

近 50 年气候驱动下三江平原粮食生产潜力时空演变分析

杜国明¹, 马敬盼¹, 张露洋², 孙晓兵³, 张志宇¹, 刘 钊¹

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北大学 土地管理研究所, 沈阳 110004; 3. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:三江平原作为中国重要的商品粮基地,近年来区域气候变化显著。运用 GAEZ 模型定量测算了 1961—2010 年三江平原粮食生产潜力,从整体状况、年际变化、县域差异等角度对近 50 年以来气候变化导致其粮食生产潜力演变的时空格局进行了分析,旨在为该区种植结构调整及产能保护提供依据。结果表明:(1) 1961—2010 年三江平原粮食平均生产潜力整体呈现波动性增长态势,每 10 a 粮食生产潜力增长量为 140.39 kg/hm²,年均增长率为 0.60%;1991—2010 年的粮食生产潜力呈增加态势但稳定性较低,波动频繁且幅度较大;(2) 三江平原粮食生产潜力变化具有显著的县域差异性,北部的友谊县、富锦市等县域粮食生产潜力较大,而南部的穆棱市、勃利县等县域粮食生产潜力较低,且集贤县、密山市、虎林市等县域粮食生产潜力的年均增长率较高,均在 0.70% 以上,但穆棱市粮食生产潜力年均增长率最小,仅为 0.24%;(3) 三江平原粮食生产潜力除西部和南部部分区域呈负增长趋势外,其余地区均呈正增长趋势;各地区正向增长的程度有所差异,东南部的部分区域的正向增长程度较高,中部的部分区域的正向增长程度较低。

关键词:气候变化; 粮食生产潜力; GAEZ 模型; 时空格局; 三江平原

中图分类号:F323.21; F326.11; S162.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0361-06

Spatiotemporal Characteristics of Grain Potential Productivity Change Under the Background of Climate Change over the Past 50 Years in the Sanjiang Plain

DU Guoming¹, MA Jingpan¹, ZHANG Luyang², SUN Xiaobing³, ZHANG Zhiyu¹, LIU Zhao¹

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Land Management Institute, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: As an important commodity grain base in China, the Sanjiang Plain is also the significant global warming area. This study estimated the grain potential productivity in Sanjiang Plain from 1961 to 2010 by using the Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) model. The spatiotemporal pattern of grain potential productivity caused by climate change in recent 50 years was analyzed from several aspects, such as changes of the whole Sanjiang Plain, annual variation, and differences between counties. The study aimed to provide scientific information for crop pattern optimization and grain production capacity protection. The results indicated that: (1) the average grain potential productivity showed a growth trend during the past 50 years in the Sanjiang Plain, and the grain potential productivity increased by 140.39 kg/(hm² · 10 a), with an average annual growth rate of 0.60%; the grain potential productivity was increasing, but the stability was low, the fluctuation was frequent and the magnitude was large from 1991 to 2010; (2) the spatiotemporal changes of potential grain productivity in different counties showed the great differences, which was caused by the special geographical environment of the Sanjiang Plain; the northern region of the Sanjiang Plain including Youyi County, Fujin City and other counties had the higher potential grain productivity, while southern region of the Sanjiang Plain such as Muling City and Boli County had a lower potential grain productivity; meanwhile, Jixian County, Mishan City, Hulin City had higher average annual growth rate of potential grain productivity than the other counties, and their growth rates were more than 0.70%; however, Mulin City had the lowest growth rate which was 0.24%; (3) the grain potential productivity of the Sanjiang Plain had the positive growth trend except for the negative growth trend in the western and southern parts of this

region, the positive growth of each region was different, and the positive growth of some areas in the south-eastern part was higher, and it was lower in the central part.

