

气候变化对中国冬小麦生产的影响

蔡 剑, 姜 东 *

(南京农业大学农业部小麦区域技术创新中心, 南京 210095)

摘 要:气候变化会对中国冬小麦生产带来深远的影响。 CO_2 浓度升高和气候变暖有利于冬小麦种植区向春麦区扩展,主要表现在辽宁、河北、陕西、内蒙古等种植边界的显著北移和青海、甘肃种植边界的显著西扩; CO_2 浓度升高还会促进小麦根、茎、叶的生长,提高叶片光合速率和氮素的吸收与利用,有利于产量提高。但气候变化在中国还表现为太阳辐射的下降,冬小麦主产区黄淮海麦区和长江中下游麦区下降更为显著,试验研究表明,长期弱光小麦产量降幅可达 6.4%~25.8%。温度升高对小麦产量的影响目前尚无明确定论;不同生育期降雨量变化对小麦产量的影响不同,生育前期降水量增加有利于小麦产量的提高,而后期则会导致一定的减产。然而,最值得关注和警惕的是高温与低温以及降水时空分布不均导致的干旱和渍水等极端气象灾害事件,随着全球气候变化发生频率显著增加,严重影响了小麦的生产,尤其是生育中后期的逆境将导致小麦结实粒、千粒重显著下降,造成产量锐减。此外,气候变化导致的病虫害加剧不仅导致减产,还将显著增加生产成本,不利于小麦生产。

关键词:小麦生产;小麦产量;气候变化;极端气象灾害

中图分类号:X16 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1726-08

The Effect of Climate Change on Winter Wheat Production in China

CAI Jian, JIANG Dong*

(Wheat Region Center for Technological Innovation, MOA, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Province, Nanjing 210095, China)

Abstract: With the intensification of global climate change, there were far-reaching effects of climate change on wheat production in China. The planting region of winter wheat was expanded under increase in concentration of carbon dioxide and climate warming in favor of development of wheat production, and it mainly showed the planting boundary shifted northward of Liaoning, Hebei, Shanxi, Inner Mongolia and the boundary west expanding of Qinghai, Gansu. Increasing in concentration of carbon dioxide also could promote growth of root, stem and leaf in wheat, improve photosynthesis and absorption and utilization of nitrogen, which were beneficial to improve yield. Whereas, the effect of decrease in solar radiation on wheat production was significant, especially in Huanghuai wheat region and in middle and low Yangtze valleys wheat region. The research showed that the decrease amplitude of wheat yield could be from 6.4 to 25.8 percentage. There was no certain conclusion for the effect of increase in temperature in wheat production. The effects of precipitation change were different in earlier growth stage and late growth stage, the former improved yield, and the latter decreased the yield. However, the deserved attention and vigilance was the of extreme climate disaster taking place frequently (the consecutive high temperature, low temperature freezing-disaster, drought and waterlogging caused by precipitation maldistribution et al.), which had affected grain yield greatly, especially in the latter growth stage resulted in significant decrease in seed setting rate and thousand kernel weight. Moreover, climate change could resulted in aggravation of disease pest and weed, which not only decreased grain yield, but also increased production cost, and it was not beneficial to wheat production.

Keywords: wheat production; wheat yield; climate change; extreme climate disaster

小麦是中国第三大粮食作物,对于维护国家粮食安全有着重要意义。中国小麦以冬小麦为主,约占中

国小麦总产量的 90%^[1]。1978 年以来,中国小麦种植面积和产量均不稳定,2000—2004 年小麦种植面积由 2 665.3 万 hm^2 降至 2 162.5 万 hm^2 ,之后至 2008 年略有回升;全国总产在 2000 年以前呈上升趋势,而 2000—2004 年,总产呈明显下降的趋势,2004 年总产降至最低 9 195 万 t,2004—2008 年总产又恢复性增

收稿日期:2011-03-19

作者简介:蔡 剑(1981—),男,讲师,主要从事作物生理生态领域的研究。E-mail:caijian@njau.edu.cn

* 通讯作者:姜 东 E-mail:jiangd@njau.edu.cn

长至 11 246 万 t。中国的气候资源较为丰富,为小麦生产的发展提供了有利条件,但由于大多处于中纬度地带、海陆相过渡带和气候过渡带,气候灾害频发,对小麦生产的发展又带来了严峻的挑战。

未来全球气候变化对中国冬小麦生产可能产生重要影响。全球气候变化的主要特征是:以 CO_2 等为主的温室气体浓度升高导致的气温升高、全球气候剧烈变化引发极端气候如极端高(低)温、干旱和水涝等频现。中国气象灾害更是种类多、强度大、频率高,非常不利于中国小麦生产的发展^[2-3]。

全球气候变化不仅会导致冬小麦种植区域改变,还影响冬小麦产量形成,加剧病虫害的发生,进而严重影响中国冬小麦生产。因此,评价气候变化对中国冬小麦的影响,对指导和规划在全球气候变化大背景下中国小麦的生产、确保国家粮食安全具有重要意义。

