

青冈县1978年以来气候变化对主要农作物产量影响的研究

丛 琪

哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月24日; 发布日期: 2022年5月31日

摘 要

研究选取青冈县1978~2019年的气温、降水、农作物种植面积及产量数据, 利用气候倾向速率及M-K突变性检验等方法对气候数据处理分析, 通过5a滑动平均的方法分解获取气候产量, 并建立气候影响度模型定量计算青冈县主要农作物产量受气候变化影响情况, 进而探讨青冈县农业生产影响因素, 在此基础上提出相关政策建议措施。研究得出如下结论: 1) 青冈县1978年以来年际平均气温呈现明显升高趋势, 且气温升高主要为最低气温上升引起, 也就是由冬季变暖引起, 年际平均气温M-K检验突变点为1990年。青冈县近40年降水量波动较大, 降水量整体为上升趋势, 突变点发生在1995年。2) 模型实证结果显示, 玉米与大豆变化一致, 在气温突变前后一直为正影响, 且突变后气温影响度加大; 玉米在降水量突变前后趋势一致, 为负影响, 但影响度变小; 大豆在降雨量突变前后由正影响变为负影响。3) 针对青冈县农业气候及农业生产研究, 提出以下农业发展对策建议, 调整种植结构, 推进生物技术引进, 加强生产管理, 落实农村生态保护政策。

关键词

气候变化, 农业生产, 青冈县, 突变点

Research on the Impact of Climate Change on the Yield of Main Crops in Qinggang County Since 1978

Qi Cong

Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Apr. 26th, 2022; accepted: May 24th, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

The research selects the temperature, precipitation, crop planting area and yield data of Qinggang county from 1978 to 2019, processes and analyzes the climate data by using the methods of climate tendency rate and M-K mutation test, decomposes and obtains the climate yield by the method of 5a moving average, establishes the climate impact degree model, quantitatively calculates the impact of climate change on the yield of main crops in Qinggang County, and then discusses the influencing factors of agricultural productivity in Qinggang county, On this basis, relevant policy suggestions and measures are put forward. The conclusions are as follows: 1) the interannual average temperature in Qinggang county has shown an obvious upward trend since 1978, and the temperature rise is mainly caused by the rise of minimum temperature, that is, caused by winter warming. The M-K test mutation point of interannual average temperature is 1990. The precipitation in Qinggang County fluctuated greatly in recent 40 years, and the precipitation showed an upward trend as a whole. The mutation point occurred in 1995. 2) The empirical results of the model show that the changes of corn and soybean are consistent, and the influence of temperature is always positive before and after the sudden change of temperature, and the influence degree of temperature increases after the sudden change of temperature; the trend of maize is the same before and after the sudden change of precipitation, which is negative, but the degree of influence becomes smaller; soybean changed from positive effect to negative effect before and after rainfall mutation. 3) According to the research on agricultural climate and agricultural productivity in Qinggang County, the following countermeasures and suggestions for agricultural development are put forward, the planting structure is adjusted, the introduction of biotechnology is promoted, production management is strengthened, and rural ecological protection policies are implemented.

Keywords

Climate Change, Agricultural Production, Qinggang County, Mutation Point

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 国内外研究进展

1.1. 国外气候变化对农业生产影响研究现状

气候变化的研究起源于英国，因此相关研究国外也更为成熟，也取得了诸多研究成果。但气候变化对农业生产的影响起步较晚，首次提出于二十世纪末期，国外学者在进行气候变化与作物生产研究时，多数采用利用作物生产模型，结合气象数据对农业生产进行指导。Christian (1992)首次通过将模拟获取的气象数据联系 SARRA-H 模型，建立了最为传统的作物模型[1]。Stockle (1992)等在原有作物模型中引入 CO₂ 因素，并成功模拟作物生长过程中 CO₂ 的重要影响[2]。David (1993)通过运用作物模型分析了美国加利福尼亚作物在长期生长中受极端气候变化的影响，运用模型模拟气候变化对作物影响的实验方法此后逐渐成熟[3]。美国农业部(1998)开发 CERES 模型，为研究提供了新的参考模型[4]。Kapetanaki 和 Rosen Zweig (2002)首次运用模型分析希腊玉米生产受气候影响的结果[5]。Easter Ling (2003)通过对 MINK 地区农作物生产进行深入分析，进一步确定影响农业生产的气候因素，尤为重要是引入光合因素，大幅度

提高了模型预测准确度[6]。Mera (2006)等利用 CROPGRO 和 CERES-Maize 模型模拟了气候要素中, 气温、降水、日照时数对大豆和玉米生产的影响[7], 自此, 国外该方向研究初步形成体系。在 2007 年 IPCC 第四次报告中, 报告首次预估了全球粮食产量受气候变化的影响, 此后, 气候变化与农业生产受到全球学者关注。Piao (2010)对中国农作物进行分析, 得出中国农作物产量受气候变化与品种差异影响最大[8]。Pedram 和 Syud (2011)以坦桑尼亚地区为对象进行研究, 分析气候变化对当地农业生产力的综合影响[9]。

1.2. 国内气候变化对农业生产影响研究现状

国内研究与国外方法相似, 采用作物模型模拟气候变化对农业生产的影响。王馥堂等(1993)运用三种空气环流模型预测当全球变暖引起温室气体含量增加时, 对大豆、玉米等主要作物的总产量的影响[10]。张建平等(1996)采用 WOFOST 与 BCC-T63 气候模型模拟气候变暖条件下, 我国北部玉米产量变化情况[11]。郭建平等(2015)研究表明气候变暖加快病虫害生长发育, 并造成危害期延长, 病虫危害区域扩大, 从而引起粮食大幅减产[12]。

