

气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和WUE的影响

孙蕊, 董心亮, 赵长龙, 苏寒, 王金涛, 刘小京, 孙宏勇

引用本文:

孙蕊, 董心亮, 赵长龙, 等. 气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和WUE的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 200–210.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190671>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CERES–Wheat模型的沧州地区冬小麦需水量分析

Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou Area using CERES–Wheat model
中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1320–1328 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150229>

'小偃60'在不同水氮条件下的用水特性

Water efficient utilization of 'Xiaoyan 60' winter wheat under different water and nitrogen conditions
中国生态农业学报. 2015, 23(10): 1253–1259 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141429>

环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究

Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea
中国生态农业学报. 2016, 24(8): 995–1004 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160162>

不同抗旱性小麦品种耗水量及产量形成的差异

Difference in water consumption and yield among different drought–resistant wheat cultivars
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 211–220 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190515>

华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较

A comparative study of yield, cost–benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat–maize under rain–fed condition in the North China Plain
中国生态农业学报. 2015(5): 535–543 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150215>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190671

孙蕊, 董心亮, 赵长龙, 苏寒, 王金涛, 刘小京, 孙宏勇. 气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和 WUE 的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 200–210

SUN R, DONG X L, ZHAO C L, SU H, WANG J T, LIU X J, SUN H Y. Effect of climate, genotype, and water management on winter wheat yield and water use efficiency in Hebei Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 200–210

气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和 WUE 的影响*

孙蕊^{1,2}, 董心亮¹, 赵长龙^{1,2}, 苏寒^{1,2}, 王金涛¹, 刘小京^{1,2}, 孙宏勇^{1,2**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 冬小麦是华北平原的主要作物, 其生长受气候等环境因子和品种、管理措施等因素的共同影响。为了研究气候×基因型×水分管理互作对河北平原冬小麦产量及水分利用效率(WUE)的影响, 以‘科农 2009’‘藁优 2018’和‘师栾 02-1’3 个该区域主栽冬小麦品种为材料, 于 2018—2019 年沿北纬 38°带, 选择河北平原冬小麦主产区的 4 个典型试验站点(衡水、南皮、栾城、南大港)进行了不同水分管理(雨养、灌溉)的大田试验。结果表明: 在灌溉条件下, 衡水、南皮、栾城和南大港的小麦产量分别为 6 316.7 kg·hm⁻²、5 204.1 kg·hm⁻²、4 356.5 kg·hm⁻² 和 2 597.7 kg·hm⁻², WUE 分别为 1.62 kg·m⁻³、1.72 kg·m⁻³、1.36 kg·m⁻³ 和 1.08 kg·m⁻³; 在雨养条件下, 南皮、栾城、衡水和南大港的小麦产量分别为 2 644.4 kg·hm⁻²、2 602.8 kg·hm⁻²、2 422.3 kg·hm⁻² 影响 1 784.3 kg·hm⁻², WUE 分别为 1.13 kg·m⁻³、1.10 kg·m⁻³、1.18 kg·m⁻³ 和 1.01 kg·m⁻³。统计分析表明, 穗数是影响产量的最主要因素, 气候×水分管理互作对产量和 WUE 均有极显著影响($P < 0.01$), 气候×基因型×水分管理互作对 WUE 有显著影响($P < 0.05$); 水分是影响产量和 WUE 的最重要因素。综合产量、耗水和 WUE 分析, 在降水量偏少的年份, 南皮在 4 个试验站点中冬小麦耗水量较少、WUE 最高、产量较高。分蘖能力强的小麦品种是适宜该区域种植的潜力品种类型。

关键词: 小麦品种; 产量; 水分管理; 基因型; 气候; 水分利用效率

中图分类号: S512.1

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effect of climate, genotype, and water management on winter wheat yield and water use efficiency in Hebei Plain*

SUN Rui^{1,2}, DONG Xinliang¹, ZHAO Changlong^{1,2}, SU Han^{1,2}, WANG Jintao¹,
LIU Xiaojing^{1,2}, SUN Hongyong^{1,2**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-saving, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Winter wheat is the main crop in the North China Plain, and its growth is affected by weather, varieties, and man-

* 国家重点研发计划项目(2018YFD0300504)资助

** 通信作者: 孙宏勇, 主要研究方向为农田水盐运移过程机理与调控。E-mail: hysun@sjziam.ac.cn

孙蕊, 主要研究方向为农田生态水盐运移过程及调控机制。E-mail: sunrui172@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2019-09-10 接受日期: 2019-11-05

* The study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFD0300504).