1 气候变化对冬小麦种植区域的影响

气候变暖提高了总积温,导致中国冬小麦安全种植界发生变化。但与此同时,北方大部分小麦产区降水呈减少趋势,干旱加重,影响其面积扩大和产量的提高^[4-5]。随着抗冻性小麦种质引进和耐冻小麦品种的选育,冬小麦种植北界显著北移。郝志新等^[6]研究辽宁省冬小麦种植北界时就发现,在气候变化情况下,辽宁省冬小麦种植北界定为本溪-抚顺-法库-彰武-阜新-北票-朝阳一线(约 42.5°N),较中国过去所确定的冬小麦种植北界(长城沿线)北移了 1~2 个纬度。杨晓光等^[5]也比较了 2 个时间段冬小麦种植北界的空间地理位移,结果表明辽宁省东部平均向北移动 120 km,西部平均向北移动 80 km;河北省平均向北移动 50 km;山西省平均向北移动 40 km;陕西省东部变化较小,西部平均向北移动 47 km;内蒙古、宁夏一线平均向北移动 200 km;甘肃西扩 20 km;青海西扩 120 km,且河北省冬小麦种植北界的北移,可使界限变化区域的小麦单产平均增加约 25%。因此,全球变暖将有利于中国冬小麦种植界北界北移,扩大冬小麦种植范围。

2 气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响

2.1 CO_2 浓度变化对冬小麦生长发育和产量的影响

CO_2 浓度升高一方面导致气候变暖,引起降水及其他生态环境因子的变化,进而间接影响农作物的生产;另一方面, CO_2 浓度升高还对农作物本身产生直

接的影响。目前, CO_2 浓度升高对小麦生长发育与产量的影响,主要集中在对小麦生长发育特性、生理生化过程等的影响,涉及到小麦产量构成、植株干重及根冠比、生长参数、碳交换速率(叶片光合与呼吸)等的变化。

大气 CO_2 浓度升高不仅促进小麦干物质积累和产量形成,潜在提高小麦产量^[7],还可能通过与其他温室气体的互作间接影响小麦产量。研究发现无论在气室条件下,还是 FACE 条件下,小麦产量随着 CO_2 浓度的升高而升高^[8-10],但两者增幅有所差异,气室条件下 CO_2 浓度每增加一个 ppm,小麦产量增幅为 0.072%~0.14%,而 FACE 条件下仅为 0.068%^[11]。此外,研究也发现 CO_2 浓度过高会导致小麦产量下降^[12]。由此可见,从 CO_2 浓度单一角度来分析,随着未来全球 CO_2 浓度的升高,小麦产量将有所增长,但若 CO_2 浓度升至过高时,小麦产量则会下降。

CO_2 浓度升高对小麦生长发育的影响主要集中在形态与生理特性方面。研究发现, CO_2 浓度升高,能促进小麦根、茎、叶生长,分蘖数、干物质积累和株高有增加的趋势。如室内控制条件(非 FACE)下中麦 3 号株高增加了 8~14 cm^[13]。FACE 条件下,宁麦 9 号成熟期穗长、穗下第 1、2 节间均显著增长,株高平均增加 0.8%~6.2%^[12]。同时, CO_2 浓度升高也使小麦生育期显著缩短^[13]。此外, CO_2 浓度的增加小麦根系形态的影响也十分显著,表现为根系变粗、不定根数量增加、根系生物量显著提高(增幅 16%~63%)、根际微生物活性增强^[14]。

小麦叶片光合速率随着 CO_2 浓度的升高而有所增加。在非 FACE 条件下, CO_2 浓度增加且 N 素充足的前提下,碳同化量增加 8%~22%;而在 FACE 条件下, CO_2 浓度增加,碳同化量增加 27%^[15]。此外,氮素的吸收利用也是直接影响小麦产量的重要因素之一,而 CO_2 浓度升高对小麦氮素吸收有着显著影响。研究表明, CO_2 浓度升高,小麦吸氮量增加,氮素利用率增加 51%~55%,氮素收获指数增加 1%~2%^[14]。

由此可见, CO_2 浓度升高对小麦生长发育的影响主要表现为:促进了小麦根、茎、叶的生长,提高了小麦光合作用和氮素的吸收与利用,缩短了小麦生育期,其影响的正面效应高于负面效应,有利于小麦干物质积累和产量提高。因此,单从全球 CO_2 浓度升高的角度来分析,未来全球 CO_2 浓度在一定范围内升高将有利于小麦生产的发展。但全球 CO_2 浓度升高随之会带来温度、降水等其他气象因子的变化,必须加以

综合分析。

2.2 温度变化对冬小麦生长发育和产量的影响

气候变暖是气候变化的最明显特征之一。小麦属于喜凉作物,当最高气温超过 32℃后,小麦产量显著降低、品质变劣。研究结果表明,黄淮海平原地区秋、冬季适度增温,总体有利于小麦产量提高,但春季增温则相反,升温愈高,减产愈多^[16]。在江淮地区冬小麦产量与冬季气温呈正相关,如果未来春季降水有偏少趋势,对冬小麦产量将不会构成大的威胁^[17]。而史印山等^[18]研究认为冬小麦产量与气温显著相关,当平均气温变化-1.2~1.2℃之间时,小麦气候产量为正值,温度过低或过高都会使小麦减产,而高温使小麦减产更严重。

