

# 基于可持续发展目标的云南省临沧市水—食物—能源—生态环境耦合协调及影响因素分析

邹永娜<sup>1</sup>, 程清平<sup>1,2,3</sup>, 任钊潼<sup>1</sup>, 金韩宇<sup>1</sup>

[1.西南林业大学 地理与生态旅游学院, 云南 昆明 650224; 2.国家林业和草原局 西南生态文明研究中心, 云南 昆明 650224; 3.云南大学 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091]

**摘要:** [目的] 评估云南省临沧市水—食物—能源—生态环境(WFEEc)耦合协调发展水平, 构建以可持续发展目标(SDGs)指标为切入点的临沧市 WFEEc 耦合协调发展评价指标体系, 为边疆多民族欠发达地区实现 WFEEc 的耦合协调发展提供借鉴。[方法] 基于压力、状态、影响、响应 4 个特征层构建 SDGs 指标体系以评估现阶段 WFEEc 耦合协调水平, 同时采用障碍度模型、多元逐步回归分析等揭示 WFEEc 耦合协调发展的影响因素。[结果] ①2010—2020 年临沧市 8 个县区 WFEEc 耦合协调水平表现为上升趋势, 由一般协调向良好协调转变(临沧市整体耦合协调度在 0.51~0.63 之间波动), 空间异质性明显。②研究期内临沧市主要障碍因子逐渐减少, 但能源子系统障碍度横贯始终, 且逐年增大。③临翔区国家财政性教育经费、镇康县非私营单位在岗职工平均工资, 凤庆、沧源县人均 GDP 值, 永德、双江县城镇化率, 云县人均 GDP 值、水资源量、污水处理厂集中处理率及国家财政性教育经费, 耿马县城镇化率、水资源量是阻碍 WFEEc 耦合协调的主要因子。[结论] 2010—2020 年临沧市 WFEEc 耦合协调度逐渐提高, 但耦合协调度值仍较低。各县区仍需积极落实相关针对性措施来不断优化提升 WFEEc 耦合协调发展水平, 同时应将一个县区一个特色产业发展模式稳步落实且逐步提升, 使临沧市可持续发展创新示范区创新驱动发展能力稳步增强。

**关键词:** 耦合协调度; 障碍度; 可持续发展; 国家可持续发展创新示范区; 云南省临沧市

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2023)03-0185-11

**中图分类号:** P963, F124.5

**文献参数:** 邹永娜, 程清平, 任钊潼, 等. 基于可持续发展目标的云南省临沧市水—食物—能源—生态环境耦合协调及影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3):185-195. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.023; Zou Yongna, Cheng Qingping, Ren Yitong, et al. Analysis of water-food-energy-ecological-environment coupling coordination and influencing factors at Lincang City of Yunnan Province based on sustainable development goals [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3):185-195.

## Analysis of Water-Food-Energy-Ecological-Environment Coupling Coordination and Influencing Factors at Lincang City of Yunnan Province Based on Sustainable Development Goals

Zou Yongna<sup>1</sup>, Cheng Qingping<sup>1,2,3</sup>, Ren Yitong<sup>1</sup>, Jin Hanyu<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming,

Yunnan 650224, China; 2. Southwest Ecological Civilization Research Center of the State

Forestry and Grassland Administration, Kunming, Yunnan 650224, China; 3. Yunnan Key Lab of

International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China)

**Abstract:** [Objective] The coupling and coordinated development level of water-food-energy-ecological environment (WFEEc) at Lincang City, Yunnan Province was evaluated and an evaluation index system of WFEEc coupling and coordinated development at Lincang City with a sustainable development goal (SDGs) index as the entry point was constructed in order to provide a reference for realizing the coupling and coordinated development of WFEEc in multi-ethnic underdeveloped border areas. [Methods] Based on the

收稿日期: 2022-08-11

修回日期: 2022-10-22

资助项目: 国家重点研发计划课题“城市人居环境可持续发展综合评估与应用示范”(2022YFC3800705); 云南省农业联合专项面上项目(202301BD070001-093)

第一作者: 邹永娜(1998—), 女(汉族), 云南省大理市人, 硕士研究生, 主要从事区域可持续发展目标耦合协调研究。Email: zouyongna@126.com。

通信作者: 程清平(1987—), 男(汉族), 云南省昭通市人, 博士, 讲师, 主要从事区域可持续发展目标耦合协调研究。Email: qchengtyli@foxmail.com。

four characteristic layers of “pressure, state, influence, and response”, an SDGs index system was constructed to evaluate the WFEEc coupling and coordination level at this stage. At the same time, a barriers model and multiple stepwise regression analysis were used to reveal the influencing factors of WFEEc coupling and coordination development. [Results] ① From 2010 to 2020, the WFEEc coupling coordination level of eight counties and districts at Lincang City showed an upward trend, from general coordination to good coordination (the overall coupling coordination degree of Lincang City fluctuated between 0.51 and 0.63), with obvious spatial heterogeneity. ② During the study period, the main obstacle factors of Lincang City gradually decreased, but the obstacle degree of the energy subsystem always crossed and increased year by year. ③ The main factors hindering WFEEc coupling and coordination were the national financial education funds of Linxiang District, the average wages of non-private employees at Zhenkang County, the per capita GDP of Fengqing County and Cangyuan County, the urbanization rate of Yongde County and Shuangjiang County, the per capita GDP of Yunxian County, the water resources, the centralized treatment rate of the sewage treatment plant, the national financial education funds, and the urbanization rate and water resources of Gengma County. [Conclusion] From 2010 to 2020, the coupling coordination degree of WFEEc at Lincang City had gradually improved, but the value of coupling coordination degree was still low. All counties and districts still need to actively implement and take relevant targeted measures to continuously optimize relevant policies and measures that promote WFEEc coupling and coordinated development level of all counties and districts, while strongly promoting the steady implementation and gradual improvement of policies for the development model of one characteristic industry at a county. The sustainable development and innovation driven development capacity of the Lincang Sustainable Development and Innovation Demonstration Zone has been steadily enhanced. This enhancement will play an increasingly important demonstration role as it radiates its influence in driving construction at the Lincang National Sustainable Development Innovation Demonstration Zone and WFEEc coupling and coordinated development in similar border areas.

**Keywords:** coupled co-scheduling; obstacle degree; sustainable development; national sustainable development innovation demonstration zone; Lincang City, Yunnan Province

水—食物—能源安全问题已成为全球三大风险源之一,是影响全球社会稳定和经济发展的关键因素<sup>[1]</sup>,亦是实现联合国 2030 年可持续发展目标(SDGs)的核心内容<sup>[2]</sup>,尤其是水(SDG6)—食物(SDG2)—能源(SDG7)—生态环境(SDG15)(WFEEc)的耦合系协调发展是实现联合国可持续发展目标(SDG)和美丽中国建设的关键所在。目前,人口急剧增长、水资源短缺、食物安全和能源枯竭等问题日益突出,不仅给 WFEEc 带来严峻挑战,同时也给生态带来前所未有的压力,严重威胁着人类的可持续发展。因此提升 WFEEc 耦合协调发展水平,成为各国政府和学界共同关注的焦点问题<sup>[3-4]</sup>。目前,聚焦水—食物—能源(WFE)相关论文<sup>[5-8]</sup>汗牛充栋。但大多未考虑可持续发展目标<sup>[5,9]</sup>,也有研究基于 SDGs 来探究 WFE 之间复杂的关系却未考虑驱动因素<sup>[10]</sup>。大多研究主要采用综合指标评价法<sup>[5]</sup>、投入产出法<sup>[6]</sup>、哈肯模型<sup>[11]</sup>、生态网络分析法<sup>[12]</sup>、生命周期分析法<sup>[8]</sup>、系统动力学模型<sup>[13]</sup>、水足迹<sup>[14]</sup>、集成非精确多目标优化方法<sup>[8,15]</sup>、决策框架<sup>[8,15]</sup>等解析 WFE 耦合关联的当前和未来发展趋势。

