

气候变化背景下中国玉米单产增速减缓的原因分析

杨 笛¹, 熊 伟^{1*}, 许吟隆¹, 冯灵芝², 张梦婷¹, 刘 欢¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 陕西省榆林市气象局, 榆林 719099)

摘 要: 采用集合经验模态分解方法, 分析 1981—2008 年中国玉米单产的变化趋势, 发现全国和 15 个省(自治区、直辖市)均出现了玉米单产增速变缓的现象。该研究选取 10 个出现玉米单产增速变缓的主产省(自治区、直辖市), 基于 Cobb-Douglas 生产函数, 构建了肥料、灌溉、其他物质投入和气候要素 4 类驱动因子与玉米单产之间的多元回归模型, 分析各驱动因子对玉米单产的影响和贡献。结果表明: 1) 肥料、灌溉、其他物质投入和气候要素 4 类驱动因子与 1981—2008 年玉米单产均存在着显著的相关关系, 其中肥料、其他物质投入和灌溉显著地促进了玉米单产的增长, 当这些因子每增加 1% 时, 将分别促进玉米单产增长 0.39%、0.06% 和 0.04%。气候要素中, 降水对玉米单产也表现为促进作用, 当降水每增加 1%, 玉米产量会增长 0.21%; 而气温和太阳辐射(云覆盖率)则对玉米单产产生负面影响, 当温度每增加 1% 和太阳辐射每减少 1%, 将导致玉米单产下降 0.99% 和 1.04%。2) 1981—2008 年, 肥料对玉米单产增加的贡献最大(使玉米增产 70.24%), 其次是灌溉(9.44%), 其他物质投入的贡献为 5.43%。气候变化要素中, 温度升高导致玉米产量降低了 1.98%, 而降水和辐射的减少则使玉米产量分别降低了 1.08% 和 4.72%。3) 肥料对 2 个玉米主产区(北方春玉米区和黄淮海夏玉米区)的产量增加均呈现显著的促进作用, 灌溉对北方春玉米单产有显著的正面影响, 其他物质投入对黄淮海夏玉米单产有显著的正面影响。气候因子中, 气温上升能显著的促进北方春玉米单产增长; 太阳辐射的减少对 2 个主产区玉米单产均有显著的负面影响。

关键词: 气候变化; 肥料; 灌溉; 玉米单产; Cobb-Douglas 生产函数; 驱动因子

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.035

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-Supp.1-0231-08

杨笛, 熊 伟, 许吟隆, 冯灵芝, 张梦婷, 刘 欢. 气候变化背景下中国玉米单产增速减缓的原因分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 231—238. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.035 http://www.tcsae.org
Yang Di, Xiong Wei, Xu Yinlong, Feng Lingzhi, Zhang Mengting, Liu Huan. Analysis of reason for recent slowing maize yield increase under climate change in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 231—238. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.035 http://www.tcsae.org

0 前 言

近年来, 全球主要粮食作物单产增长速度表现出明显的放缓趋势^[1-5], 直接影响了粮食生产能力, 目前这一现象已经引起世界各国的广泛关注。粮食是人类生存的基础, 随着人口的持续增长、人类饮食结构的调整和生物能源的需求, 预计到 2030 年全球对粮食的需求将在 2000 年的基础上增加 50%~100%, 实现这一目标将主要依赖于作物单产的上升^[6-7]。中国粮食作物的单产在经历了 70—80 年代的快速增长后, 自 90 年代中后期也表现出增速明显放缓的趋势^[8]。然而作为农业大国, 人口压

力和经济的持续增长以及耕地的减少, 使中国对作物增产的需求更大, 据估算, 到 2020 年中国主要粮食总产需要继续增长 20% 才能保证未来粮食安全^[9]。因此, 研究影响中国粮食产量的增长因素, 分析中国粮食增产速度放缓的原因, 对科学地制定粮食增产策略, 增加中、近期国家粮食生产能力, 保证国家粮食安全具有重要意义^[10]。

影响粮食作物单产的因素很多, 而肥料、技术、灌溉、气候被认为是影响中国粮食作物单产增长的主要驱动因子^[11]。近年来, 研究者利用统计方法(一阶差分、建立生产函数模型等)和作物模型模拟等手段, 开展了这些驱动因子对粮食作物单产变化影响的研究^[12-20]。Tao 等^[16]利用一阶差分方法构建了 1980—2008 年气候要素和玉米单产的多元线性回归模型, 结果显示, 气候变暖对玉米单产有明显的负面影响, 使玉米减产 1.73%。Neumann 等^[18]运用随机前沿生产函数在全球尺度上分析粮食作物的生产效率和产量差, 结果表明, 目前全球的小麦、玉米和水稻的产量已达到潜在最高产量的 64%、50% 和 64%。Liu 等^[20]利用 APSIM-Maize 模型分离气候、播期和积温对玉米产量的影响, 发现在品种和田间管理没有改变的情况下, 如果 1981—2007 年升温 1 °C, 玉米产量将会下降约 4%~22%。尽管研究者还没有达成相对一致的结论, 但是普遍认为肥料是影响作物产量最大的

收稿日期: 2016-11-16 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“气候变化下我国粮食产量增速放缓的驱动机制及适应潜力研究”(41471074); 国家自然科学基金面上项目“我国麦—玉轮作复种体系对气候变化的适应机制及适应技术集成的模拟研究”(41171093); 十二五科技支撑课题“重点领域气候变化影响与风险评估技术研究应用”(2012BAC19B0101)

作者简介: 杨 笛, 女, 山东潍坊人, 主要从事气候资源与气候变化研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。

Email: yangdi_caas@126.com

*通信作者: 熊 伟, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事气候变化与作物模型的研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: xiongwei@caas.cn

因子, 气候变暖往往对增产有负面影响。此外也有学者提出了一些假说, 认为全球很多地区主要作物单产增加速度的放缓可能是由于作物实际产量已经接近其潜在产量上限, 投入回报率递减造成的, 特别是在一些高度集约化的粮食产区, 如美国的玉米、欧洲的小麦、中国的水稻, 其实际产量已经达到或接近其潜在产量的 80%, 因而在一定程度上引起了目前观测到的单产增速放缓^[18]。