气候变暖对冬小麦生长发育也有显著影响。暖冬年份小麦冬前生长快,冬季叶龄较常年多,小麦拔节期、抽穗期、成熟期均提前^[4];暖冬冬前有效积温也显著增加,加快了小麦叶的生长和分蘖速度,冬前高峰苗提早形成,成穗率下降。此外,暖冬年份小麦冬、春季分蘖没有明显的停滞阶段,分蘖不断发生,营养生长量加大,总叶龄、高峰苗数量加大。枯黄叶多,绿叶数减少,营养生长偏旺,群体质量下降^[19-20]。但冬前温度偏高,也有利于促进小麦早发壮苗,为足穗打下良好基础^[21],而郭静和黄义德研究也表明,暖冬天气对较小群体小麦的生产能力有促进作用^[20]。

因此,气候变暖对小麦产量的影响十分显著,但国内外研究结论不一,尚无明确定论。这可能与 CO₂ 浓度升高、降水量时空分布变化、小麦自身的群体生长发育密切相关。同时,国内外学者各自研究的小麦品种、生态条件也不同,今后尚需根据中国的气候特点和生态条件作进一步深入的研究,更为准确地评价温度升高对我国小麦生产的影响,并为温度升高可能对小麦生产带来负面效应的应对措施提供一定的理论依据。

2.3 光照变化对冬小麦生长发育和产量的影响

冬小麦是喜光作物,大量研究表明,光照强度与小麦产量形成有重要的相关性^[22]。黄淮海麦区和长江中下游麦区(30~42°N)是我国的粮食主产区,超过 70%的小麦面积和产量分布在这里^[23],然而该区的种植方式和气候变化,使小麦生产中存在弱光现象,对小麦的生产有直接的影响。太阳辐射的逐渐减少是最重要原因之一。许多研究表明,在过去的 50 年里,到达地球表面的太阳辐射能显著下降。在中国的粮食主产区黄淮海麦区和长江中下游麦区,该区的日照时数

在过去的四五十年内下降非常快^[24],平均每年下降 3.74~9.22 h,在小麦生长季(每年 10 月到第二年 5 月)下降 2.98~3.67 h^[25]。该地区的一些研究表明,弱光降低了小麦的干物质积累和籽粒产量^[26-27]。其中,牟会荣等^[27]研究发现,拔节至成熟期弱光显著降低了小麦籽粒产量。遮光 22%时,扬麦 158 和扬麦 11 的产量分别比对照下降 6.4%和 9.9%,遮光 33%时,两品种的产量分别降低 16.2%和 25.8%。国外大部分弱光研究也得出类似结论^[22]。但 Evans^[28]认为当遮光强度不超过 20%时,对小麦产量的影响不显著。而 Wang 等^[29]认为,弱光条件对小麦产量的影响与周围环境密切相关,在干旱时不影响产量,在湿润气候下产量显著下降。

弱光对小麦产量的影响与粒重密切相关,多数研究认为弱光条件降低了小麦粒重^[30-31],进而降低了产量。牟会荣等^[27]研究表明,遮荫使光合作用的能量来源减少,引起净光合速率的下降,导致生物产量和籽粒产量下降。此外,弱光对小麦穗粒数的影响也较为明显。许多研究表明,挑旗孕穗期弱光显著降低了小麦的穗粒数,而其他时期遮光对穗粒数影响不明显^[22]。

因此,多数研究表明弱光显著影响了小麦的生长发育,降低了产量,但产量下降幅度与小麦基因型、弱光程度、弱光历期、弱光时期以及周围环境密切相关,尤其在长期弱光作用下,随着弱光程度增大,小麦产量下降幅度可达 6.4%~25.8%。

2.4 降水变化对冬小麦生长发育和产量的影响

降水是影响冬小麦生长发育和产量的重要气象因素之一。中国降水呈南多北少趋势,并有明显的季节和区域特性,且各区域降水强度的季节分布呈现出较为集中的趋势^[32]。而小麦各个生育期对降水量的需求不同,淮北地区小麦中后期(3—5 月)降水对产量的形成影响较大;小麦苗期(10—2 月)的降水对分蘖的多少影响较大^[33]。而西北地区研究表明,小麦生育期间的各月降水,除 2 月份以外,均与小麦产量呈显著正相关;而休闲期间的 6 月、7 月、8 月 3 个月降水与小麦产量呈显著负相关^[34]。

因此,降水量对小麦生产的影响是一个较为复杂的过程,与其不同生育期具体降水量密切相关,生育前期降水增加有利于小麦产量提高,而后期则会导致一定的减产。此外,上述对 CO₂ 浓度、气温和光照的分析表明,其中任何一个因素或多个因素与降水的多寡联系在一起,共同作用于小麦产量,且产生显著的影响效果。

2.5 极端气候对冬小麦生长发育和产量的影响

CO₂浓度和气温升高、降雨量时空分布不均以及光照变化都不同程度地影响到中国冬小麦的生产,但其影响结果不一,既有阻碍小麦生产的一面,也有促进小麦生产的一面,同时,也与小麦自身的品种特性密切相关。但CO₂浓度和气温升高、降雨量时空分布不均等使得气候变化加剧,导致中国极端气象灾害发生频率和强度增加,如北方麦区和黄淮海麦区连续的干旱和灌浆后期频发的“干热风”、长江中下游冬麦区灌浆期的“高温逼熟”以及长江中下游麦区和黄淮麦区南部地区越来越频发的连续阴雨天及强降雨等,对中国小麦生产发展产生了巨大的负面效应。

