

基于人粮关系的陕西省耕地资源 承载指数时空变化与预测

王 祯, 吴金华, 李嘉会, 魏金戈

(长安大学 土地工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 分析陕西省 2010—2019 年耕地承载指数的时空变化特征, 并对 2020—2025 年的耕地承载指数与人粮关系进行预测, 为该区国土空间规划和耕地保护政策制定提供理论参考。[方法] 基于统计年鉴面板数据, 运用重心迁移模型、地理探测器、GM(1,1)模型等方法开展研究。[结果] ①2010—2019 年陕西省总体粮食产量、人口、耕地承载力都有所上升, 耕地资源承载指数(LCCD)小幅度波动下降, 人粮关系稍微缓和; 各地级行政区耕地资源承载指数波动较大, 变化剧烈的时间段为 2010—2011 年、2014—2015 年、2017—2018 年。②2010—2019 年陕西省耕地承载指数区域差异明显, 呈现出南高北低的空间格局, 西安市、杨凌示范区为高值中心, 榆林市为低值中心; 从分区角度, 耕地资源承载指数排序为: 陕南地区 > 关中地区 > 陕北地区。10 a 间陕西省的耕地资源承载指数重心位于咸阳市境内, 总体迁移方向为从东北向西南, 指向西安市与杨凌示范区。2013—2015 年、2017—2018 年两个时间段的路径存在明显的突变, 与各地级行政区耕地承载指数的消长有关。③陕西省耕地资源承载指数时空变化最主要的影响因素是人均耕地面积, 平均解释率为 69.21%。④预测 2020—2025 年陕西省资源承载指数会小幅下降, 空间格局仍为南高北低, 除铜川市—渭南市、榆林市 2 个低值中心外, 其余地级行政区的人粮关系较为紧张。[结论] 陕西省人粮关系较为紧张, 各地级行政区的耕地资源承载指数变化呈现波动性, 且空间异质性较强。陕西省耕地资源承载指数主要受人均耕地面积影响。

关键词: 人粮关系; 耕地资源承载指数; 重心迁移模型; 地理探测器; 陕西省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)02-0174-10

中图分类号: F301.21

文献参数: 王祯, 吴金华, 李嘉会, 等. 基于人粮关系的陕西省耕地资源承载指数时空变化与预测[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 174-183. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.024; Wang Zhen, Wu Jinhua, Li Jiahui, et al. Temporal and spatial changes and prediction of cultivated land resource carrying capacity index in Shaanxi Province based on human-grain relationship [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 174-183.

Temporal and Spatial Changes and Prediction of Cultivated Land Resource Carrying Capacity Index in Shaanxi Province Based on Human-grain Relationship

Wang Zhen, Wu Jinhua, Li Jiahui, Wei Jinge

(School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial changes of the cultivated land resource carrying capacity index of Shaanxi Province from 2010 to 2019 were analyzed, and the cultivated land resource carrying capacity index and human-grain relationship were predicted from 2020 to 2025, in order to provide theoretical reference for territorial spatial planning and cultivated land protection policy in Shaanxi Province. [Methods] Based on the panel data of the statistical yearbook, the research was carried out by using the center of gravity migration model, Geodetector and GM(1,1) model. [Results] ① From 2010 to 2019, the overall grain production, population, and cultivated land carrying capacity of Shaanxi Province increased, while the LCCI (land carrying capacity index) fluctuated slightly and decreased, and the human-grain relationship slightly eased.

收稿日期: 2021-09-30

修回日期: 2021-11-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于坡位特征的黄丘区坡面植被恢复评价及模型构建”(41871190)

第一作者: 王祯(1996—), 男(汉族), 云南省昆明市人, 硕士研究生, 研究方向为耕地利用与保护。Email: 724492594@qq.com。

通讯作者: 吴金华(1965—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 教授, 主要从事土地信息系统与土地利用规划方面的研究工作。Email: jing-huaw@chd.edu.cn。

The LCCI of different administrative region fluctuated greatly, and the time periods of the drastic changes occurred from 2010 to 2011, 2014 to 2015, and 2017 to 2018. ② From 2010 to 2019, there were great regional differences in the LCCI in Shaanxi Province, showing a spatial pattern of high in the south and low in the north. Xi'an City and Yangling Agricultural Hi-tech Industries Demonstration Zone were high-value centers, while Yulin City was a low-value center. From the perspective of zoning, the order of the LCCI was Southern Shaanxi region > Guanzhong region > Northern Shaanxi region. The center of gravity of the LCCI of Shaanxi Province in the past 10 years was located in Xianyang City, and the overall migration direction was from northeast to southwest, pointing to Xi'an City and Yangling Agricultural Hi-tech Industries Demonstration Zone. There were obvious mutation in the path between 2013—2015 and 2017—2018, which was related to the fluctuation of the LCCI of different administrative regions. ③ The most important factor affecting the temporal and spatial changes of the LCCI in Shaanxi Province was the per capita cultivated land area, with an average explanatory rate of 69.21%. ④ It was predicted that the LCCI of Shaanxi Province would decline slightly from 2020 to 2025, and the spatial pattern would remain high in the south and low in the north. Except for the two low-value centers of Tongchuan City and Weinan City, Yulin City, the human-grain relationship in other administrative regions were more tense. [Conclusion] The human-grain relationship in Shaanxi Province is relatively tense, and the changes in the cultivated LCCI of various administrative regions show volatility and strong spatial heterogeneity. The cultivated LCCI in Shaanxi Province is mainly affected by the area of cultivated land per capita.

Keywords: human-grain relationship; cultivated land resource carrying capacity index (LCCI); gravity migration model; Geodetector; Shaanxi Province

耕地资源是粮食生产的空间与物质基础,是人类赖以生存的重要资源。然而随着城镇化进程的加快,耕地数量减少、耕地质量下降、耕地污染等问题已经威胁到耕地粮食生产能力^[1]。2020年12月16日至18日举行的中央经济工作会议将耕地问题作为2021年8项重点任务之一,并指出^[2]：“保障粮食安全,关键在于落实藏粮于地,藏粮于技战略。坚决遏制耕地‘非农化’,防止‘非粮化’,规范耕地占补平衡”。这表明耕地与粮食问题越来越成为关乎国家发展和人民生活的关键问题^[3]。