1.3. 研究课题的提出

由以上研究现状可知, 作物气候生产力的研究以二十世纪末 SARRA-H 作物生长模型为开端, 经历了光合生产力、气温生产力、土壤生产力的研究过程, 由静态研究到动态分析, 在研究趋向成熟的同时, 也存在一些有待进一步讨论的问题。第一, 常规气候变化对农业生产力影响研究不足。大量研究利用极端气候数据分析农业生产力影响, 缺少常规气候趋势变化下对农业生产的影响研究, 基于农业的重要地位, 在全球气候变暖的背景下, 有必要对气候变化及其对农业的影响进行研究。第二, 现有研究多为主观定性分析, 缺乏定量分析结果支撑。农业气候生产力具有计算复杂、参数多的特点, 因此, 在地区气候生产力等评价中大多直接采取全国普遍性成果数据, 地区针对性较差, 缺乏对研究区的实际情况分析, 因此应寻求一种简单有效的评价模型, 增强地区针对性。

鉴于现有研究的不足, 本文以结合青冈县实际情况, 通过对气候 1978 年以来变化特征分析, 合理选取分析模型, 研究青冈县气候现状和历史变化趋势, 结合青冈县主要农作物产量数据, 完成气候变化对农业生产力影响度的研究, 并提出青冈县未来农业发展建议, 对提高农作物生产对气候的适应能力, 协调气候变化与农业生产的适应关系, 提高农民收益、实现农业高效持续发展有着重要意义。

2. 研究材料与方法

2.1. 研究区概况

青冈县隶属于黑龙江省绥化市, 地处黑龙江省东南部, 松嫩平原高平原地区腹地, 共有耕地 256 万亩、草原 61.65 万亩、林地 62 万亩, 全县海拔高度 123 m 到 563 m, 平均海拔 457 m 左右, 农业生产地区平均海拔 360 m。青冈县东与海伦、望奎两地隔通肯河相望, 西部毗邻安达、林甸, 南为哈尔滨市, 北部为明水县。全县地势平坦, 其地貌类型主要为低海拔冲积台地和低海拔冲积平原, 处于地壳的相对稳定区, 统属岗地, 由东向西地貌依次是川岗、平岗、低岗, 是高平原岗地的典型地貌[13]。

青冈县属于温带大陆性气候, 属于温度较低地区, 四季分明, 昼夜温差大, 雨量集中, 全年太阳辐射总量 5000 MJ/m² 左右, 平均气温 2.4℃~2.6℃, 最冷月平均气温-20.9℃, 最热月平均气温 22.1℃, 年均降水量 400~500 毫米, 全年无霜期 130 天左右。春季秋季气候干燥、多风; 夏季炎热湿润, 是降雨集中季节, 也是农业生产主要时节; 冬季寒冷, 温度骤降, 农业生产停止[14]。

2.2. 研究资料获得

本文青冈县气象数据来自于青冈县气象局 1978~2018 年全年气象数据, 农作物生产数据来自于青冈

县农业局 1978 年~2018 年主要农作物种植面积及产量数据。

2.3. 研究方法

2.3.1. 气候趋向性分析[15]

气候趋向性通过气候倾向率表示，气候倾向率通过对气候数据进行一元线性回归方程拟合得出，方程形式为：

$$X = a + bt \tag{公式(2-1)}$$

式中， a ， b 为回归系数，

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})(X - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2}, \quad a = \bar{x} - b\bar{t} \tag{公式(2-2)}$$

气候在 10 年间变化速率由 $b \times 10$ 表示，其中 b 值大小表示气候变化快慢， $b > 0$ 表示 x 随时间 t 增加而增加的趋势， $b < 0$ 表示 x 随时间 t 减小而减小的趋势。

2.3.2. Mann-Kendall 突变性检验方法[16]

Mann-Kendall 突变性检验法(下文统称为 M-K 检验)是一种时间序列趋势检验中广为使用的非参数检验方法，广泛应用于水文、气象等无明显分布特征的数据检验。实现过程如下：

假设气候数据序列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ， s_k 为第 i 个样本 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的累计数，定义统计量：

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_j, \quad r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases}, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, i; k = 1, 2, \dots, n) \tag{公式(2-3)}$$

s_k 的均值与方差分别为：

$$E[s_k] = \frac{k(k-1)}{4}, \quad \text{var}[s_k] = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \quad 1 \leq k \leq n \tag{公式(2-4)}$$

对 s_k 标准化得：

$$UF_k = \frac{S_k - E[S_k]}{\sqrt{\text{var}[S_k]}} \tag{公式(2-5)}$$

标准化所得 UF_k 符合标准正态分布，其中 $UF_1 = 0$ ，将所有 UF_k 组成一条曲线。给定显著性水平 α ，若 $|UF_k| > U_\alpha$ ，则表明原序列在现有置信区间内具有明显的变化趋势。同理计算反序列可得反序列的 UF_B 曲线，在置信区间内 UF_k 与 UF_B 交点即为该气候变化趋势突变点。

2.3.3. 气候产量计算方法[17]

在进行时间序列分析时，作物产量可分为气候产量、趋势产量以及随机产量三部分。其中气候产量指受气候因素作用而产生的短期产量波动；趋势产量指伴随生产技术进步增加的产量，如农业生产技术改进等；随机产量指受不可控因素影响随机产生波动的产量，随机产量数量级远小于其他两部分，计算中多忽略不计。因此对农业产量进行如下分解：

$$Y = Y_t + Y_w + E \tag{公式(2-6)}$$

式中： Y 为农业产量，单位 kg/ha； Y_t 为趋势产量，单位 kg/ha； Y_w 为气候产量，单位 kg/ha； E 为随机产量，可忽略不计，因此公式可简化为：

$$Y = Y_t + Y_w \tag{公式(2-7)}$$

趋势产量采取对农业产量进行 5a 滑动平均法进行模拟确定，具体计算过程如下：

以 1978 年为起点，向后 5a 取值至 1982 年作为时间区间 T_1 ，利用三次多项式回归方程拟合该时间区间的直线方程模型：

$$Y_i = a_i t^3 + b_i t^2 + c t + d \quad \text{公式(2-8)}$$

对青冈县 30 年产量数据依次进行拟合，可得 37 个回归方程，除去最后四年依次 4、3、2、1 个拟合值外其余每年有 5 个拟合值。

对每年拟合值取多组拟合值一阶样本原点距：

$$Y_{i2} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_i \quad (n=1,2,3,4,5) \quad \text{公式(2-9)}$$

