

不同产量水平旱地冬小麦品种氮磷钾养分累积与转移的差异分析*

周玲 赵护兵 王朝辉** 孟晓瑜 王建伟 陈辉林 李小涵

(西北农林科技大学资源环境学院 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冬小麦品种氮磷钾累积和转移的差异。结果表明:高产冬小麦品种的花前氮累积量随养分投入水平提高而增加的幅度明显高于中、低产品种,较高的花前氮累积量,但其花前磷累积量无明显优势;高产冬小麦品种花后能累积较多的氮磷,但其氮磷转移量、转移率、转移氮磷对籽粒的贡献率均低于中、低产品种;高产冬小麦品种花前钾累积量和钾转移量无明显优势,但其籽粒对钾的保存能力较高,花后钾损失较少。因此,较高的花后氮磷累积量、较低的花后钾损失量是旱地冬小麦品种高产的重要原因。

关键词 冬小麦 旱地 产量 氮磷钾累积与转移 花前/花后

中图分类号: S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)02-0318-08

NPK accumulation and translocation in dryland winter wheat cultivars with different yields

ZHOU Ling, ZHAO Hu-Bing, WANG Zhao-Hui, MENG Xiao-Yu, WANG Jian-Wei, CHEN Hui-Lin, LI Xiao-Han

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

Abstract To evaluate the differences in NPK accumulation and translocation in dryland winter wheat cultivars with different yields, nine winter wheat cultivars were planted on field with no fertilizer application for six years. The results showed significant differences in NPK accumulation, translocation and K loss for different cultivars. Before anthesis, increased fertilizer rate led to more rapid increase in N accumulation in high-yield cultivars than in medium- and low-yield cultivars. At pre-anthesis, however, there were no significant differences in P accumulation among different-yield wheat cultivars. High-yield cultivars were characterized as high post-anthesis N and P accumulation and low K loss levels. This was due to high ability to save translocated K in wheat grains. Also in high-yield cultivars, N and P translocation and remobilization efficiencies, and the contribution of remobilized N and P to grain yield were lower than those in low-yield cultivars. However, there was no obvious difference in K accumulation and translocation at pre-anthesis. Consequently, higher post-anthesis N and P accumulation and lower K loss were important driving factors of higher grain yields in dryland wheat cultivars.

Key words Winter wheat, Dryland, Grain yield, NPK accumulation and translocation, Pre/post-anthesis

(Received Aug. 9, 2010; accepted Dec. 2, 2010)

小麦不同生长阶段所吸收的养分都优先分配至生长中心。从拔节到成熟,小麦生长中心发生从叶片→茎秆→穗→籽粒的转移^[1],导致养分分配中心发生调整,从而使养分向各器官分配的比例不断发生变

化,也使各器官中的养分发生再转移。籽粒是小麦生育后期的生长中心,因此花后吸收的养分可直接进入籽粒,同时花前储存在营养器官中的氮磷钾养分也会向籽粒转移^[2]。花后养分累积量与养分的转移量

* 国家自然科学基金项目(30871596)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB118604)和国家科技支撑计划项目(2008BADA4B09)资助

** 通讯作者: 王朝辉(1968-),男,博士,教授,主要从事植物营养方面的研究。E-mail: w-zhaohui@263.net
周玲(1984-),女,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

收稿日期: 2010-08-09 接受日期: 2010-12-02

及其对籽粒产量的相对重要性因品种而异, 且与气候、土壤和施肥等环境条件密切相关^[3]。

小麦对氮素的吸收主要发生在开花之前, 籽粒中氮素的 51%~91%源于花前营养器官累积的氮素在生殖生长阶段向籽粒的转移^[4-6]。花后小麦能继续吸收氮素, 花后吸收的氮素对籽粒氮素积累亦有重要作用^[4,7]。小麦氮素累积和氮素转移存在基因型差异^[4,8]。Arduini 等^[3]研究表明, 低产小麦品种的氮素转移量比累积量高 45%, 而高产品种低 40%。不同品种小麦灌浆期氮的同化量与分配存在显著差异^[9-10]。适量增施氮肥可以提高小麦生育后期氮素吸收强度, 使开花前贮存物质转运量和开花后氮素同化能力同步提高, 继而增加小麦籽粒产量^[11-12], 较高的籽粒产量来自于较高的氮素转移效率^[13]。

关于小麦灌浆期对磷的累积和转移的研究较少。与氮素吸收不同的是, 磷的吸收发生在小麦的一生, 一直持续至生理成熟期^[14]。籽粒建成过程中同样存在营养器官的磷素向籽粒的转移^[15]。磷的转移取决于基因型、磷有效性和干旱、高温、盐渍等环境条件^[16-17]。磷的转移量在 12.7~20.6 kg·hm⁻² 范围内, 转移率为 71%~84%^[16], 而籽粒中约 11%~100%的磷由转移而来^[15,18]。