土地承载力是指一定地区的土地所能持续供养的人口数量,即土地人口承载量。其实质是研究人口消费与食物生产、人类需求与资源供给之间的平衡发展问题^[4]。就本质而言,粮食由耕地生产,因此也有部分学者^[1,3,5-12]将土地承载力称作耕地承载力。耕地承载力研究由来已久,国内外学者对耕地承载力的研究主要集中在测算^[3,5-12]与预测^[3,5-9,13-17]。在测算方面,主要方法包括基于现实粮食产量^[3,5-7,9,13-14,18-20]与基于生产潜力的农业生态区域法^[21-24]。在预测方面,常用的方法包括灰色系统预测模型^[5-7,15]、平均增长法^[3,13]、一元线性回归模型^[3,14]。目前的观点认为,中国可以在不给全球可持续发展带来压力的情况下,在空间容量和粮食生产方面实现基本自给自足^[25]。但中国的人粮关系在空间上存在异质性,区域与区域的差异明显。综合来看,国内基于现实粮食

产量的耕地承载力研究主要以多时点的测算与预测为主,对区域内耕地承载力的空间特性研究较少;同时现有研究对耕地承载力与耕地承载指数的影响因素的定量化分析较少。

鉴于此,本文以陕西省为研究区,运用重心迁移模型、地理探测器、灰色系统预测模型等方法,分析陕西省2010—2019年耕地承载指数的时空变化特征,找出影响耕地资源承载指数的关键因素,按不同标准对陕西省2020—2025年的耕地承载指数与人粮关系进行预测,进而根据分析结果,对陕西省11个地级行政区提出差异化的人粮关系改善对策。研究结果可为城市发展方向、国土空间规划、耕地保护政策制定提供参考。

1 研究区概况

陕西省位于我国西北内陆,介于东经 $105^{\circ}29'$ — $111^{\circ}15'$,北纬 $31^{\circ}42'$ — $39^{\circ}35'$,总面积 $2.06 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。地势南北高,中间低,根据自然地理环境与社会文化差异,可将陕西省进一步划分为陕北、关中、陕南3个区域。根据《陕西省统计年鉴》,2010年以来,全省常住人口增长迅速,其中西安市是人口增长的主要城市,2010—2019年共增长156.91万人,总增长率为18.60%。2019年末陕西省常用耕地面积 $3.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$,与2010年相比增加 $1.50 \times 10^5 \text{ hm}^2$,总增长率为5.24%。

陕西省 10 a 间粮食产量增加 6.62×10^5 t, 总增长率为 5.68%。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》将我国的农业生产划分为粮食生产功能区、重要农产品保护区、复种区 3 类。陕西省主要是粮食生产功能区, 集中分布在关中平原与榆林市西部, 其他地区为零星分布^[26]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究使用的陕西省及各地级行政区的耕地面积、粮食产量、人口、地区生产总值等数据均来源于各年份的《陕西省统计年鉴》。其中, 耕地面积使用的是年末常用耕地面积; 粮食产量包括谷物、薯类和豆类等, 不包括林果、蔬菜与其他经济作物; 人口数据使用的是常住人口。

2.2 研究方法

2.2.1 耕地资源承载力与耕地资源承载指数 耕地资源承载力反映的是区域人口与粮食的关系, 可以用一定人均粮食年消费水平下, 区域粮食生产力所能供养的人口规模来度量, 其计算表达式为:

$$LCC = \frac{G}{G_{PC}} \quad (1)$$

式中: LCC 表示耕地资源承载力(人); G 表示粮食产量(kg); G_{PC} 为人均粮食年消费量标准(kg/人)。根据联合国粮农组织公布的粮食人均年消费标准可分为温饱型(400 kg/人)、小康型(450 kg/人)和富裕型(500 kg/人)3 级^[13], 其中 400 kg/人可达到人体营养安全要求^[18]。因此在计算 2011—2019 年陕西省耕地资源承载力时采用 400 kg/人的标准。

耕地资源承载指数模型由封志明等^[18]构建, 即现实人口与基于人粮关系的耕地可承载人口的比值, 可以揭示耕地承载力与现实人口的关系, 计算表达式为:

$$LCCI = \frac{P_a}{LCC} \quad (2)$$

式中: LCCI 为耕地资源承载指数; P_a 表示现实人口数量(人)。

2.2.2 重心迁移模型 运用重心迁移模型来表征陕西省耕地资源承载指数重心的变化及迁移路径, 以分析耕地资源承载指数的空间变化规律。迁移路径的方向与长度能在一定程度上反映耕地资源承载指数增加的空间特征与强度, 其计算表达式为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n LCCI_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n LCCI_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n LCCI_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n LCCI_i} \quad (3)$$

式中: X, Y 分别代表某年某地级行政区的重心的经纬度坐标; n 代表地级行政区数量; $LCCI_i$ 代表某年某地级行政区的耕地资源承载指数; X_i, Y_i 代表某地级市的几何中心地理坐标。

2.2.3 分异及因子探测器 运用地理探测器中的因子探测器研究陕西省耕地资源承载指数时空变化的影响因素。地理探测器是探测空间分异性、揭示其背后驱动力的一组统计学方法。其核心思想是假设: 如果某个自变量对某个因变量有重要影响, 那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[27-28]。分异及因子探测器是其中一种方法, 可以探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。用 q 值度量, 计算表达式为^[29]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中: $h = 1, \dots, L$ 为因子 X 的分层; N_h, N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强, 反之则越弱。极端情况下, q 值为 1 表明因子 X 完全控制了 Y 的空间分布, q 值为 0 则表明因子 X 与 Y 没有任何关系, q 值表示 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y 。

2.2.4 灰色预测模型 灰色系统由邓聚龙^[30]提出, 是指在所研究的对象或数据并不完备或确切, 具有灰色特性的系统。一般的社会经济系统都是灰色系统。采用灰色系统预测模型 GM(1, 1) 分别对陕西省各地级行政区的人口与粮食产量进行预测, 计算出各地级行政区每年的耕地资源承载指数, 作为人粮关系预测的依据。其基本步骤是先对原始数据 X_0 进行累加, 使其变为有规律的生成数列 X_t , 用微分方程求解得出预测模型函数^[7]:

$$\hat{X}_t^{(1)} = [x_0^{(0)} - \frac{u}{a}] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (5)$$

式中: $t = 1, 2, \dots, n$; u, a 为 GM(1, 1) 模型的参数估计值, 采用最小二乘法进行估计。构建 GM(1, 1) 模型前需要对原始数据进行级比值检验, 当所有原始数据均落于规定的级比值区间中, 才适合构建 GM(1, 1) 模型, 否则需要进行平移转换。GM(1, 1) 模型要求数据序列变化平缓、符合指数函数性质^[31], 因此构建模型后还需要进行后验差比检验与模型残差检验, 一般要求后验差比小于 0.65, 相对误差小于 0.20, 可达到精度要求。