2.5.1 高温对冬小麦生长发育和产量的影响

高温胁迫对中国小麦的危害主要表现为干热风 and 高温逼熟,其影响后果主要为灌浆期缩短、粒重降低,产量严重下降^[35]。赵辉^[36]研究发现,花后高温导致粒重下降高达27.5%,蛋白质产量和淀粉产量分别下降14%和31%,进而导致小麦严重减产。Wardlaw^[37]研究也发现,花后温度从18℃/13℃到27℃/22℃,灌浆的最大速率每穗每天从110 mg上升到127 mg,但灌浆持续时间缩短了32%,导致成熟时籽粒变小,粒重降低。

粒重下降导致产量下降的另一个重要因素是高温下叶片光合功能的下降,光合产物输出受阻,供籽粒灌浆充实物质不足,影响籽粒发育。研究表明,高温胁迫导致灌浆期叶片光合速率下降,且高温的危害随生育期的推进而加剧^[38]。高温下,籽粒中糖向淀粉转化受到抑制,直接影响籽粒接收光合产物能力,同时因为库活力的下降,进一步抑制了叶片光合功能的发挥,加重了高温对籽粒胚乳细胞发育和灌浆充实的影响^[39]。

因此,高温胁迫,尤其是花后灌浆期高温,导致小麦灌浆期籽粒生长发育不良,粒重大幅下降,最终造成小麦的严重减产。

2.5.2 干旱对冬小麦生长发育和产量的影响

根据全国自然灾害损失统计,气象灾害损失占全部自然灾害损失的61%,而旱灾损失占气象灾害损失的55%,干旱已成为中国主要自然灾害之一^[40]。自2008年入冬以来,中国北方地区持续少雨,中国遭遇了近50年以来的严重旱情。从农业部通报的旱情来看,此次旱情已经持续有120多天,降雨量较正常年份减少5至8成,全国农作物受旱面积峰值达到0.2亿hm²,占全国耕地面积的16%。其中冬小麦成为受

损最严重的作物。因此,干旱胁迫已经严重影响中国冬小麦的生产,尤其在北方麦区,是限制产量的主要因素,而且小麦全生育期都可能受到干旱胁迫^[41]。金善宝^[42]指出,干旱对作物生产的影响反映在一系列生理和形态变化上,最终对产量产生影响。2008—2009年越冬期间全国性的严重干旱严重制约了小麦产量的提高。

出苗期干旱导致出苗不齐,缺苗断垄,即使勉强出苗,但由于缺水,小麦根系不扎实,没有次生根生成,导致基苗不足,严重影响冬前分蘖和小麦越冬^[43]。小麦在拔节—抽穗期遭受干旱,导致小麦生长发育不良,植株矮小,有效分蘖减少,单位面积穗数和穗粒数减少,千粒重降低,严重影响产量^[44]。

此外,干旱胁迫降低了小麦光合作用,同化产物的积累显著减少,导致茎秆贮藏的碳水化合物降低,贮藏性同化物的再运转受抑,最终降低籽粒产量^[45]。而在土壤水分胁迫对冬小麦光合及产量的影响研究方面,随着土壤水分胁迫的加剧,造成小麦花后旗叶光合速率下降,气孔导度减少,叶绿素总量降低,灌浆速率降低,极大地降低了籽粒产量^[46]。

2.5.3 渍水对冬小麦生长发育和产量的影响

小麦生育中后期(抽穗开花至成熟)降雨过多而造成的渍害逆境是中国黄淮海区南部地区和长江中下游麦区的主要灾害因子,近几年发生频繁且对小麦生产影响越来越大^[47]。据江苏省气象资料统计表明,10年中有7年都是因渍害而导致小麦严重减产。渍害也是湖北省和河南省小麦高产、稳产的主要制约因子,其中河南34年小麦生产中有24年因为渍害而减产。

花后渍水导致小麦籽粒产量显著降低,且主要由千粒重和穗粒数下降所致。研究表明,拔节孕穗期渍害较多的动用了根系和叶片贮藏的养分,导致根系和叶片早衰,造成了库的减少,降低了源的增长,导致籽粒灌浆历期缩短,灌浆速率降低,千粒重随之下降,最终结果是产量大幅度下降^[48]。光合作用在作物生产中起着重要作用,通常籽粒产量的大部分来自花后的光合生产。渍水逆境使小麦生长发育受阻,源库器官发育较差,叶片光合性能变劣,后期植株光合作用停滞造成。李金才等^[49]研究表明,花后30 d到成熟期渍水处理小麦植株的呼吸底物和籽粒生长所需的灌浆物质全部依赖于植株体内贮存光合产物的再分配,渍水也降低了各品种旗叶的光化学效率,小麦旗叶光合组织遭到破坏,导致花后光合速率的下降,降低了最终