** Corresponding author, E-mail: hysun@sjziam.ac.cn

Received Sep. 10, 2019; accepted Nov. 5, 2019

agement measures. Many scholars have conducted extensive research on the mechanism of winter wheat growth, but most of these studies focused on a single factor. Moreover, research was mostly conducted at the regional scale, with few studies being conducted in areas at the same latitude. To investigate the effects of weather, genotype, and water management interaction on winter wheat yield and water use efficiency (WUE), field experiments were conducted at four typical experimental sites (Hengshui, Nanpi, Luancheng and Nandagang) in the Hebei Plain in the 38° north latitude zone from 2018 to 2019. Three winter wheat varieties ‘KN2009’, ‘GY2018’ and ‘SL02-1’ and two water management levels — irrigation and rain-fed treatments — were used at all four sites. The soil water content was measured at 20 cm intervals in the 1.6 m soil profile before sowing and after harvest. Grain yield and yield components were also measured. Weather factors were collected from a nearby weather station 200–500 m from the experimental sites. Under irrigation conditions, grain yield was 6 316.7 kg·hm⁻², 5 204.1 kg·hm⁻², 4 356.5 kg·hm⁻², and 2 597.7 kg·hm⁻², respectively; WUE was 1.62 kg·m⁻³, 1.72 kg·m⁻³, 1.36 kg·m⁻³, and 1.08 kg·m⁻³, respectively; irrigation water use efficiency (IWUE) was 1.62 kg·m⁻³, 3.20 kg·m⁻³, 2.19 kg·m⁻³, and 1.02 kg·m⁻³, respectively, at Hengshui, Nanpi, Luancheng and Nandagang sites. Under rain-fed conditions, grain yield at Nanpi, Luancheng, Hengshui and Nandagang was 2 644.4 kg·hm⁻², 2 602.8 kg·hm⁻², 2 422.3 kg·hm⁻², and 1 784.3 kg·hm⁻², respectively; WUE was 1.13 kg·m⁻³, 1.10 kg·m⁻³, 1.18 kg·m⁻³, and 1.01 kg·m⁻³, respectively. Grain yield differed significantly among the four sites, while no significant difference was noted among varieties. With regard to WUE, trends differed between the irrigation and rain-fed treatments. The WUE of different sites under irrigation conditions differed significantly, while there were no significant differences among varieties. The WUE of different sites under rain-fed conditions did not differ significantly, while WUE differed to some extent among varieties. Statistical analysis of results for grain yield and yield components revealed that the number of spikes was the most important factor affecting yield, while the effects of grain number per spike and 1000-grain weight on yield were inconsistent with different sites, varieties, and water conditions. Multivariate analysis of variance revealed that the interaction of weather factors and water management had a highly significant effect on yield and WUE ($P < 0.01$), while weather factors, genotype, and water management had a significant effect on WUE ($P < 0.05$). Thus, the effects of climate conditions and management measures on winter wheat yield, water consumption, and WUE were significantly greater than those of variety, and water factor was the influential factor on yield and WUE. Based on comprehensive yield, water consumption, and WUE analysis, Nanpi had relatively high grain yield with low water consumption and relatively high WUE. Wheat varieties with strong tillering ability were potentially suitable for planting in this region.

Keywords: Wheat variety; Yield; Water management; Genotype; Climate; Water use efficiency

小麦(*Triticum aestivum*)是我国主要的粮食作物之一。河北平原作为华北冬小麦主产区之一,基本实现了冬小麦自给,对保障国家粮食安全做出了重要贡献^[1]。但该地区也是我国最缺水的地区之一,水资源占有量为 3 165 m³·hm⁻²,仅为全国水平的 13.4%^[2]。同时,受季风气候影响,冬小麦生育期内降水量较少且分布不均匀,降水不到其需水量的 40%^[3]。因此,如何通过高效利用水分确保冬小麦稳产成为河北平原农业可持续发展面临的重大挑战。

在冬小麦生长发育过程中,温度、辐射和降雨等气候因子是影响其生长和产量的重要环境因素^[4]。谭凯炎等^[5]研究表明,近 30 年来河北平原冬小麦生长季气候变暖明显,10 月、12 月和 2—6 月增温趋势显著;胡洵瑀等^[6]认为河北平原冬小麦全生育期总辐射呈减少趋势;王占彪等^[7]研究表明,近 50 年来河北平原冬小麦季降雨量呈由南向北递减特征。许多学者针对河北平原水资源短缺的现状,研究了不同灌溉量对冬小麦产量和耗水的影响。裴宏伟等^[8]研究表明灌溉量增加对小麦产量增加有明显正效应,

且灌溉增产效率存在明显的年际差异;胡玉昆等^[9]应用 DSSAT 模型模拟了不同灌溉量对冬小麦生长的影响,认为适度的水分胁迫并不显著影响小麦产量,但可以减少小麦的耗水量。基因型是决定冬小麦产量的内在因素,不同基因型的小麦由于遗传背景不同,生物产量表现存在差异。目前抗逆性品种、耐密品种的培育为提高单位面积冬小麦产量提供了更多的可能,然而并不是有了优良品种就一定会具有高产量,小麦基因型的表达,还要依托适宜的环境条件和管理技术^[10-12]。

气候与基因型互作广泛存在于自然界,然而随着农业可持续集约化的需求,优化气候×基因型×管理措施成为促进农业发展的新趋势^[13-15]。Xin 等^[16]应用 APSIM 模型研究了华北地区冬小麦-夏玉米(*Zea mays*)轮作模式下,气候、基因型、管理措施互作对产量的影响,并提出适宜的播种时期、密度、灌溉量等具体意见。Golba 等^[17]研究了品种、地点、作物管理及其相互作用对波兰冬小麦产量及产量构成的影响,结果表明管理措施通过影响穗数和干

粒重进而对冬小麦产量有显著影响。Studnicki 等^[18]研究了波兰春小麦环境×基因型×管理措施互作对产量及品质的影响,结果表明在不利的土壤条件下,环境因素对产量和大部分品质性状影响最大。Martin 等^[19]应用大气环流和 GCM 模型模拟了在未来气候变化的情况下,环境、基因型和管理措施对丹麦冬小麦产量的影响,研究表明应培育选用生育期较长、光周期敏感性较低的品种以适应未来气候变化。

以上研究主要探讨了气候×基因型×水分管理互作对冬小麦产量的影响,而对于水分利用效率(WUE)的影响研究较少,且选取的环境因素主要针对于区域尺度,而鲜有针对同一纬度下的研究。本文针对上述情况,在河北平原冬小麦主产区沿北纬 38°带,依次从山前平原、低平原、滨海平原中选择 4 个典型试验点,探究气候×基因型×水分管理互作对冬小麦产量和 WUE 的影响,并确定主要影响因素,以期提升小麦产量和 WUE 提供优化管理措施的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

在河北平原冬小麦主产区沿北纬 38°带,选择 4 个试验站于 2018—2019 年开展冬小麦气候×基因型×水分管理互作试验。试验地点自西向东依次设置为中国科学院栾城农业生态系统试验站(114°41'E, 37°53'N, 海拔 50.1 m, 以下简称“栾城”)、河北省农

林科学院旱作节水农业试验站(115°42'E, 37°54'N, 海拔 18.9 m, 以下简称“衡水”)、中国科学院南皮生态农业试验站(116°40'E, 北纬 38°00'N, 海拔 11.0 m, 以下简称“南皮”)、河北省沧州市南大港管理区农林科学研究所(117°22'E, 38°28'N, 海拔 6.6 m, 以下简称“南大港”)。该区属于半湿润季风气候,从西向东(栾城 衡水 南皮 南大港)冬小麦生育期多年平均温度依次为 10.3、8.7、9.0、9.1;小麦生育期多年平均降雨量依次为 119.9 mm、108.9 mm、114.0 mm、118.9 mm。4 个试验站土壤属潮土类型,自西向东依次为潮褐土、潮土、轻壤质潮土和重壤质轻度盐化潮土。