虽然目前关于作物产量增长因素的影响研究已经取得了一定的成果, 但是已有的研究多集中在单个驱动因子或者站点尺度上作物单产增速的影响分析上, 而在全中国尺度评估多个驱动因子对作物单产增速影响的研究还较为缺乏。玉米不仅是重要的粮食作物, 也是重要的饲料作物。作为中国种植面积和产量最多的粮食作物之一, 玉米产量的高低、经济效益的好坏直接影响着中国粮食安全、农业生产和畜牧业的发展^[21]。因此本文以玉米为研究对象, 首先分析了 1981—2008 年中国玉米单产的变化趋势, 然后选取玉米单产变化增速变缓的省份, 基于 Cobb-Douglas 生产函数, 构建了多个驱动因素(肥料、灌溉、其他物质投入和气候要素)与玉米单产之间的多元回归模型, 分析各驱动因子对玉米单产的影响, 探寻玉米单产增长速度放缓的原因, 以期为促进中国玉米单产的持续增长提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究以中国玉米种植区(图 1)为研究对象, 主要包括北方春玉米区(包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、宁夏等省(自治区)的全部, 河北和陕西的北部)、黄淮海夏玉米区(包括山东和河南省全部、河北省的中南部、山西省的中南部地区、陕西省的关中地区和江苏、安徽两省的北部)、西南山地丘陵玉米区(包括四川、云南和贵州省全部, 广西、湖南和湖北省(自治区)的一部分)、南方丘陵玉米区(包括广东、福建、浙江、上海、江西和海南省(市)的全部, 江苏和安徽省南部, 广西、湖南和湖北省(自治区)的东部)、西北内陆玉米区(包括新疆维吾尔自治区全部和甘肃的河西走廊)和青藏高原玉米区(包括青海省和西藏自治区), 其中种植面积较大的区域主要集中在从东北斜向西南的狭长玉米带^[22]。

1.2 数据来源及处理方法

1981—2008 年玉米单产和种植面积数据, 来源于农业部种植业管理司。玉米肥料为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点尺度上玉米的单位种植面积上的氮肥使用量 (kg/hm^2), 数据来自中国农业科学院农业信息研究所提供的全国农户调研资料。灌溉和其他的各项投入(如种子、农药、农膜、机械等)数据来源于国家发展和改革委员会价格司发布的《全国农产品成本收益资料汇编》($\text{元}/\text{hm}^2$), 并以省为单位, 对单位土地面积上的这些数据进行成本价格消除通货膨胀处理, 具体方法和过程详见文献^[23]。气候数据来自东安格利亚大学的气候研究所(climate research unit, CRU)的 CRU TS 3.23 数据集, 分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 包括温度($^{\circ}\text{C}$)、降水(mm)、云覆盖率($\%$)的月均值。其中云覆盖率越高, 则太阳辐射越少, 研究之所以采用

云覆盖率来衡量太阳辐射, 是因为云覆盖率不仅能较好地反映太阳总辐射, 而且数据资料齐全, 尤其是在区域空间上。考虑到各省玉米生育期存在差异, 本研究根据 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 玉米种植面积格点数据, 在格点水平上对 1981—2008 年各省玉米生育期内的气候要素进行面积加权, 玉米生育期资料来源于社科文献出版社的《气候变化对中国农业影响评估报告》^[24]。

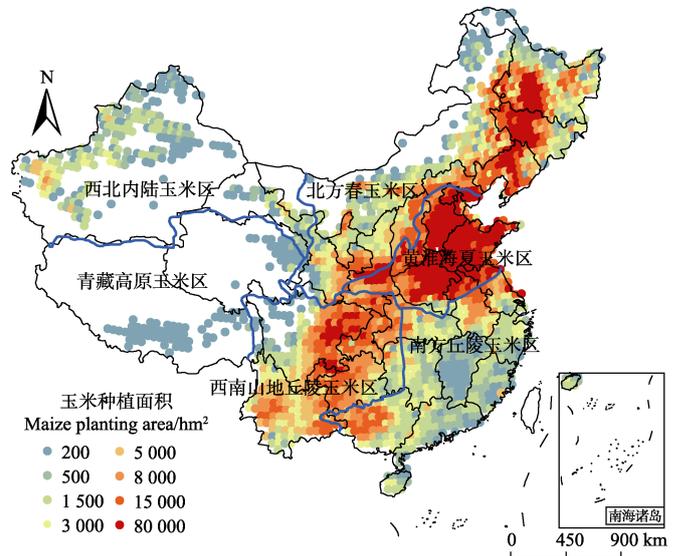


图 1 1981—2008 年中国玉米种植面积分布

Fig.1 Distribution map of maize planting area in China in 1981—2008

1.3 研究方法

本文首先采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法分析了 1981—2008 年中国和各省(自治区、直辖市)玉米单产的变化趋势, 然后基于 Cobb-Douglas 生产函数, 使用最小二乘法对玉米单产增速减缓的省(自治区、直辖市)构建了玉米单产与各驱动因子之间的多元回归模型, 并分析这些驱动因子在玉米单产变化中的影响与贡献^[25-27]。

