

旱地不同小麦品种产量与干物质及氮磷钾养分需求的关系

刘璐¹, 王朝辉^{1,2*}, 刁超朋¹, 王森¹, 李莎莎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】黄土高原是我国旱地小麦主要产区, 但产量普遍偏低, 明确不同小麦品种的产量与干物质及氮磷钾养分需求的关系, 对高产高效小麦品种选育、科学合理施肥、实现区域小麦增产有重要意义。【方法】于2014和2015年, 在黄土高原典型旱作雨养农业区种植来自我国不同主产区和当地的123个小麦品种, 采集收获期的植株样品, 测定了不同小麦品种的产量、干物质及氮磷钾养分累积和需求量, 分析了产量与干物质及养分需求的关系。【结果】不同小麦品种的籽粒产量与生物量、收获指数、养分吸收量和养分收获指数均呈显著正相关, 与干物质、需氮量、需磷量呈显著负相关。从两年的平均结果来看, 当小麦籽粒产量从5474 kg/hm²增至7891 kg/hm²时, 生物量从12194 kg/hm²增至17032 kg/hm², 收获指数从38%增至54%, 地上部氮、磷、钾吸收量分别从159 kg/hm²增至231 kg/hm²、21.3 kg/hm²增至29.5 kg/hm²、79.1 kg/hm²增至136.9 kg/hm², 氮、磷、钾收获指数分别从62%增至83%、75%增至90%、20%增至37%。干物质需求量却从2611 kg/Mg降至1873 kg/Mg, 氮、磷需求量也分别从35.1 kg/Mg降至23.7 kg/Mg、4.5 kg/Mg降至3.2 kg/Mg。品种间需钾量也随产量升高而降低, 从19.9 kg/Mg降至11.9 kg/Mg, 但产量与需钾量间并无显著负相关关系。【结论】旱地条件下, 高产品种具有较高的生物量、收获指数、养分吸收量和养分收获指数, 而干物质及养分需求量却较低。因此, 在实际生产中, 不仅要选育高产高效小麦品种, 提高生物量, 协调籽粒产量与生物量、养分吸收量和收获指数的关系, 也要根据高产品种的养分需求规律, 结合区域土壤养分供应能力和气候特点, 科学合理施肥, 保证作物有充足的养分吸收量, 并向籽粒高效转移, 使高产品种的产量潜力充分发挥。

关键词: 旱地; 小麦; 品种; 产量; 干物质; 氮; 磷; 钾

Grain yields of different wheat cultivars and their relations to dry matter and NPK requirements in dryland

LIU Lu¹, WANG Zhao-hui^{1,2*}, DIAO Chao-peng¹, WANG Sen¹, LI Sha-sha¹

(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 Northwest A&F University/State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】 Loess Plateau is the main dryland wheat production area in China, where the grain yield is usually lower than other areas. Therefore, it is of great significance to understand the relationship of grain yield of different wheat cultivars to dry matter and N, P, K requirements for introducing and breeding new cultivars with high yield and high nutrient efficiency, reasonable fertilizer application, and promoting local wheat production. 【Methods】 In 2014 and 2015, 123 winter wheat cultivars from local and other main winter wheat production areas in our country were planted in a typical rainfed dryland on the Loess Plateau, and plant samples were collected at the harvest period to investigate the relationships between wheat grain yield and the requirements of dry matter, nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) for yield formation. 【Results】 The obtained results showed that the grain yield was significantly and positively correlated with above-ground

收稿日期: 2017-05-02 接受日期: 2017-08-21

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-03); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201303104) 资助。

联系方式: 刘璐 E-mail: liulu930206@126.com; * 通信作者 王朝辉 E-mail: w-zhaohui@263.net

biomass, harvest index, the uptakes and harvest indexes of N, P and K, but negatively correlated with the requirements of dry matter, N and P of different cultivars. Results of the two-year averages showed that when the wheat grain yield was increased from 5474 kg/hm² to 7891 kg/hm², the above-ground biomass was increased from 12194 kg/hm² to 17032 kg/hm², harvest index was increased from 38% to 54%, and uptakes of N, P and K from 159 kg/hm² to 231 kg/hm², 21.3 kg/hm² to 29.5 kg/hm², and 79.1 kg/hm² to 136.9 kg/hm², respectively. At the same time, the harvest indexes of N, P and K increased from 62% to 83%, 75% to 90%, and 20% to 37%, respectively, while the dry matter requirement decreased from 2611 kg/Mg to 1873 kg/Mg, and the requirements of N and P from 35.1 kg/Mg to 23.7 kg/Mg and 4.5 kg/Mg to 3.2 kg/Mg. Requirement of K also decreased from 19.9 kg/Mg to 11.9 kg/Mg with the increase of grain yield, but no significant correlation was found between grain yield and K requirement. 【 **Conclusions** 】 In dryland, the high yield cultivars usually have higher above-ground biomass, harvest index, nutrient uptake, and nutrient harvest index, and lower dry matter and nutrient requirement. For increasing grain yield in practical wheat production in dryland, new cultivars should be introduced or bred to increase the biomass and improve the relation of grain yield to biomass, nutrient uptake and harvest index, and fertilizer management should be based on the nutrient requirement of high yield cultivars, the local soil nutrient supply capacity and climatic characteristics to ensure the crop with sufficient nutrient uptakes and efficient transport to grain, and then to fully exploit the cultivar's yielding potential.

