植物营养与肥料学报 2017, 23(5): 1135–1145
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.17150
http://www.plantnutrifert.org

黄土高原旱地小麦产量差异与产量构成及氮磷钾吸收利用的关系

马小龙[1]，王朝辉[1,2,**]，曹寒冰[1]，佘 旭[1]，何红霞[1]，包 明[1]，宋庆赟[1]，刘金山[1]
（1 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室，陕西杨凌 712100；
2 西北农林科技大学旱区作物逆境生物学国家重点实验室，陕西杨凌 712100）

摘要:【**目的**】针对我国黄土高原旱地小麦低产田块多、分布范围广、农户地块间产量差异大的问题，探索影响旱地小麦产量的关键因素，为缩小产量差异、提高旱地小麦产量提供理论依据。【**方法**】对分布在我国黄土高原的山西、陕西旱地小麦主产区的 282 个农户麦田 0—100 cm 土壤和小麦植株取样分析。将小麦产量分为高、中、低三组，分析了小麦产量差异与产量构成、氮磷钾吸收利用的关系。【**结果**】调查农户冬小麦产量平均为 3815 kg/hm^2，中、低产组分别比高产组低 32% 和 57% ($P < 0.05$)；高产组籽粒平均含氮量较低产组低 7%，但磷钾含量和茎叶氮磷钾含量差异不显著。与高产组相比，中、低产组生物量分别低 27% 和 50%，收获指数低 5% 和 13%，穗数低 15% 和 31%，穗粒数低 19% 和 41% ($P < 0.05$)；地上部吸氮量低 28% 和 51%，吸磷量低 32% 和 55%，吸钾量低 28% 和 50% ($P < 0.05$)。低产组氮收获指数分别比高、中产组低 5% 和 4%，磷收获指数低 4% 和 3%，钾收获指数低 13% 和 8%。高产组小麦的需氮量较中、低产组分别低 5% 和 12% ($P < 0.05$)，需磷量没有显著差异；高、中产组小麦的需钾量亦无显著差异，但分别较低产组显著低 5% 和 15%。高产组小麦的氮生理效率较中、低产组分别高 4% 和 11%，产量分组间小麦的磷生理效率同样没有显著差异；高、中产组小麦的钾生理效率无显著差异，分别较低产组显著高 16% 和 10%。【**结论**】黄土高原旱地农户田块小麦产量存在显著差异，其中由氮素营养不同引起的干物质累积转移、产量构成和养分吸收分配的变化是导致产量差异的重要原因。缩小旱地小麦产量差异的切入点在于氮素调控。基于作物产量形成的养分需求优化肥料投入，结合改进栽培，促进小麦干物质累积，提高穗数和穗粒数，从而实现产量普遍提升。

关键词: 旱地；冬小麦；产量差异；产量构成；养分吸收利用

Yield variation of winter wheat and its relation to yield components, NPK uptake and utilization in drylands of the Loess Plateau

MA Xiao-long[1], WANG Zhao-hui[1,2,**], CAO Han-bing[1], SHE Xu[1], HE Hong-xia[1], BAO Ming[1], SONG Qin-yun[1], LIU Jin-shan[1]
(*1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【**Objectives**】In the Loess Plateau, Northwest China, low-fertility fields are widely distributed. Winter wheat yields are varied among farmers and field plots. Exploring the key factors affecting the yields is extremely important for increasing the yields and management level of winter wheat.【**Methods**】Samples of soils at 0–100 cm depth and winter wheat plants were collected in 282 farmers' fields in Shanxi and Shaanxi Provinces, Northwest China. The winter wheat yields were divided into high, middle and low groups, the yield variations were correlated with yield components, NPK uptake and utilization.【**Results**】The mean grain yield

收稿日期：2017–04–20　　**接受日期：**2017–06–03
基金项目：财政部、农业部现代农业产业技术体系建设专项（CARS-3-1-31）；国家公益性行业（农业）科研专项（201303104）；农业科研杰出人才培养计划；国家自然科学基金项目（41401330）资助。
作者简介：马小龙（1989—），男，甘肃兰州人，硕士研究生，主要从事植物营养与调控研究。E-mail：xiaolong029@126.com
* 通信作者 E-mail：w-zhaohui@263.net

of winter wheat in surveyed farmers' lands was 3815 kg/hm^2, the average yields of the middle and low groups were respectively 32% and 57% lower than that of the high-yield group. The grain N content of the high-yielding group was 7% lower than that of the low-yielding group, the P and K contents of winter wheat grain and the N, P and K contents of stems and leaves showed no significant variance among the yield groups. Compared with the high-yielding group, the biomass in the middle and low yielding groups were 27% and 50% lower, the harvest indices of dry matter were 5% and 13% lower, the spike numbers were 15% and 31% lower, the kernel numbers were 19% and 41% lower, the aboveground N uptake were 28% and 51% lower, the P uptake were 32% and 55% lower, and the K uptake were 28% and 50% lower. The N harvest index in the low-yielding group was respectively 5% and 4%, the P harvest index 4% and 3%, and the K harvest index 13% and 8% lower than those in the high- and middle-yielding groups. The N requirements of the high-yielding group were respectively 5% and 12% lower than those of the middle and low yield groups, but no significant difference was observed for the P requirement among the groups, no significant difference between high and middle yield groups for K requirement was found, although they were respectively 5% and 15% lower than the low-yielding. The average of N physiological efficiency of the high-yielding group was 4% and 11% higher than those of the middle and low yield groups. For P physiological efficiency, there was no significant difference among yield levels. In addition, the average K physiological efficiency of the high and middle yield groups also showed no significant difference, but they were respectively 16% and 10% higher than that of the low-yielding group.【**Conclusions**】Winter wheat yields are varied significantly in farmers' lands in the Loess Plateau. The main reason is from the differences in crop dry matter accumulation, yield formation, and N, P and K uptake and distribution caused primarily by the variable N nutrition status. To reduce the farmers' wheat yield difference in this area, the key measures should be adopted to regulate the crop N nutrition and optimize the fertilizer input based on the crop nutrient requirements, meanwhile improve crop cultivation, promote dry matter accumulation in wheat plant, increase the ear number and grain number, and then achieve its yield increase in a large scale.