除聚焦 WFE 三者的耦合研究外,随着研究广度和深度的不断发展,WFE 3 要素以及其他多要素的耦合协同发展研究取得了较大突破。如例,水—能—碳耦合<sup>[16]</sup>,土地利用变化对 WFE 耦合协调度的影响<sup>[17]</sup>,水—气候—食物<sup>[18]</sup>,水—能源—食物—生态<sup>[19]</sup>,水—食物—能源—环境<sup>[20]</sup>,陆地—水—食物—环境<sup>[21]</sup>,水—食物—能源—经济<sup>[22]</sup>,水—食物—能源—经济—社会—环境等<sup>[23]</sup>。

目前,聚焦多个 SDGs 耦合协调潜力及综合评估研究也逐渐兴起。如 Zhao Zhongxu 等<sup>[24]</sup>基于 SDG 揭示了中国省级城市化与公共服务的可持续性,Qian Xiangyuan 等<sup>[25]</sup>从中国省级尺度视角探究了水—能源—食物(WFE)可持续与资源管理相关关系,Hao Lingang 等<sup>[26]</sup>发现影响亚洲 5 个中心城市 WFE 的相关因素等,然以国家可持续发展创新示范区尤其是边疆多民族欠发达地区为对象辨识“水—食物—能源—生态环境”耦合协调的相关研究尚未报道。云南省临沧市作为第二批国家可持续发展创新示范区中唯一一个边疆多民族欠发达地区,构建以 SDG 指标为切入点的临沧市 WFEEc 耦合协调发展评价指标体系,拟

主要解决 2010—2020 年临沧市及各县区“水—食物—能源—生态环境”是否处于耦合协调发展阶段及各县区影响耦合协调度的因素如何变化这一科学问题。并根据相关结果提出针对性建议措施,预期能为边疆多民族欠发达地区实现 WFEEc 的耦合协同发展提供借鉴,亦将为落实 2030 年可持续发展议程和美丽中国建设提供理论参考。

## 1 研究区概况

临沧市位于云南省西南部(图 1),是 2019 年获批的 6 个国家可持续发展创新示范区中唯一一个边疆多民族欠发达地区。地处澜沧江和怒江之间,水资源极其丰富,是云南省“西电东送”的战略基地。全年平均温度 14~26 °C,降水充足,年均降水量在 920~1 750 mm,由其独特的地形与气候条件形成了历史悠久的农业区域和极具特色的种植结构,粮食作物主要以水稻、玉米、小麦、大豆为主。

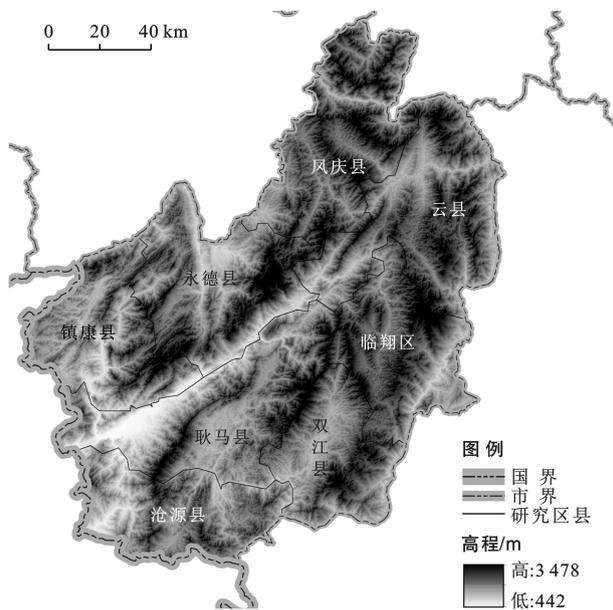


图 1 临沧示范区地形图(审图号:GS(2019)1823 号)

Fig.1 Topographic diagram of Lincang Demonstration area (Drawing review number: GS (2019) No. 1823)

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

临沧市 2010—2020 年自然与社会经济数据基于中科院战略先导项目课题组与临沧市科技局共同支持下,分别于 2021 年 4 月、2022 年 1 月、5 月与各县区相应部门对接收集,数据来源包括《临沧市统计年鉴》《临沧市领导干部工作手册》《临沧市水资源公报》《临沧市环境公报》《临沧市农业综合年报》等报表及临沧市和各县区生态环境局、住建局、农业农村局、自然资源局等收集的相关数据,数据质量严格把关。

### 2.2 方法

2.2.1 水—食物—能源—生态环境指标体系构建 科学合理的评价指标体系是准确评价 WFEEc 耦合协调发展的前提。在综合考虑 WFEEc 耦合协调作用机理的基础上,参考赵荣钦等<sup>[16]</sup>、王勇等<sup>[17]</sup>、Duan 等<sup>[18]</sup>研究,遵循科学性、系统性、全面性、真实性原则,对水资源、食物、能源、生态环境 4 个子系统从“压力、状态、影响、响应”4 个维度构建临沧市 WFEEc 耦合协调发展评价指标体系。

首先将数据进行极差标准化处理,之后用熵权法确定 46 个评价指标权重。临沧市 WFEEc 耦合协调度评价指标体系及各指标权重计算结果详见表 1。

2.2.2 综合评价模型 根据相关研究成果<sup>[5]</sup>,结合水资源、食物、能源、生态环境的特征,构建 WFEEc 的综合评价模型,即:

$$W_w = \sum_{i=1}^n a_i w_i; F_f = \sum_{i=1}^n b_i f_i; E_e = \sum_{i=1}^n c_i e_i; Ec_{ec} = \sum_{i=1}^n d_i ec_i \quad (1)$$

式中: $W_w, F_f, E_e, Ec_{ec}$  为水资源、食物、能源和生态环境子系统的综合评价指数; $a_i, b_i, c_i, d_i$  分别为各子系统评价指标的权重; $w_i, f_i, e_i, ec_i$  分别为各子系统评价指标的无量纲化数值。

2.2.3 耦合度与耦合协调度模型 耦合度的计算要借鉴物理学中的容量耦合概念和容量耦合系数模型,构建 WFEEc 耦合度模型:

$$C = \sqrt[4]{\frac{W_w F_f E_e Ec_{ec}}{[(W_w + F_f + E_e + Ec_{ec})/4]^4}} \quad (2)$$

式中: $C$  为耦合度, $C \in [0, 1]$ ,当  $C=0$  时,说明子系统间处于无关状态且发展方向和结构呈无序性; $C$  越接近 1,各子系统耦合度越好,当  $C=1$  时,表明子系统间达到良性共振耦合且向有序方向发展。

根据廖重斌<sup>[27]</sup>及相关文献<sup>[17]</sup>结合研究区 WFEEc 耦合发展的规律,将耦合度划分为 4 个等级:低水平耦合  $0 \leq C \leq 0.3$ ;拮抗状态  $0.3 < C \leq 0.5$ ;磨合状态  $0.5 < C \leq 0.8$ ;高水平耦合  $0.8 < C \leq 1$ 。

耦合度只能反映 WFEEc 之间相互作用程度的强弱,难以反映相互作用协调水平的高低,因此引入耦合协调模型。耦合协调模型通常被用来衡量系统内部的耦合协调发展状态,能够确定系统良性耦合程度的大小,其计算公式为:

$$\begin{cases} D = \sqrt{CT} \\ T = aW_w + bF_f + cE_e + dEc_{ec} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D$  为耦合协调度; $C$  为耦合度; $T$  为 WFEEc 的综合评价指数,反映各子系统间的整体协同效应; $a, b, c, d$  为待定系数。

