

新疆人-地-粮系统适配性演化与优化调控*

张雪¹, 阿里木江·卡斯木^{1,2}, 张妍¹, 方怡恒¹

1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830017
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要: 在人口、土地与粮食资源协同压力持续加剧背景下,厘清“人-地-粮”复合系统的适配性演化机制对区域可持续发展具有重要意义。本研究基于新疆 2000—2020 年“人-地-粮”系统数据,采用适配度量化模型、四象限、马尔科夫转移矩阵和障碍度,揭示其时空演化特征与协调机制。结果表明:1) 2000—2020 年,复合系统综合发展指数由 0.157 8 增至 0.218 5,年均增长率为 1.39%,其中耕地和粮食系统增速较快(1.99% 和 1.90%),人口系统增速滞后(0.32%);2) 系统适配度持续提升,高度适配区域占比由 20% 增至 31%,呈现出“点状突破-面状扩展”的演化格局;3) 第一象限(高适配-高发展)区域占比维持在 48%~56%,马尔科夫转移概率中的自维持率高达 95%,系统稳定性最强;4) 2000—2020 年,耕地和粮食子系统的障碍度分别从 45% 和 43% 下降至 40% 和 25%,而人口子系统障碍度由 12% 升至 35%,人口和耕地逐渐演化为系统协调发展的主要瓶颈。本研究为干旱区“人-地-粮”关系分析提供了一定参考,有助于新疆在多重资源约束背景下优化人口布局与土地利用结构,提升粮食生产韧性,为区域高质量与可持续发展提供了科学依据。

关键词: 人-地-粮;四象限模型;适配度;障碍度;新疆

中图分类号: F327;X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)02-0015-12

Adaptive evolution and optimization of the human-land-food nexus in Xinjiang

ZHANG Xue¹, KASIMU·Alimujiang^{1,2}, ZHANG Yan¹, FANG Yiheng¹

1. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830017, China
2. Xinjiang Arid Area Lake Environment and Resources Laboratory, Urumqi 830054, China

Abstract: Amid escalating synergistic pressures on population, land, and food resources, elucidating the adaptive evolution of the human-land-food nexus is crucial for regional sustainable development. Utilizing data on population, arable land, and grain in Xinjiang from 2000 to 2020, this study applied an adaptability quantification model, a four-quadrant model, a Markov transition matrix, and an obstacle degree model to reveal its spatiotemporal evolution and coordination mechanisms. The results show that: 1) From 2000 to 2020, the comprehensive development index of the coupled system increased from 0.157 8 to 0.218 5, with an average annual growth rate of 1.39%. The arable land and grain subsystems grew at rates of 1.99% and 1.90% per year, respectively, while the population subsystem grew at a lower rate of 0.32%. 2) System adaptability improved continuously, with the proportion of highly adaptable regions increasing from 20% to 31%, exhibiting an evolutionary pattern

* 收稿日期: 2025-08-29 录用日期: 2025-12-16 网络首发日期: 2026-01-23

基金项目: 自治区社科基金(2025BJL040); 国家自然科学基金(42361030);

研究生校级科研创新项目(XSY202501017)

作者简介: 张雪(2000年生),女;研究方向:区域经济与规划;E-mail: 107622023210594@stu.xjnu.edu.cn

通信作者: 阿里木江·卡斯木(1976年生),男;研究方向:资源环境遥感;E-mail: alimkasim@xjnu.edu.cn

全文阅读



ZR20250179

of “point breakthroughs to areal expansion”. 3) The proportion of regions in the first quadrant (high adaptability-high development) remained stable at 48%-56% and the Markov transition matrix showed a self-sustaining probability of 95%, indicating strong systemic stability. 4) From 2000 to 2020, the obstacle degrees of the arable land and grain subsystems declined from 45% and 43% to 40% and 25%, respectively. In contrast, the obstacle degree of the population subsystem rose from 12% to 35%, suggesting that population and arable land have gradually become the primary bottlenecks for coordinated development. This study provides a valuable reference for analyzing the human-land-food nexus in arid regions and offers insight to assist Xinjiang in optimizing population distribution and land-use structures under multiple resource constraints, thereby enhancing grain production resilience and fostering high-quality and sustainable regional development.

Key words: human-land-food; four-quadrant model; adaptability; obstacle degree; Xinjiang

粮食与耕地作为基础性和战略性资源,关系国家粮食安全与社会经济可持续发展(Godfray et al., 2010)。粮食安全的概念最早由联合国粮农组织于1974年提出(张元红等, 2015),随着全球人口持续增长与资源环境约束加剧(李玉恒等, 2020),粮食供需趋紧,粮食安全成为国际学界与社会广泛关注的重要议题。在此背景下,中国作为人口大国、但耕地资源相对有限,其粮食生产与消费的边际变化通过高度一体化的贸易与价格体系产生显著外溢效应(杨伟州等, 2016)。同时,气候变化、地缘冲突与能源转型等全球性冲击又反向作用于中国的粮食供给,使中国的粮食平衡与全球粮食安全呈现高度耦合(徐佳利等, 2024)。截至2020年,中国总人口已达14.1亿,占全球的18%(国家统计局, 2021),但耕地面积仅占全球10%,人均耕地面积约为0.09 hm²,为世界平均水平的44%(刘春卉等, 2022)。伴随经济快速发展与资源环境压力增大(于海淋等, 2025),中国粮食安全正面临资源约束、生态负荷上升与区域不均衡发展等多重挑战(樊艳翔等, 2025)。在人口增长与耕地约束日益凸显的背景下(马彩虹等, 2006),深入探讨“人-地-粮”系统的适配协调机制,对实现粮食安全与资源环境的可持续协同发展具有重要理论价值与现实意义。

现有研究围绕人口、耕地与粮食三者关系展开了多角度探索(鲍超等, 2007; 何宜庆等, 2016),主要体现在以下4个方面: 1) 系统交互关系。早期研究多采用灰色系统模型等方法,探讨人口增长、耕地变化与粮食产量之间的动态关系(温金祥等, 1994; 任平等, 2005),并提出应对策略。2) 人口与粮食的关系。研究表明中国土地资源承载力整体增强,但区域差异显著,部分地区已接近人口-粮食

临界超载状态(封志明等, 2008; 黄蓉等, 2018)。人口转变理论表明(李建新等, 2019),随着工业化推进与技术进步,粮食安全从数量约束转向结构与效率约束,揭示了人口-粮食关系的阶段性与复杂性。3) 人口与耕地的关系。相关研究指出人口增长与建设用地扩张造成耕地压力上升,需通过协调人地关系保障粮食安全(冯晓森等, 2005; 封志明等, 2014)。依据人地系统科学理论(刘彦随, 2020),人口是土地利用的核心驱动,耕地为人类活动的空间载体。二者由“占用扩张”向“集约利用”演化,提升耦合协调度是实现可持续发展的关键。4) 耕地与粮食的关系。部分研究聚焦耕地压力变化与粮食生产适应性,强调土地利用转型对粮食生产的调节作用(孔祥斌, 2011; Ge et al., 2018; 梁鑫源等, 2022),耕地与粮食之间呈非线性互动,过度集约可能导致产出递减与生态风险。依据报酬递减规律(陈柯斯, 2008),这种现象源于投入超过合理阈值后边际收益下降。粮食安全应通过技术进步与制度创新提升耕地质量与利用效率,实现由“数量扩张”向“质量驱动”的转变。总体来看,已有研究对“人-地-粮”系统进行了较为丰富的分析(Guo et al., 2023),但多集中于两两关系研究,三元系统的耦合协调与障碍识别研究相对薄弱,尚缺乏系统集成的分析框架与区域实证支持,尤其是在地广人稀、生态脆弱的新疆地区研究相对滞后。这不仅限制了对“人-地-粮”耦合机制的深入理解,也不利于区域粮食安全战略的精准施策。

