

• 导读 •

玉米生产系统对气候变化的响应与适应

谢瑞芝, 明博

中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室, 北京 100081

Response and Adaptation of Maize Production System to Climate Change

XIE RuiZhi, MING Bo

Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081

玉米是我国第一大粮食作物, 玉米持续增产对保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。2020 年我国玉米种植面积达到 $4.12 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 总产达到 $2.61 \times 10^8 \text{ t}$ 。然而, 气候变化是全球发展面临的严峻挑战。LOBELL 等^[2]研究认为气温每升高 1°C 作物产量减少 10%, 过去数十年全球增温对全球玉米生产造成了约 3.8% 的减产影响^[3]。气候变化使气候因子超过“波动阈值”(如高温、低温、暴雨、干旱事件)也对农业生产造成了极大危害。未来气候变化(RCP8.5)情景下, 我国黄淮海夏玉米区、西北玉米区以及东北春播玉米区平均减产预期会达到 16%—25%, 气候变化将对我国的玉米生产带来极大挑战。为了准确评估未来发展对全球气候以及玉米生产系统的影响。“十三五”期间, 国家设立启动了重点研发计划项目“玉米生产系统对气候变化的响应机制及其适应性栽培途径”, 集合全国优势科研单位, 针对关键气候因子的时空变化规律及其对玉米生产系统影响、玉米产量形成过程对多气候因子变化的响应与适应机制以及不同种植模式下玉米生产系统应对气候变化的关键技术效应与适应性栽培途径广泛而深入地开展研究和生产实践。本专题展示了在关键生育时期增温和二氧化碳升高对玉米生长发育和产量形成的影响以及玉米生产系统温室气体排放等方

面取得的一些重要进展, 以期提出适应性的玉米栽培途径提供参考。

黄淮海平原是我国重要的夏玉米产区, 近年来在玉米生育期内(6—9 月) $>35^\circ\text{C}$ 高温天气出现频率呈逐年上升趋势, 尤其以玉米花期(7—8 月份)最为明显^[4], 且高温与干旱时常相伴相随^[5], 严重影响玉米结实率和产量。玉米抽穗至开花期是对高温最敏感的时期, 此期高温热害极易引起花粉败育, 无法正常开花散粉, 致使雌穗不能受精而形成空粒, 结实率大幅下降, 玉米严重减产^[6]。本专题论文《花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响》^[7], 利用人工智能温室采用盆栽试验, 发现花期高温、干旱及复合胁迫显著抑制雄穗生长发育, 花药和花粉形态畸变, 花粉量减少, 导致果穗授粉不良、穗粒数显著减少, 最终影响籽粒产量。不同品种对高温、干旱的响应程度不同。这一研究对明确黄淮海夏玉米产量限制因子以及研发适应性栽培管理措施具有重要意义。

玉米成株期内增温可导致株高显著增加^[8], 同时也对植株组织结构产生影响^[9]。但温度升高对玉米茎秆生长发育、茎秆结构及抗倒性的影响研究较少, 难以支撑区域增温对玉米倒伏发生的分析研究。本专题论文《增温对玉米茎秆生长发育、抗倒性和产量的影

响》^[10]通过人工气候室模拟未来增温环境,研究玉米茎秆生长、结构特征和抗倒特性变化。结果表明,温度升高 2—4℃,茎秆节间长度显著增加,穗位系数和茎粗系数提高,而茎秆直径、维管束数目、截面积下降。茎秆的抗推力、穿刺强度和破碎强度等显著下降,倒伏风险增加,不同品种受增温影响而导致的茎秆抗倒性、力学特性和显微结构特性等存在较大差异。区域适宜品种筛选需关注茎秆抗倒伏能力对增温条件的适应性表现。而专题文章《高温干旱复合胁迫对夏玉米产量和茎秆显微结构的影响》研究认为^[11],高温干旱复合胁迫后夏玉米茎秆皮层厚度、硬皮组织厚度、维管束总数和小维管束数目显著降低。同时,高温干旱导致夏玉米花粉活力、光合特性和成熟期总干重显著降低,最终影响籽粒产量。上述研究表明,高温和干旱胁迫不仅影响黄淮海夏玉米产量,还会劣化茎秆发育,从而影响植株抗倒伏能力。这对于研究和解决黄淮海夏玉米广泛发生的后期倒伏具有重要意义。

