

不同产量水平旱地冬小麦品种的氮磷利用差异分析^①

周 玲, 王朝辉*, 李可懿, 顾炽明, 李生秀

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要: 以 9 个旱地冬小麦品种为材料, 通过田间试验研究不同产量水平旱地冬小麦品种氮、磷效率的差异。结果表明, 不同冬小麦品种的籽粒和地上部吸氮量、吸磷量、氮磷收获指数、氮磷效率均存在明显差异。随养分投入水平的提高, 不同产量水平品种的籽粒和地上部吸氮量、吸磷量均提高, 高产品种随养分投入增加而提高的敏感程度高于中产和低产品种。氮磷收获指数随养分投入水平的提高没有明显的变化规律。低养分投入水平下, 高产品种的氮肥回收率和偏生产力分别较低产品种高 222% 和 49%; 磷肥回收率和偏生产力分别较低产品种高 766% 和 49%, 高投入降低了各产量水平品种的偏生产力。

关键词: 冬小麦; 养分投入; 产量; 氮效率; 磷效率

中图分类号: S512.1

近年来, 依靠优良品种的推广和栽培技术的改善, 我国小麦单产得到很大程度的提高^[1-3], 但小麦的高产大多以逐年增加的化肥投入为代价, 化肥生产效益也大幅下降。与上世纪 50 年代末相比, 80 年代每千克 N 增产的小麦从 10~15 kg 下降至 10 kg^[4]。以农业生产水平居西北之首的陕西省为例, 每千克化肥养分 (N + P₂O₅ + K₂O) 仅增产小麦 4.5 kg; 增产量最高的陕南川道与渭北旱原也仅 5.5 kg 与 7.2 kg; 秦巴山区、关中灌区、长城风沙区与陕北丘陵区只有 2.9、1.8、0.2 与 0.5 kg^[5]。小麦施肥生产效益的大幅度下降使我国小麦持续增产面临严峻的考验, 因此如何以低投入高效率的方式利用养分, 实现小麦的高产是当前小麦生产中亟待解决的问题。

利用不同基因型对养分的不同反应, 进行养分高效育种是同时实现小麦高产和养分高效利用最经济有效的途径^[6]。在现有的投入水平下, 养分高效型品种可使产量提高 10%~20%^[7], 有非常可观的效果。小麦生长发育所必需的诸多矿质元素中, N 和 P 需求量大而土壤供应量少, 供求之间严重失调。合理供应这两种养分可协调产量结构, 改善生理特性, 增加光合产物积累, 进而显著提高小麦产量^[8-10]。关于不同小麦品种 N、P 效率差异的研究已有很多。Guarda 等^[11]在意大利北部开展的研究表明, 20 世纪 90 年代育成的新

品种 Eridano 和 Lampo, 在 80 kg/hm² 的施 N 水平下, 产量达到 7.5 t, 与 160 kg/hm² 施 N 水平下的产量相比没有显著降低, 而 N 素回收率分别上升 20% 和 22%。Brancowt-Hulmal 等^[12]比较了法国从 1946—1992 年间所选育的 14 个冬小麦品种的主要农艺性状, 发现与老品种相比, 新选育品种的 N 素效率有很大程度提高, 可见选育适应低 N 水平小麦品种有可行基础。低 P 和高 P 条件下, 不同品种小麦产量、生物量、各器官中 P 含量、P 利用效率和 P 收获指数^[13-15]均存在极显著差异。低 P 时的不同品种产量为施 P 时的 59%~96%^[13], 各器官中 P 含量随地力水平的提高而提高, 而 P 利用效率和 P 收获指数在高肥力下分别较低肥力降低 10% 和 3%^[15]。由此可见, 挖掘和利用作物自身的遗传潜力, 改良现有品种的营养性状, 选育养分效率高的作物基因型有重要意义。

国内关于不同小麦品种养分利用差异的研究多集中在生产水平较高的华北平原, 在西北旱地缺乏相关研究。为此, 本文选择适于西北旱地种植的 9 个冬小麦品种, 在一块连续 6 年未施任何肥料的低肥力田块上, 通过田间试验研究了不同产量水平品种的 N、P 利用差异, 以及它们对养分投入水平的响应, 以期为低投入条件下旱地小麦高产和高效生产提供理论依据。

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40671107)、国家重点基础研究发展计划项目 (2009CB118604) 和农业公益性行业科研专项经费项目 (200803030) 资助。

* 通讯作者 (w-zhaohui@263.net)

作者简介: 周玲 (1984—), 女, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事土壤植物营养方面的研究。E-mail: zhouling2008913@163.com