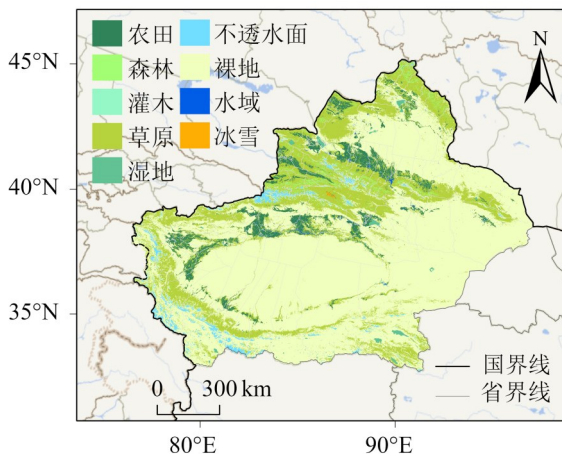
鉴于此,本研究以新疆为研究对象,构建多元指标体系,采用熵值法、适配度模型、四象限模型、马尔科夫转移矩阵与障碍度模型,系统评估区域人口、耕地与粮食的协调发展水平,识别其适配障碍因素,进而揭示三者耦合协调的动力机制与演化路

径。本研究旨在为新疆构建高效、稳定、可持续的粮食安全保障体系提供理论支撑与实践参考,也为西部地区“人-地-粮”系统优化管理与政策制定提供理论依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

新疆地处73°40'E—96°18'E、34°25'N—48°10'N,位于亚欧大陆腹地(图1),与俄罗斯、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦等八国接壤。新疆地貌形态为“三山夹两盆”,天山横亘于中部,把新疆分为南北两半,天山以南为南疆,天山以北为北疆。气候类型以干旱、半干旱为主,山地冰雪融水和径流成为区域生态与农业发展的主要水源。新疆拥有独特的“山地-绿洲-荒漠”生态系统,山地为水源涵养区,荒漠为生态屏障,绿洲则是农业生产与人口聚集的核心空间。绿洲多分布于山前冲积扇和平原地带,依托山地径流与灌溉系统形成,呈“山缘带状、盆地边缘集中”的空间格局。全国第六次荒漠化和沙化监测结果显示,新疆首次实现了荒漠化和沙化土地面积“双缩减”,荒漠化和沙化土地分别减少了1955.74和242.84 km²,结束了其“全国唯一沙化土地扩张省份”的历史,绿洲面积由1990年的9.9×10⁴ km²增至2022年的17.58×10⁴ km²,增长了77.6%;2023年新疆常住人口达25.98×10⁶人,其中,城镇常住人口15.39×10⁶人,城镇化率为59.24%;GDP为19 125.91亿元;粮食总产量达21.19×10⁶ t;全年粮食播种面积达28.25×10⁵ hm²。



审图号为GS(2023)2767,底图边界无修改。

图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the research area

1.2 数据来源

本研究使用数据主要来源于《新疆生产建设兵团统计年鉴(2001—2021)》(新疆生产建设兵团统计局,2021)、新疆维吾尔自治区人民政府(<https://www.xinjiang.gov.cn/>)发布的相关数据等,部分缺失数据的指标利用MATLAB R2022a的线性插值处理计算得出。首先,采用Min-Max标准化方法对数据进行标准化处理,以消除量纲影响;而后,采用熵权法计算权重;最后,采用多元线性综合指数计算出综合发展水平。

1.3 评价指标体系

在构建新疆“人-地-粮”适配发展评价指标体系的过程中,本研究结合新疆独特的自然地理条件与社会经济背景,构建了具有高度系统性与针对性的多层次综合评价框架(Zhu et al., 2023; Cui et al., 2019),并为各项指标设定唯一标识代码,指标体系由人口、耕地与粮食3个子系统构成(表1)。

2 研究方法

2.1 熵权法

熵权法是一种根据各项指标值的变异程度来确定指标权数的客观赋权法,可以有效避免主观因素造成的误差(Wang et al., 2023)。一般来说,指标的信息熵越小,指标值的变化程度越大,提供的信息越多,在综合评价中发挥的作用越大,权重越大。相反,指标的信息熵越大,指标值的变化越小,提供的信息越少,在综合评价中的作用越小,权重越小。指标*j*在第*i*年的占比:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^*}, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

指标*j*的信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (2)$$

指标*j*的信息熵冗余:

$$d_j = 1 - e_j, \quad (3)$$

指标*j*的权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}, \quad (4)$$

式中*n*为年数,*m*为指标数,*i*为年份,*j*为指标, x_{ij}^* 为指标原始值的标准化值。

2.2 适配性综合评价模型

本研究构建了基于适应性与匹配性双维度的“人-地-粮”适配性综合评价模型,以系统揭示人、地、粮三者间的耦合关系与配置效能。适应性主要

表1 新疆“人-地-粮”系统评价指标体系¹⁾
Table1 Evaluation index system of people-land-food system in XinJiang

子系统	指标	指标内涵及性质	单位	权重
人口(A)	人口规模(A1)	年末常住人口数(A11)(-)	10 ⁴ 人	0.080
		人口自然增长率(A12)(-)	%	0.029
	人口结构(A2)	非农业人口比重(A21)(-)	%	0.034
		乡村从业人员(A22)(+)	10 ⁴ 人	0.059
耕地(B)	耕地规模(B1)	耕地面积(B11)(+)	km ²	0.066
		总播种面积(B12)(+)	km ²	0.061
		复种指数(B13)(+)	%	0.026
	耕地技术(B2)	农业机械总动力(B21)(+)	kW	0.056
		农业用电量(B22)(+)	kWh	0.148
	耕地可持续(B3)	农业化肥施用量(B31)(-)	t	0.094
		有效灌溉率(B32)(+)	%	0.021
粮食(C)	粮食供给(C1)	单位面积粮食产量(C11)(+)	kg/ha	0.025
		粮食产量5年平均(C12)(+)	t	0.076
		粮食产量波动率(C21)(-)	%	0.012
	粮食稳定(C2)	农业产值占农林牧渔业总产值比重(C22)(+)	%	0.019
		第一产业产值(C23)(+)	元	0.075
		一般公共预算支出金额(C24)(-)	元	0.120

1)“+”为积极指标,“-”为消极指标。

反映“人-地-粮”系统在动态演进过程中的协调调节能力,强调人口增长、土地利用与粮食生产间的协同演化机制。为此,本研究引入耦合协调度模型(王金伟等,2024),定量衡量系统各要素之间的交互强度与协调水平,从而评估系统在不同发展阶段下的适应状态与演进稳定性。匹配性则体现为系统结构间的空间对称性与功能契合程度,主要关注人口分布与耕地资源、粮食供需之间的空间匹配关系。为量化各子系统之间的结构协调性,本研究采用数列匹配度模型对其空间配置的匹配状况进行测度(贺小荣等,2024)。