小麦对钾素的吸收主要在生育前期完成, 其中返青期至开花期所吸收的钾占全生育期累积总量的 83.6%, 穗(穗轴+颖壳)中的钾在孕穗末期即开始转移, 而到收获期, 叶片和叶鞘中有 60.2%的钾向外输出, 茎中转移出的钾占最大累积量的 24.9%^[1]。钾在植物体内, 与有机物质键合微弱而呈游离态。小麦细胞膜功能随生育后期的衰老而衰退, 钾容易外渗而被水淋失, 导致小麦花后钾非但没有增加, 反而出现外排^[1,19]。

以上结论均在水分充足、土壤肥力较高、化肥投入水平较高的条件下获得, 而在旱地、土壤肥力较低、化肥投入水平较低条件下缺乏相关研究。为此本研究选择适于西北旱地种植的 9 个冬小麦品种, 在连续 6 年未施任何肥料的低肥力田块上进行田间试验, 研究不同产量水平小麦氮磷钾养分累积和转移的差异, 以为旱地小麦的高产、高效栽培提供理论依据。

1 材料与试验方法

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。试验站位于黄土高原南部, 海拔 520 m 左右, 年均气温 13 °C, 年均降水量 550~600 mm, 主要集中在 7~9 月, 年均蒸发量 1 400

mm, 属半湿润易旱地区。试验前试验地连续 6 年未施任何肥料。试验田土壤为人为旱耕土垫土, 0~40 cm 土层土壤有机质含量 21.9 g·kg⁻¹, 全氮 0.8 g·kg⁻¹, 硝态氮 6.9 mg·kg⁻¹, 铵态氮 18.5 mg·kg⁻¹, 速效磷 6.5 mg·kg⁻¹, 速效钾 114 mg·kg⁻¹, 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)、80 kg·hm⁻²N + 50 kg·hm⁻²P₂O₅(低投入)和 160 kg·hm⁻²N + 100 kg·hm⁻²P₂O₅(高投入)3 个处理。氮肥为尿素(含 N 460 g·kg⁻¹), 磷肥为磷酸二铵(含 N 170 g·kg⁻¹, 含 P₂O₅ 430 g·kg⁻¹); 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”、“旱丰 902”和“九丰 9812”, 分别由陕西省长武县农业技术推广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 1 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·m⁻², 4 次重复。化肥播前一次施入, 整个生育期降水 214 mm, 无灌溉, 田间管理与当地栽培一致。

1.2 样品采集与测定

于冬小麦花期(2009 年 4 月 21~26 日, 不同品种因开花时间而异)和成熟期(2009 年 6 月 2~6 日, 不同品种因成熟时间而异)采集样品, 每小区随机取长度为 1 m 的两段植株, 合并后剪去根, 将地上部植株分为茎叶、穗。花期分别称量茎叶和穗的鲜重, 然后取部分样品于 105 °C 下杀青 30 min, 75 °C 烘干, 测定水分含量。成熟期穗风干后脱粒, 称取茎叶、颖壳、籽粒风干重, 然后取部分样品烘干, 测定水分含量。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 0.25 g, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮, 消煮液用连续流动分析仪测定全氮, 钼锑抗比色法测定全磷, 火焰光度法测定全钾。

1.3 氮、磷、钾养分累积和转移的计算方法

假设小麦在生殖生长期氮、磷未损失, 营养器官(茎叶和颖壳)中减少的氮、磷均转移至籽粒, 则营养器官氮、磷向籽粒转移参数可由以下公式计算^[3,16]。

$$\text{花前氮(磷)累积量(kg·hm}^{-2}\text{)} = \text{花期地上部氮(磷)累积量} \quad (1)$$

$$\text{花后氮(磷)累积量(kg·hm}^{-2}\text{)} = \text{收获期地上部氮(磷)累积量} - \text{花期地上部氮(磷)累积量} \quad (2)$$

$$\text{氮(磷)转移量(kg·hm}^{-2}\text{)} = \text{花期地上部氮(磷)累积量} - \text{收获期地上部营养器官(茎叶+颖壳)氮(磷)累积量} \quad (3)$$

$$\text{氮(磷)转移效率} = \text{氮(磷)转移量} / \text{花期地上部氮(磷)累积量} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{转移氮(磷)贡献率} = \text{氮(磷)转移量} / \text{籽粒氮(磷)累}$$

积量 $\times 100\%$ (5)

钾在花后因外排而发生损失, 因此相关参数由以下公式计算:

花前钾累积量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=花期地上部钾累积量 (6)

钾转移量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=花期地上部钾累积量-收获期地上部营养器官(茎叶+颖壳)钾累积量 (7)

花后钾损失量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=花期地上部钾累积量-收获期地上部钾累积量 (8)

籽粒钾占转移钾的比例=籽粒钾累积量/钾转移量 $\times 100\%$ (9)