表 1 临沧市水—食物—能源—生态环境耦合协调发展评估指标体系  
Table 1 Evaluation index system for coupled and coordinated development of water-food-energy-ecological environment at Lincang City

目标层	指标层	指标	指标代码	指标性质	对应 SDG 目标	指标来源	权重
水资源子系统	压力	废水排放总量 <sup>#</sup> /10 <sup>4</sup> t	PW <sub>1</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.3.1)	[27]	0.092 3
		人均综合用水量 <sup>#</sup> (m <sup>2</sup> /人)	PW <sub>2</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.4.2)	[5]	0.092 6
		城市居民生活用水量 <sup>#</sup> /(L·d <sup>-1</sup> )	PW <sub>3</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.4.2)		0.092 3
		农村居民生活用水量 <sup>#</sup> /(L·d <sup>-1</sup> )	PW <sub>4</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.4.2)		0.092 2
	状态	人均水资源量 <sup>#</sup> /m <sup>3</sup>	SW <sub>1</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.4.2)	[5,27,28]	0.091 2
		万元 GDP 用水量 <sup>#</sup> (m <sup>3</sup> /10 <sup>4</sup> 元)	SW <sub>2</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.4.2)	[5,28]	0.092 2
	影响	产水模数 <sup>#</sup> /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	IW <sub>1</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.5.1)	[5]	0.090 9
		化学需氧量排放总量 <sup>#</sup> /t	IW <sub>2</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.5.1)	[5,29]	0.091 5
		水资源总量 <sup>#</sup> /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	IW <sub>3</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.4.2)		0.091 5
	响应	污水处理厂集中处理率 <sup>a</sup> %	RW <sub>1</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.3.1)	[27]	0.091 8
废水集中式治理设施排放量 <sup>#</sup> /10 <sup>4</sup> t		RW <sub>2</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.081 5	
食物资源子系统	压力	人口自然增长率 <sup>#</sup> %	PF <sub>1</sub>	负	可持续城市 (SDG11.3.1)	[5,29]	0.110 7
		人口密度 <sup>#</sup> (人/km <sup>2</sup> )	PF <sub>2</sub>	负	可持续城市 (SDG11.3.1)	[29]	0.111 2
	状态	每公顷农田灌溉用水量 <sup>^</sup> /(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	SF <sub>1</sub>	负	可持续农业 (SDG2.4.1)		0.109 4
		人均占有粮食 <sup>#</sup> /kg	SF <sub>2</sub>	正	可持续农业 (SDG2.1.2.)		0.108 7
		粮食年产量 <sup>#</sup> /(t·hm <sup>-2</sup> )	SF <sub>3</sub>	正	可持续农业 (SDG2.1.2)		0.111 1
	影响	农村居民恩格尔系数 <sup>^</sup> %	IF <sub>1</sub>	负	可持续农业 (SDG2.1.1)	[5]	0.094 6
		城镇居民恩格尔系数 <sup>^</sup> %	IF <sub>2</sub>	负	可持续农业 (SDG2.1.1)	[5]	0.109 4
	响应	旱涝保收面积 <sup>^</sup> /hm <sup>2</sup>	RF <sub>1</sub>	正	可持续农业 (SDG2.4.1)		0.089 1
		有效灌溉面积 <sup>^</sup> /hm <sup>2</sup>	RF <sub>2</sub>	正	可持续农业 (SDG2.4.1)	[30]	0.049 9
		年末耕地总资源 <sup>^</sup> hm <sup>2</sup>	RF <sub>3</sub>	正	可持续农业 (SDG2.4.1)		0.105 9
能源子系统	压力	石油类污染物排放总量 <sup>#</sup> /t	PE <sub>1</sub>	负	可持续消费和生产方式 (SDG12.4.1)		0.113 8
		能源消费总量 <sup>^</sup> /t	PE <sub>2</sub>	负	可持续现代能源 (SDG7.1.2)	[5,30]	0.112 9
	状态	当量热值 <sup>^</sup> /(t,以标准煤计)	SE <sub>1</sub>	正	可持续现代能源 (SDG7.3.1)		0.096 7
		等价热值 <sup>^</sup> /(t,以标准煤计)	SE <sub>2</sub>	正	可持续现代能源 (SDG7.3.1)		0.111 1
	影响	原煤工业生产消费量 <sup>^</sup> /t	IE <sub>1</sub>	负	可持续现代能源 (SDG7.1.2)		0.113 4
		工业源氨氮排放量 <sup>#</sup> /t	IE <sub>2</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.113 4
		万元 GDP 能耗 <sup>*</sup> (t/10 <sup>4</sup> 元,以标准煤计)	IE <sub>3</sub>	负	可持续消费和生产方式 (SDG12.2.2)	[5,27,29,30]	0.113 3
	响应	太阳能热水器普及率 <sup>#</sup> %	RE <sub>1</sub>	正	可持续现代能源 (SDG7.b.1)		0.111 9
		农村沼气普及率 <sup>#</sup> %	RE <sub>2</sub>	正	可持续现代能源 (SDG7.b.1)		0.113 5
	压力	工业源化学需氧量排放量 <sup>#</sup> /t	PEC <sub>1</sub>	负	可持续城市 (SDG11.6.1)	[30]	0.065 2
灾害造成的直接经济损失 <sup>#</sup> /10 <sup>4</sup> 元		PEC <sub>2</sub>	负	可持续城市 (SDG11.5.2)		0.065 7	
状态	生态环境耗水量 <sup>^</sup> /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	SEc <sub>1</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.065 9	
	氮、磷、钾肥施用量 <sup>^</sup> /t	SEc <sub>2</sub>	负	可持续农业 (SDG2.3.1)		0.065 2	
生态环境子系统	影响	城镇化率 <sup>^</sup> %	IEc <sub>1</sub>	正	可持续陆地生态系统 (SDG15.1.1)	[27]	0.065 2
		森林覆盖率 <sup>a,b</sup> %	IEc <sub>2</sub>	负	可持续城市 (SDG11.3.1)		0.065 5
		烟粉尘区域总量 <sup>#</sup> /t	IEc <sub>3</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.3.1)		0.065 4
	影响	环境空气质量状况优良天数比例 <sup>a,b</sup> %	IEc <sub>4</sub>	正	可持续城市 (SDG11.6.2)		0.061 5
		氨氮排放总量 <sup>#</sup> /t	IEc <sub>5</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.062 7
		总磷排放总量 <sup>#</sup> /t	IEc <sub>6</sub>	负	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.063 4
	响应	城市建成区人均公园绿地面积 <sup>^</sup> (m <sup>2</sup> /人)	REc <sub>1</sub>	正	可持续城市 (SDG11.7.1)		0.063 8
		生活垃圾无害化处理率 <sup>#</sup> %	REc <sub>2</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.3.1)		0.065 9
		氨氮集中式治理设施排放量 <sup>#</sup> /t	REc <sub>3</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.053 4
		总磷集中式治理设施排放量 <sup>#</sup> /t	REc <sub>4</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.052 8
响应	化学需氧量集中式治理设施排放量 <sup>#</sup> /t	REc <sub>5</sub>	正	水和环境卫生 (SDG6.5.1)		0.053 3	
	建成区绿化覆盖率 <sup>^</sup> %	REc <sub>6</sub>	正	可持续城市 (SDG11.7.1)		0.065 1	

注:①表中 a 为美丽中国建设指标, b 为云南“十四五”规划指标; \*, ^, # 为指标来源; \* 代表 SDG 直接选取指标, ^ 代表 SDG 本地化指标, # 代表 SDG 延伸指标; ②指标层“压力、状态、影响、响应”划分依据具体见“参考文献”一栏, 其中没有文献来源的指标一部分根据已有参考文献 [28—31] 类似指标划分, 一部分根据参考文献 [28, 30] 中对压力、状态、影响、响应概念定义及指标本身含义将指标合理划分到不同状态层下。

