

基于耕地—粮食—人口系统的休耕区域 耕地压力时空演变及预测

——以河北省为例

杨人豪,杨庆媛,陈伊多,曾 黎

(西南大学地理科学学院,重庆 400715)

摘 要: 基于河北省 65 a 耕地面积、粮食产量和人口数量等统计数据,分析全省耕地—粮食—人口系统随时间变化的特点,结合人均最小耕地面积公式计算耕地压力指数并分析其时空特征,利用灰色预测 GM(1,1) 模型预测河北省未来 11 a 耕地压力指数。结果表明:(1) 河北省 1949—2014 年 65 a 时间内耕地面积由 $726.58 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 下降至 $653.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 人均耕地面积由 0.24 hm^2 下降至 0.09 hm^2 , 粮食总产量由 $469.51 \times 10^4 \text{ t}$ 上升至 $3\,360.2 \times 10^4 \text{ t}$, 人均粮食产量由 152.14 kg 上升至 455.07 kg , 总人口数由 3 086.06 万人上升至 7 384 万人;(2) 耕地压力指数在人均年粮食需求量取值为 380、400、420 kg 的情景下均呈下降趋势,分别在 2005 年、2008 年、2010 年之后持续低于 1, 65 a 中全省 11 市耕地压力指数均呈现下降趋势,2010 年底仅 4 市耕地压力指数大于 1, 耕地压力指数的全局 Moran's I 指数从弱正相关到弱负相关再到明显的正相关性,其空间聚集性变强;(3) 未来 11 a 全省耕地压力指数保持稳定微弱下降趋势,均小于 1, 耕地压力较小。针对河北省粮食安全问题提出了建议。

关键词: 耕地—粮食—人口系统;耕地压力;粮食安全;休耕;时空特征;河北省

中图分类号: S151 **文献标志码:** A

Cultivated area—food—population system in land fallow area and analysis of spatio-temporal evolution and prediction of cultivated land index

——A Case Study of Hebei Province

YANG Ren-hao, YANG Qing-yuan, CHEN Yi-duo, ZENG Li

(School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: This study analyzed cultivated land, food and population systems with time-varying characteristics based on statistics like cultivated land area, grain yield and population of Hebei Province during the last 65 years as well as cultivated land pressure index using the formula of the smallest cultivated land area. The paper calculated, analyzed and forecasted the spatial and temporal characteristics of the cultivated land pressure index in Hebei Province by GM(1,1) model. The results showed that: (1) There are some changes in Hebei Province from 1949 to 2014: The cultivated land decreased from $726.579 \times 10^4 \text{ hm}^2$ to $653.774 \times 10^4 \text{ hm}^2$, the cultivated land per capita decreased from 0.24 hm^2 to 0.09 hm^2 , the grain yield increased from $469.51 \times 10^4 \text{ t}$ to $3\,360.2 \times 10^4 \text{ t}$, grain yield per capita increased from 152.14 kg to 455.07 kg , and the total population increased from $3\,086.06 \times 10^4$ to $7\,384 \times 10^4$; (2) All the cultivated land pressure indexes declined when the annual grain demand per capita was 380, 400, 420 kg, and continued below 1, respectively after 2005, 2008 and 2010. All the cultivated land pressure indexes of 11 cities in Hebei Province declined during the 65 years and only indexed 4 cities over 1 in 2010. The global Moran's I of cultivated land pressure index was from weak negative correlation to weak positive correlation and the spatial agglomeration became stronger; (3) The cultivated land pressure index of Hebei Province continued to decline with

收稿日期:2016-12-25

修回日期:2018-03-14

基金项目:国家社会科学基金重大项目“实行耕地轮作休耕制度研究”项目(15ZDC032)

作者简介:杨人豪(1992—),男,四川达州人,硕士,主要研究方向为土地利用与国土规划。E-mail:swuyrh@126.com。

通信作者:杨庆媛(1966—),女,云南腾冲人,教授,博士生导师,主要从事国土资源与区域规划,土地经济与政策研究。E-mail:yizyang@swu.edu.cn。

the index below 1 over the next 11 year, and suggestions aiming at the less cultivated land pressure and food security issues in Hebei Province were put forward.

Keywords: area-food-population system; pressure on cultivated land; food security; land follow; spatio-temporal characteristics; Hebei Province

中国的人口数量稳居世界第一,其粮食安全直接影响国家和社会稳定。作为粮食生产的物质基础,耕地却面临数量减少^[1]、质量下降^[2]等严重问题。据统计我国耕地数量以每年 $10\times 10^4\text{ hm}^2$ 的速度减少,耕地质量因污染^[3]、生态破坏^[4]等不断下降,甚至出现无法耕种的现象。由耕地、粮食、人口构成的相互制约、相互影响的复合系统成为研究的热点^[5-6]。2016 年 6 月 19 日农业部等十部委下发《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》,将河北省黑龙港地下水漏斗区作为地下水漏斗区休耕试点区域,连续多年实施季节性休耕,实行“一季休耕、一季雨养”,将不再种植需抽水灌溉的冬小麦,只种植雨热同季的春玉米、马铃薯和耐旱耐瘠薄的杂粮杂豆,减少地下水用量。在耕地数量保持均衡,粮食产量、人口数量双增长的背景下探究耕地压力的动态变化和空间特征,以期对区域农业政策、人口政策,建设地区生态文明建设等工作提供依据。

耕地问题一直以来受到广泛关注,国外学者多关注于耕地受到环境污染、工业侵占等威胁时面临的问题和解决方法^[7-9];国内学者基于不同的视角、空间尺度、时间维度对耕地数量变化及驱动因子^[10-11],耕地变化与城镇化^[12]、经济增长^[13]等耦合,粮食安全^[14]及影响因素^[15]等问题进行深入的研究和探讨。研究中多使用回归模型研究省域尺度的耕地资源动态变化,如安徽省、辽宁省、浙江省、陕西省、河北省等^[16-19]的耕地变化,为相关研究提供了较好的参照。由于回归模型的局限性,某些预测结果与实际偏差较大;大部分研究时间跨度较短,不足以反映省域耕地资源的整体变化趋势。本文根据统计数据,分析河北省 1949—2014 年的耕地、人口、粮食的变化情况,测算耕地压力指数并分析其时空演变,进而运用较为成熟的灰色预测 GM(1,1) 模型预测未来 11 a 年河北省实行耕地季节性休耕后的耕地压力指数,其目的是探究河北省长期以来耕地资源整体变化状况,预测在耕地休耕、调整农业种植结构等背景下耕地压力的动态变化。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河北省($36^{\circ}05'\sim 42^{\circ}40'\text{N}$, $113^{\circ}27'\sim 119^{\circ}50'\text{E}$)

