

华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析

崔振岭¹, 陈新平¹, 张福锁¹, 徐久飞², 石立委², 李俊良²

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094; 2. 青岛农业大学 植物科技学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 针对近年来华北平原水肥投入不断增加而小麦单产徘徊不前的局面, 本研究对山东省惠民县小麦的施肥现状和影响小麦产量的主要因素进行了调查。结果表明, 研究地区小麦季农民习惯的氮磷钾肥投入量在不同农户间差异较大, 平均为 $424 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$, $226 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$, $88 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$, 其中氮磷肥用量已远超过同期作物养分消耗量。在现有小麦产量水平和施肥水平条件下, 土壤有机质含量和亩穗数对小麦产量的贡献最大, 其次为土壤速效磷含量和穗粒数, 土壤速效钾和千粒重与小麦籽粒产量没有明显相关性。由于过量氮磷肥施用和高的土壤速效钾含量, 不同农户间施肥量的差异对小麦产量影响较小。

关键词: 肥料用量; 土壤肥力; 产量结构; 有机质; 亩穗数

中图分类号: S14 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2008)增刊-0224-06

Analysis on Fertilizer Applied and the Central Factors Influencing Grain Yield of Wheat in the Northern China Plain

CUI Zhen-ling¹, CHEN Xin-ping¹, ZHANG Fu-suo¹, XU Jiu-fei², SHI Li-wei², LI Jun-liang²

(1. College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. College of Plant Science and Technology, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming to the status which grain yield of wheat wasn't increase by increasing fertilizer and water quantity, a farmer's fertilization inquiry coupled with soil and grain yield analysis was conducted to analyze the central factors influencing grain yield of wheat in Huimin county, Shandong province. The results showed that, the farmer applied about 424 kg/ha N , $226 \text{ kg/ha P}_2\text{O}_5$ and $88 \text{ kg/ha K}_2\text{O}$ included organic fertilizer to wheat in investigated sites, and the amount of N and P fertilizer applied was more than crop N and P uptake. Significant farmer-to-farmer differences in fertilizer rate were found. Under farmer's fertilization and soil fertility condition, grain yield of wheat had close relation with soil organic matter and spike number per acreage, weak relation with soil Olsen-P and seed number per spike and no relation with soil exchanged K and weight per thousand seeds. Added increment of fertilizer didn't increase grain yield of wheat with the farmer's fertilization practice because of high N and P fertilizer applied and high soil exchanged K content.

Key words: Fertilizer quantity; Soil fertility; Yield components; Organic matter; Spike number per acreage

对建国以来我国小麦生产发展历史分析可以看出, 小麦单产的提高在总产的提高中发挥了重要的作用。1961-1997年, 我国小麦总产从0.14亿t增加到1.23亿t, 其中单产增加了6.3倍, 而收获面积仅增加了18%。肖世和^[1]研究认为, 解决中国粮食生产问题的瓶颈是努力提高小麦产量。然而近几年我国小麦单产出现徘徊不前甚至略有降低的趋势, 2003年全国小麦平均单产仅为 3.91 t/hm^2 , 比1997年不仅没有增加, 反而降低了5%^[2]。

小麦单产的提高主要归功于栽培环境的改善和新品种的推广利用, 其中栽培环境的改善主要包括土壤肥力的提高、水肥投入的加大和栽培技术的进步等^[3]。调查研究表明, 作为小麦、玉米主产区的华北平原水肥的投入已远远超过达到当前作物产量的水肥需求量^[4-6], 而且生产上大面积应用的小麦品种均为丰产性好、抗逆性强的品种, 产量潜力均在 $7.5 \sim 9 \text{ t/hm}^2$ 以上^[7]。没有实现均衡增产是限制该地区小麦产量进一步提升的主要原因, 以1995年山

收稿日期: 2007-09-08

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD10B03; 2006BAD10B08); 国家自然科学基金项目(30700478)