Key words: dryland; wheat; cultivar; grain yield; dry matter; nitrogen; phosphorus; potassium

预计到 2030 年我国人口将增加到 16 亿, 届时谷物总产要达到 600~640 Mt 才能保障粮食供给和粮食安全^[1-2]。小麦作为我国的主要粮食作物, 种植面积达 2.43×10^7 hm², 占粮食作物种植总面积的 20%~27%, 是全国近 2/3 人口的口粮。黄土高原旱作雨养农业区小麦种植面积占我国小麦种植面积的 27%~29%^[3-5], 是我国主要的旱地小麦产区^[6]。选育高产高效小麦品种和优化水肥管理是旱地小麦稳产和增产的关键, 如果不掌握小麦品种的需肥规律, 往往造成施肥不合理^[7], 导致肥料利用率降低^[8], 还会带来环境问题。因此, 掌握不同产量水平的小麦品种干物质累积、养分需求与产量之间的关系, 是旱地小麦丰产优质、高效可持续生产的关键。

小麦产量形成的养分需求量作为指导施肥的关键参数, 近年来日益受到人们的关注。2007—2008 年英国 Sutton Bonington 和 Norwich 两地的籽粒需氮 (N) 量分别为 30.0 和 22.7 kg/Mg^[9], 在我国, 对 1985—1995 年间田间试验数据的分析表明, 每形成 1000 kg 小麦籽粒产量的需氮量平均为 24.6 kg^[10], 其中西北旱地、黄淮海、长江中下游麦区的需氮量分别为 28.4、29.8、26.0 kg/Mg^[7]。对华北地区 2000—2011 年 88 个田间试验结果的分析表明, 从不施氮到过量施氮 (> 160 kg/hm²), 小麦籽粒需氮量从 20.8 增加至 25.7 kg/Mg^[11]。可见, 小麦的养分需求量存在明显的地域差异, 且因施肥量不同而异。在英国, 对

39 个小麦品种的研究表明, 其籽粒需氮量介于 13.0~37.0 kg/Mg^[12]; 在墨西哥的试验发现, 施氮量 150 kg/hm² 时, 10 个小麦品种的需氮量为 25.0~36.7 kg/Mg^[13], 说明品种间养分需求量的差异不可忽视。对河北 6 个超高产小麦品种的研究发现, 其籽粒平均产量为 9131 kg/hm², 氮、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 需求量平均为 28.0、14.3 和 22.6 kg/Mg^[14-16]; 对山东 3 个高产品种的试验发现, 产量平均为 7217 kg/hm², 氮、磷、钾需求量平均为 30.4、11.0 和 29.8 kg/Mg^[17]; 浙江品种 '119' 的产量为 3332 kg/hm², 氮、磷、钾需求量分别为 38.1、21.0、50.3 kg/Mg^[18]。随产量增加, 小麦的养分需求量似乎表现出降低的趋势, 但对 2000 年后的国内文献数据分析表明, 随着籽粒产量的增加, 小麦籽粒氮、磷需求量都呈增加趋势^[7, 19]。在渭北旱原关于 '晋麦 47'、'小偃 22' 等小麦品种^[20]和华北平原关于 '石麦 12'、'石新 828' 等小麦品种^[21]的研究发现, 小麦籽粒需钾量随着产量增加分别呈现出增加和降低两种趋势。可见, 小麦的养分需求量因施肥、地域、品种等因素的变化而异, 但与籽粒产量间的关系并无确切定论。

可见, 关于小麦籽粒产量形成的养分需求量已引起广泛重视, 并从栽培、施肥、地域差异等方面进行了大量研究, 但是对于小麦籽粒产量形成的养分需求量与品种间的关系, 即具有不同产量水平的小麦品种的养分需求量究竟如何变化, 虽有研究,

但缺乏大量品种的系统比较。除养分以外, 干物质也是产量形成的物质基础, 品种之间形成一定的产量对干物质累积数量的需求有无差异, 还未见报道。鉴于此, 本文通过在黄土高原典型旱地的 2 年田间试验, 种植来自全国主要麦区和当地的 123 个小麦品种, 研究了不同小麦品种籽粒产量与干物质和养分需求量之间的关系, 以期对西北旱地小麦品种选育和合理施肥提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原典型旱作雨养农业区陕西省永寿县御中村(东经 108°12'、北纬 34°44')。冬小麦是该地主要粮食作物, 通常于 9 月下旬或 10 月初播种, 于次年 6 月中下旬收获。无灌溉条件, 作物生产的唯一水源为自然降水。土壤为土垫旱耕人为土, 试验开始前 0—20 cm 耕层土壤基本理化性状: 土壤 pH 为 8.4, 有机质为 12.9 g/kg, 全氮为 0.9 g/kg, 硝态氮和铵态氮分别为 22.7 和 4.5 mg/kg, 有效磷为 16.9 mg/kg, 速效钾为 123.4 mg/kg。试验地点 1992~2015 多年平均降水量为 529 mm, 夏休闲季(6 月 16 日至 9 月 30 日)平均为 310 mm。试验期间 2013—2014 年、2014—2015 年的总降水分别为 538 和 630 mm, 生长季降水分别为 246 和 256 mm。

1.2 田间试验设计

田间试验采用裂区设计, 主处理为施肥和不施肥, 副处理为 123 个小麦品种, 主区大小为 20 m × 12.5 m, 主处理重复 4 次。施肥处理中仅施氮肥和磷肥, 均作为基肥在播前一次性施入, 然后旋耕、整地。氮肥用量 150 kg/hm², 磷肥用量 100 kg/hm²。氮肥肥源为尿素(含 N 46.4%), 磷肥肥源为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)。由于土壤不缺钾, 所以没有施用钾肥。供试小麦品种为来自全国不同麦区的 123 个小麦品种。小麦分别于 2013 年 9 月 28—30 日和 2014 年 10 月 3—4 日播种, 均于次年 6 月 18—20 日收获。采用常规平作, 每个品种播种 4 行, 行长 2.0 m, 行距 20 cm, 每行均匀点播 80 粒, 株距 2.5 cm。小麦生长期间无灌溉。病虫害防治同当地农户。

1.3 样品采集与测定

在小麦成熟期, 从每个品种的中间两行随机抽取 30 穗植株。具体方法: 将植株连根拔起, 于根茎结合部剪掉根系, 地上部分为穗和茎叶, 将 30 个穗全部装入标记好的小网袋, 茎叶装入标记好的中网

袋, 风干后称重。将穗脱粒, 称量籽粒风干重。每个副区中间 2 行中剩余的植株全部收割用作计产, 小麦籽粒产量以烘干重表示。

取部分风干的茎叶、颖壳和籽粒用蒸馏水冲洗干净后, 装入已编号的纸袋, 放入烘箱, 在 65℃ 下烘干至恒重, 用德国莱驰 MM400 球磨仪将烘干的植物样品粉碎。用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮粉碎的植物样品, 连续流动分析仪测定消解液中的氮和磷, 火焰光度计测定消解液中的钾。植物样品的氮、磷、钾含量均以烘干基表示。