同理对青冈县 30 年产量数据向前拟合，依旧可得 37 个回归方程，除去最开始四年依次 4、3、2、1 个拟合值外其余每年有 5 个拟合值。并对每年拟合值取一阶样本原点距：

$$Y_{i1} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_i \quad (n=1,2,3,4,5) \quad \text{公式(2-10)}$$

趋势产量为：

$$Y_t = (Y_{i2} + Y_{i1}) / 2 \quad \text{公式(2-11)}$$

农业产量减去趋势产量，得到气候产量：

$$Y_w = Y - Y_t \quad \text{公式(2-12)}$$

为消除量纲可取气候产量与趋势产量比值得相对气候产量为：

$$Y_r = Y_w / Y_t \quad \text{公式(2-13)}$$

2.3.4. 基于不同气候因素的气候产量分解计算方法[18]

$Y_w(i)$ 表示第 i 气候因素的气候产量，单位 kg/ha， $Y_t(i)$ 表示第 i 气候因素的趋势产量，单位 kg/ha，第 i 气候因素的影响系数为 $\beta(i)$ ：

$$\beta(i) = Y_w(i) / Y_t(i) \quad \text{公式(2-14)}$$

取第 i 气候因素的距平值为 x_i ，通过回归拟合，得到气候影响系数方程：

$$\beta(i) = a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i \quad \text{公式(2-15)}$$

式中， $\beta(i)$ 为第 i 气候因素的影响系数； x_i 为第 i 气候因素的距平值； a_i ， b_i ， c_i 为第 i 气候因素的影响系数方程的参数。

进一步计算可得第 i 气候因素 $Y_w(i)$ 的气候产量与 $\beta(i)$ 关系式为：

$$Y_w(i) = \beta(i) Y / (1 + \beta(i)) \quad \text{公式(2-16)}$$

第 i 气候因素的趋势产量 $Y_t(i)$ 与 $\beta(i)$ 关系式为：

$$Y_t(i) = Y / (1 + \beta(i)) \quad \text{公式(2-17)}$$

2.3.5. 气候影响度模型建立[19]

本文建立气候影响度模型进行气候变化对农业生产影响的定量分析。某一气候因子 i 的气候影响度由气候单产变化值占实际单产变化值的百分比来表示。 t 时间段 i 气候因子气候影响度 α 为：

$$\alpha(it) = \frac{\bar{Y}_w(it) - \bar{Y}_w(i)}{\bar{Y}(t) - \bar{Y}} \tag{2-18}$$

式中， $\bar{Y}_w(it)$ 为第 t 时间段第 i 气候因子的气候产量均值，单位 kg/ha； $\bar{Y}_w(i)$ 为研究期内 i 气候因子气候产量均值，单位 kg/ha； $\bar{Y}(t)$ 为第 t 时间段农业产量均值，单位 kg/ha； \bar{Y} 为研究期内农业产量均值，单位 kg/ha。

气候因素综合影响度为某一时间段各气候因素影响度均值，关系式为：

$$\alpha(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha(it) \tag{2-19}$$

式中， n 为自由度，本文中为气候因子个数； $\alpha(t)$ 为 t 时间段内气候变化综合影响度； $\alpha(it)$ 为 t 时间段内 i 气候因子气候影响度。

3. 1978-2019 年青冈县气候演变趋势与分析

3.1. 青冈县温度变化特征分析

3.1.1. 青冈县 1978~2019 年年际气温变化分析

青冈县气温变化如图 1 所示，42 年间青冈县气温呈现波动式上升过程，自 1978 年至 2017 年年际平均气温为 3.45℃，气候倾向速率为 0.26℃/10a，约为每年升温 0.26℃，通过了 0.01 的显著性水平检验，说明 42 年内青冈县年际平均气温上升极显著。近 42 年全国气候倾向速率为 0.27℃/10a，与青冈县气候倾向速率基本一致，因此青冈县气温上升主要可归因于全球变暖。二十世纪八十年代以来每十年平均气温分别为 2.74℃、3.63℃、3.87℃、3.5℃，二十世纪九十年代升温幅度最大，较八十年代升温 0.9℃。从平均气温多项式拟合曲线可得，近 42 年中青冈县年平均气温呈现拱形变化趋势，其中 1990 年至 2017 年为气温偏高且增速较快时期，1978 年至 1990 年气温较低，1985 与 1987 年气温远低于平均水平，农业上称为低温冷害年。青冈县最高气温为 2007 年 5.1℃，最低气温为 1987 年 2.0℃，相差 3.1℃，年际间振幅较大。如图 2、图 3、所示，年最高、最低气温的气候倾向率分别为 0.28℃/10a、0.64℃/10a，最高气温变化趋势未通过 0.05 显著性检验，说明年最高气温并未出现显著性上升，但观察青冈县近 42 年年际最高气温正负距平数量，其中 55%为正距平，说明青冈县近四十年年际最高气温为不显著上升趋势；年际最低气温通过 0.01 显著性检验，说明年际最低气温上升具有极显著趋势。综合分析，年际最高气温与最低气温都有上升幅度，且最低气温上升幅度远大于最高气温上升幅度，整体年际平均气温变化介于二者之间。