1.3.1 玉米单产与各驱动因子的模型构建

根据上面所得出的 1981—2008 年中国玉米单产变化趋势, 选取玉米单产增速变缓的省(自治区、直辖市), 基于 Cobb-Douglas 生产函数构建中国玉米单产与各驱动因子之间的多元线性回归模型, 并对模型进行显著性检验。Cobb-Douglas 主要描述了投入和产出之间的关系, 目前在经济学中得到广泛应用^[23], 该生产函数应用在农业方面时, 作物产量代表产出, 而投入包括土地、劳动、资本等生产要素。目前 Cobb-Douglas 生产函数主要被用于研究影响粮食综合生产能力的因素。尽管气候因素不属于农业生产投入, 但是却直接影响到作物生产和生产要素的投入情况(如灌溉的投入等), 因此本研究在构建玉米单产的 Cobb-Douglas 生产函数模型时, 将气候要素也考虑到了函数中。此外 Stavits 等^[28]研究指出, 中国存在巨大的劳动力过剩, 劳动投入的边际收益可以忽略不计, 本研究对此也作了简化处理, 玉米单产生产函数模型中未包括劳动力投入。综上所述, 本研究建立的玉米单产回归模型如式(1)。

$$\ln Y_{it} = \alpha_0 + \alpha \ln F_{it} + \beta \ln I_{it} + \gamma \ln O_{it} + \sum_{j=1}^3 \rho_j \ln C_{jit} + \varepsilon \quad (1)$$

式(1)中*i*为省份,*t*为年份(1981—2008年)。Y为玉米单产,单位kg/hm²。F、I和O分别为肥料、灌溉和其他直接物质投入,其中其他物质投入指种子、农药、农膜、机械等。C为生长期经过面积加权的气候因素,*j*为3个气候要素:气温、降水和云覆盖率。 α 、 β 、 γ 和 ρ 分别为肥料、灌溉、其他物质投入和气候要素的系数,系数的大小代表对单产的影响程度,系数为正时,则表明该项对玉米单产有促进作用,反之为负面影响。由于玉米单产生产模型为双对数模型,因此肥料、灌溉、其他物质投入和气候要素每增加1%,引起的玉米单产变化分别为 $\alpha\%$ 、 $\beta\%$ 、 $\gamma\%$ 和 $\rho\%$ 。 α_0 为常数项, ε 为误差项。

模型的具体构建过程是采用普通最小二乘法(ordinary least square, OLS)进行,研究事先限定了玉米生产中4类主要驱动因子,因此为了防止遗漏重要变量,研究采用回归设定误差检验(regression specification error test, RESET)进行遗漏变量检验,结果表明模型中未遗漏重要变量。该模型还分别通过了单位根检验、自相关检验、异方差检验和共线性检验,说明研究所构建的玉米单产模型是合理并具有统计意义^[11]。

1.3.2 驱动因子对玉米单产的贡献分析方法

本研究采用各因子的系数和各因子多年变化百分比的乘积来衡量全国玉米单产模型中各驱动因子的贡献大小,具体过程见参考文献^[17]。其中1981—2008年玉米单产各驱动因子随时间的变化百分比是根据玉米单产和各驱动因子28a的初始值(为了消除1a数据带来偶然性,研究用1981—1983年头3a数据的平均值代表)和终止值(同理,也用2006—2008年最后3a的数据平均值)来计算得到的,具体计算过程见式(2)。

$$Con(E) = (E_2 - E_1) / E_1 \cdot Coff(E) \quad (2)$$

式中,*E*代表式(1)的各驱动因子(肥料、灌溉、其他物质投入、气温、降水和云覆盖率)中与玉米单产存在显著性关系的驱动因子,Con(*E*)为1981—2008年驱动因子*E*对全国玉米单产增长的贡献率,含义为驱动因子*E*引起的玉米单产的变化百分比。 E_1 为这28a(1981—2008年)年里驱动因子*E*的起始值, E_2 为这28a里驱动因子*E*的终止值。Coff(*E*)为玉米单产模型,见式(1)中驱动因子*E*的系数。

2 结果与分析

2.1 1981—2008年全国和各省(自治区、直辖市)玉米单产的变化趋势

1981—2008年中国玉米单产整体呈增长趋势(图2),但是随时间变化,单产增加到一定程度出现了增速变缓现象。为了便于观察玉米单产增速减缓现象,研究将1981—2008年(共计28a)以7a为间隔平均分为4个时段,并利用一元一次方程分别拟合4个时段中国玉米单产的变化趋势。在1981—1987年、1988—1994年、1995—2001

年、2002—2008年4个时段内中国玉米单产随时间变化的速率分别为126.81、93.538、57.805和25.91 kg/(hm²·a)呈现逐步下降的趋势(各时段拟合效果均达到 $P < 0.01$ 水平的极显著相关)。尽管1981—2008年全国玉米单产保持着增加趋势,但是增速变缓是已经发生的事实,尤其是在2002年之后。

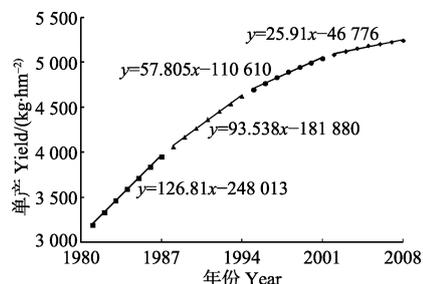


图2 1981—2008年全国玉米每7a单产变化趋势

Fig.2 Trend of maize yield in China in every 7 a in 1981—2008

各省的玉米单产变化总体上也呈现出上升趋势(表1),但31个省(自治区、直辖市)中有15个地区的玉米单产增速在4个时段出现了逐步变缓现象,分别是吉林、河北、黑龙江、河南、内蒙古、陕西、云南、新疆、江苏、安徽、甘肃、北京、宁夏、广东和上海,这些省(自治区、直辖市)1981—2008年平均每年玉米总产之合为 1.07×10^8 t,约占全国玉米总产量的54.80%。而且除了上述15个省(自治区、直辖市)玉米单产增速在4个时段逐步变缓外,山东省在4个时段表现为波动变缓,在前3个时段单产增速逐步减缓,而第4个时段(2002—2008年)增速又有增加趋势,福建省和海南省由于1981—1987年数据缺失问题,则表现出自1988—2008年玉米单产增速逐渐变缓的趋势。

2.2 各驱动因子对中国部分省市1981—2008年玉米单产的影响分析

为了更好地分析中国玉米单产增速减缓的原因,研究选取上述出现玉米单产增速逐步变缓的省份数据进行分析,由于北京、上海、宁夏、广东的玉米产量较少,而新疆的部分年份存在数据缺失,因此本研究选用其余10个省份。