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验于2008年10月至2009年6月在西北农林科技大学农作一站进行。该试验站位于渭河三级阶地,海拔约520 m,年均气温13℃,全年降水量550~600 mm,季节分布不均,多集中在7—9月,属半湿润易旱区。试验田土壤为人为旱耕土垫土,含有有机质21.9 g/kg、全N 0.8 g/kg、NO₃⁻-N 6.9 mg/kg、NH₄⁺-N 18.5 mg/kg、速效P 6.5 mg/kg、速效K 114 mg/kg, pH 8.3。

试验采用裂区设计,主处理为养分投入水平,包括不施肥(对照),施N 80 kg/hm²(低N),施P₂O₅ 50 kg/hm²(低P),施80 kg/hm² N + 50 kg/hm² P₂O₅(低投入)和施160 kg/hm² N + 100 kg/hm² P₂O₅(高投入)5个处理。N肥用尿素(含N 460 g/kg),P肥在低P处理中选用过磷酸钙(含P₂O₅ 160 g/kg),其他处理中选用磷酸二铵(含N 170 g/kg,含P₂O₅ 430 g/kg);副处理为近年来当地广泛采用的9个冬小麦品种,分别为西农88、小偃22、武农148、西农979、西农2611、西农2000、西农9871、早丰902和九丰9812,分别由陕西长武县农技中心和西北农林科技大学小麦研究所提供。主区面积40 m²,副区面积2.7 m²,每品种在一个副区内种6行,行长1.8 m,行距20 cm,人工点播,播种密度为50粒/m²,4次重复。化肥播前一次施入,整个生育期无灌溉,田间管理与当地栽培一致。

1.2 样品采集与测定

于成熟期采集样品,每小区随机取1 m长的两段植株,合并后剪去根,将地上部植株分为茎叶、穗。样品风干后脱粒,称取茎叶、颖壳、籽粒风干重。取部分茎叶、颖壳、籽粒在105℃下杀青30 min,75℃烘干,测定风干样的水分含量。小麦生物量和籽粒产量均以烘干重表示。植物样品粉碎后,称取0.249 1~0.250 9 g,用H₂SO₄-H₂O₂法消煮,消煮液用连续流动分析仪测定全N,钼锑抗比色法测定全P。

1.3 养分效率的计算

养分效率是养分吸收、同化、运转、再利用等多个生理过程综合作用的结果。目前,国内外评价作物养分效率的参数有很多,由于这些参数是为不同的研究目的而设定,因此很难统一。本文采用比较通用的回收率、农学效率和偏生产力,计算方法如下^[11,16]:

(1) N肥农学效率(kg/kg) = (施N区产量 - 不施N区产量) / 施N量,表示单位施N量所增加的作物籽粒产量,其大小可以评价N肥的增产效应。

(2) N肥回收率(%) = (施N区作物吸N量 - 不施N区作物吸N量) / 施N量 × 100%,表示被植物吸收的N占施入土壤的肥料N比例,其大小反映了作物对施入土壤中的肥料N的吸收状况。

(3) N肥偏生产力(kg/kg) = 施N小区作物产量 / 施N量,它是指投入的单位肥料N所能生产的作物籽粒产量,其大小反映了施用N肥对经济产量产生的效应。

P肥利用效率的计算同N肥。

1.4 统计分析

试验数据用DPS软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同冬小麦品种的籽粒产量差异

结合方差分析多重比较的结果,可将9个小麦品种分为3组(表1),高产组为品种西农88,在不同养分投入水平的平均产量为4528 kg/hm²;中产组为品种小偃22、早丰902、西农9871、西农2000、武农148,平均产量为3756 kg/hm²;低产组为西农979、西农2611、九丰9812,平均产量为3326 kg/hm²。无养分投入时,高产品种西农88的籽粒产量就显著高于其他品种;养分投入水平提高更增加了其增产效果,分别比对照提高34%和55%。中产组品种在无养分投入时,产量多与低产组品种无显著差异;低养分投入时籽粒产量较对照提高16%~29%,平均为25%;高养分投入时产量提高24%~79%,平均为42%。低产组品种

表1 不同养分投入水平下冬小麦品种的籽粒产量(kg/hm²)

Table 1 Grain yield of different winter wheat varieties at different fertilizing rates