1.2 试验材料和试验处理

本试验以适宜在河北省中南部冬麦区种植的‘科农 2009’、‘冀优 2018’和‘师栎 02-1’为供试材料,分别在 4 个站点等量播种。栾城、衡水、南皮和南大港 4 个试验站点的播种日期依次为 10 月 17 日、10 月 21 日、10 月 20 日和 10 月 19 日,收获日期依次为 6 月 8 日、6 月 8 日、6 月 11 日和 6 月 10 日。试验分为灌溉和雨养两个处理,灌溉处理的灌溉量和灌溉时间具体如表 1 所示。雨养试验在小麦生育期内不灌溉,其余管理措施与灌溉处理均一致。每个处理设置 3 个重复,随机排列,即每个试验地有 18 个小区,小区面积约 50 m²,灌溉处理与雨养处理之间设有 1.5 m 保护行。各站点施底肥均为复合肥,并均在拔节期追施尿素一次,底肥和追肥均与当地最优施肥情况一致(肥料充足,施肥不是限制因素)。

表 1 不同试验地点小麦的灌溉时期及灌溉量
Table 1 Irrigation time and irrigation amount of winter wheat at different sites mm

站点 Site	总灌溉量 Total irrigation amount	灌溉时期 Irrigation time			
		越冬期 Recovering period	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Booting stage	灌浆期 Grain filling stage
栾城 Luancheng	80	0	80	0	0
衡水 Hengshui	240	0	80	80	80
南皮 Nanpi	80	0	80	0	0
南大港 Nandagang	80	0	80	0	0

1.3 测定项目和方法

1.3.1 冬小麦生育期耗水量的测定

在冬小麦播种前、拔节期、开花期和收获期,以 20 cm 为间隔,用土钻取 0~160 cm 土层的土样(南大港地下水埋深较浅,取 0~100 cm 土层的土样),采用烘干法测定并计算土壤质量含水量(%)。

土壤储水量计算公式为:

$$\text{土壤储水量}(W) = \sum_i^n h_i \times \rho_i \times b_i \times 10 \quad (1)$$

式中: i 为土层(0~20 cm 为 1 层), n 为土层数, h_i 为土层深度(cm), ρ_i 为土壤容重(g·cm⁻³), b_i 为土壤质量含水量(%)。

冬小麦生育期耗水量根据水分平衡公式计算:

$$ET = P + I + \Delta W - R - D + CR \quad (2)$$

式中: ET 为耗水量(mm); P 为降雨量(mm); I 为灌溉量(mm); ΔW 为 0~160 cm 的土壤储水量变化(mm), 即初始时期储水量-收获时期的储水量; R 为径流(mm); D 为 160 cm 以下的土壤排水(mm); CR 为地下水到根域的上流流量(mm)。在本次试验中 R 、 D 、 CR 可以忽略不计^[20-21]。

1.3.2 水分利用效率的测定

$$\text{水分利用效率(WUE)} = \frac{\text{籽粒产量}}{\text{小麦生育期耗水量}} \quad (3)$$

$$\text{灌溉水分利用效率(IWUE)} = \frac{\text{灌溉处理籽粒产量} - \text{不灌溉处理籽粒产量}}{\text{灌溉量}} \quad (4)$$

1.3.3 产量及其构成要素、收获指数的测定

灌溉小区收获 2 m², 雨养小区收获 6 m², 每个处理各取 3 次重复, 脱粒晒干后测定籽粒产量; 收获后在各自小区内数 1 m 双行的茎数, 用于计算穗数。同时, 各小区收获长势均匀的 20 株单茎, 进行考种测定穗粒数和千粒重。

$$\text{收获指数(HI)} = \frac{\text{经济产量}}{\text{生物产量}} \quad (5)$$

1.4 气象数据

2018—2019 年试验季气象数据来源于栾城、衡

水、南皮、南大港试验地安装的小型气象站, 主要气象数据包括逐日平均气温()、20:00—20:00 累计降水量(mm)、日照时数(h)、相对湿度(%)等。

4 个试验站长期气象数据(1994—2014 年)源自中国地面气候资料日值数据集(V3.0), 由中国气象科学数据共享服务网提供, 包括逐日平均气温()、20:00—20:00 累计降水量(mm)、日照时数(h)和相对湿度(%)等。将 1994—2014 年 10 月下旬、11 月—翌年 5 月、6 月上旬的月平均气温、月平均降水量作为多年平均值用于与试验季气象数据的对比。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 21.0 和 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理、分析以及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 生长季主要气象因素

由图 1 可知, 4 个试验站点 2018—2019 年小麦生长季温度与多年平均温度变化趋势一致。栾城试验季冬小麦生育期平均温度为 9.9 , 低于多年平均温度(10.3) ; 衡水和南皮试验季生育期平均