由表2可见,玉米单产模型中各个驱动因子的系数均达到显著水平($P < 0.05$),其中气候要素(温度、降水和辐射)和肥料达到了极显著水平($P < 0.01$),且除温度外,其余驱动因子均呈现正相关。除了降水和太阳辐射,其他驱动因子都有所增长,因此过去28a里各项物质投入均促进了玉米单产的增长,而各项气候要素(气温、降水和辐射)均使得玉米单产下降。

从各因子的影响程度来看,肥料对玉米单产的促进作用最大,其投入每增加1%,玉米单产会增长0.39%,而灌溉和其他投入的促进作用则分别为0.04%和0.06%。1981—2008年中国这10个省(自治区)的肥料、灌溉投入和其他物质投入的起始值分别是56.64 kg/hm²、0.78元/hm²和9.81元/hm²,终止值分别为158.65 kg/hm²、

2.62 元/hm² 和 18.69 元/hm², 依次增长了 180.10%、235.90% 和 90.52%, 因此 1981—2008 年肥料、灌溉和其他物质投入对玉米单产的贡献分别为使玉米单产增长了

70.24%、9.44% 和 5.43%。可见肥料的投入对过去 28 a 来中国玉米单产的增加作用是不可忽视的, 这一结果与褚清河等^[29]的研究结果一致。

表 1 1981—2008 年各省(自治区、直辖市)玉米的单产变化趋势
Table 1 Trend of maize yield in different provinces (autonomous regions, municipalities) in 1981-2008

省、自治区和直辖市 Provinces, autonomous regions, municipalities	1981—2008 总产量占全国的比重 Proportion of yield in the province of China in 1981-2008/%	1981—2008 变化速率 Change rate in 1981-2008 /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	1981—1987 变化速率 Change rate in 1981-1987 /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	1988—1994 年变化速率 Change rate in 1988-1994 /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	1995—2001 年变化速率 Change rate in 1995-2001 /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2002—2008 年变化速率 Change rate in 2002-2008 /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2002—2008 变化速度相对于 1981—1987 的变化比例 Change percentage of change rate in 2002-2008 compared with the rate of 1981-1987/%
吉林 Jilin [#]	13.18	78.8**	164.4**	96.4**	47.2**	35.0**	-78.7
山东 Shandong	12.55	101.3**	124.7**	97.3**	95.0**	108.6**	-12.9
河北 Hebei [#]	9.31	62.4**	113.9**	79.6**	45.1**	11.3**	-90.1
黑龙江 Heilongjiang [#]	9.03	57.5**	196.5**	105.4**	9.6	-81.8**	-141.6
河南 Henan [#]	8.81	78.9**	131.4**	100.2**	59.9**	19.5**	-85.2
辽宁 Liaoning	7.88	74.1**	9.1*	55.1**	95.7**	131**	1339.6
四川 Sichuan	5.73	51.8**	41.8**	48.9**	55.2**	60.8**	45.5
内蒙古 Neimenggu [#]	5.57	109.1**	235.2**	150.9**	66.9**	-15.7*	-106.7
山西 Shanxi	3.56	56.7**	37.8**	50.0**	61.9**	79.3**	109.8
陕西 Shaanxi [#]	3.44	56.7**	95.6**	63.6**	44.5**	33.7**	-64.7
云南 Yunnan [#]	3.41	62.6**	71.6**	67.6**	59.6**	47.7**	-33.4
贵州 Guizhou	2.48	89.6**	61.7**	84.7**	98.7**	105.1**	70.3
新疆 Xinjiang [#]	2.37	187.3**	266.1**	218.5**	160.5**	95.8**	-64.0
江苏 Jiangsu [#]	2.18	38.8**	170.1**	71.5**	-5.7	-56.9**	-133.5
安徽 Anhui [#]	1.76	67.5**	111.3**	108.1**	45.0**	-30.4**	-127.3
甘肃 Gansu [#]	1.53	83.9**	166.8**	104.9**	56.7**	19.0**	-88.6
湖北 Hubei	1.46	85.5**	80.4**	85.1**	87.7**	85.3**	6.1
广西 Guangxi	1.38	83.6**	34.9**	67.7**	99.3**	132.9**	280.8
北京 Beijing [#]	0.93	38.4**	151.2**	76.0**	0.8	-74.2**	-149.1
重庆 Chongqing	0.86	—	—	—	338.4**	390.1**	—
天津 Tianjin	0.66	49.2**	3.3	34.4**	64.3**	94.3**	2757.6
宁夏 Ningxia [#]	0.64	169.1**	307.5**	218.2**	120.3**	29.1**	-90.5
湖南 Hunan	0.62	153.5**	86.4**	136.9**	175.8**	203.7**	135.8
广东 Guangdong [#]	0.32	119.4**	139**	128.2**	112.5**	94.6**	-31.9
浙江 Zhejiang	0.14	74.5**	27.7**	60.0**	91.5**	114.1**	311.9
福建 Fujian	0.06	135**	—	157.4**	108.8**	68.4**	—
江西 Jiangxi	0.05	109.8**	91.9**	104.9**	115.8**	124.7**	35.7
上海 Shanghai [#]	0.04	70.3**	170.4**	101.4**	37.1**	-23.4**	-113.7
海南 Hainan	0.03	166.9**	—	176.2**	154.3**	156.5**	—
西藏 Xizang	0.01	81.1**	16.8**	63.4**	102.5**	134.8**	702.4
青海 Qinghai	0.00	335.9**	—	—	463.0**	544.4**	—

注: **表示 1% 显著性水平, *表示 5% 显著性水平, #表示 1981—2008 年玉米单产逐步变缓的省份, “—” 代表无数据。下同。

Note: ** 1% significance level, * 5% significance level, # The province of maize yield slowing down in 1981-2008, “—” represents no data. The same as below.