地处蒙古高原、燕山和太行山山地、华北平原交界处,地势西北高、东南低,包括高原、山地、丘陵、盆地、平原等多种地貌,总面积 $18.88\times 10^4\text{ km}^2$,辖石家庄市、唐山市、秦皇岛市、邯郸市、邢台市、保定市、张家口市、承德市、沧州市、廊坊市、衡水市 11 市。河北省属温带大陆性季风气候,四季分明,冬夏均温相差达 20°C ,年均降水量 484.5 mm ,年无霜期 $81\sim 204\text{ d}$ 。2014 年末全省总人口为 7 384 万人,全年地区生产总值 29 421.20 亿元,人均生产总值 39 984 元,全年粮食播种面积 $633.2\times 10^4\text{ hm}^2$,粮食产量 $3.36\times 10^7\text{ t}$ 。

1.2 数据来源

研究中涉及的耕地面积、人口数量、粮食产量、粮食播种面积、农作物播种面积等数据主要来源于《河北省统计年鉴》(1949—2015)、《河北农村统计年鉴》(1949—2015)、河北省国民经济和社会发展规划统计公报及各市统计年鉴(1949—2015)等。

2 研究方法

2.1 最小人均耕地面积

最小人均耕地面积是指保障一定区域内粮食安全而所需保护的耕地数量底线,即在一定区域范围内,一定食物自给水平和耕地综合生产能力条件下,为了满足每个人正常生活的食物消费所需的耕地面积^[20]。其计算公式如下:

$$S_{\min} = \beta \frac{G_r}{p \times q \times k} \tag{1}$$

式中, $S_{\min}$ 为最小人均耕地面积(hm^2), β 为粮食自给率(%), G_r 为人均年粮食需求量($\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}$), p 为粮食单产($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), q 为粮食播种面积占总播种面积的百分比(%), k 为复种指数。

2.2 耕地压力指数

耕地压力指数是指人均所需最小耕地面积与实际人均耕地面积之比,其大小反映区域基于耕地—粮食—人口系统的耕地资源紧张程度^[20]。其计算公式如下:

$$K = \frac{S_{\min}}{S_a} \tag{2}$$

式中, K 为耕地压力指数, S_a 为实际人均耕地面积(hm^2)。 $K < 1$ 时,耕地无明显压力; $K = 1$ 时,耕地

濒临压力变化的边界; K 大于 1 时,耕地压力明显,若不采取粮食增产措施,可能爆发区域粮食危机。

2.3 灰色预测 GM(1,1) 模型

灰色预测中的数列预测模型是对某一指标的发展变化情况所作的预测,其预测结果是该指标在未来各个时刻的具体数值。数列预测的基础就是基于累加生产数列的 GM(1,1) 模型。其预测模型建立过程如下:

(1) 设 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ 为原始数据序列,将原始数据作一次累加生成处理,即 $x^{(1)} = x^{(0)}(1), x^{(1)}(2) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2), x^{(1)}(3) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) + x^{(0)}(3), \dots, x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(t), x^{(1)}(M) = \sum_{i=1}^M x^{(0)}(t)$, 整理后得到:

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \tag{3}$$

(2) 构造累加矩阵和常数向量:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(N-1) + x^{(1)}(N)) & 1 \end{bmatrix},$$
$$Y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(N) \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, B 为新数据序列的累加矩阵, Y_N 为常数向量, N 为新生成数据序列的元素个数。

(3) 运用最小二乘法拟合灰色参数:

$$\hat{a} = (\alpha, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \tag{5}$$

式中, $\hat{a}$ 为所求灰色参数, α 和 u 为待求参数, B^T 为转置后的累加矩阵。

(4) 构建时间函数:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{\alpha})e^{-u} + \frac{u}{\alpha} \tag{6}$$

将灰色参数带入时间函数,并作一次累减生成,得到预测公式:

$$\hat{x}^{(0)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{\alpha})(1 - e^\alpha)e^{\alpha t} + \frac{u}{\alpha} \tag{7}$$

式中, $\hat{x}^{(1)}(t+1)$ 为累加数据序列中 $t+1$ 个预测值,则 $\hat{x}^{(0)}(t)$ 为第 t 个需要预测的值。

(5) 为保证模型的精度和可信度,须进行检验。检验预测公式精度一般采用方差比 C 和小误差概率 P 。如果 $C < 0.35, P > 0.95$, 预测精度高;如果

$C < 0.5, P > 0.80$, 预测精度较高; $C < 0.65, P > 0.70$, 预测精度一般; $C \geq 0.65, P \leq 0.70$, 预测精度不合格。本文将 1949—2014 年数据带入 DPS 软件中利用 GM(1,1) 模型预测 2015—2025 年各变量的值。

