

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01220

冬小麦新品种“科农 199”高产稳产特征分析*

赵慧^{1,3} 张玮^{1,2} 王静¹ 纪军^{1,2} 王志国¹ 李俊明^{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 石家庄 050022; 2. 植物细胞与染色体工程国家重点实验室 北京 100101; 3. 河北科技大学生物科学与工程学院 石家庄 050018)

摘要 “科农 199”是利用染色体工程技术培育的高产稳产小麦新品种,其抗寒、耐旱、抗干热风,根系发达,生育中后期能够高效吸收深层土壤的水分养分。本文研究了氮肥、磷肥、水分运筹等对“科农 199”产量潜力的影响,为“科农 199”的栽培推广提供参考。试验从 2008 年开始,在冬小麦各主要生育期收集数据、取样并进行相关处理;在收获后进行室内考种,考查千粒重、穗粒数、单株穗数、产量等重要性状指标。通过田间试验发现,“科农 199”小麦无论低氮或高氮供给条件下都比其他品种积累更多的干物质并向籽粒中分配,从而形成较高的经济产量;大田节肥试验中施纯氮 120 kg·hm⁻² 时单产 6 532.5 kg·hm⁻²,氮肥偏生产力达 54.4 kg·kg⁻¹;施纯氮 180 kg·hm⁻² 时单产 7 312.5 kg·hm⁻²,氮肥偏生产力达 40.6 kg·kg⁻¹。在低磷定位试验中,“科农 199”表现出分蘖力强、成穗率高、收获群体大的特点。在冬前底墒水充足的条件下,春季灌水 1~2 次可满足亩产千斤的水分需求。现阶段冻害干旱等极端气候高发频发,推广“科农 199”这类抗逆稳产品种,可提高我国小麦生产可持续性,有助于保障粮食安全。

关键词 科农 199 冬小麦 氮肥利用效率 磷肥利用效率 产量潜力

中图分类号: S322.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)05-1220-09

Analysis of high and stable yield characteristics of “Kn199” winter wheat cultivar

ZHAO Hui^{1,3}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Jing¹, JI Jun^{1,2}, WANG Zhi-Guo¹, LI Jun-Ming^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. State Key Laboratory of Plant Cell and Chromosome Engineering, Beijing 100101, China; 3. College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract “Kn199” winter wheat cultivar is 1RS/1BL translocation line and derivative of octoploid synthetic *Triticum aestivum* and *Elytrigia elongata* species. It has excellent frost hardiness, winter survival, drought tolerance, hot/dry wind resistance, onsite adaptability and yield stability. Its robust root system facilitates high water absorption and nutrient uptake at the depth of soils especially under drought stress conditions. In this study, nitrogen and phosphorus use efficiency (*NUE*, *PUE*) of “Kn199” under reduced and optimum nutrient supplies were investigated in relation to yield potential under limited irrigation conditions. A field experiment was set up in 2008 where wheat yield traits such as pre-winter tiller number, post greening plant number, filling spike number were investigated. Wheat plant tissues were also taken at different growth stages and the 1000-grain weight, per spike grain, per plant spike, yield index and sterile spikelet measured after harvest. The results showed that “Kn199” accumulated more dry matter with a greater distribution in kernels than the other genotypes under both low [120 kg(N)·hm⁻²] and normal [180 kg(N)·hm⁻²] nitrogen inputs. Partial factor productivity of applied N (*PFP_N*) in the nitrogen-saving trial was 54.4 kg·kg⁻¹ for “Kn199”, yielding 6 532.5 kg·hm⁻² under 120 kg·hm⁻² N supply. It was 40.6 kg·kg⁻¹, yielding 7 312.5 kg·hm⁻² under 180 kg·hm⁻² N supply. Under lower phosphorous input of 60 kg(P₂O₅)·hm⁻² in long-term nurseries, “Kn199” exhibited the most desirable *PUE* attributes such as high tillering capacity, spike formation and harvest population. With sufficient soil water prior to winter, one or two times of irrigation in spring was enough for “Kn199” to yield 7 500 kg·hm⁻² in North Huang-Huai winter wheat cultivation region. Under the adverse and severe climatic conditions such as extreme frosts, droughts and hot winds, “Kn199” cultivation benefits stable grain yield and food security in the

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KSCX3-EW-N-02)和国家小麦产业技术体系建设专项(CARS-03-05B)资助

** 通讯作者: 李俊明(1964~), 男, 研究员, 主要从事小麦遗传育种研究。E-mail: ljm@sjziam.ac.cn

赵慧(1979~), 女, 博士研究生, 主要从事小麦遗传育种研究。E-mail: applecong@126.com

收稿日期: 2011-05-15 接受日期: 2011-06-13

region.

Key words Kn199, Winter wheat, Nitrogen use efficiency, Phosphorous use efficiency, Yield potential

(Received May 15, 2011; accepted Jun. 13, 2011)

黄淮海区在我国小麦生产中占有重要地位, 该区域小麦生长过程中常遇到灾害性天气, 如冻害、低温冷害、干旱和干热风等诸多不利因素, 严重影响着小麦的大面积高产稳产。随着高产、高效、优质农业的发展, 化肥在我国农业中的地位愈来愈重要。然而我国的化肥利用率由于受单施肥、施肥量和施肥方法不当等因素影响, 导致化肥中养分的当季利用率很低, 其中氮肥为 30%~35%, 磷肥为 10%~25%, 钾肥为 35%~65%, 均仅为发达国家的 60%左右^[1], 不仅造成直接经济损失, 而且部分地区因施肥过量已引起地表富营养化、地下水和蔬菜硝态氮含量超标、氧化亚氮排放量增加等环境问题^[2]。因此, 提高化肥利用率、灌水生产效率和水土耦合增产效率、减少因施肥引起的环境问题, 已成为全球关注的课题。

