

中国稻作与旱作生产的气象减产风险评价

程 琨, 潘根兴*, 李恋卿, 刘晓雨, 崔立强

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所/农业与气候变化研究中心, 南京 210095)

摘 要:本研究利用直线滑动平均模型对中国各省区 1950—2006 年旱作和稻作的趋势产量进行了模拟,计算出历年的气象产量,并采用减产率指标、减产率浮动性指标、高风险概率指标 3 个评价指标以及综合性指标进行了气象产量的气候变化减产风险评价,同时采用变异系数对我国各省产量波动状况进行了分析,并将各指标与年平均降水变率、年平均气温变率进行耦合分析。结果表明,旱作高减产风险和波动风险主要分布在华东和华南地区,而稻作则体现为由南向北风险逐渐增加。年平均降水变率和年平均气温变率高的地区,其水稻气象减产风险较大。由于人口增长和经济发展的压力,中国农业面临着应对气象减产和保证粮食增产的双重压力。

关键词:气候变化;气象产量;减产风险;粮食安全;风险评价

中图分类号:X16 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)09-1764-08

Risk Assessment of Meteorological Yield Decline of Dryland Crops and Paddy Rice Against Climate Change in China

CHENG Kun, PAN Gen-xing*, LI Lian-qing, LIU Xiao-yu, CUI Li-qiang

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture/Center of Agriculture and Climate Change, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Assessment of the impact of climate change on cereals production of China in the past will bring much reference for mitigating climate change in agriculture in the future. In this study, linear moving average model was used to stimulate trend yield of dryland crops and rice production in China. Then a dataset of meteorological yield was compiled at provincial level. By calculating the indices, such as annual yield reduction rate, variability of yield decline and probability of high risk as well as an integrated risk index, an assessment of climate change in cereals production was conducted. In addition, coupling analysis between all indices and variability of mean annual precipitation and temperature was taken. The results showed that severe meteorological yield decline in dry farming occurred in extensive area of East China and South China, while the cut risk of rice product aggravate gradually from south to north across China. The meteorological yield reduction of rice in regions where existed high variability of average annual precipitation and temperature would show much high risks.

Keywords: climate change; meteorological yield; cut risk; food security; risk analysis

气候变化对农业生产影响的研究成为近年来各国学者关注的热点课题^[1-4]。中国地处东亚季风区,是世界上气候变化最为显著、气象灾害最频繁的国家之一,未来气候变化及其极端天气事件的增多将有可能影响中国粮食生产的稳定和持续发展^[5],中国作为世界上人口最多的发展中国家,以占全球 12%的农作物

收获面积养活占世界 22%的人口^[6],与此同时,农业为我国 2007 年国内生产总值(GDP)贡献了 11%的比例^[7]。因此,粮食安全问题关系到人的生存和国家稳定。但有研究表明,由于未来 CO₂ 浓度增加,我国粮食产量潜力将会增大,但是由于水分胁迫和极端天气事件的增加,也会增大粮食生产的不稳定性,降低其适应性^[8]。因此,明确气候变化对我国粮食生产的影响,保证粮食的高产、稳产是现阶段的重要课题。

水稻作为我国重要的粮食作物之一,年种植面积约 3 000 万 hm²,占粮食作物种植面积的近 1/4,占粮

收稿日期:2011-03-19

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903003)

作者简介:程 琨,男,博士研究生,研究方向为气候变化与农业生产。

E-mail: kuncheng86@yahoo.com.cn

* 通讯作者:潘根兴 E-mail: pangenxing@yahoo.com.cn

食总产量的45%^[9]。而幅员辽阔、气候类型多样带来的水资源分布不均^[7],使得中国大部分地区,尤其是华北、西北地区以旱作作物为主。稻作和旱作生产由于其各自的特征,受各种气象因子影响有很大差异,特别是水分。因此,探明我国各区域旱稻作生产受气候变化影响状况,对及时采取应对策略,缓解未来气候变化影响有极其重要的科学意义。

本文采用1950—2006年间中国各省粮食产量的统计数据,进行粮食生产的气象产量风险评价,通过综合分析,期望探讨在气候变化影响下我国粮食生产风险状况及其区域性表现特点,为未来中国农业应对气候变化的战略提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中所用粮食产量数据来自《中国统计年鉴》和《新中国六十年统计资料汇编》;水稻产量数据来自国际水稻研究所(International Rice Research Institute, IRRI)统计数据及《中国统计年鉴》。包括除港澳台以外的30个省、自治区、直辖市(重庆市未从四川省析出)的粮食产量数据;由于青海省基本没有水稻种植,因此水稻产量数据只包括除港澳台、青海省以外的29个省、自治区、直辖市。除四川省、西藏自治区外,样本序列均达到57年。