3 结果与分析

3.1 河北省耕地、粮食、人口动态变化

河北省耕地面积从 1949 年 $726.58 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 下降至 2014 年的 $653.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 总体呈缓慢下降趋势。人均耕地面积从 1949 年的 0.24 hm^2 下降到 2014 年的 0.09 hm^2 , 前期呈快速下降趋势, 后期下降速度放缓。根据耕地总面积和人均耕地面积的动态变化情况可划分为 3 个阶段(图 1): 1949—1953 年为缓慢增长阶段, 这时期新中国的农业得到国家的大力支持, 土地改革激发农民积极性, 耕地得到大量的恢复和复垦。1953 年底全省耕地总面积为 $764.52 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 人均耕地面积为 0.23 hm^2 。1954—2007 年为动态下降阶段, 期间全省耕地总面积总体呈下降态势, 在 1964—1965 年有小幅回升; 1949—2014 年人均耕地面积下降速度明显。这期间耕地资源数量先后由于“大跃进”、三年自然灾害、建设用地占用耕地和退耕还林、还草等工程等原因下降明显; 耕地总量不断减少至 2007 年的 $589.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 随着人口不断增长, 人均耕地面积迅速下降至 0.08 hm^2 。2007—2014 年为增长平稳阶段, 期间各市将耕地保护作为重要贯彻目标, 实行土地开发整理等措施积极保护耕地, 耕地总面积得到稳定增长, 人口数量由于计划生育等政策的影响也保持稳定的缓慢增长, 人均耕地面积稳定在 0.09 hm^2 。2014 年底全省耕地面积为 $653.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 人均耕地面积为 0.09 hm^2 。

河北省粮食总产量从 1949 年 $469.51 \times 10^4 \text{ t}$ 上升至 2014 年的 $3\,360.2 \times 10^4 \text{ t}$, 人均粮食产量从 1949 年的 152.14 kg 上升到 2014 年的 455.07 kg , 两者基本均呈震荡上升趋势, 并且起伏趋势保持一致, 存在较强的相关性。全省粮食总产量 4 次上台阶(图 2): 1949~1965 年粮食产量小于 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$, 1965 年底, 粮食产量为 $964.55 \times 10^4 \text{ t}$, 人均粮食产量为 236.01 kg ; 1966—1987 年粮食产量迅速增长, 跨过 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 门槛, 1987 年底, 粮食产量为 $1\,920 \times 10^4 \text{ t}$, 人均粮食产量为 336.25 kg ; 1988—2010 年粮食产量继续增加, 超过 $2\,000 \times 10^4 \text{ t}$, 2010 年底, 粮食产量为 $2\,975.9 \times 10^4 \text{ t}$, 人均粮食产量为 413.66 kg ; 2011—2014 年粮食产量超过 $3\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 大关, 2014 年底, 粮食产量为 $3\,360.2 \times 10^4 \text{ t}$, 人均粮食产量为 455.07 kg 。

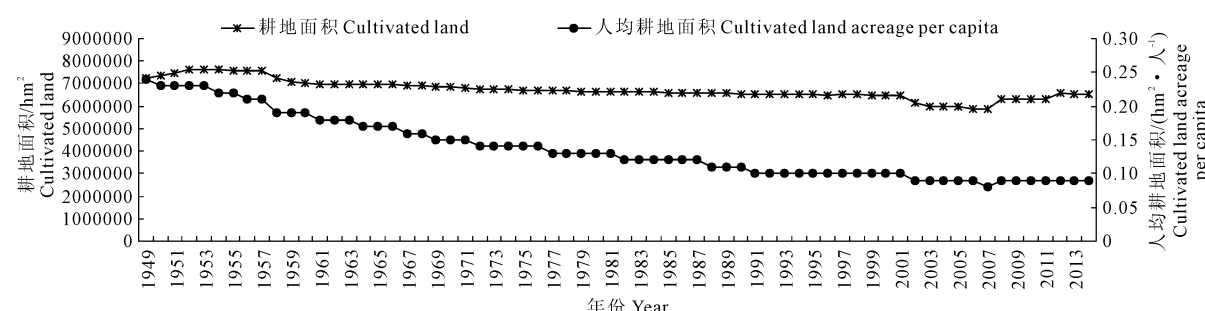


图 1 河北省耕地面积和人均耕地面积变化 (1949—2014 年)

Fig.1 The change of cultivated land and cultivated land acreage per capita of Hebei Province from 1949 to 2014

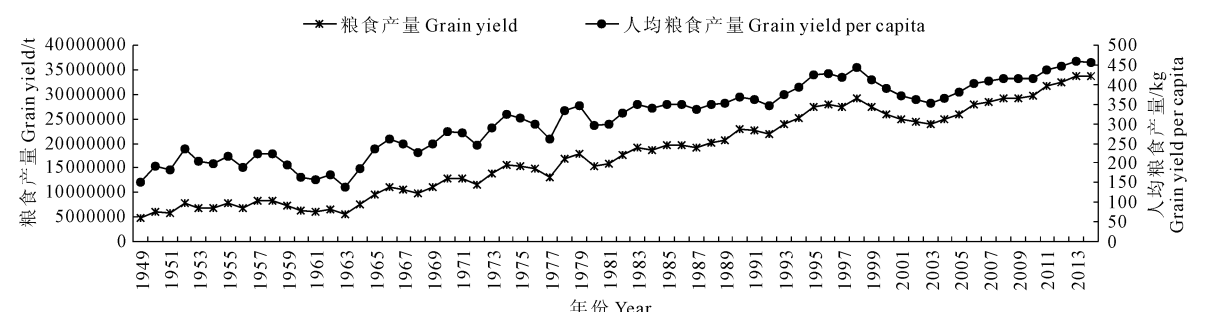


图 2 河北省粮食产量和人均粮食产量变化 (1949~2014 年)

Fig.2 The change of grain yield and grain yield per capita of Hebei Province from 1949 to 2014

河北省总人口数从 1949 年的 3 086.06 万人上
升至 2014 年的 7 384 万人,基本呈持续增长态势,
分别在 1965 年、1978 年、1990 年、2009 年超过 4 000
万、5 000 万、6 000 万、7 000 万。人口自然增长率起
伏较大,按照波动可以分为 6 个阶段 (图 3): 1949~
1955 年为第 1 个上升阶段,此时新中国成立,人民
安全得到有效保障,人口自然增长速度较快;1955
年底,人口总数为 3 529 万人,人口自然增长率为
20.70‰。1956~1961 年为第 1 个下降阶段,期间人
口增长受“三年严重自然灾害”和“大跃进”运动等
不利影响,社会动荡,人口自然增长率下降至谷底;
1961 年底,人口总数为 3 795 万人,人口自然增长率
为 1.50‰。1962~1963 年为第 2 个上升阶段,在结
束了“大跃进”运动和自然条件逐渐转好的背景下,
人口数量得到了有效增长,人口自然增长率出现明