全球变暖、温度升高背景下,黄淮海夏玉米适宜生育期延长,为玉米套播改夏直播提供了有利条件^[12-13]。但该区主推品种熟期仍然偏长,收获时难以达到生理成熟,严重影响玉米产量和品质。本专题论文《基于品种生育期有效积温确定夏玉米适宜播期》^[14]则针对当前气候变化背景下,品种和播种期调控以适应有效积温增加对夏玉米生产系统的影响。通过不同熟期类型品种以及播种期梯度处理发现,晚播导致生育期内温度提升,不同品种的结实率、收获指数下降,空秆率上升,继而造成产量下降。这为区域种植模式优化与适宜熟期品种选择提供了参考。

大气 CO₂ 浓度升高(简称 eCO₂)可以通过影响植物的各项生理活动而影响根、茎、叶等器官的生长发育,并影响作物的产量^[15]。作为光合底物,eCO₂ 不仅会影响植物的光合作用过程,而且会影响碳氮代谢及产量形成^[16]。ZONG 等^[17]通过对玉米的研究发现,eCO₂ 会缓解干旱对光合作用的限制,缓解情况随供氮水平的不同而不同。在 eCO₂ 下,一些植物碳同化能力增强,生物量积累加快,对氮素供给提出了更高的要求^[18]。但牛晓光等^[19]研究认为,在相同施氮水平下,eCO₂ 对于玉米产量没有显著影响。本专题论文《大气 CO₂ 浓度升高与氮肥互作对玉米花后碳氮代谢及产量的影响》^[20]利用自由大气 CO₂ 富集(FACE)平台,研究了常规大气 CO₂ 浓度(aCO₂)

和 eCO₂ 条件下,不施氮和施氮处理对夏玉米产量及其构成要素,干物质积累,花后碳、氮代谢以及碳氮比动态的变化。研究结果显示,eCO₂ 与施氮处理下,夏玉米生物量积累增加,但产量及产量构成因素变化不显著。合理增施氮肥对促进 eCO₂ 背景下的碳氮代谢的协调有一定必要性。该研究为全球气候变化下玉米生理过程及产量形成的变化提供理论支撑,同时为玉米作物模型调参提供实证数据。

作物通过光合作用将大气中的 CO₂ 固定到植物体内,又通过根系分泌物、凋落物及根系生物量等将一部分光合碳输入到土壤中^[21-22],为土壤中的微生物提供碳源和能源。陆地生态系统的碳循环通过植物的光合作用和呼吸作用,以及土壤微生物的共同作用影响大气 CO₂ 的浓度,使陆地植被系统成为“碳汇”。然而,土壤是否成为碳“源”或者“汇”取决于土壤碳库的平衡^[23]。陆地生态系统中的碳储量取决于光合碳的输入和以 CO₂ 的形式及甲烷和可溶性有机碳的损失之间的平衡^[24],大气中 CO₂ 浓度的增加和由此引发的全球变暖可能会通过改变碳的吸收和释放速率来影响这一平衡。本专题论文《大气 CO₂ 浓度和温度升高对农田土壤碳库及微生物群落结构的影响》^[25]综述了大气 CO₂ 浓度和温度升高及其交互作用对土壤碳库和土壤微生物群落结构的影响。大气 CO₂ 浓度和温度升高对土壤碳库的影响可以相互抵消,但是土壤碳库是否成为碳“源”与温度升高的幅度密切相关,今后需重点关注气候变化条件下微生物底物利用策略以及微生物群落结构的变化。