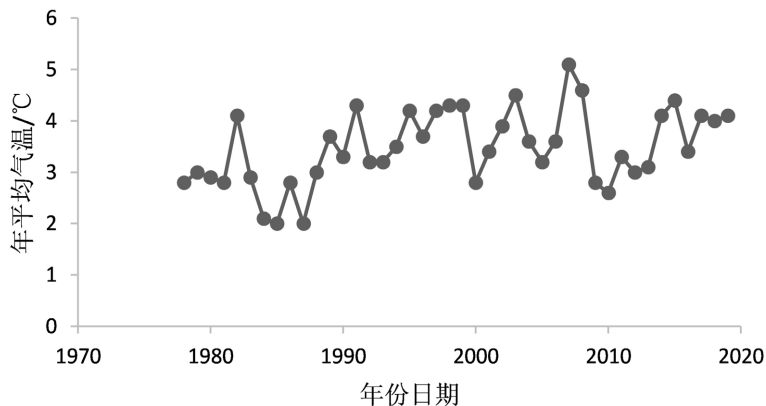


Figure 1. Interannual variation of average temperature in Qinggang County
图 1. 青冈县平均气温的年际变化

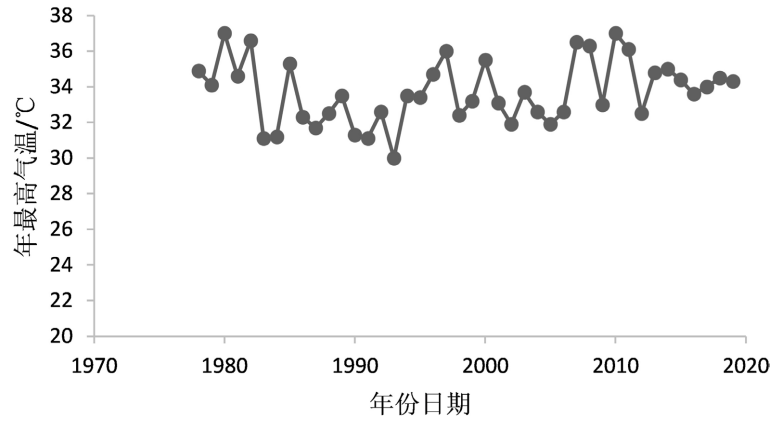


Figure 2. Interannual variation of annual maximum temperature in Qinggang County
图 2. 青冈县年最高气温的年际变化

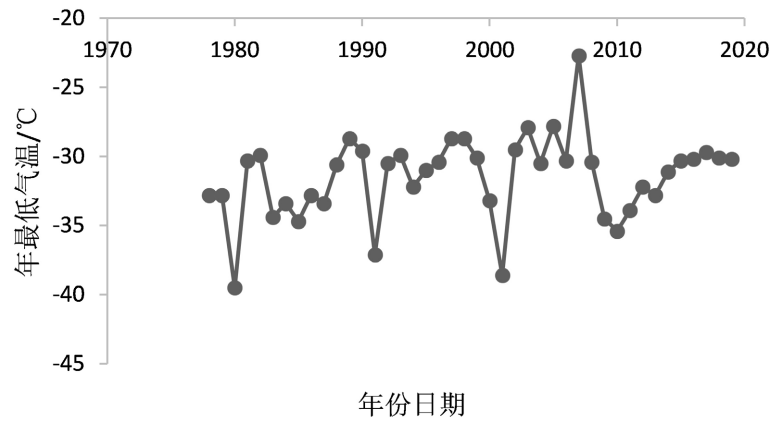


Figure 3. Interannual variation of annual minimum temperature in Qinggang County
图 3. 青冈县年最低气温年际变化

3.1.2. 青冈县 1978~2019 年气温 M-K 突变性检验

青冈县年际平均气温 M-K 突变性检验结果如图 4，在置信区间里 UF 曲线与 UB 曲线存在一个明显交点为 1990 年，说明青冈县年际平均气温在 1990 年突变。1978~1990 年 $UF < 0$ 为主，说明在 1990 年之前青冈县年际平均气温呈现下降趋势；1990 年之后 UF 全部大于 0，且于 1998 年开始大于 0.05 置信区间，表明青冈县年际平均气温自 1990 年后持续升温，于 1998 年后升温趋势加快。

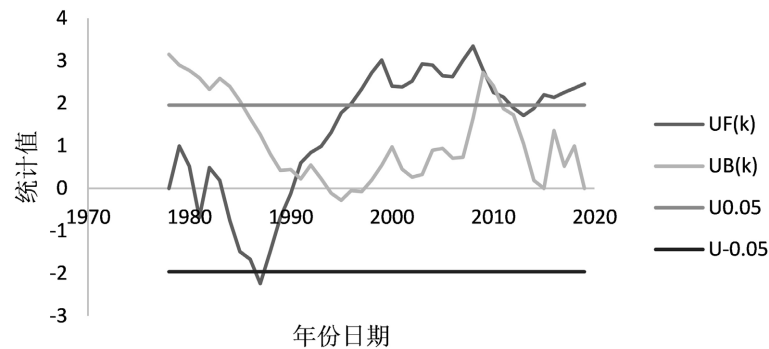


Figure 4. Test chart of sudden change of temperature in Qinggang County
图 4. 青冈县气温突变检验图