显提高;1963 年底,总人口数为 3 956 万人,人口自
然增长率为 27.41‰。1964~1976 年为第 2 个下降
阶段,期间发生长时间社会动乱,国民经济发展缓
慢,新增人口速度放缓,人口自然增长率在较长时
间段内出现下降现象;1976 年底,人口总数为
4 943.40 万人,人口自然增长率仅为 7.10‰。1977~
1996 年为震荡下降阶段,期间我国实行改革开放、
计划生育等重大政策,人口自然增长得到一定控
制,自然增长率出现震荡下降现象;1996 年底,人口
总数为 6 508.11 万人,人口自然增长率为 7.30 ‰。
1997~2014 年为平稳浮动阶段,期间计划生育政策
得到有效和严格实施,人口自然增长进入非常平稳
的阶段,基本保持在 5‰~7‰之间;2014 年底,人口
总数为 7 384 万人,人口自然增长率为 6.95‰。

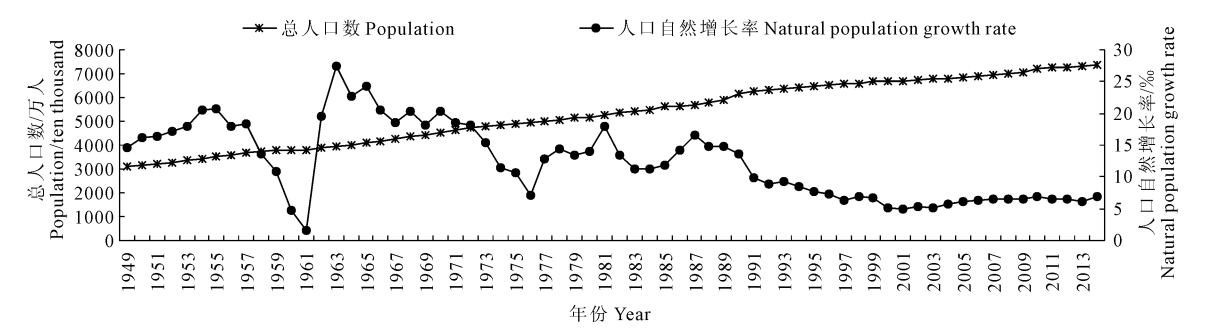


图 3 河北省总人口数和人口自然增长率变化 (1949~2014 年)

Fig.3 The change of population and natural population growth rate of Hebei Province from 1949 to 2014

3.2 河北省耕地压力指数的时间演变

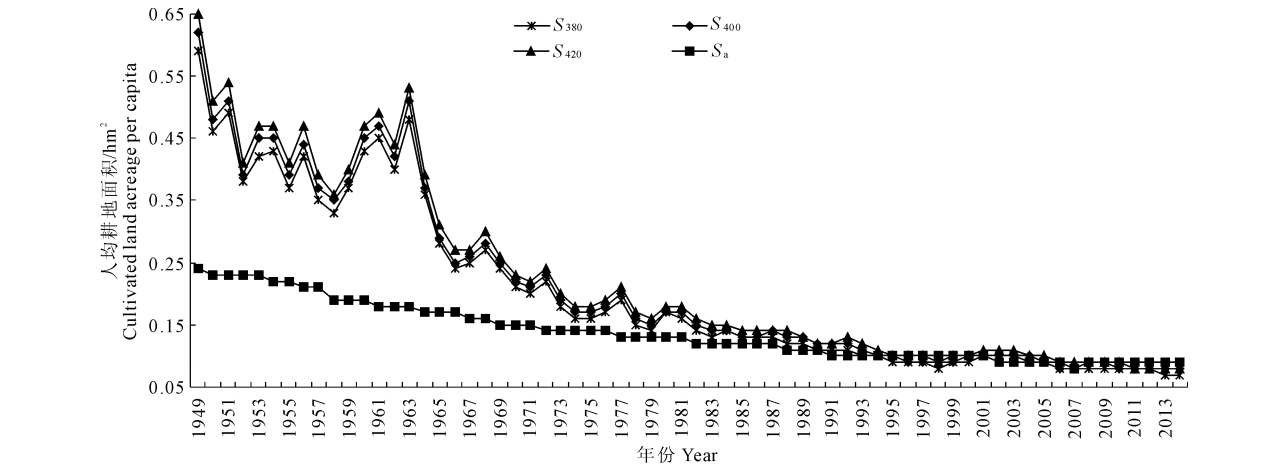
耕地被占用和人口增长的结果必然是耕地压力的增加,耕地压力指数能很好地反映区域耕地资源的压力水平。人均年粮食需求量(G_r)取值的不同直接影响耕地压力水平的高低。众多研究者对该变量取值为 300~400 kg^[16-19],且世界粮农组织提出 400 kg 即可满足正常营养水平。考虑河北省实际情况和当前全国人均年粮食消费水平 400~500 kg^[21-22],将 G_r 取值为 380、400、420 kg,粮食自给率为 100%,计算结果如图 4、5 显示。

图 4 中 K_{380} 、 K_{400} 、 K_{420} 分别从高值 0.59、0.62、0.65 hm² 震荡下降至 0.05 hm²,期间 1960—1963 年出现较大反弹,随后分别急剧下降至 0.24、0.25、0.27 hm²,并持续保持下降态势,在 1993 年之后,基本保持在 0.10 hm² 以下。图 5 中 K_{380} 、 K_{400} 、 K_{420} 也基本呈现震荡下行态势,在三年自然灾害之后 K 值甚

至超过了建国初期几年。 K_{380} 、 K_{400} 、 K_{420} 分别在 1990、1995、1996 年首次低于 1,在 2005、2008、2010 年之后持续保持低于 1,表明在低方案(人均年粮食需求为 380 kg)情况下,河北省在 20 世纪 90 年代即能满足人口粮食基本需求,耕地压力处于临界状态;在三种方案情况下,河北省在 21 世纪初期进入耕地压力较小的时期。