作者简介: 崔振岭(1978-), 男, 山东东营人, 副教授, 主要从事养分资源管理研究。

通讯作者: 陈新平(1968-), 男, 安徽宣城人, 博士, 教授, 主要从事植物营养研究。

东省为例,小麦单产超过 400 kg 的县市 39 个,其中诸城市、寿光市和桓台县已连续 2 年突破 6 750 kg/hm²,并出现了安丘千儒林连续多年超过 8 250 kg/hm²的村,然而当年山东省的小麦平均产量仅为 4 500 kg/hm²^[8],说明高产或超高产典型固然重要,但均衡增产是实现小麦总产再次突破的关键。如何准确寻找并突破现有农业生产中的主要限制因子,实现小麦的均衡增产成为当前小麦生产中亟待研究解决的重要问题。本研究从受人为因素影响最大的麦田养分投入、土壤肥力和产量构成因素入手,对影响小麦籽粒产量的主因素进行了分析,以期发现问题,找出规律,为小麦单产的再次突破打下基础。

1 材料和方法

2004 年 8 月,利用地理信息系统和 GPS 定位将山东惠民县分成 53 个均匀的 5 km×5 km 网格,在每个网格中心附近选取有代表性村庄作为调查点,每个村庄随机选取 5~10 户农民进行调查。调查的主要内容包括小麦主栽品种、种植面积、常年平均产量、施肥时期、肥料品种、肥料用量、灌水时间、灌水量和其他田间管理等,本研究共调查小麦农户 370 户。

选取惠民县具有代表性的中高产麦田 101 户进行田间试验研究,其中 2002 年 39 户,2003 年 62 户。在小麦播种前按“S”型用土钻取 5~10 点 0~30 cm 混合土样,土壤混匀风干后,用铬酸氧还滴定的外热源法测定土壤有机质;0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗吸光光度法测定土壤速效磷;1 mol/L NH₄Ac 浸提-火焰光度法测定土壤交换性钾。在农民每次施肥后调查农民施入化肥和有机肥的用量,化肥养分

含量按肥料包装袋的养分计算;有机肥养分含量参照《中国有机肥料养分数据集》的参数进行估算^[9]。在小麦灌浆后期每块田块选取有代表性的长势均匀的 1 m 样段 3~4 个测定亩穗数,在每个样段中顺序取 20 穗小麦测定穗粒数,小麦收获时取具有代表性的长势均匀的 1 m² 样方 2 个,收获脱粒后烘干计产(冬小麦籽粒产量以 15% 水分计),随机取收获后的小麦 500 粒测千粒重。田间管理由农民自己掌握。

2 结果与分析

2.1 小麦生产和施肥现状评价

惠民县土壤主要以壤质和沙质潮土为主,小麦品种以鲁麦 23 改良系、潍麦 8 号和淄麦 12 等大穗型品种为主,常年平均产量为 6~7 t/hm²。小麦基肥以磷酸二铵、尿素和土杂肥为主,部分农民施用复合肥,大部分农户只在小麦返青-起身期间进行 1 次追肥,部分农户在小麦拔节-孕穗期间追施第 2 次肥料,肥料以尿素和碳铵为主。农民习惯的肥料投入中氮肥用量最大,最高为 919 kg/hm²,最低为 143 kg/hm²,平均用量为 424 kg/hm²,其中有机肥带入 59 kg/hm²;磷肥最高用量为 726 kg/hm²,最低为不施磷肥,平均用量为 226 kg/hm²,有机肥和追肥带入较少;钾肥最高用量为 635 kg/hm²,最低为不施钾肥,平均用量为 88 kg/hm²,其中 60% 为有机肥带入。氮肥用量中,165 kg/hm² 作为基肥在播前翻耕入土,260 kg/hm² 在春后随水撒施,基追比例为 1:1.6。春后 2 次追肥农户的氮肥用量远远超过一次追肥农户的氮肥用量,施用有机肥农户的磷钾肥用量并没有相应减少,说明农民施肥随意性很大,对合理施肥量没有明确的概念,大部分农民施肥时没有考虑有机肥带入的养分量(图 1,表 1)。