Key words: dryland; winter wheat; yield variation; yield components; nutrient uptake and utilization

中国是世界小麦生产大国，也是消费大国。到2030年全国粮食消费需求将达7.5亿吨，是目前粮食产量的1.5倍[1]，即粮食增长速度每年至少应保持在2%左右[2]才能满足。从1990到2014年，我国小麦总产量增加29%，单产增加64%，而播种面积却减少22%[3]。针对人多地少、耕地面积或播种面积不断下降的国情，单产水平提高对保证我国粮食供需平衡至关重要。旱地，特别是西北地区的旱地将是我国未来农业生产的前沿，尽管该区降雨少、土壤肥力水平低，小麦种植面积却占区域总耕地面积的56%左右[4]，平均产量约为3600 kg/hm^2，地块间产量变异介于1344～8419 kg/hm^2[5]，巨大的产量差异为进一步挖掘产量潜力，提高区域总体产量提供了可能。因此，查明旱地小麦产量差异的形成原因，缩小高低产量间的差距，对保障区域和我国粮食安全具有重要意义。

分析产量差异形成的原因，确定制约粮食产量提高的关键因素，在世界范围内受到普遍关注[6]。近年来，人们采用不同方法和技术从不同层面和角度认识粮食产量的差异及其形成的原因[7-9]。就小麦而言，在区域尺度的产量潜力的研究认为，北美、西欧、东欧和中亚、南美和地中海、南亚、东亚的实际产量仅为潜在产量的64%、79%、46%、43%、54%和72%，未来产量仍有30%～50%的增加空间[10]。此外，美国[11]、伊朗[12]、澳大利亚[13]、俄罗斯[14]、阿根廷[15]的潜力产量与实际产量之差分别为4.2、4.0、2.5、2.1和1.1 t/hm^2。我国华北平原的气候潜在产量达8.3 t/hm^2，实际产量仅为潜力产量的61%[16]，黄土高原的光温潜力产量平均为8.3 t/hm^2[17]，而该地区多点田间试验的平均产量仅为5.7 t/hm^2[18]，相差46%。对农户实际生产情况的调研表明，我国旱地小麦产量平均为3569 kg/hm^2，不同地区间产量变化介于2143～4852 kg/hm^2[19]，其中陕西渭北旱塬平均产量为3475 kg/hm^2，农户间的产量差异高达4000 kg/hm^2[20]。可见，无论是实际产量与潜力产量，还是同一气候条件不同地区之间，或是农户之间均存在

巨大的产量差异。

关于产量差异形成的原因，对全球气候变化的研究发现，气温升高使小麦产量降低 5%，降雨量减少使其产量降低 1%，而大气二氧化碳浓度升高使小麦产量增加 3%[21]。分析我国 1951～2002 年间气候变化表明，气温升高使全国小麦产量降低 5%[22]。品种是影响作物产量的另一重要因素，我国北方地区品种更替引起的穗粒重和收获指数增加，使冬小麦产量在 1960～2000 年间提高 32～72 kg/hm^2[23]。病虫害侵害常是作物减产的重要原因，2015 年我国 6682 万公顷小麦受病虫害侵害，造成 402 万吨产量损失[24]。在华北平原 17 年的玉麦轮作试验表明，优化施肥可以有效缩小产量差异[25]。在加拿大，田间管理和品种选择是雨养小麦产量变异的主要原因[26]。根据小麦生育期的降水情况调整播种密度是澳大利亚、西班牙等旱地雨养小麦产量差异缩小的关键[27]。在我国，以小农户种植为主，产量变异来源于多个方面。对河北 6 县 362 个农户的调研结合田间试验进行的研究表明，播期、施肥、灌溉时间及病虫害防治是限制小麦产量的关键因素[28]。

本文研究了我国西北黄土高原的山西、陕西农户田块间小麦产量差异 (图 1) 与产量构成及养分吸收利用的关系，以期为提高该地区小麦产量水平提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

调研取样工作于 2014～2016 年进行，涉及的

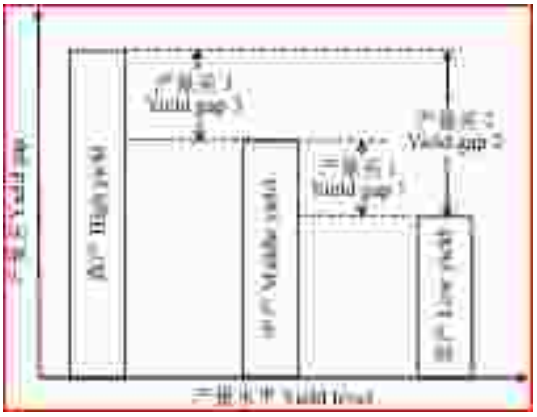

图 1　农户冬小麦产量差异的研究模型

Fig. 1　Research model of winter wheat yield variation of farmers

282 个农户位于黄土高原典型旱作农业区的山西、陕西两省 6 县，即山西洪洞、闻喜、垣曲，陕西合阳、永寿、千阳，东西横跨 400 多公里 (东经 105°7′52″～111°43′19″)，南北间距 170 多公里 (北纬 34°44′14″～36°23′2″)。冬小麦是这一区域的主要粮食作物，播种时间为 9 月下旬或 10 月初，收获时间为 6 月。该区域年均气温 6.6～14℃，年平均降雨量为 466 mm，且 60%～70% 的降雨集中在夏季的 7、8、9 月，各地区 2015、2016 年降雨分布见图 2。常规平作栽培 (行宽 20 cm) 是该区域冬小麦栽培方式。前茬作物为春、夏玉米或冬小麦，一年一熟。

1.2　调查、取样与测定方法

1.2.1 调查取样　选择分布在同一纬度、小麦种植面积较大的山西、陕西小麦种植农户进行。样点选择

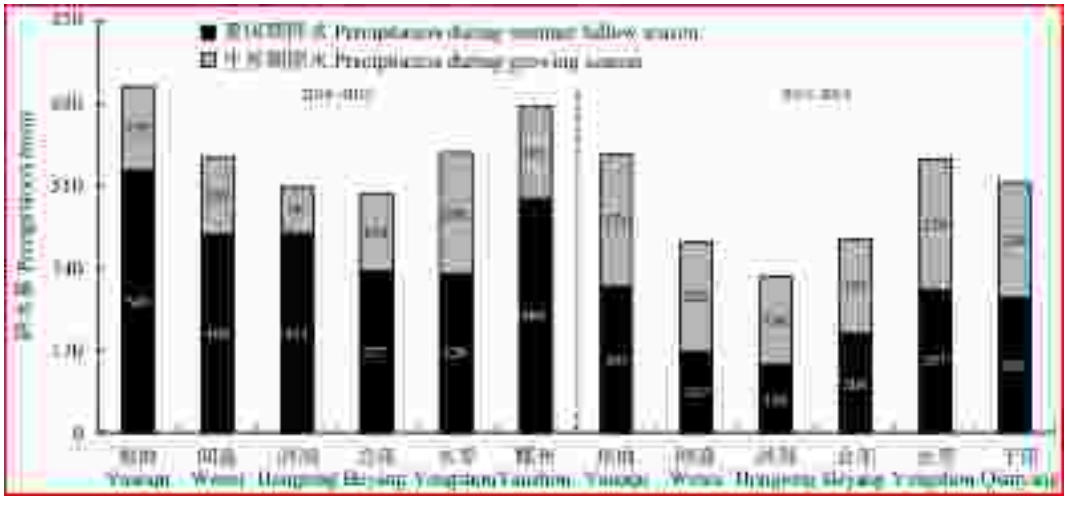

图 2　调研的六个县的年降雨量及其在夏闲期和小麦生长期的分配

Fig. 2　Precipitation and its distribution during the summer fallow and winter wheat growing seasons in the surveyed six counties