1.4 数据计算与处理

养分吸收量指小麦收获期植株地上部累积的某种养分总量^[2]。计算公式如下:

$$\text{吸氮(磷、钾)量(kg/hm}^2\text{)} = (\text{籽粒产量} \times \text{籽粒养分含量} + \text{茎叶生物量} \times \text{茎叶养分含量} + \text{颖壳生物量} \times \text{颖壳养分含量}) / 1000$$

养分需求量指每形成 1000 kg 籽粒产量小麦地上部吸收的某种养分总量。计算公式如下:

$$\text{需氮(磷、钾)量(kg/Mg)} = \text{地上部吸氮(磷、钾)量} / \text{籽粒产量} \times 1000$$

干物质需求量指每形成 1000 kg 籽粒产量小麦地上部需累积的干物质总量。计算公式如下:

$$\text{干物质需求量(kg/Mg)} = \text{地上部生物量} / \text{籽粒产量} \times 1000$$

其中: 小麦产量、生物量单位均为 kg/hm²; 养分含量单位均为 g/kg。

数据整理用 Microsoft Excel 2013, 用 SigmaPlot 12.5 作图, 本文所用数据均来自施肥处理。

2 结果与分析

2.1 不同小麦品种的产量与生物量

对小麦籽粒产量(图 1A)的分析表明, 品种间产量存在显著差异, 2014 年介于 4790~7713 kg/hm², 2015 年介于 5473~8531 kg/hm², 相同品种两年平均介于 5474~7891 kg/hm², 高低相差 44%。不同品种小麦的生物量也存在较大差异(图 1A), 2014 年介于 9383~18443 kg/hm², 2015 年介于 12096~18120 kg/hm², 相同品种两年平均介于 12194~17032 kg/hm², 高低相差 40%。品种间籽粒产量与生物量呈显著正相关, 回归分析表明, 2014 和 2015 年籽粒产量每增加 1000 kg/hm², 生物量分别增加 1629 和 1524 kg/hm², 两年平均增加 1577 kg/hm²。不同小麦品种的籽粒产量与收获指数也呈现显著正相关

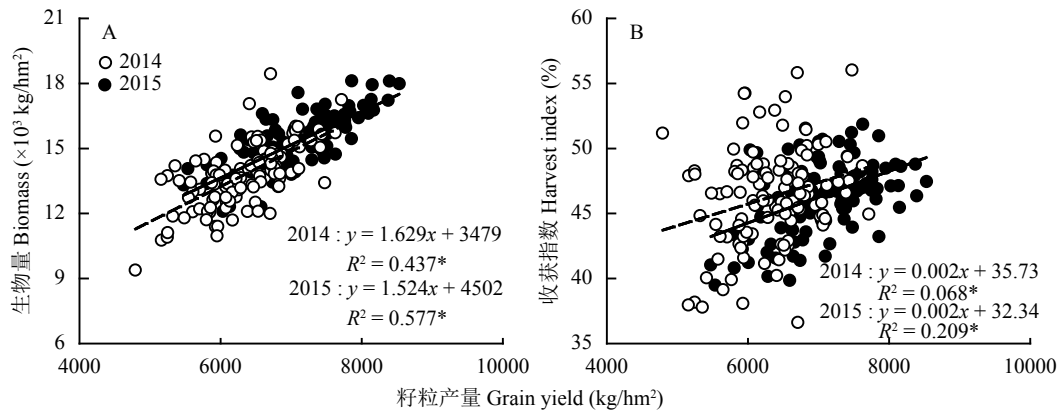


图 1 冬小麦品种间籽粒产量与生物量 (A) 及收获指数的关系 (B)

Fig. 1 Relationships of winter wheat grain yield with biomass (A) and harvest index (B) for all tested cultivars

[注 (Note) : *表示回归关系在 0.05 水平上显著, 2014 和 2015 分别代表 2013—2014 年和 2014—2015 年的小麦生长季

* indicates significant regression at $P < 0.05$. 2014 and 2015 represent the winter wheat growing seasons of 2013—2014 and 2014—2015.]

(图 1B)。2014 年不同小麦品种的收获指数介于 37%~56%，2015 年介于 40%~52%，相同品种两年平均介于 38%~54%，高低相差 39%。可见，不同小麦品种的籽粒产量存在显著差异，生物量随籽粒产量提高而增加，高产品种具有较高的生物量和收获指数，能将累积的干物质更多地转移到籽粒形成经济产量。

2.2 不同小麦品种的干物质需求量

不同小麦品种的干物质需求量差异显著，且与籽粒产量呈显著负相关 (图 2)。2014 年不同小麦品种的干物质需求量介于 1785~2731 kg/Mg，2015 年介于 1928~2533 kg/Mg，相同品种两年平均介于 1873~2611 kg/Mg，高低相差 39%。回归分析表明，小麦籽粒产量每增加 1000 kg/hm²，两年干物质需求量分别减少 86.5 和 100.0 kg/Mg，平均减少 93.3 kg/Mg。进一步说明高产品种较低产品种能更高效地利用光合产物形成籽粒产量。

2.3 不同小麦品种的需氮量

图 3 表明，不同小麦品种的地上部吸氮量差异显著，且与籽粒产量呈显著正相关 (图 3A)。2014 年吸氮量介于 135~239 kg/hm²，2015 年介于 153~245 kg/hm²，相同品种两年平均介于 159~231 kg/hm²，高低相差 45%。回归分析表明，籽粒产量每增加 1000 kg/hm²，吸氮量两年分别增加 16.6 和 15.7 kg/hm²，平均增加 16.2 kg/hm²。不同小麦品种的需氮量与籽粒产量呈显著负相关 (图 3B)。2014 年需氮量介于 23.7~36.8 kg/Mg，2015 年介于 23.6~36.2 kg/Mg，相同品种两年平均介于 23.7~35.1 kg/Mg，

