

春季干旱对旱地冬小麦生产的影响及 施肥和灌溉的应对效果 ——以 2003 年和 2009 年山西垣曲县冬小麦生产的调查和试验观察为例

褚清河^{1,2}, 闫 明¹, 薛献来³, 潘根兴^{1*}

(1.南京农业大学农业与气候变化研究中心, 南京 210095; 2.山西省农业科学院农业资源综合考察研究所, 太原 030031; 3.山西省垣曲县科学技术协会, 山西 垣曲 043700)

摘 要:旱灾多发是气候变化中农业生产面临的日益严重的挑战。而干旱半干旱区农业对旱灾表现出明显的脆弱性。本文收集了 2009 年和 2003 年山西省垣曲县农业生产调查资料和山西省农业科学院在该县的肥料试验示范地小麦生产试验资料, 统计分析了 2009 年干旱下小麦产量与正常气候年(2003 年)对比的变化, 表明气候变化下小麦生长期干旱导致大田小麦减产超过 30%, 并田块间产量变率由正常气候年的 10%左右提高到 22%~42%。在雨养旱地, 施肥技术试验示范地减产幅度在 6%以下; 干旱年水浇地的增产效果达到 48%~64%, 而施肥技术的增产效果达到 30%~44%。而水浇地优化施肥示范地产量甚至比正常气候年产量提高 36%~77%。肥水协调技术大幅度减缓了干旱下产量损失, 同时大大降低了田块间产量变率, 达到有效抵御干旱对小麦产量的影响。因此, 发展优化施肥及肥水协调技术在应对气候变化的影响中具有显著的减缓潜力, 而水资源的有效供应可能成为北方气候变化下干旱对旱地作物生产的主要挑战。

关键词:气候变化; 冬小麦; 干旱; 肥水管理; 应对技术; 生产力稳定性

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1772-05

Impact of Spring Drought on Winter Wheat Yield and the Mitigation by Fertilization and Irrigation: An Example of Survey and Field Experiments in 2003 and 2009 in Yuanqu County, Shanxi Province, China

CHU Qing-he^{1,2}, YAN Ming¹, XUE Xian-lai³, PAN Gen-xing^{1*}

(1.Center of Agriculture and Climate Change, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Institute of Agricultural Resources Comprehensive Survey, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China; 3.Association of Science and Technology, Yuanqu County, Yuanqu 043700, China)

Abstract: The increasing drought hazard is one of the increasingly severe challenges of China's crop production under impact of climate change. Agriculture in arid and semi-arid regions has been considered very susceptible to climate change, especially to the increasing drought impacts. In this paper, data was collected of winter wheat yield both from farm survey and field experiments in a normal climate year of 2003 and a drought year of 2009, respectively. As in the studied region, drought frequency has been increased and winter wheat yield had been much impacted by spring drought during wheat active growing. Wheat yield was seen decreased by over 30% and the plot yield variability increased from 10% to 22%~42% in the drought year of 2009 compared to of 2003. Nevertheless, in unirrigated rainfed fields, yield reduction was seen at 6% under well fertilization treatments, while irrigation only and better fertilization only brought an yield increase by 48%~64% and 30%~44% respectively compared to unirrigated respectively in the drought year. However, better fertilization in irrigated fields resulted in high yield, even higher by 36%~77% than the mean yield in the normal year. In addition, field variability of wheat yields was also reduced under irrigation and better fertilization. Therefore, drought impacts had been effectively mitigated using better designed fertilization

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: 褚清河(1957—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业资源综合调查和肥料技术发展研究。

* 通讯作者: 潘根兴 E-mail: gxpan@njau.edu.cn

and proper irrigation performed for the production of dry land wheat. It is suggested that available nutrient amendment and irrigation will have much potential for mitigating drought impacts on rainfed agriculture.

Keywords: climate change; winter wheat; drought; nutrient and moisture management; mitigation measures; yield sustainability

气候变化对农业的影响及我国粮食安全问题是当前农业与气候变化研究的重大挑战^[1]。最近,国际农业研究磋商组织(CGIAR)气候变化、农业和粮食安全计划发布了《绘制全球热带地区气候变化和粮食不安全热点地图》报告,提出了气候变化中降雨量变化和升温下全球热带地区粮食安全的严重脆弱性,警告未来气候变化中气象灾害频发可能造成超过预期的粮食减产和农村贫困^[2]。我国是气候变化的受害国,而我国农业特别是小麦等旱地作物生产是受到气候变化不利影响的脆弱产业^[3]。据统计,最近几十年我国每年由于气象灾害造成的农业直接经济损失达 1 000 多亿元,约占国民生产总值的 3%~6%,其中影响最大的是旱灾^[4]。美国世界观察研究所发表的《气候变化对农业的影响》报告认为,气候变化对未来我国农业的总体影响不大,气候变化对我国粮食生产的总体影响为-8%~2%^[5],而我国学者的模拟研究提出,至 2050 年我国雨养旱作物将减产达 12%~22%间^[6]。气候变化在我国区域格局不同,气候变化对不同区域和不同类型的农作物生产的影响可能不同^[6]。