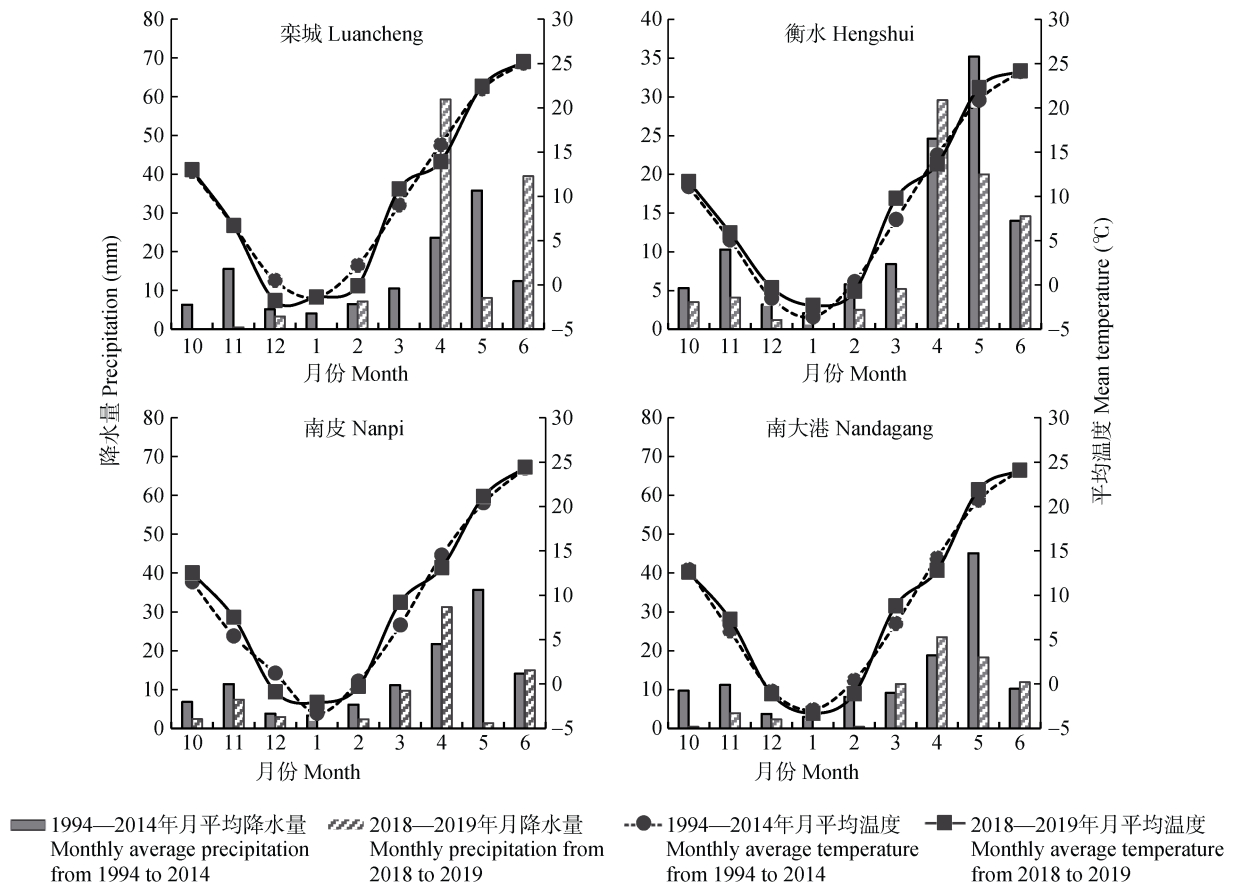


图 1 不同试验地点小麦试验季(2018—2019 年)与多年(1994—2014 年)月平均降水量和月平均温度对比
Fig. 1 Comparison of monthly precipitation and temperature during winter wheat growing season between 2018-2019 and average values from 1994 to 2014

温度均为 9.4 ℃, 均高于多年平均温度(8.7 ℃、9.0 ℃); 南大港试验季生育期平均温度为 9.1 ℃, 略高于多年平均温度(9.0 ℃)。但是, 在月份尺度上, 所有地点的 2 月平均温度均低于往年 2 月平均温度, 3 月和 5 月的平均温度均高于往年平均温度。

4 个站点 2018—2019 年小麦生长季降水量较多年平均降水量变化较大(图 1)。栾城试验季冬小麦生育期降水量为 117.9 mm, 略低于多年平均试验季降水量(119.9 mm); 衡水、南皮、南大港试验季降水量

分别为 80.7 mm、72.2 mm、72.1 mm, 显著低于多年平均降水量(108.9 mm、114.0 mm、118.8 mm)。这主要是当年 10 月—翌年 1 月所有站点降水量均小于多年降水量所致。

2.2 气候×基因型×水分管理对产量及构成要素的影响

2018—2019 年, 栾城、衡水、南皮、南大港 4 个站点种植相同品种不同水分处理情况下, 冬小麦的产量、构成要素及收获指数如表 2 所示。

表 2 不同地点和水分管理下不同小麦品种的产量、构成要素及收获指数(2018—2019 年)
Table 2 Wheat yields, components and harvest indexes at different sites and irrigation treatments from 2018 to 2019

站点 Site	水分管理 Water management	基因型 Genotype	穗数 Spike number (spikes·m ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	收获指数 Harvest index	产量 Yield (kg·hm ⁻²)
栾城 Luancheng	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	603b	33a	32.0a	0.45a	4 112.3b
		师栾 02-1 SL02-1	789a	28b	27.6b	0.45a	4 601.3a
		冀优 2018 GY2018	611b	29b	33.1a	0.41b	4 355.9ab
		平均 Mean	668	30	30.9	0.44	4 356.5
	雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009	382c	22a	36.3b	0.47a	2 048.1c
		师栾 02-1 SL02-1	462a	22a	30.9c	0.47a	3 130.1a
		冀优 2018 GY2018	426b	19b	38.9a	0.44b	2 630.1b
		平均 Mean	423	21	35.4	0.46	2 602.8
衡水 Hengshui	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	644b	35a	40.5a	0.49a	6 166.7b
		师栾 02-1 SL02-1	765a	32b	34.1b	0.48a	6 383.4a
		冀优 2018 GY2018	741a	31b	41.8a	0.45b	6 400.1a
		平均 Mean	718	33	38.8	0.47	6 316.7
	雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009	402b	22ab	36.8b	0.42b	2 216.7b
		师栾 02-1 SL02-1	427a	24a	31.0c	0.47a	2 733.3a
		冀优 2018 GY2018	378c	19b	38.3a	0.36c	2 316.8b
		平均 Mean	402	22	35.4	0.42	2 422.3
南皮 Nanpi	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	630b	33a	36.5b	0.45a	5 682.8a
		师栾 02-1 SL02-1	862a	30a	30.0c	0.46a	5 530.2a
		冀优 2018 GY2018	647b	21b	38.2a	0.41b	4 399.2b
		平均 Mean	713	28	34.9	0.44	5 204.1
	雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009	415b	25a	34.3b	0.43a	2 478.3b
		师栾 02-1 SL02-1	458a	25a	30.3c	0.42ab	2 695.8a
		冀优 2018 GY2018	441a	20b	37.8a	0.39b	2 759.0a
		平均 Mean	438	23	34.1	0.41	2 644.4
南大港 Nandagang	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	271c	33ab	36.7a	0.48a	2 111.9b
		师栾 02-1 SL02-1	352a	35a	30.8b	0.48a	2 820.9a
		冀优 2018 GY2018	317b	31b	37.5a	0.42b	2 860.4a
		平均 Mean	314	33	35.0	0.46	2 597.7
	雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009	205c	30b	36.6a	0.48a	1 603.7b
		师栾 02-1 SL02-1	288a	32a	30.5b	0.49a	2 155.4a
		冀优 2018 GY2018	241b	30b	36.5a	0.48a	1 593.8b
		平均 Mean	245	31	34.5	0.48	1 784.3

同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters following the same column data indicate significant differences between treatments at the same location ($P < 0.05$).