品种	对照	低投入	高投入
西农 88	3 497 c(a)	4 680 b(a)	5 406 a(a)
小偃 22	3 295 b(abc)	4 111 ab(b)	4 720 a(b)
早丰 902	3161 b(abc)	3 973 a(b)	4 192 a(c)
西农 9871	3 406 b(ab)	3 949 a(b)	4 234 a(c)
西农 2000	2 895 a(c)	3 721 a(bc)	3 739 a(d)
武农 148	2 896 c(c)	3 708 b(bc)	5 197 a(a)
西农 979	2 991 b(bc)	3 401 b(cd)	4 139 a(c)
西农 2611	2 900 b(c)	3 109 b(de)	4 211 a(c)
九丰 9812	2 994 a(abc)	2 884 a(e)	3 307 a(e)

注:括号外同行不同小写字母表示养分投入水平间的差异达p<0.05显著水平,括号内同列不同字母表示品种间的差异达p<0.05显著水平,下同。

在无养分投入时产量就很低, 养分投入的增产幅度亦很小; 低养分投入籽粒产量较对照提高 4%~14%, 平均为 6%; 高养分投入提高 10%~45%, 平均为 31%。可见, 不同组小麦产量均无养分投入时最低, 低投入时居中, 高投入时最高; 无养分投入时籽粒产量及其对增加养分投入的反应敏感程度是决定小麦产量的重要因素。

2.2 不同冬小麦品种对氮磷吸收的差异

2.2.1 不同冬小麦品种的籽粒吸 N 量、地上部吸 N 量和 N 收获指数差异

高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种, 在不同养分投入水平的籽粒吸 N 量平

均分别为 77.0、68.7 和 59.7 kg/hm² (表 2)。无养分投入时, 高产品种西农 88 的籽粒吸 N 量并不高, 与中、低产品种没有显著差异, 但低、高养分投入水平下其籽粒吸 N 量分别比对照提高 78% 和 143%, 成为对应投入水平下籽粒吸 N 量最高的品种。中产品种在低养分投入时, 籽粒吸 N 量提高 32%~60%, 平均为 50%; 高养分投入时提高 64%~151%, 平均为 97%。低产组品种随养分投入增加, 提高较小, 低养分投入时提高 13%~46%, 平均为 29%; 高养分投入时提高 36%~92%, 平均为 71%。

表 2 不同冬小麦品种的籽粒吸 N 量、地上部吸 N 量和 N 收获指数

Table 2 Nitrogen uptakes in shoot and grain and nitrogen harvest indexes of different winter wheat varieties

品种	籽粒吸 N 量 (kg/hm ²)			地上部吸 N 量 (kg/hm ²)			N 收获指数 (%)		
	对照	低投入	高投入	对照	低投入	高投入	对照	低投入	高投入
西农 88	44.4 c(bc)	79.0 b(a)	107.7 a(a)	56.3 c(bcd)	100.6 b(a)	135.9 a(a)	78.8 a(d)	78.6 a(bcd)	79.3 a(bcd)
小偃 22	48.4 c(abc)	74.1 b(a)	99.9 a(b)	61.1 c(abc)	90.2 b(b)	129.8 a(a)	79.4 b(cd)	82.4 a(a)	77.2 c(ef)
旱丰 902	44.8 c(bc)	71.7 b(ab)	84.4 a(cd)	55.5 c(bcd)	87.8 b(bc)	106.0 a(c)	80.9 ab(b)	81.7 a(ab)	79.6 b(bc)
西农 9871	55.1 c(a)	72.9 b(a)	90.4 a(c)	66.6 c(a)	92.8 b(ab)	116.2 a(b)	82.3 a(a)	78.6 b(cd)	77.7 b(def)
西农 2000	41.9 b(c)	63.7 a(bc)	73.3 a(ef)	52.1 b(d)	77.3 a(d)	89.7 a(d)	80.1 b(bc)	82.6 a(a)	81.7 a(a)
武农 148	41.6 c(c)	64.0 b(bc)	104.3 a(ab)	50.5 c(d)	79.6 b(cd)	129.6 a(a)	82.4 a(a)	80.6 a(abc)	80.5 a(ab)
西农 979	42.0 c(c)	61.2 b(c)	79.3 a(de)	53.4 c(cd)	76.8 b(d)	101.2 a(c)	78.7 a(d)	79.7 a(abcd)	78.4 a(cde)
西农 2611	43.1 c(bc)	56.3 b(c)	82.8 a(d)	55.5 c(bcd)	73.0 b(d)	108.3 a(bc)	77.6 a(e)	77.1 a(d)	76.4 a(f)
九丰 9812	49.4 b(ab)	55.8 ab(c)	67.3 a(f)	62.7 b(ab)	72.0 ab(d)	84.5 a(d)	78.9 a(d)	77.5 a(d)	79.9 a(bc)