籽粒产量。

渍水对小麦生育期土壤氮素的吸收利用有很大影响,并直接影响小麦干物质转运和氮素从营养器官向籽粒的合成和转运,导致产量降低。魏凤珍等^[50]认为,从不同生育时期小麦根际土壤渍水逆境对单株吸氮量的影响程度来看,孕穗期>灌浆期>拔节期>返青期>苗期。灌浆期根际渍水逆境不仅影响根系对氮素的吸收,同时还影响氮素在植株体内的运转与分配,渍水逆境造成小麦根系和叶片全氮含量所占比例下降,茎鞘全氮含量和籽粒全氮含量所占比例增加,表明渍水逆境削弱了根系的吸氮能力和阻碍了茎鞘内氮素及时向功能叶片运输。因此,渍水逆境导致小麦根系有氧呼吸减弱,缺氧呼吸增强,抑制了小麦根系主动吸收和营养元素的运转,功能叶片营养元素的亏缺,不仅造成“库”的减少,也同时影响“源”的正常光合性能及籽粒灌浆结实,千粒重也随之下降。

3 气候变化对小麦病虫害的影响

小麦病虫害的发生除了受其自身的生物学特性影响外,与气候条件、自身品种、耕作栽培制度、施肥与灌溉水平等也密切相关。当前全球气候变化加剧,气候条件对小麦病虫害的发生影响越来越大,且随着气候变化的加剧,其发生规律、频率及强度均产生了显著的变化。

小麦赤霉病是危害小麦生产的主要病害之一,也是一种典型的气候型病害。该病流行程度在地区间、年际间的差异,主要取决于气候条件^[51]。在小麦抽穗扬花期,阴雨、潮湿天气持续的时间愈长,病害发生就愈重^[52]。越冬的菌源是发病的基础,而影响菌源数量的主要气候因子之一就是冬季的温度^[53],气候变暖则易增加来年的发病率。小麦白粉病的发生也是小麦生产中发病面积较大、危害损失严重的常发性病害^[54],严重危害到小麦的生产。气候条件是影响小麦白粉病发生流行程度的决定因素,主要原因是适宜发病的湿度时间加长,雨日雨量加大,以及田间高密度群体和高湿度生境也给病菌提供了良好的增殖条件^[55]。麦蚜是小麦产区的主要害虫,特别是由其传播的小麦黄矮病和黄叶病在流行年份引起的产量损失更为严重。随着气候变暖,蚜虫种群为了适宜气候变化,蚜虫由低海拔川区向高海拔山区迁飞的时间提前,且高峰期蚜量呈增加趋势^[56]。此外,小麦吸浆虫也严重影响小麦生产,受吸浆虫危害的小麦一般减产 10%~20%,严重的减产 40%~80%,甚至绝收。降水量的多少和时空分

布是影响吸浆虫发生程度的关键因素^[57]。

综上所述,本文认为 CO₂ 浓度升高、气候变暖、光照变化对小麦生产的影响因地、因时而异,有正面效应,亦有负面效应,且与小麦品种自身特性密切相关,产量或增或减;评估其是否阻碍或促进小麦生产,需要进一步综合分析与研究,才能加以明确。但气候变化加剧引发的极端气象灾害严重危害了小麦的生产,尤其是花后高温、干旱、渍水等导致小麦结实粒、千粒重严重下降,造成严重减产,且在特定年份和地区其影响可能导致严重减产,甚至绝收,已经成为当前影响冬小麦稳产、高产的主要制约因子,应引起高度重视,加强其应对技术的研究。同时,随着 CO₂ 浓度升高、气候变暖、降水时空分布不均增多,小麦病虫害发生频率和强度有增加的趋势,并可能成为将来中国冬小麦生产发展的重要限制因子。

参考文献:

- [1] 张 宇,王石立,王馥棠,等. 气候变化对我国小麦发育及可能影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 1997, 55(1): 86-94.
ZHANG Yu, WANG Shi-li, WANG Fu-tang, et al. Research on the possible effects of climate change on growth and yield of wheat in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 55(1): 86-94.
- [2] 王春乙. 重大农业气象灾害研究进展[M]. 北京:气象出版社, 2007.
WANG Chun-yi. Researching progress on serious agricultural meteorological disasters[M]. Beijing: Meteorologic Publishing House, 2007.
- [3] 陈立春,郭 磊,宋 波,等. 气候变化对小麦生产的影响与对策[J]. 安徽农业科学, 2009(32): 15779-15782.
CHEN Li-chun, GUO Lei, SONG Bo, et al. Effects of climate change on wheat production and countermeasures[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009(32): 15779-15782.
- [4] 李 艳,王式功,马玉霞. 全球气候变暖对我国小麦的影响研究综述[J]. 环境研究与监测, 2006, 19(2): 11-13.
LI Yan, WANG Shi-gong, MA Yu-xia. Review on research of global climate warming's effect on wheat [J]. *Environmental Study and Monitoring*, 2006, 19(2): 11-13.
- [5] 杨晓光,刘志娟,陈 阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336.
YANG Xiao-guang, LIU Zhi-juan, CHEN Fu. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329-336.
- [6] 郝志新,郑景云,陶向新. 气候变暖背景下的冬小麦种植北界研究——以辽宁省为例[J]. 地理科学进展, 2001, 20(3): 254-261.
HAO Zhi-xin, ZHENG Jing-yun, TAO Xiang-xin. A study on northern boundary of winter wheat during climate warming: A case study in Liaoning Province[J]. *Progress In Geography*, 2001, 20(3): 254-261.
- [7] Acocck B, Acocck M C. Modelling approaches for predicting crop ecosys-