适应性量化模型:

$$E = \alpha x + \beta y + \lambda z, \quad (5)$$

$$C = \frac{3\sqrt[3]{xyz}}{x+y+z}, \quad (6)$$

$$D_j = \sqrt{C \times E}, \quad (7)$$

式中 E 为综合发展指数, x 、 y 、 z 分别为人、地、粮子系统评价值,本研究认为人、地和粮同等重要,故均取 $\alpha=\beta=\lambda=1/3$; C 为耦合度, D_j 为“人-地-粮”系统耦合协调度。

匹配性量化模型:

$$M_j = 1 - \frac{|W_j|}{U-1}, \quad j = 1, 2, \dots, U, \quad (8)$$

式中 M_j 为第 j 年匹配度, W_j 分别为 x 、 y 和 z 序列从小到大排序的差值,采用“人-地-粮”两两匹配度均值来计算三者整体匹配状态, U 为研究单元个数。

适配度综合加权计算:

$$A_j = aD_j + bM_j, \quad (9)$$

式中 A_j 为适配度, a 、 b 为适应性与匹配度所占权重。由于匹配仅能反映系统间的对称关系,并不代表系统处于良好发展状态,且有文献仅以耦合协调度来测度系统之间的适配水平,可见匹配性的重要程度弱于适应性;参考现有研究做法, a 、 b 分别取值为0.6、0.4(郑军等,2025;王兆峰等,2024)。 A 越接近于0,表明适配度越低; A 越接近于1,表明适配度越高。

2.3 四象限模型

四象限模型将定量和定性相结合,研究多领域的演化和长期均衡发展,其结果直观,易于分析(Wang et al., 2023)。本研究应用该模型从动态和静态2个层面全面探讨了“人-地-粮”复合系统的适配度与综合发展指数的关系演变。静态层面着重于某一特定时间段内复合系统的协调状态,而动

态层面则分析了系统关系在不同时间段的变化趋势,研究其长期演变和发展路径,为高质量区域发展和“人-地-粮”系统的可持续性服务(余玉洋等, 2024)。该模型以适配度为 x 轴,综合发展指数为 y 轴,推导出4个象限,构建四象限模型。第一象限为高适配-高发展:综合发展水平高,人口、耕地、粮食关系协调;第二象限为低适配-高发展:发展快但人口、耕地、粮食内部失衡;第三象限为低适配-低发展:基础薄弱且系统不协调;第四象限为高适配-低发展:发展较弱但内部结构协调。

2.4 马尔科夫转移矩阵

本研究采用马尔科夫转移矩阵分析“人-地-粮”复合系统适配关系类型的整体演化路径,以进一步探索演化规律(钟洋等, 2025)。公式如下:

$$p_{u,v}^{t,t+d} = \frac{\sum_{T_0}^{T-d} n_{u,v}^{t,t+d}}{\sum_{T_0}^{T-d} n_u^{t,t+d}}, \quad (10)$$

($u = 1, 2, \dots, k; v = 1, 2, \dots, k; t = T_0, \dots, T-d$)

式中 $p_{u,v}^{t,t+d}$ 表示第 t 年从 u 型转移到 $t+d$ 年 v 型的概率; k 表示4种适配关系类型,即 $k=4$; d 为不同关系类型间的地区转移期,取 $d=5$ (Wang et al., 2023); $n_{u,v}^{t,t+d}$ 表示第 t 年从 u 型转移到 $t+d$ 年 v 型的地区数量, $n_u^{t,t+d}$ 为第 t 年 u 型地区数量; T_0 和 T 分别为研究的起始和终止年份, $t \leq T-d$,以保证转移终点 $t+d$ 不超出研究期。

2.5 障碍度模型

障碍度模型引入了因子贡献、指标偏离度和障碍度3个指标用于障碍因子诊断,能够有效地量化人、地、粮三大子系统对新疆人地粮复合系统协调发展的影响(Wang et al., 2021)。公式如下:

$$I_j = 1 - f(U_j), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

$$O_j = \frac{F_j I_j}{\sum_{j=1}^n F_j I_j}, \quad (12)$$

式中 $f(U_j)$ 代表第 j 个子系统的实际发展指数,指标偏离度(I_j)是子系统 j 的实际发展指数和理想发展指数之间的差距;因子贡献度(F_j)是子系统 j 对综合系统的贡献程度,即该子系统的权重障碍度(O_j)是子系统 j 对综合系统的约束程度。

3 结果与分析

3.1 “人-地-粮”复合系统适配性评估

3.1.1 综合发展指数时间演化分析 2000—2020年,新疆“人-地-粮”系统综合发展指数由2005年的0.1578上升至2020年的0.2185,年均增长率为1.39%,反映出区域资源系统协同能力持续增强。

三大子系统中,耕地和粮系统的年均增长率分别为1.99%和1.90%,表明土地利用效率和粮食生产能力显著提升。相较之下,人口系统年均增长率仅为0.32%,表明增长幅度相对较缓,人口系统进入结构优化与质量提升阶段,新疆正处于人口转型阶段的中后期,人口自然增长率下降、常住人口规模趋稳、劳动力结构逐步合理,这种“缓增稳态”反映了人口系统的良性演化与稳定支撑作用(图2)。整体来看,各系统呈现波动上升和协调增强的特点,人地粮关系趋于优化。但在人、地、粮及复合系统中,部分年份仍出现短期回落,反映出系统对政策、环境与结构性因素的敏感性。其中,人口系统水平相对较高、贡献突出,而土地系统虽然基础薄弱但增速最快,发展潜力显著。