高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种, 在不同养分投入水平的地上部吸 N 量平均分别为 97.6、85.6 和 76.4 kg/hm²。无养分投入时, 高产品种西农 88 的地上部吸 N 量与中、低产品种没有显著差异, 但在低、高养分投入下分别比对照提高 79% 和 142%, 显著高于中、低产品种。中产品种在低养分投入时, 地上部吸 N 量提高 39%~58%, 平均为 50%; 高养分投入时提高 72%~157%, 平均为 101%。低产组品种随养分投入增加, 提高较小, 低养分投入时提高 15%~44%, 平均为 29%; 高养分投入时提高 35%~95%, 平均为 71%。

N 收获指数是籽粒中 N 素累积量占地上部累积量的比例, 反映了小麦体内 N 素向籽粒分配的能力。统计分析表明, 多数品种的 N 收获指数在 3 个投入水平间没有显著差异, 即养分投入的增加并没有促进 N 素向籽粒的分配。无养分投入时, 高产品种西农 88 的 N 收获指数为 78.8%, 中产和低产品种的平均值分别为 81.0% 和 78.4%。低养分投入条件下, 三者分别为

78.6%、81.2% 和 78.1%。高养分投入时, 相应的收获指数分别为 79.3%、79.3% 和 78.2%。可见, 低产品种的 N 收获指数较低, 高产品种的 N 收获指数并不是最高的, N 收获指数的高低并不能解释不同品种籽粒吸 N 量的差异。

由此, 不同产量水平冬小麦品种的籽粒吸 N 量和地上部吸 N 量均随养分投入水平的提高而提高, N 收获指数随养分投入的提高没有明显的变化规律。高产品种的籽粒和地上部吸 N 量虽在无养分投入时并不高, 但其随养分投入增加而提高的敏感程度显著高于中产和低产品种。

2.2.2 不同冬小麦品种的籽粒吸 P 量、地上部吸 P 量和 P 收获指数差异

对不同品种籽粒吸 P 量的分析表明 (表 3), 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种在不同养分投入水平的籽粒吸 P 量平均分别为 9.9、9.4 和 7.7 kg/hm²。无养分投入时, 高产品种西农 88 的籽粒吸 P 量为 8.4 kg/hm², 虽高于低产品种的平均值 7.3

kg/hm²，但低于中产品种的平均值 8.5 kg/hm²。与对照相比，低投入时低产品种的籽粒吸 P 量没有显著提高，中产品种提高 6%~26%，平均为 16%，而高产品种西

农 88 提高 24%。高投入下亦如此，低产组品种没有显著提高，中产品种提高 3%~46%，平均为 16%，而西农 88 提高 28%。

表 3 不同冬小麦品种的籽粒吸 P 量、地上部吸 P 量和 P 收获指数差异

Table 3 Phosphorus uptakes in shoot and grain and phosphorus harvest indexes of different winter wheat varieties

品种	籽粒吸 P 量 (kg/hm ²)			地上部吸 P 量 (kg/hm ²)			P 收获指数 (%)		
	对照	低投入	高投入	对照	低投入	高投入	对照	低投入	高投入
西农 88	8.4b (ab)	10.4 a(a)	10.7 a(b)	9.6 b(ab)	11.9 a(a)	12.3 a(b)	86.7 a(d)	87.6 a(bcd)	87.3 a(cd)
小偃 22	9.5 a(a)	10.6 a(a)	10.3 a(b)	10.8 a(a)	11.8 a(a)	12.0 a(b)	87.7 b(cd)	89.7 a(ab)	86.5 b(de)
旱丰 902	7.8 b(bc)	9.6 a(ab)	9.0 ab(cd)	8.7 b(bcd)	10.7 a(ab)	10.1 ab(cd)	89.7 a(a)	89.2 a(abc)	88.7 a(abc)
西农 9871	8.7 a(ab)	9.2 a(ab)	9.3 a(c)	9.8 a(ab)	10.7 a(ab)	10.8 a(c)	89.2 a(ab)	86.6 b(d)	85.9 b(de)
西农 2000	8.2 a(b)	10.4 a(a)	8.5 a(cd)	9.2 a(bc)	11.4 a(a)	9.5a (de)	89.4 b(ab)	90.9 a(a)	89.7 ab(a)
武农 148	8.4 c(ab)	9.7 b(ab)	12.3 a(a)	9.5 c(ab)	10.8 b(ab)	13.9 a(a)	88.2 c(bc)	89.8 a(ab)	88.9 b(ab)
西农 979	8.3 a(b)	8.6 a(bc)	9.0 a(cd)	9.3 a(b)	9.4 a(bc)	10.2 a(cd)	89.1 b(ab)	91.2 a(a)	88.6 b(abc)
西农 2611	6.9 a(c)	7.4 a(cd)	8.2 a(de)	7.9 b(cd)	8.5 ab(cd)	9.6 a(d)	87.2 a(cd)	86.8 a(cd)	85.7 a(e)
九丰 9812	6.7 a(c)	6.5 a(d)	7.3 a(e)	7.7 a(d)	7.4 a(d)	8.3 a(e)	87.7 a(cd)	87.7 a(bcd)	88.0 a(bc)