2.2.5 平均增长法 采用平均增长法对于无法通过后验差比检验与残差检验的 GM(1, 1) 模型进行预

测。平均增长法是一种指数型增长,在人口预测^[32]、耕地面积预测^[33]中都有应用,其计算公式为:

$$P = N \times (1 + R)^n \quad (6)$$

式中: P 为预测值; N 为预测初始年份的实际值; R 为平均增长率; n 为预测年数。

3 结果与分析

3.1 耕地资源承载指数的时空变化

3.1.1 人粮关系划分标准 根据封志明等^[18]的研究,结合陕西省实际,从粮食供需维度,将陕西省及其各地级行政区每年的人粮关系分为供给过剩、供大于需、供需平衡、需大于供、需求过剩 5 类。各类人粮关系对应的耕地资源承载指数详见表 1。

表 1 各类人粮关系对应的耕地资源承载指数

耕地资源人口承载指数	人粮关系
$LCCI \leq 0.5$	供给过剩
$0.5 < LCCI \leq 0.875$	供大于需
$0.875 < LCCI \leq 1.125$	供需平衡
$1.125 < LCCI \leq 1.5$	需大于供
$LCCI > 1.5$	需求过剩

3.1.2 陕西省耕地承载指数总体变化 总体来看,10 a 间陕西省的粮食产量、人口、耕地承载力都有所上升,耕地承载指数下降。耕地承载指数在 1.23~1.28 之间波动,且波动幅度不大。原因是虽然陕西省的人口持续增长,但粮食产量一直处于波动的状态,导致了耕地承载力与耕地资源承载指数的波动。从人粮关系的角度,10 a 间陕西省人粮关系始终为需大于供,人粮关系亟待改善。2010—2019 年陕西省耕地承载指数变化详见表 2。

表 2 陕西省 2010—2019 年耕地承载指数

年份	粮食产量/ 10 ⁴ t	人口/ 万人	耕地承载力/ 万人	耕地承载 指数	人粮关系
2010	1 164.90	3 726.67	2 912.25	1.28	需大于供
2011	1 194.70	3 735.23	2 986.75	1.25	需大于供
2012	1 245.10	3 742.60	3 112.75	1.20	需大于供
2013	1 215.80	3 753.09	3 039.50	1.23	需大于供
2014	1 197.78	3 763.70	2 994.45	1.26	需大于供
2015	1 226.80	3 775.12	3 067.00	1.23	需大于供
2016	1 228.30	3 792.87	3 070.75	1.24	需大于供
2017	1 216.20	3 812.62	3 040.50	1.25	需大于供
2018	1 226.31	3 835.44	3 065.78	1.25	需大于供
2019	1 231.13	3 864.40	3 077.83	1.26	需大于供

3.1.3 陕西省耕地承载指数时空变化 2010—2019 年陕西省各地级行政区耕地承载指数变化如图 1 所示。从变化方向上来看,根据各地级行政区耕地承载指数

的时间变化,可将地级行政区分为上升型与下降型两类。下降型城市包括榆林市、铜川市,其余城市均为上升型。从变化趋势上来看,陕西省所有地级行政区的耕地承载指数都具有一定的波动性,变化较为剧烈的时间段为 2010—2011 年、2014—2015 年、2017—2018 年。2010 年—2011 年,各地级行政区粮食产量大幅下降,导致耕地承载指数上升。2014—2015 年,杨凌示范区、商洛市、榆林市、延安市的耕地承载指数发生了剧烈的变化,其中杨凌示范区、商洛市为下降,榆林市、延安市为上升。原因是该时间段 4 个地级行政区的人口数量均上升,杨凌示范区、商洛市粮食产量上升,榆林市、延安市粮食产量下降。2017—2018 年,杨凌示范区、西安市、安康市、商洛市、延安市的耕地承载指数明显上升,咸阳市、商洛市、榆林市发生明显下降。从分区角度,陕西省各分区及其内部的耕地承载指数都具有一定的差异性。2019 年陕北、关中、陕南的总体耕地承载指数分别为 0.68,1.42 和 1.48,大小关系表现为:陕南地区>关中地区>陕北地区。

3.1.4 陕西省人粮关系时空变化 2010—2019 年陕西省各地级行政区人粮关系变化如图 2 所示。陕西省耕地承载指数总体上呈现出的南高北低的基本格局,2014 年最明显,从南向北依次为需大于供、需求过剩、供需平衡、供大于需。除咸阳市外,其余地级行政区的人粮关系变化都具有一定的方向性,咸阳市的人粮关系经历了供需平衡→需大于供→供需平衡的变化,体现了耕地承载指数时间变化上的波动性。从 2010 年开始,西安市与杨凌示范区就是陕西省的高值中心,且一直处于需求过剩的状态;榆林市是低值中心,一直处于供大于需的状态;到 2019 年,榆林市的耕地承载指数为 0.51,逼近供给过剩的人粮关系。

3.1.5 陕西省耕地资源承载指数重心迁移 陕西省耕地资源承载指数重心迁移状况如图 3 所示。2010—2019 年陕西省的耕地资源承载指数重心始终位于咸阳市境内,咸阳市与西安市交界处以北。10 a 间重心的总体迁移方向为从东北向西南,指向西安市与杨凌示范区,表明相对于其他方位,西南方向的地级行政区耕地资源承载指数增加得更剧烈。重心逐年迁移路径中,2013—2015 年、2017—2018 年两个时间段的路径存在明显的突变。2013—2014 年,商洛市的耕地承载指数由 1.44 上升至 1.80,上升比例为 24.88%,为该时间段所有地级行政区最高,导致重心向其所在的东南方向迁移。2014—2015 年,商洛市的耕地承载力回归到之前的水平,而这一时间段西安市、杨凌示范区减少,延安市、榆林市增加,导致重心