3.2. 青冈县降雨量变化特征分析

3.2.1. 青冈县 1978~2019 年降水量变化分析

青冈县 1978~2019 年间年均降水量为 493.77 mm，青冈县近 42 年均降水量一元回归拟合如图 5 呈上升趋势，气候倾向速率为 5.0 mm/10a，且未通过显著性检验，可见青冈县 42 年间并不存在明显的降水增加趋势。对青冈县近 42 年雨雪天数进行回归分析呈现下降趋势，倾向速率为 9.6 days/10a，通过显著性 0.1 检验，说明雨雪天数下降具有一定的显著性趋势。对比青冈县近四十年降水量与雨雪天数数据可发现，当去出青冈县洪水灾害年份 2013 年后，二者变化趋势趋于一致，青冈县降水量气候倾向速率为 3.42 mm/10a。主要原因为 2013 年东北地区冷漩涡偏多且路径偏北，850 hpa 水汽输送充足，东亚夏季风偏强，欧亚纬向环流弱，引起黑龙江地区暴雨频发，单日单次降雨量远远超过平均水平，属于异常情况，所以对青冈县 2013 年数据分离单独分析后其余数据呈现与历史数据一致趋势[20]。青冈县降水量 1989 年最低，为 297.2 mm，2013 年以 770.2 mm 创历史新高，降雨量为最低年的 2.6 倍，可见青冈县洪涝灾害发生明显。对青冈县近 42 年(除去 2013 年)降水量数据进行多项式拟合结果为先上升后下降，1995 年为分界点，1995 前青冈县只有 1982 年、1986 年、1989 年、1991、1992 年低于历史平均值，1995 年后 20 年中只有 2005 年、2009 年、2012 年、2015 年、2017 年高于历年降水量平均水平。

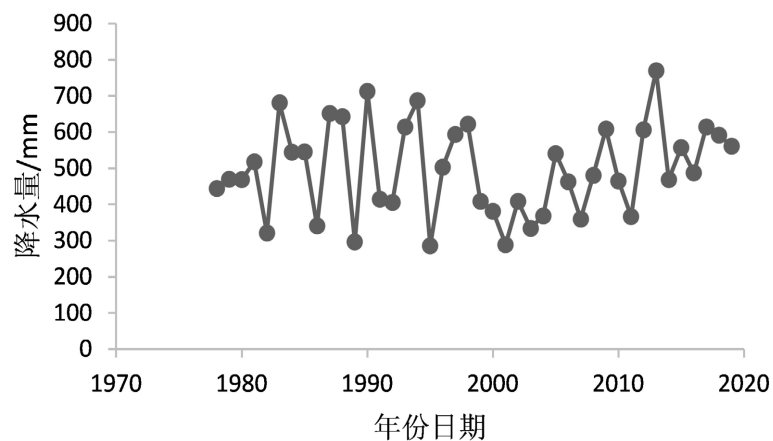


Figure 5. Interannual variation of precipitation in Qinggang County
图 5. 青冈县降水量年际变化图

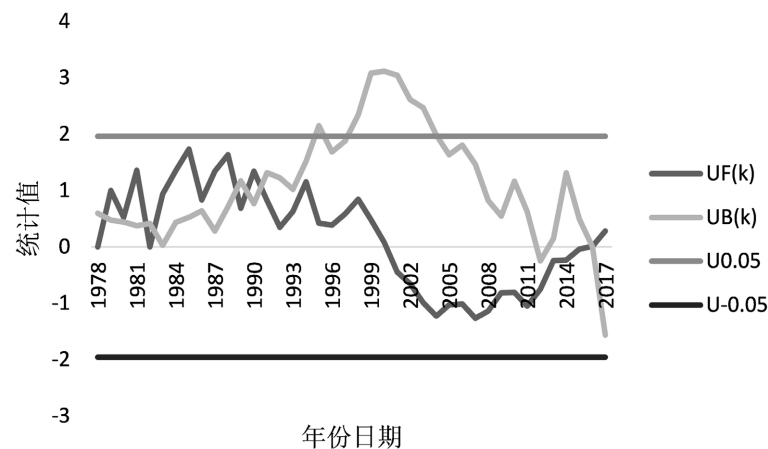


Figure 6. Map of abrupt change of rainfall in Qinggang County
图 6. 青冈县降雨量突变性检验图

3.2.2. 青冈县 1978~2019 年降水量 M-K 突变性检验

如图 6 所示,青冈县近 42 年降水量 M-K 突变性检验结果中存在多个突变点,均集中在 1998 年以前,1998 年超出置信区间发生明显变化趋势。多个突变点分别为 1991 年、1993 年、1995 年,青冈县降水量 UF 在 1995 年后只有 1996~1999 年大于 0,其余均小于 0,表明 1995 年突变点后先呈现增加趋势后均保持下降趋势,故取 1995 年为本次检验突变点,与降水量年际趋势分析结果一致。

3.3. 青冈县气候变化基本趋势

基于青冈县气象局 1978~2019 年气候数据资料,采用气候倾向速率与 M-K 气候突变性检验的方法,分析了青冈县气温、降水量气候要素的年际变化特征。

在气温方面,青冈县近 42 年平均气温 3.45℃,呈现波动式上升,气候倾向速率为 0.26℃/10a,通过了 0.01 的显著性水平检验,1990 年为气温突变点,1990 年至 2017 年为气温偏高且增速较快时期,1978 年至 1990 年气温较低。青冈县最高、最低气温的气候倾向率分别为 0.28℃/10a、0.64℃/10a,最高气温变化趋势未通过 0.05 显著性检验,年际最低气温通过 0.01 显著性检验。因此可以认定青冈县平均气温具有显著性上升趋势,其中最高气温上升不明显,最低气温上升趋势显著。

在降水量方面,青冈县近 42 年平均降水量 493.77 mm,呈现阶段性变化趋势,气候倾向速率为 5.0 mm/10a。根据 M-K 突变性检验结果可知,青冈县降雨量突变点为 1995 年,且 1978~1995 年平均降水量略大于 1995~2019 年,其中 1995 前青冈县只有 1982 年、1986 年、1989 年、1991、1992 年低于历史平均值,1995 年后 20 年中只有 2005 年、2009 年、2012 年、2015 年、2017 年高于历年降水量平均水平。因此青冈县降水量整体可认定为阶段性减少趋势。