我国华北地区是旱粮作物的主产地,近 10 a 来气候变化十分强烈,表现为总降水的偏少,特别是春季降水亏缺易发生春旱。土壤水分是小麦关键生育期作物发育的重要条件,因而关键生育期内降雨成为影响雨养旱地小麦生产的关键因素。在山西南部冬小麦生产中,当地农谚“麦收八十三茬雨”,指的是 8 月份降雨以满足小麦秋时播种,10 月份降雨满足小麦分蘖,而 3 月份降雨满足返青和拔节(俗称“起身”)。因此,春季降雨影响的土壤墒情,特别是 3 月和 4 月冬小麦返青期和拔节期的土壤水分供应,可能严重影响旱地冬小麦产量。本文通过对山西垣曲县两个不同气候情景年份的冬小麦产量的大田观察统计,分析春季干旱对冬小麦生产的影响幅度,以及施肥和灌溉对减缓干旱影响的效果,为旱作区冬小麦生产应对气候变化影响的技术发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和农业生产概况

试验观察在山西垣曲县进行。该县位于山西省南

部,中条山麓,黄河岸畔,西接晋南平原,2006 年人口 23 万,国土面积 1 620 km²,耕地 1.8 万 hm²,主要为山地丘陵旱地,占 80%以上,可灌溉面积约占耕地 20%,是一个典型的雨养旱作农业县。农作物以冬小麦、春玉米、谷子及各种豆类为主,正常气候下当地小麦的产量可达 5 t·hm⁻²。

垣曲属温带大陆性气候,四季分明。春季干旱多雨,夏季雨量集中,冬季少雪干燥。太阳能辐射 130 kcal·cm⁻²,年均日照时数 2 150 h,年日照百分率 49%。历年平均气温 13.2 ℃,年积温 4 899 ℃,>0 ℃的积温为 4 757.6 ℃,持续期 260 d,年无霜期 228 d,多年平均降水量 640.2 mm,主要集中在 7—9 月。年蒸发量 2 045.2 mm,其中 1 月份 81.5 mm,6 月份 340.6 mm。

1.2 试验观察年份及气象条件

2009 年是气候变化表现十分突出的一年,春季降雨稀少,为典型旱灾年,春季作物受旱严重。为了对比,选择风调雨顺的 2003 年小麦生产作对照。当地旱地小麦的主栽品种没有大的改变,包括运丰 21,运丰 30,临早 536,晋麦 47 等,水浇地小麦主栽品种为烟农 19 和烟农 21,该两年小麦品种的栽培面积和分布基本相似。据当地气象站的观测记载资料,2003 年和 2009 年两年的小麦生长期降水量情况见表 1。

表 1 垣曲县 2003 年和 2009 年小麦生长期降水量分配(mm)

Table 1 Rainfall(mm) during winter wheat growth in 2003 and 2009 of Yuanqu County, Shanxi, China

月份	1	2	3	4	5	总计
2009 年	0	29.7	19.8	16.8	91.5	66.4
2003 年	6.6	24.9	33.1	48.7	46.9	113.3

注:据垣曲县气象站资料。

1.3 大田调查

本文采用了大田调查小麦产量和小麦肥料试验示范地的小麦产量资料进行分析。其中,大田小麦生产调查数据来自当地农业调查统计部门 2003 年和 2009 年的调查结果。根据农业生产调查统计的工作规范,考虑到地貌和农业生产条件,在全县不同乡镇选择 12 个调查样区,样区的面积在 2003 年和 2009 年分别介于 3.3~20 hm² 和 2.8~17 hm² 间,随机采样测