参考 Pereira<sup>[32]</sup> 研究成果, 本文认为 4 个子系统具有同等重要性, 故取  $a=b=c=d=1/4$ 。  $D \in [0, 1]$ , 采用孙久文等<sup>[33]</sup> 来确定耦合协调的类型及划分标准: 严重失调  $0 \leq D \leq 0.2$ ; 轻度失调  $0.2 < D \leq 0.4$ ; 一般协调  $0.4 < D \leq 0.6$ ; 良好协调  $0.6 < D \leq 0.8$ ; 优质协调  $0.8 < D \leq 1$ 。

2.2.4 障碍因素诊断模型 在综合评价模型的基础上, 建立了障碍度诊断模型。这是一个用于诊断影响事物发展的障碍因素的数学模型<sup>[25,34]</sup>。通过计算各指标对各县区 WFEEc 关系可持续性的障碍程度, 有助于为临沧市 WFEEc 的可持续发展提供有针对性的建议。

$$O_j = \frac{Co_j \cdot De_j}{\sum_{j=1}^n Co_j \cdot De_j} \times 100\% \quad (4)$$

$$= \frac{\omega_j [\max(X) - X_{ij}]}{\sum_{j=1}^n \{\omega_j [\max(X) - X_{ij}]\}} \times 100\%$$

式中:  $O_j$  是第  $j$  个指数的障碍度;  $Co_j$  是因子贡献度, 由可变权重  $\omega_j$  表示;  $De_j$  是偏离度, 表示为理想值和指数值之间的差值。

2.2.5 影响因素选取 WFEEc 耦合协调度受经济发展水平、教育、技术进步、经济集聚、人口、农林支持等因素的影响, 参考李成宇<sup>[5]</sup>、孙久文等<sup>[33]</sup> 研究, 因地制宜地选择人均 GDP、国家财政性教育经费、专利申请

数、非私营单位在岗职工平均工资、年末常住人口、第一产业增加值、水资源总量、污水处理厂集中处理率、城镇化率 9 个影响因子作为影响临沧 WFEEc 耦合协调度因素的主要解释变量, 探究影响各县区 WFEEc 综合评价模型的主导驱动因子, 并运用多元逐步回归分析影响 WFEEc 耦合协调度因素。

### 3 结果与分析

#### 3.1 综合评价指数时序特征

在研究期内, 临沧市 WFEEc 综合评价指数虽在 2018 及 2019 年出现降低趋势, 但总体呈增加态势 (表 2)。各子系统多年平均综合评价指数:  $E_{c_{ec}}(0.59) > E_e(0.56) > W_w(0.53) > F_f(0.44)$ , 增幅:  $W_w(0.19) > F_f(0.15) > E_{c_{ec}}(0.08) > E_e(0.03)$ , 其中一直处于高值的生态环境子系统及逐年提高的水资源子系统对综合评价指数的提升起到积极作用, 粮食、能源子系统的反复波动影响着 WFEEc 综合评价指数的稳步提升。其中 2012—2014 年综合评价指数趋于稳定, 其主要原因是  $W_w, E_e$  在 2013 年降低, 而  $F_f, E_{c_{ec}}$  则呈增加趋势; 2019 年出现小幅度减少, 原因在于  $F_f$  增加,  $E_{c_{ec}}$  保持稳定, 但  $E_e$  小幅减少,  $W_w$  出现骤降, 较前一年降低 0.08; 可见 4 个子系统存在明显相互作用, 要想总体提升综合评价指数必须确保 4 个子系统协同发展。

表 2 2010—2020 年临沧市水—食物—能源—生态环境耦合协调发展类型

Table 2 Types of coupled and coordinated development of water-food-energy-ecological environment at Lincang City from 2010 to 2020

年份	$W_w$	$F_f$	$E_e$	$E_{c_{ec}}$	$T$	$C$	$D$	耦合协调类型
2010	0.41	0.33	0.55	0.61	0.48	0.56	0.52	一般协调
2011	0.44	0.44	0.47	0.51	0.47	0.56	0.51	一般协调
2012	0.44	0.47	0.60	0.54	0.51	0.60	0.56	一般协调
2013	0.49	0.50	0.51	0.56	0.51	0.61	0.56	一般协调
2014	0.48	0.43	0.58	0.55	0.51	0.60	0.55	一般协调
2015	0.52	0.44	0.56	0.57	0.52	0.61	0.57	一般协调
2016	0.64	0.46	0.56	0.61	0.57	0.65	0.61	良好协调
2017	0.60	0.48	0.56	0.63	0.57	0.65	0.61	良好协调
2018	0.62	0.41	0.58	0.63	0.56	0.64	0.60	良好协调
2019	0.54	0.44	0.57	0.63	0.54	0.63	0.59	一般协调
2020	0.60	0.48	0.58	0.69	0.59	0.67	0.63	良好协调

注: 表中  $W_w, F_f, E_e, E_{c_{ec}}$  分别表示水资源、食物资源、能源、生态环境 4 个子系统综合评价指数;  $T, C, D$  分别表示 WFEEc 综合评价指数、耦合度、耦合协调度。

#### 3.2 水—食物—能源—生态环境耦合度及耦合协调度分析

3.2.1 时间特征 研究期内临沧市耦合度总体呈提升态势, 2020 年较 2010 年增加 0.11 (表 2)。其中,

2011, 2016, 2020 年耦合度提高最快, 较前一年均提升 0.04。2010—2020 年 WFEEc 一直处于磨合状态, 2020 年达 0.67 属磨合阶段中值, 总体有向磨合高值逼近趋势; 耦合协调度变化趋势与耦合度趋于一致,

存在同增同减趋势;在研究期内系统耦合协调度在部分年份虽出现小幅波动下降但总体呈增加趋势,WFEEc 从一般协调向良好协调过渡,详见表 2 ( $D:0.51\sim 0.63$ )。

从县区看,在研究期内各县区耦合度与耦合协调度表现为波动上升趋势(图 2),且同一时间段内不同

县区均呈现出耦合协调度低于耦合度,其中耦合度、耦合协调度年均增长率最高分别为双江、耿马县( $C=2.93\%;D=3.48\%$ ),最低均为沧源县( $C=1.07\%;D=1.22\%$ ),除耿马县(图 2g)耦合度从拮抗状态过渡到磨合状态外,其余各县区均处于磨合状态;各县区耦合协调度均从一般协调过渡到良好协调,但其值较低。