Keywords: climate change; grain potential productivity; GAEZ model; spatiotemporal characteristics; Sanjiang Plain

世界粮农组织把应对气候变化列为解决世界粮食供给和缓解饥饿的全球性重大挑战^[1]。中国作为农业和人口大国,人口增长与粮食供给矛盾突出,气候变化背景下的农业生产对国家粮食安全以及社会稳定影响深远^[1-3]。在影响粮食产量的众多因素中,单产提高对粮食增产的贡献度最大^[4-6]。同时由于耕地面积的有限性,稳定可持续提高粮食单产已成为提高粮食产量的重要举措。目前保障粮食安全的核心已由产量安全逐步转向产能安全。核算粮食产能和生产潜力及其变化,可以为“藏粮于地”、耕地资源绿色可持续发展等国家耕地及粮食安全战略的实施提供依据^[7-12]。

在气候变化对区域粮食生产潜力影响的研究中,学者们采用了多种方法和模型,从全国或者局部区域尺度,对区域整体或者个别作物类型的生产潜力进行分析^[13-16]。联合国粮农组织和国际应用系统分析研究所共同开发了农业生态区划(Global Agro-Ecological Zones, GAEZ)模型, GAEZ 模型经过不断地完善与改进,已被国内外众多学者应用到粮食生产潜力的估算中,结果有较高的准确性和科研意义^[17-21]。

三江平原地处中温带北段、东北地区东部,是东北地区乃至全国气候变暖最为显著的区域,农业受气候影响显著^[22]。同时,三江平原在新中国成立后陆续进行大规模农业开发,现已成为我国重要的粳稻主产区和商品粮基地,对我国农业发展和粮食供给贡献较大。因此,分析气候驱动下三江平原粮食生产潜力时空演变具有较为重要的现实意义。本文运用 GAEZ 模型对三江平原粮食生产潜力进行计算,并针对三江平原粮食生产潜力的时间变异和空间差异特征进行分析,旨在为区域耕地资源可持续利用、粮食产能保护及农业适应性研究提供依据,为后续耕地资源优化配置、供给侧结构调整提供参考。

1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省东部,地理位置介于 $43^{\circ}50'02''$ — $48^{\circ}24'41''$ N, $129^{\circ}11'49''$ — $134^{\circ}46'37''$ E。行政区域包括佳木斯、鸡西、鹤岗、双鸭山、七台河等地级市以及牡丹江市所属的穆稜县和哈尔滨所属的依兰县,共计 23 个县(市、区)。处于中温带湿润、半湿润大陆性季风气候区。多年平均降水量 450~650 mm,平均气温为 $1\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。四季分明,春季气候较为干燥,风力较大;夏季高温日长,雨量丰富;秋季多风,

昼夜温差大;冬季严寒干燥。土壤有机质和养分总贮量较高,有较高的潜在肥力。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

GAEZ 模型综合考虑气象、土壤适宜性、耕地利用等多方面的因素,数据包括:1961—2010 年三江平原及周边区域的 21 个气象站点的气象数据,其中气温数据涉及日均温、日最高温度、日最低温度、积温等;降水数据涉及降水量、相对湿度、降水强度、降水变率等;辐射数据包括日照时数、有效辐射量等。土壤数据包括土壤质地、土壤肥力、土壤类型、侵蚀强度等属性,来自于中国科学院资源环境科学数据中心。地形高程数据包括坡度和坡向信息(分辨率为 30 m),来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘数据(SRTM)。耕地数据包括土地利用结构、土地利用方式、耕地灌溉比例等,其中耕地利用数据(2010 年)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(比例尺为 1:10 万),耕地灌溉数据来自于黑龙江省统计年鉴等。为分析气候变化对三江平原粮食生产潜力的影响,本文假定研究区土地利用未发生变化,以 2010 年土地利用数据为基础,利用 1961—2010 年气候数据分析 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 栅格单元的粮食生产潜力。