1.4 数据处理

试验数据用 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的籽粒产量

结合方差分析多重比较的结果, 可将 9 个冬小麦品种分为 3 组(表 1): 高产组包括“西农 88”, 在不

同养分投入水平下平均产量为 $4\,528 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 中产组包括“小偃 22”、“旱丰 902”、“西农 9871”、“西农 2000”、“武农 148”, 平均产量为 $3\,756 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低产组包括“西农 979”、“西农 2611”、“九丰 9812”, 平均产量为 $3\,326 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。无养分投入(对照)时, 高产品种“西农 88”的籽粒产量显著高于其他品种; 养分投入水平提高更增加了其增产效果, 低、高养分投入时分别比对照增产 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; 低养分投入时小麦籽粒产量较对照提高 16%~29%, 平均为 25%; 高养分投入时小麦籽粒产量较对照提高 24%~79%, 平均为 42%。低产组品种在无养分投入时产量很低, 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%; 高养分投入籽粒产量较对照提高 10%~45%, 平均为 31%。可见, 不同组小麦产量均在无养分投入时最低, 低投入时居中, 高投入时最高; 无养分投入时籽粒产量较高的品种随养分投入增加而增产的幅度也较高。

表 1 不同养分投入水平下不同供试冬小麦品种的籽粒产量差异

Tab. 1 Grain yield of different winter wheat cultivars tested at different fertilizer application rates $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

产量水平 Yield level	品种 Variety	对照 Control	低投入 Low-input	高投入 High input
高产 High level	西农 88 Xinong 88	3 497c(a)	4 680b(a)	5 406a(a)
中产 Middle level	小偃 22 Xiaoyan 22	3 295b(abc)	4 111ab(b)	4 720a(b)
	旱丰 902 Hanfeng 902	3 161b(abc)	3 973a(b)	4 192a(c)
	西农 9871 Xinong 9871	3 406b(ab)	3 949a(b)	4 234a(c)
	西农 2000 Xinong 2000	2 895a(c)	3 721a(bc)	3 739a(d)
	武农 148 Wunong 148	2 896c(c)	3 708b(bc)	5 197a(a)
低产 Low level	西农 979 Xinong 979	2 991b(bc)	3 401b(cd)	4 139a(c)
	西农 2611 Xinong 2611	2 900b(c)	3 109b(de)	4 211a(c)
	九丰 9812 Jiufeng 9812	2 994a(abc)	2 884a(e)	3 307a(e)

括号内、外不同小写字母分别表示不同品种和养分投入水平间差异达 5%显著水平, 下同。Values followed by different small letters outside and inside parentheses are significantly different among different fertilizer treatments and winter wheat varieties at 5% level, respectively. The same below.

2.2 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的花前和花后氮累积量

由表 2 可知, 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种, 不同养分投入水平下花前氮累积量平均值分别为 $78.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $80.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $78.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。无养分投入时, 高产品种“西农 88”的花前氮累积量为 $53.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 中、低产品种的平均值分别为 $62.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $62.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入时, 三者分别为 $73.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $72.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $73.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 39%、16%和 17%; 高养分投入时, 三者分别为 $109.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $107.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $98.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 106%、73%和 58%。

高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种, 不同养

分投入水平下花后氮累积量平均值分别为 $18.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $-1.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。无养分投入时, 高产品种“西农 88”的花后氮累积量为 $3.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 中、低产品种的平均值分别为 $-5.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $-5.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入时, 三者分别为 $26.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $13.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 高养分投入时, 三者分别为 $26.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $-0.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

不同产量水平小麦品种的花后氮累积量明显低于花前, 说明旱地小麦对氮素的吸收主要是在花前完成。不同产量水平小麦品种花前氮累积量均随养分投入水平的提高而提高。高产品种花前氮累积量在无养分投入时虽较低, 但其随养分投入而增加的幅

表 2 不同养分投入水平下不同冬小麦品种花前和花后氮累积量

Tab. 2 Amount of pre- and post-anthesis N accumulation of different winter wheat cultivars under different fertilizer application rates $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

品种 Variety	花前 Pre-anthesis			花后 Post-anthesis		
	对照	低投入	高投入	对照	低投入	高投入
	Control	Low input	High input	Control	Low input	High input
西农 88 Xinong 88	53.1c(c)	73.7b(ab)	109.3a(bc)	3.2b(ab)	26.9a(a)	26.7a(a)
小偃 22 Xiaoyan 22	53.7c(c)	79.7b(a)	127.2a(a)	7.4a(a)	10.5a(bcd)	2.6a(bcd)
旱丰 902 Hanfeng 902	70.7a(ab)	69.5a(ab)	91.8a(d)	-15.2b(c)	18.4a(ab)	14.2a(ab)
西农 9871 Xinong 9871	79.2b(a)	74.2b(a)	126.0a(ab)	-12.6b(c)	18.6a(ab)	-9.9ab(d)
西农 2000 Xinong 2000	53.2b(c)	63.5ab(b)	82.6a(d)	-1.0a(abc)	13.8a(bc)	7.1a(bcd)
武农 148 Wunong 148	54.4c(bc)	75.5b(a)	109.7a(bc)	-3.9b(abc)	4.2a(cde)	19.9a(ab)
西农 979 Xinong 979	58.1c(bc)	72.3b(ab)	90.8a(d)	-4.7a(abc)	4.5a(cde)	10.3a(abc)
西农 2611 Xinong 2611	65.5b(abc)	74.1b(a)	112.7a(ab)	-10.0a(bc)	-1.1a(e)	-4.4a(cd)
九丰 9812 Jiufeng 9812	64.2c(abc)	72.7b(ab)	93.2a(cd)	-1.5a(abc)	-0.7a(de)	-8.6a(d)