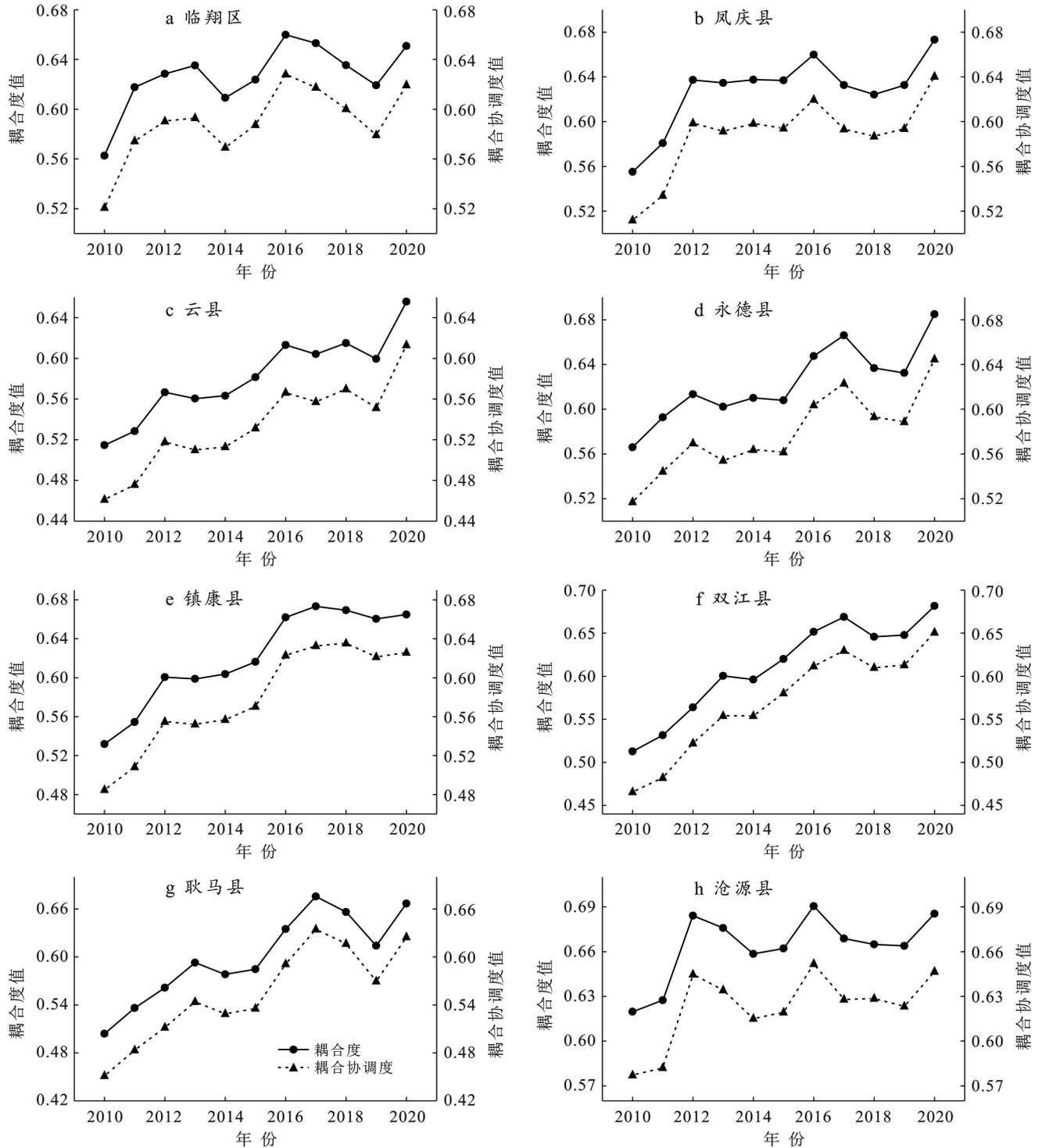


图 2 临沧市各县区耦合度及耦合协调度时间特征变化

Fig.2 Time characteristic changes of coupling degree and coupling coordination degree among counties and districts at Lincang City

3.2.2 空间特征 从空间上看(图3),各县区耦合协调度与耦合度存在明显区域差异,2010年沧源县耦合度及耦合协调度最高分别为0.62,0.58,耿马县耦合度及耦合协调度最低,分别为0.50,0.45,此时耦合协调度空间极差为0.13。从耦合度分析发现,除耿马县处于拮抗状态,其余各县区均处于磨合状态,且各县区均处于一般协调;到2020年沧源、双江、永德耦

合度较高(均大于0.68),其耦合协调度也处于高值(均大于0.64),此时耦合协调度空间极差为0.04,在研究期内耦合协调度空间差异逐渐缩小。各县区耦合协调度区域异质性明显,除2019年外,总体呈“向好”趋势。空间分析再一次印证各县区耦合度与耦合协调度存在高度的一致性,且在同一时间段内耦合协调度略低于耦合度。

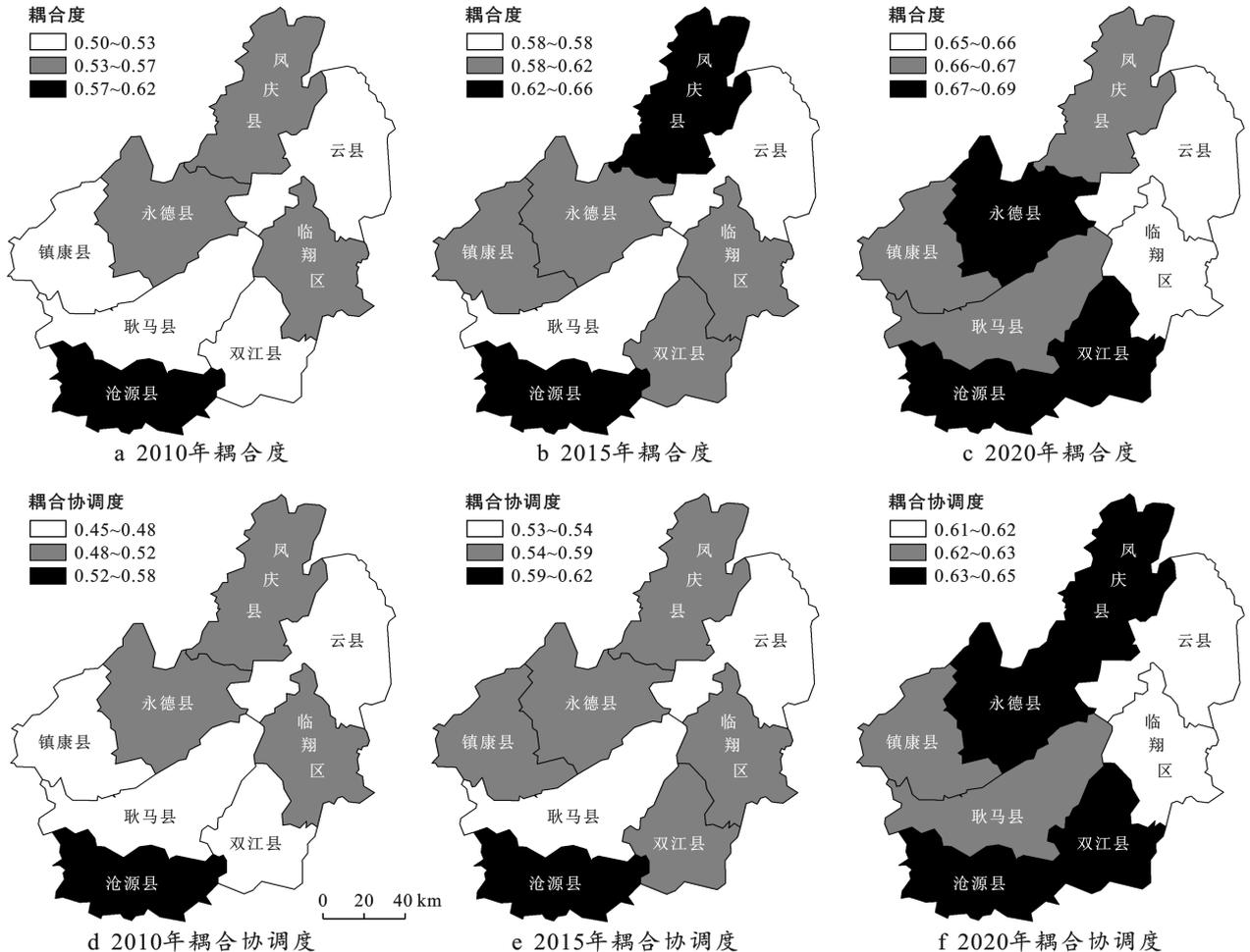


图3 临沧市各县区2010,2015,2020年耦合度及耦合协调度空间特征变化

Fig.3 Spatial characteristics of coupling degree and coupling coordination degree in various counties and districts of Lincang City in 2010, 2015, and 2020