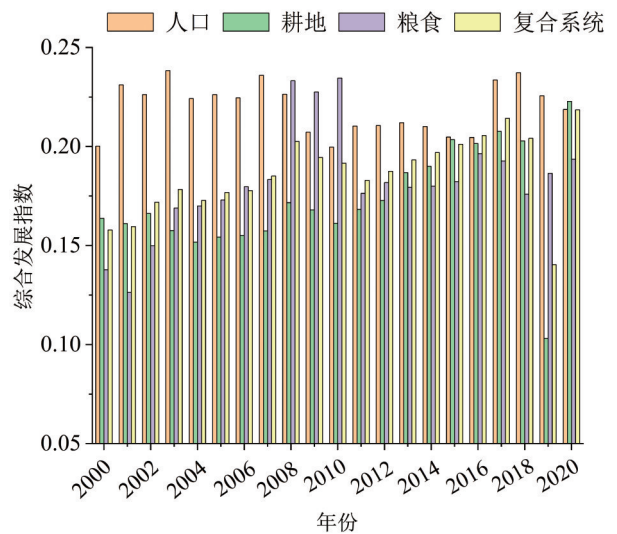


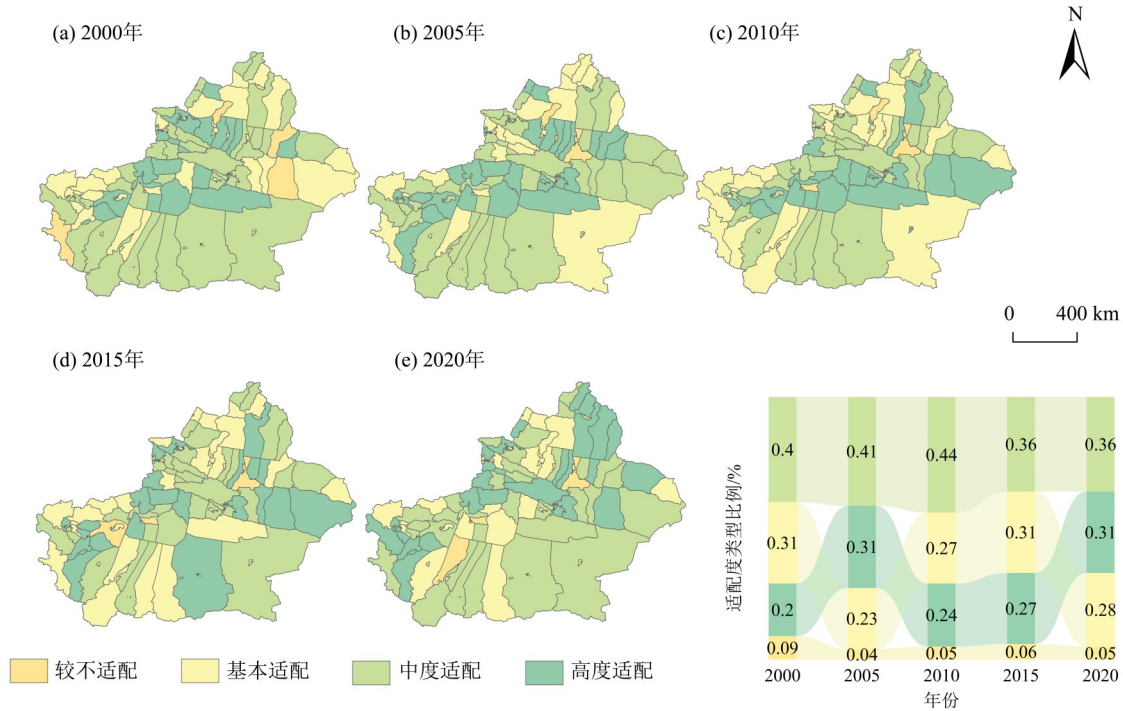
图2 新疆“人-地-粮”系统综合发展指数时间演变

Fig. 2 Temporal evolution of the comprehensive development index of the human-land-food system in Xinjiang

3.1.2 适配度时空演变特征分析 2000—2020年,新疆“人-地-粮”复合系统适配度整体呈波动上升态势,但区域分异特征显著(图3)。2000年,新疆适配水平较低的区域集中于塔县、克拉玛依、奇台和鄯善等地,人地矛盾突出、粮食保障较弱,形成人口压力大、土地利用粗放、粮食供给不足的典型低适配格局,主要由自然环境严酷、经济基础薄弱等因素所致;基本适配区主要分布在阿克苏、巴楚、乌恰、疏附、托克逊和高昌等地,呈局部集聚;中、高度适配区集中于巴州、天山北坡城市群和伊犁河谷等地,系统协调较好,表现出以绿洲为载体、以集约为特征的高适配格局。至2005年,适配格局整体优化,塔县由“较不适配”转为“基本适配”,伊吾、伊

州、托克逊等地升入“中度适配”，受“西部大开发”等政策推动，区域基础设施和农业生产条件有所改善，促进了土地利用效率和农业结构调整。2010年，高度适配区扩展至伊州、鄯善、北屯及周边绿洲，中度适配区涵盖精河、富蕴、呼图壁等地；绿洲作为干旱区人类聚居与农业生产的核心空间单元，其形成依托灌溉条件和人工治

理，使“人-地-粮”系统得以在有限资源约束下实现高效耦合，成为推动区域系统协调演进的重要空间载体。2015年，昌吉、北屯等地持续保持高度适配，系统协调性增强。到2020年，高度适配区进一步扩展至阿克陶、叶城和阿勒泰部分地区，呈现“点状突破-面状扩展”的演化格局，系统协调与适配水平显著提升。



审图号为GS(2023)2767,底图边界无修改。

图3 新疆“人-地-粮”适配度时空演变

Fig. 3 Spatial-temporal evolution of human-land-food adaptability in Xinjiang

从时序演化看，新疆“人-地-粮”系统适配度提升呈现阶段性与结构性转移。2000年，占比较大的“基本适配”区在此后大量跃升为“中度”或“高度适配”区，体现出整体水平改善与协同增强。绿洲在干旱区的扩展与优化，不仅强化了资源配置与要素整合功能，也在一定程度上缓冲了人口与土地资源的矛盾，推动了区域人地关系由粗放开发向集约高效转型。但部分地区因资源劣势或人口过快集聚出现退化，系统波动与脆弱并存，协调基础薄弱。总体而言，适配性提升主要受到人口结构优化、土地利用效率提高与农业科技进步的协同驱动，但区域差异依旧显著，南疆部分地区人地矛盾和粮食保障压力仍突出。