高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种，在不同养分投入水平的地上部吸 P 量平均分别为 11.3、10.6 和 8.7 kg/hm²。无养分投入时，高产品种西农 88 的地上部吸 P 量为 9.6 kg/hm²，与中产品种的平均值相同，高于低产品种的平均值 8.3 kg/hm²。在低投入下，低产品种的地上部吸 P 量较对照没有显著提高，中产品种提高 9%~25%，平均为 16%，而高产品种西农 88 提高 23%，达到低投入水平的最高地上部吸 P 量。高投入下趋势相同，低产组品种的籽粒吸 P 量提高 8%~20%，平均为 13%，中产品种提高 3%~45%，平均为 17%，而西农 88 提高 27%，亦达到高投入水平的最高值。

对 P 收获指数的分析表明（表 3），无养分投入时，高产品种西农 88 的 P 收获指数为 86.7%，中产和低产品种的平均值分别为 88.9% 和 88.0%。低养分投入条件下，三者分别为 87.6%、89.2% 和 88.6%。高养分投入时，相应的收获指数分别为 87.3%、87.9% 和 87.4%。可见，中产品种的 P 收获指数稍高，而高产品种稍低，P 收获指数的高低也不能解释不同品种籽粒吸 P 量的差异。

由此，随养分投入水平的提高，不同产量水平品种的籽粒吸 P 量和地上部吸 P 量均提高，而 P 收获指数无明显变化。高产品种的籽粒和地上部吸 P 量虽在无养分投入时不高，但其随养分投入增加而提高的敏感性较高。

2.3 不同冬小麦品种的氮、磷效率差异

2.3.1 不同冬小麦品种的 N 肥效率差异 对低投入下不同品种 N 肥农学效率（表 4）的计算表明，高产品种西农 88 的农学效率为 10.7 kg/kg，中产品种的平均农学效率为 4.4 kg/kg，而低产组因各品种与对照相比产量均降低，故该组的平均农学效率为负值。

表 4 不同冬小麦品种的 N 肥农学效率、回收率及偏生产力

Table 4 Agronomic efficiency, recovery efficiency and partial factor productivity of applied N fertilizer for different winter wheat varieties

品种	N 肥农学效率 (kg/kg)	N 肥回收率 (%)	N 肥偏生产力 (kg/kg)	
	低投入	低投入	低投入	高投入
西农 88	10.7 (a)	43.1 (a)	58.5 a(a)	33.8 b(a)
小偃 22	6.8 (abc)	25.6 (abc)	51.5 a(b)	29.5 b(b)
旱丰 902	1.9 (bcd)	21.1 (bc)	49.8 a(b)	26.3 b(c)
西农 9871	5.3 (abc)	31.8 (ab)	49.3 a(b)	26.5 b(c)
西农 2000	7.1 (ab)	27.5 (abc)	46.8 a(bc)	23.3 b(d)
武农 148	1.0 (bcd)	18.4 (bc)	46.5 a(bc)	32.5 b(a)
西农 979	-1.1 (bcd)	15.5 (bc)	42.8 a(cd)	25.8 b(c)
西农 2611	-1.7 (cd)	14.3 (bc)	38.8 a(de)	26.5 b(c)
九丰 9812	-6.3 (d)	10.5 (c)	35.8 a(e)	20.7 b(e)

注：N 肥农学效率和回收率的计算以低 P（50 kg/hm²）处理为对照（籽粒产量和地上部吸 N 量文中未列出）。

不同产量水平的小麦品种在低养分投入条件下的 N 肥回收利用率与农学效率表现相同。高产品种西农 88 N 肥回收率为 43.1%，中产和低产品种的平均 N 肥

回收率分别为 24.9% 和 13.4%，高产品种较低产品种高 222%，这表明高产品种能更高效地吸收施入土壤中的 N 肥。

对投入养分后 N 肥偏生产力（表 4）的分析表明，与低养分投入相比，高养分投入下所有品种的 N 肥偏生产力都显著降低，说明 N 肥投入水平提高后，N 肥的增产效益显著降低。在同一投入水平下，不同品种的 N 肥偏生产力存在显著差异。低投入下，高产品种西农 88 的 N 肥偏生产力为 58.5 kg/kg；中产和低产品种平均分别为 48.7 和 39.1 kg/kg，高产品种较低产品种高 49%；在高投入下亦如此，仍是高产品种最高，为 33.8 kg/kg，低产品种最低，平均为 24.3 kg/kg，中产品种平均为 27.6 kg/kg。