产。两个年度调查的样本量和调查样本的分布相似。

1.4 肥水管理应对技术试验

小麦肥水管理技术试验示范为山西省农业科学院在该县的肥料技术大田示范试验。配方施肥为当地农业部门推荐的三元素复混肥,作为施肥技术的对照。而进行试验示范的调控施肥技术为养分配比定量调控肥料(SCR 肥),是根据田块土壤采样的养分含量提出养分施肥定量配比,肥料为 N、P 二元素定量配比肥^[7]。两种施肥的实物用量均为 750 kg·hm⁻²(折合氮磷纯量 225 kg·hm⁻²)。试验在该县的不同乡镇选择代表性农户的田块进行,2003 年示范为 6 个乡镇的各 5 个农户的田块,2009 年示范为 19 个乡镇的共 19 个农户的田块。为了抵御干旱,2009 年设计实施了水浇地与雨养地的对比试验,其中水浇地在其中的 15 个乡镇选择 15 个代表性农户具有机井灌溉条件的田块,一般在土壤明显干旱时抽水补墒。试验示范田块的面积在 0.1~0.6 hm²。试验示范田块均实行单收测产。

1.5 统计及差异显著性检验

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理,统计分析用 SPSS 11.0 统计软件进行,组间差异显著性检验采用 LSD 法。差异显著性概率定为 $P<0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 干旱对小麦产量的影响

据表 1,2003 年春季(1—4 月)降水共 113.3 mm,而 2009 年同期降水仅 66.4 mm,减少了 41.5%。2009 年 3—4 月的降雨量共 36.6 mm,比 2003 年减少了 55%。因此,返青和拔节期土壤水分缺乏可能导致生长发育不良而减产。表 2 显示,2003 年和 2009 年全县大田小麦平均产量分别为 2.97 t·hm⁻² 和 2.24 t·hm⁻² (表 2),亦即 2009 年的春季旱灾使该县冬小麦平均减产达 3 成以上。表 2 表明,配方施肥试验示范地 2003 年小麦平均产量为 2.85 t·hm⁻²,但 2009 年(19

块地)平均产量为 2.47 t·hm⁻²,两年相比干旱下配方施肥试验地减产 15%。然而,采用养分配比调控施肥技术(SCR 施肥)试验示范地小麦产量,在 2009 年比正常气候的 2003 年减产 6%。因此,无论是在常规管理下还是技术管理下,干旱使雨养旱地小麦产量遭受严重损失。不过,其减产损失程度在常规大田高达 30%,而技术管理下大为降低。因而气候变化下干旱对旱地作物的产量损失是十分巨大的,良好技术的增产潜力受到干旱胁迫的显著抑制。

同时,我们对两年的小麦产量的试验地田块间变率进行了统计和比较(图 1)。2003 年正常气候下,无论是大田调查样本还是试验示范地,小麦产量的田块间变率均在 15% 以下,田块的生产能力显得较为一致;而干旱的 2009 年,大田统计的小麦产量的变率提高到 41.5%,肥料技术的试验示范地也提高到 22%~25%,大田和试验地的产量的田块间变率分别是正常气候年份的 3 倍和 2 倍。这说明,缺乏先进农业管理技术下,当地冬小麦产量的田块生产力出现了高度的不确定性。尽管试验地实行了较好的施肥管理而提高了产量,但干旱影响下产量变率仍然有所增大。所以,冬小麦生产力的田块间差异在气候变

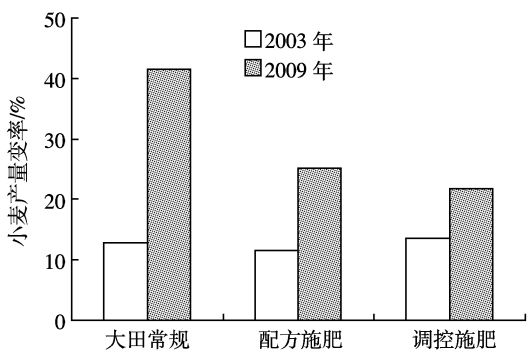


图 1 正常气候年(2003 年)和干旱年(2009 年)小麦产量田块间变率比较

Figure 1 Yield variability of winter wheat under normal climate and drought of 2003 and 2009 respectively

表 2 2003 年和 2009 年雨养旱地小麦产量及干旱减产率分布

Table 2 Wheat yield of rain-fed fields in 2003 and 2009 and the yield decline under drought

数据来源		2003 年/t·hm ⁻²	2009 年/t·hm ⁻²	平均减产率/%
大田调查		2.97±0.38a(n=12)	2.24±0.93b(n=12)	32.6
试验示范	配方施肥	2.85±0.33a(n=25)	2.47±0.62b(n=19)	15.4
	调控施肥	3.76±0.51a(n=25)	3.55±0.77b(n=19)	5.9

注:同行不同小写字母表示两年间产量的显著差异($P<0.05$)。
Note: Different low case characters in a same row represent significant difference in grain yield between the two years and drought of 2003 and 2009 respectively.