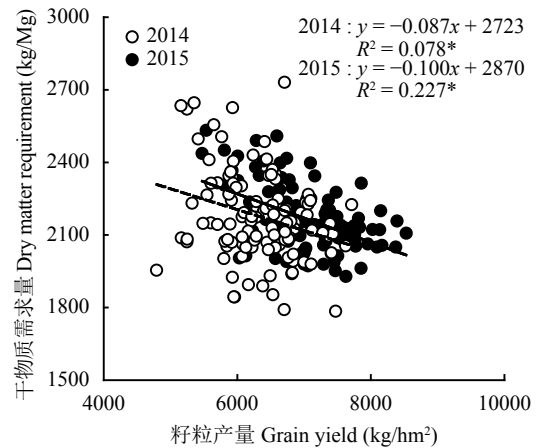


图 2 冬小麦品种间籽粒产量与干物质需求量的关系

Fig. 2 Relationship between winter wheat grain yield and the dry matter requirement for all cultivars

[注 (Note) : *表示回归关系在 0.05 水平上显著, 2014 和 2015 分别代表 2013—2014 年和 2014—2015 年小麦生长季

* indicates significant regression at $P < 0.05$. 2014 and 2015 represent the winter wheat growing seasons of 2013—2014 and 2014—2015.]

高低相差 48%。回归分析表明，籽粒产量每增加 1000 kg/hm²，两年需氮量分别降低 2.0 和 1.9 kg/Mg，平均降低 1.95 kg/Mg。与需氮量不同，不同小麦品种的氮收获指数与籽粒产量呈显著正相关 (图 3C)。2014 年氮收获指数介于 68%~88%，2015 年氮收获指数介于 52%~80%，相同品种两年平均介于 62%~83%，高低相差 34%。可见，小麦品种之间，随产量增加，地上部吸氮量增加，需氮量降低，但氮收获指数增加，这表明高产小麦品种能吸收更多氮素，并将吸收的氮素更多地分配和转移到籽粒，能利用单位数量的氮形成更多的籽粒产量，有着较

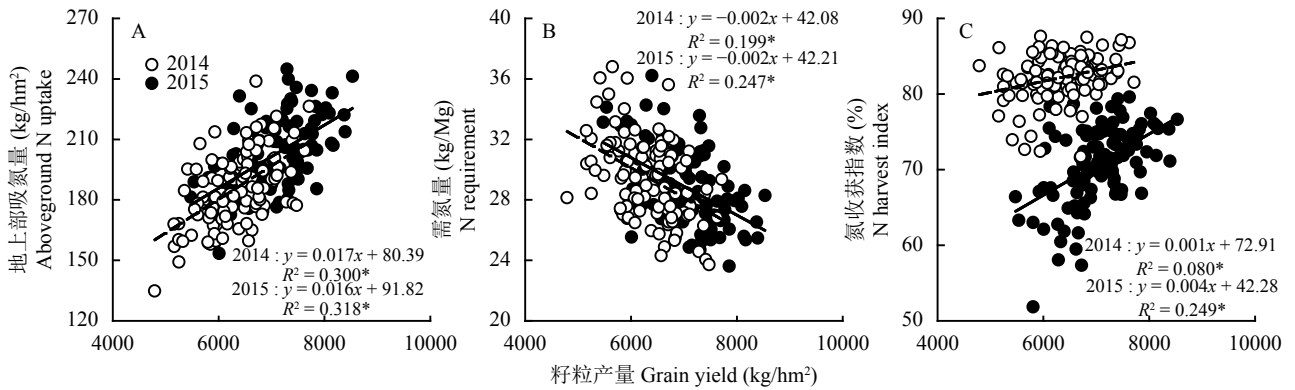


图3 冬小麦品种间籽粒产量与地上部吸氮量、需氮量以及氮收获指数的关系

Fig. 3 Relationships of winter wheat grain yield with the aboveground N uptake, N requirement and N harvest index for all cultivars

[注 (Note): *表示回归关系在 0.05 水平上显著, 2014 和 2015 分别代表 2013—2014 年和 2014—2015 年小麦生长季

* indicates significant regression at $P < 0.05$. 2014 and 2015 represent the winter wheat growing seasons of 2013—2014 and 2014—2015.]

高的氮素吸收和利用效率。

2.4 不同小麦品种的需磷量

图 4 表明, 不同小麦品种的地上部吸磷量与籽粒产量也呈显著正相关 (图 4 A)。2014 年吸磷量介于 16.5~29.9 kg/hm², 2015 年介于 22.2~33.8 kg/hm², 相同品种两年平均介于 21.3~29.5 kg/hm², 高低相差 38%。回归分析表明, 籽粒产量每增加 1000 kg/hm², 两年吸磷量分别增加 2.3 和 2.7 kg/hm², 平均增加 2.5 kg/hm²。不同小麦品种的需磷量存在较大差异, 并随籽粒产量的增加而显著降低 (图 4 B), 2014 年需磷量介于 2.9~4.5 kg/Mg, 2015 年介于 3.4~4.8 kg/Mg, 相同品种两年平均介于 3.2~4.5 kg/Mg, 高低相差 41%。回归分析表明, 籽粒产量每增加 1000 kg/hm², 两年需磷量均降低 0.2 kg/Mg。不

同小麦品种的磷收获指数均与籽粒产量呈显著正相关 (图 4 C), 2014 年的磷收获指数介于 81%~93%, 2015 年介于 72%~90%, 相同品种两年平均介于 75%~90%, 高低相差 20%。可见, 随小麦品种的产量提高, 吸磷量增加, 需磷量降低, 磷收获指数增加, 高产小麦品种能吸收更多的磷素, 并将吸收的磷素更多地分配和转移到籽粒, 利用单位数量的磷形成更多的籽粒产量, 有着较高的磷素吸收和利用效率。

2.5 不同小麦品种的需钾量

分析表明, 小麦品种的地上部吸钾量与产量呈显著正相关 (图 5 A)。2014 年吸钾量介于 74.5~143.4 kg/hm², 2015 年介于 74.1~140.7 kg/hm², 相同品种两年平均介于 79.1~136.9 kg/hm², 高低相