近年来黄淮海区培育出一批优质、高产、节水、省肥新品种, 在生产上发挥了节水、节肥和增产的重要作用。利用染色体工程技术培育的小麦新品种“科农 199”^[3]以其高产、稳产和广适性表现突出而成为黄淮冬麦区主栽品种之一。本文以该品种的氮肥、磷肥、水分运筹及品种产量潜力为研究对象, 进行了 2 年的田间试验示范, 旨在探讨“科农 199”小麦的高产稳产特征, 为节水、节肥、高产栽培和进一步挖掘新品种的高产潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2008~2010 年在中国科学院栾城农业生态系统试验站进行。该站位于北纬 37°53', 东经 114°41', 海拔高度 50.1 m, 属暖温带半湿润半干旱季风气候, 光热资源较丰富, 年总辐射量 5 433 kJ·cm⁻², 年日照时数 2 608 h, 年平均气温 12.3 °C。多年平均降水量 480.7 mm, 且主要集中在 7~9 月份, 雨热同期。冬小麦生长季的降雨量平均为 100~150 mm, 远不能满足小麦生长的水分需求(450 mm)。该站地处太行山山前平原, 地势平坦, 土层深厚, 土壤类型为褐土, 质地为壤土。土壤较肥沃, 耕层(0~30 cm)有机质含量 12.0~13.0 g·kg⁻¹, 全氮 0.7~0.8 g·kg⁻¹, 碱解氮 60~80 mg·kg⁻¹, 速效磷 15~20 mg·kg⁻¹, 速效钾 150~170 mg·kg⁻¹。0~30 cm 土体的平均容重 1.47 g·cm⁻³, 平均田间持水量(容积)34%。

2008 年小麦收获前, 河北省中北部地区遇到了

连阴雨天气, 多数小麦品种存在不同程度的穗发芽情况, 致使种子发芽率降低。2008 年秋播, 全区均加大了播量, 加之冬前气温偏高, 造成越冬前群体偏大。在冬春少雨雪的情况下, 根据土壤墒情的实际情况, 春季通过适时灌溉调控群体, 防止倒伏发生。在小麦灌浆中后期(5 月 26~29 日), 连续 4 d 最高温度 38~42 °C, 长时间风力大于 3 m·s⁻¹, 瞬间风力达 83 m·s⁻¹, 干热风对本区小麦生产造成了严重影响, 绝大多数品种比常年减产。

2009~2010 年度, 河北省冀中南麦区小麦生产经历了冬前降温早、积温少, 越冬期温度低、冻害重, 春季持续低温、生育期延迟等不利条件, 石家庄周边地区(包括本试验站服务的 5 个示范县)更是遭遇前所未见的秋冻、暴雪等自然灾害, 部分示范县小麦冻害严重, 一些品种近乎绝收, 多数品种单产降低 5%~10%, 在一定程度上影响了本试验站工作的开展。

1.2 氮肥控制试验

1.2.1 小区定位试验

试验材料为“科农 199”、“石 4185”、“京 411”、“小偃 54”和“科农 9204”5 个品种。设置 N1 和 N2 两个施氮量处理, 氮用量分别为 60 kg·hm⁻² 和 180 kg·hm⁻²。播种前两个处理 0~20 cm 土壤养分状况为: 有机质含量为 10 g·kg⁻¹, 碱解氮分别为 25 mg·kg⁻¹(N1) 和 61 mg·kg⁻¹(N2), 速效磷分别为 48 mg·kg⁻¹(N1) 和 52 mg·kg⁻¹(N2), 速效钾分别为 79 mg·kg⁻¹(N1) 和 83 mg·kg⁻¹(N2)。

播种日期为 2008 年 10 月 12 日。试验小区面积为 1.25 m×4.00 m, 行距 25 cm, 株距 5 cm, 每小区 5 行, 重复 4 次, 裂区设计, 施氮量为主区, 品种为副区。磷肥用磷酸钙, 用量为 105 kg(P₂O₅)·hm⁻²; 钾肥用硫酸钾, 用量为 135 kg(K₂O)·hm⁻²; 氮肥用普通尿素。播前全部磷、钾肥和 2/3 氮肥作为底肥施入, 1/3 氮肥在拔节期追肥。四叶期定苗, 基本苗为 100 株·m²。其余管理同一般高产田, 做到足墒播种, 春季浇起身、开花和灌浆水。

在小麦拔节期、挑旗期、开花期和成熟期分别取 10 株小麦, 分器官称取鲜重, 然后在 105 °C 杀青 30 min, 再在 80 °C 烘干至恒重, 称干重。在收获时, 每小区取 10 株(去除边行)进行室内考种, 用传统方法调查单株穗数、每穗粒数、单株产量和千粒重等农艺性状, 并计算出收获指数^[4]。

1.2.2 大田生产试验

试验材料为小麦品种“科农 199”。试验田为高产地块,耕作层土壤有机质含量 $12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验设 6 个氮肥水平: N0[0 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$,不施氮肥]; 节肥处理 N1[60 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$], N2[120 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$], N3[180 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$]; 普通种植试验 N4[225 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$]; 高产处理 N5[270 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$](表 1)。

表 1 大田生产试验不同氮肥处理的施肥量

Table 1 Application rates of different fertilizers of nitrogen input treatments of the production test $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	底肥 Basic fertilizer		追肥 Top dressing fertilizer
	尿素 (NH_2) ₂ CO	磷酸二铵 (NH_4) ₂ HPO ₄	尿素 (NH_2) ₂ CO
N0	—	—	—
N1	—	300.0	—
N2	150.0	300.0	—
N3	150.0	300.0	130.5
N4	150.0	300.0	228.0
N5	150.0	300.0	325.5