农业生产是土壤温室气体排放的重要诱因,对全球温室效应的影响不容忽视^[26-28]。随着农作物产量的增加,温室气体排放也在不断增加^[29]。氮肥不合理施用是造成我国农田温室气体尤其是 N₂O 排放上升的主要因素^[30],施用缓释肥或添加抑制剂来调控氮素形态转化被认为是土壤温室气体减排的有效措施之一^[31-33]。本专题论文《不同类型氮肥对东北春玉米土壤 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放的影响》^[34]利用静态箱-气相色谱法,研究了缓释肥(SLN)、尿素添加硝化抑制剂+脲酶抑制剂(NIUI)和普通尿素(OU)等氮肥施用措施在不同生育时期的温室气体排放特性。缓释肥处理对于土壤 N₂O 的减排效应主要在苗前,而抑制剂则可延续至苗期。2 种处理方法均可降低土壤 CO₂ 排放。该研究为高纬度地区农田氮肥高效利用管理和温室气体减排提供参考依据。

参考文献 References

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 赵明, 李潮海, 崔彦宏, 刘永红, 高聚林, 薛吉全, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, ZHAO M, LI C H, CUI Y H, LIU Y H, GAO J L, XUE J Q, WANG L C, WANG P, LU W P, WANG J H, YANG Q F, WANG Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959. (in Chinese)
- [2] LOBELL D B, BURKE M B, TEBALDI C, MASTRANDREA M D, FALCON W P, NAYLOR R L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 2008, 319(5863): 607-610.
- [3] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, 333: 616-620.
- [4] 和骅芸, 胡琦, 潘学标, 马雪晴, 胡莉婷, 王晓晨, 何奇瑾. 气候变化背景下华北平原夏玉米花期高温热害特征及适宜播期分析. 中国农业气象, 2020, 41(1): 1-15.
HE H Y, HU Q, PAN X B, MA X Q, HU L T, WANG X C, HE Q J. Characteristics of heat damage during flowering period of summer maize and suitable sowing date in North China plain under climate change. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(1): 1-15. (in Chinese)
- [5] CAIRNS J E, CROSSA J, ZAIDI P H. Identification of drought, heat, and combined drought and heat tolerant donors in maize. *Crop Science*, 2013, 53(4): 1335-1346.
- [6] 宋方威, 吴鹏, 邢吉敏, 周小英, 崔彼然, 于秀萍, 王进. 高温胁迫对玉米自交系父本花粉生活力的影响. 玉米科学, 2014, 22(3): 153-158.
SONG F W, WU P, XING J M, ZHOU X Y, CUI X R, YU X P, WANG J. Influences of heat stress on viability of pollen grain inbred lines of male parent. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(3): 153-158. (in Chinese)
- [7] 闫振华, 刘东尧, 贾绪存, 杨琴, 陈艺博, 董朋飞, 王群. 花期高温干旱对玉米雄穗发育、生理特性和产量影响. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3592-3608.
YAN Z H, LIU D Y, JIA X C, YANG Q, CHEN Y B, DONG P F, WANG Q. Maize tassel development, physiological traits and yield under heat and drought stress at flowering stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3592-3608. (in Chinese)
- [8] 郑东泽. 气象因素对寒地玉米生长发育、产量及品质的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
ZHENG D Z. Effects of meteorological factors on growth, yield and quality of maize in cold regions. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [9] CAMPBELL C, ATKINSON L, ZARAGOZA-CASTELLS J, LUNDMARK M, ATKIN O, HURRY V. Acclimation of photosynthesis and respiration is asynchronous in response to changes in temperature regardless of plant functional group. *New Phytologist*, 2007, 176(2): 375-389.
- [10] 刘东尧, 闫振华, 陈艺博, 杨琴, 贾绪存, 李鸿萍, 董朋飞, 王群. 增温对玉米茎秆生长发育、抗倒性和产量的影响. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3609-3622.
LIU D Y, YAN Z H, CHEN Y B, YANG Q, JIA X C, LI H P, DONG P F, WANG Q. Effects of elevated temperature on maize stem growth, lodging resistance characters and yield. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3609-3622. (in Chinese)
- [11] 邵靖宜, 李小凡, 于维祯, 刘鹏, 赵斌, 张吉旺, 任佰朝. 高温干旱复合胁迫对夏玉米产量和茎秆显微结构的影响. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3623-3631.
SHAO J Y, LI X F, YU W Z, LIU P, ZHAO B, ZHANG J W, REN B Z. Combined effects of high temperature and drought on yield and stem microstructure of summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3623-3631. (in Chinese)
- [12] SUN H, ZHANG X, CHEN S, PEI D, LIU C. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain. *Industrial Crops and Products*, 2006, 25(3): 239-247.
- [13] 任佰朝, 高飞, 魏玉君, 董树亭, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 冬小麦-夏玉米周年生产条件下夏玉米的适宜熟期与积温需求特性. 作物学报, 2018, 44(1): 137-143.
REN B Z, GAO F, WEI Y J, DONG S T, ZHAO B, LIU P, ZHANG J W. Suitable maturity period and accumulated temperature of summer maize in wheat-maize double cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(1): 137-143. (in Chinese)
- [14] 陈静, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏, 杨今胜, 张吉旺. 基于品种生育期有效积温确定夏玉米适宜播期. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3632-3646.
CHEN J, REN B Z, ZHAO B, LIU P, YANG J S, ZHANG J W. Determination on suitable sowing date of summer maize hybrids