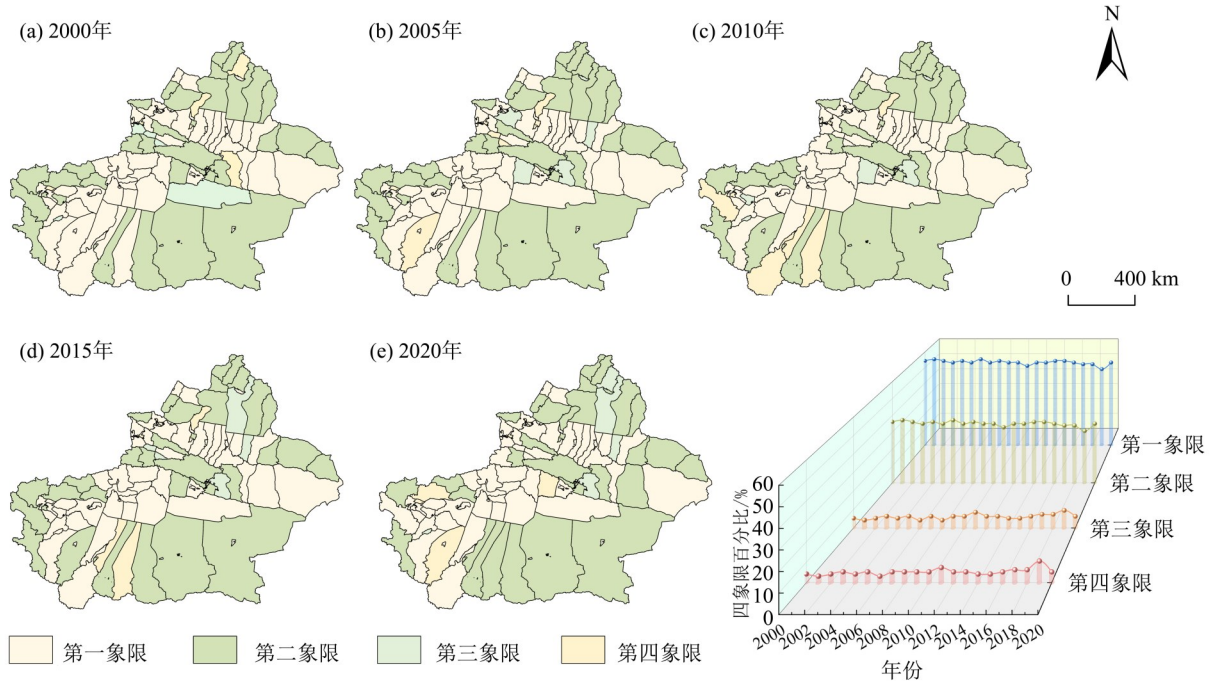
3.2 “人-地-粮”综合发展指数与适配度关系演变

3.2.1 基于四象限模型的关系评价 本研究基于

“人-地-粮”系统综合发展水平与系统适配度构建四象限模型，对2000—2020年新疆地区的系统协调格局进行动态识别与类型划分，揭示了区域系统演化的显著异质性与结构性分化趋势。整体来看，第一象限区域在研究期内始终占据主导地位，占比维持在48%~56%，表征出部分区域在实现较高经济社会发展水平的同时，系统内部各要素之间呈现出较强的协同耦合特征。然而，长期序列数据亦表明，该类区域占比呈现一定波动趋势，2011和2019年的占比分别为51.06%和48.94%，显示部分地区的资源环境承载与系统适配性面临结构性紧张(图4)。库尔勒、昌吉、吉木萨尔等地在多数年份稳定处于第一象限，表现出较强的系统稳定性与协调性，可视为系统最优类型。第二象限区域长期稳定存在，占比维持在30%~38%，反映出这类区域在资源配置效率与

系统内部结构方面具有潜在优势,具备较高的发展弹性与转型空间,北屯、巩留、泽普等地是系统“失衡型增长”的典型,发展较快但系统适配性不足。第三与第四象限的区域比例总体偏低,且末、和田、哈

巴河等地处于第三象限,其系统内存在结构性失衡问题,长期处于发展滞后、适配不足的双重困境之中;第四象限则受限于经济基础薄弱、产业体系不完善等因素,整体发展水平相对滞后(图5)。



审图号为GS(2023)2767,底图边界无修改。

图4 新疆“人-地-粮”系统四象限占比

Fig. 4 Quadrant distribution of the human-land-food system in Xinjiang

3.2.2 关系状态的转移概率 为揭示“人-地-粮”系统在新疆的协调演化机制,本研究基于2000—2020年地级单元的象限变化,构建了四象限马尔科夫转移概率矩阵,分析系统状态的时序转移特征(图6)。研究表明,系统整体演化具有较强的稳定性和路径依赖性,不同区域的跃迁规律差异显著。第一象限表现出最高的稳定性,资源配置高效。第二象限自维持概率为55%,部分区域在快速城镇化和工业扩张背景下,面临资源约束和耕地压力,系统协调性下滑,但随着基础设施和制度优化,部分地区呈现向更优状态跃迁的趋势。第三象限自维持概率高达94%,反映出路径依赖效应,缺乏外部干预或突破,演化动力不足,短期内难以转型。第四象限自维持概率为75%,但存在13%的退化风险,表明其尽管资源适配较好,但由于经济和产业支撑不足,发展动能未激活,存在结构良性、功能低效的特征。总体来看,第一象限主导系统格局,第二象限具有跃升潜力,第三象限固化趋势明显,第四象限面临退化风险。

3.3 “人-地-粮”系统的障碍因素诊断

根据2000—2020年新疆人地粮复合系统中各子系统障碍度的动态变化结果,耕地和粮食子系统的障碍度分别从2000年的45%和43%下降至2020年的40%和25%,制约作用持续减弱;相反,人口子系统的障碍度从12%上升至35%,其对系统协调发展的制约日益显著(图7)。从障碍因子的时序演化看(图8),2000年,系统协调性主要受粮食子系统影响,C11(单位面积粮食产量)为最大障碍,表明粮食供给不足、耕地技术落后与人口规模偏小是制约发展的核心问题;2005年,B22(农业用电量)、A22(乡村从业人员)和B12(总播种面积)居于主要障碍位置,反映出农业能源利用结构不合理、劳动力供给不足与耕地资源压力上升;2010年,人口增长叠加粮食需求扩大,A11(年末常住人口数)、C23(第一产业产值)和B12(总播种面积)成为主要瓶颈,突出表现为资源供需矛盾加剧;2015年则面临粮食供给不足、农业能效低和人口增长引发的资源紧张三重压力,其中C12(粮食产量5年平均)、B22(农业用电