3.3 河北省耕地压力指数的空间演变

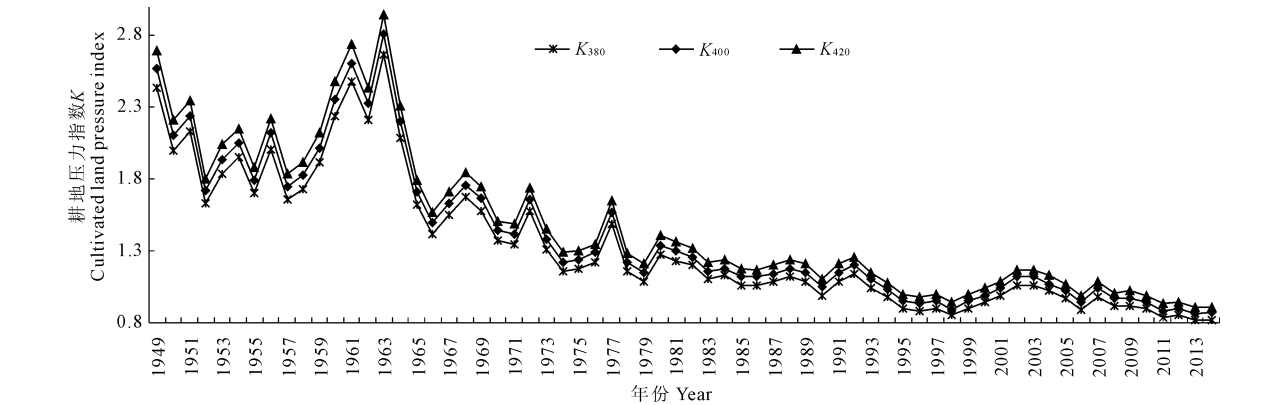
假定人均年粮食需求量 G_r 取值为 400 kg 时,根据公式(1)和公式(2),利用河北省 11 市数据分别计算 1950 年、1970 年、1990 年、2010 年的耕地压力指数,并使用 Arcgis9.3 把各市四个年份的耕地压力指数进行可视化表达(图 6),大部分省市的耕地压力指数均从高值($K \geq 2.00$)下降至较低水平($1.00 \leq K \leq 1.20$)。1950 年 11 市耕地压力指数均大于 1.60;1970 年仅唐山市耕地压力指数小于 1.00,邯郸



注: S_{380} 、 S_{400} 、 S_{420} 分别是人均年粮食需求量 G_r 取值为 380、400、420 kg 时对应的最小人均耕地面积; S_a 是对应年份的实际人均耕地面积。
Note: S_{380} , S_{400} and S_{420} are the smallest cultivated land acreage per capita when the annual grain demand per capita (G_r) are 380, 400 kg and 420 kg respectively; S_a is actual land area per capita.

图 4 河北省最小耕地面积与人均耕地面积变化(1949—2014 年)

Fig.4 Change of smallest cultivated land acreage per capita and cultivated land acreage per capita of Hebei Province from 1949 to 2014



注: K_{380} 、 K_{400} 、 K_{420} 分别是人均年粮食需求量 G_r 取值为 380、400、420 kg 时对应的耕地压力指数
Note: K_{380} , K_{400} and K_{420} are the cultivated land pressure when the annual grain demand per capita (G_r) are 380, 400 kg and 420 kg respectively

图 5 河北省耕地压力指数的时间演变(1949—2014 年)

Fig.5 Change of cultivated land pressure index of Hebei Province over time from 1949 to 2014

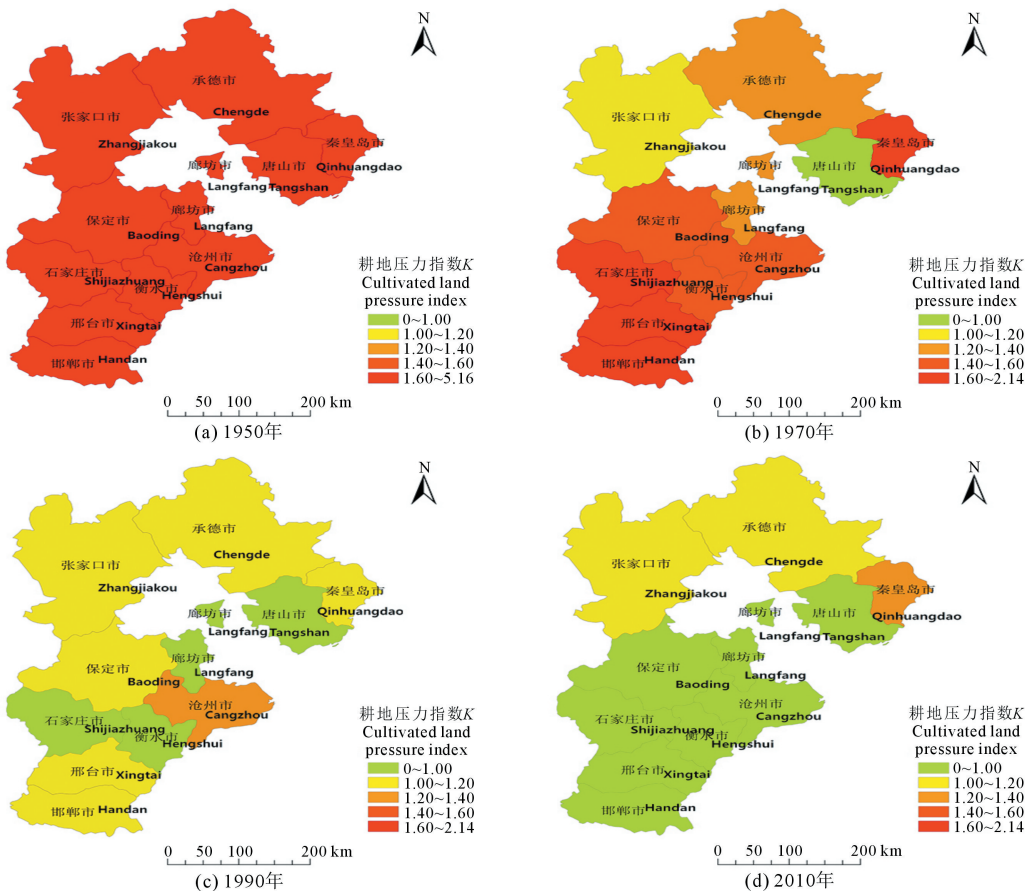


图 6 河北省耕地压力指数的空间演变(1949—2014 年)