- tem responses to climate change[J]. *Crop Science Society of America*, 1993:306.
- [8] Cure J D, Acock B. Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38: 127–145.
- [9] Deepak S S, Agrawal M. Growth and yield responses of wheat plant to elevated levels of CO₂ and SO₂, singly and in combination[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 104:411–419.
- [10] Pinter P J, Kimball B A, Wall G W, et al. Free-air CO₂ enrichment (FACE): Blower effects on wheat canopy microclimate and plant development [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103 (4): 319–333.
- [11] Jeffrey S A. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: Review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration[J]. *Field Crops Research*, 2001, 73: 1–34.
- [12] 李世峰. FACE 对小麦产量形成和品质的影响及其原因分析[D]. 扬州大学硕士论文, 2005.
- LI Shi-feng. The effect of free-air CO₂ enrichment on yield constitution and quality of wheat and reason analysis[D]. Yangzhou University Master Degree Thesis, 2005.
- [13] 白月明, 王春乙, 温民. 不同 CO₂ 浓度处理对冬小麦的影响[J]. 气象, 1996, 22(2): 7–11.
- BAI Yue-ming, WANG Chun-yi, WEN Min. Impacts of different CO₂ concentration treatment on winter wheat[J]. *Meteorological Monthly*, 1996, 22(2): 7–11.
- [14] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦 P、K 吸收和 C:N、C:P 比的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24 (6): 1192–1198.
- MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effects of free air carbon dioxide enrichment on uptake of P, K and mass ratios of C:N, C:P in winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24 (6): 1192–1198.
- [15] Brooks T J, Wall G W, Pinter P J, et al. Acclimation response of spring wheat in a free-air CO₂ enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes. 3. Canopy architecture and gas exchange [J]. *Photosynthesis Research*, 2000, 66: 97–108.
- [16] 周林, 王汉杰, 朱红伟. 气候变暖对黄淮海平原冬小麦生长及产量影响的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报, 2003, 4(2): 76–82.
- ZHOU Lin, WANG Han-jie, ZHU Hong-wei. Simulation study on the impact of climate warming on production of winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2003(4): 76–82.
- [17] 张爱民, 王效瑞, 马晓群. 淮河流域气候变化及其对农业的影响[J]. 安徽农业科学, 2002, 30(6): 843–846.
- ZHANG Ai-min, WANG Xiao-rui, MA Xiao-qun. Study on the climate change and its influence on agriculture in drainage area of northern Anhui[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2002, 30(6): 843–846.
- [18] 史印山, 王玉珍, 池俊成, 等. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1444–1447.
- SHI Yin-shan, WANG Yu-zhen, CHI Jun-cheng, et al. Impact of climate change on winter wheat production in the Hebei Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1444–1447.
- [19] 朱展望, 黄荣华, 佟汉文, 等. 气候变暖对湖北省小麦生产的影响及应对措施[J]. 湖北农业科学, 2008(10): 1216–1218.
- ZHU Zhan-wang, HUANG Rong-hua, TONG Han-wen, et al. Impacts and countermeasures of climate warming on wheat production in Hubei [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2008(10): 1216–1218.
- [20] 郭静, 黄义德. 暖冬天气对淮北区小麦中后期部分群体质量指标及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 34(24): 11475–11477.
- GUO Jing, HUANG Yi-de. Effects of warm-winter on some indexes of center later period wheat in Huaibei Area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 34(24): 11475–11477.
- [21] 申玉香, 陶红, 王海洋, 等. 气候变暖对沿海地区小麦生长的影响 [J]. 江苏农业科学, 1999(6): 18–21.
- SHEN Yu-xiang, TAO Hong, WANG Hai-yang, et al. The effects of climate warm on wheat growth in coastal area [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 1999(6): 18–21.
- [22] Demotes-Mainard S, Jeuffroy M H. Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2004, 87(2–3): 221–233.
- [23] 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- China Agriculture Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Publishing House, 2007.
- [24] 杨羨敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960—2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 243–248.
- YANG Xian-min, ZENG Yan, QIU Xin-fa, et al. The climatic change of global solar radiation the yellow river basin during 1960–2000[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 16(2): 243–248.
- [25] 金之庆, 石春, 葛道阔, 等. 长江下游平原小麦生长季气候变化特点及小麦发展方向[J]. 江苏农业学报, 2001, 17(4): 193–199.
- JIN Zhi-qing, SHI Chun, GE Dao-kuo, et al. Characteristics of climate change during wheat growing season and the orientation to develop wheat in the Lower Valley of the Yangtze River [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2001, 17(4): 193–199.
- [26] 贺明荣, 王振林, 高淑萍. 不同小麦品种千粒重对灌浆期弱光的适应性分析[J]. 作物学报, 2001, 27(5): 640–644.
- HE Ming-rong, WANG Zhen-lin, GAO Shu-ping. Analysis on adaptability of wheat cultivars to low light intensity during grain filling[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(5): 640–644.
- [27] 牟会荣. 拔节至成熟期遮光对小麦产量和品质形成的影响及其生理机制[D]. 南京农业大学博士论文, 2009.
- MU Hui-rong. Effects of shading between jointing and maturity on yield, quality formation and their mechanism in winter wheat[D]. Nanjing Agricultural University Doctor Degree Thesis, 2009.
- [28] Evans L T. Crop evolution, adaption and yield[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [29] Wang G G, Qian H, Klinka K. Growth of *Thuja plicata* seedlings along a light gradient[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1994, 72: 1749–1757.
- [30] Spiertz J H J. The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1997, 25: 182–197.