总结来看,气温上升为青冈县近 42 年气候变化的主要特征,降水量呈现阶段性下降趋势,存在一定的年际波动。

4. 气候变化与主要农作物生产力分析

4.1. 青冈县近 40 年玉米气候生产力影响度分析

4.1.1. 青冈县玉米气候产量分解

如图 7,玉米气候产量在-2630.5~1405.5 kg/ha 之间波动,最高值出现在 2008 年,最低值出现在 2003 年。41 年间共有 18 个年份的气候产量值大于 0,表明这些年份为对玉米生产具有正向效果,均值为 542.93 kg/ha,在 1998、2008、2012 年气候产量均大于 1000 kg/ha,具有明显正向作用;共有 23 个年份气候产量小于 0,表示这些年份不利于玉米生产,均值为-634.24 kg/ha,其中在 1989 年和 2004 年最为明显,气候产量低于-2000 kg/ha,2004 年更是突破-2500 kg/ha。

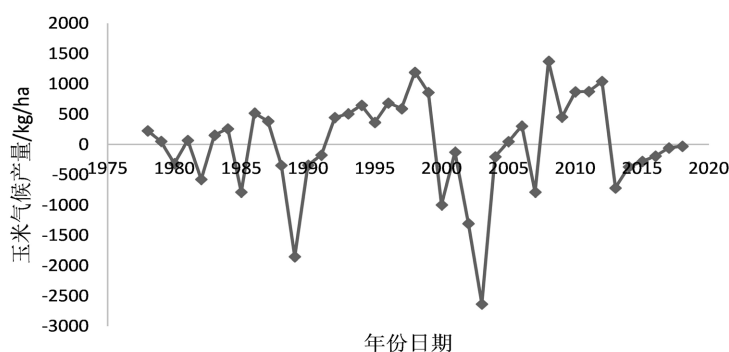


Figure 7. Climate change map of maize yield in Qinggang County

图 7. 青冈县玉米气候产量变化图

4.1.2. 玉米不同气候因素农业生产力影响分析

在对青冈县 1978 年以来玉米不同气候因素产量分解中, 首先根据第四章分析结果计算得到气候影响系数, 并通过将气候影响系数与气候因素的距平值拟合得到不同气候因素的气候影响系数方程如表 1, 进一步计算得到要素气候产量。

Table 1. Influence equation of corn climate factors in Qinggang County

表 1. 青冈县玉米气候要素影响方程

作物名称		影响系数方程	R^2
气温	玉米	$y = 0.0006x - 0.04x - 0.0202$	$R^2 = 0.0254$
降水量	玉米	$y = -4E-06x + 0.0006x + 0.0418$	$R^2 = 0.2402$

根据表 1 可得青冈县主要作物每一年的气温影响系数与降水量影响系数, 带入气候产量计算公式得青冈县不同年份不同因素下的作物气候产量, 结合气候因素的突变性检验结果整理得青冈县主要作物气候突变前后气候因素产量如表 2。

Table 2. Average value of maize climatic factors before and after abrupt change of climatic yield in Qinggang County

表 2. 青冈县玉米气候要素气候产量突变前后平均值

作物	气候因素	突变前	突变后	平均值
玉米	气温	-47.67	63.54	7.94
	降水量	153.86	-93.34	30.26
	平均值	50.10	-14.90	19.10

将表 2 数据代入气候影响度公式, 分别得到青冈县主要农作物的气温与降水量突变前后影响度如表 3。

Table 3. Influence degree of climate change on maize yield in Qinggang County

表 3. 青冈县气候突变前后对玉米产量影响度

时间段		气温影响度	降水量影响度	气候影响度
玉米	突变前	2.2	-10.5	-4.15
	突变后	8.1	-7.5	0.3
	平均值	5.2	-9.0	-1.9

由表 3 结果可知, 青冈县气候突变前后玉米产量受不同气候因素变化的影响度特征结果如下: 在气温变化影响下, 突变前与突变后气温气候产量分别减少 47.67、增加 63.54, 气温影响度分别为 2.2%与 8.1%; 在降水影响下, 突变前与突变后降水气候产量分别增加 153.86、减少 93.34, 降水影响度分别为 -10.5%、-7.5%。总体而言, 青冈县 1978 年以来, 玉米气温影响度突变前后一直为正值, 且突变后大于突变前; 玉米降水量影响度一直为负, 绝对值呈现减少趋势, 波动较小, 气候综合影响度由负转正, 故气候变化对青冈县玉米生产影响在 1990 年前为减产, 1990~2019 年为增产。

4.2. 青冈县近 40 年大豆气候生产力影响度分析

4.2.1. 青冈县大豆气候产量分解

如图 8, 大豆气候产量变化范围为 -953.1~1340.2 kg/ha, 变化范围明显小于玉米, 最大值出现在 1987 年, 最小值在 1989 年。统计数据中共有 13 年的气候产量在坐标轴上方, 表示当年气候情况利于大豆生

产，均值为 333.19 kg/ha，除最大值点 1987 年增产较明显外，其余年份增加范围皆较稳定；在 41 年间共有 28 年的气候产量在横坐标轴下方，表示这些年的气候对大豆生产具有负面影响，均值为-634.21 kg/ha，其中 1982 和 1989 年减产较多，1989 年减产接近 1000 kg/ha。