由表 2 可知, 在灌溉处理下衡水产量最高, 为 $6\,316.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 南皮次之, 为 $5\,204.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 栾城为 $4\,356.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 最后为南大港, 产量为 $2\,597.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。雨养处理与灌溉处理在各个站点的趋势不一致。南皮雨养产量最高, 为 $2\,644.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其次为栾城, 为 $2\,602.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 衡水为 $2\,422.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 南大港为 $1\,784.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同品种在各站点的平均产量具有较为一致的变化趋势。‘师栾 02-1’无论是灌溉还是雨养处理产量都最高, 分别为 $4\,833.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $2\,678.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ‘科农 2009’和‘藁优 2018’在灌溉处理中差异不显著, 分别为 $4\,518.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $4\,503.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而在雨养处理中差异显著, 分别为 $2\,086.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2\,324.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在衡水‘藁优 2018’是灌溉处理中产量最高的, 在栾城‘师栾 02-1’是雨养处理中产量最高的。各试验站点种植的冬小麦在灌溉和雨养情况下, 产量存在明显差异, 而品种的表现较为一致。这说明气候条件和管理措施对产量的影响显著大于品种。

2.3 气候×基因型×水分管理对冬小麦产量及构成要素相关性的影响

在不同水分管理、不同品种和不同站点情况下, 穗数均与产量呈极显著正相关(表 3)。在不同水分管理情况下, 雨养产量与穗粒数呈显著负相关; 不同品种情况下, ‘科农 2009’的产量与穗粒数呈极显著正相关; 不同站点情况下, 栾城产量与穗粒数和千粒重均呈极显著相关, 衡水产量与穗粒数呈极显著正相关, 南皮产量与穗粒数呈显著正相关。由相关系数可知, 穗数是对产量影响最主要的因素, 而千粒

表 3 不同地点、品种和水分管理下小麦产量及产量构成要素的相关分析

Table 3 Correlation analysis of yield and yield components under different sites, varieties and irrigation treatments

	因素 Factor	千粒重	穗粒数	穗数
		1000-grain weight	Grains per spike	Number of spikes
水分 Water	灌溉 Irrigation	0.293	0.106	0.770**
	雨养 Rain-fed	-0.251	-0.329*	0.711**
品种 Variety	科农 2009 KN2009	0.288	0.541**	0.875**
	师栾 02-1 SL02-1	0.353	0.206	0.823**
	藁优 2018 GY2018	0.302	0.343	0.886**
地点 Site	栾城 Luancheng	-0.642**	0.701**	0.678**
	衡水 Hengshui	0.415	0.764**	0.961**
	南皮 Nanpi	0.139	0.499*	0.837**
	南大港 Nandagang	-0.181	-0.008	0.745**

水分处理中 $n=36$, 地点处理中 $n=18$, 品种处理中 $n=24$ 。所有处理**代表 0.01 水平, *代表 0.05 水平。 $n=36$ in water treatment, $n=18$ in location treatment, and $n=24$ in variety treatment. ** represents 0.01 level and * represents 0.05 level in all treatments.

重和穗粒数在不同情况下表现不一致, 但综合来看, 穗粒数对产量的影响比千粒重更显著。

2.4 气候×基因型×水分管理对冬小麦耗水量和 WUE 的影响

2.4.1 对耗水量的影响

由表 4 可知, 4 个地点灌溉和雨养处理对冬小麦生育期耗水量的影响不一致。在灌溉处理中, 冬小麦生育期耗水量在衡水最大(392.2 mm), 栾城次之(321.0 mm), 然后为南皮(303.3 mm), 南大港最少(241.2 mm)。雨养处理下栾城最大(236.3 mm), 南皮次之(235.0 mm), 然后为衡水(204.4 mm), 南大港最少(176.8 mm)。

从品种来看, 灌溉处理中, ‘师栾 02-1’生育期耗水量最大(325.4 mm), ‘藁优 2018’次之(311.9 mm), ‘科农 2009’最少(306.0 mm); 雨养处理下冬小麦耗水量均小于灌溉处理, 但是不同品种的雨养处理与灌溉处理耗水量表现不同, ‘藁优 2018’耗水量最大(217.1 mm), 其次是‘科农 2009’(213.0 mm), ‘师栾 02-1’耗水量最小(209.3 mm)。在灌溉和雨养情况下, 试验站点的耗水量存在明显差异, 而品种间耗水量差异较小。说明气候条件和管理措施对冬小麦生育期耗水量的影响显著大于品种。

2.4.2 对 WUE 的影响

在灌溉条件下, 不同站点 WUE 存在显著差异, 不同品种 WUE 差异不显著(表 4)。南皮的 WUE 最高($1.72\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 其次为衡水($1.62\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 然后为栾城($1.36\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 南大港最低($1.08\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); ‘师栾 02-1’最高 ($1.47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ‘科农 2009’次之 ($1.45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ‘藁优 2018’最低($1.42\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。IWUE 与 WUE 表现较为一致。南皮 IWUE 最高 ($3.20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 其次为栾城($2.19\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 然后为衡水($1.62\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 南大港最低($1.02\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); ‘科农 2009’最高 ($2.22\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ‘师栾 02-1’次之 ($1.93\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ‘藁优 2018’最低($1.87\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。南皮灌溉处理的‘科农 2009’WUE 和 IWUE 都最高, 分别为 $2.00\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $4.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