方法：将各样点的麦田按生产力水平分成高、中、低三类，在每类田块中随机抽取8～10个地块作为研究对象，同时要求田块面积在0.13公顷(2亩)以上，以保证种植和管理方式的代表性，共得到282个农户的产量及相应数据，其中样品采自垣曲鲁家坡42户、闻喜邱家岭8户、闻喜上院30户、洪洞东梁5户、洪洞西义30户、合阳合家庄27户、合阳白家庄30户、永寿御驾宫25户、永寿监军30户、千阳侯家坡30户、耀州寺沟25户。调查内容包括小麦品种(表1)、肥料用量、机械使用、栽培管理措施、病虫害防治等指标，并于冬小麦成熟期每20 cm为一层，采集各农户田块0—100 cm剖面土壤。各采样地点农户田块的施肥量及土壤养分平均含量见表2。

表1 调研地点不同产量水平农户选用的小麦品种

Table 1 Wheat cultivars widely used by local farmers in different yield level

产量水平 Yield level	品种 Cultivar
高 High	长旱58，长6359，晋麦47，小偃22，运旱20410，烟农21，中麦175，其他 Changhan 58，Chang 6359，Jinmai 47，Xiaoyan 22，Yunhan 20410，Yannong 21，Zhongmai 175，Others
中 Middle	长旱58，长6359，长8744，晋麦47，晋麦536，小偃22，运旱20410，烟农21，中麦175，其他 Changhan 58，Chang 6359，Chang 8744，Jinmai 47，Jinmai 536，Xiaoyan 22，Yunhan 20410，Yannong 21，Zhongmai 175，Others
低 Low	长8744，晋麦47，晋麦536，晋麦54，临丰3号，烟农21，其他 Chang 8744，Jinmai 47，Jinmai 536，Jinmai 54，Linfeng 3，Yannong 21，Others

注（Note）：“其他”指在产量分组中出现过一次和名称不确定的小麦品种 “Others” mean the wheat cultivar whose name is not known or appeared only once in each yield level.

1.2.2 小麦植株取样与测定 冬小麦收获时，在每个被调研农户的地块划出能代表该地块小麦长势的50 m^2(10 m × 5 m)采样区，首先在其中随机选择3个1平方米的样方，测定每个样方内的小麦穗数，计算公顷穗数。然后采用“盲抽法”随机采集包括100个穗的小麦植株，即不看麦穗大小，直接用手从10～20个样点将小麦植株由基部连根拔起，同一小区的盲抽样株混合后于根茎结合处剪掉根系，作为一个考种和化学分析样品。将穗剪下装入标记好的小网袋，茎叶全部装入标记好的大网袋，绑紧袋口。风干后，称量茎叶风干重、穗风干重，穗脱粒，称量风干籽粒重，测定千粒重，计算穗粒数。植物样品65°C烘至恒重后，测定风干茎叶、颖壳、籽粒的含水量，进而计算小麦的产量、生物量。小麦的生物量、产量、千粒重均以烘干重表示。植物样品粉碎后，采用H_2SO_4–H_2O_2法消解，连续流动分析仪(AA3，SEAL公司，德国)测定消解液中的全氮、全磷含量，火焰光度计测定全钾。

1.2.3 土壤取样与测定 在小麦取样区内随机选择3个样点，以20 cm为一层，采取0—100 cm的土壤样品，同层土壤均匀混合作为一个分析样品，迅速装入做好标记的塑料袋中带回实验室，待风干后分别过0.15 mm和1 mm筛。过0.15 mm的土样用来测定有机质、全氮，过1 mm的土样用来测定硝铵态氮、有效磷、速效钾、pH。有机质用重铬酸钾外加热法测定。硝铵态氮用1 mol/L的KCl浸提，速效磷用0.5 mol/L的$NaHCO_3$浸提，均用连续流动分析仪测定(AA3，德国)。速效钾用1 mol/L的NH_4OAc浸提，火焰光度计测定。土壤pH用pH计测定。相关结果已另文发表[5]。

1.3 数据计算与统计分析

将282个农户数据按产量高低排序，等样本数分成高、中、低3组(每组94个数据)。

籽粒产量(kg/hm^2) = 公顷穗数 × 穗粒数 × 千粒重/1000

生物量(kg/hm^2) = 产量/干物质收获指数

干物质收获指数 = 盲抽样籽粒干重/盲抽样地上部总干重 × 100 %

地上部养分吸收量(kg/hm^2) = [籽粒养分含量 × 籽粒产量+茎叶养分含量 × 茎叶生物量+颖壳养分含量 × 颖壳生物量]/1000[29]

养分收获指数 = 籽粒养分吸收量/地上部养分吸收量 × 100%[30]

籽粒产量形成的养分需求量(kg/1000 kg) = 地上部养分吸收量/产量 × 1000[30]

籽粒产量形成的养分生理效率(kg/kg) = 产量/地上部养分吸收量[31]

式中：籽粒、茎叶养分含量单位为g/kg。

用Microsoft Excel 2016整理数据，GraphPad Prism 5.0作图，SAS 8.1统计分析。

表 2　各采样地点农户田块位置、施肥量及土壤基本性质

Table 2　Location, fertilizer application rates of farmers and basic soil nutrient status