Fig.6 Spatial change of cultivated land pressure index of Hebei Province over time from 1949 to 2014

市、石家庄市、秦皇岛市、邢台市耕地压力指数大于 1.60,其余 6 市耕地压力指数位于 1.00~1.60 之间;1990 年唐山市、廊坊市、石家庄市、衡水市耕地压力指数小于 1.00,其余 7 市耕地压力指数基本位于 1.00~1.20 之间;2010 年除了承德市、秦皇岛市、张家口市耕地压力指数大于 1.00,其余 8 市耕地压力指数均低于 1.00。

地理学第一定律指出:任何事物之间均相关,而离得较近的事物总比离得较远的事物其相关性要高^[23],也就是说地理事物是相互关联、相互影响的,而通过计量来表征空间自相关性的方法中最成熟的是 Moran's I 指数。全局 Moran's I 指数代表区域自相关性的程度,取值为 $[-1,1]$ 。当全局 Moran's I 指数为正时,表示空间正相关性,其值越大,空间相关性越强;当全局 Moran's I 指数为负时,表示空间负相关性,其值越小,空间差异越大;当全局 Moran's I 指数为 0 时,空间呈随机性^[24]。Moran 散点图可将区域自相关性的类型进行可视化表达,图中分为四个象限,第一象限 HH 为显著高高集聚类型区,第二象限 LH 为显著低高集聚类型区,第三象限 LL 为显著低低集聚类型区,第四象限 HL 为显著

高低集聚类型区。利用 Geoda 软件基于邻接的“Queen”规则,计算 1950 年、1970 年、1990 年、2010 年河北省 11 市耕地压力指数的全局 Moran's I 估计值,并制作 Moran 散点图(图 7)。4 个年份中,全局 Moran's I 指数依次为 0.1854、-0.2875、-0.0028、0.5346,从弱正相关到弱负相关再到明显的正相关性;近 60 a 以来,位于第一象限 HH 和第三象限 LL 的市域数量从 7 个增加到 11 个,说明近年来河北省市域耕地压力指数较高(低)的地区,其周边市域耕地压力指数也较高(低),耕地压力指数相似市域的空间聚集变得较强。

3.4 河北省耕地压力指数预测

河北省是国家休耕工作试点区域之一,2015—2025 年期间可以进行粮食种植生产的耕地面积在预测的基础上还应减去休耕面积。2016 年 7 月中旬农业部确定 2016 年河北省休耕规模为 13.33×10^4 hm^2 。为保证区域粮食安全,假定河北省休耕面积持续保持在 13.33×10^4 hm^2 。运用 DPS 软件对于未来 11 a 的总人口数、耕地面积、粮食产量、粮食播种面积占总播种面积的百分比、复种指数等变量进行

预测(表 1),分别在人均年粮食需求量 G_t 取值为 380、400、420 kg 下计算河北省耕地压力指数(图 8)。预测得到的未来 11 a 河北省耕地压力指数处于稳定趋势,各年均小于 1,说明未来 11 a 全省出现粮食短缺危机的可能性较小。

耕地压力指数 K 在每年实际人均耕地面积已知情况下,主要受到最小人均耕地面积($S_{\min}$)影响,而 $S_{\min}$ 受粮食单产(p),粮食播种面积占总播种面积

的百分比(q),复种指数(k)三个变量共同影响。可利用 Spearman's 相关系数对 $S_{\min}$ 与 p 、 q 、 k 三个变量进行非参数相关分析(表 2),发现 p 、 k 和 $S_{\min}$ 、 K 呈较明显的负相关, q 和 $S_{\min}$ 、 K 呈正相关;三个变量中 k 、 p 对 $S_{\min}$ 、 K 影响最大。说明粮食单产、复种指数降低时,耕地压力指数随之升高,如在“三年自然灾害”期间,粮食产量大减,复种指数偏低,而 K 值达到了较高水平,甚至超过了建国初期几年。