### 3.3 水—食物—能源—生态环境障碍度分析

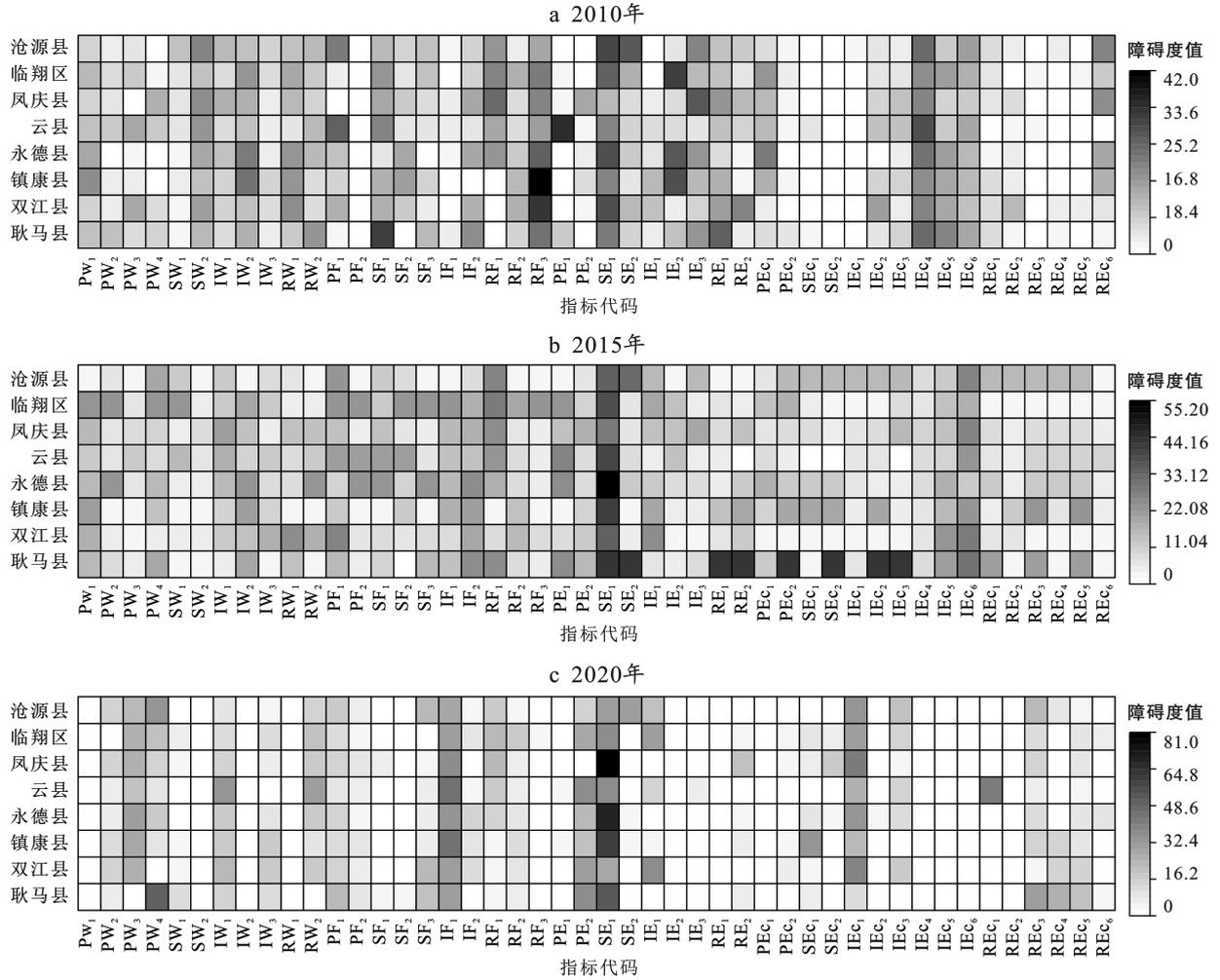
如图4所示,在研究期内虽总体障碍因素明显减少,但部分因子障碍度却明显增加。不同县区在不同年份影响WFEEc耦合发展的障碍因素明显不同。2010年,对于临沧市而言, $RF_3$ ,  $SE_1$ ,  $IE_{C_1}$ 是影响系统耦合协调度的主要障碍因素。具体来看,2010年各县区障碍度最高值临翔区为 $SF_1$ (31.82),凤庆和云县均为 $RF_3$ (32.28, 41.59),永德和沧源县为 $SE_1$ (28.89, 30.10),镇康县为 $PE_1$ (34.16),双江县为 $IE_3$ (27.67),耿马县为 $IE_2$ (31.48);到2020年, $SE_1$ ,  $IF_1$ ,

$IE_{C_1}$ 是全市的主要障碍因素。从各县区来看,障碍度最高值临翔区、云县、永德、双江、耿马县为 $SE_1$ 值分别为53.80, 60.65, 69.51, 80.92, 36.06,凤庆县为 $IE_{C_1}$ (38.76),镇康县为 $IF_1$ (45.46),可见2020年障碍度仍然集中于能源子系统,但主要障碍因素由2010年的多个( $SE_1$ ,  $PE_1$ ,  $IE_2$ ,  $IE_3$ )减少为单个( $SE_1$ ), $SE_1$ 障碍度增加。

### 3.4 多元逐步回归分析

多元逐步回归分析表明(表3),国家财政性教育经费是影响临翔区耦合协调度的主导因子;凤庆、沧源

县为人均 GDP;永德、双江县为城镇化率;镇康县为非 和城镇化率;云县则表现为人均 GDP 值、水资源总 私营单位在岗职工平均工资;耿马县则为水资源总量 量、国家财政性教育经费及污水处理厂集中处理率。



注:图中横坐标字符为生态环境耦合协调发展评估指标,具体见表 1。下同。

图 4 临沧市各县区 2010,2015,2020 年水—食物—能源—生态环境障碍度分析

Fig.4 Analysis of water-food-energy-ecological environment barriers in various counties and districts of Lincang City in 2010, 2015 and 2020

表 3 临沧市各县区耦合度协调度多元逐步回归分析结果

Table 3 Multiple stepwise regression analysis results of coupling degree coordination among counties and districts in Lincang City

县 区	回归方程	影响因素	R <sup>2</sup>	p 值
临翔区	$y=0.013\ 3 * I_2+0.524\ 5$	$I_2$	0.551\ 1	
凤庆县	$y=(3.617\ 3\ E-06) * I_1+0.513\ 4$	$I_1$	0.684\ 6	
云 县	$y=(6.053\ 6\ E-06) * I_1+0.004\ 4 * IW_3\sim 0.000\ 8 * RW_1+0.007\ 1 * I_2+0.367\ 4$	$I_1, IW_3, RW_1, I_2$	0.992\ 6	
永德县	$y=0.006\ 3 * IEc_1+0.386\ 5$	$IEc_1$	0.783\ 0	
镇康县	$y=(2.155\ 1\ E-06) * I_4+0.447\ 4$	$I_4$	0.903\ 1	<0.05
双江县	$y=0.011\ 7 * IEc_1+0.163\ 0$	$IEc_1$	0.912\ 7	
耿马县	$y=0.009\ 9 * IEc_1+0.005\ 2 * IW_3+0.031\ 6$	$IEc_1, IW_3$	0.941\ 1	
沧源县	$y=(2.286\ 7\ E-06) * I_1+0.581\ 0$	$I_1$	0.437\ 6	

注:只保留了显著性结果。表中  $I_1, I_2, I_4, IW_3, RW_1, IEc_1$  分别表示人均 GDP 值、国家财政性教育经费、非私营单位在岗职工平均工资、水资源量、污水处理厂集中处理率、城镇化率。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

#### 4.1.1 WFEEc 影响因素分析 多数研究聚焦水—食

物—能源 3 要素的耦合作用及外部驱动因子,忽略了承载三者的生态环境的重要性<sup>[5-8,11,13]</sup>,目前基于可持续发展目标对 WFEEc 耦合协调相关研究鲜见,尤其是针对国家可持续创新发展示范区的相关研究几乎