播种日期为 2008 年 10 月 6 日。播种方式 4 密 1 稀,平均行距 15 cm,基本苗密度为 255~270 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其余管理同一般高产田,做到足墒播种,春季起身~拔节、开花~灌浆期间浇灌 2 水。产量性状测定采用田间之字形取样,5 个样点,每样点取 1 m^2 统计穗数,收获后每个样点 10 株进行室内考种,传统方法调查单株穗数、每穗粒数、千粒重等农艺性状。测产采用收割机收获,收获面积 $33\times 10^{-3} \text{ hm}^2$ 。并按如下公式计算氮肥偏生产力^[5]:

$$\text{氮肥偏生产力}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}) = \frac{\text{施氮处理产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})}{\text{施氮量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})} \quad (1)$$

1.3 磷肥控制试验

试验材料为“科农 199”和“石 4185”。设置 4 个磷(P_2O_5)处理: P0(0), P1(60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), P2(180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), P3(360 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。试验在养分池中进行,养分池四周水泥墙隔离,面积为 2 $\text{m}\times 2 \text{ m}$ 。每池播种 8 行,行距 25 cm,基本苗密度为 180 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,每个品种 4 行。2008 年 10 月 13 日播种。在小麦的各个生长期进行喷药、浇水等田间精细管理,确保不同处理除磷外其他生长条件一致。

施入的磷肥为磷酸二铵,钾肥为氯化钾,全部作为基肥施入。氮肥为尿素,分基肥和追肥两次等量施入。试验小区随机区组排列,重复 3 次。养分池内不同肥料具体施用量如表 2。

在小麦越冬前和灌浆期用传统方法数养分池内分蘖数和穗数,并在收获后测产。

表 2 磷肥试验不同处理的肥料施用量

Table 2 Application rates of different fertilizers of phosphorous input treatments of nutrition-pool test $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	磷酸二铵 (NH_4) ₂ HPO ₄	尿素 (NH_2) ₂ CO	氯化钾 KCl
P0	0	130.4	72.0
P1	53.0	121.0	72.0
P2	169.0	102.2	72.0
P3	267.0	83.4	72.0

1.4 水分控制试验

供试品种为“科农 199”、“衡 4399”、“邯 6172”、“石麦 18”、“石麦 15”和“石 4185”,其中“石 4185”为生产对照种。

2009 年 10 月 5 日足墒播种。小区为 12 行区,面积 $10 \text{ m}\times 1.8 \text{ m}$ 。行长 10 m,行距 15 cm,等行距播种,基本苗密度为 300 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,随机区组设计,重复 3 次。播种后统一浇底墒水。采用 1 m 双行的方法,在小麦出苗 1 周后调查全部试验小区的出苗情况,在越冬前调查株数和分蘖数,在返青后调查存活株数,在返青期、起身期、拔节期调查分蘖数;在灌浆期调查穗数,统计 10 个主茎穗的小穗数、不育小穗数和穗粒数。机械收获测产,测千粒重。

相关指标数据按如下公式计算:

$$\text{冬前平均分蘖率}(\%) = \frac{4 \text{ 个水处理的冬前分蘖数之和}}{\text{基本苗密度}\times 4} \quad (2)$$

$$\text{越冬存活率}(\%) = \frac{\text{返青单株数}}{\text{出苗数}}\times 100\% \quad (3)$$

$$\text{返青期分蘖率}(\%) = \frac{\text{返青期总蘖数}}{\text{返青单株数}} \quad (4)$$

采用底肥和追肥相结合的施肥方式,两项折合纯氮 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。底肥用量:磷酸二铵 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,尿素 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,硫酸锌 22.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。追肥:尿素 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,春季第 1 次浇灌时(3 月 22 日)施用。

采用返青水(3 月 22 日)+孕穗水(5 月 2 日)+灌浆水(6 月 2 日)的灌溉模式,每次灌溉 50 m^3 。具体灌溉时间见表 3。

表 3 水分控制试验不同处理的灌溉日期

Table 3 Dates of irrigation of different treatments of water test

处理 Treatment	灌溉日期(月-日) Irrigation date (month-day)		
	返青期 Re-greening stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage
W0	—	—	—
W1	03-22	—	—
W2	03-22	05-02	—
W3	03-22	05-02	06-02

1.5 产量潜力试验

1.5.1 2008~2009 年度

试验材料为“石 4185”、“邯 6172”、“冀 5265”、“石新 828”和“科农 199”5 个主栽品种。播种日期为

10月5日。试验采用随机区组设计, 小区面积 $1\text{ m} \times 12\text{ m}$, 等行距播种, 6行区, 行距 16 cm , 基本苗密度为 $240\sim 270\text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。重复3次。整个小区机械收获, 测产。

水肥运筹: 高产地块耕作层土壤有机质含量 $12.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $58\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。播前造足底墒, 施足底肥(施肥量: 尿素 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷酸二铵 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 硫酸锌 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。出苗后加强生产管理, 春季浇灌拔节水(追施尿素 $187.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、开花水和灌浆水。

1.5.2 2009~2010年度

试验材料为“石 4185”、“邯 6172”、“石新 828”和“科农 199”4个主栽品种。播种日期为10月6日。试验小区设计及田间管理基本同上年。

特殊管理: 2009年11月2日寒流过后近半数品种受到冻害。在冬季死苗死茎较多、越冬群体偏小的情况下, 特别加强早春管理, 春季第1水提早到返青期(3月23日)。