2.2 研究方法

2.2.1 GAEZ 模型 GAEZ 模型采用逐级修正的方式计算生产潜力^[23]。首先根据生长参数(叶面积指数、收获指数等)和光照辐射条件计算光合生产潜力;再结合降水和气温条件计算光温生产潜力;考虑土壤水限制条件计算光温水生产潜力;综合分析病虫害、霜冻等农业灾害计算气候生产潜力。同时综合考虑土壤肥力、pH 值、土壤质地、地貌类型、土壤主要性状指标等信息提取适宜种植区。针对适宜种植区模拟理想的农业生产条件,计算适宜种植区的生产潜力。

GAEZ 模型中生产潜力的估算分别考虑雨养和灌溉条件。雨养条件是指有水胁迫条件下作物的生产潜力;灌溉条件是指保障水条件充分,即假设水对生产潜力没有影响。此计算方法与我国实际种植情况相一致,符合农业生产,则总生产潜力计算公式如下:

$$\text{yield}_{\text{total}} = \text{yield}_{\text{rain-fed}}(1-i) + \text{yield}_{\text{irrigated}} \times i \quad (1)$$

式中: $\text{yield}_{\text{total}}$ 为总生产潜力; $\text{yield}_{\text{rain-fed}}$ 为雨养条件下的生产潜力; $\text{yield}_{\text{irrigated}}$ 为灌溉条件下的生产潜力; i 为灌溉面积与总耕地面积的比率(%)。

2.2.2 Mann-Kendall 法 世界气象组织推荐的 Mann-Kendall 法(简称 M-K 法)是一种非参数统计检验方法,适用于非正态分布的数据,常用来检测气候不连续的变化—突变现象^[24]。由于其不要求所分析数据服从某一概率分布,而且其趋势检测能力与参数趋势检测方法相同,因而受到国际水文组织的认可。本文选取了 M-K 方法对三江平原粮食生产潜力序列进行趋势和突变点检验。

2.2.3 HP 滤波法 气候变化导致粮食生产潜力出现年际差异,即粮食生产潜力的波动。这种波动可以分为长期波动和短期波动。长期波动是粮食生产潜力随着时间的迁移表现出的整体波动情况和特征,短期波动是指粮食生产潜力相对于长期趋势的偏离。本文利用波动指数来反映近 50 年来三江平原粮食生产潜力的波动情况。为了计算波动指数,本文采用 HP 滤波方法,将粮食生产潜力的趋势成分及周期成分进行分离。其中的趋势成分即潜在生产潜力,周期成分即生产潜力缺口^[25]。

波动指数计算公式为:

$$I_t = (Y_t - \hat{Y}_t) / \hat{Y}_t \times 100\% \quad (2)$$

式中: Y_t 为 t 年实际生产潜力; \hat{Y}_t 为 t 年生产潜力的趋势值; $Y_t - \hat{Y}_t$ 为 t 年生产潜力剔除长期趋势后的绝对波动,即 t 年实际生产潜力对长期趋势的绝对偏差; I_t 表示 t 年生产潜力在剔除趋势值后相对于长期趋势的波动程度。

2.2.4 线性回归系数 用 x_i 表示样本量为 n 的某一变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 和 t_i 之间的一元线性回归:

$$x_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: a 为回归常数; b 为回归系数。 a 和 b 用最小二乘法进行估计。

对数据 x_i 及相应的时间 t_i ,回归系数 b 最小二乘估计为:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (4)$$

回归系数 b 的符号表示变量的趋势倾向性,当 $b > 0$ 时,说明变量 x 随时间的增加呈上升趋势;反之 $b < 0$ 表示随时间的增加变量 x 呈下降趋势, b 值的大小反映了上升或下降的倾向程度。

3 结果与分析

3.1 粮食生产潜力的时间变化分析

将利用 GAEZ 模型计算的 2010 年三江平原各县(市、区)的粮食产能与由统计数据得到的粮食产量进行相关性分析,发现 Pearson 相关性为 0.653,两