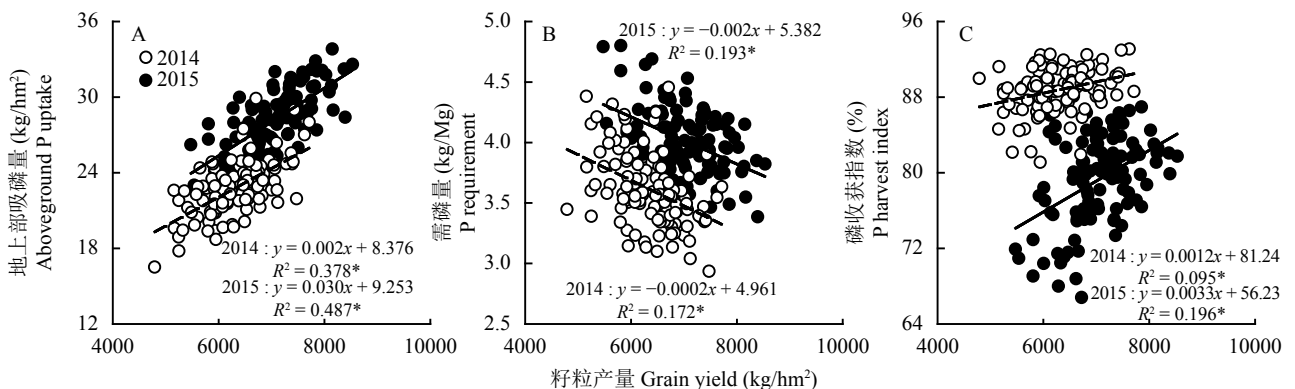


图4 冬小麦品种间籽粒产量与地上部吸磷量、需磷量以及磷收获指数的关系

Fig. 4 Relationships of winter wheat grain yield with the aboveground P uptake, P requirement and P harvest index for all cultivars

[注 (Note): *表示回归关系在 0.05 水平上显著, 2014 和 2015 分别代表 2013—2014 年和 2014—2015 年小麦生长季

* indicates significant regression at $P < 0.05$. 2014 and 2015 represent the winter wheat growing seasons of 2013—2014 and 2014—2015.]

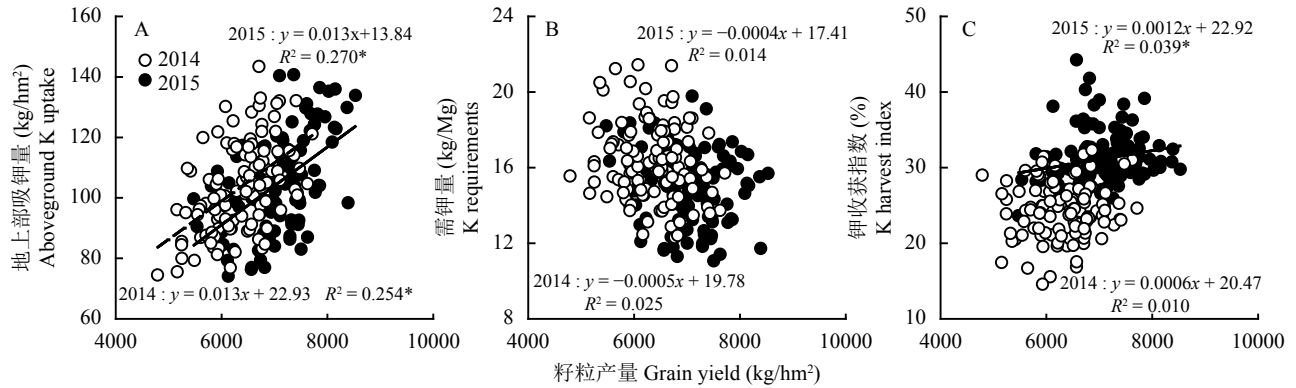


图 5 冬小麦品种间籽粒产量与地上部吸钾量、需钾量以及钾收获指数的关系

Fig. 5 Relationships of winter wheat grain yield with the aboveground K uptake, K requirement and K harvest index for all cultivars

[注 (Note) : *表示回归关系在 0.05 水平上显著, 2014 和 2015 分别代表 2013—2014 年和 2014—2015 年小麦生长期

* indicates significant regression at $P < 0.05$. 2014 and 2015 represent the winter wheat growing seasons of 2013—2014 and 2014—2015.]

差 73%。回归分析表明, 籽粒产量每增加 1000 kg/hm², 两年吸钾量分别增加 12.7 kg/hm² 和 12.9 kg/hm², 平均增加 12.8 kg/hm²。小麦品种的需钾量随籽粒产量增加有降低趋势, 但两者相关并不显著 (图 5 B)。2014 年需钾量介于 12.3~21.4 kg/Mg, 2015 年介于 11.1~19.8 kg/Mg, 相同品种两年平均介于 11.9~19.9 kg/Mg, 高低相差 67%。钾收获指数随着籽粒产量的增加而增加, 2015 年相关显著, 但 2014 年相关不显著 (图 5 C)。2014 年钾收获指数介于 15%~32%, 2015 年介于 19%~38%, 相同品种两年平均介于 20%~37%, 高低相差 85%。可见, 小麦的吸钾量随产量增加而增加, 需钾量降低, 钾收获指数增加, 说明高产小麦品种能吸收更多的钾

素, 并更多地分配和转移到籽粒, 形成更多的籽粒产量, 有着较高的钾素吸收和利用效率。

2.6 典型小麦品种的干物质与养分需求分析

将试验中两年籽粒平均产量排在前四位的品种与当地品种比较 (表 1), 发现 4 个高产品种的平均产量均显著高于当地的 2 个小麦品种, 但高产品种之间及当地品种之间的产量差异均不显著。高产品种的生物量和收获指数也高于当地品种。与此相反, 高产品种的干物质需求量和氮、磷、钾需求量却低于当地品种, 而且在高产品种和当地品种之间, 也呈现出产量越高干物质和养分需求量越低的趋势, 与前述干物质及养分需求量与籽粒产量的负相关关系相一致。

表 1 高产小麦品种与当地小麦品种的产量、生物量、收获指数、干物质与养分需求量的比较

Table 1 Comparison of different traits between high-yield and local winter wheat cultivars