1.6 数据统计分析方法

试验数据基于Microsoft Excel 2003进行计算分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥对“科农 199”生长及产量的影响

2.1.1 对干物质积累的影响

由表4可知, 随生育进程进行, 小麦植株干物质积累量逐渐增加。在低氮(N1)条件下, 品种间比较, 拔节期: “小偃 54”>“石 4185”>“京 411”>“科农 199”>“科农 9204”; 挑旗期: “小偃 54”>“科农 199”>“石 4185”>“京 411”>“科农 9204”; 开花期: “小偃 54”>“科农 199”>“京 411”>“石 4185”>“科农 9204”; 成熟期: “科农 199”>“石 4185”>“科农 9204”>“京 411”>

“小偃 54”。

施纯氮 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2)条件下, 品种间比较, 拔节期: “小偃 54”>“科农 199”>“石 4185”>“京 411”>“科农 9204”; 挑旗期: “小偃 54”>“京 411”>“科农 199”>“石 4185”>“科农 9204”; 开花期: “科农 199”>“石 4185”>“小偃 54”>“科农 9204”>“京 411”; 成熟期: “科农 199”>“石 4185”>“科农 9204”>“小偃 54”>“京 411”。

以上结果表明, 低氮水平下, “科农 199”的干物质积累速度迅速提高, 特别在成熟期, 干物质积累量升至第1; 在施纯氮 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下, 从开花期到成熟期, “科农 199”都表现出最高的干物质积累量。开花到成熟是干物质积累关键期, 这一时期确保充足的肥水供应, 是提高籽粒产量的基础。两个施氮量处理比较, 增加施氮量, 干物质积累量增加, 表明增施氮肥是获得较高生物产量的基础。高产、氮高效品种如“科农 199”在这一时期吸收养分和积累干物质较多, 在一定程度上保证了该品种有较高的产量。

2.1.2 对成熟期干物质分配的影响

由表5可以看出, 低氮条件(施氮量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下, 成熟期植株干物质主要分配在籽粒中。“科农 199”籽粒分配量最高, 达 $6.71\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$, 分配比例为 54.29% 。高氮条件(施氮量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下, “科农 199”也能获得较高的籽粒分配量($8.40\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$)。

同一施氮水平, 不同品种间比较, 无论施纯氮为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 还是 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, “科农 199”、“科农 9204”、“石 4185”3个品种的籽粒中干物质分配比例较大。两个施氮量处理间比较, 增施氮肥植株干物质积累量增加, 有利于获得较高籽粒产量, 同时“科农 199”在两个处理中均表现出很高的籽粒分配量和单株积累量。

表4 不同氮肥水平下不同小麦品种的干物质积累动态

Table 4 Dynamic changes of dry matter accumulation of different wheat varieties under two nitrogen levels $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$

氮肥水平 Nitrogen level [$\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$]	品种 Variety	拔节期 Jointing stage	挑旗期 Flagging stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Mature stage
60 (N1)	科农 199 Kn199	217.85	648.72	884.59	1 847.86
	石 4185 Shi4185	223.35	633.58	863.27	1 836.26
	京 411 Jing411	218.83	612.56	880.36	1 522.83
	小偃 54 Xiaoyan54	237.66	684.42	892.48	1 482.60
	科农 9204 Kn9204	208.91	596.73	845.64	1 773.69
180 (N2)	科农 199 Kn199	371.75	980.62	1 384.83	3 206.95
	石 4185 Shi4185	368.06	975.68	1 360.55	3 187.60
	京 411 Jing411	328.44	984.38	1 280.75	2 841.87
	小偃 54 Xiaoyan54	373.27	991.35	1 332.88	2 952.16
	科农 9204 Kn9204	308.94	946.73	1 320.46	3 046.50

2.1.3 对产量及产量构成因素的影响

小区试验结果(表 6)表明, 品种间单株产量相比较, 低氮(施氮量为 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平下: “科农 9204”>“科农 199”>“石 4185”>“京 411”>“小偃 54”, 高氮(施氮量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平下: “科农 9204”>“石 4185”>“科农 199”>“小偃 54”>“京 411”, 表明无论高氮处理或低氮处理, “科农 199”均可获得较高籽粒产量。

一般说来, 高产高效品种具有高的收获指数^[6]。由表 6 亦可知, 施氮量为 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平下, 各品种收获指数比较: “科农 9204”>“京 411”>“科农 199”>“石 4185”>“小偃 54”; 施氮量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平下: “科农 9204”>“石 4185”>“科农 199”>“京 411”>“小偃 54”。以上结果表明, 不同施氮量条件下“科农 199”均可获得较高的收获指数, 且低氮($60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平下, 各品种收获指数均高于高氮($180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)水平。

大田试验结果表明(表 7), “科农 199”在一年不

施用氮肥情况下(N0)的产量为 $6\ 390 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 仅施用底肥(N1 和 N2)与不施肥处理(N0)相比增产效果不明显。春季追施少量尿素(N3)可显著增大收获群体, 提高单产。增加氮肥施用量(N4 和 N5)也能增大群体和提高小麦产量^[7]。田间节肥处理(N2)“科农 199”单产 $6\ 532.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 氮肥偏生产力达 $54.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 田间节肥处理(N3)“科农 199”单产 $7\ 312.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 氮肥偏生产力达 $40.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施纯氮超过 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N4 和 N5)时, 增产效果不显著, 氮肥偏生产力大大降低。

2.2 磷肥对“科农 199”生长及产量的影响

由表 8 可知, 不同施磷处理下, “科农 199”和“石 4185”的冬前分蘖数均随施磷量的增加而增加, 但施磷量达到 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2)后, 两个小麦品种的冬前分蘖数增加幅度变小。不同施磷量下, “科农 199”的冬前分蘖数均比对照品种“石 4185”多, 施磷量为 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P1)、 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2)和 $360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P3)时, 分别高 59.49%、36.86%和 31.41%。