- [31] Wang Z, Yin Y, He M, et al. Allocation of photosynthates and grain growth of two wheat cultivars with different potential grain growth in response to pre- and post-anthesis shading[J]. *Crop Science*, 2003, 189(5):280-285.
- [32] 林云萍, 赵春生. 中国地区不同强度降水的变化趋势 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009(2):18-25.
LIN Yun-ping, ZHAO Chun-sheng. Trends of precipitation of different intensity in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009(2):18-25.
- [33] 樊有义, 高玉振, 陈 刚, 等. 小麦生育期内的降水对产量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2001, 29(6):742-743.
FAN You-yi, GAO Yu-zhen, CHEN Gang, et al. Effect of the rainfall in the wheat growth period on its yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2001, 29(6):742-743.
- [34] 张正斌, 山 仑, 王德轩. 降水因子与小麦产量最优回归模型的探讨[J]. 水土保持通报, 1996, 16(4):31-35.
ZHANG Zheng-bin, SHAN Lun, WANG De-xuan, et al. Optimum regression model between rainfall and wheat yield[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(4):31-35.
- [35] 杨国华, 董建力. 灌浆期高温胁迫对小麦叶绿素和粒重的影响[J]. 甘肃农业科技, 2009(8):3-4.
YANG Guo-hua, DONG Jian-li. Impact of high temperature stress on chlorophyll and grainweight of wheat in filling stage[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2009(8):3-4.
- [36] 赵 辉, 荆 奇, 戴廷波, 等. 花后高温和水分逆境对小麦籽粒蛋白质形成及其关键酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(12):2021-2027.
ZHAO Hui, JING Qi, DAI Ting-bo, et al. Effects of post-synthesis high temperature and water stress on activities of key regulatory enzymes involved in protein formation in two wheat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(12):2021-2027.
- [37] Wardlaw I. Interaction between drought and chronic high temperature during kernel filling in wheat in a controlled environment[J]. *Annals of Botany*, 2002, 90:469-476.
- [38] 王晨阳, 郭天财, 阎耀礼, 等. 花后短期高温胁迫对小麦叶片光合性能的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(1):111-114.
WANG Chen-yang, GUO Tian-cai, YAN Yao-li, et al. Effects of short post-anthesis high temperature stress on leaf photosynthetic potential in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(1):111-114.
- [39] Jenner C F. Effects of exposure of wheat ears to high temperature on dry matter accumulation and carbohydrate metabolism in the grain of two cultivars[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1991, 18:165-177.
- [40] 王 浩. 综合应对中国干旱的几点思考 [J]. 中国水利, 2010(8):4-6.
WANG Hao. Some thoughts of dealing to droughty comprehensively in china[J]. *China Water Resources*, 2010(8):4-6.
- [41] 兰巨生. 农作物综合抗旱性评价方法的研究[J]. 西北农业学报, 1998, 7(3):85-87.
LAN Jusheng. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1998, 7(3):85-87.
- [42] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京:中国农业出版社, 1996.
JIN Shan-bao. China wheat study[M]. Beijing:China Agriculture Publishing House, 1996.
- [43] 吴兆苏. 作物栽培学[M]. 农业出版社, 1990:65-111.
WU Zhao-su. Crop Cultivation[M]. Agriculture Publishing House, 1990:65-111.
- [44] 关正君, 霍艳林. 干旱对小麦生长发育的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2006, 12(2):48-49.
GUAN Zheng-jun, HUO Yan-lin. Effect of drought on wheat growth development[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2006(12):48-49.
- [45] 谭新星, 许大全. 叶绿素缺乏的大麦突变体的光合作用和叶绿素荧光[J]. 植物生理学报, 1996, 22(1):51-57.
TAN Xin-xing, XU Da-quan. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence of deficiency of chlorophyll in barley mutant[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1996, 22(1):51-57.
- [46] 许振柱, 于振文 张永丽. 土壤水分对小麦籽粒淀粉合成和积累特性的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(4):595-600.
XU Zhen-zhu, YU Zhen-wen, ZHANG Yong-li. The effects of soil moisture on grain starch synthesis and accumulation of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(4):595-600.
- [47] 李金才, 常 江, 魏凤珍. 小麦湿害及其与小麦生产的关系[J]. 植物生理学通讯, 1997, 3:304-312.
LI Jin-cai, CHANG Jiang, WEI Feng-zhen. Wet injury and the relation with wheat producing[J]. *Plant Physiology Communication*, 1997, 3:304-312.
- [48] 姜 东, 谢祝捷, 曹卫星, 等. 花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(2):175-182.
JIANG Dong, XIE Zhu-jie, CAO Wei-xing, et al. Effects of post-anthesis drought and waterlogging on photosynthetic characteristics, assimilates transportation in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(2):175-182.
- [49] 李金才, 王 晋, 魏凤珍, 等. 孕穗期渍水逆境对冬小麦干物质积累与分配的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27:325-327.
LI Jin-cai, WANG Jin, WEI Feng-zhen. Effects of waterlogging at booting stage on accumulation and distribution of dry matter in winter wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2000, 27:325-327.
- [50] 魏凤珍, 王成雨, 李金才. 沿淮地区生态条件分析与稻茬麦应变抗逆栽培技术规程[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(11):3196-3197.
WEI Feng-zhen, WANG Cheng-yu, LI Jin-cai. Effects of waterlogging on the content and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium nutrition at booting and filling stage of winter wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2007, 35(11):3196-3197.
- [51] 赵圣菊, 姚彩文, 霍治国. 我国小麦赤霉病地域分布的气候分区[J]. 中国农业科学, 1991, 24(01):60-61.
ZHAO Sheng-ju, YAO Cai-wen, HUO Zhi-guo. Climatological zonation of Chinese wheat scab distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1991, 24(01):60-61.
- [52] 李进永, 张大友, 许建权, 等. 小麦赤霉病的发生规律及防治策略 [J]. 上海农业科技, 2008, 4:113.