粮食产量包括水稻、小麦、玉米、大豆及谷类产量,因此将粮食产量去除水稻产量后,即可得到旱作作物产量数据。

气象数据来源于中国气象资料共享网站。搜集了分省各气象站年平均气温、年平均降水数据,计算近60年两因子的变异系数,以期辨明影响气象减产、产量波动性的主要气象因子。

1.2 地理区域划分

为便于评述和分析,根据各省地理位置文中将中国大陆分为东北、华北、华东、华南、西北、西南六大地理区域。其中,东北包括吉林、辽宁、黑龙江,华北包括北京、天津、内蒙古、河北、山西,华东包括山东、江苏、浙江、上海、安徽、江西,华南包括广东、福建、广西、海南、河南、湖北、湖南,西北包括陕西、新疆、甘肃、宁夏、青海,西南包括重庆、四川、云南、贵州、西藏。

1.3 产量的分解

根据影响作物最终产量形成的各种自然和非自然因素,按影响的性质和时间尺度将粮食单产时间序列分解为趋势产量、气象产量及随机产量^[10],如式(1):

$$Y = Y_t + Y_w + \varepsilon \quad (1)$$

式中 Y 代表作物的实际产量, Y_t 代表作物的趋势产量; Y_w 是受以气象要素为主的短周期变化因子影响的产量分量,称为气象产量,以一年为周期; ε 为随机因素决定的随机产量。相对于气象因子,土壤因子、地形因子和人为因子等环境因子年际间变化较小,能代表某一地域某一时期的生产力水平,因此常把这些因子决定的作物产量定义为趋势产量,即 Y_t 反映的是农业生产水平对作物产量的贡献。随着作物品种不断改良、农用化肥改进以及种植技术的提高,作物的趋势产量在逐年增高,且在作物产量中占的比重较大,而随机产量在作物产量中占的比重很小,常常被忽略不计。因此,(1)式可以简化为:

$$Y = Y_t + Y_w \quad (2)$$

本研究中,趋势产量采用直线滑动平均模型^[13]进行模拟;求出趋势产量之后,气象产量则为:

$$Y_w = Y - Y_t \quad (3)$$

进一步作相对化变换:

$$R(\%) = Y_w \times 100 / Y_t \quad (4)$$

此时,气象产量就变成一个相对比值,称为相对气象产量,表明粮食波动的幅值不受时间和空间影响,具有可比性。相对气象产量序列 $\{R_t\}$ 是计算风险评价指标的基础,其表明了粮食单产偏离趋势产量的幅度。相对气象产量小于0,则表明该年属于气象减产年,否则该年属于气象增产年。根据数据的分布状况以及我国实际情况,我们定义相对气象产量 $\leq -5\%$ 的年份为气象灾年,以期对我国各区受灾状况进行评估。

1.4 评价要素选取与计算方法

根据风险评价理论,本文主要采用年均减产率、变异系数、高风险概率3个风险指标及综合减产风险指标对我国粮食产量减产风险进行评价,采用变异系数对产量波动性进行分析,最终使用聚类分析的方法将我国粮食生产的气候变化影响风险分为严重、重、中、轻、轻微5个风险级别。

1.4.1 产量波动性分析

本研究利用变异系数以描述供试时间段各省区粮食单产的波动情况,而产量的波动性应当消除趋势产量变化的影响,因此,将变异系数计算方法改进为下式^[11]:

$$CV = \sqrt{\sum (Y - Y_t)^2 / (n-1) / \bar{Y}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, n 代表样本数,即观察年数; $\bar{Y}$ 代表年均

单产。

1.4.2 年平均减产率

本指标反映研究区域粮食产量的总体减产状况。计算方法为将所有减产年份的相对气象产量加和后除以全部样本量,即:

$$ADR = \left| \sum_{i=1}^n R_i / n \right| \quad (6)$$

式中, ADR 为年平均减产率, R_i 为相对气象产量, n 为所有样本数。

1.4.3 减产率浮动性

本指标用以评价该地区减产率的变异程度,用所有减产年份相对气象产量的变异系数表示,即:

$$UC(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 / (n-1)}}{|\bar{R}|} \times 100 \quad (7)$$