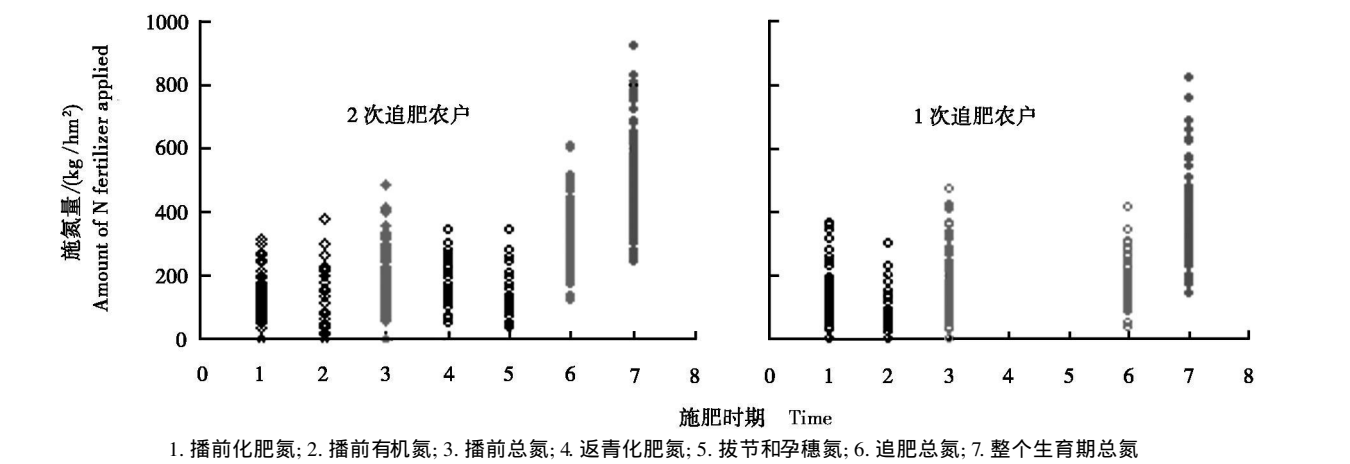


图1 小麦季不同生育时期农民习惯的氮肥投入量

Fig. 1 The amount of N fertilizer applied to winter wheat in different growth stage

表 1 不同户型农民小麦季磷钾投入状况

Tab. 1 The amount of P and K fertilizer applied to winter wheat in manured and nonmanured farmers

户型 Family	户数 No.	有机肥/(kg/hm ²) Organic fertilizer		基施化肥/(kg/hm ²) Fertilizer supplied before planting		追施化肥/(kg/hm ²) Fertilizer supplied at growing stage		总量/(kg/hm ²) Amount	
		P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
无有机肥户 Organic fertilizer no supplied family	166	—	—	202±97	30±51	6±36	0±2	208±106	30±51
有有机肥户 Organic fertilizer supplied family	204	38±19	93±84	195±100	35±54	7±30	3±17	240±104	131±105
平均 Average	370	21±23	53±79	198±98	33±53	7±32	2±13	226±106	88±100

表 2 农民习惯施肥条件下冬小麦的养分利用效率

Tab. 2 Nutrient efficiency of winter wheat under farmer's conventional fertilization condition

项目 Item	氮肥 N	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O
籽粒产量/(t/hm ²) Grain yield		5.9	
施肥量/(kg/hm ²) Fertilizer quantity	424	226	88
养分偏生产力/(kg/kg) Nutrient partial factor productivity	15	26	67

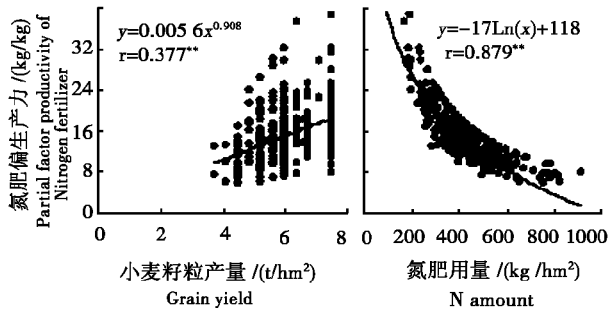


图 2 小麦籽粒产量和氮肥用量与氮肥偏生产力的关系

Fig. 2 Relationship between wheat grain yield or N quantity and partial factors productivity