表 5 不同氮肥水平下不同品种成熟期单株干物质分配状况

Table 5 Dry matter accumulation and distribution of different wheat varieties during maturity stage under two nitrogen levels

氮肥水平 Nitrogen level [kg(N)·hm ⁻²]	品种 Variety	茎叶 Stem and leaf		颖壳 Glume		籽粒 Grain		单株积累量 Accumulation per plant (g)
		分配量 Distribution amount (g·plant ⁻¹)	分配比例 Distribution ratio (%)	分配量 Distribution amount (g·plant ⁻¹)	分配比例 Distribution ratio (%)	分配量 Distribution amount (g·plant ⁻¹)	分配比例 Distribution ratio (%)	
60 (N1)	科农 199 Kn199	4.37	35.36	1.28	10.35	6.71	54.29	12.36
	石 4185 Shi4185	4.56	37.44	1.30	10.67	6.32	51.88	12.18
	京 411 Jing411	3.65	35.61	1.44	14.05	5.16	50.34	10.25
	小偃 54 Xiaoyan54	3.46	35.97	1.18	12.27	4.98	51.76	9.62
	科农 9204 Kn9204	4.17	35.19	1.15	9.70	6.53	55.11	11.85
180 (N2)	科农 199 Kn199	10.15	46.43	3.31	15.14	8.40	38.43	21.86
	石 4185 Shi4185	10.11	45.79	3.58	16.21	8.39	38.00	22.08
	京 411 Jing411	9.07	46.87	2.92	15.09	7.36	38.04	19.35
	小偃 54 Xiaoyan54	8.90	43.76	3.54	17.40	7.90	38.84	20.34
	科农 9204 Kn9204	10.03	46.24	3.18	14.66	8.48	39.10	21.69

表 6 不同氮肥水平下不同品种单株产量及产量构成因素

Table 6 Yield and yield components of different wheat varieties under different nitrogen levels

氮肥水平 Nitrogen level [kg(N)·hm ⁻²]	品种 Variety	千粒重	穗粒数	单株穗数	单株产量	收获指数
		1000-grain weight (g)	Grains per spike	Spikes per plant	Grain weight per plant (g)	Harvest index (%)
60 (N1)	科农 199 Kn199	38.00	34.28	4.00	5.20	49.38
	石 4185 Shi4185	37.88	32.05	4.10	4.96	48.78
	京 411 Jing411	38.66	32.37	3.20	4.46	50.05
	小偃 54 Xiaoyan54	35.60	31.22	3.70	4.12	48.38
	科农 9204 Kn9204	38.34	34.45	4.00	5.25	50.60
180 (N2)	科农 199 Kn199	38.65	30.60	6.60	7.85	39.43
	石 4185 Shi4185	38.80	30.85	6.40	7.90	39.67
	京 411 Jing411	38.90	30.80	5.80	6.70	38.74
	小偃 54 Xiaoyan54	36.55	28.40	7.20	6.95	38.67
	科农 9204 Kn9204	38.70	30.80	6.70	8.10	40.50

在灌浆期统计穗数,“科农 199”和“石 4185”两品种的穗数均随施磷量增加而增加,但施磷量达到 180 kg·hm⁻²(P2)后成穗数增加变缓。两品种间在不同施磷量下穗数无明显差异。

收获后测产,随着施磷量的不断增加,产量也不断提高,其中“科农 199”的增产幅度分别为 131.6%(从 P0 到 P1)、42.5%(从 P1 到 P2)、12.0%(从 P2 到 P3)、“石 4185”的增产幅度分别为 114.4%(从 P0 到 P1)、50.1%(从 P1 到 P2)、11.8%(从 P2 到 P3)。从不施磷肥到施磷肥 180 kg·hm⁻²,小麦产量都有较大的增长空间,但超过 180 kg·hm⁻²(P2)后,产量增幅明显降低,再结合肥料的经济投入成本,本研究认为小麦高产的最佳磷肥施用量为 180 kg·hm⁻²。

2.3 水分对“科农 199”生长及产量的影响

2.3.1 出苗情况

在小麦播种后,统一浇底墒水。出苗 1 周后(2009 年 10 月 18 日)调查各试验小区的出苗情况,各品种平均出苗数表现为:“衡 4399”>“石麦 15”>“石麦

18”>“石 4185”>“科农 199”>“邯 6172”(表 9)。

2.3.2 冬前生长情况

至 2009 年 11 月 2 日,各水分处理不同品种的群体为 915~1 020 万茎·hm⁻²,单株分蘖率 3.08%~3.39%(表 10),小麦长势良好。且在只浇底墒水的情况下(W0),“科农 199”的冬前分蘖数达 1 018.5×10⁴·hm⁻²,结合表 9 中该品种の出苗情况,“科农 199”显示了极强的分蘖能力,且在各水分处理中“科农 199”的冬前分蘖数均位于 6 个品种之首。

2.3.3 越冬能力

2010 年 3 月 25 日,统计返青后存活的单株数量,发现越冬后基本群体仅为 163.5~241.5 万茎·hm⁻²。不同品种的越冬能力存在显著差异,不浇返青水的情况下(W0)越冬存活率分别为 55.3%~77.2%(表 11)。由表 11 还看出,早期灌溉显著提高了返青期存活的单株数量,越冬存活率(W1)提高到 64.0%~80.9%。“石麦 15”和“科农 199”都表现出较强的抗寒能力。