气候要素中各因子对玉米单产的作用不同, 温度升高和辐射降低(即云覆盖度增加)导致玉米减产, 降水的增加会促进玉米单产增加。气温和云覆盖率每增加 1%, 玉米分别减产 0.99% 和 1.04%, 降水对玉米单产则有促进作用, 降水每增加 1%, 玉米增产 0.21%。1981—2008 年, 受气候变化和人类活动影响, 中国 10 个省(自治区)气温平均升高了 2.00%, 辐射平均降低了 4.54%, 降水平均减少了 5.12%, 从而导致玉米单产分别减产了 1.98%、1.08% 和 4.72%, 这一结果也与前人的研究结果相似。大量关于气候变化对玉米影响的研究都认为温度升高会导致玉米产量降低, 其原因可能是温度升高缩短了玉米的生育期长度, 可能存在灌浆不足, 导致单产下降^[30-31]。玉米作为喜光作物, 辐射会提高玉米的净光合生产率, 促进干物质积累使玉米增产, 因此太阳

辐射降低也会导致玉米单产降低^[32]。而降水量的增加由于补给了水分, 利于玉米养分的吸收和运输, 从而有利于产量的构成, 但是在过去 28 a 里, 降水量平均是降低的, 因此也影响了中国玉米单产的增长。

综合表 2 中 4 类驱动因子(温度、降水、辐射(云覆盖率)、肥料、灌溉和其他物质投入)对 1981—2008 年玉米单产的贡献, 可以看出这 4 类驱动因子共使玉米单产增加 77.33%, 其中肥料(70.24%)、灌溉(9.44%)和其他物质投入(5.43%)三者共同使玉米增产 85.11%, 而气候要素使玉米减产 7.78%。在实际生产中, 根据农业部种植业管理司提供的 1981—2008 年玉米单产数据, 10 个省(自治区)平均玉米产量在过去 28 a 里, 仅增加了 66.00%, 这种差异可能是由本研究模型中未涉及到的其他因子(如病虫害、农业气象灾害等因子)造成的。

表 2 1981—2008 年部分省(区)玉米单产和各驱动因子的多元线性回归结果

Table 2 Results of multiple linear regression of maize yield and various factors in main maize production areas in 1981—2008

变量 Variables	驱动因子 Driving factors					
	肥料 Fertilizer/ (kg·hm ⁻²)	灌溉 Irrigation (元·hm ⁻²)	其他 物质投 入 Other inputs/ (元·hm ⁻²)	气候要素 Climatic factors		
				温度 Tempera- ture/°C	降水 Precipita- tion/mm	云覆 盖率 Cloud cover/%
系数 Coefficient	0.39**	0.04*	0.06*	-0.99**	0.21**	-1.04**
初始值 Initial value	56.64	0.78	9.81	21.03	113.58	63.39
终止值 End value	158.65	2.62	18.69	21.45	107.77	66.27
1981—2008 年驱动因子 变化百分比 Change rate in 1981-2008/%	180.10	235.90	90.52	2.00	-5.12	4.54
对单产的贡献% Contribution to yield/%	70.24	9.44	5.43	-1.98	-1.08	-4.72

中国地域辽阔, 区域差异明显, 为了能更好地了解各区域情况, 研究又以玉米种植区为单位, 进一步分析了各驱动因子对各玉米区的影响。由于西南山地丘陵玉米区和西北内陆玉米区只有云南和甘肃省出现了产量变缓现象, 而且这 2 个省份玉米生产分别仅占全国玉米总量的 3.41% 和 1.53%, 因此研究只分析了统计的数据量相对多且玉米生产比重较大的北方春玉米区(吉林、黑龙江、内蒙古)和黄淮海夏玉米区(河北、河南和陕西)(在此未考虑江苏和安徽的北部)的玉米单产的受影响情况, 结果见表 3。

表 3 各驱动因素对各玉米产区玉米单产的贡献
Table 3 Contribution of driving factors to maize yield in main maize production areas

地区 Regions	变量 Variables	驱动因子 Driving factors					
		肥料 Fertilizer (kg·hm ⁻²)	灌溉 Irrigation (元·hm ⁻²)	其他物 质投入 Other inputs (元·hm ⁻²)	气候要素 Climate Factors		
					温度 Temp- erature /°C	降水 Preci- pitation /mm	云覆 盖率 Cloud cover /%
北方春 玉米区 Northern spring maize region	系数	0.27**	0.12**	0.04	1.52**	0.10	-0.89*
	1981—2008 年变化 百分比	269.90	301.03	67.80	3.41	-16.58	4.46
	贡献	72.87	36.12	2.71	5.18	-1.66	-3.97
黄淮海夏 玉米区 Huang- Huai-hai summer maize region	系数	0.42**	-0.10*	0.13*	0.54*	0.14	-0.30**
	1981—2008 年变化 百分比	184.36	152.37	86.36	1.97	-12.12	9.46
	贡献	77.43	-15.24	11.23	1.06	-1.70	-2.84

由表 3 可见, 在 1981—2008 年不同驱动因子对北方春玉米区和黄淮海夏玉米区玉米单产的影响和贡献作用

并不完全一致, 存在区域差异。具体来说, 肥料与北方春玉米区和黄淮海夏玉米区玉米单产均具有极显著(达到 $P < 0.01$ 水平)的正相关关系, 表明肥料能明显促进 2 大主产区的玉米增产, 但是不同区域肥料促进程度不同。肥料投入每增加 1%, 北方春玉米区和黄淮海夏玉米区玉米单产将会分别增加 0.27% 和 0.42%, 由于 1981—2008 年这 2 个主产区玉米的施肥量分别增长了 269.90% 和 184.36%, 因此肥料使玉米依次增产了 72.87% 和 77.43%。