向北迁移。2017—2018 年,耕地承载指数大幅上升的杨凌示范区、西安市、安康市、商洛市位于陕西省南

部,而大幅下降的咸阳市、铜川市、榆林市位于陕西省偏北位置,导致该时间段重心长距离南移。

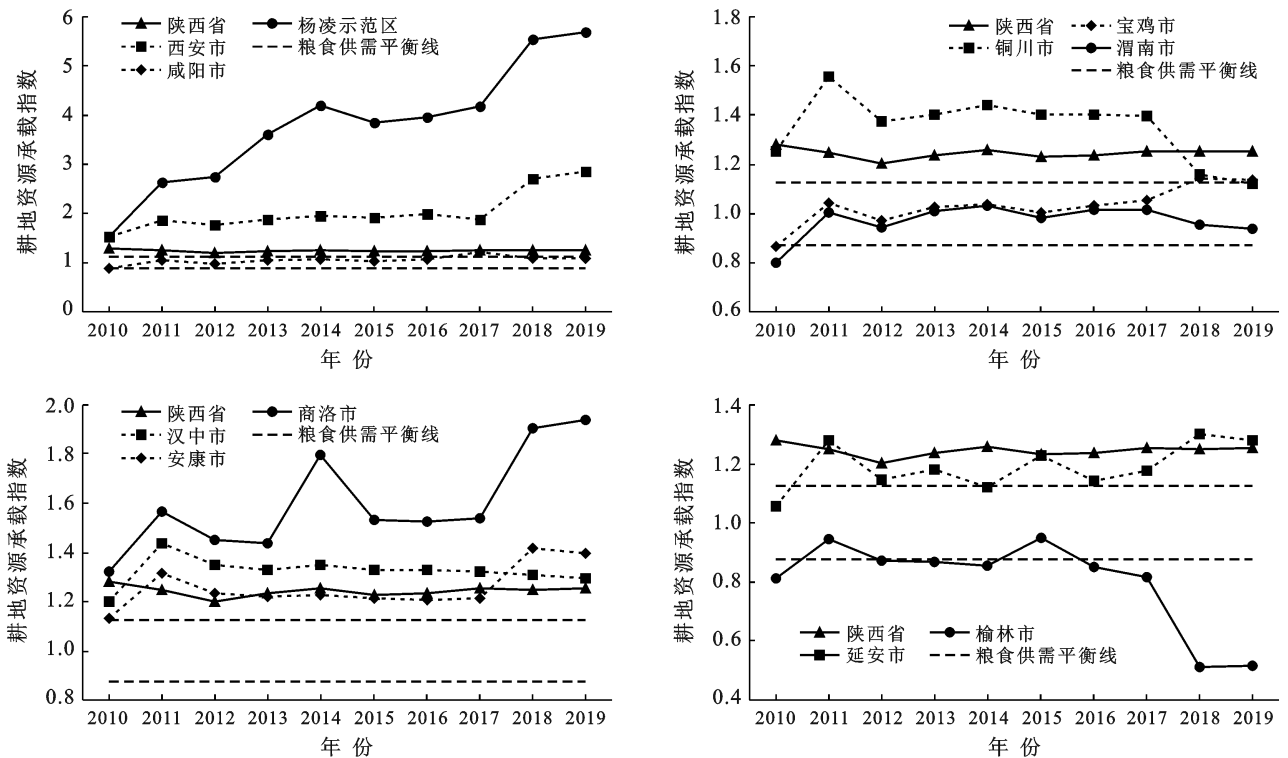


图 1 陕西省 2010—2019 年耕地承载指数变化

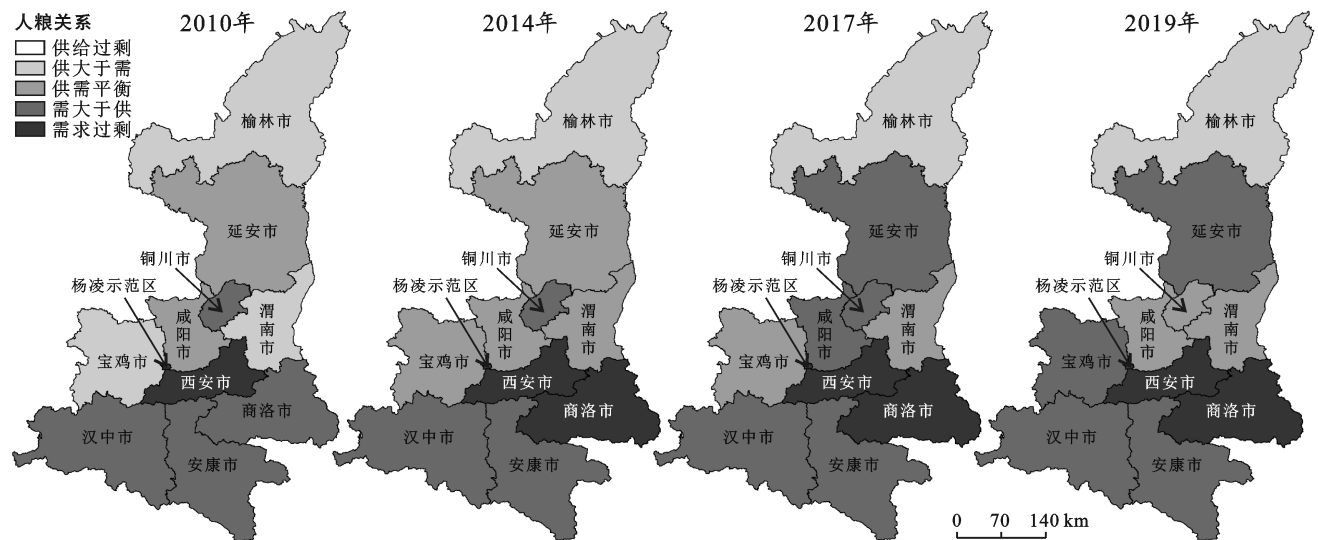


图 2 陕西省人粮关系时空变化

3.2 耕地资源承载指数时空变化的影响因素

根据孙燕君等^[1]的总结,结合数据的可获取性,选取人均耕地面积、人均地区生产总值(人均 GDP)、粮食复种指数、地均粮食产量、第一产业产值占地区生产总值的比重 5 个因素作为分异及因子探测器的分析影响因子。将影响因子采用自然断点法分为 3 层,根据公式计算每年各探测因子的 q 值,结果详见表 3。

表 3 陕西省 2010—2019 年耕地承载指数分异及因子探测器计算结果

影响因素	最大 q 值	最小 q 值	平均 q 值	标准差
人均耕地面积	0.775 6	0.546 2	0.692 1	0.061 2
人均 GDP	0.482 0	0.001 2	0.155 6	0.129 6
粮食复种指数	0.451 6	0.158 5	0.245 4	0.099 5
地均粮食产量	0.550 8	0.075 4	0.158 7	0.132 9
第一产业占比	0.701 3	0.044 0	0.253 2	0.229 9