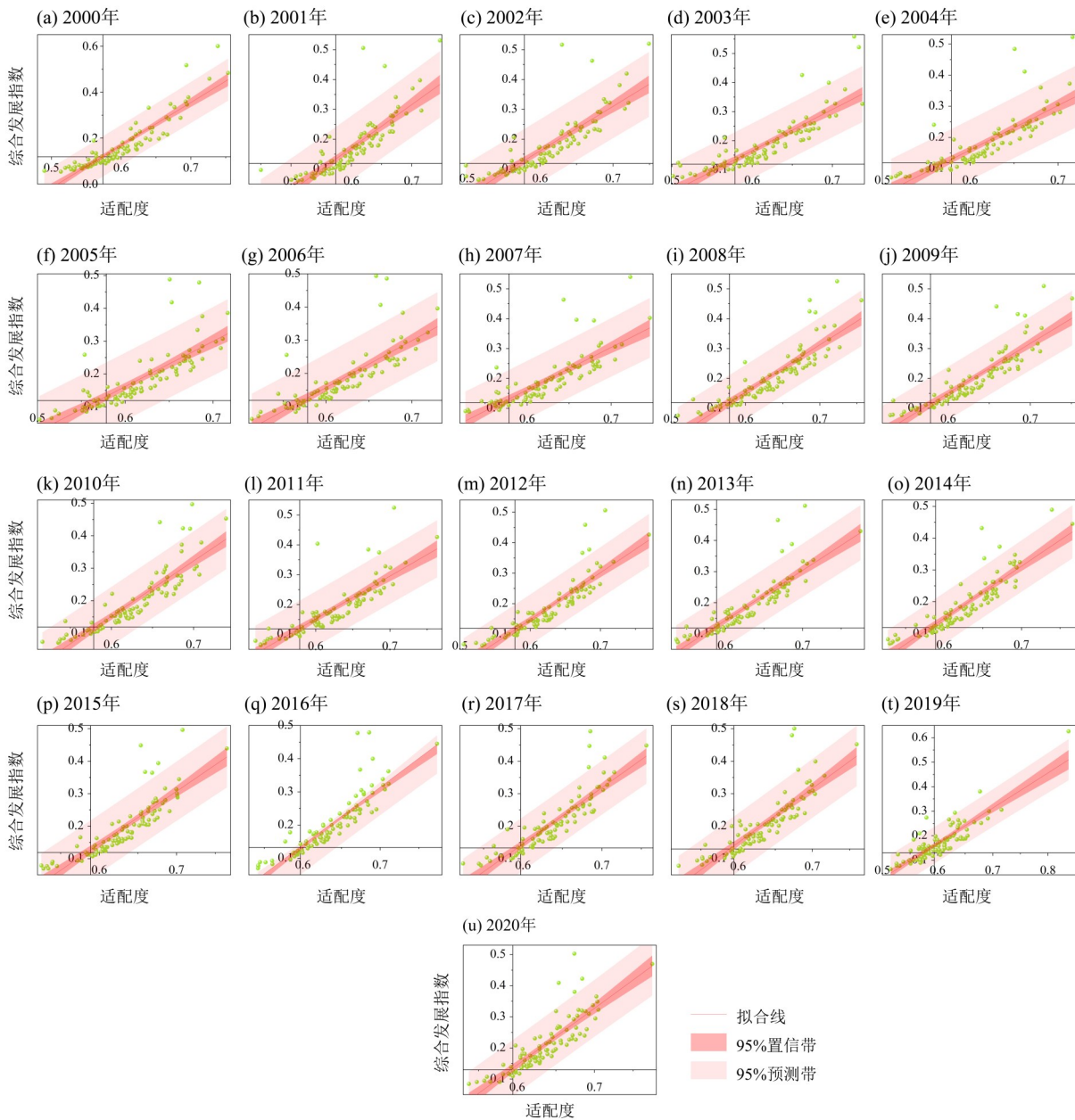


图5 新疆“人-地-粮”系统综合发展指数和适配度

Fig. 5 Comprehensive development index and adaptation of the human-land-food system in Xinjiang

量)和A11(年末常住人口数)为主要障碍;至2020年,B31(农业化肥施用量)、C23(第一产业产值)和B12(总播种面积)等指标显示出生态压力增强与粮食生产效率偏低趋势。总体而言,新疆人地粮复合系统协调发展的制约因素已由早期以粮食与耕地为主,逐步转向人口、资源、生态压力叠加的新格局,人口系统的障碍性显著上升,成为当前制约系统协调演进的关键瓶颈。

4 政策建议与不足

第一、激发土地资源潜力,推动粮食系统绿色

转型,提升空间功能与生态可持续性。尽管新疆耕地子系统基础薄弱,但其增速最快,潜力巨大,是推动区域跃迁的重要支点。应将农地整治与农业现代化、绿色转型统筹推进(宋英等,2025),在现有高标准农田建设基础上,重点推广节水灌溉、水肥一体化、低碳耕作和农药化肥减量等技术,提高单产和资源利用效率。引导耕地体系由单一生产功能向“生产-生态-安全”等多元功能拓展,在保障粮食产量的前提下兼顾生态修复与碳减排目标,通过优化土地利用方式与农业技术路径,为新疆“人-地-粮”系统长期协调发展提供支撑。

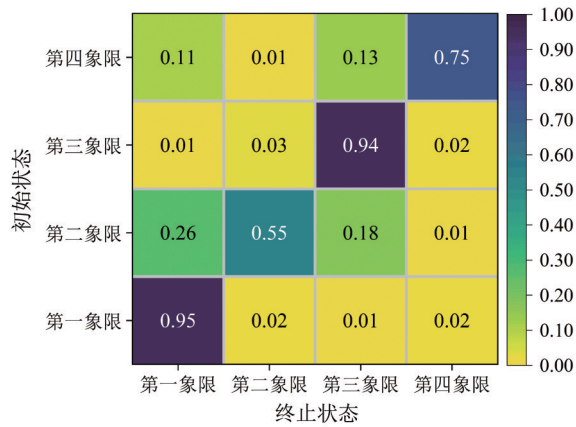


图 6 新疆“人-地-粮”系统马尔科夫转移矩阵概率
Fig. 6 Probability of Markov transition matrix for the human-land-food system in Xinjiang

第二、优化人口资源配置与生态承载的动态调控机制,促进区域流动性与协调发展。研究表明,近年来新疆“人-地-粮”系统协调性的主要瓶颈已由耕地与粮食供给问题转向人口系统结构性压力。人口既是驱动力也是潜在约束因素,应构建人口与资源环境之间的动态调控机制,防止优势区域人口过度集聚、边缘地区人口流失,促进区域流动性与

协调发展,构建“人-地-粮”三元良性循环。在高适配-高发展区域推动“农业-产业园区-就业”联动,提高农村人口本地吸附与就业转化能力。在低适配-低发展区域应重点提升农村人口的综合能力,完善农村基础公共服务,提升农业劳动力素质和人地适配性。在双碳背景(Han et al., 2024)与生态红线约束(Wei et al., 2023)下,提升人口与资源配置精度,增强系统可持续性与抗风险能力。

第三、构建差异化的“人-地-粮”治理框架,提升空间韧性与区域跃迁能力。新疆“人-地-粮”系统适配性整体改善,但空间差异显著。部分地区长期滞留于“低适配-低发展”象限,系统失衡突出。应依据四象限模型,因地制宜实施分区治理。在“高发展-高适配”区(吉木萨尔、额敏等),应聚焦优化系统结构和推动高质量增长,围绕“高标准农田-农产品深加工”优化“地-粮-产业”链条,在县级工业园区周边设立粮食加工分拨中心、冷链物流枢纽,并加强产业与就业结构互动。在“高发展-低适配”区(北屯、轮台等),应建立资源与承载能力评估机制,推进农业面积规模化与土地承载监测,防止高增长带来的生态与资源过度透支。在“低适配-低发展”区(布尔津、尼勒克等),建议优先完善基础

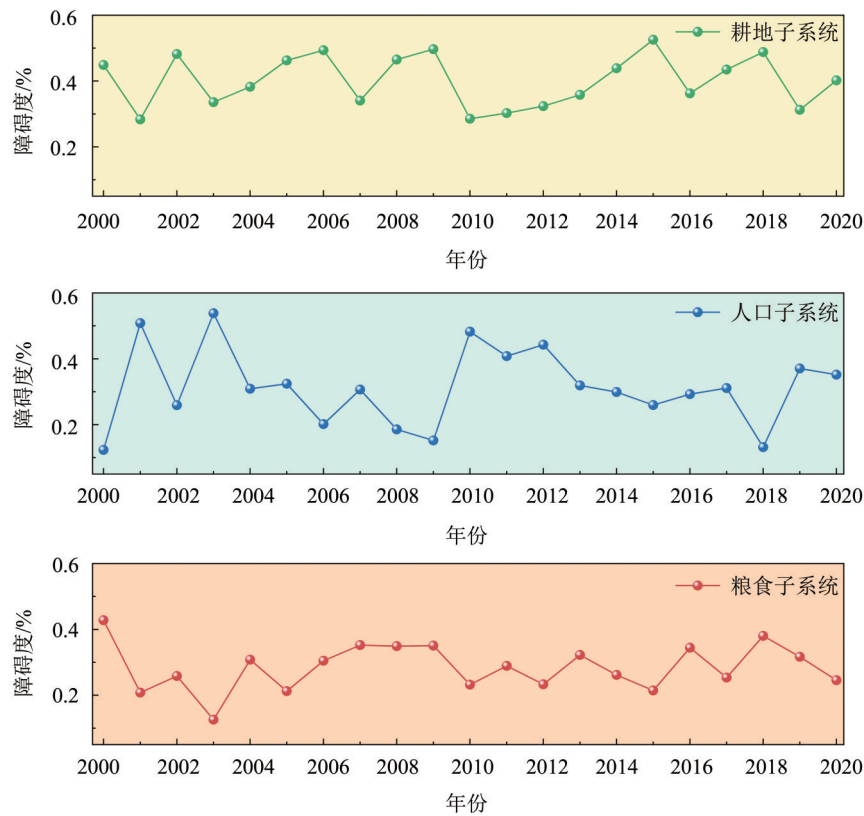


图 7 子系统对复合系统适配度的障碍程度
Fig. 7 Obstruction degree of subsystems to the adaptability of the composite system