指标 Trait	高产品种 High-yielding cultivar				当地品种 Local cultivar	
	运旱 22-33 Yunhan 22-33	隆平 203 Longping 203	偃展 4110 Yanzhan 4110	新麦 26 Xinmai 26	晋麦 47 Jinmai 47	长 6359 Chang 6359
籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	7890 a	7878 a	7813 a	7606 a	6398 b	6639 b
生物量 Biomass (kg/hm ²)	16996 a	16492 ab	16997 a	16072 ab	14289 c	15133 bc
收获指数 Harvest index (%)	46.5 abc	47.9 a	46.0 abc	47.2 ab	45.1 bc	44.0 c
干物质需求量 Dry matter requirement (kg/Mg)	2152 bc	2088 c	2130 abc	2120 bc	2224 ab	2275 a
需氮量 N requirement (kg/Mg)	26.9 b	26.2 b	29.7 a	28.0 ab	29.6 a	29.0 ab
需磷量 P requirement (kg/Mg)	3.4 c	3.7 ab	3.8 ab	3.5 bc	3.9 a	3.6 abc
需钾量 K requirement (kg/Mg)	12.8 c	14.4 bc	17.2 a	16.8 ab	15.6 ab	16.3 ab

注 (Note) : 同行数据后不同小写字母表示品种间在 0.05 水平下差异显著 Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different winter wheat cultivars at $P < 0.05$.

3 讨论

3.1 小麦产量与干物质需求量的关系

连续两年研究发现, 高产小麦品种产量较高的主要原因在于干物质形成量高, 向籽粒的转移量高, 但形成单位籽粒产量需要的干物质质量却小, 即利用干物质形成籽粒产量的能力较高。本试验结果表明, 相同小麦品种两年平均产量高低相差 44%, 生物量相差 40%, 产量和生物量呈显著正相关关系。对西北的陕西、山西、甘肃三省 180 个农户的调研也发现, 生物量每增加 1000 kg/hm², 籽粒产量就增加 430 kg/hm²[23]; 在华北平原的研究表明, 拔节期灌水一次较不灌水可使生物量增加 114%, 相应的籽粒产量增加 225%[24], 与本研究结论一致。说明无论优化灌水, 还是采用育种手段, 增加小麦收获期的干物质积累是籽粒产量提高的关键。本研究还发现, 两年平均收获指数介于 38%~54%, 收获指数与籽粒产量也呈显著正相关。墨西哥 8 个小麦品种的研究结果表明, 籽粒产量介于 6000~7800 kg/hm², 收获指数介于 35%~46%, 两者呈显著正相关 ($R^2 = 0.81, P < 0.05$)^[25], 与本研究结果基本一致。而在西北旱地 9 个小麦品种的研究结果表明, 籽粒产量高低相差 2100 kg/hm², 收获指数相差却不大, 在 43% 左右^[26]。对美国 5 类小麦的研究发现, 籽粒产量介于 4100~8300 kg/hm², 收获指数介于 33%~61%, 平均为 45%, 产量和收获指数间也无显著相关^[27]。在过去几十年里, 育种学家通过对籽粒产量和矮秆性状的长期选择, 小麦的收获指数已经由原来的 30% 提高至 45%, 有些品种甚至达到了 50%^[28]。与此相比, 本研究收获指数 (46%) 已经相对较高, 虽然仍小于理论最大收获指数 (64%)^[29], 但进一步提高的难度增加, 意味着小麦产量进一步提高将主要取决于干物质累积量的增加^[28-31]。渭北旱塬不同施肥和栽培模式的研究也表明, 顶凌追肥、垄覆沟播、高密垄覆沟播栽培的小麦籽粒产量较农户产量分别提高 5.8%、8.7% 和 17%, 收获指数却分别降低 1.5%、0.6% 和 3.8%, 而干物质累积量分别提高 8.1%、16% 和 29%, 说明促进干物质累积对提高籽粒产量具有重要作用^[32]。本研究中, 籽粒产量增加了 44%, 干物质需求量却降低了 39%, 干物质需求量随籽粒产量的增加而降低, 两者呈显著负相关。意大利 3 个小麦品种的研究也表明, 品种 Svevo 的籽粒产量最高为 7200 kg/hm², 较 Simeto 高 37%, 较 Creso 高 67%, 而地上部干物质对籽粒产量的贡献率却是

Svevo 最低, 为 1/5, Creso 最高为 1/2, Simeto 居中为 1/3^[33], 与本研究结论一致。这说明产量高的品种能利用更少的干物质形成籽粒产量, 也就是单位产量的干物质需求量更低。

本研究中两年产量均高于当年平均产量的 4 个高产品种产量平均为 7300 kg/hm², 高于当地常规小麦品种平均产量 (6500 kg/hm²)。个别品种, 如运早 22-33、偃展 4110、隆平 203、新麦 26 在 2015 年经历了低温干旱后籽粒产量仍较高, 可达 7800 kg/hm² 以上, 表现出高产和适应性强的特点, 但仍低于英国在 1970~1995 年间育出的 8 个小麦品种, 其最低产量为 8000 kg/hm²^[34]。随着城镇化进程加快以及耕地面积减少, 提高粮食单产水平是满足未来我国粮食需求的主要途径。因此, 在培育高产高效小麦品种的过程中, 不仅要选取干物质需求量低, 即能用更少的干物质来形成单位产量的品种, 也要维持或提高品种的现有收获指数, 提高生物量, 协调籽粒产量和生物量、收获指数的关系, 实现小麦产量进一步提高。