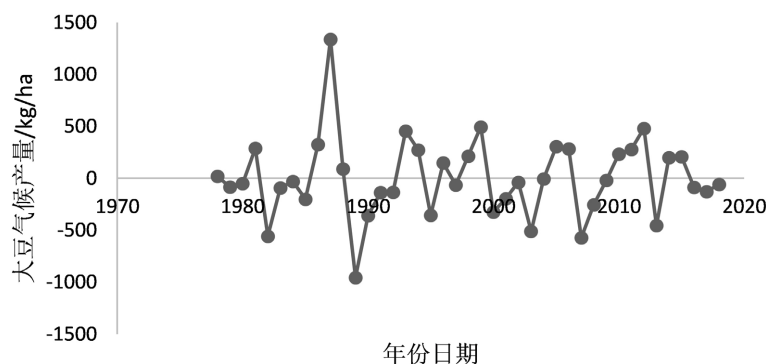


Figure 8. Climate change of soybean yield in Qinggang County
图 8. 青冈县大豆气候产量变化图

4.2.2. 大豆不同气候因素农业生产力影响分析

在对青冈县 1978 年以来大豆不同气候因素产量分解中，首先根据第四章分析结果计算得到气候影响系数，并通过将气候影响系数与气候因素的距平值拟合得到不同气候因素的气候影响系数方程表 3，进一步计算得到要素气候产量。

Table 4. Influence equation of soybean climatic factors in Qinggang County
表 4. 青冈县大豆气候要素影响方程

作物名称	影响系数方程	R ²
气温 大豆	$y = 0.028x^2 - 0.1326x - 0.0273$	$R^2 = 0.1743$
降水量 大豆	$y = -7E-06x + 0.001x + 0.1062$	$R^2 = 0.4642$

根据表 3 可得青冈县主要作物每一年的气温影响系数与降水量影响系数，带入气候产量计算公式得青冈县不同年份不同因素下的作物气候产量，结合气候因素的突变性检验结果整理得青冈县主要作物气候突变前后气候因素产量如表 4。

Table 5. Average value of climatic factors and climatic yield of soybean before and after mutation in Qinggang County
表 5. 青冈县大豆气候要素气候产量突变前后平均值

作物	气候因素	突变前	突变后	平均值
大豆	气温	159.18	-84.20	37.49
	降水量	3.81	3.48	3.65
	平均值	81.50	-40.36	20.57

将表 4 数据代入气候影响度公式，分别得到青冈县主要农作物的气温与降水量突变前后影响度如表 5。

由表 6 可知，青冈县气候突变前后大豆受不同气候因素变化的影响度特征结果如下：在气温变化影响下，突变前与突变后大豆气温气候产量系数分别为 159.18、-84.20，气温影响度突变前后分别为 28.8% 与 35.1%；在降水影响下，突变前与突变后降水气候产量分别为 3.81、3.4，降水影响度分别为 1.5%、-1.6%。总体而言，青冈县 1978 年以来，大豆气温影响度突变前后一直为正值，且突变后小于突变前，波动较小；

大豆降水量影响度由正转负，绝对值呈现小幅增加趋势，气候综合影响度均为正值，前后波动很小，故气候变化对青冈县大豆生产影响为增产影响。

Table 6. Influence degree of climate change on soybean yield in Qinggang County
表 6. 青冈县气候突变前后对大豆产量影响度

	时间段	气温影响度	降水量影响度	气候影响度
大豆	突变前	28.8	1.5	15.15
	突变后	35.1	-1.6	16.75
	平均值	31.9	-0.05	15.93

5. 结论

5.1. 主要结论

1) 采用气象倾向速率及 M-K 突变性检验方法对青冈县 1978 年以来 42 年气候情况进行分析。结果显示，年际平均气温呈现明显升高趋势，平均气温气候倾向速率为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，约为每十年升温 0.26°C ，年最低气温的气候倾向率为 $0.64^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，说明青冈县气温升高主要为最低气温上升引起，也就是由冬季变暖引起，年际平均气温 M-K 检验突变点为 1990 年。青冈县近 40 年降水量波动较大，降雨量最高年为最低年的 2.6 倍，但降水量整体为上升趋势，气候倾向速率为 $3.42\text{ mm}/10\text{a}$ ，突变点发生在 1995 年。

2) 通过气候产量分解模型及气候影响度模型对青冈县气候产量与气候要素特征关系进行评价。结果显示，玉米与大豆变化一致，在气温突变前后一直为正影响，且突变后气温影响度加大；玉米在降水量突变前后趋势一致，为负影响；大豆在降雨量突变前后由正影响变为负影响。在气候总影响度研究结果方面，青冈县主要农作物在气候因素突变前后气候影响度绝对值从大到小依次为大豆、玉米，其中大豆为正影响，玉米为负影响。

5.2. 未来发展建议

限制青冈县农业生产发展的因素按其影响程度依次为气温、降水量、市场价格及无霜期变化。温度直接影响光合生产潜力，且完全取决于自然情况，很难人为改变，因而只有后三者可通过合理建设加以解决。可以完善农田水利设施和农田种植结构调整，以及通过选育品种等措施提高青冈县主要农作物产量。具体发展对策如下。

1) 适当调整种植结构

根据青冈县气候变化特点，改善品种种植布局，有计划的培育农业新品种，多选用高抗旱、抗涝的农业品种，结合青冈县地理特点，优先发展玉米、种植，偏北部地区可考虑适当种植大豆、经济作物，做好品种搭配，因地制宜，增加复种面积，尽量采用科学的种植方法、种植制度，减少因气候变化对青冈县农业的负面影响。

2) 进生物技术的引进

生物技术创新对于青冈县目前情况存在一定困难，但可通过引进技术，加强品种改良、环境控制、固氮防灾以及生物质利用等技术引进，推动现代农业产业园建设，既提高青冈县农业生产对气候变化的适应力又打造地方知名农产品品牌，提高农业竞争力。