试验地点 (样本数) Location (Sample number)	经纬度 Longitude Latitude	施肥量 Nutrient input (kg/hm²)			土壤理化性质 Basic soil property						
		N	P_2O_5	K_2O	土层 (cm) Soil layer	有机质 (g/kg) OM	全氮 (g/kg) Total N	矿质氮 (mg/kg) Mineral N	有效磷 (mg/kg) Avail. P	速效钾 (mg/kg) Avail. K	pH
垣曲鲁家坡 (42) Yuanqu Lujiapo	111.7°E 35.2 °N	124 ± 7	154 ± 7	43 ± 3	0—20	11.2 ± 2.5	0.7 ± 0.1	10.3 ± 15.9	14.1 ± 13.9	125.4 ± 59.5	8.4 ± 0.1
					20—40	8.7 ± 1.9	0.5 ± 0.1	13.4 ± 25.1	7.5 ± 9.7	100.7 ± 37.9	8.4 ± 0.2
闻喜邱家岭 (8) Wenxi Qiujialing	111.3°E 35.3°N	127 ± 22	75 ± 14	19 ± 15	0—20	11.2 ± 2.6	0.7 ± 0.1	10.4 ± 16.3	14.3 ± 14.2	128.2 ± 59.6	8.4 ± 0.1
					20—40	8.7 ± 1.8	0.5 ± 0.1	13.8 ± 25.7	7.6 ± 9.9	103.2 ± 37.0	8.4 ± 0.2
闻喜上院 (30) Wenxi Shangyuan	111.4°E 35.3°N	151 ± 20	103 ± 37	42 ± 5	0—20	11.9 ± 2.6	0.7 ± 0.1	6.4 ± 9.9	8.2 ± 5.9	102.7 ± 20.4	8.3 ± 0.2
					20—40	9.0 ± 1.4	0.6 ± 0.1	7.3 ± 12.2	4.0 ± 2.7	79.7 ± 9.3	8.3 ± 0.1
洪洞东梁 (5) Hongtong Dongliang	111.6°E 36.4°N	119 ± 41	77 ± 42	25 ± 24	0—20	14.6 ± 2.3	0.8 ± 0.2	20.7 ± 15.3	14.6 ± 11.8	111.9 ± 68.9	8.4 ± 0.1
					20—40	10.4 ± 2.3	0.6 ± 0.1	6.3 ± 2.5	3.8 ± 4.5	138.7 ± 96.9	8.5 ± 0.2
洪洞西义 (30) Hongtong Xiyi	111.6°E 36.4°N	133 ± 73	97 ± 53	41 ± 31	0—20	14.2 ± 4.3	0.7 ± 0.1	5.2 ± 2.4	12.2 ± 7.1	129.1 ± 46.2	8.4 ± 0.2
					20—40	10.7 ± 2.6	0.6 ± 0.1	4.6 ± 7.2	5.5 ± 3.9	93.7 ± 26.4	8.3 ± 0.1
合阳合家庄 (27) Heyang Hejiazhuang	110.1°E 35.2°N	130 ± 37	141 ± 101	30 ± 28	0—20	12.0 ± 2.2	0.8 ± 0.1	18.7 ± 12.3	11.3 ± 4.9	153.8 ± 45.5	8.3 ± 0.1
					20—40	7.9 ± 2.2	0.6 ± 0.1	7.6 ± 6.1	3.1 ± 1.7	101.0 ± 30.0	8.4 ± 0.2
合阳白家庄 (30) Heyang Baijiazhuang	110.0°E 35.3°N	180 ± 53	116 ± 50	110 ± 34	0—20	10.8 ± 2.2	0.7 ± 0.1	7.3 ± 6.8	9.0 ± 4.7	138.2 ± 40.6	8.4 ± 0.3
					20—40	8.5 ± 2.2	0.6 ± 0.1	10.9 ± 12.3	2.7 ± 1.5	103.3 ± 29.6	8.4 ± 0.3
永寿御驾宫 (25) Yongshou Yujiagong	108.2°E 34.7°N	180 ± 81	86 ± 56	0	0—20	11.0 ± 3.5	0.8 ± 0.2	11.0 ± 2.8	20.1 ± 6.3	104.7 ± 25.2	8.5 ± 0.1
					20—40	8.1 ± 2.5	0.6 ± 0.1	12.5 ± 6.4	9.1 ± 4.7	84.6 ± 15.8	8.5 ± 0.2
永寿监军 (30) Yongshou Jianjun	108.3°E 34.6°N	135 ± 0	60 ± 0	30 ± 0	0—20	13.8 ± 1.3	0.9 ± 0.1	14.7 ± 39.4	14.8 ± 5.9	124.6 ± 29.0	8.4 ± 0.1
					20—40	10.2 ± 1.5	0.7 ± 0.2	16.0 ± 33	5.9 ± 3.2	101.7 ± 18.8	8.4 ± 0.1
千阳侯家坡 (30) Qianyang Houjiapo	107.1°E 34.7°N	188 ± 0	75 ± 0	38 ± 0	0—20	14.5 ± 1.5	0.9 ± 0.1	9.5 ± 12.5	12.8 ± 7.9	128.9 ± 23.2	8.3 ± 0.1
					20—40	12.0 ± 1.4	1.0 ± 1.2	11.4 ± 15.1	6.2 ± 3.4	107.5 ± 12.9	8.3 ± 0.1
耀州寺沟 (25) Yaozhou Sigou	109.0°E 34.9°N	265 ± 104	79 ± 19	38 ± 0	0—20	13.1 ± 3.4	0.9 ± 0.2	14.6 ± 10.7	23.2 ± 9	106.6 ± 47.1	8.3 ± 0.1
					20—40	9.3 ± 3.9	0.6 ± 0.1	11.5 ± 16.6	6 ± 3.9	82.9 ± 39.2	8.5 ± 0.1

注（Note）：表中数字为同一地点各农户田块的平均值 ± 标准差 Data in table are means ± standard deviations for lands of farmers in the same location.

2 结果与分析

2.1 不同田块的小麦籽粒产量及氮磷钾养分含量

2年6县的调研表明(表3)，该区域的小麦籽粒产量平均为3815 kg/hm²(*n*=282)，田块间最高与最低产量相差8倍。不同产量等级间差异显著，高、中、低产组的产量分别介于4557～9154 kg/hm²、3220～4553 kg/hm²、1143～3217 kg/hm²，中、低产组分别比高产组低32%和57%。与产量不同，研究区域不同田块的小麦籽粒含氮量介于13.07～26.66 g/kg，含磷量介于1.79～3.71 g/kg，含钾量介于2.53～4.53 g/kg，且高产组籽粒平均含氮量较低产组显著降低7%，与中产组差异不显著；不同产量水平间小麦籽粒的磷、钾含量和茎叶的氮、磷、钾含量差异均不显著。可见，西北旱地农户田块间的小麦产量存在显著差异，与高产田块相比，中低产田块均有较大的增产潜力；除籽粒氮含量外，小麦籽粒的磷钾含量和茎叶的氮、磷、钾含量不因产量而变化。

2.2 不同田块的小麦生物量及产量构成

研究区域不同田块的小麦地上部生物量、收获指数也存在显著差异(表4)，与高产组相比，中、低产组生物量分别降低27%和50%，收获指数分别降低5%和13%。就产量构成而言，不同产量水平间的穗数、穗粒数存在显著差异(表4)，中、低产组穗数分别较高产组低15%和31%；穗粒数分别低19%和41%。高、中、低产组的千粒重差异不显著。可见，在黄土高原旱地，增加单位面积穗数和穗粒数，提高生物量和收获指数是旱地中低产田小麦产量提高的关键。

2.3 不同田块的小麦地上部养分吸收量及养分收获指数

高、中、低3个产量分组之间小麦地上部的氮、磷、钾吸收量存在显著差异(图3)。3组小麦的地上部吸氮量分别介于112～246 kg/hm²、64～165 kg/hm²和28～131 kg/hm²，平均值分别为152 kg/hm²、110 kg/hm²和75 kg/hm²，中、低产组比高产组分别降低28%和51%；吸磷量分别介于10～33 kg/hm²、7～22 kg/hm²和3～17 kg/hm²，平均值分别为18 kg/hm²、12 kg/hm²和8 kg/hm²，中、低产组较高产组分别低32%和55%；吸钾量分别介于42～174 kg/hm²、37～141 kg/hm²和18～84 kg/hm²，平均值分别为87 kg/hm²、63 kg/hm²和43 kg/hm²，中、低