肥料施用的偏生产力为单位纯养分生产的作物籽粒产量,其值可以表征一定地区提高肥料利用效率的潜力,并直接影响到农民的经济收入。对于氮肥偏生产力来说,在一般施氮条件下(>100 kg/hm² N),氮肥偏生力可以达到 40~60 kg/kg。在惠民县农民习惯的氮磷钾肥的投入情况下,小麦籽粒产量平均为 5.9 t/hm²,氮磷钾肥的平均偏生产力分别为 15, 26, 67 kg/kg,也就是说农民每施入 1 kg 纯氮、五氧化二磷和氧化钾可以分别生产 15, 26, 67 kg 的小麦籽粒产量(表 2)。氮肥偏生产力随着单位面积籽粒产量的增加而呈线性增加,随着单位面积氮肥用量的增加而呈指数降低,与氮肥用量的相关性要远大于与籽粒产量的相关性,说明在现有产量水平和施肥条件下,增加作物产量与减少氮肥用量均能有效的提高氮效率,且减少氮肥用量的效果要好于增加作物产量(图 2)。

2.2 肥料用量对小麦产量的影响

调查农户小麦季平均的氮磷钾肥用量分别为

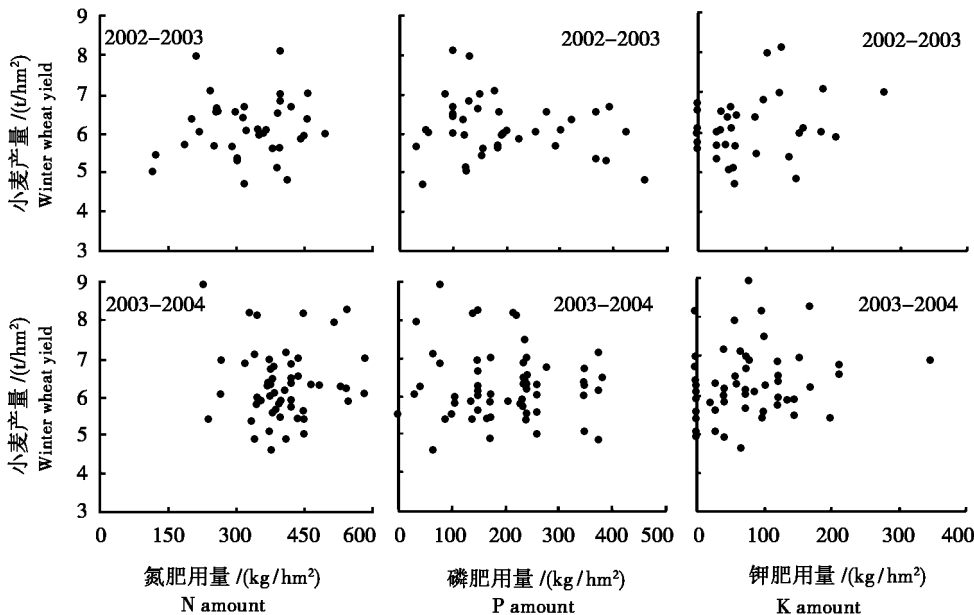


图 3 肥料用量对小麦籽粒产量的影响

Fig. 3 Effect of fertilizer rate on wheat grain yield

393 kg/hm² N, 198 kg/hm² P₂O₅ 和 70 kg/hm² K₂O; 小麦籽粒产量平均为 6.2 t/hm², 最高为 8.9 t/hm², 最低为 4.6 t/hm²。肥料用量和产量与全县网格调查数据差异不大, 基本可以代表全县的小麦生产实际。小麦籽粒产量和农民习惯肥料用量的相关性表明, 小麦籽粒产量与农民习惯氮磷钾的施用量没有任何相关性, 即在现有的施肥量水平和土壤肥力条件下, 不同农户间小麦籽粒产量的差异不是由施肥量的差异造成的(图 3)。若将土壤速效磷含量低于等于 14 mg/kg (n=29) 和土壤交换性钾含量低于等于 100 mg/kg (n=26) 的田块的磷钾肥用量与小麦籽粒产量进行相关性分析(图 4), 小麦籽粒产量随着单位面积施钾量的增加而呈极显著的线性增加, 而单位面积施磷量与小麦籽粒产量仍没有任何相关性, 这主要是因为农民过量施磷造成的, 29 块低土壤有效磷田块中, 仅有 2 块的单位面积施磷量低于 100

kg/hm² (P₂O₅)。低的土壤有效磷供应和低的磷肥施用量决定了低的小麦籽粒产量, 2 块田的平均小麦籽粒产量为 5.4 t/hm², 远低于所有田块的小麦籽粒产量平均值 6.2 t/hm²。