3) 加强农业生产管理

青冈县现农业发展核心影响因素仍为生产要素的不稳定性，主要为气候要素与市场价格要素，所以优化农业生产模式，从源头削弱生产要素影响极为重要。加强农业水利等基础设施管理，发展设施农业；

推进农业信息化等项目建设，由大耕大作转向精准农业；借鉴社区农业，通过订单农业、托管服务、入股分红等方式，将小农业融入农业产业链。

4) 落实农村生态保护政策

伴随可持续发展理念在各行各业相继提出，农业可持续发展成为新的农业生产方式。青冈县应加强重视资源及环境保护，贯彻绿色发展理念，推广黑土地保护有效治理模式，落实东北黑土地保护性耕作行动计划，充分调动社会各部门积极性，以现有环境问题为导向，稳步推进土壤管控及其修复利用工作。

5.3. 存在问题及未来研究

鉴于作者知识水平有限、资料获取的局限性以及论文准备时间的限制，文中仍存在些许不足，今后工作中还需在以下方面进行进一步完善。

1) 采用气候影响度模型的优点为逻辑严谨、原理性强，但参数确定较为粗略，导致分析结果存在偏差，后续应通过对不同地区要素搜集，进一步夯实本文成果。

2) 农业生产力影响因素主要为气候及市场两因素，但不局限于本文内容，如农业技术、农业政策、农机设备更新等，应在今后工作中通过调研补齐数据，使研究结果更为全面、准确。

3) 关于农业生产力研究前人已做了很多研究工作，后续工作中可以在以下方面开展研究：与生产实际相结合，与资环、规划及灾害预警相结合，注重与实际应用相结合；研究中除了运用统计方法外，还应开展实地试验、生长模型模拟、人工气候模拟等多种研究。

参考文献

- [1] Christian, B., Benjamin, S., Maud, B., Benoit, S., Seydou, T., Thierry, L., *et al.* (2005) From GCM Grid Cell to Agricultural Plot Scale Issues Affecting Modeling of Climate Impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **360**, 2095-2108. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1741>
- [2] Stockle, C., Dyke, P.T., Williams, J.R., Allan Jones, C. and Rosenberg, N.J. (1992) A Method for Estimating the Direct and Climatic Effects of Rising Atmospheric Carbon Dioxide on Growth and Yield of Crops (Part II): Sensitivity Analysis at Three Sites in the Mid Western USA. *Agricultural Systems*, **38**, 239-256. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(92\)90068-Y](https://doi.org/10.1016/0308-521X(92)90068-Y)
- [3] Black, D.E. (2002) The Rains May Be A-Comin'. *Science*, **297**, 528-529. <https://doi.org/10.1126/science.1074379>
- [4] Jones, P.D., Raper, S.C.B. and Wigley, T.M.L. (1986) Southern Hemisphere Surface Air Temperature Variations: 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **25**, 1213-1230. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C1213:SHSATV%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C1213:SHSATV%3E2.0.CO;2)
- [5] Carbone, G.J., Kiechle, W., Locke, C., Mearns, L.O., McDaniel, L. and Downton, M.W. (2003) Response of Soybean and Sorghum to Varying Spatial Scales of Climate Change Scenarios in the Southeastern United States. *Climatic Change*, **60**, 72-98. <https://doi.org/10.1023/A:1026041330889>
- [6] Easterling, W.E., Rosenberg, N.J., Mckeeney, M.S., Allan Jones, C., Dyke, P.T. and Williams, J.R. (1992) Preparing the Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Model to Simulate Crop Response to Climate Change and the Direct Effects of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**, 17-34. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(92\)90084-H](https://doi.org/10.1016/0168-1923(92)90084-H)
- [7] Mera, R.J., Niyogi, D., Buol, G.S., Wilkerson, G.G. and Semazzi, F.H.M. (2006) Potential Individual versus Simultaneous Climate Change Effects on Soybean (C₃) and Maize (C₄) Crops: An Agroteclmology Model Based Study. *Global and Planetary Change*, **54**, 163-182. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.11.003>
- [8] Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Zhou, L., Liu, H., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, C., Tan, K., Yu, Y., Zhang, T. and Fang, J. (2010) The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China. *Nature*, **467**, 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- [9] Ahaed, S.A., Diffenbaugh, N.S., Hertel, T.W., Lobell, D.B., Ramankutty, N., Rios, A.R. and Rowhani, P. (2010) Climate Volatility and Poverty Vulnerability in Tanzania. Policy Research Working Papers, World Bank, Washington DC. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5117>
- [10] 王馥棠. CO₂ 浓度增加对植物生长和农业生产的影响[J]. 气象, 1993(7): 8-13.
- [11] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 杨晓光, 何勇. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟[J]. 中国生态农业学报,

2008, 16(6): 1448-1452.

- [12] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [13] 史晓磊. 基于引力模型的青冈县农村居民点空间布局优化[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [14] 罗岚. 基于现代化生态农业发展的青冈县城镇规划研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [15] 梁颖. 蛟河市近 30 年来气候变化及其对主要农作物的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [16] 唐佳. 气候变化对蒲江县主要农作物产量的影响及灾损评估[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2019.
- [17] 张亚宁, 张明军, 王圣杰, 杜铭霞, 周苏娥. 气候变化对河西走廊主要农作物的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1325-1335.
- [18] 黄晓旭. 气候变化对盐亭县主要农作物产量的影响度及灾损风险评估[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2016.
- [19] 孙书安, 郑国清, 刘九芬, 孟菊茹. 气象因子影响度的概念及其应用[J]. 河南农业科学, 1993(3): 11-12.
- [20] 李永生, 张健, 于梅, 班晋. 2013 年黑龙江省夏季洪涝灾害成因分析[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(3): 31-37.