仍为“空白”。综合评价发现临沧市 WFEEc 综合评价指数总体呈波动增加趋势,尤以水资源子系统对其贡献最大,这主要是因为水资源子系统“影响”层:产水模数( $IW_1$ )、水资源总量( $IW_3$ ),“响应”层污水处理厂集中处理率( $RW_1$ )逐年稳步增加而化学需氧量排放总量( $IW_2$ )逐年减少。此外,尽管生态环境子系统增幅较小(0.08),但在4个子系统中综合评价指数较高,表明临沧市生态环境较好,对 WFEEc 耦合协调贡献明显。通过耦合协调度发现,临沧市耦合协调度总体从一般向良好协调发展,2019年耦合协调度逆向发展(良好协调向一般协调过渡),其原因可能是由于2019年云南遭遇大旱,水资源总量相对于2018年减少了 $6.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,增长率为-0.41。2010—2020年临沧市耦合协调度由一般协调向良好协调变化,但其值较低( $D$ 值在0.51~0.63之间波动)。进一步来看,2010—2020年各县区耦合协调度与临沧市较为一致,但存在明显的空间异质性,2020年双江县耦合协调度最高,云县最低。

从障碍度因素分析发现,2010—2020年临沧市和各县区阻碍 WFEEc 耦合发展的因素明显减少,而能源当量热值障碍度在逐年提高,这可能与社会经济生产和生活中能源消费结构不合理有关。通过多元逐步回归发现人均 GDP 是凤庆、沧源、云县影响耦合协调度的共同影响因素,这可能是由于3县区一直以来拥有得天独厚的旅游文化资源(凤庆和云县茶旅游文化产业,沧源翁丁古村被称为“中国最后一个原始部落”)带动当地经济发展;城镇化率是影响永德、双江、耿马耦合协调度的共同影响因素,表明3县社会经济平稳发展有利于促进耦合协调水平提高;财政性教育经费投入是影响临翔区、云县耦合协调度的共同因素,这与当地政府一直以来高度重视教育相吻合,教育为从事相关水—食物—能源—生态环境部门和行业提供了科技人才支撑;镇康县为非私营单位在岗职工平均工资水平,表明人均收入水平的提高可能对镇康县耦合协调度的提高具一定的促进作用。

#### 4.1.2 建议和未来研究展望

(1) 建议。①水资源子系统:临沧市应充分利用水资源禀赋,科学推动清洁绿色水电站开发利用,持续优化中小水电站管理运行,此外还需密切注意水电站建设对生态环境的影响,特别是耿马、云县;②食物子系统:各县区应调整优化农业产业结构,依据自身优势扩大绿色有机农产品的深加工,提高农产品附加值,减少农田灌溉污染;③能源子系统:优化调整能源消费和生产结构,倡导绿色能源消费,开发低碳

可再生能源,推动技术转型升级,提高能源利用率。尤其是临翔区、双江、永德、云县;④生态环境子系统:各县区应努力推动社会经济发展与生态保护齐头并进,提高生态环境保护意识,严控环境污染项目的批复,特别是云县。

此外,临翔区、云县还应加进一步加大教育经费投入,吸引高层次人才流入,促进内培外引;凤庆、沧源、云县需进一步拉动内需,增加人均收入,刺激消费;永德、双江、耿马县应统筹城乡发展,努力缩小城乡差距;镇康县应建立健全企业帮扶制度,提高居民收入水平。

同时各县区应进一步拉动内需、刺激消费,持续推动创新经济发展,精准定位自身特色产业,合理利用各县区特色资源,因地制宜与因时制宜适时调整和优化发展模式和路径,增强一个县区一个特色产业(“一县一业”)政策巩固和完善,永葆创新驱动发展的活力和动力,努力提升边境3县与其余县区教育同步发展,稳步增强临沧可持续发展创新示范区可持续发展能力(具体措施见图5)。

(2) 未来研究展望。本文获取了比较丰富而可靠的数据样本,得出了比较可靠的结果,但仍然存在一定的局限主要表现在:①在数据上,由于县级数据获取难度较大,对于部分县份的个别缺失数据采用插值的方法进行补充,这有可能对结果造成一定的影响,但结果仍然具有重要参考价值;在影响指标的选取时虽已结合研究区实际并且参考李成宇等<sup>[5]</sup>研究但仍然存在影响因素不能完全反映影响 WFEEc 耦合协调度的情况。②在方法上,未来可以考虑空间关联网络相关带动效应、路径分析、三维评价模型、系统动力学模型、灰色关联等多种方法以及多情景预测来模拟预测未来发展路径。

## 4.2 结论

聚焦边疆多民族欠发达的临沧国家可持续发展创新示范区,采用多种统计方法揭示 WFEEc 耦合协调发展及影响因素,主要研究结果如下。

(1) 研究期内,临沧市整体和各县区 WFEEc 耦合协调度变化趋势与耦合度几乎同增同减,总体上由一般协调向良好协调发展,且各县区耦合协调度空间差异缩小(耦合协调度极差:2010年,0.13;2015年,0.06;2020年,0.04),但值仍较低。

(2) 研究期内,阻碍临沧市各县区 WFEEc 的因素明显减少,但能源子系统障碍度明显增强,尤其是“状态”层能源当量热值是制约全市和各县区耦合协调的主要障碍因子。