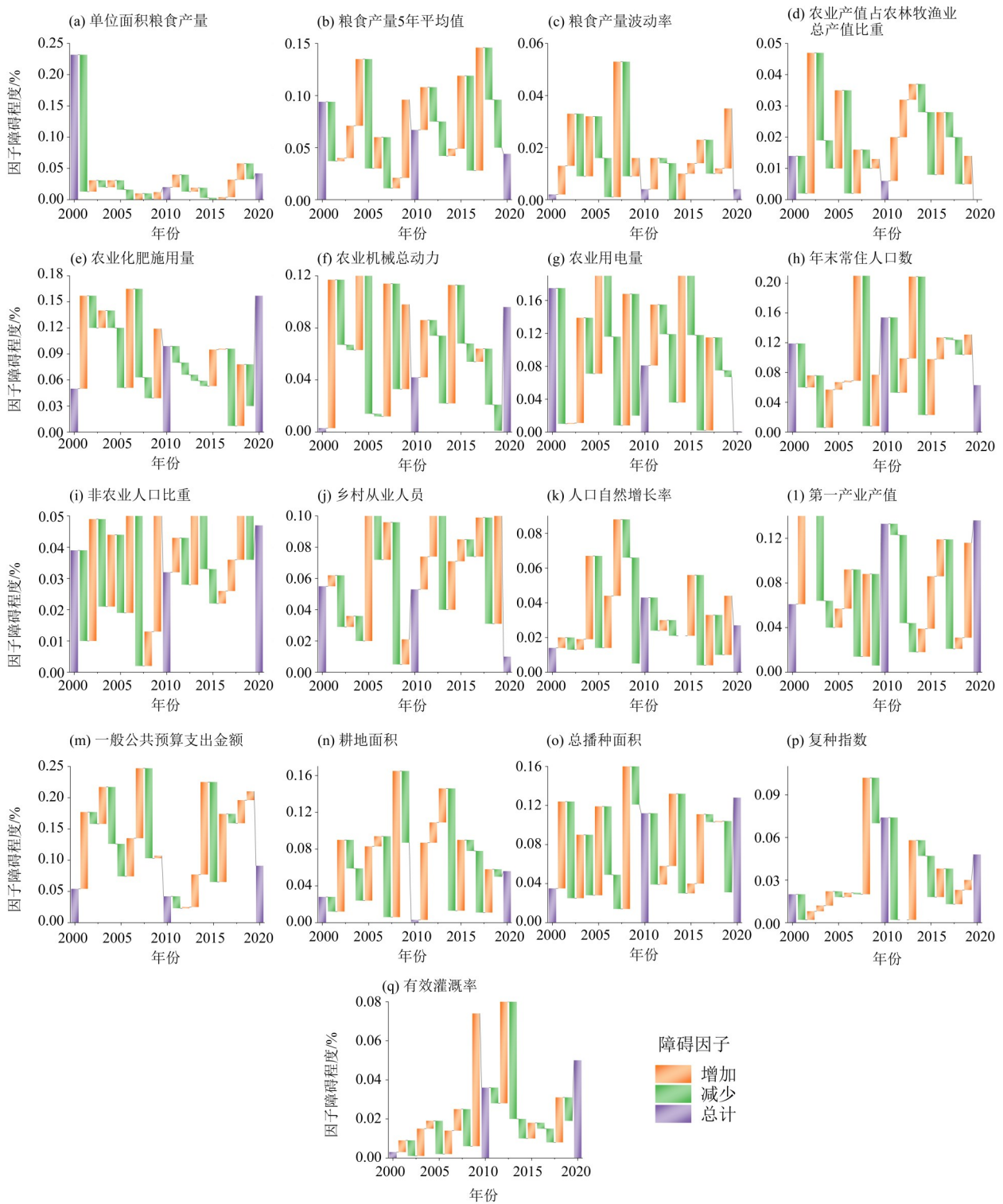


图 8 各因子对适配度的障碍程度

Fig. 8 Degree of obstacle of each factor to adaptability

设施和公共服务,缓解系统失衡并夯实系统的物质基础。在“高适配-低发展”区域(伊宁、和田等),建议通过农业机械化推广、土地流转示范、农产品加工引导等手段,将耕地优势向产业功能转化,缓解适配性分化,提升整体空间协调与系统跃迁能力。

此外,本研究仍然存在不足之处,构建的适配度模型虽融合了耦合协调度与匹配性指标,但未充分考虑气候变化(Zhang et al., 2024; 慈晖等, 2024)和水资源等外部变量的影响(李长松等, 2022),这可能限制了系统适配演化机制的整体解释力。现

有研究指出干旱区的粮食生产与资源约束呈现复杂的非线性关系(曹召丹,2023),气候变化和水资源短缺应当纳入分析框架(张书海等,2020),以更全面地理解“人-地-粮”系统的适配性。因此,未来应进一步细化对人口、耕地、粮食三者间复杂互动的分析,并考虑外部因素对系统适配性的长期影响。

5 结论

本研究基于2000—2020年新疆“人-地-粮”复合系统,系统探究了综合发展水平与适配度的时空演化特征,揭示了区域协调发展的空间格局及内在障碍因子。研究结果表明:

1)2000—2020年,新疆“人-地-粮”复合系统整体呈现“稳步提升、协同增强”的发展趋势,系统综

合发展指数年均增长1.39%,但子系统间发展不均衡,人、地、粮3个子系统的年均增长率分别为0.32%、1.99%和1.90%。系统适配度的时空演化呈现出“点状突破-面状扩展”的重构特征,天山北坡城市群和伊犁河谷等地维持较高适配水平,南疆部分地区则因资源错配与结构脆弱性,适配度提升缓慢,区域发展差异显著。

2)第一象限(高适配-高发展)区域始终主导系统演化进程,具备较强的系统稳定性与协调能力;第二象限(低适配-高发展)区域具有较高发展弹性与跃升潜力;第三、第四象限区域则受资源约束与结构性障碍影响,存在发展固化甚至退化风险。

3)制约系统协调演进的核心矛盾已由“耕地-粮食”转向“人口-耕地”,其中人口系统障碍度显著上升,人口和耕地成为当前协调发展的主要制约因素。

参考文献:

- 贺超,方创琳,2007.长江流域耕地-粮食-人口复合系统的动态分析及调控途径[J].中国人口·资源与环境,17(2):115-120.
- 曹召丹,2023.干旱区“水-粮食-环境”纽带系统水文经济优化[D].杭州:浙江大学.
- 陈柯斯,2008.报酬递减规律在土地集约利用中的应用[J].商业文化(学术版)(6):152.
- 慈晖,张强,张江辉,等.1961—2010年新疆极端气温时空演变特征研究[J].中山大学学报(自然科学版),2015,54(4):129-138.
- 樊艳翔,贺灿飞,罗业典,等,2025.人口转型、耕地利用绿色转型与粮食全要素生产率适配格局及驱动因素——以滇中城市群县域为例[J/OL].资源科学.(2025-06-24).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3868.N.20250623.1606.006.html>.
- 冯晓森,于江海,梁彦庆,2005.河北省人口-耕地-粮食系统动态分析预测[J].河北师范大学学报,29(1):101-105.
- 封志明,杨艳昭,游珍,2014.中国人口分布的土地资源限制性和限制度研究[J].地理研究,33(8):1395-1405.
- 封志明,杨艳昭,张晶,2008.中国基于人粮关系的土地资源承载力研究:从分县到全国[J].自然资源学报,23(5):865-875.
- 国家统计局,2021.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社:3-74.
- 何宜庆,易行,潘细牙,等,2016.长江经济带人口-耕地-粮食复合系统协调性时空演变[J].南昌大学学报(理科版),40(4):381-388+394.
- 贺小荣,石彩霞,周国华,2024.长江经济带城市规模与城市宜居性的时空演化及适配关系[J].地理研究,43(7):1769-1789.
- 黄蓉,周毓栋,傅志军,2018.基于人粮关系的宝鸡市耕地资源人口承载力变化[J].贵州农业科学,46(6):167-171.
- 孔祥斌,2011.粮食安全:不能忽视耕地的作用——对茅于軾先生的“18亿亩红线与粮食安全无关”的回应[J].中国土地(6):57-60.
- 李长松,周玉玺,2022.中国粮食主产区农业水资源脆弱性与粮食安全时空耦合关系研究[J].生态与农村环境学报,38(6):722-732.
- 李建新,杨珏,姜楠,2019.结构差异视角下的新疆人口转变[J].西北人口,40(3):23-33.
- 李玉恒,黄惠倩,宋传奎,2020.京津冀地区乡村人地关系演化研究[J].中国土地科学,34(12):96-104.
- 梁鑫源,金晓斌,韩博,等,2022.藏粮于地背景下国家耕地战略储备制度演进[J].资源科学,44(1):181-196.
- 刘春卉,聂文静,赵晓彤,等,2022.农村外出务工人员承包地处置方式的区域差异与影响因素——基于社会融入视角[J].自然资源学报,37(2):424-439.
- 刘彦随,2020.现代人地关系与人地系统科学[J].地理科学,40(8):1221-1234.
- 马彩虹,赵先贵,2006.人口-耕地-粮食互动关系与区域可持续发展——以陕西省为例[J].干旱区资源与环境,20(2):50-54.
- 任平,周介铭,王广杰,等,2005.四川省人口、耕地和粮食可持续发展研究[J].国土与自然资源研究(4):30-31.

- 宋英, 来风兵, 黄凯铃, 等. 近 30 年塔克尔莫乎尔沙漠化土地的时空格局演变及影响因子[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 2025, 64(6): 149-159.
- 王金伟, 王启翔, 陆大道, 2024. 数字经济、旅游经济与新型城镇化时空耦合格局及影响因素——以长三角地区为例[J]. 地理研究, 43(12): 3301-3326.
- 王兆峰, 张先甜, 2024. 中国人一地一粮复合系统适配性评价及影响[J]. 地理学报, 79(3): 779-799.
- 温金祥, 龙牧华, 宇振荣, 等, 1994. 山东省人口一耕地一粮食系统的预测分析及对策研究[J]. 生态经济, 10(5): 34-38.
- 新疆生产建设兵团统计局, 2021. 新疆生产建设兵团统计年鉴(2001—2021)[M]. 新疆: 新疆生产建设兵团统计局: 19-352.
- 徐佳利, 周太东, 2024. 全球粮食危机与中国应对策略[J]. 国际经济合作(2): 32-43+92.
- 杨伟州, 郭硕, 于莉, 等, 2016. 沧州市人口-耕地-粮食协调发展关系时空变异[J]. 水土保持研究, 23(1): 253-259.
- 于海淋, 姜海玲, 张舒涵, 等, 2025. 粮食和生态双重视角下耕地资源安全时空格局演变[J/OL]. 遥感技术与应用: 1-12. (2025-06-04). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1099.tp.20250603.0914.002.html>.
- 余玉洋, 李晶, 2024. 秦巴山区生态系统服务供需与人类活动强度的时空变化及其耦合关系[J]. 生态学报, 44(19): 8764-8773.
- 张书海, 阮端斌, 2020. 资源跨区域流动视角下的承载力评价——一个动态评价框架及其应用[J]. 自然资源学报, 35(10): 2358-2370.
- 张元红, 刘长全, 国鲁来, 2015. 中国粮食安全状况评价与战略思考[J]. 中国农村观察, (1): 2-14+29+93.
- 郑军, 仲嘉维, 2025. 中国农村三产融合与农业绿色转型系统适配性评价及影响因素[J]. 自然资源学报, 40(10): 2701-2717.
- 钟洋, 董秀军, 2025. 中部地区新型城镇化与乡村全面振兴耦合协调的时空演化及影响因素[J]. 地理学报, 80(8): 2159-2180.
- CUI X, FANG C, LIU H, et al, 2019. Assessing sustainability of urbanization by a coordinated development index for an Urbanization-Resources-Environment complex system: A case study of Jing-Jin-Ji region, China[J]. Ecol Indic, 96: 383-391.
- GE D, LONG H, ZHANG Y, et al, 2018. Farmland transition and its influences on grain production in China[J]. Land Use Policy, 70: 94-105.
- GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al, 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. Science, 327(5967): 812-818.
- GUO A, YUE W, YANG J, et al, 2023. Cropland abandonment in China: Patterns, drivers, and implications for food security[J]. J Clean Prod, 418: 138154.
- HAN F, KASIMU A, WEI B, et al, 2024. Surplus or deficit? Quantification of carbon sources and sinks and analysis of driving mechanisms of typical oasis urban agglomeration ecosystems[J]. J Environ Manag, 371: 123058.
- WANG D, LI Y, YANG X, et al, 2021. Evaluating urban ecological civilization and its obstacle factors based on integrated model of PSR-EVW-TOPSIS: A case study of 13 cities in Jiangsu Province, China[J]. Ecol Indic, 133: 108431.
- WANG K, MA H, FANG C, 2023. The relationship evolution between urbanization and urban ecological resilience in the Northern Slope Economic Belt of Tianshan Mountains, China[J]. Sustain Cities Soc, 97: 104783.
- WEI B, KASIMU A, FANG C, et al, 2023. Establishing and optimizing the ecological security pattern of the urban agglomeration in arid regions of China[J]. J Clean Prod, 427: 139301.
- ZHANG X, KASIMU A, LIANG H, et al, 2024. Mechanism analysis of vegetation phenology in an urban agglomeration in an arid zone driven by seasonal land surface temperatures [J]. Urban Clim, 53: 101795.
- ZHU C, FANG C, ZHANG L, 2023. Analysis of the coupling coordinated development of the Population-Water-Ecology-Economy system in urban agglomerations and obstacle factors discrimination: A case study of the Tianshan North Slope Urban Agglomeration, China [J]. Sustain Cities Soc, 90: 104359.

(责任编辑 江 睿)