式中, UC 为相对气象产量的变异系数, $\bar{R}$ 为相对气象产量的算术平均值, n 为所有样本数。

1.4.4 高风险概率

风险概率指标^[12],即通过已知样本的概率密度函数,计算该地区粮食产量位于增产或减产区间的概率。由于农作物产量表现为平年较多,大丰大欠年份较少,本研究通过正态拟合优度检验,证明在消除生产力水平影响之后,所有地区粮食单产相对气象产量序列符合正态分布,进而利用正态分布的性质得到反映粮食生产风险状况的不同增减产区间及相应的概率大小,即:

$$F(P) = \int_{-\infty}^P \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(R-\bar{R})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (8)$$

式中: P 值为减产概率,本研究中计算减产达到 5% 的概率,从而评价该地区粮食产量高减产风险的程度; σ 为标准差。

1.4.5 综合减产风险

综合减产风险指标是整合年均减产率、变异系数、高风险概率 3 个风险指标的新指标。具体方法是,首先将每个指标进行极差化处理以消除不同量纲的影响,使各风险指标介于 0~1 之间,再将各指标相累加而得到气象产量风险的综合指标^[13]。

1.5 统计方法

本研究中数据的搜集、整理、各项指标的计算以及图表制作在 MS-Excel 2003 中完成;在 JMP 7.0 软件中进行聚类分析和多元相关分析;而 3 个指标的极差化处理在 Minitab 15 中进行。

2 结果与分析

2.1 分省区稻作与旱作气象产量的波动性分析与对比

利用式(5)对不同省区稻作、旱作气象产量波动性进行计算和评价,结果如表 1 所示。近 60 年,中国所有省、自治区、直辖市旱作气象产量变异系数介于 6.89%~31.83%,水稻介于 7.03%~33.71%,均具有较大的空间变异。

表 1 中国分省区粮食气象产量变异系数评价结果

Table 1 Assessment using variation coefficient of annual meteorological yield among the provinces of China

省份	变异系数/%		风险类型		对比
	旱作	稻作	旱作	稻作	
黑龙江	16.08	25.29	D	B	-
吉林	25.71	33.71	B	A	-
辽宁	24.69	27.62	B	B	-
北京	14.31	14.88	D	D	-
河北	9.99	22.24	E	C	-
内蒙古	14.34	24.77	D	B	-
山东	10.18	20.47	E	C	-
山西	15.75	26.85	D	B	-
天津	15.36	33.38	D	A	-
甘肃	9.68	27.83	E	B	-
宁夏	11.09	28.05	E	B	-
陕西	11.28	21.69	E	C	-
青海	14.03	—	D		
新疆	7.96	24.92	E	B	-
安徽	18.08	16.91	C	D	+
江苏	11.96	15.86	E	D	-
江西	31.83	7.03	A	E	+
上海	20.03	13.9	C	D	+
浙江	14.96	12.74	D	D	+
福建	16.42	8.41	D	E	+
广东	30.71	10.21	A	E	+
广西	19.57	12.01	C	D	+
海南	15.28	8.47	D	E	+
河南	11.28	24.46	E	B	-
湖北	9.02	13.08	E	D	-
湖南	18.48	8.78	C	E	+
贵州	8.38	19.49	E	C	-
四川	18.63	13.64	C	D	+
西藏	9.39	27.55	E	B	-
云南	6.89	10.42	E	E	-

注:表中,不同字母表示不同风险级别,其中,A=“严重风险”,B=“高风险”,C=“中度风险”,D=“轻度风险”,E=“轻微风险”。+:旱作风险大于稻作,-:旱作风险小于稻作。

旱作产量波动性主要表现为华北、西北地区弱而东北、华东、华南地区强的分布特点。全国 70%(21 个)的省份波动风险为轻、轻微,其余风险较高的省份主要分布在东北、华东、华南地区。特别地,华东地区江西省和华南地区广东省的产量波动风险级别为严重,而东北三省中吉林、辽宁两省级别为重度风险,在进行保证产量稳定性技术研究以及制定相关应对策略时应当重点关注这些省份。

而稻作产量波动性则主要表现为北强南弱的特点。仅有 48%(14 个)的省份风险级别为轻、轻微,与旱作相比减少了 22%。东北三省、华北地区除北京市、西北地区除陕西省均达到重度或严重波动风险。而西藏自治区的水稻产量也由于其特殊的气候类型处于

重度风险级别。

将各省区旱作和稻作产量变异系数进行比较得出,全国整体特征为北方水稻产量波动风险高于旱作,而南方相反。需要引起关注的是,西南地区除四川省水稻产量波动风险低于旱作外,其余三省均高于旱作,说明西南地区水稻产量的稳定性较差,而杨修等研究也得出了西南地区水稻生产对气候变化表现出较强的负敏感性和脆弱性^[4]。