由此，与中产组和低产组品种相比，高产品种具有较高的 N 肥生产效益。

2.3.2 不同冬小麦品种的 P 肥效率差异 P 肥效率的各指标（表 5）与 N 肥效率基本相同。低投入下，高产品种西农 88 的 P 肥农学效率为 30.0 kg/kg，中产品种的平均农学效率为 1.2 kg/kg，而低产组因多数品种与对照相比产量均降低，故该组的平均 P 肥农学效率为负值。

表 5 不同冬小麦品种的 P 肥农学效率、回收率及偏生产力差异
Table 5 Agronomic efficiency, recovery efficiency and partial factor productivity of applied P fertilizer for different winter wheat varieties

品种	P 肥农学效率 (kg/kg)	P 肥回收率 (%)	P 肥偏生产力 (kg/kg)	
	低投入	低投入	低投入	高投入
西农 88	30.0 (a)	9.3 (a)	93.5 a(a)	54.3 b(a)
小偃 22	0 (bc)	3.3 (bcd)	82.5 a(b)	47.0 b(b)
旱丰 902	10.5 (b)	4.4 (b)	79.5 a(b)	42.0 b(c)
西农 9871	-1.8 (bc)	-0.6 (e)	78.8 a(b)	42.3 b(c)
西农 2000	3.5 (bc)	3.7 (bc)	74.8 a(bc)	37.5 b(e)
武农 148	-6.0 (c)	0.6 (cde)	74.0 a(bc)	52.0 b(a)
西农 979	-4.8 (c)	0 (de)	68.0 a(cd)	41.5 b(c)
西农 2611	-2.0 (bc)	2.3 (bcde)	62.3 a(de)	41.8 b(c)
九丰 9812	1.5 (bc)	0.9 (bcde)	57.8 a(e)	33.0 b(e)

注：P 肥农学效率和回收利用率的计算以低 N（80 kg/hm²）处理为对照（籽粒产量和地上部吸 P 量文中未列出）。

不同品种在低养分投入条件下的 P 肥回收率亦如此。高产品种西农 88 的 P 肥回收率最高，为 9.3%，中产和低产品种平均分别为 2.3% 和 1.1%，高产品种较低产品种高 766%，这表明高产品种能更高效地吸收施入土壤中的 P 肥。

与低养分投入相比，高养分投入下所有品种的 P 肥偏生产力都显著降低（表 5），说明 P 肥投入水平提高后，P 肥的增产效益也显著降低。在同一投入水平下，不同品种的 P 肥偏生产力存在显著差异。低投入下，高产品种西农 88 的 P 肥偏生产力显著高于其他品种，为 93.5 kg/kg；中产品种的平均 N 肥偏生产力居中，为 77.8 kg/kg；低产品种的平均值最低，为 62.6 kg/kg，高产品种较低产品种高 49%；在高投入下亦存在同样的规律，仍是高产品种最高，为 54.3 kg/kg，低产品种最低，平均为 38.9 kg/kg，中产品种平均为 44.2 kg/kg。

由此，与中产和低产品种相比，高产品种具有更高的 P 肥生产效益。

3 讨论

粮食产量和养分效率都是相对概念，理论上讲同时实现粮食高产和养分高效，使它们处于最佳的平衡点是可以实现的^[17]。小麦产量和养分效率都是多重遗传和环境因素相互作用的表现^[18]，养分投入是仅次于品种的主要可控环境因素^[9]。研究结果表明，高、中、低 3 个产量水平的品种在低养分投入时，产量分别较对照提高 34%、25% 和 6%，高投入时较对照分别提高 55%、42% 和 31%，高产品种对 N、P 养分投入的敏感程度明显高于低产品种。低养分投入水平下，高产品种的 N 肥回收率和偏生产力分别较低产品种高 222% 和 49%；P 肥回收率和偏生产力分别较低产品种高 766% 和 49%，高产品种具有远高于低产品种的 N、P 生产效益。由此可见，在西北旱地，不过度依赖化肥等资源的大量投入，而通过品种的优化是同时实现作物高产与养分高效的可行途径。