度明显高于中、低产品种, 因此累积量亦明显高于后两者。在同一养分投入水平下, 花后氮累积量基本表现为高产品种最高, 中产品种次之, 低产品种最低。中产品种在土壤供氮不足时花后有明显的氮素损失; 低产品种花后氮素累积不明显, 低氮肥投入时氮素损失明显。

2.3 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的氮转移量、转移率和转移氮对籽粒贡献率

由表 3 可知, 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种, 不同养分投入水平下氮转移量平均值分别为 $58.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $63.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $61.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。无养分投入时, 高产品种“西农 88”的氮转移量为 $41.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 中、低产品种的平均值分别为 $51.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $50.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入时, 三者分别为 $52.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $56.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $56.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 27%、9%和 12%; 高养分投入时, 三者分别为 $81.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $83.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $77.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 97%、63%和 54%。

无养分投入时, 高产冬小麦品种“西农 88”的氮转移率为 76.6%, 中、低产品种的平均值分别为 81.6%和 80.0%; 低养分投入条件下, 三者分别为 68.6%、76.9%和 77.4%; 高养分投入时, 相应的氮转移效率分别为 73.7%、76.7%和 77.4%。3 个产量水平冬小麦品种转移氮素对籽粒氮累积的贡献率, 无养分投入时分别为 90.2%、113.2%和 116.1%, 低养分投入时分别为 67.7%、83.5%和 103.7%, 高养分投入时分别为 74.4%、92.4%和 102.4%。

可见, 冬小麦花后氮转移量随养分投入水平的提高而提高, 高产品种虽较中、低产品种敏感, 但因其无养分投入时较低, 故养分投入增加后其花后氮转移量并未表现出优势。氮素转移率和转移氮对籽粒的贡献率却随养分投入增加表现出降低的趋势,

且高产品种的转移率明显低于中、低产品种。品种之间转移氮贡献率差异更明显, 产量水平高的品种转移率明显较低。一些情况下, 中产和低产品种的转移氮贡献率大于 100%, 是由于花后的氮转移量高于籽粒中氮的累积量, 说明这些品种花后营养器官中减少的氮素并没有完全转移至籽粒, 可能因花后分蘖死亡、叶片凋落, 或茎叶衰老、累积氮分解而发生氮素损失。

2.4 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的花前和花后磷累积量

由表 4 可知, 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种, 在不同养分投入水平下花前磷累积量平均值分别为 $7.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $7.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 花后磷累积量平均值分别为 $3.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种的花前磷累积量, 在无养分投入时分别为 $7.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $7.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入水平下分别为 $7.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $7.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照降低 4%、10%和 5%; 高养分投入水平时分别为 $8.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $9.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $7.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 16%、14%和 7%。

无养分投入时, 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种的花后磷累积量分别为 $2.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入水平时分别为 $4.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $3.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 114%、141%和 60%; 高养分投入水平时分别为 $3.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照提高 68%、38%和 60%。

显然, 高产品种花前磷累积量并没有表现出明显优势。小麦花后磷累积量随养分投入水平提高而提高, 但高养分投入时提高效应下降, 高产品种花后磷累积量在无养分投入时较高, 养分投入增加时, 依然较高。

表 3 不同养分投入水平下不同冬小麦品种氮转移量、转移率和转移氮对籽粒贡献率

Tab. 3 N translocation, remobilization efficiency and contribution of remobilization to grain yield for different winter wheat cultivars under different fertilizer application rates

品种 Variety	氮转移量			氮转移率			转移氮贡献率		
	Amount of N translocation ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			N remobilization efficiency (%)			Contribution of remobilized N to grain yield (%)		
	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input
西农 88 Xinong 88	41.2c(c)	52.1b(b)	81.0a(bcd)	76.6a(de)	68.6a(c)	73.7a(b)	90.2a(b)	67.7b(e)	74.4ab(d)
小偃 22 Xiaoyan 22	41.0c(c)	63.6b(a)	97.3a(ab)	76.3a(e)	79.8a(a)	75.3a(b)	87.5a(b)	86.3a(bcd)	98.2a(abc)
旱丰 902 Hanfeng 902	60.0a(ab)	53.3a(ab)	70.2a(cd)	83.4a(ab)	75.9b(ab)	75.1b(b)	133.7a(a)	78.4b(cde)	83.3b(cd)
西农 9871 Xinong 9871	67.7b(a)	54.3b(ab)	100.2a(a)	84.1a(a)	70.9b(bc)	78.2ab(ab)	126.0a(a)	76.4b(de)	110.4a(a)
西农 2000 Xinong 2000	42.9a(c)	49.9a(b)	66.2a(d)	80.9a(abc)	78.7a(a)	78.1a(ab)	108.5a(ab)	80.8b(bcde)	89.0b(bcd)
武农 148 Wunong 148	45.5c(bc)	59.9b(ab)	84.4a(abcd)	83.5a(ab)	79.1ab(a)	76.9b(b)	110.2a(ab)	95.4b(abc)	81.3c(cd)
西农 979 Xinong 979	46.6c(bc)	56.7b(ab)	68.9a(cd)	80.3a(bcd)	77.8ab(a)	75.2b(b)	110.9a(ab)	96.8a(ab)	86.7a(cd)
西农 2611 Xinong 2611	53.1b(abc)	57.4b(ab)	87.2a(abc)	80.3a(bcd)	76.2a(ab)	75.5a(b)	132.2a(a)	107.2a(a)	106.8a(ab)
九丰 9812 Jiufeng 9812	50.9c(bc)	56.5b(ab)	75.9a(cd)	79.3b(cde)	78.3b(a)	81.6a(a)	105.1a(ab)	107.0a(a)	113.7a(a)