- based on effective accumulated temperature in growth period. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3632-3646. (in Chinese)
- [15] 中国气象局科技与气候变化司. 2017 年中国温室气体公报. 北京, 2019.
- Department of Science, Technology and Climate Change, China Meteorological Administration. 2017 China Greenhouse Gases Bulletin. Beijing, 2019. (in Chinese)
- [16] ELIZABETH A A, STEPHEN P L. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 351-372.
- [17] ZONG Y Z, SHANGGUAN Z P. Nitrogen deficiency limited the improvement of photosynthesis in maize by elevated CO₂ under drought. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 73-81.
- [18] REICH P B, HUNGATE B A, LUO Y Q. Carbon-nitrogen interactions in terrestrial ecosystems in response to rising atmospheric carbon dioxide. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37: 611-636.
- [19] 牛晓光, 杨荣全, 李明, 段碧华, 刁田田, 马芬, 郭李萍. 大气 CO₂ 浓度升高与氮肥互作对玉米光合特性及产量的影响. *中国生态农业学报*, 2020(2): 255-264.
- NIU X G, YANG R Q, LI M, DUAN B H, DIAO T T, MA F, GUO L P. Effects of interaction between elevated atmospheric CO₂ concentration and nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristic and yield of maize. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2020(2): 255-264. (in Chinese)
- [20] 李明, 李迎春, 牛晓光, 马芬, 魏娜, 郝兴宇, 董李冰, 郭李萍. 大气 CO₂ 浓度升高与氮肥互作对玉米花后碳氮代谢及产量的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(17): 3647-3665.
- LI M, LI Y C, NIU X G, MA F, WEI N, HAO X Y, DONG L B, GUO L P. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and nitrogen fertilizer on the yield of summer maize and carbon and nitrogen metabolism after flowering. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3647-3665. (in Chinese)
- [21] NORBY R J, DELUCIA E H, GIELEN B, CALFAPIETRA C, GIARDINA C P, KING J S, LEDFORD J, MCCARTHY H R, MOORE D J P, CEULEMANS R, DE ANGELIS P, FINZI A C, KARNOSKY D F, KUBISKE M E, LUKAC M, PREGITZER K S, SCARASCIA-MUGNOZZA G E, SCHLESINGER W H, OREN R. Forest response to elevated CO₂ is conserved cross a broad range of productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2005, 102(50): 18052-18056.
- [22] 王艳红, 于镇华, 李彦生, 刘俊杰, 王光华, 刘晓冰, 谢志煌, Stephen J Herbert, 金剑. 植物-土壤-微生物间碳流对大气 CO₂ 浓度升高的响应. *土壤与作物*, 2018, 7(1): 22-30.
- WANG Y H, YU Z H, LI Y S, LIU J J, WANG G H, LIU X B, XIE Z H, HERBERT S J, JIN J. Carbon flow in the plant-soil-microbe continuum in response to atmospheric elevated CO₂. *Soils and Crops*, 2018, 7(1): 22-30. (in Chinese)
- [23] KUZUYAKOV Y, GAVRICHKOVA O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: A review of mechanisms and controls. *Global Change Biology*, 2010, 16(12): 3386-3406.
- [24] OSANAI Y, KNOX O, NACHIMUTHU G, WILSON B. Increasing soil organic carbon with maize in cotton-based cropping systems: Mechanisms and potential. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 229: 106985.
- [25] 房蕊, 于镇华, 李彦生, 谢志煌, 刘俊杰, 王光华, 刘晓冰, 陈渊, 刘居东, 张少庆, 吴俊江, Stephen J Herbert, 金剑. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对农田土壤碳库及微生物群落结构的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(17): 3666-3679.
- FANG R, YU Z H, LI Y S, XIE Z H, LIU J J, WANG G H, LIU X B, CHEN Y, LIU J D, ZHANG S Q, WU J J, HERBERT S J, JIN J. Effects of elevated CO₂ concentration and warming on soil carbon pools and microbial community composition in farming soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3666-3679. (in Chinese)
- [26] WHITE D. Expert Review of The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019 Special Report Global Warming of 1.5 °C. 2019.
- [27] LI L, XU J H, HU J X, HAN J R. Reducing nitrous oxide emissions to mitigate climate change and protect the ozone layer. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(9): 5290-5297.
- [28] THOMPSON R L, LASSALETTA L, PATRA P K, WILSON C, WELLS K C, GRESSENT A, KOFFI E N, CHIPPERFIELD M, WINIWARTER W, DAVIDSON E A, TIAN H, CANADELL J G. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change*, 2019, 9(2): 1-6.
- [29] GUDAPATY P, SRINIVAS I, RAO K V, SHANKER A K, RAJU B M K, CHOUDHARY D, RAO K S, SRINIVASRAO C, MANDAPAKA M. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of