- LI Jin-yong, ZHANG Da-you, XU Jian-quan, et al. Occurrence regularity and control strategy of wheat scab [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2008, 4: 113.
- [53] 商鸿生. 麦类作物病虫害诊断与防治原色图谱[M]. 金盾出版社, 2003: 43-45.
- SHANG Hong-sheng. Diagnosis and control atlas of diseases and insect pests in wheat crop[M]. Jindun Publishing House, 2003: 43-45.
- [54] 霍治国, 刘万才, 邵振润, 等. 试论开展中国农作物病虫害危害流行的长期气象预测研究[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 117-121.
- HUO Zhi-guo, LIU Wan-cai, SHAO Zhen-run, et al. On developing long-term meteorological prediction research of crops pests and diseases prevailing in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(1): 117-121.
- [55] 邱光, 刘强, 储西平, 等. 特殊气候条件对小麦白粉病流行的影响[J]. 江苏农业科学, 1999, 2: 36-38.
- QIU Guang, LIU Qiang, CHU Xi-ping. Effect of special climate on population wheat powdery mildew [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 1999, 2: 36-38.
- [56] 刘明春, 蒋菊芳, 魏育国, 等. 气候变暖对甘肃省武威市主要病虫害发生趋势的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9522-9525.
- LIU Ming-chun, JIANG Ju-fang, WEI Yu-guo, et al. Influences of climate warming on main diseases and insect pests occurrence trend in Wuwei City, Gansu Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(20): 9522-9525.
- [57] 苏向阳, 刘根强, 张宏伟, 等. 气象因子对叶县小麦吸浆虫发生的影响及防治对策[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(12): 192-193.
- SU Xiang-yang, LIU Gen-qiang, ZHANG Hong-wei, et al. Effect of meteorological factors and control strategy on occurrence of midge in wheat in Ye County [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(12): 192-193.

欢迎订阅 2012年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版由农业部主管、中国农业科学院主办。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种;耕作栽培·生理生化;植物保护;土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境;园艺;园林;贮藏·保鲜·加工;畜牧·兽医等栏目。读者对象是国内外农业科研(所)、农业大专院校的科研、教学人员。

《中国农业科学》中文版影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊前列或前列位次。1999年起连续10年获"国家自然科学基金重点学术期刊专项基金"资助;2001年入选中国期刊方阵双高期刊;1999年获"首届国家期刊奖",2003、2005年获"第二、三届国家期刊奖提名奖";2004-2006年连续荣获第四、五届全国农业优秀期刊特等奖;2002年起7次被中信所授予"百种中国杰出学术期刊"称号;2008年获中国科技信息研究所"精品科技期刊"称号,及武汉大学中国科学评价中心"权威期刊"称号;2010年荣获"第二届中国出版政府奖期刊提名奖"。在北京大学《中文核心期刊要目总览(2008年版)》中位居"农业综合类核心期刊表"首位。2010年1月起中文版改为半月刊,将有更多最新农业科研成果通过《中国农业科学》及时报道。

《中国农业科学》英文版(Agricultural Sciences in China)2002年创刊,2006年1月起正式与国际著名出版集团 Elsevier 合作,海外发行由 Elsevier 全面代理,全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2010年1月起英文版页码增至160页。2010年 Agricultural Sciences in China 被 SCIE 收录,拟于2012年1月更名为 Journal of Integrative Agriculture。

《中国农业科学》中文版大16开,每月1、16日出版,国内外公开发行。每期224页,定价49.50元,全年定价1188.00元,国内统一刊号:CN11-1328/S,国际标准刊号:ISSN0578-1752,邮发代号:2-138,国外代号:BM43。

《中国农业科学》英文版大16开,每月20日出版,国内外公开发行。每期160页,国内订价36.00元,全年432.00元,国内统一刊号:CN11-4720/S,国际标准刊号:ISSN1671-2927,邮发代号:2-851,国外代号:1591M。

邮编:100081

地址:北京 中关村南大街12号《中国农业科学》编辑部

电话:010-82109808,82106280,82106281,82106282

传真:010-82106247

网址:www.ChinaAgriSci.com

邮箱:zgnykx@mail.caas.net.cn