表3 不同产量水平冬小麦籽粒产量及氮磷钾养分含量

Table 3 Grain yields and nutrient contents of winter wheat at different yield levels

产量水平 Yield level	产量 (kg/hm²) Grain yield	籽粒 Grain (g/kg)			茎叶 Straw (g/kg)		
		N	P	K	N	P	K
高 High	5734 ± 965 a	20.53 ± 2.15 b	2.64 ± 0.43 a	3.35 ± 0.41 a	4.71 ± 0.99 a	0.35 ± 0.13 a	9.33 ± 2.88 a
中 Middle	3917 ± 347 b	21.17 ± 2.57 b	2.56 ± 0.41 a	3.32 ± 0.4 a	4.7 ± 1.3 a	0.33 ± 0.16 a	8.98 ± 2.48 a
低 Low	2494 ± 534 c	22.03 ± 3.3 a	2.61 ± 0.46 a	3.39 ± 0.38 a	4.93 ± 1.33 a	0.35 ± 0.13 a	8.77 ± 2.31 a
平均 Mean	3815 ± 1218	21.35 ± 2.79	2.58 ± 0.42	3.34 ± 0.39	4.8 ± 1.24	0.34 ± 0.15	8.96 ± 2.52

注（Note）：表中数据为平均值 ± 标准差 Data in the table are averages ± standard deviations; 茎叶养分含量为茎叶与颖壳的加权平均值 Straw nutrient contents are the weighted averages of stem and glume nutrient contents; 同列数据后不同小写字母表示产量水平间差异达5%显著水平 Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant differences among yield levels ($P \leqslant 5\%$).

表4 黄土高原旱地农户田块的冬小麦生物量及产量构成差异

Table 4 Winter wheat biomass and yield components differences among lands of farmers in the Loess Plateau

产量水平 Yield level	生物量 (kg/hm²) Biomass	收获指数 (%) Harvest index	穗数 (× 10⁴/hm²) Spike number	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 (g) 1000-kernel weight
高 High	13063 ± 2464 a	44.3 ± 4.6 a	430 ± 91 a	34.9 ± 8.4 a	39.8 ± 6.8 a
中 Middle	9490 ± 1583 b	42.0 ± 5.4 b	364 ± 68 b	28.1 ± 6.0 b	38.5 ± 7.1 a
低 Low	6506 ± 1310 c	38.5 ± 5.3 c	298 ± 57 c	20.5 ± 8.9 c	40.2 ± 9.5 a
平均 Mean	9215 ± 2735	41.4 ± 5.6	355 ± 82	27.1 ± 9.4	39.3 ± 7.9

注（Note）：同列数据后不同小写字母表示产量水平间差异达5%显著水平 Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant differences among yield levels ($P \leqslant 5\%$).

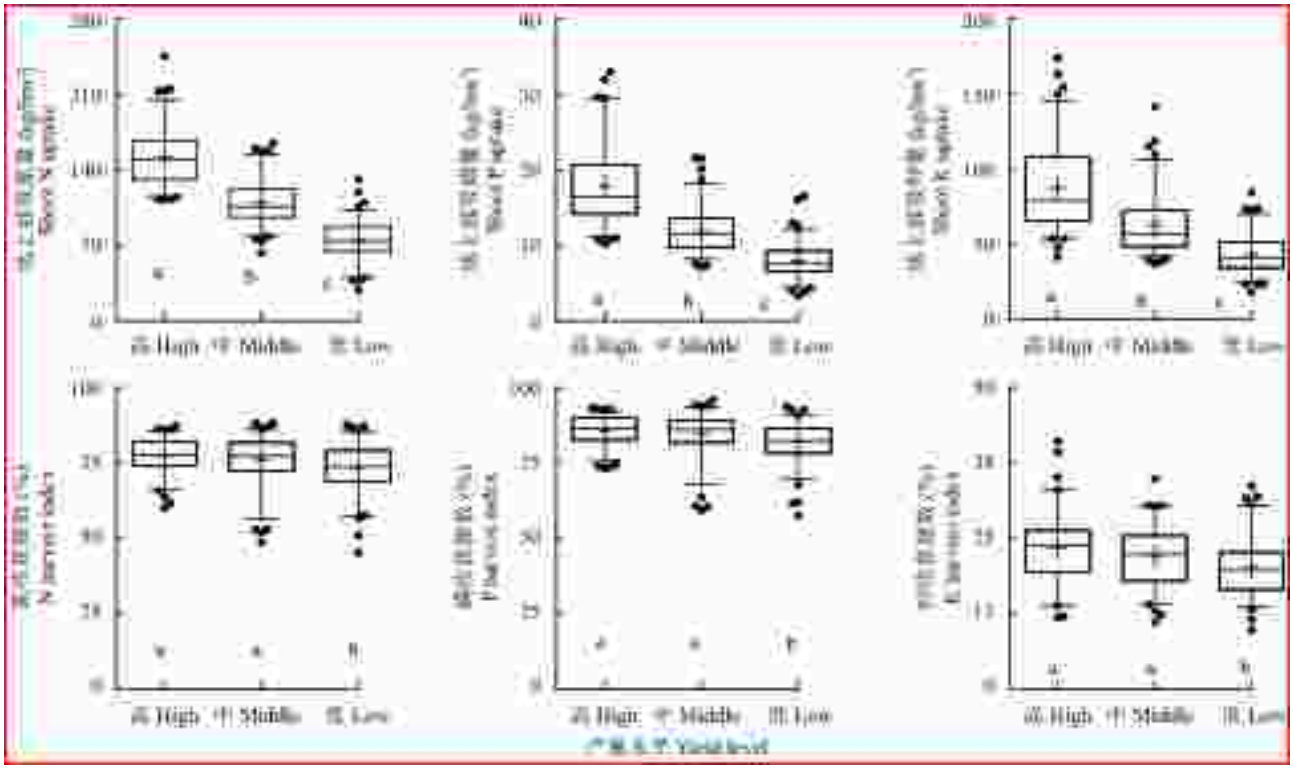

图 3　黄土高原旱地农户田块间小麦地上部养分吸收量及养分收获指数

Fig. 3　Nutrient uptakes and nutrient harvest indices of winter wheat among high, middle and low yield levels

[注（Note）：盒子中间的横线表示中数，加号表示平均数, 下边界和上边界分别表示第 25 和 75 中位数，下、上盒须分别表示第 5 和 95 中位数，下面和上面的点分别表示小于 5 和大于 95 分位数；不同小写字母表示不同产量水平间差异达 5% 显著水平 The lines and plus signs within the boxes represent the median and mean of all data, respectively; the lower and upper box edges, whisker caps, and dots represent 25 and 75, 5 and 95, and < 5 and > 95 percentiles of all data, respectively; Different lowercase letters indicate significant differences among different yield levels (P≤5%).]