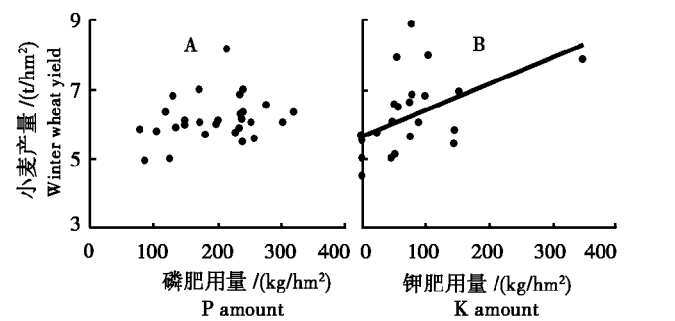


图 4 低土壤速效磷(≤14 mg/kg)和低土壤交换性钾(≤100 mg/kg)条件下磷(A)钾(B)用量与小麦籽粒产量的关系

Fig. 4 Relationship between P₂O₅ rate and wheat grain yield for soil Olsen-P≤14 mg/kg(A) and between K₂O rate and wheat grain yield for soil exchange-K≤100 mg/kg(B)

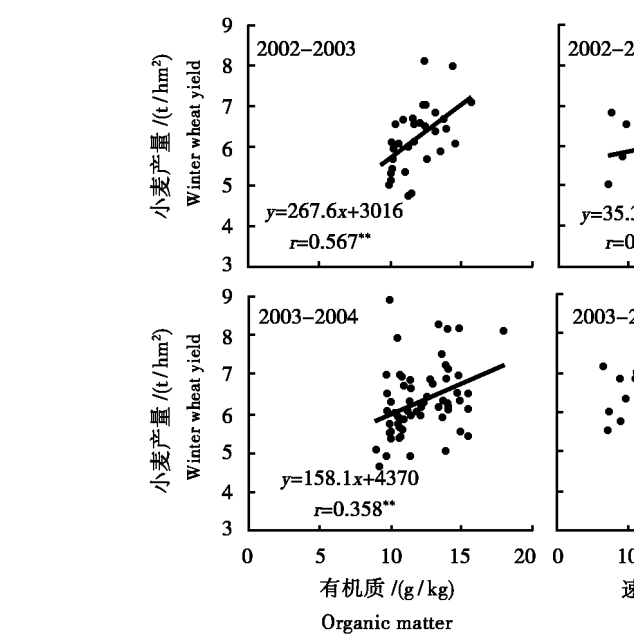


图 5 土壤肥力对小麦籽粒产量的影响

Fig. 5 Effect of soil fertility on wheat grain yield

2.3 土壤肥力对小麦产量的影响

调查麦田 0~30 cm 土壤有机质含量平均为 12 g/kg, 最高为 18 g/kg, 最低为 9 g/kg, 属于中等偏低水平; 土壤速效磷(Olsen-P)含量平均为 20 mg/kg, 最高为 63 mg/kg, 最低为 7 mg/kg, 属于中等水平; 土壤交换性钾含量平均为 115 mg/kg, 最高为 173 mg/kg, 最低为 53 mg/kg, 属于中等偏上水平。2 年的结果表明, 小麦籽粒产量随土壤有机质含量的增加呈极显著的线性增加; 2003 年土壤速效磷含量与小麦籽粒产量相关性显著而 2004 年相关性不显著; 土壤交换性钾含量与小麦籽粒产量没有任何相关性(图 5)。这主要是由于研究地区农民习惯养分投入中磷