在雨养条件下, 各个站点的 WUE 差异不显著, 而品种间有一定差异。衡水最高, 为 $1.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次为南皮, 为 $1.13\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 然后为栾城, 为 $1.10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 南大港最低, 为 $1.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ‘师栾 02-1’WUE 最高, 为 $1.28\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ‘藁优 2018’为 $1.07\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ‘科农 2009’最低, 为 $0.98\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。栾城雨养处理的‘师栾 02-1’WUE 为 $1.33\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 为所有站点和品种中最高。

表 4 不同地点和水分管理下不同冬小麦的水分利用效率(WUE) (2018—2019 年)
Table 4 Water use efficiencies at different sites and under irrigation treatments from 2018 to 2019

地点 Site	水分管理 Water management	基因型 Genotype	降雨量 Precipitation (mm)	灌溉量 Irrigation amount (mm)	土壤供水量 Soil water supply (mm)	农田耗水量 Farmland water consumption (mm)	水分利用效率 Water use efficiency (kg·m ⁻³)	灌溉水分利用效率 Irrigation water use efficiency (kg·m ⁻³)		
栾城 Luancheng	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	117.9	80.0	126.4	324.3	1.27a	2.58a		
		师农 02-1 SL02-1	117.9	80.0	121.7	319.6	1.44a	1.84b		
		藁优 2018 GY2018	117.9	80.0	121.3	319.2	1.36a	2.16ab		
		平均 Mean				321.0	1.36	2.19		
	雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009	117.9	0	89.3	207.2	0.99ab			
		师农 02-1 SL02-1	117.9	0	117.0	234.9	1.33a			
		藁优 2018 GY2018	117.9	0	149.0	266.9	0.99ab			
		平均 Mean				236.3	1.10			
		衡水 Hengshui	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	80.7	240.0	60.1	380.8	1.62a	1.65ab
				师农 02-1 SL02-1	80.7	240.0	99.8	420.5	1.52a	1.52ab
藁优 2018 GY2018	80.7			240.0	54.4	375.1	1.71a	1.70a		
平均 Mean						392.2	1.62	1.62		
雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009		80.7	0	126.9	207.6	1.07a			
	师农 02-1 SL02-1		80.7	0	129.5	210.2	1.30a			
	藁优 2018 GY2018		80.7	0	114.8	195.5	1.18a			
	平均 Mean					204.4	1.18			
	南皮 Nanpi		灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	72.2	80.0	131.5	283.7	2.00a	4.01a
				师农 02-1 SL02-1	72.2	80.0	160.3	312.5	1.77ab	3.54b
藁优 2018 GY2018		72.2		80.0	161.6	313.8	1.40b	2.05c		
平均 Mean						303.3	1.72	3.20		
雨养 Rain-fed		科农 2009 KN2009	72.2	0	179.5	251.7	0.98ab			
		师农 02-1 SL02-1	72.2	0	152.3	224.5	1.20a			
		藁优 2018 GY2018	72.2	0	156.6	228.8	1.21a			
		平均 Mean				235.0	1.13			
		南大港 Nandagang	灌溉 Irrigation	科农 2009 KN2009	72.1	80.0	83.2	235.3	0.90a	0.64b
				师农 02-1 SL02-1	72.1	80.0	97.0	249.1	1.13a	0.83b
藁优 2018 GY2018	72.1			80.0	87.2	239.3	1.20a	1.58a		
平均 Mean						241.2	1.08	1.02		
雨养 Rain-fed	科农 2009 KN2009		72.1	0	113.4	185.5	0.86b			
	师农 02-1 SL02-1		72.1	0	95.6	167.7	1.28a			
	藁优 2018 GY2018		72.1	0	105.2	177.3	0.90b			
	平均 Mean					176.8	1.01			

同列数据后不同小写字母表示同一地点不同处理间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments at the same site ($P < 0.05$).

2.5 气候×基因型×水分管理对冬小麦产量和 WUE 的影响

对不同气候、不同基因型、不同水分管理条件

下的产量和 WUE 分别进行多因素方差分析,结果如表 5-6 所示。由表 5 可知,单因素分析表明,气候和水分均对产量有极显著影响($P < 0.01$),而基因型

对产量有显著影响($P<0.05$), 水分、气候、基因型所占平方和的比例分别为 49.33%、27.38%、1.38%, 说明水分是对产量影响最大的因素。多因素分析表明, 气候×水分管理互作大于气候×基因型×水分管理互作和基因型×水分管理, 说明在互作情况下, 气候×水分管理对产量影响最大。

如表 6 所示, 单因素分析表明, 气候和水分均对 WUE 有极显著影响($P<0.01$), 而基因型对 WUE 有显著影响($P<0.05$), 水分、气候、基因型所占平方和的比例分别为 25.81%、21.59%、4.47%, 这说明水分和

气候均是影响 WUE 的主要因素, 同时水分对 WUE 的影响最大。多因素分析表明, 气候×水分管理互作对 WUE 影响极显著($P<0.01$), 气候×基因型×水分管理互作对 WUE 影响显著($P<0.05$), 气候×基因型互作、基因型×水分管理互作对 WUE 影响均不显著, 这说明在互作情况下, 气候×水分管理对 WUE 影响最大。

综上所述, 水分是对产量和 WUE 影响最大的因素, 气候×水分管理互作同样对产量和 WUE 有极显著影响, 这符合河北平原农业发展中水资源受限的实际情况。

表 5 气候、基因型、水分管理及其互作对冬小麦产量的影响

Table 5 Effects of climate, genotype, water management and their interaction on winter wheat yield

变异来源 Source of variation	自由度 <i>df.</i>	平方和 SS	平方和占比 SS (%)	均方 MS	F 值 F value	P 值 P value
气候 Climate (C)	3	225 005.253	27.379	75 001.751	55.060	0.000
基因型 Genotype (G)	2	11 335.897	1.379	5 667.949	4.161	0.022
水分 Water management (W)	1	405 403.601	49.330	405 403.601	297.614	0.000
气候×基因型 C × G	6	8 400.445	1.022	1 400.074	1.028	0.419
气候×水分管理 C × W	3	92 799.209	11.292	30 933.070	22.709	0.000
基因型×水分管理 G × W	2	743.634	0.090	371.817	0.273	0.762
气候×基因型×水分管理 C × G × W	6	12 739.775	1.550	2 123.296	1.559	0.180
总和 Total	72	821 812.311				