2.2 分省区稻作与旱作产量气象减产风险评价

2.2.1 年平均减产率

年平均减产率可以反映该地区年平均减产幅度的大小,值越大,说明该地区的粮食产量受气候变化负面影响的程度越深。由表 2 可知,东北地区旱作和

表 2 中国分省区三项减产指标评价结果
Table 2 Assessment using all the three indices of provincial yield decline of China

省份	年平均减产率/%					减产率浮动性/%					高风险概率/%				
	旱作		稻作		对比	旱作		稻作		对比	旱作		稻作		对比
黑龙江	4.89	C	6.29	A	-	65.74	E	96.38	C	-	34.09	B	39.36	A	-
吉林	4.76	C	6.26	A	-	65.48	E	82.58	D	-	33	B	37.83	A	-
辽宁	5.07	C	5.55	B	-	93.69	B	104.5	B	-	35.2	A	37.45	A	-
北京	2.46	E	2.52	D	-	74.08	D	137.63	A	-	21.77	E	26.44	C	-
河北	3.54	D	5.2	B	-	91.04	B	102.73	B	-	29.12	C	36.69	A	-
内蒙古	3.33	D	2.9	D	+	74.55	D	86.49	D	-	27.09	D	34.09	B	-
山东	3.08	D	4.23	B	-	88.09	C	114.25	B	-	26.76	D	32.64	B	-
山西	3.8	D	5.54	B	-	76.33	D	76.38	E	-	29.81	C	39.36	A	-
天津	5.09	C	5.15	B	-	82.48	C	135.19	A	-	36.32	A	38.21	A	-
甘肃	2.18	E	4.38	B	-	107.92	A	63.21	E	-	20.05	E	33	B	-
宁夏	4.53	C	4.75	B	-	84.99	C	128.84	A	-	34.09	B	35.94	A	-
陕西	3.6	D	3.65	C	-	71.28	E	113.14	B	-	28.43	C	30.85	B	-
新疆	3.18	D	5.41	B	-	117.17	A	107.55	B	+	30.15	C	38.21	A	-
青海	5	C				93	B				37.07	A			
安徽	4.55	C	3.66	C	+	94.09	B	93	C	+	33.72	B	31.21	B	+
江苏	2.82	D	3.24	D	-	96.02	B	107.57	B	-	26.11	D	28.77	C	-
江西	4.45	C	1.73	E	+	78.58	D	58.44	E	+	34.09	B	11.51	E	+
上海	4.37	C	2.59	D	+	100.62	B	98.88	C	+	33.36	B	23.58	C	+
浙江	3.94	D	2.81	D	+	103.2	B	94.26	C	+	33.72	B	25.14	C	+
福建	4	D	2.11	E	+	86.19	C	98.14	C	-	34.09	B	20.05	D	+
广东	7.91	A	2.52	D	+	109.28	A	72.74	E	+	39.74	A	20.9	D	+
广西	6.02	B	2.79	D	+	65.53	E	70.59	E	-	37.07	A	24.2	C	+
海南	2.3	E	1.08	E	+	92.49	B	103.71	B	-	32.64	B	12.51	E	+
河南	3.29	D	4.74	B	-	101.27	B	87.18	D	+	29.46	C	35.1	A	-
湖北	3.27	D	2.8	D	+	88.22	C	107.36	B	-	28.77	C	27.09	C	+
湖南	5.02	C	2.04	E	+	94.74	B	129.98	A	-	35.57	A	20.05	D	+
贵州	3.07	D	3.8	C	-	76.22	D	83.51	D	-	26.11	D	32.28	B	-
四川	5.48	B	3.01	D	+	113.81	A	102.17	B	+	37.83	A	27.09	C	+
西藏	2.04	E	4.76	B	-	109.85	A	98.05	C	+	20.9	E	35.57	A	-
云南	2.36	E	2.17	E	+	69.25	E	72.52	E	-	20.9	E	17.11	D	+

注:表中字母和加减号所示意义与表 1 相同。

稻作的年均减产幅度较其他地区都大,说明气候变化对东北地区粮食生产的负面影响较大。广东、广西、四川三省的旱作生产年平均减产率达到 5.5%~7.9%,为重度、严重气象减产区,杨修等^[15-16]的研究结果也显示了我国长江中下游及其南部沿海和西南地区为气候变化下灌溉小麦与玉米生产的中度负敏感区。而稻作生产气象减产幅度较大的省份主要分布在东北、华北、西北地区。