者在 0.01 水平呈双侧显著相关,粮食生产潜力的模拟效果较好,可以为现实农业进行生产指导。分析 50 年间长时间尺度三江平原粮食生产潜力演变曲线发现(图 1),1961—2010 年的三江平原粮食年均生产潜力在 2 964.60~5 127.55 kg/hm² 波动,标准差为 555.43 kg/hm²,50 a 平均值为 3 996.78 kg/hm²,以每 10 年 140.39 kg/hm² ($y = 14.039x - 23878$, $R^2 = 0.13577$)的线性倾向率增加。

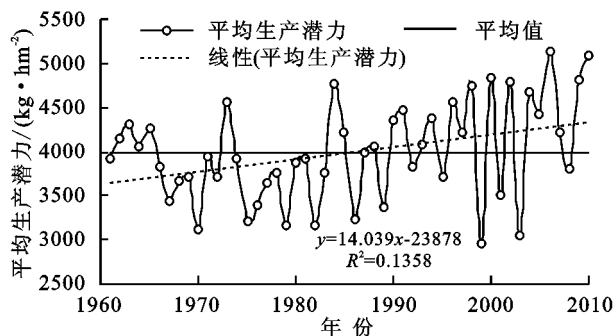


图1 1961—2010年三江平原粮食平均生产潜力变化情况

利用 Mann-Kendall 方法对三江平原粮食生产潜力序列进行趋势和突变点检验。研究发现(图 2), 1961—2010 年生产潜力长期呈现上升(1961—1965 年)—下降(1966—1990 年)—上升(1991—2010 年)趋势,整体呈现上升趋势。其中 1961—1970 年生产潜力呈先上升后下降的趋势,并于 1970 年(UFK=−2.2361)达到 $\alpha=0.05$ 显著水平;1971—1980 年一直呈现下降趋势,并于 1979 年(UFK=−2.2041)达到 $\alpha=0.05$ 显著水平;1981—1990 年一直呈现下降趋势,并于 1982 年(UFK=−2.0584)和 1983 年(UFK=−1.9808)达到 $\alpha=0.05$ 显著水平;1991—2000 年一直呈现上升趋势,并于 1996 年发生突变,出现显著增长;2001—2010 年一直呈现上升趋势,并于 2006 年(UFK=1.9978),2007 年(UFK=2.0817),2009 年(UFK=2.2412)和 2010 年(UFK=2.568)达到 $\alpha=0.05$ 显著水平。

分析 1961—2010 年三江平原粮食生产潜力的每 10 年间变化发现(图 3),就生产潜力平均值而言,呈现 2001—2010 年>1991—2000 年>1981—1990 年>1961—1970 年>1971—1980 年的态势。除 1971—1980 年外,随着时间的推移,不同时间段之间生产潜力平均值均稳步增加,但不同时间段的变化差异显著。1961—1970 年,生产潜力以每年 95.71 kg/hm² 的线性倾向率减少;1971—1980 年,生产潜力以每年 55.75 kg/hm² 的线性倾向率减少;1981—1990 年,生产潜力以每年 21.72 kg/hm² 的线性倾向率增加;1991—2000 年,生产潜力以每年 5.60 kg/hm² 的线性倾向率增加;2001—2010 年,生产潜力以每年 106.13 kg/hm² 的线性倾向率增加。就线性倾向率而言,