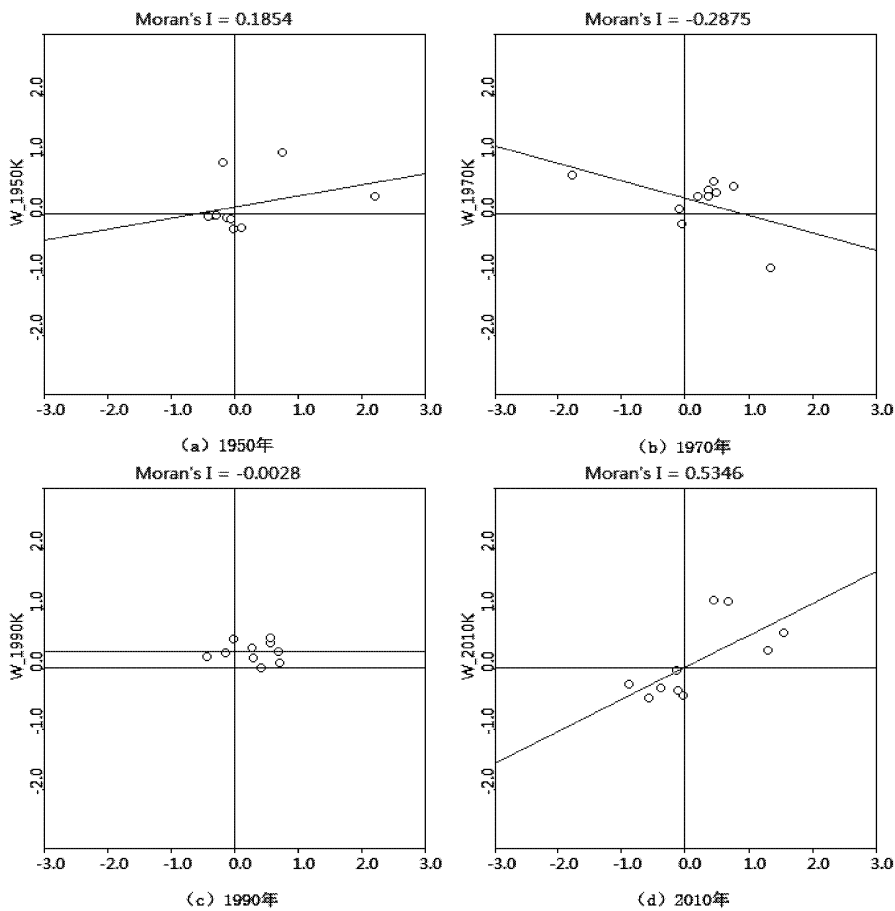


图 7 全局 Moran's I 指数变化(1949—2014 年)
Fig.7 The change of global Moran's I from 1949 to 2014

表 1 基于 GM(1,1) 的总人口数、耕地面积、粮食产量、粮播比、复种指数预测模型及精度检验
Table 1 Prediction model and accuracy test of population, calculative land, grain yield, ratio of grain and cropping index using GM(1,1)

变量 Variable	预测模型 Prediction model		方差比 C	小误差概率 P
	a, b	公式 Formula		
总人口数 Populaiton	$a = -0.0126, b = 3439.1103$	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 276871.1982e^{0.0126t} - 273785.1382$	0.1631	1.0000
耕地面积 Cultivated land	$a = 0.0029, b = 7415202.6626$	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = -2467971748.5273e^{-0.0029t} + 2475237538.5273$	0.4439	0.8308
粮食产量 Grain yield	$a = 0.0241, b = 7573136.4732$	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 319344641.7133e^{0.0241t} - 314649541.7133$	0.2589	1.0000
粮播比 Ratio of grain	$a = 0.002509, b = 86.1896$	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = -34271.487194e^{-0.002509t} + 34356.987194$	0.6482	0.5385
复种指数 Cropping index	$a = 0.0023, b = 1.2295$	$\hat{x}^{(1)}(t+1) = 537.5795e^{0.0023t} - 536.4095$	0.6178	0.7538

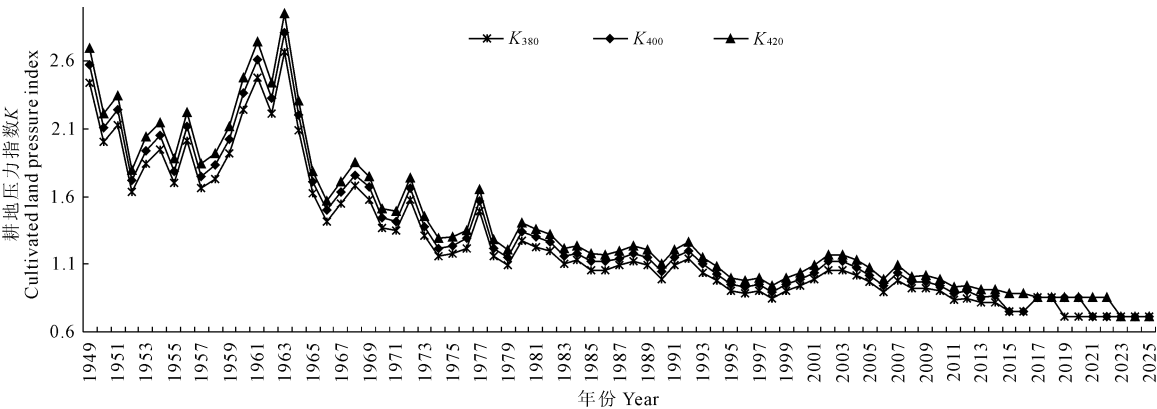


图 8 耕地压力指数变化 (1949—2025 年)
Fig.8 Change of cultivated land pressure index of Hebei Province over time from 1949 to 2025

表 2 人均最小耕地面积 $S_{\min}$ 、耕地压力指数 K 与三个变量 p 、 q 、 k 的 Spearman's 相关分析结果						
Table 2 Correlation between smallest cultivated land area, cultivated land pressure index and three parameters						
项目 Item	K_{380}	K_{400}	K_{420}	K_{380}	K_{400}	K_{420}
粮食单产 p Grain yield per unit area	-0.806 **	-0.807 **	-0.808 **	-0.833 **	-0.837 **	-0.835 **
粮播比 q Ratio of grain	0.621 **	0.623 **	0.625 **	0.641 **	0.643 **	0.642 **
复种指数 k Cropping index	-0.854 **	-0.856 **	-0.854 **	-0.831 **	-0.832 **	-0.831 **

注: ** 表示显著性水平 $P<0.01$, S_{380} 、 S_{400} 、 S_{420} 、 K_{380} 、 K_{400} 、 K_{420} 分别是人均年粮食需求量 G_r 取值为 380、400、420 kg 时对应的最小人均耕地面积和耕地压力指数。
Note: ** means significance level $P<0.01$, S_{380} , S_{400} , S_{420} , K_{380} , K_{400} and K_{420} are the smallest cultivated land acreage per capita and cultivated land pressure when the annual grain demand per capita (G_r) are 380, 400 kg and 420 kg respectively.