表 4 不同养分投入水平下不同冬小麦品种花前和花后磷累积量

Tab. 4 Amount of pre- and post-anthesis P accumulation of different winter wheat cultivars under different fertilizer application rates $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

品种 Variety	花前 Pre-anthesis			花后 Post-anthesis		
	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input
	西农 88 Xinong 88	7.4b(bc)	7.1b(bcd)	8.6a(bcd)	2.2b(ab)	4.7a(a)
小偃 22 Xiaoyan 22	7.5b(abc)	7.8b(ab)	9.7a(ab)	3.3a(a)	4.0a(ab)	2.3a(c)
旱丰 902 Hanfeng 902	8.8a(a)	6.4b(de)	8.3ab(bcd)	-0.1c(d)	4.3a(a)	1.8b(cd)
西农 9871 Xinong 9871	8.8a(ab)	6.8b(bcde)	10.2a(a)	1.0b(bcd)	3.9a(ab)	0.6b(d)
西农 2000 Xinong 2000	7.4a(bc)	6.8a(bcde)	7.7a(cd)	1.8b(abc)	4.6a(a)	1.8b(cd)
武农 148 Wunong 148	7.5b(abc)	8.3ab(a)	9.6a(ab)	2.0b(ab)	2.5b(bc)	4.3a(a)
西农 979 Xinong 979	7.7a(ab)	6.7b(cde)	7.3ab(cd)	1.6a(abcd)	2.7a(bc)	2.9a(bc)
西农 2611 Xinong 2611	7.8a(ab)	7.7a(abc)	8.8a(abc)	0.1a(cd)	0.7a(d)	0.8a(d)
九丰 9812 Jiufeng 9812	6.2b(c)	6.1b(e)	7.2a(d)	1.4a(bcd)	1.3a(cd)	1.1a(d)

2.5 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的磷转移量、转移率和转移磷对籽粒的贡献率

由表 5 可知, 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种在不同养分投入水平下的磷转移量平均值分别为 $6.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。无养分投入时, 高产品种“西农 88”的磷转移量为 $6.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 中、低产品种的平均值分别为 $6.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入时, 三者分别为 $5.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较无养分投入时分别降低 7%、13%和 6%; 高养分投入时, 三者分别为 $7.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $7.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较无养分投入时提高 15%、12%和 5%。

无养分投入时, 高产品种“西农 88”的磷转移率为 82%, 中、低产品种的平均值分别为 86.0%和 86.1%; 低养分投入条件下, 三者分别为 77.8%、82.9%和 86.2%; 高养分投入时, 相应的磷转移率分别为 81.7%、84.7%和 84.5%。无养分投入时高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种转移磷对籽粒的贡献率

分别为 72.5%、83.1%和 89.5%; 低养分投入条件下, 三者分别为 56.4%、62.9%和 84.4%; 高养分投入时, 三者分别为 67.3%、79.0%和 83.0%。

显然, 高产小麦品种营养器官中磷向籽粒的转移也没有突出优势, 并不明显高于中产和低产品种。磷转移率和对籽粒的贡献率在各养分投入水平下也均低于中产和低产品种。

2.6 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的花前钾累积量和花后钾损失量

由表 6 可知, 无养分投入时, 高产冬小麦品种“西农 88”的花前钾累积量为 $86.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 中、低产品种的平均值分别为 $97.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $92.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 低养分投入时, 三者分别为 $88.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $102.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $93.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与无养分投入时无显著差异; 高养分投入时, 三者分别是 $104.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $129.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $113.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较无养分投入时提高 21%、33%和 23%。

无养分投入时, 高、中、低 3 个产量水平冬小

表 5 不同养分投入水平下不同冬小麦品种磷转移量、转移率和转移磷对籽粒贡献率

Tab. 5 P translocation, remobilization efficiency and contribution of remobilization to grain yield for different winter wheat cultivars under different fertilizer application rates