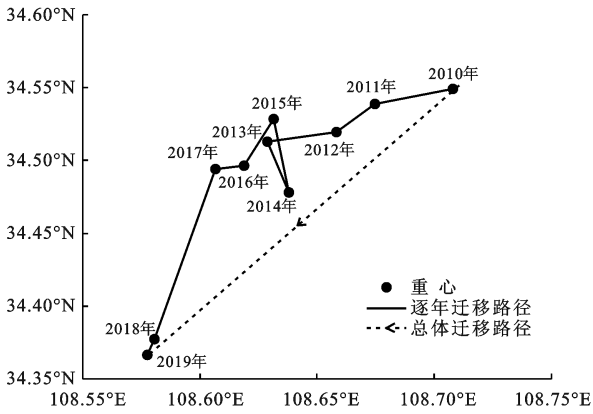


图 3 陕西省 2010—2019 年耕地资源承载指数重心迁移路径

5 个影响因素中,最大值出现在人均耕地面积,为 0.775 6;最小值出现在人均 GDP,为 0.001 2。各影响因素的平均值大小排序为:人均耕地面积>第一产业产值占地区生产总值的比重>粮食复种指数>地均粮食产量>粮食复种指数。除人均耕地面积和粮食复种指数外,其他因素均存在方差较大,即波动较大的问题。 q 值时间变化情况如图 4 所示。人均耕地面积的 q 值一直稳定在较高水平的 0.7 左右,波动性较小;而地均粮食产量和第一产业占比分别在 2010—2011 年、2015—2016 年两个时间段发生突变;2010—2017 年粮食复种指数的 q 值稳定在 0.2 左右,但在 2017—2018 年时间段内发生突变;人均 GDP 的 q 值经历过两次突变,波动性较大。综上所述,除人均耕地面积外,其他因素或多或少都存在波动问题,且 q 值较小,认为它们对陕西省耕地资源承载指数的

影响较小或无影响;同时可以认为人均耕地面积是陕西省耕地资源承载指数的主要影响因素,平均可以解释 69.21% 的耕地资源承载指数时空变化。

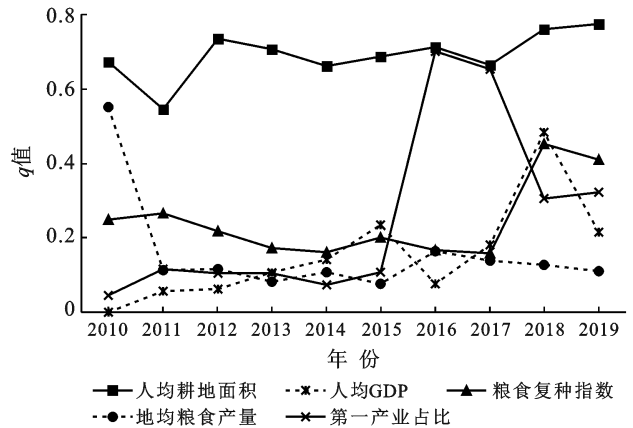


图 4 陕西省 2010—2019 年耕地资源承载指数 q 值的变化

3.3 耕地资源承载指数时空变化的预测研究

运用 GM(1, 1) 模型分别对各地级行政区人口与粮食产量进行拟合与预测。经检验(表 4),有 7 个模型的级比值超过规定级比值区间。对 7 个模型进行平移转换后,铜川市人口、延安市产量 2 个模型无法通过后验差比检验;杨陵区产量、榆林市产量 2 个模型无法通过模型残差检验。对于这 4 个模型,采用平均增长法进行预测。经计算,铜川市人口、延安市产量、杨陵区产量、榆林市产量的平均增长预测模型分别为: $P = N \times 0.996 1^n$, $P = N \times 0.987 2^n$, $P = N \times 1.070 4^n$, $P = N \times 0.882 0^n$ 。

表 4 陕西省 2010—2019 年耕地资源承载指数 GM(1,1) 模型拟合精度检验

模型名称	级比值区间	后验差比	最大相对误差	模型名称	级比值区间	后验差比	最大相对误差
安康市产量	[0.941, 1.167]	0.609	0.086	渭南市人口	[0.997, 1.010]	0.326	0.008
安康市人口	[0.997, 1.001]	0.037	0.002	西安市产量	[0.933, 1.322]*	0.265	0.132
宝鸡市产量	[0.964, 1.203]*	0.182	0.055	西安市人口	[0.918, 0.996]	0.253	0.044
宝鸡市人口	[0.997, 1.003]	0.047	0.003	咸阳市产量	[0.930, 1.195]	0.177	0.067
汉中市产量	[0.939, 1.200]*	0.100	0.036	咸阳市人口	[0.996, 1.140]	0.588	0.061
汉中市人口	[0.998, 1.004]	0.197	0.003	延安市产量	[0.894, 1.198]	0.656**	0.088
商洛市产量	[0.930, 1.232]*	0.433	0.144	延安市人口	[0.990, 1.002]	0.040	0.004
商洛市人口	[0.994, 1.003]	0.102	0.004	杨陵区产量	[0.915, 1.718]*	0.034	0.201***
铜川市产量	[0.844, 1.242]	0.291	0.081	杨陵区人口	[0.986, 0.998]	0.128	0.009
铜川市人口	[0.996, 1.037]	0.817**	0.031	榆林市产量	[0.623, 1.163]*	0.369	0.244***
渭南市产量	[0.936, 1.255]*	0.150	0.054	榆林市人口	[0.995, 1.006]	0.094	0.004

注: * 表示级比值超出规定区间[0.834, 1.199]; ** 表示后验差比大于 0.65; *** 表示最大相对误差大于 0.2

根据灰色预测模型 GM(1, 1) 的特性, 预测 2020—2025 年的耕地承载指数及人粮关系。将各地级行政区的人口和产量累加得到全省数据, 根据公式分别按温饱型(400 kg/人)、小康型(450 kg/人)和富裕型(500 kg/人)3 种不同的人均粮食消费标准计算耕地资源承载指数, 计算结果详见表 5。根据表 5, 陕西省 2020—2025 年的耕地资源承载指数呈下降趋势。按人

均粮食消费水平的最低标准 400 kg/人, 陕西省 2020—2025 年的耕地承载指数将逐渐下降, 到 2025 年时可达 1.14, 接近人粮平衡的 1.125, 人粮关系趋于缓和。但人均粮食消费水平是动态变化的, 会随着社会发展而改变。当使用 450 与 500 kg/人标准进行预测时, 耕地承载指数仍保持在一个相对较高的值。陕西省人粮关系时空变化预测结果如图 5 所示。无论以何种人均

粮食消费标准,陕西省 2020—2025 年的人粮关系都趋于逐步缓和的状态。但细化到地级行政区尺度,仍存在空间差异明显、人口超载区众多等问题。当以 400 kg/人作为人均粮食消费标准时,时空变化不显著;当以 450 kg/人作为人均粮食消费标准时,2025 年榆

林市成为供给过剩区,咸阳市成为需大于供区,安康市、延安市成为需求过剩区。当以 500 kg/人作为人均粮食消费标准时,2020 年起将不存在供需平衡区,全省除榆林市外均为预测人口大于理论承载人口的区域,人口、粮食、耕地资源之间的矛盾十分尖锐。