灌溉对各区域玉米产量的作用也存在区域差异。在北方春玉米区, 灌溉投入与玉米单产存在显著的正面影响, 灌溉投入每增加 1%, 玉米单产会增长 0.12%。由于 1981—2008 年中国北方春玉米区灌溉投入增长了 301.03%, 因此灌溉使其单产增长了 36.12%。前人的研究也认为, 在北方春玉米区玉米生长对水分变化敏感, 干旱缺水常导致该地区玉米减产, 因此增加灌溉投入对该区域内玉米产量影响较显著^[33-34]。而在黄淮海夏玉米区, 这是由于黄淮海地区夏玉米种植期雨量充沛, 目前基本以雨养为主。由于灌溉成本和灌后遇雨成涝问题, 增加灌溉对该地区产量可能会有少许的负面作用。同时, 由于该地区的良好灌溉条件, 在夏玉米发生严重旱情时也进行应急灌溉, 但由于高温下失墒快和轮灌期长等问题, 大面积受旱之后灌溉, 玉米产量仍会比不灌溉或少灌溉年份低, 导致灌溉和产量的负相关。

在黄淮海夏玉米区, 其他物质投入与玉米单产存在显著正相关关系。其他物质投入每增加 1%, 玉米单产会增长 0.13%。由于 1981—2008 年黄淮海夏玉米区其他物质投入增长了 86.36%, 因此其他物质投入的增长使玉米增产 11.23%。在北方春玉米区, 其他物质投入对玉米单产略有促进作用, 但未能达到显著水平。

3 种气候要素对各区域玉米单产的影响也有所不同。气温对北方春玉米和黄淮海夏玉米单产表现为显著的促进作用, 气温每升高 1%, 玉米会分别增产 1.52% 和 0.54%, 1981—2008 年气温分别上升了 3.41% 和 1.97%, 因此气温使玉米单产增长了 5.18% 和 1.06%。之所以产生这种现象可能是因为北气候变暖增加了当地的热量资源, 积温的增加加速了玉米生长发育和干物质的积累。同时热量资源的增加也促使春季物候期提前和秋季成熟期推后, 玉米的生育期延长, 因此促进了玉米单产增长^[30-31]。在北方和黄淮海地区, 降水与玉米产量之间没有显著相关关系, 产生这种现象的原因可能是 2 个地区的灌溉设施齐全, 对灌溉的依赖使得降水的变化不会对玉米产生过大的影响。云覆盖率对在 2 大主产区的玉米单产均有显著的负面影响, 说明辐射的变化明显地影响了 2 个产区的玉米生产。云覆盖率每增加 1%, 即辐射每降低 1%, 北方春玉米和黄淮海夏玉米分别会减产 0.89% 和 0.30%, 由于 1981—2008 年 2 个种植区的云覆盖率增加了 4.46% 和 9.46%, 因此导致玉米单产分别下降 3.97% 和 2.84%。

3 结论与讨论

3.1 结论

1) 1981—2008 年中国玉米单产总体上呈增加趋势,

但是出现了增速呈变缓现象,尤其是在2002—2008年。全国有15个省(自治区、直辖市)出现了玉米单产增速逐步变缓的现象。

2) 肥料、灌溉、其他物质投入和气候要素确实影响了1981—2008年玉米单产的变化,其中肥料、降水、其他物质投入和灌溉明显地促进了玉米单产的增产,当这4个因子每增加1%时,将分别促进玉米单产增长0.39%、0.21%、0.06%和0.04%。而气温和云覆盖率则对玉米单产变化产生负面影响,温度每增加1%和辐射每减少1%(即云覆盖度每增加1%),将导致玉米单产下降0.99%和1.04%。

3) 在1981—2008年期间,肥料对产量的贡献最大,其次是灌溉。研究所涉及的区域里,28 a里肥料、灌溉、其他物质投入分别平均增加了180.10%、235.90%和90.52%,促使玉米单产分别增长了70.24%、9.44%和5.43%。而受气候变化的影响,玉米产量略有降低,其中温度升高导致玉米产量降低了1.98%,降水和辐射的减少则导致玉米产量分别降低了1.08%和4.72%。

4) 肥料对2大玉米主产区(北方春玉米区和黄淮海夏玉米区)的玉米有显著的增产效果。在北方春玉米区灌溉投入能够显著地促进玉米单产增加。其他物质投入的增加可以显著促进黄淮海夏玉米区玉米的增产。气候因子中,气温对北方和黄淮海的玉米单产增长均有显著的促进作用,而云覆盖率对两个地区玉米的单产有显著的负面影响。

3.2 讨论

本研究基于Cobb-Douglas生产函数构建了1981—2008年中国玉米单产与多个驱动因子(肥料、灌溉、其他投入和气候要素)的多元回归模型,分析了各驱动因子对玉米单产的影响和贡献,拟为中国玉米生产的可持续发展提供一定参考。研究中还存在一些问题,需要在今后进一步进行分析和探索。

1) 统计分析方法在区域尺度分析产量贡献因子方面具有很多优点,如需要较少的数据、能定量地给定结果的置信区间和不确定性大小等。但由于所用数据的质量、数据种类、模型选择的不同以及简化处理问题等,使研究结果还存在一定的不确定性。例如实际生产中,作物单产变化受到了诸多因素的影响,而本研究只涉及了主要驱动因子,还未能考虑其他因子(如病虫害、气象灾害、田间管理、规模化经营和劳动力投入等)的影响^[35]。此外,研究还无法从机理和机制上回答作物产量变化的深层次原因。希望今后随着研究手段的发展、数据资料的收集和研究的深入,能够更全面和综合地考察更多因子对玉米产量的影响,加强各因子影响的机理方面的研究和分析,提高研究结果的精准度。

2) 肥料是1981—2008年玉米增产中贡献最大的因子,这一结果与前人的研究结果基本一致^[29]。1981—2008年玉米施用的化肥(氮肥)增加了180.10%,目前中国化肥施用量的增速远远超过粮食产量的增长速度,而过量施用化肥所带来的诸多问题,也已受到广泛的关注。首先随着化肥用量的增加,作物的增产效果逐渐降低。有研究认为过量施用化肥会导致肥料利用率显著降低,作