稻作与旱作减产幅度对比分界较为明显,体现为东北、华北、西北等北方地区水稻生产气象减产幅度高于旱作生产,而华南、华东、西南地区则相反。

2.2.2 减产率浮动性

减产率浮动性指标反映了该地区气候变化下减产的幅度变动,可以说明极端气候对减产的影响程度。旱作产量减产率浮动性大的省份主要集中在西北、华东、华南、西南地区(表 2);尽管这些地区的年平均减产率相对较低,但其粮食生产受气候变化负面影响的敏感性比较强,不易把握其减产幅度,应当加强这些地区气象灾害的防御工作,否则可能遭遇更加严重的气象减产。而稻作生产下,东北的吉林、华北的河北、山东、北京和天津以及西北的宁夏、陕西、新疆的减产率浮动性均达重度、严重风险级别,而这些省份的年平均减产率也相对较高,因此,这些省份面临着双重风险,需要引起足够重视;而江苏省、四川省和华南地区的海南、湖北和湖南三省的减产率浮动性也达到重度及以上风险级别。

经统计,全国 69%的省份稻作下减产率浮动性高于旱作,而华东五省除江苏,西南四省中四川省和西藏自治区以及新疆维吾尔自治区、河南省的稻作减产

率浮动性低于旱作。说明我国大部分地区稻作较旱作不易把握其减产幅度,潜在风险较大。

2.2.3 高风险概率

高风险概率反映了研究区域气象减产幅度达 5% 的概率,值越高,说明此地区出现灾年的概率越大,高幅度减产风险也就越大。高风险概率指标风险级别在全国的分布有明显的区域性特征。东北三省旱作和稻作高风险概率均达重度以上级别;华东、华南地区大部分省份旱作生产高风险概率高于其他地区,而华北、西北地区稻作减产幅度达 5% 以上的概率高于其他地区;以上分布说明稻作高减产风险主要发生在北方地区。

而稻作与旱作对比的结果体现为显著的南北差异。从对比结果可以看出,北方稻作高幅度减产概率较旱地大,而南方相反。这可能与近年来极端气象事件发生的频率和区域性特征有关。

2.2.4 综合减产风险评价

对上述减产率、减产不确定性、高风险概率 3 个指标进行综合评估,得到近 60 年稻作和旱作生产气象产量减产综合风险的区域分布(图 1)。旱作综合减产风险高的区域主要分布在西北、华东和华南地区,四川、天津、辽宁也面临着重度、严重减产风险。这些地区旱作生产面积占全国 27%,产量占全国 29%(以 2006 年为例),说明全国有将近 1/5 的旱作生产存在气象减产风险,需要高度重视这些地区旱作生产的减灾抗灾。

而稻作生产的综合减产风险由南向北体现出一定的层次性渐变特征,即减产风险由南向北逐渐增加,其中以东北地区 and 新疆维吾尔自治区、天津市等

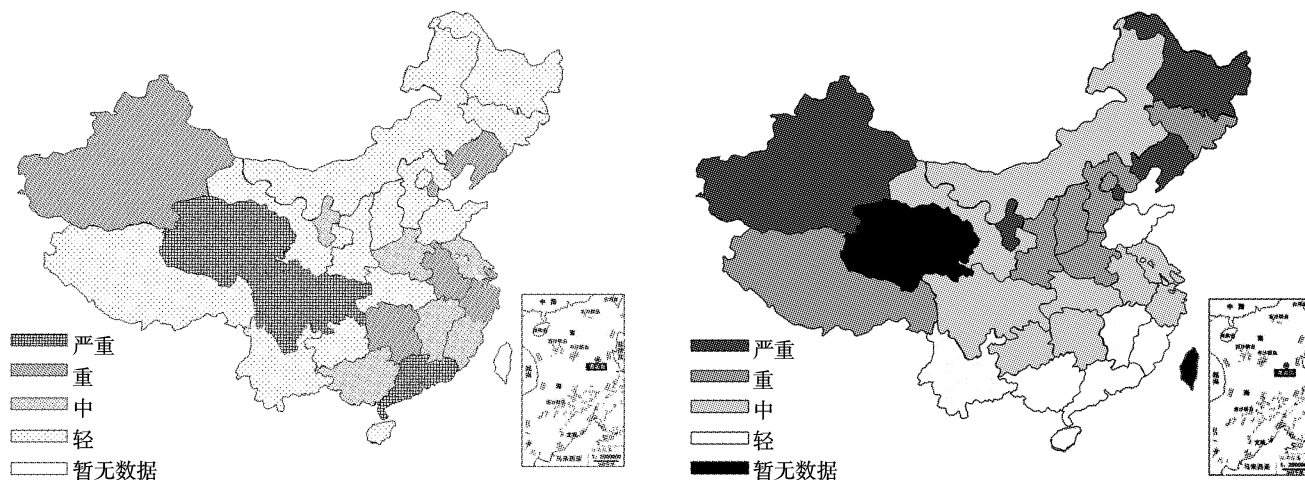


图 1 粮食生产气象产量减产综合风险的区域分布(左,旱作;右,稻作)