表 5 陕西省耕地资源承载指数预测结果

人均粮食消费标准	年份	粮食产量/ 10 ⁴ t	人口/万人	耕地人口承载力/万人	耕地资源承载指数	人粮关系
400 kg/人	2020	1 311.57	3 868.76	3 278.93	1.18	需大于供
	2025	1 386.39	3 966.14	3 465.98	1.14	需大于供
450 kg/人	2020	1 311.57	3 868.76	2 914.60	1.33	需大于供
	2025	1 386.39	3 966.14	3 080.87	1.29	需大于供
500 kg/人	2020	1 311.57	3 868.76	2 623.14	1.47	需大于供
	2025	1 386.39	3 966.14	2 772.78	1.43	需大于供

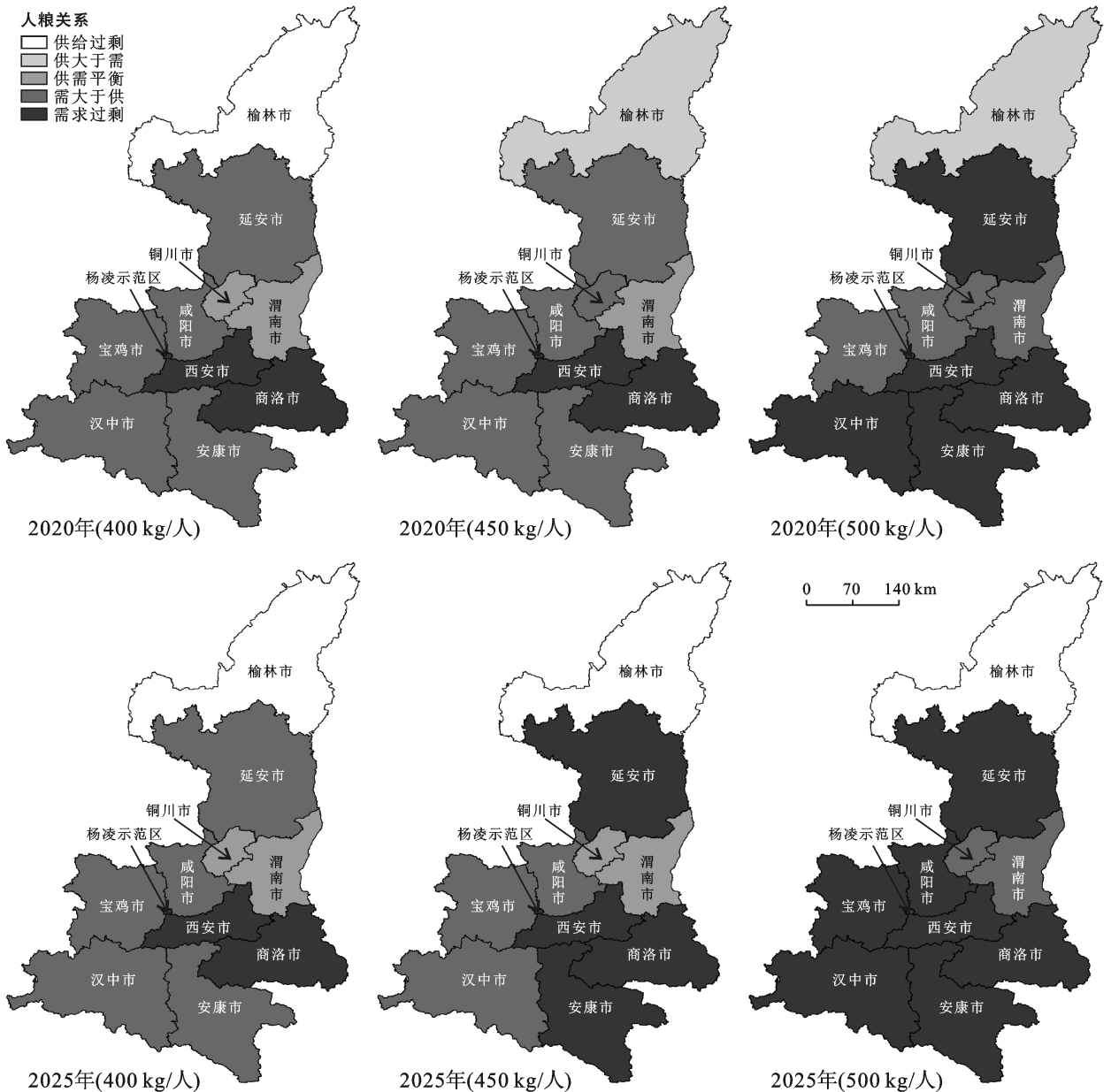


图 5 陕西省人粮关系时空变化预测结果

4 陕西省人粮关系改善对策

从分地级行政区层面,2010—2019 年陕西省耕地承载指数的时空变化是人口、粮食产量、人均耕地面积相互作用的结果。在城市化快速发展的地区,人口增长和建设用地扩张是主要特征,耕地保护面临的主要问题是建设占用,导致粮食产量降低,如西安市、杨凌示范区等。而在黄土高原、秦岭等需要生态保护的地区,耕地保护与生态保护会存在一定冲突,若人口增长,人粮关系就会恶化,如安康市、延安市等。

一些发展农业的地区,耕地保护与粮食生产面临的主要困境是耕地的非粮化,这种现象在陕西省的水果产区尤为明显,如关中平原、延安市山地、秦岭北麓与汉江流域等。铜川市是传统的资源型城市,近年来人口的快速流失是耕地承载指数降低的主要原因。由于生态治理成效显著,加上耕地保护与复垦,使得 2010—2019 年榆林市耕地面积上升了 37.83%,又因为人口增长不快,使得榆林市的人粮关系快速好转。陕西省各地级行政区差异化的人粮关系改善对策详见表 6。