$P<0.01$ 代表极显著水平, $P<0.05$ 代表显著水平。 $P < 0.01$ and $P < 0.05$ represent extremely significant at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

表 6 气候、基因型、水分及其互作对冬小麦水分利用效率(WUE)的影响

Table 6 Effects of climate, genotype, water management and their interaction on water use efficiency (WUE) of winter wheat

变异来源 Source of variation	自由度 <i>df.</i>	平方和 SS	平方和占比 SS (%)	均方 MS	F 值 F value	P 值 P value
气候 Climate (C)	3	1.695	21.589	0.565	14.485	0.000
基因型 Genotype (G)	2	0.351	4.470	0.175	4.496	0.016
水分 Water management (W)	1	2.026	25.805	2.026	51.958	0.000
气候×基因型 C × G	6	0.374	4.763	0.062	1.597	0.169
气候×水分管理 C × W	3	0.708	9.017	0.236	6.051	0.001
基因型×水分管理 G × W	2	0.246	3.133	0.123	3.154	0.052
气候×基因型×水分管理 C × G × W	6	0.579	7.374	0.097	2.475	0.036
总和 Total	72	7.851				

$P<0.01$ 代表极显著水平, $P<0.05$ 代表显著水平。 $P < 0.01$ and $P < 0.05$ represent extremely significant at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3 讨论

近 30 年来, 以气候变暖为主要特征的全球变化已对农业发展产生重要的影响。有学者^[22-23]认为温度是制约冬小麦产量的主要气候因子, 华北平原冬小麦返青—抽穗期对温度最敏感, 其次是抽穗—成熟, 播种—越冬较为不敏感。本研究比较试验季(2018—2019 年)与多年(1994—2014 年)月平均温度

发现: 除栾城外, 其余 3 站个试验站试验季平均温度高于多年平均值; 4 个站点试验季冬小麦抽穗—成熟期平均温度均高于多年平均值, 这说明在该区域气候普遍变暖。对比 4 个地点的水热情况发现试验季栾城水热资源最丰富, 而南大港水热资源最不充沛, 结合雨养条件下所得的栾城产量较高、南大港产量最低的情况, 说明产量的表现受制于水热条件, 这与 Zhu 等^[24]研究较为一致。

产量是受众多因素影响的综合性状表现,许多学者针对某一种因素或两种因素开展了研究:孙本普等^[25]通过大田试验,研究了不同年份的气候和栽培条件对冬小麦产量构成要素的影响;郑建敏等^[26]探讨了基因型和环境互作对冬小麦产量及产量构成要素的影响;王家瑞等^[27]研究了不同灌水模式对冬小麦产量构成要素的影响。以上研究均表明穗数是对产量影响最主要的因素。本研究通过气候×基因型×水分管理对产量及其构成要素的研究结果表明,穗数对产量的影响最大,不同站点、品种、水分条件下穗粒数和千粒重对产量的影响不一致,但综合来看穗粒数对产量的影响大于千粒重。不同基因型的冬小麦分蘖能力不同,本研究中‘师栾 02-1’‘科农 2009’和‘冀优 2018’分蘖期的分蘖数分别为 450 株、356 株和 345 株,‘师栾 02-1’分蘖最多产量也最大。不同环境对小麦穗数的影响主要体现在生长初期气象条件对出苗率的影响,南大港小麦生长初期降水少、温度低导致出苗率最少。不同水分管理下冬小麦穗数差异明显,尤其表现在拔节—抽穗期,而开花期—成熟期穗数变化幅度较小。所以应该选择分蘖能力强的冬小麦品种。

作物 WUE 是衡量作物耗水量与物质生产量之间关系的重要指标。影响冬小麦 WUE 的因素有很多,主要有小麦本身的特性和外部环境因子。许多学者探究了小麦品种、灌溉条件、气候变化等因素中一种或两种因素对冬小麦 WUE 的影响,大多结果表明以上因素均对 WUE 有显著影响^[28-29]。本文通过气候×基因型×水分管理对 WUE 的影响表明,灌溉条件下不同地点的 WUE 差异显著,而不同品种的 WUE 差异不显著;雨养条件下不同地点的 WUE 差异不显著,而不同品种的 WUE 有一定的差异。分析其原因,不同冬小麦品种因其生理生态特征不同而在 WUE 上表现出显著差异,尤其在水分胁迫下表现突出;雨养条件下不同站点的降水分布不均,降水量也不同,导致冬小麦生育期不同阶段耗水及生长发育不同,最终表现出 WUE 差异显著。笔者认为应根据生长气候环境来进行适宜气候的冬小麦基因型筛选,然后优化的管理措施使之与环境和小麦基因型特点相适应,达到冬小麦稳产高效的目标。如选育、筛选分蘖能力强、高水分利用效率和抗逆性强的冬小麦品种;管理措施方面可以根据不同区域的气候条件和冬小麦生理特性调整播期和播量,使其充分发挥资源高效利用特点;根据降水情况制定合理灌溉制度,达到稳产节水高效的

目的。

4 结论

1) 试验结果表明,气候条件和管理措施对冬小麦产量、耗水量和 WUE 的影响显著大于品种,水分是对产量和 WUE 影响最大的因素。

2) 综合站点、品种、水分对产量及构成要素的相关分析,穗数是影响产量最主要的因素。

3) 综合产量、耗水量和 WUE,在降水量较少的年份,南皮是 4 个站点中小麦生育期耗水量较少、WUE 和 IWUE 高、产量较高的站点。

参考文献 References

- [1] 王涛, 吕昌河, 于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 475-487
WANG T, LU C H, YU B H. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 475-487
- [2] 梁钰琪. 河北平原冬小麦节水栽培技术发展及推广影响因素研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015
LIANG Y Q. Study on water saving technology development and diffusion of winter wheat in the Hebei Plain[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2015
- [3] WANG X P, HUANG G H, YANG J S, et al. An assessment of irrigation practices: sprinkler irrigation of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 197-208
- [4] PORTER J R, SEMENOV M A. Crop responses to climatic variation[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 360(1463): 2021-2035
- [5] 谭凯炎, 邬定荣, 赵花荣. 气候变暖背景下华北平原冬小麦生育期温度条件变化趋势分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(6): 333-341
TAN K Y, WU D R, ZHAO H R. Trend analysis of temperature conditions over different growth periods of winter wheat under climate warming in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(6): 333-341
- [6] 胡润琦, 王靖, 冯利平. 华北平原冬小麦各生育阶段农业气候要素变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 317-323
HU X Y, WANG J, FENG L P. Analysis on agro-climatic elements variation during winter wheat growing season in North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(3): 317-323
- [7] 王占彪, 王猛, 尹小刚, 等. 近 50 年华北平原冬小麦主要生育期水热时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 22-29
WANG Z B, WANG M, YIN X G, et al. Spatiotemporal