3.2 小麦产量与养分需求量的关系

本研究表明, 高产小麦品种具有较高的地上部氮、磷、钾吸收量和养分收获指数, 但氮、磷需求量却较低。即高产品种能吸收更多的氮、磷, 并将吸收的养分更多地分配和转移到籽粒中, 利用单位数量的氮、磷形成更多的籽粒产量, 有较高的养分吸收和利用能力。结果表明, 小麦籽粒产量由 5474 增至 7891 kg/hm² 时, 地上部氮、磷、钾吸收量分别从 159 kg/hm² 增至 231 kg/hm²、21.3 kg/hm² 增至 29.5 kg/hm²、79.1 kg/hm² 增至 136.9 kg/hm²。且氮、磷、钾吸收量均与籽粒产量呈显著正相关。西班牙南部 4 个地点高、低产小麦品种的研究表明, 高产小麦和低产小麦品种的籽粒产量平均为 3700 和 3000 kg/hm², 地上部吸氮量分别为 118 和 98 kg/hm²^[35]。浙江衢州的试验结果表明, 施磷量从 0 增至 400 kg/hm² 时, 小麦籽粒产量从 3200 kg/hm² 增至 5700 kg/hm², 地上部吸磷量从 12.9 kg/hm² 增至 25.7 kg/hm²^[36]。全国范围的研究发现, 小麦籽粒产量从 < 4500 kg/hm² 增加到 > 7500 kg/hm² 时, 地上部吸钾量从 97.2 kg/hm² 增至 201.9 kg/hm², 且籽粒产量与地上部吸钾量呈显著正相关^[37]。这均与本研究结果一致, 说明通过施肥、育种等措施增加籽粒产量的同时, 地上部氮、磷、钾吸收量也提高。关于小麦产量与氮、磷收获指数的关系报道不一致。陕西杨凌不同施肥水平的试验发现, 施氮量由 0 增至 320 kg/hm² 时, 籽粒产量由

1988 kg/hm² 增至 6313 kg/hm², 而氮收获指数却无显著差异, 在 77% 左右; 施磷量由 0 增至 150 kg/hm², 籽粒产量由 2056 kg/hm² 增至 5971 kg/hm², 磷收获指数也无显著差异, 在 87% 左右^[38]。我国北方 85 个田间试验数据也表明, 籽粒产量从 < 4500 kg/hm² 到 > 10500 kg/hm² 时, 氮收获指数基本维持在 77% 左右^[11]。全国范围的研究也表明, 籽粒产量由 < 4500 kg/hm² 到 > 9000 kg/hm², 磷收获指数也无显著变化, 基本维持在 80% 左右^[39], 而钾收获指数却呈现出先降低后增加的趋势^[37]。本试验中, 从低产到高产, 氮、磷、钾收获指数分别从 62% 增至 83%、75% 增至 90%、20% 增至 37%。氮、磷、钾收获指数均与籽粒产量存在正相关关系。与前人研究结果不尽一致, 除研究区域不同外, 主要应与养分投入或管理不同引起的作物养分吸收利用差异有关^[40-41]。英国 12 个品种的研究表明, 小麦籽粒产量由 2900 kg/hm² 增至 4600 kg/hm² 时, 氮收获指数由 74% 增至 82%, 认为氮收获指数随籽粒产量的增加而增加^[41], 与本研究结果一致。说明通过选择适宜品种, 可以在产量提高的同时提高养分利用效率。

本研究表明, 不同小麦品种籽粒产量由 5474 kg/hm² 增至 7891 kg/hm² 时, 氮、磷需求量分别从 35.1 kg/Mg 降至 23.7 kg/Mg、4.5 kg/Mg 降至 3.2 kg/Mg, 氮磷需求量均与当年籽粒产量呈显著负相关。对西班牙两个小麦品种的研究表明, 高产小麦的需氮量低于低产小麦, 分别为 33 kg/Mg 和 37 kg/Mg^[35], 与本研究结果基本一致。不同学者在不同试验条件下的研究结果不尽相同。统计 2000—2011 年河北等四省 187 个农户小麦试验数据发现, 冬小麦籽粒产量从 < 4000 kg/hm² 到 10000~12000 kg/hm² 时, 需氮量从 22.9 kg/Mg 增至 27.6 kg/Mg, 需磷量从 6.4 kg/Mg 增至 7.6 kg/Mg, 随产量增加, 氮、磷需求量呈现出增加的趋势^[42]。黄土高原南部旱地不同施肥水平的试验也表明, 施氮量介于 0~320 kg/hm² 时, 籽粒产量介于 1988~6313 kg/hm², 需氮量由 20.9 kg/Mg 增至 33.8 kg/Mg^[38]。与本研究结果不同, 主要原因可能与施肥量有关。施肥量增加会促进作物对养分的吸收及其在营养器官中的累积, 从而影响籽粒对养分的有效利用, 导致养分需求量增加^[42]。本研究是在同一地点、同一施肥量下多个品种的对比试验, 结果表明高产品种不仅有较高的养分吸收量, 还有较高的养分收获指数, 说明目前生产中应用的高产品种不仅养分吸收能力强, 而且将吸收的养分转运到籽粒形成产量的能力也较强, 这可

能是高产品种养分需求量低, 即利用较少养分就能形成较高产量的重要原因。我国 836 个田间试验文献数据分析表明, 当钾肥用量在 48~150 kg/hm² 之间时, 籽粒产量从 < 4500 kg/hm² 到 > 7500 kg/hm², 需钾量从 23.8 kg/Mg 降至 20.2 kg/Mg, 认为需钾量随产量的增加有所降低^[37]。印度统计 1970—1998 年 22 个地点的田间试验结果, 表明籽粒产量为 1600~5900 kg/hm², 需钾量介于 10.4~54.6 kg/Mg, 但未明确籽粒产量和需钾量间的关系^[43]。本研究中, 从低产到高产, 需钾量从 19.9 kg/Mg 降至 11.9 kg/Mg, 需钾量随籽粒产量增加而降低。可能的原因是渭北旱塬土壤钾素供应充足^[44], 即使不施钾肥, 土壤本身的钾素也不会限制作物对钾的吸收, 这也从另一方面说明西北旱地钾素投入不是高产小麦品种选育需考虑的重要限制因子, 即高产品种仅依靠从土壤中吸收的钾素就可以形成较高的籽粒产量, 因此其钾素需求较低, 即利用单位质量钾素形成籽粒产量的能力较强。可见, 选育高产小麦品种, 需要明确区域产量与养分供求的关系, 保障地上部充足的养分吸收量, 并促进养分向籽粒的转移, 达到高产和养分高效的双重目的。