1961—1980 年呈现减少态势,1981—2010 年呈现增加态势,且 2001—2010 年的增加速率较大。

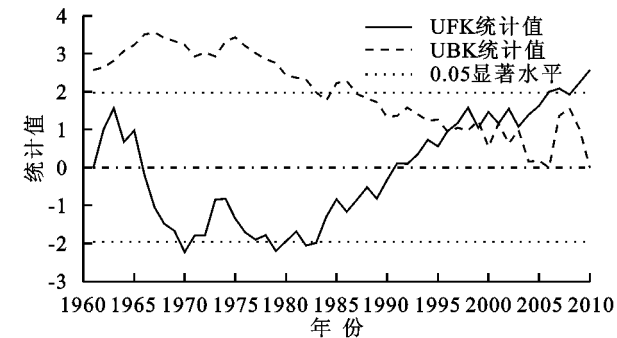


图 2 1961—2010 年三江平原粮食生产潜力的 Mann-Kendall 统计量曲线

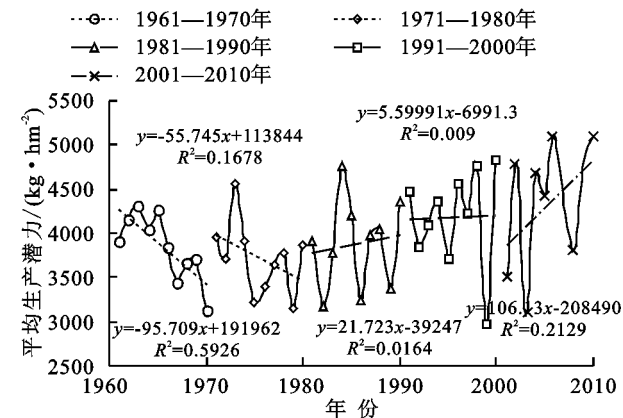


图 3 1961—2010 年三江平原粮食的年代变化

以 1961—2010 年三江平原粮食平均生产潜力为研究对象,运用 Hodrick-Prescott Filter (H-P 滤波法)进行三江平原粮食生产潜力的波动性观测(平滑参数取 100),得到波动指数(图 4)。可以发现,1961—2010 年三江平原粮食生产潜力波动幅度不大,为-28.20%~24.02%。就波动幅度来看,呈现 1991—2000 年>2001—2010 年>1981—1990 年>1971—1980 年>1961—1970 年的态势,1981—2010 年的波动幅度较大,说明该时间段粮食生产潜力与长期趋势的偏离较大,稳定性较差;就波动次数而言,1991—2010 年的波动次数较多。整体看,1991—2010 年的粮食生产潜力稳定性较低,波动频繁且幅度较大。

3.2 粮食生产潜力的空间差异分析

三江平原特殊的地理环境致使县域粮食生产潜力分布与变化具有显著差异(表 1):(1) 空间分布上,三江平原北部地区(友谊县、绥滨县、桦川县、集贤县和富锦市)等县域粮食生产潜力平均值较大,而南部的穆棱市、鸡西市市辖区等县域粮食生产潜力平均值较低;(2) 在县域粮食生产潜力的变化上,北部的集贤县和绥滨县以及东部的密山市和虎林市等县域粮食生产潜力的年均增长率较大,而南部的穆棱市和鸡西市市辖区以及西部的依兰县等县域粮食生产潜力

的年均增长率较小;(3) 在县域粮食生产潜力的稳定性上,穆棱市、友谊县、汤原县和鸡西市市辖区粮食生产潜力的变异系数较低,较为稳定;密山市、抚远县和虎林市生产潜力的变异系数较高,较为不稳定。