4 结论与建议

4.1 结论

结合河北省近 60 a 的耕地、粮食、人口的变化特征,测算耕地压力指数并对其时空特征分析,预测未来 11 a 里耕地压力变化趋势,得到以下结论:

(1) 河北省耕地—粮食—人口系统不断动态发展,自建国以来,耕地面积总体呈缓慢下降趋势,人均耕地面积前期呈快速下降趋势,后期下降速度放缓;粮食产量和人均粮食产量均在震荡中呈现上升趋势;总人口数较快增长,人口自然增长率起伏较大。

(2) 在人均年粮食需求量分别为 380、400、420 kg 的情景下,河北省耕地压力指数均为下降趋势,分别在 1990 年、1995 年、1996 年开始出现低于 1 的情况,在 2005、2008、2010 年之后持续低于 1。在人均年粮食需求量为 400 kg 情况下,河北省 11 市的耕地压力指数经历了从 1950 年均大于 1.60 到 2010 年仅 3 市的耕地压力指数大于 1.00 的过程,耕地压力指数的全局 Moran's I 指数从弱正相关到弱负相关再到明显正相关性,耕地压力指数相似市域的空间聚集性增强。

(3) 根据预测结果结合河北省耕地休耕目标,全省未来 11 a 里耕地面积和人均耕地面积均出现下降,预计 2025 年人均耕地面积(除去休耕的面积)为 0.06 hm²,在人均年粮食需求量为 380、400、420 kg 的情况下,耕地压力指数均小于 1,分别为 0.67、0.71、0.74,说明全省基于粮食安全角度的耕地压力情况较为乐观,不会出现因实行耕地轮作休耕造成的粮食供应不足的现象。

4.2 建议

通过预测在未来 11 a 内,河北省耕地压力指数小于 1,出现粮食安全问题可能性较小。但是如果随着休耕面积的扩大,各市(县)仍可能出现耕地压力较大的情况,据此,提出以下建议:

(1) 利用高新科技途径提高耕地粮食单产,在土地平坦的河北省利用大型农业机械进行耕作已取得较好成效,还应继续加强农田水利基础设施建设,提高农业生产集约化和地区生产专业化水平,选用改良后产量高的品种,利用有机肥料替代化肥,科学耕作和管理耕地,加大对中低产田的改造,提高耕地综合生产能力。

(2) 河北省的粮播比从 1949 年 85.50%下降至 2014 年 72.67%,下降幅度明显。在水热条件和农

地耕作条件较好的区域可提高一定粮播比保证粮食产量满足区域粮食消费。各市县应实行更多的惠农政策,利用粮食直补、良种补助和农资综合补助等农业补贴来提高农民种植粮食的积极性,因地制宜适当提高粮食播种面积占农作物总播种面积的比例。

(3) 严格执行“十分珍惜、合理利用土地和切实保护耕地”的基本国策,坚持最严格的耕地保护制度,加强土地管理力度,减少优质良田因建设城市、修建道路被占用和损毁。科学合理对耕地实行休耕,调整农业种植结构,使耕地休养生息。只有耕地的数量和质量得到保证,粮食安全才能得到根本保障。

参 考 文 献:

[1] 陈印军,易小燕,方琳娜,等.中国耕地资源与粮食增产潜力分析[J].中国农业科学,2016,49(6):1117-1131.

[2] 张正斌,徐 萍.中国水资源和粮食安全问题探讨[J].中国生态农业学报,2008,16(5):1305-1310.

[3] 王 静,林春野,陈瑜琦,等.中国村镇耕地污染现状、原因及对策分析[J].中国土地科学,2012,26(2):25-30.

[4] 邓良基,凌 静,张世熔,等.四川旱耕地生产、生态问题及水土流失综合治理研究[J].水土保持学报,2002,16(2):8-11.

[5] 李玉平,蔡运龙.区域耕地-人口-粮食系统动态分析与耕地压力预测——以河北省邢台市为例[J].北京大学学报(自然科学版),2007,43(2):230-234.

[6] 耿艳辉,闵庆文,成升魁,等.泾河流域耕地-人口-粮食系统与耕地压力指数时空分布[J].农业工程学报,2008,24(10):68-73.

[7] Wesström I, Joel A, Messing I. Controlled drainage and subirrigation: A water management option to reduce non-point source pollution from agricultural land[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014,198:74-82.

[8] Heathwaite A L, Quinn P F, Hewett C J M. Modeling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation [J]. Journal of Hydrology, 2005,304(1-4):446-461.

[9] Olarewaju O E, Adetunji M T, Adeofun C O, et al. Nitrate and phosphorus loss from agricultural land: Implications for nonpoint pollution[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009,85(1):79-85.

[10] 杨 朔,李世平.陕西省耕地数量变化与动因分析[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):225-230.

[11] 刘 玉,郭丽英,刘彦随.1980—2008 年环渤海地区县域粮食的时空动态变化及分析[J].农业工程学报,2012,28(12):230-236.

[12] 龙开胜,陈利根,李明艳.工业化、城市化对耕地数量变化影响差异分析——以江苏省为例[J].长江流域资源与环境,2008,17(4):579-583.

[13] 马文博,李世平,陈 昱.耕地数量变化与经济发展动态关系研究——以陕西省为例[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):181-186.

[14] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等.中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J].自然资源学报,2001,16(4):313-319.

[15] 宋小青,欧阳竹.1999—2007 年中国粮食安全的关键影响因素[J].地理学报,2012,67(6):793-803.

[16] 赵素霞,牛海鹏.基于灰色马尔科夫模型的河南省耕地压力状况研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(8):46-51.

[17] 范秋梅,蔡运龙.基于粮食安全的区域耕地压力研究——以辽宁省为例[J].地域研究与开发,2010,29(5):110-113.

[18] 李玉平,蔡运龙.浙江省耕地变化与粮食安全的分析及预测[J].长江流域资源与环境,2007,16(4):466-470.

[19] 赵永华,刘晓静,奥 勇.陕西省耕地资源变化及耕地压力指数分析与预测[J].农业工程学报,2013,29(11):217-223.

[20] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜.区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J].地理学报,2002,57(2):127-134.

[21] 王 千,金晓斌,阿依吐尔逊·沙木西,等.河北省粮食产量空间格局差异变化研究[J].自然资源学报,2010,25(9):1525-1535.

[22] 唐华俊,李哲敏.基于中国居民平衡膳食模式的人均年粮食需求量研究[J].中国农业科学,2012,45(11):2315-2327.

[23] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970,46(2):234-240.

[24] 熊昌盛,韦仕川,栾乔林,等.基于 Moran's I 分析方法的耕地质量空间差异研究——以广东省广宁县为例[J].资源科学,2014,36(10):2066-2074.