Figure 1 Regional distribution of integrated risk of meteorological yield decline(Left, dry farming; left, rice farming)

边缘气候区和宁夏回族自治区最为严重。而稻作生产综合减产风险达重度级别以上的省份其水稻产量占全国总水稻产量的 16%，种植面积占 15%（以 2006 年为例），尽管比重较小，但北方地区作为未来气候变化下潜在水稻种植发展区域，其潜在风险应当引起人们的关注。

图 1 中，将旱作和稻作综合分析可以得出，整体上，我国粮食生产综合风险体现为旱作高风险区域分布零散，而稻作则明显地体现为北高南低的区域性分布特征。而宁夏以及位于边缘气候区的辽宁、天津、新疆无论稻作还是旱作，其综合减产风险都较高。

3 讨论

3.1 气象产量减产风险与气候波动

稻、旱作气象产量变异系数与各减产评价指标相关分析结果如表 3 所示。稻作和旱作的气象产量变异系数与年平均减产率、高风险概率两个指标呈极显著的正相关，说明产量波动性增加的同时带来了年平均减产幅度和高幅度减产风险的增加。熊伟等^[4]通过模型模拟得出，到 2040 年气候变化将可能带来粮食单产的更大的波动；结合本研究，可得出在未来气候变化情景下，我国粮食产量将面临很大的减产风险。因此，产量变异系数也可以作为体现我国粮食减产风险的重要指标，而通过一系列措施确保我国粮食稳产是保障粮食安全的前提。例如已有研究表明^[17]，土壤较高的有机碳含量有助于提高产量的稳定性，那么，通过采取良好的农田管理措施，提升这些地区的地力，进而提高土壤有机碳含量，在捕获大气中二氧化碳的同时，可以提高这些地区产量的稳定性并缓解气候变化导致的气象减产。

本研究对各省近 60 年年平均降水和气温的数据进行了变异性分析，并探讨其与各项减产风险指标的关系。旱作生产的三项减产评价指标、综合指标以及气象产量变异系数与年平均降水量变率和年平均气温变率均无显著的相关性。究其原因，可能是旱作产

量波动和气象减产的形成是由多种气象因子共同作用的结果；也可能与旱作产量是由多种作物组成的有关。但表 4 表明，稻作的年平均减产率与年平均气温变异系数呈显著正相关，即在中国年平均气温变率越高的地区，其年平均减产幅度越大；减产率浮动性与年平均降水呈显著正相关，说明年平均降水变率是造成减产率浮动的重要影响因子之一，而良好的水分管理模式就有利于缓解减产率的浮动性；高风险概率与年平均气温变率和年平均降水变率均有显著正相关关系，究其原因在于，极端气象事件是造成产量大幅减产的主要因子^[18]，而大多数极端气象事件的形成是由于气温和降水的骤变^[19-21]。

表 4 水稻各气象减产评价指标与气象要素变率的相关系数

Table 4 Correlation of meteorological yield decline of rice with variability of annual temperature and rainfall

项目	年均减产率	减产浮动性	高风险概率	综合减产风险	气象产量变异系数
年均温变率	0.44*	-0.03	0.51**	0.41*	0.53**
年均降水变率	0.35	0.41*	0.45*	0.52**	0.42*

研究表明，近 50 年中国年平均地表气温增加了 1.1℃，明显高于全球或北半球同期平均增温速率^[2-23]；而年降水量变化趋势不显著，但年代际波动较大，并存在明显的区域差异综合减产风险和气象产量变异系数与气象因子相关分析结果表明，无论是减产风险还是波动风险，均与年平均气温和降水变率有显著的正相关关系，说明气温和降水是造成水稻产量减产和波动的两个主要气象因子。当然，造成水稻产量的减产和波动的气象因子除两者外还有其他因素的作用，还有待更加深入的探讨，以便更好地防灾抗灾。