表 7 大田试验中氮肥用量对“科农 199”产量的影响
Table 7 Effects of nitrogen input on yield and yield components of “Kn199” in the production test

氮肥用量 Nitrogen level [kg(N)·hm ⁻²]	穗数 Spikes (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity from applied N (kg·kg ⁻¹)
0 (N0)	609.0	33.2	38.8	6 390.0	—
60 (N1)	621.0	33.5	38.5	6 487.5	—
120 (N2)	618.0	33.7	38.5	6 532.5	54.4
180 (N3)	657.0	34.4	39.0	7 312.5	40.6
225 (N4)	678.0	34.8	39.1	7 725.0	34.3
270 (N5)	697.5	34.5	39.0	7 837.5	29.6

表 8 不同磷肥水平对“科农 199”产量性状的影响
Table 8 Yield traits of “Kn199” under different phosphorus levels

磷肥用量 Phosphorus level [kg(P ₂ O ₅)·hm ⁻²]	品种 Variety	冬前分蘖数 Tillers before winter (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗数 Spikes (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)
0 (P0)	科农 199 Kn199	0	100.7	2 417.5
	石 4185 Shi4185	0	97.0	2 530.0
60 (P1)	科农 199 Kn199	126.0	161.3	5 600.0
	石 4185 Shi4185	79.0	167.7	5 425.0
180 (P2)	科农 199 Kn199	177.0	228.3	7 982.5
	石 4185 Shi4185	129.3	238.3	8 145.0
360 (P3)	科农 199 Kn199	189.7	256.7	8 942.5
	石 4185 Shi4185	144.3	254.7	9 105.0

表 9 不同水分处理不同品种の出苗情况
Table 9 Number of emerged seedlings of different wheat varieties under different irrigation treatments 10⁴·hm⁻²

品种 Variety	W0	W1	W2	W3	平均 Average
石 4185 Shi4185	295.5	295.5	297.0	297.0	296.3
石麦 15 Shimai15	295.5	298.5	298.5	298.5	297.8
科农 199 Kn199	295.5	295.5	295.5	295.5	295.5
石麦 18 Shimai18	295.5	297.0	298.5	297.0	296.6
衡 4399 Heng4399	295.5	301.5	300.0	298.5	298.9
邯 6172 Han6172	294.0	295.5	295.5	295.5	295.1

2.3.4 返青期群体动态

2010年3月27日,调查返青期总茎数。由表12可知,不灌溉处理不同品种的返青群体为376.5~676.5万茎·hm⁻²,灌溉后群体扩大到499.5~730.5万茎·hm⁻²。受冻害较重的品种“石4185”灌溉后群体增加32.6%,而抗寒性好的“石麦15”和“科农199”群体仅增加不到8%,且这两个品种分蘖率最高。另外,早春灌溉对返青期单株分蘖率未产生影响,灌溉小区总蘖数较多,但群体增大是由于灌溉小区的有效单株增多造成的,表明早春灌溉能使一些濒临死亡的单株成活下来。

2.3.5 成穗情况

由于冬春季温度低,2009~2010年度小麦生长发育较常年推迟,灌浆期灌溉推迟到6月2日。2010年6月8日,进行田间产量性状调查。由表13看到,灌溉处理比不灌溉处理的穗数多、穗大(小穗数多)、穗部发育好(不育小穗少)、穗粒数多。2次(W2)和3

次(W3)灌溉处理比1次灌溉(W1)显著增加穗数,减少不育小穗数,增加穗粒数;但对小穗数没有明显的影响。从穗部发育指标来看,从W0到W2处理,“科农199”的不育小穗最少,W3处理后“石4185”和“科农199”有较少的不育小穗;同时4种水分处理下,“石麦15”和“科农199”都保持较多穗数,这些优良性状都有利于获得较高的生物学产量。

本年度小麦收获群体较常年偏小30%~40%。本试验不灌溉小区收获群体286.5~457.5万穗·hm⁻²,1次灌溉(W1)小区收获群体316.5~525.0万穗·hm⁻²,2次(W2)和3次(W3)灌溉小区收获群体390.0~529.5万穗·hm⁻²。6个品种1次灌溉(W1)后收获群体增加10%以上,2次灌溉(W2)也能增加部分品种的收获群体,说明春季灌溉对小麦成穗效果显著。

由于群体偏小,本年度小麦穗粒数较常年多10%左右,本试验6个品种穗粒数都较往年明显增加^[8]。6个品种灌溉处理比不灌溉处理穗粒数增加

表 10 不同水分处理不同品种的冬前分蘖情况

Table 10 Tiller number before winter of different wheat varieties under different irrigation treatments

品种 Variety	冬前分蘖数 Tiller number before winter (10 ⁴ ·hm ⁻²)				平均分蘖率 Average tillering rate (%)
	W0	W1	W2	W3	
石 4185 Shi4185	1 015.5	1 008.0	982.5	987.0	3.33
石麦 15 Shimai15	958.5	961.5	979.5	967.5	3.22
科农 199 Kn199	1 018.5	1 021.5	1 009.5	1 015.5	3.39
石麦 18 Shimai18	940.5	967.5	955.5	946.5	3.18
衡 4399 Heng4399	937.5	951.0	940.5	958.5	3.16
邯 6172 Han6172	924.0	921.0	916.5	937.5	3.08

表 11 返青水对不同小麦品种抗寒性的影响

Table 11 Effect of spring irrigation on winter survival of different wheat varieties