产组较高产组显著低 28% 和 50%。可见，要提高旱地小麦产量，作物吸收更多的氮、磷、钾养分是关键。

统计分析表明，高、中产量组的氮磷钾收获指数差异不显著，但均显著高于低产组 (图 3)。高、中、低产田块的氮收获指数平均分别为 77%、76% 和 73%，低产组分别比高、中产组显著降低 5% 和 4%；磷收获指数平均分别为 86%、85% 和 82%，低产组比高、中产组显著降低 4% 和 3%；钾收获指数平均分别为 23%、22% 和 20%，低产组比高、中产组显著降低 13% 和 8%。可见，从低产到高产，除需要提高小麦地上部氮磷钾吸收量外，这些养分从营养体向籽粒分配和转移的比例也需增加。

2.4　不同田块的小麦籽粒养分需求量及养分生理效率差异

不同农户地块形成 1000 kg 小麦籽粒产量的需氮量介于 17.4～34.8 kg，需磷量介于 2.1～4.8 kg，需钾量介于 9.3～29.1 kg。对不同产量分组的养分需求量分析表明，高中低组的小麦需氮量存在显著差异 (表 5)，高产组需氮量较中、低产组分别低 5% 和 12%；产量分组间小麦的需磷量没有显著差异；高、中产组小麦的需钾量亦无显著差异，但分别较低产组显著低 5% 和 15%。说明在黄土高原旱地高产条件下，形成单位小麦产量需要的氮钾养分数量要比低产条件下少。

进一步对养分生理效率的分析表明 (表 5)，不同田块的小麦籽粒产量形成的氮磷钾生理效率分别介于 20.0～49.6 kg/kg、183.3～508.3 kg/kg 和 26.5～125.3 kg/kg。高、中、低组的小麦氮生理效率也存在显著差异，高产组氮生理效率较中、低产组分别高 4% 和 11%；产量分组间小麦的磷生理效率同样没有显著差异；高中产组小麦的钾生理效率无显著差异，分别较低产组显著高 16% 和 10%。

3　讨论

3.1　旱地小麦的产量差异及其引起的养分含量变化

黄土高原旱地农户地块小麦产量低而不稳[5, 20]。

表5 不同产量水平小麦千公斤籽粒养分需求量及养分生理效率

Table 5 Winter wheat 1000 kg-grain nutrient requirement and nutrient physiological efficiency under high, middle and low yield levels

产量水平 Yield level	籽粒养分需求量 Nutrient requirements of grain (kg/1000 kg)			养分生理效率 Nutrient physiological efficiency (kg/kg)		
	N	P	K	N	P	K
高 High	26.7 ± 3.2 c	3.1 ± 0.6 a	15.2 ± 4.4 b	38.0 ± 4.6 a	334 ± 64 a	70.4 ± 17.8 a
中 Middle	28.1 ± 4.5 b	3.1 ± 0.7 a	16.0 ± 4.6 b	36.4 ± 5.4 b	340 ± 68 a	66.8 ± 15.6 a
低 Low	30.4 ± 6.0 a	3.2 ± 0.7 a	17.8 ± 5.2 a	34.1 ± 6.4 c	325 ± 67 a	60.6 ± 16.9 b
平均 Mean	28.6 ± 5.0	3.1 ± 0.7	16.4 ± 4.9	35.9 ± 5.7	335 ± 66	65.8 ± 17.4

注（Note）：同列数据不同小写字母表示不同产量水平间差异达5%显著水平 Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant differences among yield levels ($P \leqslant 5\%$).

本研究结果显示，当前该区域农户田块的小麦产量平均为3815 kg/hm²。这一产量水平仅实现了黄土高原旱地田间试验产量的67%[18]，黄土高原光温生产潜力的45%，气候生产潜力的73%[17]。统计资料显示，我国2015年小麦平均产量为5244 kg/hm²，与之相比，黄土高原旱地小麦有30%的增产潜力[32]。在调研的282个农户产量中，低产田块小麦平均产量为2494 kg/hm²，仅实现了中、高产田块的64%和43%。可见黄土高原旱地农户地块的小麦产量有巨大的提升空间。

不少研究表明小麦籽粒氮含量与产量之间存在负相关关系[30, 33–34]。本研究发现高产田块小麦籽粒产量比低产田块高130%，其含氮量却比低产田块降低7%，类似的产量增加而籽粒含氮量降低的关系，已有不少报道。原因主要在于作物碳与氮同化不同步性，即碳同化速率大于氮同化[33, 35]，或说是由籽粒产量增加的速率大于养分累积速率导致的养分稀释效应所致[34, 36]。本研究中从低产到高产，籽粒产量增加130%，而籽粒吸氮量仅增加113%，进一步说明养分稀释效应是产量增加后籽粒含氮量降低的主要原因。但车升国等对全国田间试验文献资料的分析发现籽粒氮含量随产量水平的提高而升高[37]，不过类似的报道不多，其原因尚不明确。

关于小麦籽粒磷含量与产量关系的研究结果并不一致，且多是对多点试验数据的总结。Zhan等[38]的分析表明籽粒磷含量随产量增加而降低；车升国等[39]发现籽粒磷含量并不随产量而变化，其含量基本在3.0 g/kg左右。本研究结果表明籽粒磷含量与产量无显著的相关关系，磷含量基本在2.6 g/kg左右，低于车升国等报道的籽粒磷含量，原因可能在于本研究位于黄土高原旱地，大多数地块的土壤有效磷偏低，介于12～15 mg/kg，含量不高变化也不大，且由于石灰性土壤中的肥料磷极易被固定，作物对磷的吸收利用相对较低且稳定，因此籽粒的磷含量也相对稳定且偏低。有研究表明，土壤速效钾含量与小麦籽粒钾含量密切相关[40]，但在本研究中高中低产田块的小麦籽粒钾含量基本在3.3 g/kg左右，与产量无关，但低于多点试验数据分析得出的我国小麦籽粒平均钾含量4.3 g/kg[41]。原因可能与磷的情况相似，即与土壤养分供应状况有关。研究区域多数地块土壤速效钾含量均在120 mg/kg左右，相对于较低的旱地小麦产量水平而言应属供应充足，但由于在旱作雨养农业区，小麦主要生长期在春季和初夏的旱季，土壤水分胁迫使得钾离子的移动性降低，同时限制作物根系生长，导致小麦对钾的吸收显著下降[42]。因此作物并不能充分吸收土壤中钾素，所以小麦籽粒钾含量不随产量变化而显著变化，保持相对稳定和较低的水平。