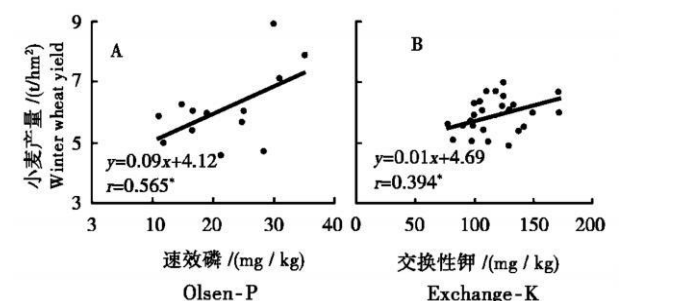


图 6 低磷投入量(P₂O₅≤90 kg/hm²)和不施钾条件下土壤速效磷(A)钾(B)与小麦籽粒产量的关系

Fig. 6 Relationship between soil Olsen-P and wheat grain yield for P₂O₅ rate ≤90 kg/hm²(A) and between soil exchange-K and wheat grain yield for zero-K(B)

钾肥投入过量和大部分田块土壤交换性钾含量较高 ($\geq 100 \text{ mg/kg}$) 造成的。将单位面积磷肥用量小于等于 90 kg/hm^2 (P_2O_5) ($n=14$) 和不施钾 ($n=29$) 的田块的土壤速效磷钾与小麦籽粒产量进行相关性分析, 土壤速效磷钾含量显著的影响小麦籽粒产量, 小麦籽粒产量随着土壤速效磷钾含量的升高而升高 (图 6)。

2.4 产量构成因素对小麦产量的影响

调查麦田亩穗数的变异最大, 最高为 623 万穗/ hm^2 , 最低为 315 万穗/ hm^2 , 平均为 415 万穗/ hm^2 ; 千粒重变异最小, 最高为 47 克/千粒, 最低为 31 克/千粒, 平均为 40 克/千粒; 穗粒数变异居中, 最高为 51 粒/穗, 最低为 28 粒/穗, 平均为 41 粒/穗。产量构成因素与小麦产量的相关性表明, 亩穗数对小麦籽粒产量的贡献最大, 穗粒数次之, 千粒重最小 (图 7)。