表 6 陕西省人粮关系改善对策

地级行政区	2010—2019 年 LCCI 变化速率/ (%·a ⁻¹)	预测人粮关系(2025 年)	人均耕地面积 位次(2019)	“十四五”发展定位	人粮关系改善对策
西安市	9.77	需求过剩	10	城市化地区	以城市化发展为主,兼顾耕地保护。严格控制永久基本农田保护区耕地的建设占用、非农化、非粮化行为;同时合理规划人口,防止人粮关系急速恶化。切实落实耕地占补平衡,严格把关补充耕地的数量与质量。在保证粮食生产的基础上,发展特色水果、蔬菜与畜牧业
铜川市	-1.15	供需平衡 需大于供	4	城市化地区	以资源型城市转型为主,兼顾耕地保护。根据耕地承载指数的变化、预测、人均耕地面积,铜川市人粮关系未来发展将趋于缓和,因此保证耕地面积不减是促进铜川市人粮关系正向发展的主要对策
宝鸡市	3.52	需大于供 需求过剩	5	城市化地区、农产品主产区	开发与保护并重。在农产品生产区实行严格的耕地保护策略,在促进农业现代化、多样化发展的同时,应注意防范耕地的非粮化;在农产品主产区开展土地复垦与高标准农田建设,增加耕地的数量与质量
咸阳市	2.68	需大于供 需求过剩	6	城市化地区、农产品主产区	开发与保护并重,促进西咸一体化战略的推进。南部重点发展城市化,北部农产品主产区在施行严格的耕地保护策略的同时开展土地复垦与整治,增加耕地面积从而缓和快速恶化的人粮关系
渭南市	1.92	供需平衡 需大于供	3	城市化地区、农产品主产区	开发与保护并重,防止人粮关系恶化。渭南市人均耕地面积大,2025 年预测结果良好,因此在人粮关系改善时应注重保持耕地面积的增长,并防范用途转变
延安市	2.33	需大于供 需求过剩	2	城市化地区、农产品主产区、重点生态功能区	分区制定开发与保护策略。子午岭地区、黄土高原丘陵沟壑区、黄龙山区、延安沿黄区应注重生态保护,以水土流失的防治为主。在与永久基本农田不冲突的前提下继续开展退耕还林。延安市人均耕地面积较大,但人粮关系正处于急速恶化阶段,这与自然条件和人口增长有着密不可分的关系。因此应在自然条件较好的农产品主产区开展土地复垦与整治,提高耕地利用效率与产量,同时施行严格的耕地保护政策。在保证粮食生产的基础上,形成黄土高原苹果产业带
汉中市	0.90	需大于供 需求过剩	7	城市化地区、重点生态功能区	汉中市人均耕地面积小,但人粮关系相对于其他地级市恶化得较慢。因此应以城市化、秦岭山区生态保护为主,耕地保护为辅。在严控永久基本农田用途和数量的基础上,适当增加耕地
榆林市	-4.05	供给过剩	1	城市化地区、重点生态功能区	城市化与生态保护并重,促进人粮关系的良性发展。榆林市北部区域主要参与呼包鄂榆城市群发展;南部处于黄土高原腹地,为丘陵沟壑区,应注重生态保护。根据研究结果,榆林市未来的耕地承载指数还会持续减少,粮食处于供给过剩状态,成为促进陕西省人粮关系缓和的重点区域。榆林市的人粮关系良性发展应注意统筹协调好城市化发展、生态保护与耕地保护之间的关系。在保证粮食生产的基础上,实施羊子“双千万”工程,发展“草—养—加”全产业链
安康市	2.61	需大于供 需求过剩	8	城市化地区、重点生态功能区	人均耕地面积少,人粮关系迅速恶化,2025 年若以 450 kg/人或 500 kg/人作为预测标准,人粮关系为需求过剩。因此城市化、生态保护与耕地保护应并重。人粮关系方面重点是通过土地整理、复垦与耕地后备资源开垦增加耕地面积,同时应施行严格的耕地保护制度,保护现状耕地不减少
商洛市	5.18	需求过剩	9	重点生态功能区	南部秦岭山区应以生态保护为主。根据人粮关系研究结果,商洛市人均耕地面积少、未来人粮关系极其紧张,应注重土地复垦与耕地后备资源的开垦。在保证粮食生产的基础上,发展养鸡产业
杨凌示范区	30.17	需求过剩	11	城市化地区	城市化发展为主,耕地保护为辅。发展以现代化农业与农产品加工为主的农业高新技术产业示范区,严控永久基本农田的数量与质量

5 讨论与结论

(1) 2010—2019 年陕西省总体粮食产量、人口、耕地承载力都有所上升,耕地资源承载指数小幅度波动下降,人粮关系稍微缓和;各地级行政区耕地资源承载指数波动较大,变化剧烈的时间段为 2010—2011 年、2014—2015 年、2017—2018 年,与粮食产量的剧烈变化有关。

(2) 2010—2019 年陕西省耕地承载指数区域差异明显,呈现出南高北低的空间格局,西安市、杨凌示范区为高值中心,榆林市为低值中心;从分区角度,耕地资源承载指数排序为:陕南地区>关中地区>陕北地区;10 a 间陕西省的耕地资源承载指数重心位于咸阳市境内,总体迁移方向为从东北向西南,指向西安市与杨凌示范区,2013—2015 年、2017—2018 年两个时间段的路径存在明显的突变,与各地级行政区耕地承载指数的消长有关。

(3) 陕西省耕地资源承载指数时空变化最主要的影响因素是人均耕地面积,平均解释率为 69.21%。由于粮食作物实际种植面积数据的缺失,年末常用耕地面积与基于人粮关系的耕地承载力指数并不能完全对应,可能存在耕地建设占用、从事林果业等情况。但地理探测器结果表明,保护耕地面积依旧是保证区域粮食安全的重要手段。

(4) 运用 GM(1,1)、平均增长模型分不同人均粮食消费水平预测陕西省 2020—2025 年耕地承载指数与人粮关系的时空变化。结果显示陕西省资源承载指数会小幅下降,空间格局仍为南高北低,除铜川市—渭南市、榆林市 2 个低值中心外,其余地级行政区的人粮关系较为紧张。

(5) 根据最新《陕西省统计年鉴》,2020 年陕西省常住人口为 3 955 万人,粮食产量为 1.28×10^7 t。分别以 400 kg/人,450 kg/人和 500 kg/人为粮食消费标准时,耕地资源承载指数为 1.18,1.33,1.57,与本文的预测值分别相差 4.97%,4.79%,5.30%。因此,本研究的预测结果具有一定参考价值。

(6) 在保障粮食安全的基础上,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》指出,要优化农业生产布局,积极发展设施农业,因地制宜发展林果业^[26]。陕西省《全省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》针对特色优势产业提出了更加具体的果业、畜牧业、设施农业“3+X”现代农业体系^[34]。综合来看,粮食安全与耕地保护是关乎国家安全的问题,因此国家与陕西省都将其放在了最重要的位置。目前,

耕地保护受到的最主要的威胁就是耕地的“非农化”与“非粮化”问题,在陕西省主要表现为占用耕地建房与改变耕地用途发展林果。要解决耕地保护与特色农业发展、城镇化建设之间的矛盾,就必须明确土地用途,从“防”与“治”两方面入手。“防”的主要手段包括划定永久基本农田保护红线,从规划与立法层面严格限制耕地的用途转变,明确与发展特色农业发展和城镇化建设的土地相区分;“治”即通过遥感和人力巡查等方式监测耕地用途的改变,并强制整改或处罚。

[参 考 文 献]