本研究中，不同产量水平冬小麦品种的籽粒和地上部吸 N 量、吸 P 量均随养分投入水平的提高而提高，这与前人的研究结果相似^[15,19]，但是 N、P 收获指数随养分投入提高而变化的结论与前人并不一致。李华等^[19]对 3 个 N 水平的研究表明，N 收获指数随施 N 量的提高而降低，王树亮等^[15]通过比较不同小麦品种对 P 素吸收利用的差异得出，随地力水平的提高 P 收获指数降低，而在本研究中，随养分投入水平的提高，N、P 收获指数没有明显的变化规律。在低 N、高 N 水平下，产量与地上部吸 N 量均呈极显著正相关^[12,20-21]。本研究结果显示，高产品种的籽粒和地上部吸 N 量、吸 P 量虽在无养分投入时并不高，但其随养分投入增加而提高的敏感程度高于中产和低产品种，这是高产品种在养分投入提高后产量提高的主要原

因。产量与 N 收获指数在低 N 水平下呈极显著正相关^[12,20-22],高 N 水平下极显著正相关^[12,21-22]或不相关^[20]。本研究也得出,高产品种的 N、P 收获指数并不高。

尽管养分效率非常重要,但其内在的复杂性使得目前人们仍缺乏对它的遗传和主要机制的清晰认识^[23]。养分效率由养分吸收效率和养分利用效率组成^[24],并由这两部分共同决定^[25],吸收效率和利用效率对养分效率基因型差异的相对重要性因作物种类、基因型和环境条件的不同而有差异,但一般认为养分吸收效率是养分效率的主要变异来源^[26-28],不同品种间养分吸收的差异能更好地解释籽粒产量的差异^[29-30]。本研究中,高产品种的籽粒和地上部吸 N 量和吸 P 量对养分投入的增加更为敏感,在养分投入增加后大幅提高,具有较高的 N、P 回收率,因此产量较中产和低品种高。这可能是因为高品种在投入养分后,能形成适宜的根系大小、形态^[22,25,31-32],增强 N、P 的吸收能力。在本研究中,与低投入相比,高投入虽然提高了冬小麦的籽粒产量,但是降低偏生产力,与前人的研究结果一致^[11,15,33],这符合报酬递减规律,故高投入条件下的养分效率低于低投入。

4 结论

在旱地小麦栽培中品种起着决定作用,不同产量水平品种籽粒和地上部吸 N 量,吸 P 量, N、P 收获指数, N、P 效率均存在明显差异。高产品种的籽粒和地上部吸 N 量, N、P 量虽在无养分投入时并不高,但其随养分投入增加而提高的敏感程度高于中产和低品种,具有较高的 N、P 回收率和农学效率。随养分投入水平的提高,不同冬小麦品种的籽粒和地上部吸 N 量、吸 P 量均提高, N、P 收获指数没有明显的变化规律, N、P 偏生产力下降。选择优良品种,根据优良品种的遗传特性采用合理的栽培措施,特别是养分调控,促进小麦地上部和籽粒 N、P 的吸收,是旱地小麦实现高产高效可行途径。

参考文献:

- [1] 周阳,何中虎,陈新民,王德森,张勇,张改生. 30 余年来北部冬麦区小麦品种产量改良遗传进展. 作物学报, 2007, 33(9): 1 530-1 535
- [2] 崔振岭,陈新平,张福锁,徐久飞,石立委,李俊良. 华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析. 华北农学报, 2008, 23(增刊): 224-229
- [3] 郭战玲,沈阿林,寇长林,马政华,王守刚. 华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析. 华北农学报, 2009, 24(2):

185-189

- [4] Li SX, Wang ZH, Hu TT, Gao YJ, Stewart BA. Nitrogen in dryland soils of China and its management. *Advances in Agronomy*, 2009, 101: 123-181
- [5] 王圣瑞,马文奇,徐文华,黎青慧,张福锁. 陕西省小麦施肥现状与评价研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(9): 31-37
- [6] Clark RB, Duncan RR. Improvement of plant mineral nutrition through breeding. *Field Crop Res.*, 1991, 27: 219-240
- [7] 王激清,马文奇,江荣凤,张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全. 资源科学, 2008, 30(3): 415-422
- [8] 杨延兵,高荣岐,尹燕桦,张春庆,管延安. 氮素与品种对小麦产量和品质性状的效应. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 78-81
- [9] 曹承富,孔令聪,汪建来,赵斌,赵竹. 氮素营养水平对不同小麦品种品质性状的影响. 麦类作物学报, 2004, 24(1): 47-50
- [10] 李春喜,姬生栋,陈天房. 磷肥对小麦籽粒产量和品质的影响. 河南职业技术师范学报, 1989, 17(3/4): 99-103
- [11] Guarda G, Padovan S, Delogu G. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *Eur. J. Agronomy*, 2004, 2: 181-192
- [12] Brancow-Hulmel M, Doussinault G, Lecomte C, Bérard P, Buanec BL, Trotter M. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.*, 2003, 43: 37-45
- [13] 李继云. 有效利用土壤营养元素的作物育种新技术. 中国科学 B 辑, 1995, 25(1): 41-48
- [14] 柏栋阴,冯国华,张会云,陈荣振,王晓军. 低磷胁迫下磷高效基因型小麦的筛选. 麦类作物学报, 2007, 27(3): 407-410
- [15] 王树亮,田奇卓,李娜娜,谢连杰,裴艳婷,李慧. 不同小麦品种对磷素吸收利用的差异. 麦类作物学报, 2008, 28(3): 476-483
- [16] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣凤. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924
- [17] 张福锁,马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系. 土壤与环境, 2000, 9(2): 154-15
- [18] Dawson JC, Huggins DR, Jones SS. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. *Field Crops Research*, 2008, 107: 89-101
- [19] 李华,王朝辉,李生秀. 地表覆盖和施氮对冬小麦干物质和氮素积累与转移的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1 027-1 034