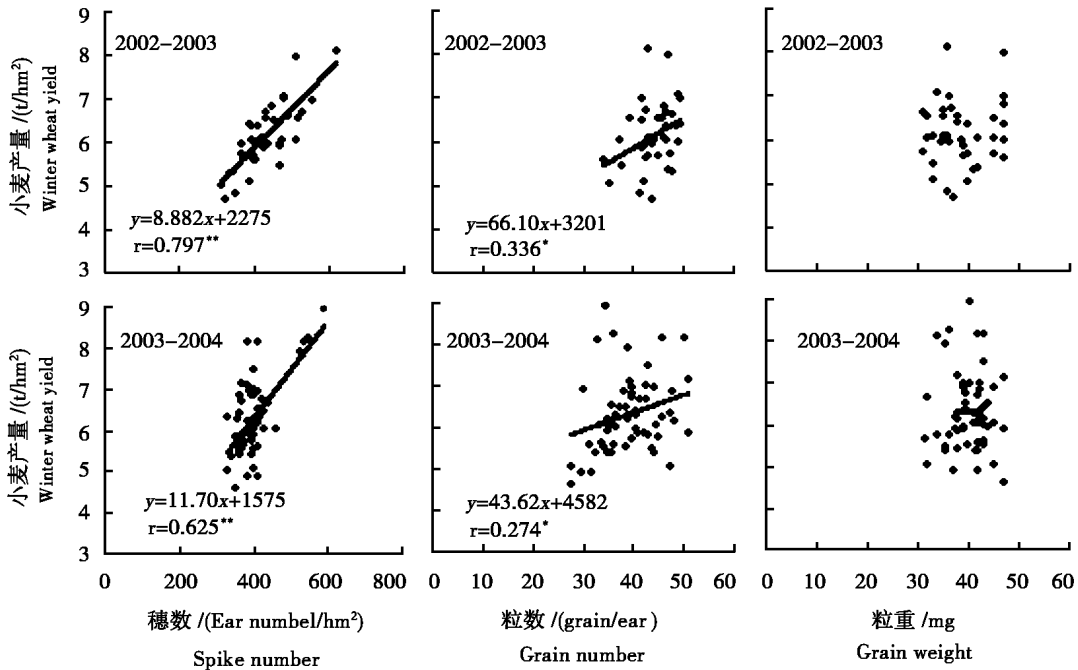


图 7 产量构成因素对小麦籽粒产量的影响

Fig. 7 Effect yield components on the grain yield of wheat

3 讨论

小麦单产的提高主要归功于栽培环境的改善和新品种的推广利用, 其中栽培环境的改善主要包括土壤条件改善、水肥投入增加和栽培技术提高等^[3]。大量的研究表明, 土壤有机质偏低仍是限制华北平原小麦产量的主要因素, 部分地区土壤速效磷含量是限制小麦产量的因素而部分地区不是, 土壤交换性钾与小麦产量的关系不大^[10-13]。在本研究条件下, 如果将所有田块的数据进行相关性分析也得到类似的结论, 即小麦籽粒产量与土壤有机质的关系表现为极显著的正相关, 土壤速效磷与小麦籽粒产量表现为弱的正相关, 而土壤交换性钾与小麦籽粒产量无显著相关。如果将磷钾肥用量和土壤速效磷钾含量进行分级, 在低磷钾肥用量的田块, 土壤速效磷钾与小麦籽粒产量呈明显的线性相关, 在低土壤速效磷钾含量的田块, 施磷钾肥可以显著的提高小麦籽粒产量。小麦籽粒产量与土壤养分的关系不仅与研究地区土壤养分丰缺程度有关, 还与当地农民

的施肥习惯有关。研究地区农民习惯氮磷肥的投入分别为 $424 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$, $226 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$, $88 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$, 而同期小麦养分消耗量仅为 $162 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$, $55 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$, $114 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$ ^[14]。大部分田块过量的氮磷肥投入和高的土壤交换性钾含量 ($115 \text{ mg/kg K}_2\text{O}$) 降低不同农户间氮磷钾肥的差异对小麦籽粒产量的影响^[15, 16]。但个别田块低土壤速效磷钾含量补充磷钾增产明显的现象也不能忽略, 特别是目前我国北方小麦-玉米轮作体系钾素长年亏缺的情况下, 应注意通过秸秆还田, 增施有机肥或补充适量钾肥等措施来维持土壤速效钾含量, 保证土壤高的生产力。

小麦籽粒产量由亩穗数、穗粒数和千粒重共同组成, 三者的协调发展才能使小麦夺取高产。然而在不同的条件下, 小麦籽粒产量 3 要素对产量的贡献并不一样, 在创高产时应有所侧重。我国小麦产量从低产到超高产的提高过程是一个以穗数为基础兼顾穗粒数和粒重的不断协调平衡发展的过程, 也是一个从群体偏小群体生物量不足到不断提高群体

生物产量和收获指数的过程。在这过程中,穗数始终是基础,只有在此基础上协调提高穗粒数和粒重才能保证产量的不断提高^[3]。对现有麦田的产量三要素的调查也表明了同样的观点,即单位面积有效穗数对小麦籽粒产量贡献最大,穗粒数次之,而千粒重最小^[17-22]。小麦亩穗数是一个受到综合调控措施影响的可调控的指标,如出苗稀的麦田通过合理的水肥等田间管理也能达到高的亩穗数,出苗全的麦田在不合理的水肥等田间管理的条件下也常会出现亩穗数不足的现象。从目前研究地区冬小麦的生产实践来看,小麦亩穗数主要受到播种(包括播种质量、播期、播量)、水肥管理和土壤肥力的影响。过早过量的水肥管理特别是基施氮肥过多容易造成小麦早春的旺长,无效分蘖增多,消耗过多的水分和养分,反而不利于后期的分蘖成穗(崔振岭等,2003)。另外,对于大穗型小麦品种,亩穗数主要受土壤肥力的控制,土壤肥力越高,小麦单位面积有效穗数越高^[23]。因此,麦田土壤肥力不高,单位面积有效穗数偏低是限制华北平原小麦产量进一步提高的主要因素,高产的潜力在于通过合理施肥培肥地力,提高小麦单位面积有效穗数。