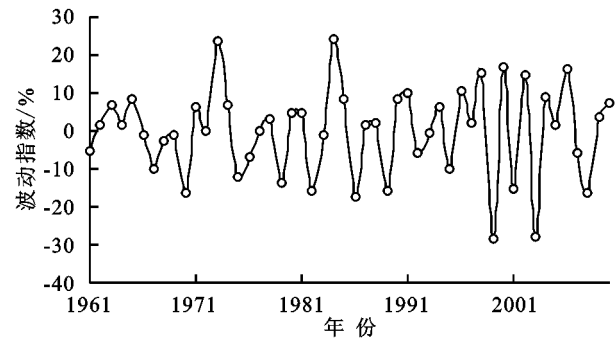


图 4 1961—2010 年三江平原粮食生产潜力波动指数
表 1 1961—2010 年三江平原县域粮食生产潜力相关指数

县(市、区)	平均值/ (kg·hm ⁻²)	变异 系数	年均 增长率/%
友谊县	5428.75	0.13	0.65
绥滨县	5052.15	0.18	0.68
桦川县	5039.40	0.13	0.68
集贤县	4827.33	0.17	0.82
富锦市	4815.34	0.15	0.67
萝北县	4488.68	0.14	0.49
依兰县	4390.32	0.15	0.33
汤原县	4285.78	0.13	0.51
佳木斯市市辖区	4232.08	0.13	0.47
同江市	4058.50	0.17	0.46
鹤岗市市辖区	4051.11	0.15	0.56
虎林市	3971.75	0.19	0.70
桦南县	3970.70	0.17	0.51
宝清县	3730.67	0.17	0.69
密山市	3658.18	0.21	0.79
勃利县	3647.71	0.17	0.56
饶河县	3513.70	0.18	0.57
抚远县	3380.00	0.21	0.65
双鸭山市市辖区	3275.78	0.19	0.69
鸡东县	3119.05	0.19	0.66
七台河市市辖区	3078.83	0.18	0.68
穆棱市	2750.47	0.11	0.24
鸡西市市辖区	2650.93	0.13	0.39

分析线性回归系数的空间分布(图 5),可以看出三江平原粮食生产潜力的空间变化趋势大致有以下特点:(1) 除西部和南部(桦川县、佳木斯市市辖区、汤原县、穆棱市和鸡西市市辖区)等地的部分区域呈粮食生产潜力的负增长趋势外,其余地区均呈正增长趋势;(2) 各地区正向增长的程度有所差异,东南部(密山市和虎林市)等地的部分区域的正向增长程度较高,中部(集贤县、富锦市和桦川县)等地的部分区域的正向增长程度较低。

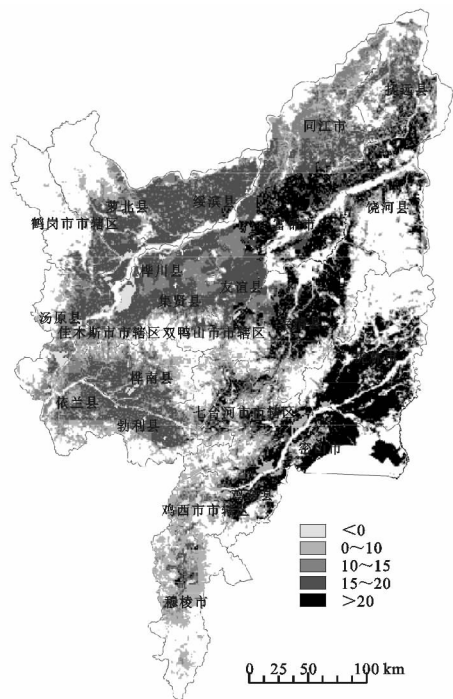


图5 1961—2010年三江平原粮食生产潜力线性回归系数

4 讨论与结论

4.1 讨论

三江平原在经历大规模开荒以及持续不断的小规模农垦活动后,土地利用结构发生显著变化,耕地面积急剧增加,湿地面积大幅度减少,致使三江平原区域气候变化剧烈,且对温度、降水等产生较大的影响^[26-27]。20世纪60年代、70年代 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温偏低,夏季低温发生频繁同时伴有降雨量减少突变和增温突变现象^[28];20世纪80年代气候变化显著,主要体现在增温突变、年日照时数和平均风速的减少突变上^[29]。气候的极端性变化极大地影响了该区的农业生产,进而对粮食生产潜力产生一定的负面影响,致使三江平原粮食生产潜力长期呈降低趋势。而20世纪90年代后,三江平原气候突变较少,升温显著,且此阶段的升温是全球气候变暖同步的区域响应表现,对区域粮食生产潜力有一定的促进作用^[28-30],致使三江平原粮食生产潜力呈升高趋势。气候通过影响粮食生产潜力进而对区域粮食产能及其稳定性产生深远影响。因而,必须合理适度进行耕地结构性调整,以减轻气候波动对粮食产能稳定性的影响,提升耕地利用与农业生产对气候变化的适应能力。