- change characteristics of heat and rainfall during the growth period of winter wheat in the North China Plain from 1961 to 2010[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 22–29
- [8] 裴宏伟, 孙宏勇, 沈彦俊, 等. 不同灌溉处理下冬小麦水平衡与灌溉增产效率研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011(5): 75–80
PEI H W, SUN H Y, SHEN Y J, et al. Water balance and yield-increasing efficiency of irrigation of winter wheat under different irrigation schemes[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2011(5): 75–80
- [9] 胡玉昆, 杨永辉, 杨艳敏, 等. 华北平原灌溉量对冬小麦产量、蒸发蒸腾量、水分利用效率的影响[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2009, 42(6): 701–705
HU Y K, YANG Y H, YANG Y M, et al. Effect of irrigation on winter wheat yield, evapotranspiration and water use efficiency in North China Plain[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(6): 701–705
- [10] 李克南. 华北地区冬小麦-夏玉米作物生产体系产量差特征解析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
LI K N. Yield gap analysis focused on winter wheat and summer maize rotation in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014
- [11] CASSMAN K G, DOBERMANN A, WALTERS D T, et al. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2003, 28(1): 315–358
- [12] 段艳娟. 小麦生产力的基因型与气候效应模拟[D]. 南京: 南京农业大学, 2010
DUAN Y J. Modeling genotype by climate effect on wheat productivity[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010
- [13] 陈朝阳, 魏建伟, 陈淑萍, 等. 黄淮海夏玉米品种籽粒产量基因型与环境互作分析[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(8): 2749–2760
CHEN Z Y, WEI J W, CHEN S P, et al. Genotype by environment interaction effect on grain yield of Huanghuaihai summer maize cultivars[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(8): 2749–2760
- [14] TAO F L, ZHANG S, ZHANG Z. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 201–212
- [15] SEYOUM S, RACHAPUTI R, CHAUHAN Y, et al. Application of the APSIM model to exploit G×E×M interactions for maize improvement in Ethiopia[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 113–124
- [16] XIN Y, TAO F L. Optimizing genotype-environment-management interactions to enhance productivity and eco-efficiency for wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 480–492
- [17] GOLBA J, STUDNICKI M, GOZDOWSKI D, et al. Influence of genotype, crop management, and environment on winter wheat grain yield determination based on components of yield[J]. *Crop Science*, 2018, 58(2): 660
- [18] STUDNICKI M, WIJATA M, SOBCZYŃSKI G, et al. Effect of genotype, environment and crop management on yield and quality traits in spring wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 72: 30–37
- [19] MARTÍN M M S, OLESEN J E, PORTER J R. A genotype, environment and management (G×E×M) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 187: 1–13
- [20] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 等. 不同行距对冬小麦麦田蒸发、蒸散和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 22–26
SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of different row spacing on soil evaporation, evapotranspiration and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3): 22–26
- [21] 冯广龙, 刘昌明. 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析[J]. *自然资源学报*, 1998, 13(3): 42–49
FENG G L, LIU C M, et al. Analysis of root system growth in relation to soil water extraction pattern by winter wheat under water limiting conditions[J]. *Journal of Natural Resources*, 1998, 13(3): 42–49
- [22] 肖登攀, 陶福祿, 沈彦俊, 等. 华北平原冬小麦对过去 30 年气候变化响应的敏感性研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4): 430–438
XIAO D P, TAO F L, SHEN Y J, et al. Sensitivity of response of winter wheat to climate change in the North China Plain in the last three decades[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 430–438
- [23] 高静, 邬定荣, 王培娟, 等. 华北平原冬小麦主要发育阶段日数对温度变化的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(4): 431–436
GAO J, WU D R, WANG P J, et al. Relative sensitivity of main growth durations to temperature for winter wheat in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(4): 431–436
- [24] ZHU R R, ZHENG H X, WANG E L, et al. A hybrid process based-empirical approach to identify the association between wheat productivity and climate in the North China Plain during the past 50 years[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2018, 108: 72–80
- [25] 孙本普, 王勇, 李秀云, 等. 不同年份的气候和栽培条件对冬小麦产量构成因素的影响[J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(2): 83–87
SUN B P, WANG Y, LI X Y, et al. The influence of climate and cultivation on the yield components of winter wheat in different years[J]. *Acta Tritical Crops*, 2004, 24(2): 83–87

- [26] 郑建敏, 李浦, 廖晓虹, 等. 四川冬小麦产量构成因子初步分析[J]. 作物杂志, 2012(1): 105–108
ZHENG J M, LI P, LIAO X H, et al. Preliminary study on yield component factors of Sichuan winter wheat[J]. Crops, 2012(1): 105–108
- [27] 王家瑞, 刘卫星, 陈雨露, 等. 不同灌水模式对冬小麦产量及水分利用的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(10): 1229–1236
WANG J R, LIU W X, CHEN Y L, et al. Regulatory effect of different irrigation regimes on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(10): 1229–1236
- [28] 王海霞, 李玉义, 任天志, 等. 不同灌溉制度对冬小麦产量与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 112–114
WANG H X, LI Y Y, REN T Z, et al. Effects of different irrigation regimes on yield and WUE of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 112–114
- [29] 成林, 方文松. 气候变化对雨养冬小麦水分利用效率的影响估算[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 300–310
CHENG L, FANG W S. Estimation of climate change effects on water use efficiency of rain-fed winter wheat[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(3): 300–310