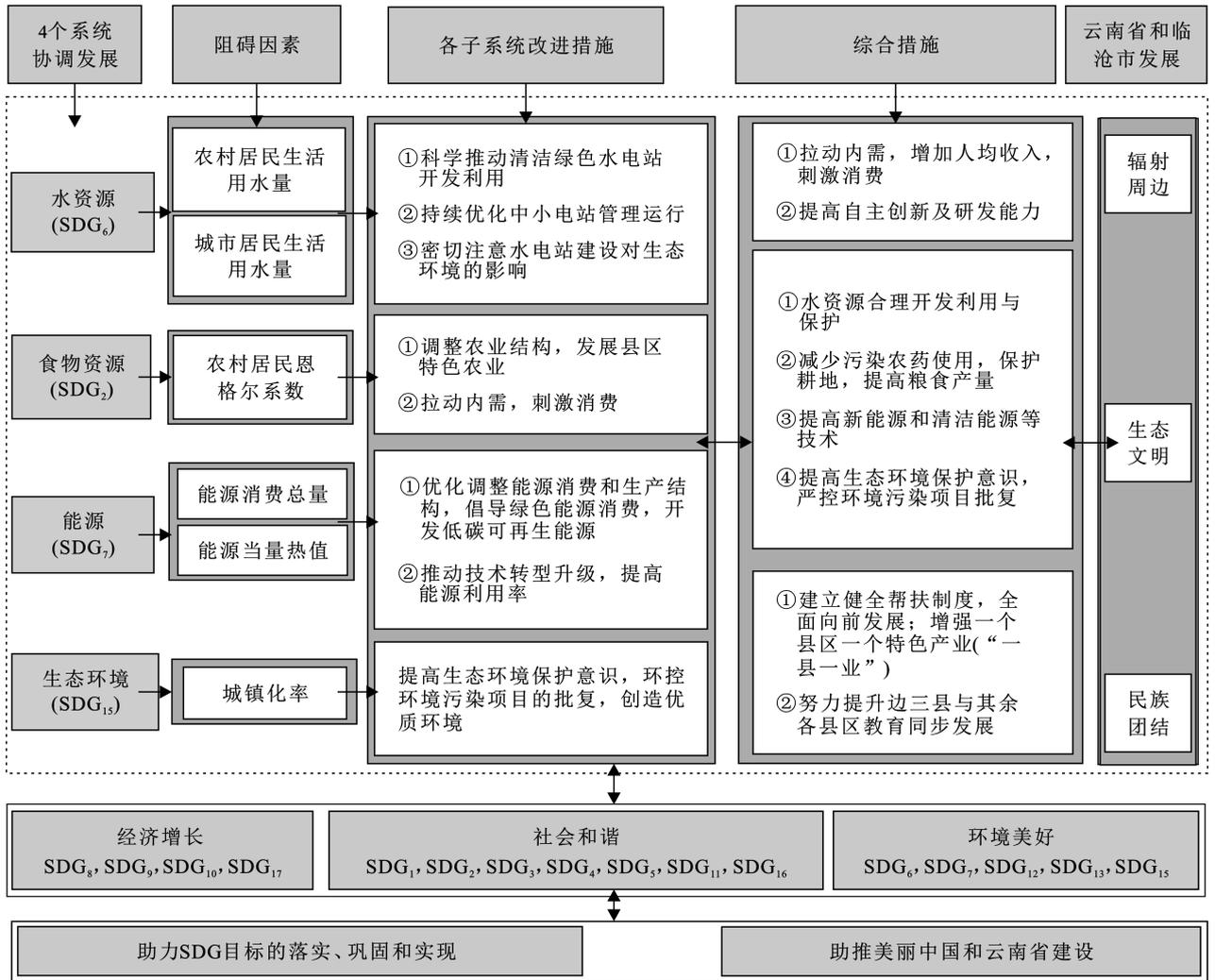


图 5 临沧市水—食物—能源—生态环境提升改进措施及助力实现可持续发展目标 (SDGs) 路径

Fig.5 Measures for improving water-food-energy-ecological environment in Lincang City and supporting implementation of sustainable development goals (SDGs) pathways

(3) 研究期内,影响各县区耦合协调度的因素存在明显空间异质性,临翔区为国家财政性教育经费,镇康县为非私营单位在岗职工平均工资,凤庆、沧源县为人均 GDP,永德、双江县为城镇化率,云县为人均 GDP、水资源量、污水处理厂集中处理率及国家财政性教育经费,耿马县为城镇化率、水资源量。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Zhang Lixiao, Zhang Pengpeng. The conceptual connotation and the practical challenge of nexus of FEW [J]. Studies on Foreign Social Sciences, 2019(9):57-61,84.  
 [2] Yuan Jiahang, Luo Xinggang. Regional energy security performance evaluation in China using MTGS and SPATOPSIS [J]. Science of the Total Environment, 2019, 696:133817.  
 [3] 林志慧,刘宪锋,陈瑛,等.水—粮食—能源纽带关系研究进展与展望[J].地理学报,2021,76(7):1591-1604.  
 [4] 郝梦露,彭守璋.宁南山区生态环境与社会经济的耦合协

调发展[J].水土保持通报,2021,41(5):319-326.  
 [5] 李成宇,张士强.中国省际水—能源—粮食耦合协调度及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(1):120-128.  
 [6] Feng Cuiyang, Qu Shen, Jin Yi, et al. Uncovering urban food-energy-water nexus based on physical input-output analysis: The case of the Detroit Metropolitan Area [J]. Applied Energy, 2019,252:113422.  
 [7] Zhang Pengpeng, Zhang Lixiao, Hao Yan, et al. Understanding the tele-coupling mechanism of urban food-energy-water nexus: Critical sources, nodes, and supply chains [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,235:297-307.  
 [8] Li P C, Ma H W. Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020,157:104789.  
 [9] 孙才志,魏亚琼,赵良仕.干旱区水—能源—粮食纽带系统协同演化:以中国西北地区为例[J].自然资源学报,

- 2022,37(2):320-333.
- [10] Zhang Junze, Wang Shuai, Pradhan P, et al. Mapping the complexity of the food-energy-water nexus from the lens of sustainable development goals in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022,183:106357.
- [11] Ozturk I. Sustainability in the food-energy-water nexus: Evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) countries [J]. *Energy*, 2015,93:999-1010.
- [12] Chen Shaoqing, Chen Bin. Urban energy-water nexus: A network perspective [J]. *Applied Energy*, 2016, 184:905-914.
- [13] Ravar Z, Zahraie B, Sharifinejad A, et al. System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni Basin in Iran [J]. *Ecological Indicators*, 2020,108:105682.
- [14] 郝帅,孙才志,宋强敏.中国能源—粮食生产对水资源竞争的关系:基于水足迹的视角[J].*地理研究*,2021,40(6):1565-1581.
- [15] Mannan M, Al-Ansari T, MacKey H R, et al. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,193:300-314.
- [16] 赵荣钦,余娇,肖连刚,等.基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放研究[J].*地理学报*,2021,76(12):3119-3134.
- [17] 王勇,孙瑞欣.土地利用变化对区域水—能源—粮食系统耦合协调度的影响:以京津冀城市群为研究对象[J].*自然资源学报*,2022,37(3):582-599.
- [18] Duan Weili, Chen Yaning, Zou Shan, et al. Managing the water-climate-food nexus for sustainable development in Turkmenistan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,220:212-224.
- [19] Shi Haiyang, Luo Geping, Zheng Hongwei, et al. A novel causal structure-based framework for comparing a basin-wide water-energy-food-ecology nexus applied to the data-limited Amu Darya and Syr Darya River basins [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021,25(2):901-925.
- [20] Correa-Cano M E, Salmoral G, Rey D, et al. A novel modelling toolkit for unpacking the water-energy-food-environment (WEFE) nexus of agricultural development [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022,159:112182.
- [21] Ren Dandan, Yang Yonghui, Yang Yanmin, et al. Land-water-food nexus and indications of crop adjustment for water shortage solution [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,626:11-21.
- [22] Klíklš Š, Klíklš B. Integrated circular economy and education model to address aspects of an energy-water-food nexus in a dairy facility and local contexts [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,167:1084-1098.
- [23] Chai Jian, Shi Huiting, Lu Quanying, et al. Quantifying and predicting the water-energy-food-economy-society-environment nexus based on Bayesian networks: A case study of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,256:120266.
- [24] Zhao Zhongxu, Pan Ying, Zhu Jing, et al. The impact of urbanization on the delivery of public service-related SDGs in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,80:103776.
- [25] Qian Xiangyan, Liang Qiaomei. Sustainability evaluation of the provincial water-energy-food nexus in China: Evolutions, obstacles, and response strategies [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021,75:103332.
- [26] Hao Lingang, Wang Ping, Yu Jingjie, et al. An integrative analytical framework of water-energy-food security for sustainable development at the country scale: A case study of five Central Asian countries [J]. *Journal of Hydrology*, 2022,607:127530.
- [27] 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.
- [28] 郭倩,汪嘉杨,张碧.基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J].*自然资源学报*,2017,32(3):484-493.
- [29] Wang Jiayang, Mu Xiaoqin, Chen Shouji, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity of the Dianchi Lake basin in 2005—2015, based on DSPERM framework model and simulated annealing-projection pursuit model [J]. *Regional Sustainability*, 2021,2(2):189-201.
- [30] 王亮,刘慧.基于 PS-DR-DP 理论模型的区域资源环境承载力综合评价[J].*地理学报*,2019,74(2):340-352.
- [31] Sun Xiang, Zhu Bokuan, Zhang Shuai, et al. New indices system for quantifying the nexus between economic-social development, natural resources consumption, and environmental pollution in China during 1978—2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804:150180.
- [32] Santos Pereira L. Water, agriculture and food: Challenges and issues [J]. *Water Resources Management*, 2017,31(10):2985-2999.
- [33] 孙久文,崔雅琪,张皓.黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J].*自然资源学报*, 2022,37(7):1673-1690.
- [34] Fan Yupeng, Fang Chuanglin. Evolution process and obstacle factors of ecological security in Western China, a case study of Qinghai Province [J]. *Ecological Indicators*, 2020,117:106659.