物增产不明显,并出现增速放缓的情况,尤其是在高施肥地区作物增产潜力小,增产变缓程度更大^[36-37]。而且过量使用化肥也会导致土壤肥力下降,土壤板结,加剧农田盐碱化和环境污染,影响作物品质,甚至会涉及到食品安全问题^[38-40]。因此尽管过去肥料对玉米增产的贡献最大,但今后生产中应该理性使用肥料,加强和推广合理施肥。

3) 气候变化是不争的事实,且关于气候变化对玉米的研究也开展了很多,但在1981—2008年里,尽管气候变化导致了玉米产量降低,但是并未产生较大的影响,而且在温度、降水和辐射3个气象因素中,得出太阳辐射的降低所带来的负面影响较其他两者而言,对玉米产量的不利影响更大。目前由于气候变化和环境污染等问题,中国大部分地区都出现太阳辐射减弱的问题^[41],而以往的关于气候变化对玉米产量影响的研究又多集中在温度升高上,对辐射影响还关注较少,今后还需要进一步加强这方面的研究。此外,本研究中在气象要素方面只是简单地考虑温度、降水和辐射3种要素对玉米产量的影响,而对CO₂浓度的肥效作用,以及各气候因子的交互作用等也未能涉及,今后拟进一步加强研究,以更全面、系统地考察气候变化对玉米产量的影响。

[参 考 文 献]

- [1] Grassini P, Eskridge K M, Cassman K G. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends[J]. *Nature Communications*, 2013, 4:2918
- [2] Halfef S. Trends in maize, rice, and wheat yields for 188 nations over the past 40 years: A prevalence of linear growth. *Agriculture[J]. Ecosystems and Environment*, 2003, 97(1): 275—283.
- [3] Finger R. Evidence of slowing yield growth—the examples of Swiss cereal yields[J]. *Food Policy*, 2010, 35(2): 175—182.
- [4] Fischer R A, Edmeades G O. Breeding and cereal yield progress[J]. *Crop Science*, 2010, 50(s1):S85—S98.
- [5] Ray D K, Ramankutty N, Mueller N D, et al. Recent patterns of crop yield growth and stagnation[J]. *Nature Communications*, 2012, 3:1293.
- [6] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(50): 20260—20264.
- [7] Bruinsma J. *World agriculture towards 2015/2030: An FAO perspective[M]*. London: Earthscan, 2003.
- [8] 李琳凤, 李孟刚. 当前影响我国粮食生产的主要因素分析[J]. *中国流通经济*, 2012, 26(4): 109—115.
Li Linfeng, Li Menggang. The Analysis on the influencing factors of grain production in the light of the current situation of China[J]. *China Business and Market*, 2012, 26(4): 109—115. (in Chinese with English abstract)
- [9] Peng S, Tang Q, Zou Y. Current status and challenges of rice production in China[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 1—6.
- [10] Wei X, Velde M V D, Holman I P, et al. Can climate-smart agriculture reverse the recent slowing of rice yield growth in China?[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 196(196):125—136.

- [11] 熊伟, 林而达, 蒋金荷, 等. 中国粮食生产的综合影响因素分析[J]. 地理学报, 2010, 65(4): 397—406.
Xiong Wei, Lin Erda, Jiang Jinhe, et al. An integrated analysis of impact factors in determining China's future grain production[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(4): 397—406. (in Chinese with English abstract)
- [12] Lobell D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yields[J]. *Science*, 2003, 299(5609): 1032—1032.
- [13] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends[J]. *Nature*, 1997, 387(6632): 484—485.
- [14] Xiong W, Conway D, Lin E, et al. Potential impacts of climate change and climate variability on China's rice yield and production[J]. *Climate Research*, 2009, 40(1): 23—35.
- [15] Lobell D B, Field C B. Global scale climate—crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. *Environmental research letters*, 2007, 2(1): 014002.
- [16] Tao F, Zhang Z, Zhang S, et al. Response of crop yields to climate trends since 1980 in China[J]. *Climate Research*, 2012, 54(3): 233—247.
- [17] You L, Rosegrant M W, Wood S, et al. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6): 1009—1014.
- [18] Neumann K, Verburg P H, Stehfest E, et al. The yield gap of global grain production: A spatial analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2010, 103(5): 316—326.
- [19] Xiong W, Holman I P, You L, et al. Impacts of observed growing-season warming trends since 1980 on crop yields in China[J]. *Regional environmental change*, 2014, 14(1): 7—16.
- [20] Liu Z, Hubbard K G, Lin X, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China[J]. *Global change biology*, 2013, 19(11): 3481—3492.
- [21] 仇焕广, 张世煌, 杨军, 等. 中国玉米产业的发展趋势、面临的挑战与政策建议[J]. 中国农业科技导报, 2013(1): 20—24.
Qiu Huanguang, Zhang Shihuang, Yang Jun, et al. Development of China's maize industry, challenges in the future and policy suggestions[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013(1): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王淑萍. 我国玉米种植产区的划分[J]. 养殖技术顾问, 2010(6): 74.
- [23] 崔静, 王秀清, 辛贤, 等. 生长期气候变化对中国主要粮食作物单产的影响[J]. 中国农村经济, 2011(9): 13—22.
- [24] 矫梅燕, 周广胜, 陈振林. 气候变化对中国农业影响评估报告(No.1)[M]. 北京: 社科文献出版社, 2014.
- [25] 任冉. 基于集合经验模态分解(EMD-EEMD)的中国夏季降水预报方法的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
Ren Ran. The Research about the Summer Precipitation Prediction in China Based on EEMD Method[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science&Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [26] 肖海峰, 王姣. 我国粮食综合生产能力影响因素分析[J]. 农业技术经济, 2004(6): 45—49.
- [27] 崔静, 王秀清, 辛贤. 气候变化对中国粮食生产的影响研究[J]. 经济社会体制比较, 2011(2): 54—60.
- [28] Stavits B. Market reforms and changes in crop productivity: Insights from China[J]. *Pacific Affairs*, 1992, 64(3): 373—383.
- [29] 褚清河, 郭耀东. 中国粮食产量八连增的原因、问题及发展对策[J]. 山西农业科学, 2012, 40(4): 295—303.
Zhu Qinghe, Guo Raodong. Reason, problem and growth measures for food crop successive 8-year increase in China[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2012, 40(4): 295—303. (in Chinese with English abstract)
- [30] 吕硕. 气候变化对吉林梨树春玉米产量影响及品种适应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
Lv Shuo. Analysis of Climate Change on Yield of Spring Maize and Adaptation in Maize Cultivars in Lishu Jilin[D]. Beijing: China Agriculture University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [31] 师朝霞. 浅析温度对玉米产量、质量的影响[J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2012(4): 21—22.
- [32] 王洋, 齐晓宁, 邵金锋, 等. 光照强度对不同玉米品种生长发育和产量构成的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(6): 769—773.
Wang Yang, Qi Xiaoning, Shao Jinfeng, et al. Effects of light intensity at full growing stage on the growth and yield of different maize varieties[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(6): 769—773. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张丽. 水分—氮素—光照对玉米生长的互作效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
Zhang Li. Interactions of Nitrogen with Light on the Growth of Maize[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [34] 马建勇. 东北地区高温干旱对玉米产量影响的情景分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
Ma Jianyong. Projected of Future Changes of Heat Stress & Drought and Their Impacts on Maize Yield in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [35] 李长生, 李茂松, 马秀枝, 等. 黄淮海地区农田污染对粮食生产的制约及防治对策[J]. 自然灾害学报, 2006(s1): 86—91.
Li Changsheng, Li Maosong, Ma Xiuzhi, et al. Restriction of farmland's pollution in Huang-Huai-Hai area on grain production and its prevention and control measures[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006(s1): 86—91. (in Chinese with English abstract)
- [36] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 生态环境学报, 2000, 9(1): 1—6.
Zhu Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [37] 曾希柏, 陈同斌, 胡清秀, 等. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 539—546.
Zeng Xibai, Chen Tongbin, Hu Qingxiu, et al. Grain Productivity and its potential as related to fertilizer

