宜性综合评价总体上经历了从较差水平—中等水平—良好水平—优质水平的变化过程。

(2) 从耦合协调度角度来看,2001—2020 年宁夏水土资源适宜性的资源-生态-社会-经济评价 4 个子体系间的耦合协调度逐年上升,由严重失调(0.159)上升至优质协调(0.946)。下沉到地级市尺度进行评价,市级耦合协调程度整体与全区协调发展相适应,其中银川市经历波动有待继续向好发展,发展跨度最大的是吴忠市。

(3) 基于灰色关联法分析发现,各子体系对水土资源适宜性评价关联度大小排名为资源评价体系>社会评价体系>经济评价体系>生态评价体系。现阶段,应该更多地关注自然保护区面积、农业用水比例、单位 GDP 能耗、单位 GDP 电耗、人均 GDP 等指标。

### 参考文献:

[1] 刘晶,鲍振鑫,刘翠善,等.国内外区域水土资源匹配研究综述[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2019,40(6):20-24,74.

Liu J, Bao Z X, Liu C S, et al. Review of the study on the matching of regional land and water resources at home and abroad[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2019, 40(6): 20-24, 74.

[2] 吕添贵.水土资源综合承载力评价与调控机制研究:以贵阳市为例[D].杭州:浙江大学,2015.

Lv T G. Research on Comprehensive Evaluation of Land-water Resources Carrying Capacity and Its Regulations Mechanism: A Case Study of Guiyang City[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[3] Raup H F. Land use and water supply problems in southern California: The case of the Perris Valley[J]. Geographical Review, 1932, 22(2): 270-278.

[4] 李灿,张凤荣,朱泰峰,等.基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J].农业工程学报,2013,29(5):217-227.

Li C, Zhang F R, Zhu T F, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 217-227.

[5] 张伟丽,王伊斌,李金晓,等.黄河流域生态保护与高质量发展耦合协调网络分析[J].生态经济,2022,38(10):179-189.

Zhang W L, Wang Y C, Li J X, et al. Coupling coordination network analysis of ecological protection and high-quality economic development in the Yellow River Basin[J]. Ecological Economy, 2022, 38(10): 179-189.

[6] 张淑东.宁夏经济开放度的评价与对策研究[J].商讯,2021,256(30):5-8.

Zhang S D. Evaluation and countermeasures of economic openness in Ningxia[J]. Business News, 2021, 256(30): 5-8.

[7] 程静,黄越.宁夏回族自治区生态系统服务价值时空演变及其驱动力[J].水土保持研究,2021,28(2):382-389.

Cheng J, Huang Y. Spatiotemporal evolution of ecosystem services value and its driving forces in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 382-389.

[8] 李真朴,岳自慧,刘平,等.宁夏新时期水土保持生态建设总体思路[J].中国水土保持,2020,456(3):54-56.

Li Z P, Yue Z H, Liu P, et al. General idea on soil and water conservation ecological construction of Ningxia in the new period[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020, 456(3): 54-56.

[9] 文倩,孙江涛,范利瑶,等.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[J].水土保持



- 持研究,2022,29(1):333-338.
- Wen Q, Sun J T, Fan L Y, et al. Evaluation of agricultural soil-water resources carrying capacity (ASWCC) and relation analysis based on entropy weight TOPSIS in Henan Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022, 29(1): 333-338.
- [10] 连海东, 牟舵, 张硕, 等. 基于组合权 TOPSIS 数学模型的地表水水质评价[J]. 人民珠江, 2021, 42(8): 85-92.
- Lian H D, Mou D, Zhang S, et al. Evaluation of surface water quality based on combined Weight-TOPSIS mathematical model[J]. Pearl River, 2021, 42(8): 85-92.
- [11] 雷勋平, Qiu R, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.
- Lei X P, Qiu R, Liu Y. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 243-253.
- [12] 舒小林, 高应蓓, 张元霞, 等. 旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(3): 82-90.
- Shu X L, Gao Y B, Zhang Y X, et al. Study on the coupling relationship coordinative development between tourism industry and eco-civilization city [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(3): 82-90.
- [13] 赵俊. 塔里木河流域农业经济发展的多维度分析: 基于灰色关联度模型[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(9): 176-179.
- Zhao J. Multidimensional analysis of agricultural economic development in Tarim River Basin: Based on grey relational analysis [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(9): 176-179.
- [14] 李斌, 古丽娜尔·吐尔孙, 张志刚, 等. 24 个白蜡品种(系)生长及光合适应性灰色关联度评价[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(2): 219-226.
- Li B, Gulinaer T E S, Zhang Z G, et al. Evaluation of gay correlation degree on the growth and photosynthetic adaptability of 24 *Fraxinus* varieties (lines) [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(2): 219-226.
- [15] 吕荣芳. 宁夏沿黄城市带生态系统服务时空权衡关系及其驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- LV R F. Spatial-temporal Associations Among Ecosystem Services and Their Driving Mechanisms: A Case Study in the City Belt Along the Yellow River in Ningxia [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- ~~~~~
- (上接第 431 页)
- [29] Gong J, Cao E J, Xie Y C, et al. Integrating ecosystem services and landscape ecological risk into adaptive management: Insights from a western mountain-basin area, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281(5): 11-18.
- [30] 陈昭, 罗小波, 高阳华, 等. 基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1051-1060.
- Chen Z, Luo X B, Gao Y H, et al. Modeling and multi-scale analysis of the spatial heterogeneity of land surface temperature in Chongqing based on semi-variogram [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(7): 1051-1060.
- [31] 梅志雄, 徐颂军, 欧阳军. 珠三角县域城市潜力的空间集聚演化及影响因素[J]. 地理研究, 2014, 33(2): 296-309.
- Mei Z X, Xu S J, Ouyang J. Spatial agglomeration pattern evolvement and its influencing factors of urban potential at county level in the Pearl River Delta [J]. Geographical Research, 2014, 33(2): 296-309.
- [32] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1242-1252.
- Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1242-1252.