- conventional and conservation agriculture system in rainfed semi arid tropics of India. *Atmospheric Environment*, 2016, 145: 239-250.
- [30] ZHANG J T, TIAN H Q, SHI H, ZHANG J F, WANG X K, PAN S F, YANG J. Increased greenhouse gas emission intensity of major croplands in China: Implications for food security and climate change mitigation. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6116-6133.
- [31] KANTER D R, SEARCHINGER T D. A technology-forcing approach to reduce nitrogen pollution. *Nature Sustainability*, 2018, 1(10): 544-552.
- [32] MCGEOUGH K L, WATSON C J, MÜLLER C, LAUGHLIN R. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94: 222-232.
- [33] 赵迅, 郭李萍, 谢立勇, 孙雪, 赵洪亮, 许婧. 不同农作措施对棕壤玉米田 N_2O 排放及碳足迹的影响. *中国农业气象*, 2016, 37(3): 270-280.
- ZHAO X, GUO L P, XIE L Y, SUN X, ZHAO H L, XU J. Impacts of different farming managements on N_2O emission and carbon footprint for maize from brown soil. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(3): 270-280. (in Chinese)
- [34] 姚凡云, 刘志铭, 曹玉军, 吕艳杰, 魏雯雯, 吴兴宏, 王永军, 谢瑞芝. 不同类型氮肥对东北春玉米土壤 N_2O 和 CO_2 昼夜排放的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(17): 3680-3690.
- YAO F Y, LIU Z M, CAO Y J, LÜ Y J, WEI W W, WU X H, WANG Y J, XIE R Z. Diurnal variation of N_2O and CO_2 emissions in spring maize fields in northeast China under different nitrogen fertilizers. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3680-3690. (in Chinese)
- (责任编辑 杨鑫浩)