品种 Variety	W0		W1	
	返青单株数 Plant number after re-greening (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	越冬存活率 Winter survival rate (%)	返青单株数 Plant number after re-greening (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	越冬存活率 Winter survival rate (%)
石 4185 Shi4185	163.5	55.3	189.0	64.0
石麦 15 Shimai15	228.0	77.2	241.5	80.9
科农 199 Kn199	198.0	67.0	216.0	73.1
石麦 18 Shimai18	187.5	63.5	210.0	70.7
衡 4399 Heng4399	199.5	67.5	214.5	71.4
邯 6172 Han6172	199.5	67.9	210.0	71.1

表 12 返青水对不同小麦品种返青期生长的影响

Table 12 Effect of spring irrigation on tiller number of different wheat varieties during re-greening stage

品种 Variety	W0		W1	
	总蘖数 Tiller number (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	分蘖率 Tillering rate (%)	总蘖数 Tiller number (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	分蘖率 Tillering rate (%)
石 4185 Shi4185	376.5	2.30	499.5	2.64
石麦 15 Shimai15	676.5	2.97	730.5	3.03
科农 199 Kn199	598.5	3.02	645.0	2.99
石麦 18 Shimai18	481.5	2.57	597.0	2.84
衡 4399 Heng4399	580.5	2.91	631.5	2.94
邯 6172 Han6172	541.5	2.71	603.0	2.87

3%左右, 春季 1 次灌溉和多次灌溉之间穗粒数差异不显著。

2.3.6 千粒重和产量情况

试验结果(表 14)表明, 灌溉 1 水(W1)平均提高产量 39%。对于抗寒性好、越冬群体较大的品种如“石麦 15”、“科农 199”来说, 春季灌溉 1 水即可满足高产对水分的需求。“衡 4399”、“邯 6172”、“石麦 18”等抗寒性中等的品种春季灌溉 2 水(W2)也可保

障足够群体, 从而确保产量。冻害较重的“石 4185”灌溉 3 水(W3)可促进籽粒发育, 增加千粒重, 减少产量损失。

2.4 产量潜力试验结果

表 15 给出了 2008~2010 年度参试品种的产量潜力试验结果。“冀 5265”和“科农 199”比对照品种增产 3%左右, 大粒品种“石新 828”受干热风影响粒重大幅度下降, 比对照减产 11.3%。

表 13 不同水分处理对小麦产量构成的影响

Table 13 Effect of different water treatments on the yield components of different wheat varieties

产量构成 Yield component	水分处理 Irrigation treatment	石 4185 Shi4185	石麦 15 Shimai15	科农 199 Kn199	石麦 18 Shimai18	衡 4399 Heng4399	邯 6172 Han6172
穗数 Spikes ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	W0	286.5	457.5	414.0	331.5	351.0	343.5
	W1	316.5	525.0	474.0	385.5	409.5	402.0
	W2	390.0	529.5	490.5	438.0	463.5	456.0
	W3	393.0	526.5	478.5	445.5	468.0	457.5
单株小穗数 Spikelets per plant	W0	19.4	18.9	19.0	19.8	19.2	19.3
	W1	20.5	19.9	19.3	20.3	19.5	19.5
	W2	20.4	20.1	19.2	20.4	19.5	19.6
	W3	20.7	20.0	19.6	20.6	19.3	19.9
单株不育小穗数 Sterile spikelets per plant	W0	2.9	4.1	2.8	3.6	2.8	3.1
	W1	2.2	3.7	2.2	3.1	2.4	2.8
	W2	1.9	3.8	1.8	2.7	2.1	2.5
	W3	1.8	3.5	1.9	2.4	2.1	2.5
穗粒数 Grains per spike	W0	36.2	35.5	35.8	36.1	35.7	35.8
	W1	37.2	36.5	37.2	37.4	37.3	37.2
	W2	37.5	36.6	37.2	37.9	37.6	37.4
	W3	37.8	36.5	37.3	38.1	37.7	37.5

表 14 不同水分处理对不同小麦品种籽粒发育和产量的影响

Table 14 Effect of different water treatments on grain weight and yield of different wheat varieties

项目 Item	水分处理 Irrigation treatment	石 4185 Shi4185	石麦 15 Shimai15	科农 199 Kn199	石麦 18 Shimai18	衡 4399 Heng4399	邯 6172 Han6172
千粒重 1000-grain weight (g)	W0	38.0	37.1	37.2	37.5	37.2	37.3
	W1	39.6	39.2	39.4	39.5	39.4	39.5
	W2	41.0	40.1	40.2	40.9	40.4	40.5
	W3	42.3	40.5	40.8	42.4	40.9	41.2
产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	W0	3 432.0	5 539.5	4 815.0	3 792.0	3 930.0	3 766.5
	W1	4 429.5	7 506.0	6 751.5	5 338.5	5 658.0	5 448.0
	W2	5 416.5	7 647.0	7 153.5	6 649.5	6 667.5	6 573.0
	W3	6 094.5	7 654.5	7 152.0	6 880.5	6 993.0	6 766.5

表 15 2008~2010 年度不同小麦品种的产量潜力

Table 15 Yield potentials of different wheat varieties in different years

品种 Variety	2008~2009		2009~2010	
	产量潜力 Yield potential ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	增幅 Increase rate (%)	产量潜力 Yield potential ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	增幅 Increase rate (%)
石 4185 Shi4185 (CK)	8 397.0	—	6 153.0	—
邯 6172 Han6172	8 517.0	1.4	6 705.0	9.0
冀 5265 Ji5265	8 646.0	3.0	—	—
石新 828 Shixin828	7 449.0	-11.3	6 904.5	12.2
科农 199 Kn199	8 628.0	2.8	7 069.5	14.9

在 2008 年氮肥控制大田生产试验中, 施纯氮 $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下“科农 199”的产量为 $7\ 837.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与此相比, “科农 199”小麦在同年度产量潜力试验中单产 $8\ 628 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 比大田生产高出 10.1%。说明通过栽培措施配套, 小麦生产有 10% 以上的增产潜力。