品种 Variety	磷转移量			磷转移率			转移磷贡献率		
	Amount of P translocation (kg · hm ⁻²)			P remobilization efficiency (%)			Contribution of remobilized P to grain yield (%)		
	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input
西农 88 Xinong 88	6.1ab(cd)	5.7b(bc)	7.1a(bc)	82.2a(c)	77.8a(cd)	81.7a(d)	72.5a(c)	56.4b(d)	67.3ab(cd)
小偃 22 Xiaoyan 22	6.2b(cd)	6.6b(ab)	8.1a(ab)	82.2a(c)	84.2a(ab)	82.9a(cd)	66.8b(c)	65.4b(cd)	77.5a(bcd)
旱丰 902 Hanfeng 902	7.9a(a)	5.3b(c)	7.2ab(abc)	89.4a(a)	81.8b(bc)	85.8ab(ab)	103.6a(ab)	56.6c(d)	80.0b(bc)
西农 9871 Xinong 9871	7.7a(ab)	5.4b(c)	8.7a(a)	86.7a(b)	76.8b(d)	84.8a(abc)	89.4a(abc)	59.5b(cd)	93.1a(a)
西农 2000 Xinong 2000	6.4a(bcd)	5.8a(bc)	6.7a(bc)	87.0a(b)	85.0b(ab)	86.7ab(a)	80.0a(bc)	58.1b(d)	79.0a(bc)
武农 148 Wunong 148	6.4a(bcd)	7.1a(a)	8.1a(ab)	84.9ab(b)	86.7a(a)	83.5b(cd)	75.9a(c)	75.1a(bc)	65.4a(d)
西农 979 Xinong 979	6.7a(abc)	5.9a(bc)	6.1a(c)	86.8a(b)	87.5a(a)	84.0b(bc)	80.5a(bc)	75.4a(bc)	69.0a(d)
西农 2611 Xinong 2611	6.8a(abc)	6.6a(ab)	7.4a(abc)	86.9a(b)	86.1a(ab)	83.4b(cd)	105.7a(a)	95.1a(a)	90.4a(ab)
九丰 9812 Jiufeng 9812	5.3ab(d)	5.2b(c)	6.2a(c)	84.7b(b)	84.9b(ab)	86.1a(ab)	82.3a(abc)	82.6a(ab)	89.5a(ab)

麦品种花后钾损失量分别为 24.6 kg · hm⁻²、47.4 kg · hm⁻²和 45.5 kg · hm⁻²; 低养分投入条件下, 三者分别为 23.1 kg · hm⁻²、33.5 kg · hm⁻²和 38.5 kg · hm⁻², 较无养分投入时降低 6%、29%和 15%; 高养分投入时, 三者分别为 22.6 kg · hm⁻²、49.8 kg · hm⁻²和 45.2 kg · hm⁻², 较无养分投入时降低 8%、-5%和 1%。

显然, 各养分投入水平下, 高产冬小麦品种的花前钾累积量均低于中产和低产品种, 其花后钾损失量也较后两者低; 随养分投入水平提高, 高产品种的钾损失量有降低趋势, 中、低产品种却维持了较高的损失量。可见, 高产冬小麦品种花前钾的累积量不高, 花后钾损失却明显低于中、低产品种。

2.7 不同养分投入水平下不同冬小麦品种的钾转移量和籽粒钾占转移钾比例

由表 7 可知, 无养分投入时, 高产冬小麦品种“西农 88”的钾转移量为 39.1 kg · hm⁻², 中、低产品种的平均值分别为 62.0 kg · hm⁻²和 58.2 kg · hm⁻²; 低养分投入时, 前者为 42.0 kg · hm⁻², 与无养分投入

时无显著差异, 而后两者均为 52.2 kg · hm⁻², 较无养分投入时分别降低 16%和 10%; 高养分投入时, 三者分别为 44.4 kg · hm⁻²、70.6 kg · hm⁻²和 62.2 kg · hm⁻², 与无养分投入时没有显著差异。

对不同产量水平冬小麦品种在各养分投入水平下籽粒钾占转移钾比例的分析表明, 无养分投入时, 高、中、低 3 个产量水平冬小麦品种籽粒钾占转移钾的比例分别为 10.7%、25.2%和 23.9%; 低养分投入条件下, 三者分别为 64.9%、45.0%和 30.4%; 高养分投入时, 三者分别为 64.8%、31.7%和 31.4%。

可见, 随养分投入水平的提高, 高产品种的钾转移量没有显著提高, 且高产品种的钾转移量在各个养分投入水平下均低于中产和低产品种。高产品种籽粒钾占转移钾的比例在无养分投入时较低, 但养分投入增加后其籽粒钾占转移钾的比例大幅提高, 在高投入水平下显著高于中、低产品种。养分投入水平增加, 高产品种花后移出营养体的钾能更多地进入籽粒可能是其高产的一个重要原因。

表 6 不同养分投入水平下不同冬小麦品种花前钾累积量和花后钾损失量

Tab. 6 Amount of pre-anthesis K accumulation and post-anthesis K loss of different winter wheat cultivars under different fertilizer application rates