- [20] Foulkes MJ, Sylvester-Bradley R, Scott RK. Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilization of applied fertiliser nitrogen. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, 1998, 130: 29–44
- [21] Ortiz-Monasterio JI, Sayre KD, Rajaram S, McMahom M. Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. *Crop Sci.*, 1997, 37: 898–904
- [22] 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. II. 影响吸收效率的因素分析. *西北植物学报*, 1999, 19(3): 393–401
- [23] Basra AS, Goyal SS. Mechanisms of improved nitrogen-use efficiency in cereals // Kang MS. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. CABI publishing, 2002: 269–288
- [24] Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization. *Agron. J.*, 1982, 75: 562–564
- [25] Foulkes MJ, Hawkesford MJ, Barraclough PB, Holdsworth MJ, Kerr S, Kightley S, Shewry PR. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research*, 2009, 114: 329–342
- [26] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 张定一. 小麦氮素吸收利用的基因型差异研究. *中国土壤与肥料*, 2007(2): 38–42
- [27] 陈范骏, 米国华, 张福锁, 王艳, 刘向生, 春亮. 华北区部分主栽玉米杂交种的氮效率分析. *玉米科学*, 2003, 11(2): 78–82
- [28] Dhugga KS, Waines JG. Analysis of nitrogen accumulation and use in breed durum wheat. *Crop Sci.*, 1989, 29: 1 232–1 239
- [29] Van Sanford DA, MacKown CT. Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. *Crop Sci.*, 1987, 27: 295–300
- [30] May L, Van Sanford DA, MacKown CT, Cornelius PL. Genetic variation for nitrogen use in soft red_hard red winter wheat populations. *Crop Sci.*, 1991, 31: 626–630
- [31] 孙海国, 张福锁. 缺磷胁迫下的小麦根系形态特征研究. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 295–299
- [32] 张定一, 张永清, 杨武德, 苗果园. 不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应. *小麦研究*, 2006, 27(1): 1–9
- [33] 张敏敏, 翟丙年, 宋翔, 李生秀. 冬小麦不同基因型氮素利用效率的差异及机理分析. *中国农学通报*, 2007, 23(8): 245–249

Analyses of Nitrogen and Phosphorus Use over Winter Wheat Cultivars with Different Yields in Dryland

ZHOU Ling, WANG Zhao-hui, LI Ke-yi, GU Chi-ming, LI Sheng-xiu

(College of Resources and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: High efficiency breeding based on different responses of crop genotypes to nutrients is the most economic and effective way to achieve high yield and high nutrient efficient. In order to evaluate the differences of nutrient efficiency over winter wheat cultivars with different yields in dryland, nine winter wheat varieties were planted in a field where no fertilizer was applied for six years. Obtained results showed that, N and P uptakes in shoot and grain, N and P harvest indexes, N and P efficiency of different winter wheat cultivars were significantly different. With the increase of fertilizer rate, N and P uptakes in shoot and grain of different yield cultivars increased, and the increments were greater in high-yield varieties than the low-yield ones, showing a stronger response of high-yield cultivars to the input of fertilizer. However, N and P harvest indexes were not affected by the fertilization treatments. Compared with the low-yield cultivars, the high-yield ones were greater by 222% and 49% in N recovery efficiency and N partial factor productivity, and 766% and 49% in P recovery efficiency and P partial factor productivity respectively at the treatment of low fertilizer input. Partial factor productivity of different yield cultivars decreased significantly under high fertilizer input.

Key words: Winter wheat, Fertilizer rate, Grain yield, N efficiency, P efficiency