2009~2010 年度, 冻害发生严重。参试的两个主栽品种“石新 828”和“科农 199”抗寒性好, 大灾之年稳产性好, 尤其是“科农 199”比对照品种“石 4185”增产 14.9%, 大大减轻灾害带来的损失。

3 讨论

选育氮、磷高效小麦品种有利于达到“少投入、多产出、保护环境”的目的, 其关键是提高小麦从低肥土壤中吸收氮、磷的效率。氮肥偏生产力(PFP_N)是指单位投入的肥料氮所能生产的作物籽粒产量, 适合我国目前土壤和环境养分供应量大、化肥增产效益下降的现实, 被国际农学界认为是评价肥料效应的适宜指标^[9]。Dobermann^[10]指出粮食作物氮肥效率比较适宜的目标值, 其中氮肥偏生产力为 $40\sim 70 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。通过本研究表明, “科农 199”小麦氮肥利用效率高: 田间节肥环保处理(施纯氮 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)中单产 $6\ 532.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 氮肥偏生产力高达 $54.4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 田间节肥处理(施纯氮 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)中单产 $7\ 312.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 氮肥偏生产力达 $40.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。叶优良等^[11]的研究结果表明, 优化施氮处理氮肥施用量在 $125.1\sim 164.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间, 比农民传统施肥减少 38.61%~53.29%, 但小麦产量提高 0.87%~10.44%, 同时提高了氮素利用效率。

我国的磷肥消费量居世界首位, 约占世界磷肥消费量的 25%^[12], 磷肥能显著增加作物产量^[13-14], 但肥料投入过高不仅造成资源浪费, 还会给生态环境带来一定的破坏。结合本试验的研究结果, 从生产应用推广角度来看, 小麦高产对磷肥的要求是施纯磷 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。针对黄淮海区土壤氮磷大量累积的情况, 生产上必须坚持“稳氮、控磷、补钾”的施肥原则, 氮、磷、钾合理使用。一般底施纯氮 $180\sim 225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 五氧化二磷 $105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 缺钾麦田施氧化钾 $75\sim 105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 即可保障亩产千斤的养分需求。

水分是作物生长的必要条件, 同时也是提高作物产量的重要因素^[15-17]。姚艳荣等^[18]发现“科农 199”在不同灌溉水平下水分利用效率比其他节水品种都高出 4% 以上, 达到显著水平。本研究表明, “科农 199”在冀中南冬麦区高产麦田底墒水充足的条件下, 春季灌水 1~2 次可满足亩产千斤的水分需求。在冬春寒冷干旱造成越冬群体偏小的情况下, 春季灌水 2 次可增加穗粒数和千粒重, 并获得 $6\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量。

从 2 年品种生产潜力试验结果和多年生产实践经验来看, 黄淮海区品种选择要把抗逆性和稳产性放到突出位置, 必须加强生产用种抗寒(包括冰冻和倒春寒)、抗干热风、抗穗发芽、抗倒伏等关键性状的把握。特别是现阶段极端气候高发频发, 导致小麦生产中的各种灾害也有频率增加、偏重发生的趋势。因此, 推广“科农 199”这类抗逆稳产品种, 在灾害发生时比普通品种减轻损失 5%~10%, 可提高我国小麦生产可持续性, 有助于保障国家粮食安全。

参考文献

- [1] 郭林, 罗迎娣, 袁琳, 等. 关于提高我国化肥利用率的探讨[J]. 河南化工, 2007, 24(12): 6-9
- [2] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 33-40
- [3] 李俊明, 张相岐, 张爱民, 等. 高产广适小麦新品种——科农 199[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 368
- [4] 刘兆晔, 于经川, 杨久凯, 等. 小麦生物产量、收获指数与产量关系的研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 182-184
- [5] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. Plant and Soil, 1981, 58(1/3): 177-204
- [6] 童依平, 李继云, 李振声. 不同小麦品种(系)吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究. . 影响吸收效率的因素分析[J]. 西北植物学报, 1999, 19(3): 393-401
- [7] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. Using in-season nitrogen management and wheat cultivars to improve nitrogen use efficiency[J]. Soil Sci Soc Am J, 2011, 75(3): 1-8
- [8] 李月华. 石家庄市二零零九年种麦技术建议[EB/OL]. [2009-09-28]. http://www.njct.gov.cn/kuaiyitong/newspaper/2009/2009-07/newspaper_09_07_1text01.html
- [9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924
- [10] Dobermann A. Nitrogen use efficiency—state of the art[R]. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers Frankfurt, Germany, 2005
- [11] 叶优良, 黄玉芳, 刘春生, 等. 氮素实时管理对冬小麦产量和氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1578-1584
- [12] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费. . 磷肥消费和需求[J]. 土壤, 2004, 36(2): 113-116
- [13] 关军锋, 李广敏. 施磷对限水灌溉小麦根冠及产量的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 102-105
- [14] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 不同施肥制度对作物产量及土壤磷素肥力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 885-889
- [15] Abayomi Y A, Wright D. Effects of water stress on growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. Trop Agr, 1999, 76(2): 120-125
- [16] Ali M H, Hoque M R, Hassan A A, et al. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat[J]. Agr Water Manage, 2007, 92(3): 151-161
- [17] Balwinder-Singh, Humphreys E, Eberbach P L, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule[J]. Field Crop Res, 2011, 121(2): 209-225
- [18] 姚艳荣, 贾秀领, 马瑞昆, 等. 冬小麦田间水分反应特性产量评价指标研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 70-78