品种 Variety	花前钾累积量 Pre-anthesis K accumulation			花后钾损失量 Post-anthesis K loss		
	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input
	西农 88 Xinong 88	86.2b(c)	88.3b(b)	104.0a(e)	24.6a(c)	23.1a(cd)
小偃 22 Xiaoyan 22	86.2c(c)	109.7b(a)	140.8a(ab)	34.4b(bc)	40.8b(ab)	59.0a(a)
旱丰 902 Hanfeng 902	110.9ab(a)	97.0b(b)	121.7a(bcde)	55.6a(a)	18.5b(d)	45.9a(ab)
西农 9871 Xinong 9871	101.3b(ab)	92.5b(b)	127.1a(abcd)	47.7a(ab)	22.5b(d)	47.0a(ab)
西农 2000 Xinong 2000	83.3a(c)	95.5a(b)	108.5a(cde)	45.8a(ab)	37.8a(ab)	54.4a(a)
武农 148 Wunong 148	103.9b(ab)	115.3b(a)	146.7a(a)	53.6a(ab)	47.9ab(a)	42.7b(ab)
西农 979 Xinong 979	97.3b(abc)	96.7b(b)	105.1a(de)	46.8a(ab)	38.7a(ab)	36.4a(bc)
西农 2611 Xinong 2611	91.6b(bc)	97.0b (b)	127.4a(abc)	50.5a(ab)	42.9a(ab)	55.5a(a)
九丰 9812 Jiufeng 9812	89.1b(bc)	87.4b(b)	109.0a(cde)	39.1ab(abc)	33.9b(bc)	43.7a(ab)

表 7 不同养分投入水平下不同冬小麦品种钾转移量和籽粒钾占转移钾的比例

Tab. 7 K translocation and the percentage of grain K to K remobilization of different winter wheat cultivars under different fertilizer application rates

品种 Variety	钾转移量			籽粒钾占转移钾的比例		
	Amount of K translocation ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			Percentage of grain K to K remobilization (%)		
	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input	对照 Control	低投入 Low input	高投入 High input
西农 88 Xinong 88	39.1a(b)	42.0a(c)	44.4a(c)	10.7b(b)	64.9a(ab)	64.8a(a)
小偃 22 Xiaoyan 22	49.5c(ab)	60.1b(a)	79.4a(a)	31.5a(a)	32.2a(c)	27.0a(b)
旱丰 902 Hanfeng 902	70.1a(a)	38.0b(c)	66.5a(ab)	22.4b(ab)	68.7a(a)	36.1ab(b)
西农 9871 Xinong 9871	64.9a(a)	41.9b(c)	68.8a(ab)	30.2a(a)	64.0a(ab)	31.9a(b)
西农 2000 Xinong 2000	58.6a(ab)	55.9a(ab)	70.4a(ab)	22.2b(ab)	33.2a(c)	25.4b(b)
武农 148 Wunong 148	66.7a(a)	65.1a(a)	67.7a(ab)	19.6c(ab)	26.6b(c)	38.2a(b)
西农 979 Xinong 979	60.6a(ab)	55.4a(ab)	56.2a(bc)	23.2a(ab)	38.1a(bc)	37.6a(b)
西农 2611 Xinong 2611	61.1a(ab)	54.6a(ab)	70.3a(ab)	19.0a(ab)	22.9a(c)	29.0a(b)
九丰 9812 Jiufeng 9812	52.9b(ab)	46.7c(bc)	59.9a(bc)	29.6a(a)	30.3a(c)	27.7a(b)

3 讨论

养分累积与转移直接影响着籽粒养分的含量和作物产量形成。籽粒养分含量高是由于植株在花后能累积更多的养分,同时又能将花前储存在营养器官的养分更完全地转移至籽粒^[20-21]。本研究表明,小麦对氮磷养分的累积和转移有相似规律,但不同产量水平冬小麦品种花前、花后氮磷累积存在明显差异。高产品种花前氮累积量随养分投入水平提高而增加的幅度明显高于中、低产品种,故在投入养分后具有较高的花前氮累积量,但其花前磷累积量没有明显优势。高产品种花后氮、磷累积量高于中、低产品种,这与他人^[3,22]的研究结果相似,说明高产品种在花后能吸收较多的氮、磷养分,进而合成更多的同化物以形成较高产量,因此选用产量潜力高的品种,并使其花后具较高氮、磷积累量是获得更高产量的基础。本研究中高产品种的氮磷转移量、转移效率及转移氮磷对籽粒的贡献率均低于中产和低产品种,这与 Przulj 等^[23]在春播大麦上的结论一致,即花后高养分累积与低养分转移相伴随,说明虽然氮磷转移对籽粒贡献大于花后累积^[22],但不同品种产量差异的原因主要在于花后氮磷的累积,而非转移。

氮磷供应对氮磷的累积和转移有显著影响。Dordas^[16]对硬质小麦的研究表明,花后氮磷累积量随氮磷投入水平提高而提高。而在本研究中,随养分投入水平的提高,花后磷的累积量虽不断提高,但氮累积量并无此趋势,朱新开等^[24]的研究中也得出同样结论,说明养分投入只能在一定范围内促进小麦花后氮的累积。开花后小麦营养器官贮存氮素向籽粒的转移量随养分投入水平的提高而增加,前人已有类似报道^[25-28],但随养分投入水平提高,高产品种营养器官磷向籽粒的转移没有突出优势,并