综合以上分析,华北平原麦田土壤有机质含量不高,单位面积有效穗数偏低是限制该地区小麦产量再次突破的主要因素,高产的潜力在于通过合理施肥培肥地力特别是增加有机质含量,通过改善栽培环境来提高小麦单位面积有效穗数,夺取高产。

参考文献:

- [1] 肖世和. 超级麦研究与 21 世纪小麦育种[C] // 全国作物遗传育种学术讨论会论文集. 北京: 北京农业出版社, 1998: 175- 185.
- [2] 中国小麦产量. 中国农作物数据库. 中国种植业信息网. <http://zzys.agri.gov.cn/nongqing-result.asp>.
- [3] 傅兆麟. 小麦产量因素在产量提高过程中的作用效应分析[J]. 淮北煤师院学报, 2002, 23(2): 43- 50.
- [4] 王树安, 兰林旺, 周殿玺, 等. 小麦节水高产栽培技术研究报告[M] // 兰林旺, 周殿玺. 小麦节水高产研究. 北京: 北京农业大学出版, 1995: 4- 15.
- [5] Chen Xin-ping. Optimization of the fertilizer management of a winter wheat/summer maize rotation system in the Northern China Plain[D]. Germany: University of Hohenheim, 2003: 14- 30.
- [6] 赵久然. 北京郊区作物产量和氮肥施用的调查与分析[J]. 北京农业科学, 1997, 15: 36- 38.
- [7] 王法宏, 王旭清, 赵君实. 1997 年山东小麦亩产超 650kg 地块高产因素分析[J]. 山东农业科学, 1997(5): 12- 16.
- [8] 王法宏, 赵君实. 山东小麦生产潜力及进一步提高产量的关键措施[J]. 山东农业科学, 1995(1): 4- 8.
- [9] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分数据集[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999: 65- 108.
- [10] 陈秀德, 王洪征, 黄孝新, 等. 土壤养分含量及施肥与小麦产量关系的研究[J]. 山东农业科学, 1999(4): 34- 35.
- [11] 于淑芳, 杨力, 孙明, 等. 山东省高产粮田养分状况及施肥影响的研究[J]. 山东农业科学, 2000(5): 31- 33.
- [12] 孟庆华, 贺明荣, 王琪贞, 等. 山东省主要土类高产农田土壤状况及其限制性养分因子的研究[J]. 土壤通报, 1996, 27(6): 256- 258.
- [13] 高祥照, 胡克林, 郭焱, 等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥. 中国农业科学[J]. 2002, 35(6): 660- 666.
- [14] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 II. 农田养分收入参数[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 151- 154.
- [15] 李秋梅. 高肥力土壤上冬小麦/夏玉米轮作体系中磷钾肥合理施用的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001: 46- 49.
- [16] Mallarion A P, Webb J R, Blackmer. Corn and soybean yields 14 years phosphorus and potassium fertilization on a high testing soil [J]. Journal of Production Agriculture, 1991, 4(3): 312- 317.
- [17] 庞红喜, 宋哲民, 屈益民. 大穗小麦品种(系)产量及其构成因素分析[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(4): 28- 32.
- [18] 申琳. 京郊吨粮田小麦产量构成因素的通径分析[J]. 北京农业科学, 1998, 16(3): 18- 21.
- [19] 赵延吉, 赵檀方, 谭相真. 山东省小麦高产新品种的现状 & 进一步提高产量潜力的途径[J]. 作物研究, 1996, 10(1): 34- 36.
- [20] 赵民强, 王平信. 宿县地区小麦产量构成因素动态和高产途径[J]. 安徽农学通报, 1998, 4(4): 20- 23.
- [21] 赵贵法, 董必先, 郭素萍. 小麦产量构成因素的统计分析 & 高产栽培的主攻方向[J]. 河南职业技术师院学报, 1995, 23(2): 19- 21.
- [22] 王海洋, 张俊喜, 顾根宝, 等. 沿海地区小麦产量构成因素分析及高产栽培途径研究[J]. 江苏农业科学, 1998(6): 5- 7.
- [23] 王法宏, 李汉元, 王旭清, 等. 当前山东小麦生产中存在的主要问题 & 技术对策[J]. 山东农业科学, 1998(4): 4- 6.