4 结论

不同小麦品种的干物质与养分需求量存在明显差异。干物质需求量、氮磷需求量与籽粒产量呈显著负相关, 需钾量也随籽粒产量增加而降低, 但两者间负相关关系并不显著。较高的生物量和收获指数、较低的干物质需求量和养分需求量是高产品种的重要特征。在实际生产中, 不仅要选育高产高效小麦品种, 提高生物量, 协调籽粒产量与生物量、养分吸收量和收获指数的关系, 也要根据高产品种的养分需求规律, 结合区域土壤养分供应能力和气候特点, 科学合理施肥, 保证作物有充足的养分吸收量, 并向籽粒高效转移, 使高产品种的产量潜力得以充分发挥。

致谢: 感谢国家现代农业产业技术体系功能研究室和综合试验站的科研人员在品种收集方面提供的支持与帮助。

参考文献:

- [1] Miao Y X, Stewart B A, Zhang F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 397-414.
- [2] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to

- food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117–127.
- [3] Gao Y J, Li Y, Zhang J C, *et al.* Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(2): 109–121.
- [4] Turner N C, Li F M, Xiong Y C, *et al.* Agricultural ecosystem management in dry areas: challenges and solutions[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1): 1–6.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [6] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, *et al.* In-season nitrogen management strategy for winter wheat: Maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(1/2): 140–146.
- [7] 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.
- [8] 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.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [9] Gaju O, Allard V, Martre P, *et al.* Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(2): 139–152.
- [10] Liu M Q, Yu Z R, Liu Y H, *et al.* Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 245–258.
- [11] 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.
- [12] Barraclough P B, Howarth J R, Jones J, *et al.* Nitrogen efficiency of wheat: Genotypic and environmental variation and prospects for improvement[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(1): 1–11.
- [13] Ortiz-Monasterio R J I, Sayre K D, Rajaram S, *et al.* Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates[J]. *Crop Science*, 1997, 37: 898–904.
- [14] 党红凯, 李瑞奇, 李雁鸣, 等. 超高产冬小麦对氮素的吸收、积累和分配[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1037–1047.
Dang H K, Li R Q, Li Y M, *et al.* Absorption, accumulation and distribution of nitrogen in winter wheat under super highly yielding conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1037–1047.
- [15] 党红凯, 李瑞奇, 李雁鸣, 等. 超高产栽培条件下冬小麦对磷的吸收、积累和分配[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 531–541.
Dang H K, Li R Q, Li Y M, *et al.* Absorption, accumulation and distribution of phosphorus in winter wheat under super highly yielding conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 531–541.
- [16] 党红凯, 李瑞奇, 李雁鸣, 等. 超高产冬小麦对钾的吸收、积累和分配[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 1037–1047.
Dang H K, Li R Q, Li Y M, *et al.* Absorption, accumulation and distribution of potassium in winter wheat under super highly yielding conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 1037–1047.
- [17] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮海区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. *作物学报*, 2002, 28(5): 577–585.
Yu Z W, Tian Q Z, Pan Q M, *et al.* Theory and practice on cultivation of super high yield of winter wheat in the wheat fields of Yellow River and Huaihe River districts[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5): 577–585.
- [18] 张国平. 小麦干物质积累和氮磷钾吸收分配的研究[J]. *浙江农业科学*, 1984, (5): 222–225.
Zhang G P. Research on absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium and accumulation of dry matter in winter wheat[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 1984, (5): 222–225.
- [19] 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.
- [20] 曹寒冰, 王朝辉, 师渊超, 等. 渭北旱地冬小麦监控施氮技术的[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.
- [21] Niu J F, Zhang W F, Ru S H, *et al.* Effects of potassium fertilization on winter wheat under different production practices in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2013, 140(1): 69–76.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, *et al.* Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1–10.
- [25] Sayre K D, Rajaram S, Fischer R A. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico[J]. *Crop Science*, 1997, 37(1): 36.
- [26] 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.
- [27] Jing D, Bean B, Brown B, *et al.* Harvest index and straw yield of five classes of wheat[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2016, 85: 223–227.
- [28] 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.
- Liu Z Y, Yu J C, Yang J K, *et al.* The research on the relationship between biomass, harvest index and grain yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 182–184.
- [29] Foulkes M J, Slafer G A, Davies W J, *et al.* Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(2): 469–486.
- [30] Reynolds M, Bonnett D, Chapman S C, *et al.* Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(2): 439–452.
- [31] Ye Y L, Wang G L, Huang Y F, *et al.* Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties[J]. *Fuel & Energy Abstracts*, 2011, 124(3): 316–322.
- [32] 薛澄, 王朝辉, 李富翠, 等. 渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4395–4405.
- Xue C, Wang Z H, Li F C, *et al.* Effects of different fertilization and mulching cultivation methods on yield and soil water use of winter wheat on Weibei dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21): 4395–4405.
- [33] Arduini I, Masoni A, Ercoli L, *et al.* Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(4): 309–318.
- [34] Shearman V J, Sylvesterbradley R, Scott R K, *et al.* Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK[J]. *Crop Science*, 2005, 45(1): 175–185.
- [35] López-Bellido R J, Castillo J E, López-Bellido L. Comparative response of bread and durum wheat cultivars to nitrogen fertilizer in a rainfed Mediterranean environment: soil nitrate and N uptake and efficiency[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 80(2): 121–130.
- [36] Teng W, Deng Y, Chen X P, *et al.* Characterization of root response to phosphorus supply from morphology to gene analysis in field-grown wheat[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(5): 1403–1411.
- [37] 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.
- [38] 孟晓瑜. 底墒和氮磷用量对旱地冬小麦产量形成、养分水分利用的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2011.
- Meng X Y. Effect of soil moisture before sowing and nitrogen and phosphorus rates on dryland winter wheat yield formation, nutrient and water use[D]. Yangling, Shannxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2011.
- [39] 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.
- [40] Fageria N K. Nitrogen harvest index and its association with crop yields[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37: 795–810.
- [41] Austin R B, Bingham J, Blackwell R D, *et al.* Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1980, 94(3): 675–689.
- [42] 串丽敏. 基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2013.
- Chuan L M. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for wheat[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [43] Pathak H, Aggarwal P K, Roetter R, *et al.* Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65(2): 105–113.
- [44] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 等. 我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(2): 123–132.
- Liu R L, Jin J Y, Wu R G, *et al.* The characteristics of potassium cycle and the influence of straw mulching and potassium application in soil-crop system in northern of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 123–132.