三江平原粮食生产潜力的空间差异性与其温度、降水的空间差异性密切相关。三江平原北部和东部属于湿润气候,而西部和西南部则属于半湿润气候。同时区域气候变化不仅与土地利用变化有关,而且与地形地貌有较大的关联。三江平原北部和东部多为平原,地势较低,而西部和西南部则多为山地丘陵。三江平原半湿润

环境的形成与包括完达山在内的长白山对东南暖湿气流的屏障作用有关,由此在背风的一侧出现气候温和、降水较少的地方性气候,而东部乌苏里江沿岸各县年降水量大于年蒸发量,其余地区则反之^[30-31]。温度、降水的空间差异致使三江平原粮食生产潜力均值呈现北高南低;年均增长率呈北部、东部明显高于南部;以及西部、南部生产潜力长期呈负增长的趋势。今后该区进行耕地资源可持续开发利用时,应充分考虑地貌因素对小区域气候的影响,进行适当地种植结构调整,以保护区域粮食产能的稳定正向发展。气候变化背景下,三江平原积温界限北移,促进了区域耕地种植结构的迅速调整,耕地水田化现象凸显。同时,为应对气候变化,农区、垦区两种不同耕地管理模式对区域粮食生产潜力的影响也是值得进一步探讨的问题。为分析气候变化对粮食生产潜力的影响,本文的土地利用数据以2010年数据为基础,没有考虑耕地面积变化、种植业结构调整等对区域粮食综合生产能力的影响,这将是本研究继续深化的方向。

4.2 结论

(1) 1961—2010年三江平原粮食平均生产潜力长期呈现上升—下降—上升趋势,整体呈现增长态势。50 a粮食平均生产潜力平均值为 $3\,996.78\text{ kg/hm}^2$,每10 a粮食生产潜力增长量为 140.39 kg/hm^2 ,年增长率为 0.60% 。

(2) 三江平原粮食生产潜力每10 a间的变化特征有所差异。就生产潜力平均值而言,呈现2001—2010年 $>1991—2000$ 年 $>1981—1990$ 年 $>1961—1970$ 年 $>1971—1980$ 年的态势;就线性倾向率而言,1961—1980年呈现减少态势,1981—2010年呈现增加态势,且2001—2010年的增加速率较大。但1991—2010年的粮食生产潜力稳定性较低,波动频繁且幅度较大。

(3) 三江平原粮食生产潜力的空间差异主要表现为北部区域的高生产潜力和南部地区的低生产潜力。在县域生产潜力的增长率和稳定性上,呈现稳定的高增长率的县市有:桦川县、富锦市、鹤岗市市辖区和友谊县;呈现不稳定的高增长率的县市有:集贤县、密山市、虎林市、宝清县、双鸭山市市辖区、绥滨县、七台河市市辖区、鸡西市、抚远县、饶河市和勃利县;呈现稳定的低增长率的县市有:汤原县、萝北县、佳木斯市市辖区、鸡西市市辖区、依兰县和穆棱市;呈现不稳定的低增长率的县市有:桦南县和同江市。

(4) 三江平原粮食生产潜力线性回归系数在空间上除西部和南部(桦川县、佳木斯市市辖区、汤原县、穆棱市和鸡西市市辖区)等地的部分区域呈粮食生产潜力的负增长趋势外,其余地区均呈正增长趋势;各地区正向增长的程度有所差异,东南部(密山市和虎林市)等地的部分区域的正向增长程度较高,中