化下放大了,使得区域冬小麦生产力出现了更高的不稳定性,从而进一步提高了区域农田生产力的不确定性风险。

2.2 生产管理技术对干旱影响的应对效果

垣曲县是以丘陵为主的雨养农业县,为了提高旱作物生产能力,近年来通过农田基本建设大力发展水浇地。2009年进行了水浇地的肥料技术试验示范。将2009年不同管理技术的产量与2003年正常气候年产量进行统计分析,结果示于图2。2003年,调控施肥技术比配方施肥技术增产32%,比调查统计的平均产量高出26%。2009年遭受春旱下,雨养旱地大田和配方施肥试验田均出现不同程度减产,而调控施肥田块产量虽然低于其2003年水平,仍高于2003年大田平均产量20%。2009年配方施肥和调控施肥的水浇地产量分别比2003年大田统计平均产量提高36%和76%,比2003年正常气候下雨养旱地试验示范田块的产量均提高了40%。而2009年同比,配方施肥和调控施肥两种施肥技术的水浇地示范田产量分别比雨养旱地示范产量提高了64%和48%。两种施肥技术的产量效应在雨养旱地和水浇地分别为43.7%和29.6%,而两种施肥技术下干旱年水浇地相对于正常气候年产量的增产效应均达40%的幅度。因此,尽管施肥技术可以明显提高作物产量,发展水浇地可以在干旱年份达到大幅度减缓干旱的产量损失的效果,而肥水协同(水浇地采用优化施肥技术)可以达到大幅度提高产量的效果,通过大幅度增产而达到有效抵御干旱灾害的效果。因此,在供试旱地农业区,适当发展水浇地,配合良好施肥的共同作用基本抵御了干旱的减产威胁,达到超出正常年的产量。因此,作物生产的农田管理技术的良好协同可以有效地抵御干旱对旱

地作物产量的影响。

3 讨论

旱地作物在我国农业生产和粮食安全保障中占主要地位,主要分布于我国东北、华北和西北地区等干旱、半干旱地区。相对于稻作农业,旱作物生产对气候变化十分敏感^[8]。刘颖杰和林而达研究表明,当前以全球变暖为主要特征的气候变化对我国华北粮食作物生产具有明显的负面影响^[9]。孙芳等的模型研究认为,黄土高原地区是我国雨养小麦生产对气候变化的敏感和脆弱区^[9]。垣曲县基本处于黄土高原雨养农业区,本试验资料分析表明,小麦生产对气候变化下的降水变率增大、春季降水资源亏缺的影响非常敏感。2009年春季比2003年正常年份小麦生长期降水减少60%,常规条件下减产达到30%以上。这个减产幅度还高于居辉等对未来气候变化下我国小麦产量的可能减产20%的估计^[10]。但是,在干旱年水浇地增产幅度达到50%以上,水浇地配合优化施肥与正常年相比还增产40%,避免了气候变化的影响。这支持了孙芳等^[9]和居辉等^[10]关于灌溉小麦对气候变化的敏感性较低的模拟研究结果。熊伟等在模拟我国冬小麦平均产量变化时提出调整播期和改变品种是应对全球变暖对冬小麦生产影响的适应措施^[11]。我们的研究说明,作物生产中灌溉和良好施肥的田间管理可以在适应干旱的气候变化影响中发挥关键作用,可以作为未来应对干旱对冬小麦生产的主要田间管理途径。

粮食生产的安全保障还与年际生产力稳定性和田块生产力变异性有关^[11]。近60a来,我国农业生产稳定性随区域有很大的变异性,气候变化强烈地区这种变异性增大,因而会影响到我国农业生产力和粮食安全保障的不确定性^[8,13]。本文的结果表明,无论是大田调查统计还是试验示范地干旱下小麦产量的田块间变率都显著增大。但是,干旱下减产幅度和产量变率均随着技术管理投入而显著降低(图1),说明农田生产的优化管理技术可以大幅度降低干旱下产量损失,起到了减缓气候变化对农业生产影响的效果。熊伟等的模型模拟结果^[11]也表明,未来气候变化情景下我国冬小麦平均产量和最高产量可能会有所增高,但产量的年际波动和变率也将明显加大,产量的年际变幅也会显著增加。因此,小麦产量的田块不确定性依然较正常气候下大,这是气候变化对旱地农业生产造成的不利因素的重要方面。这也是在评价气候变化对