- consumption among different counties of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 539—546. (in Chinese with English abstract)
- [38] 孟安华. 牛粪有机肥培肥土壤的机理及不同作物的激发效应[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
Meng Anhua. Mechanism of Cattle Manures Improving Soil Fertility Stimulatory Effects of Different Crops[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王爱荣. 控制化肥过量施用保护农业生态环境[J]. *农业资源与环境学报*, 2007, 24(3): 95—96.
- [40] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. *生态环境学报*, 2004, 13(4): 656—660.
- Huang Guoqin, Wang Xingxiang, Qian Haiyan, et al. Negative impact of inorganic fertilizes application on agricultural environment and its countermeasures[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004, 13(4): 656—660. (in Chinese with English abstract)
- [41] 马金玉. 中国地面太阳辐射长期变化特征及短期预报方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
Ma Jinyu. The Long-term Variation and Short-term Prediction Method of Surface Solar Radiation in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science&Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)

Analysis of reason for recent slowing maize yield increase under climate change in China

Yang Di¹, Xiong Wei^{1*}, Xu Yinlong¹, Feng Lingzhi², Zhang Mengting¹, Liu Huan¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Yulin Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Yulin 719099, China)

Abstract: China's maize yield has demonstrated a slowing growth since the end of last century, which has received great concerns for policy makers and agricultural scientists. Reasons for such phenomena are usually ascribed to decreasing fertilizer efficiency, land degradation, decreasing technology inputs such as new crop varieties, and climate change. However, none of the reasons has been clearly investigated and quantified to date, particularly at a very regional scale. Here a gridded and time series database of maize yield, areas, irrigation, fertilizer application, we apply an ensemble empirical mode decomposition (EEMD) analysis and examine the contribution of each factors on past yield growth and their changes along time. We discover that the slowing yield growth has been experienced at the whole China and 15 provinces (autonomous regions, municipalities) in 1981-2008. Based on Cobb-Douglas production function, we create multiple linear regression models for the whole country and the 10 provinces that exhibits slowing yield increase, to isolate the contributions of fertilizer, irrigation, other physical inputs and climate on past maize yield increase. Results showed, at national scale, 1) maize yield was significantly correlated with fertilizer, irrigation, other physical inputs and climate factors during 1981-2008. Maize yield was significantly promoted by inputs of fertilizer, irrigation and others, with a 1% increase of these investments increasing maize yield by 0.39%, 0.06% and 0.04%. Among climate factors, change of precipitation increased maize yield, with a 1% increase in precipitation promoting maize yield by 0.21%. Whereas temperature and cloud cover had negative effects on maize yield change, a 1% increase in temperature and a 1% decrease in solar radiation would decrease maize yield by 0.99% and 1.04% respectively. 2) Past increase of fertilizer application amount contributed most to past yield increase of maize (70.24%), followed by irrigation (9.44%), and other physical inputs (5.43%). Within all climate drivers, increase of temperature reduced maize yield by 1.98%, while decrease in precipitation and solar radiation increased maize yield by 1.08% and 4.72%. 3) Increased fertilizer application significantly increased the production in Northern spring maize region and Huang-Huai-hai summer maize region. Irrigation had positive effects in Northern spring maize region. The other physical inputs had significantly positive effects in Huang-Huai-hai summer maize region. For climate drivers, increase of temperature could promote maize yield significantly in Northern spring maize region and Huang-Huai-hai summer maize region. The reducing solar radiation had significantly negative effects on maize yield in two maize producing regions. Although statistic model is able to isolate the contribution of various factors, it's accuracy depends on the training date and the models that have been selected. Our results only focus on the major factors that affecting China's maize production, which to some extent limits its explanation ability as many other factors such as environmental degradation, pest and diseases, labor loss have started to affect the national crop production. Nevertheless, our results are consistent with previous studies showing that fertilizer is the major player for past maize yield growth, while its decreasing contribution has caused the recent slowing the maize yield increase. Climate change is becoming an important factor in fluctuating the production and affecting the changing trends.

Keywords: climate change; fertilizers; irrigation; maize yield; Cobb-Douglas production function; driving factors