- [1] 孙燕君,王璐,刘振华,等.耕地资源承载力关键影响因素识别与典型评价模型研究进展[J].农业资源与环境学报,2020,37(6):829-844.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府·中央经济工作会议在北京举行习近平、李克强作重要讲话[EB/OL].新华网(2020-12-18)[2021-11-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-12/18/content_5571002.htm.
- [3] 官雪,李玉环,吕玮,等.泰安市粮食耕地人口承载力评价[J].中国人口·资源与环境,2017,27(S1):258-261.
- [4] 封志明.土地承载力研究的过去,现在与未来[J].中国土地科学,1994,8(3):1-9.
- [5] 张贵军,朱永明,张蓬涛,等.石家庄市耕地资源人口承载力评价[J].中国农业资源与区划,2013,34(6):120-126.
- [6] 史兴俊,靳贺杰,房鑫,等.基于人粮关系的信阳市耕地资源人口承载力研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2020,33(2):265-269.
- [7] 吕秋俊,李晓.基于人粮关系的成都市耕地资源人口承载力研究[J].绵阳师范学院学报,2016,35(5):103-107.
- [8] 何毓蓉,周红艺,张保华,等.四川省耕地地力生产潜力及承载力研究[J].地理科学,2004,24(1):20-25.
- [9] 谢平,文倩,孙水娟,等.基于人粮关系的湖南省耕地资源人口承载力研究[J].水土保持研究,2012,19(4):274-277,295.
- [10] 周启刚,张晓媛,曹倩倩.基于地统计学的三峡库区重庆段耕地人口承载力时空特征研究[J].水土保持通报,2014,34(5):140-145.
- [11] 张晓燕,陈影,门明新,等.基于产能的耕地资源人口承载力研究[J].水土保持研究,2010,17(3):176-180.
- [12] 杨馨越,魏朝富,倪九派.三峡生态屏障区耕地承载力与人口生态转移[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1554-1562.
- [13] 尹春燕,匡鸿海,高勇,等.乐山市土地人口承载力研究[J].湖北农业科学,2014,53(17):4048-4051,4055.
- [14] 杨利民,于闽.我国未来人口发展对耕地的需求分析[J].经济地理,2013,33(2):168-171.
- [15] 陈丽宇.基于灰色系统模型的银川市耕地资源人口承载力研究[J].安徽农业科学,2010,38(17):9131-9133.
- [16] 刘芯榕,周德全.天柱县耕地生产潜力与人口承载力研

- 究[J].安徽农业科学,2011,39(16):10022-10024.
- [17] 李蒙,朱勇,周建琴,等.基于气候生产潜力的云南人粮关系及其未来变化[J].中国农业气象,2019,40(2):96-104.
- [18] 封志明,杨艳昭,张晶.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,2008,23(5):865-875.
- [19] 谢晓彤,朱嘉伟,周琳琳.河南省 1999—2014 年人粮关系时空变化分析[J].河南农业大学学报,2017,51(2):266-273.
- [20] 郭志伟.北京市土地资源承载力综合评价研究[J].城市发展研究,2008(5):24-30.
- [21] 王江思,马传明,王文梅.郑州市土地资源承载力分析[J].湖北农业科学,2013,52(16):3799-3804.
- [22] 李新刚,王双进,孙钰.土地承载力与经济动态效应和耦合协调:基于京津冀城市群的实证研究[J].经济理论与经济管理,2018(12):98-109.
- [23] Malaj E, Liber K, Morrissey C A. Spatial distribution of agricultural pesticide use and predicted wetland exposure in the Canadian Prairie Pothole Region [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 134765.
- [24] 陈百明.“中国土地资源生产能力及人口承载量”项目研究方法概论[J].自然资源学报,1991,6(3):197-205.
- [25] Zhou Wei, Elshkaki A, Zhong Shuai, et al. Study on Relative Carrying Capacity of Land Resources and Its Zoning in 31 Provinces of China [J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1459.
- [26] 中华人民共和国中央人民政府·中华人民共和国国民经济和社会发展第 14 个 5 年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL].(2021-3-13)[2021-11-04]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [27] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-127.
- [28] Wang Jinfeng, Hu Yi. Environmental health risk detection with GeogDetector [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [29] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [30] 邓聚龙.灰色理论基础[M].湖北武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [31] 杨国华,颜艳,杨慧中. GM(1,1)灰色预测模型的改进与应用[J].南京理工大学学报,2020,44(5):575-582.
- [32] 韦燕飞,潘润秋.基于加权平均增长法的人口预测模型在土地利用规划中的应用[J].资源开发与市场,2008(9):789-790.
- [33] 吴明发,欧名豪,纪昌品,等.广东耕地数量预测方法对比研究[J].广东农业科学,2011,38(19):207-210.
- [34] 陕西省人民政府·陕西省人民政府关于印发国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要的通知[EB/OL].(2021-03-16)[2021-12-28]. http://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/zcwj/szfwj/szf/202103/t20210316_2156630.html

(上接第 173 页)

- [14] 李岩,黄超傑,王珂,等.安徽省森林生态承载力及其重心迁移研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(1):87-96.
- [15] 陈丽军,苏金豹,万志芳.生态文明视域下森林公园旅游生态承载力的时序演变研究[J].林业经济,2019,41(8):25-29.
- [16] 宫一路,李雪铭.城市中心区绿地系统生态承载力空间格局研究[J].生态经济,2021,37(3):223-229.
- [17] Fang Yiping, Zhu Fubiao, Yi Shuhua, et al. Ecological carrying capacity of alpine grassland in the Qinghai-Tibet Plateau based on the structural dynamics method [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021,23(8):12550-12578.
- [18] 曹智,闵庆文,刘某承,等.基于生态系统服务的生态承载力:概念、内涵与评估模型及应用[J].自然资源学报,2015,30(1):1-11.
- [19] 黄经南,敖宁谦,谢雨航.国际常用发展指标框架综述与展望[J].国际城市规划,2019,34(5):94-101.
- [20] 顾家明,胡卫卫,田素妍.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的江苏省生态承载力评价及障碍因素诊断[J].水土保持通报,2019,39(2):246-252.
- [21] 包蕊,邱莎,唐明方,等.基于 DPSIR 模型的锡林郭勒盟生态承载力评价[J].生态经济,2020,36(8):139-145.
- [22] Li Mingjie, Zhang Jie, Zhu Yulin. Evaluation on the warning-degree of the ecological carrying capacity of Guangzhou City based on the DPSIR model [J]. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 2020, 17: 869-878.
- [23] Guo Jing, Ren Jun, Huang Xiaotao, et al. The dynamic evolution of the ecological footprint and ecological capacity of Qinghai Province [J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 3065.
- [24] 苟廷佳,陆威文.基于组合赋权 TOPSIS 模型的生态文明建设评价:以青海省为例[J].统计与决策,2020,36(24):57-60.
- [25] 贾海发,邵磊,罗珊.基于熵值法与耦合协调度模型的青海省生态文明综合评价[J].生态经济,2020,36(11):215-220.