3.2 旱地小麦的产量差异与干物质累积、产量构成及养分吸收的关系

作物产量形成是一定生态环境条件下生物量与收获指数协调、平衡的结果。已有研究表明，高产品种具有明显高于低产品种的生物量[43–44]。本研究中，农户种植的小麦品种95%以上为近年来国家审定的品种，具备高产潜力，但高产田块的干物质累积量显著高于中、低产田块，说明干物质累积量的差异是导致旱地小麦产量差异的重要原因，而非品种。在西北旱地的田间试验发现小麦产量不以收获指数为转移[44–45]，但本研究发现高产地块的收获指数显著高于中低产地块，原因可能是本研究不同于同一地点进行的田间试验，不同地点的气候、土壤，以及各农户的养分投入数量、田间管理差异，使得小麦的干物质累积及其向籽粒的转移不同。单位面积穗数、穗粒数和千粒重是构成小麦产量的基本要

素，三者之间存在着矛盾与竞争。本研究结果表明高产地块的小麦单位面积穗数较中、低产地块显著高出 18% 和 44%，穗粒数较中、低产地块高出 24% 和 70%，但高、中产地块的千粒重却低于低产地块，这表明旱地不同农户地块间小麦产量三要素中穗数和穗粒数差异是引起籽粒产量差异的重要原因，单位面积穗数、穗粒数较高的地块产量亦高[44, 46–47]，而高、中产田块千粒重降低也正是其穗数和穗粒数提高引起的结果。

小麦产量水平与其氮磷钾吸收利用能力密切相关。氮素是植物生长需要多、土壤供应相对较少、供求之间存在尖锐矛盾的元素，提高植株吸氮量是提升小麦产量的基础。本研究表明，高、中、低产田块间小麦地上部氮、磷、钾吸收量存在显著差异，中、低产组吸氮量比高产组分别降低 28% 和 51%；吸磷量分别降低 32% 和 55%；吸钾量分别降低 28% 和 50%。进一步说明吸收更多的氮磷钾养分是黄土高原旱地小麦产量提高的必要条件。作物地上部吸收的养分向籽粒转移的能力用养分收获指数表示。分析发现高、中产地块小麦的氮磷钾收获指数均显著高于低产地块，说明高产地块不仅地上部氮磷钾吸收量高于低产地块，而且将吸收的养分分配到籽粒中的能力更是强于低产地块，这与前人研究结果一致[30, 37–39, 41]。因此，黄土高原旱地小麦籽粒产量因氮磷钾养分吸收、转移而变化，养分吸收量高，向籽粒转移多的地块产量亦高。

3.3　旱地不同产量水平的小麦对养分需求和利用规律

籽粒产量形成的养分需求量，揭示了作物形成籽粒产量对养分的需求情况，是推荐施肥量计算中的重要参数[37]；养分生理效率反映了作物利用吸收的养分形成籽粒产量的能力[29]。研究表明，高土高原旱地小麦籽粒氮钾需求量与养分生理效率在高、低产量水平间表现出显著的差异，而磷的需求量和生理效率没有显著差异。小麦籽粒产量水平从低产增加至高产，籽粒产量增加 130%，而地上部吸氮、钾量分别增加 103% 和 101%，养分吸收量增加的幅度明显小于籽粒产量增加的幅度，因此高产条件下，形成单位小麦产量需要的氮钾养分数量要比低产条件下低，而作物利用吸收的单位养分形成籽粒产量的生理效率比低产条件下高。关于小麦养分需求量、生理效率与产量水平的关系研究结果不尽一致，车升国等认为随产量水平的提高，氮、磷需求量增加、生理效率降低[37, 39]，而 Yue 等[30]和 Zhan 等[38]研究结果与之相反，需氮、磷量随产量的增加而降低，生理效率随产量的增加而增加。关于钾需求量、生理效率与产量关系的报道不多，Zhan 等[41]发现需钾量随产量的增加而降低。造成这些差异的原因还有待于深入研究。可见，在黄土高原旱地高产栽培条件下，应根据小麦的养分需求和利用特性，适当调控氮钾的投入数量，稳定磷的投入数量，充分发挥品种和栽培优势，实现小麦高产和肥料高效施用。

4　结论

黄土高原旱地农户田块小麦产量存在显著差异。除籽粒氮含量随产量的升高而降低外，小麦籽粒的磷、钾含量和茎叶的氮、磷、钾含量不因产量而变化。干物质累积转移、产量构成和养分吸收分配是引起黄土高原旱地小麦产量差异的重要原因，即高的生物量、收获指数、单位面积穗数、穗粒数、地上部氮磷钾吸收量和养分收获指数是高产田块的重要特征。缩小旱地小麦田间的产量差异、实现中、低产小麦增产的切入点在于氮素调控，基于作物产量形成的养分需求差异协调肥料投入，同时结合优化栽培，促进小麦干物质累积，提高穗数和穗粒数，从而实现产量普遍提升。

参 考 文 献：

[1] 茹振钢, 冯素伟, 李淦. 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3388–3393.
Ru Z G, Feng S W, Li G. High-yield potential and effective ways of wheat in Yellow & Huai River Valley facultative winter wheat region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3388–3393.

[2] Fan M S, Shen J B, Yuan L X, *et al*. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 13–24.

[3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
National Bureau of Statistics of the People’s Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.

[4] Li F C, Wang Z H, Dai J, *et al*. Summer fallow soil management-impact on rainfed winter wheat[J]. Acta Agriculturae Scandinavica (Section B: Soil and Plant Science), 2014, 64(5): 398–407.

[5] 马小龙, 余旭, 王朝辉, 等. 旱地小麦产量差异与栽培、施肥及主要土壤肥力因素的关系[J]. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4757–4771.
Ma X L, She X, Wang Z H, *et al*. Yield variation of winter wheat and its relation to cultivation, fertilization, and main soil fertility factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(24): 4757–4771.

[6] Van Ittersum M K, Cassman K G. Yield gap analysis—Rationale,

methods and applications—Introduction to the Special Issue[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 1–3.

[7] Lobell D B, Cassman K G, Field C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34(1): 179–204.

[8] Lobell D B. The use of satellite data for crop yield gap analysis[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 56–64.

[9] Van Ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, *et al*. Yield gap analysis with local to global relevance–A review[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 4–17.

[10] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, *et al*. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490(7419): 254–257.

[11] Patrignani A, Lollato R P, Ochsner T E, *et al*. Yield gap and production gap of rainfed winter wheat in the southern great plains[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(4): 1329–1339.

[12] Deihimfard R, Mahallati M N, Koocheki A. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modelling[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 28–38.

[13] Oliver Y M, Robertson M J. Quantifying the spatial pattern of the yield gap within a farm in a low rainfall Mediterranean climate[J]. Field Crops Research, 2013, 150: 29–41.