3.2 风险分布格局与未来农业生产

气候变化国家评估报告指出，北方地区和青藏高原增温比其他地区显著，东北北部和内蒙古大部分地区的年降水量有一定程度的增加^[24]；而未来 20~100 年中国地表气温将明显增加，北方降水增加幅度大于南方^[25]。因此，水稻种植带随气候变暖和北方区域降水增加而逐渐北移，但本研究得出中国由南向北水稻气象减产风险逐渐增加，那么，在未来气候变化下，北方地区农业需水量的增加和降水变率的加大^[26]使得水稻种植带的北移将面临较大的减产风险；应当通过采取一些农业技术措施，如薄膜覆盖、选育抗逆性强的水稻品种等来应对气候变化带来的负面影响，以保证水稻的高产、稳产。在中国，旱作物受气候变暖负面影响较大^[27]，已有研究表明^[28]，1979—2000 年我国由

表 3 各气象产量减产评价指标与产量变异系数的相关性

Table 3 Correlation of meteorological yield decline with yield variability

产量变异系数	年均减产率	减产率浮动性	高风险概率
旱作	0.72**	-0.06	0.65**
稻作	0.90**	0.14	0.91**

注：* 相关性达显著水平， $P < 0.05$ ；** 相关性达极显著水平， $P < 0.01$ ；下同。

于温度升高造成的小麦减产幅度达 4.5%。因此,北方气候变暖将对减产风险较低的旱作物带来潜在风险。

气候变化国家评估报告指出^[24],未来南方的大雨日数将显著增加,暴雨天气可能会增多;也有研究指出,未来全国大部分地区热带风暴、强降水等极端性气候事件的发生频率将可能显著增加^[29]。但是,对未来气候变化的模拟由于现有研究水平和技术的影响以及气候变化的不易把握,还有很大的不确定性,这将对我国未来粮食生产应对气候变化带来较大困难。根据权威部门测算,到 2030 年前后,中国将达到 15 亿的人口顶峰,每年消耗粮食 6 亿 t。目前中国粮食生产能力是 5 亿 t^[30]。为了满足未来 20 年新增 2 亿人口的需要,中国农业需要再增加 1 亿吨的生产能力,达到 6 亿 t。因此,未来气候变化下,我国粮食生产面临着应对气候变化和增产的双重压力,而技术的进步和有效的宏观调控将是应对气候变化的有力保证。

4 结论

近一个世纪以来中国气候变化愈演愈烈,区域间气候要素变化的差异带来其粮食减产风险和产量稳定性的差别。过去 60 年在气候变化影响下,稻作和旱作生产气象减产风险体现出不同的区域分布特征。旱作高减产风险和波动风险主要分布在华东和华南地区,而稻作则体现为由南向北风险逐渐增加的趋势。对各区域稻作和旱作生产年平均减产率、减产率浮动性、高风险概率三个风险指标以及气象产量变异系数进行对比得出,稻作生产气象减产风险和波动风险北方大于南方,而旱作生产体现为南方大于北方。

未来气候变化下,多熟制将向北、向高海拔地区扩展,北方地区水稻种植面积也将越来越大^[31],这些变化将促进我国农业的发展和产量的提高。但是,我们不能忽视气候变化给高减产和波动风险区域带来的产量不确定性。因此,进一步探明各气象因子对高风险区域的影响特征,提出具体应对策略,将是保证我国未来应对气候变化保障粮食安全的重要途径。

参考文献:

- [1] Rosenzweig C, Parry M. Potential impact of climate change on world food supply[J]. *Nature*, 1994, 367(13): 133-138.
- [2] Olesen J, Bindib M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 16 (4): 239-262.
- [3] Reilly J, Tubiello F, McCarl B, et al. U.S. Agriculture and Climate Change: New Results[J]. *Climatic Change*, 2003, 57 (1-2): 43-67.
- [4] Xiong W, Holman I, Lin E, et al. Climate change, water availability and future cereal production in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135: 58-69.
- [5] 王馥棠. 气候变化与我国的粮食生产[J]. *中国农村经济*, 1996(11): 19-23.
WANG Fu-tang. Climate change and Chinese food production[J]. *China Rural Economy*, 1996(11): 19-23.
- [6] FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the UN, 2002. Available from: <http://apps.fao.org/>.
- [7] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467: 43-51.
- [8] Barry S, Cai Y. Climate change and agriculture in China[J]. *Global Environment Change*, 1996, 6: 205-214.
- [9] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
National Bureau of Statistics Rural Social Economic Survey. China rural statistical yearbook[M]. Beijing: China statistics press, 2008.
- [10] 王馥棠, 李郁竹, 王石立. 农业产量气象模拟与模型引论[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 40-41, 53-56.
WANG Fu-tang, LI Yu-zhu, WANG Shi-li. Introduction of weather simulation model for agricultural production[M]. Beijing: Science press, 1990: 40-41, 53-56.
- [11] 钟甫宁, 邢 鹏. 粮食单产波动的地区性差异及对策研究 [J]. *中国农业资源与区划*, 2004, 25(3): 16-19.
ZHONG Fu-ning, XING Li. Study on the regional difference and counter measures for regions with fluctuating grain yield per unit area [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2004, 25(3): 16-19.
- [12] 邓 国, 王昂生, 李世奎, 等. 风险分析理论及方法在粮食生产中的应用初探[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(3): 221-226.
DENG Guo, WANG Ang-sheng, LI Shi-kui, et al.. Risk theory and method and its initial application in grain yield[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(3): 221-226.
- [13] 邓 国, 王昂生, 周玉淑, 等. 中国粮食产量不同风险类型的地理分布[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 210-215.
DENG Guo, WANG Ang-sheng, ZHOU Yu-shu, et al. Geographical distribution of China's grain yield risk area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 210-215.
- [14] 杨 修, 孙 芳, 林而达, 等. 我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性[J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(5): 85-89.
YANG Xiu, SUN Fang, LIN Er-Da, et al. Sensitivity and vulnerability of rice to climate change in China[J]. *Journal of Nature Disasters*, 2004, 13(5): 85-89.
- [15] 杨 修, 孙 芳, 林而达, 等. 我国小麦对气候变化的敏感性和脆弱性[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(4): 692-696.
YANG Xiu, SUN Fang, LIN Er-Da, et al. Sensitivity and vulnerability of wheat to climate change in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 692-696.
- [16] 杨 修, 孙 芳, 林而达, 等. 我国玉米对气候变化的敏感性和脆弱性[J]. *地域研究与开发*, 2005, 24(4): 54-57.
YANG Xiu, SUN Fang, LIN Er-da, et al. Sensitivity and vulnerability

- of maize to climate change in China [J]. *Areal Research and Development*, 2005, 24(4): 54–57.
- [17] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agric Ecosys Environ*, 2009, 129(1–3): 344–348.
- [18] 王春乙, 娄秀荣, 王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 37–43.
WANG Chun-yi, LOU Xiu-rong, WANG Jian-lin. Influence of agricultural meteorological disasters on output of crop in China[J]. *Journal of Nature Disasters*, 2007, 16(5):37–43.
- [19] 马柱国, 任小波. 1951—2006 年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195–201.
MA Zhu-guo, REN Xiao-bo. Drying trend over China from 1951 to 2006[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4): 195–201.
- [20] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16–18.
ZAI Pan-mao, ZOU Xu-kai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 16–18.
- [21] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144–148.
ZAI Pan-mao, WANG Cui-cui, LI Wei. A review on study of change in precipitation extremes[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 144–148.
- [22] 秦大河, 罗勇. 全球气候变化的原因和未来变化趋势[J]. 科学对社会的影响, 2008(2): 16–21.
QIN Da-he, LUO Yong. The causes of global climate change and its future trends[J]. *Impact of Science on Society*, 2008(2): 16–21.
- [23] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2):63–73.
QIN Da-he, CHEN Zhen-lin, LUO Yong, et al. Updated understanding of climate change sciences [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(2):63–73.
- [24] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3–8.
DING Yi-hui, REN Guo-yu, SHI Guang-yu, et al. National Assessment Report of Climate Change(I): Climate change in China and its future trend[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3–8.
- [25] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇. IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3):183–184.
ZHAO Zong-ci, WANG Shao-wu, LUO Yong. Assessments and projections of temperature rising since the establishment of IPCC[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007,3(3):183–184.
- [26] Tao F, Yokozawa M, Hayashi Y, et al. Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 95: 203–215.
- [27] Wang J, Mendelsohn R, Dinar A, et al. The impact of climate change on China's agriculture[J]. *Agric Econ*, 2009, 40: 323–337.
- [28] You L, Rosegrant M, Wood S, et al. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China[J]. *Agric For Meteorol*, 2009, 149: 1009–1014.
- [29] Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33:L24702.
- [30] 伊文. 气候变化中的粮食未来 [J]. 中国减灾, 2010, 3: 28–29.
YI Wen. Future food production under climate change[J]. *Disaster Reduction in China*, 2010, 3: 28–29.
- [31] 刘颖杰, 林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4):229–233.
LIU Ying-jie, LIN Er-da. Effects of Climate Change on Agriculture in Different Regions of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(4):229–233.