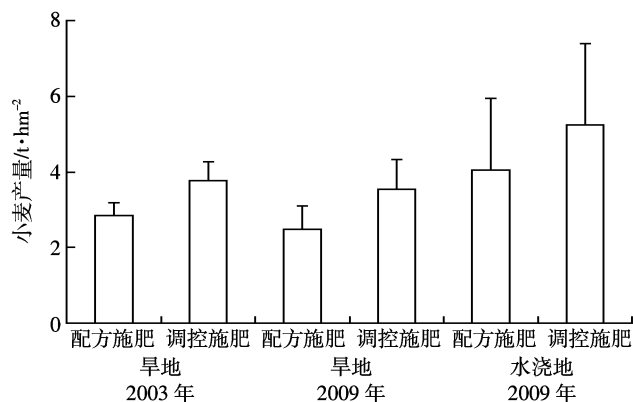


图2 不同管理技术对小麦产量的影响与应对效果比较

Figure 2 Comparison of different crop management practices on mitigating the drought impact on wheat yield

农业生产影响中必须予以充分重视的问题。

4 结论

气候变化下降水的强烈年际波动,春季降水不足(比常年减少60%)造成半干旱黄土高原区雨养冬小麦生产严重减产,减产幅度达20%~37%。同时增加了冬小麦产量的田块间更大的变异性,加剧了气候变化下农田小麦生产力的不确定性,即使在良好施肥管理下也如此。适当灌溉并配合良好施肥,可以显著减缓气候变化对小麦生产的减产效应,因而肥水协调的优化管理技术可以作为气候变化下干旱对冬小麦生产影响的应对途径和措施。

参考文献:

- [1] 熊伟,林而达,居辉,等.气候变化的影响阈值与中国的粮食安全[J].气候变化研究进展,2005,1(2):84-87.
XIONG Wei, LIN Er-da, JU Hui, et al. A Study of the threshold of climate change impact on food production in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(2):84-87.
- [2] Ericksen P, Thornton P, Notenbaert A, et al. Mapping hotspots of climate change and food insecurity in the global tropics[R]. CCAFS Report no.5. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security(CCAFS). Copenhagen, Denmark. 2011.
- [3] 林而达.气候变化与减灾[J].中国减灾,2008(3):16-17.
LIN Er-da. Climate change and disaster reduction[J]. *Disaster Reduction in China*, 2008(3):16-17.
- [4] 居辉,许吟隆,熊伟.气候变化对我国农业的影响[J].环境保护,2007,11:71-73.
JU Hui, XU Yin-long, XIONG Wei. Climate change impacts on China's agriculture[J]. *Environment Protection*, 2007, 11:71-73.
- [5] Cline W R. Global warming and agriculture [R].Impacts estimate by country.Center for Global Development, Peterson Institute for Global Economy, NY, USA, 2006.
- [6] 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,2008,4(增刊1):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*, 2008, 4(Suppl1):229-233.
- [7] 褚清河.给作物施“中成药”——SCR—调控肥[J].中国农资,2005(1):56-57.
- [8] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129:344-348.
- [9] 孙芳,杨修,林而达,等.中国小麦对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J].中国农业科学,2005,38(4):692-696.
SUN Fang, YANG Xiu, LIN Er-da, et al.Study on the Sensitivity and vulnerability of wheat to climate change in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4):692-696.
- [10] 居辉,熊伟,许吟隆,等.气候变化对我国小麦产量的影响[J].作物学报,2005,31(10):1340-1343.
JU Hui, XIONG Wei, XU Yin-long, et al. Impacts of climate change on wheat yield in China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005,31(10):1340-1343.
- [11] 熊伟,许吟隆,林而达.气候变化导致的冬小麦产量波动及应对措施模拟[J].中国农学通报,2005,21(5):380-385.
XIONG Wei, XU Yin-long, LIN Er-da. The Simulation of yield variability of winter wheat and its corresponding adaptation options under climate change[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5):380-385.
- [12] 潘根兴,赵其国.我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家粮食安全[J].地球科学进展,2005,20(4):384-393.
PAN Gen-xing, ZHAO Qi-guo. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: facing the challenge of global change and food security[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(4):384-393.
- [13] 赵听奕,张惠远.全球气候变化影响下中国农业产量的可持续性[J].地理科学,2000,20(3):224-228.
ZHAO Ting-yi, ZHANG Hui-yuan. The sustainability of Chinese agricultural yield affected by global climate change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000,20(3):224-228.