[14] Schierhorn F, Faramarzi M, Prishchepov A V, *et al*. Quantifying yield gaps in wheat production in Russia[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(8): 1–12.

[15] De Paepe J L, Alvarez R. Wheat yield gap in the Pampas: Modeling the impact of environmental factors[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1367–1378.

[16] Li K N, Yang X G, Liu Z J, *et al*. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59: 1–12.

[17] 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 161–165.
Li J, Wang L X, Shao M A, *et al*. Simulation of wheat potential productivity on Loess Plateau region of China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(2): 161–165.

[18] 曹寒冰, 王朝辉, 师渊超, 等. 渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3826–3838.
Cao H B, Wang Z H, Shi Y C, *et al*. Optimization of nitrogen fertilizer recommendation technology based on soil test for winter wheat on Weibei Dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3826–3838.

[19] 张卫峰, 马文奇, 王雁峰, 等. 中国农户小麦施肥水平和效应的评价[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1049–1055.
Zhang W F, Ma W Q, Wang Y F, *et al*. Assessment on farmers' fertilization behavior for wheat production in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1049–1055.

[20] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 245–253.
Zhao H B, Wang Z H, Gao Y J, *et al*. Investigation and evaluation of household wheat fertilizer application in Shaanxi Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 245–253.

[21] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616–620.

[22] Piao S L, Ciais P, Huang Y, *et al*. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43–51.

[23] Zhou Y, He Z H, Sui X X, *et al*. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000[J]. Crop Science, 2007, 47(1): 245–253.

[24] 赵中华, 王强, 朱晓明. 2015年全国小麦病虫害发生新特点与防治新思路[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(8): 33–36.
Zhao Z H, Wang Q, Zhu X M. National wheat new characteristics and new ideas in the prevention and control plant diseases and insect pests during 2015[J]. China Plant Protection, 2016, 36(8): 33–36.

[25] Dai X Q, Ouyang Z, Li Y S, *et al*. Variation in yield gap induced by nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer in North China Plain[J]. Plos One, 2013, 8(12): 1–8.

[26] Chapagain T, Good A. Yield and production gaps in rainfed wheat, barley, and canola in Alberta[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6(990): 1–10.

[27] Tokatlidis I S. Addressing the yield by density interaction is a prerequisite to bridge the yield gap of rain-fed wheat[J]. Annals of Applied Biology, 2014, 165(1): 27–42.

[28] Liang W L, Peter C, Wang G Y, *et al*. Quantifying the yield gap in wheat-maize cropping systems of the Hebei Plain, China[J]. Field Crops Research, 2011, 124(2): 180–185.

[29] 何刚, 王朝辉, 李富翠, 等. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1657–1671.
He G, Wang Z H, Li F C, *et al*. Nitrogen, phosphorus and potassium requirement and their physiological efficiency for winter wheat affected by soil surface managements in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1657–1671.

[30] Yue S C, Meng Q F, Zhao R F, *et al*. Change in nitrogen requirement with increasing grain yield for winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(6): 1687–1693.

[31] Novoa R, Loomis R. Nitrogen and plant production[J]. Plant and Soil, 1981, 58(1): 177–204.

[32] FAO. Faostat–Agriculture database[EB/OL]. http://wwwfaoorg/faostat/en/#data/QC, 2016.

[33] Triboi E, Martre P, Girousse C, *et al*. Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 25(2): 108–118.

[34] Bogard M, Allard V, Brancourt-Hulmel M, *et al*. Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(15): 4303–4312.

[35] Munier-Jolain N G, Salon C. Are the carbon costs of seed production related to the quantitative and qualitative performance? An appraisal for legumes and other crops[J]. Plant, Cell & Environment, 2005, 28(11): 1388–1395.

[36] Acreche M M, Slafer G A. Variation of grain nitrogen content in relation with grain yield in old and modern Spanish wheats grown under a wide range of agronomic conditions in a Mediterranean region[J]. The Journal of Agricultural Science, 2009, 147(6): 657–667.

[37] 车升国, 袁亮, 李燕婷, 等. 我国主要麦区小麦氮素吸收及其产量效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 287–295.
Che S G, Yuan L, Li Y T, *et al*. N uptake and yield response of wheat in main wheat production regions of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 287–295.

[38] Zhan A, Chen X P, Li S Q, *et al*. Changes in phosphorus requirement with increasing grain yield for winter wheat[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(6): 2003–2010.

[39] 车升国, 袁亮, 李燕婷, 等. 我国主要麦区小麦产量形成对磷素的需求[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 869–876.
Che S G, Yuan L, Li Y T, *et al*. Phosphorous requirement for yield formation of wheat in main wheat production regions of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(4): 869–876.

[40] Yang N, Wang Z H, Gao Y J, *et al*. Effects of planting soybean in summer fallow on wheat grain yield, total N and Zn in grain and available N and Zn in soil on the Loess Plateau of China[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 58: 63–72.

[41] Zhan A, Zou C Q, Ye Y L, *et al*. Estimating on-farm wheat yield response to potassium and potassium uptake requirement in China[J]. Field Crops Research, 2016, 191: 13–19.

[42] 陈新平, 王敬国, 杨志福, 李晓林. 土壤水分胁迫条件下磷、钾营养的相互关系及其对小麦抗旱性的影响[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(S2): 71–76.
Chen X P, Wang J G, Yang Z F, Li X L. Effect of phosphorus and potassium fertilization on drought resistance of wheat under soil water stress condition[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1995, 21(S2): 71–76.

[43] 童依平, 李继云, 李振声. 不同小麦品种吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究Ⅰ. 吸收和利用效率对产量的影响[J]. 西北植物学报, 1999, 19(2): 104–111.
Tong Y P, Li J Y, Li Z S. Genotypic variations for nitrogen use efficiency in winter wheat I. Effects of N uptake and utilization efficiency on grain yields[J]. Acta Botanica Boreall-Occidentalla Sinica, 1999, 19(2): 104–111.

[44] 周玲, 王朝辉, 李生秀. 旱地条件下冬小麦产量和农艺性状对养分投入的响应[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1192–1197.
Zhou L, Wang Z H, Li S X. Grain yield and agronomic traits of winter wheat varieties in response to fertilization in dryland[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(7): 1192–1197.

[45] Dai J, Bean B, Brown B, *et al*. Harvest index and straw yield of five classes of wheat[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 85: 223–227.

[46] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 等. 华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析[J]. 华北农学报, 2008, 23(增刊1): 224–229.
Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, *et al*. Analysis on fertilizer applied and the central factors influencing grain yield of wheat in the Northern China Plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(Suppl. 1): 224–229.

[47] 王江春, 于波, 王荣, 等. 山东省小麦品种演变及产量性状的遗传分析[J]. 山东农业科学, 2007, 2: 5–9.
Wang J C, Yu B, Wang R, *et al*. Evolution and genetic analysis of yield characters of wheat varieties in Shandong Province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2007, 2: 5–9.