部(集贤县、富锦市和桦川县)等地的部分区域的正向增长程度较低。

参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization. FAO Profile for Climate Change[R]. Rome: FAO, 2009.
- [2] Tubiello F N, Fischer G. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000—2080[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2007, 74(7): 1030-1056.
- [3] 尹朝静, 李谷成, 高雪. 气候变化对中国粮食产量的影响: 基于省级面板数据的实证[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 89-94.
- [4] 封志明, 孙通, 杨艳昭. 2003—2013 年中国粮食增产格局及其贡献因素研究[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 895-907.
- [5] 刘玉, 高秉博, 潘瑜春, 等. 基于 LMDI 模型的中国粮食产量变化及作物构成分解研究[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1709-1720.
- [6] 李月, 孔祥斌, 张安录, 等. 基于 LMDI 模型的我国省域粮食生产变化影响因素分析[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(1): 129-140.
- [7] 杜国明, 刘彦随, 于凤荣, 等. 耕地质量观的演变与再认识[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 243-249.
- [8] 倪超, 雷国平. 黑龙江省粮食生产与耕地利用耦合分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 246-259.
- [9] 余海龙, 黄菊莹, 王亭荷. 宁夏中部干旱带 56 年来气候生产潜力变化特征研究: 以宁夏中宁县为例[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(6): 172-175.
- [10] Zhang Y, Cai Y, Beach R H, et al. Modeling climate change impacts on the US agricultural exports[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(4): 666-676.
- [11] 黄志英, 梁彦庆, 葛京凤, 等. 河北省作物生产潜力及人口承载力研究[J]. *农业现代化研究*, 2005, 26(2): 93-96.
- [12] Ben Zaied Y, Zouabi O. Climate change impacts on agriculture: A panel cointegration approach and application to Tunisia[N]. *Mpra Paper*, 2015-6-3(64711).
- [13] Yao F, Xu Y, Lin E, et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3): 395-409.
- [14] Li F, Zhang S, Xu X, et al. The response of grain potential productivity to land use change: A case study in western Jilin, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(11): 14729-14744.
- [15] Li T S, Wu H H, Zhao H Z. Grain potential productivity of cultivated land in Baoji, Shaanxi Province, China[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 295/298: 2631-2634.
- [16] Izaurrealde R C, Rosenberg N J, Brown R A, et al. Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2003, 117(1): 73-96.
- [17] 赵媛媛, 何春阳, 李晓兵, 等. 干旱化与土地利用变化对中国北方草地与农牧交错带耕地自然生产潜力的综合影响评价[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 123-135.
- [18] Lv Z, Liu X, Cao W, et al. Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171/172(3): 234-248.
- [19] Liu L, Xu X, Chen X. Assessing the impact of urban expansion on potential crop yield in China during 1990—2010[J]. *Food Security*, 2015, 7(1): 33-43.
- [20] 杜国明, 张露洋, 徐新良, 等. 近 50 年气候驱动下东北地区玉米生产潜力时空演变分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(5): 864-874.
- [21] 毛留喜, 赵俊芳, 徐玲玲, 等. 我国“镰刀弯”地区春玉米种植的气候适宜性与调整建议[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3935-3943.
- [22] 栾兆擎, 章光新, 邓伟, 等. 三江平原 50 a 来气温及降水变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 39-43.
- [23] International Institute for Applied Systems Analysis, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3. 0) [R]. Laxenburg: IIASA and Rome: FAO, 2012.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [25] Razzak W. The Hodrick-Prescott technique: A smoother versus a filter: An application to New Zealand GDP[J]. *Economics Letters*, 1997, 57(2): 163-168.
- [26] 杜国明, 于凤荣, 张树文, 等. 21 世纪初期三江平原北部土地利用时空特征分析[J]. *中国农村水利水电*, 2012, 54(2): 72-74.
- [27] 杜国明, 杜蕾, 杨厚翔, 等. 三江平原北部近 55 年来土地垦殖的时空格局研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 156-160.
- [28] 闫敏华, 邓伟, 陈泮勤. 三江平原气候突变分析[J]. *地理科学*, 2003, 23(6): 661-667.
- [29] 邹立尧, 国世友, 牛宁. 三江平原 1960—2004 年农业气候环境年代际变化[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(8): 844-850.
- [30] 闫敏华, 陈泮勤, 邓伟, 等. 三江平原气候变暖的进一步认识: 最高和最低气温的变化[J]. *生态环境*, 2005, 14(2): 151-156.
- [31] 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 等. 地形因子对三江平原土地利用/覆被变化的影响研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 10-15.