不高于中产和低产品种。氮磷转移率是表征作物从营养器官转移氮磷能力的参数,前人对其随施肥水平提高而变化的研究结论不一致。Barbottin 等^[29]发现某些情况下,小麦氮素转移率是稳定不变的;Dordas^[16]认为氮、磷转移率在各养分投入水平下相似;Muurinen 等^[30]得出,高氮水平下的氮素转移率较高;张法全等^[31]研究表明随施氮量增加,氮转移率呈先增后降的趋势,在施氮 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达到最大。本试验条件下,不同产量水平冬小麦品种的氮、磷转移率随养分投入的提高有降低趋势,王月福等^[27]的报道中也存在这一现象。所得结论存在较大差异的原因可能与供试材料和降水、温度、施肥水平等环境条件差异有关。Dordas^[16]还发现转移氮磷对籽粒的贡献不受施肥水平的影响,而本研究显示,随养分投入水平提高,各产量水平冬小麦品种转移氮磷对籽粒的贡献率表现出降低趋势,说明氮磷转移量随养分投入提高的幅度低于籽粒产量提高的幅度,从另一方面说明氮磷转移不是形成高产的重要原因。

钾在籽粒形成过程中,仅参与籽粒的代谢,其生理作用完成后便由籽粒中移出,很少在籽粒中贮存^[32],钾外排导致小麦生育后期钾累积总量有降低趋势^[1,19]。后期追施钾肥可使小麦千粒重提高^[1,33],说明小麦花后仍可从土壤中吸收钾,钾累积量下降是因为吸收小于外泄^[1]。本研究结果也显示,不同产量水平冬小麦品种的钾素在花后都存在不同程度的损失,高产品种的损失量低于中、低产品种,这可能是因为高产品种后期衰老较慢,维持了较大的绿叶面积^[34],从而有效抑制了钾素的外排。高产品种花前钾累积量不高,钾转移量也没有明显优势,但其籽粒钾占转移钾的比例较高,表明高产品种对转入籽粒的钾素有较好的保存能力,与其较低的花后钾

损失量相对应, 这可能是品种高产的另一原因。

因此, 在旱地小麦高产栽培中品种起着决定作用。选择优良品种, 根据优良品种的遗传特性采用合理栽培措施, 特别是养分调控, 使其在花后具有较高的氮磷累积量, 同时减缓衰老以降低钾的损失, 是西北旱地进一步提高冬小麦产量的有效途径。

参考文献

- [1] 韩燕来, 介晓磊, 谭金芳, 等. 超高产冬小麦氮磷钾吸收、分配与运转规律的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 908–915
- [2] Gebbing T, Schnyder H, Kühbauch W. The utilization of pre-anthesis reserves in grain filling of wheat. Assessment by steady-state $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ labelling[J]. Plant Cell Environ, 1999, 22: 851–858
- [3] 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]. Eur J Agron, 2006, 25(4): 309–318
- [4] Cox M C, Qualset C O, Rains D W. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. I. Dry matter and nitrogen accumulation[J]. Crop Sci, 1985a, 25: 430–435
- [5] Cox M C, Qualset C O, Rains D W. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. II. Nitrogen assimilation in relation to grain yield and protein[J]. Crop Sci, 1985b, 25(3): 435–440
- [6] Van Sanford D A, Mac Kown C T. Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat[J]. Crop Sci, 1987, 27(2): 295–300
- [7] Austin R B, Edrich J A, Ford M A, et al. The fate of the dry matter, carbohydrates and ^{14}C lost from the leaves and stems of wheat during grain filling[J]. Ann Bot, 1977, 41(6): 1309–1321
- [8] Papakosta D K, Gagianas A A. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling[J]. Agron J, 1991, 83: 864–870
- [9] 刘晓冰, 李文雄, 周鹏. 春小麦产量和蛋白质关系研究——干物质积累分配与氮素同化运转[J]. 东北农业大学学报, 1996, 23(2): 116–123
- [10] 荆奇, 戴廷波, 姜东, 等. 不同生态条件下不同基因型小麦干物质和氮素积累与分配特征[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(1): 1–5
- [11] Souza E J, Martin J M, Guttieri M J, et al. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality[J]. Crop Sci, 2004, 44(2): 425–432
- [12] Abad A, Lloveras J, Michelena A. Nitrogen fertilization and foliar urea effects on durum wheat yield and quality and on residual soil nitrate in irrigated Mediterranean conditions[J]. Field Crops Res, 2004, 87(2/3): 257–269
- [13] Wang H, McCaig T N, DePauw R M, et al. Physiological characteristics of recent Canada western red spring wheat cultivars: Components of grain nitrogen yield[J]. Can J Plant Sci, 2003, 83(4): 699–707
- [14] Batten G D. A review of phosphorus efficiency in wheat[J]. Plant Soil, 1992, 146(1/2): 163–168
- [15] Papakosta D K. Phosphorus accumulation and translocation in wheat as affected by cultivar and nitrogen fertilization[J]. J Agron Crop Sci, 1994, 173(3/4): 260–270
- [16] Dordas C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations[J]. Eur J Agron, 2009, 30(2): 129–139
- [17] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. Eur J Agron, 2007, 26(3): 179–186
- [18] Batten G D, Wardlaw I F, Aston M J. Growth and the distribution of phosphorus in wheat developed under various phosphorus and temperature regimes[J]. Aust J Agric Res, 1986, 37(5): 459–469
- [19] 李迎春, 彭正萍, 薛世川, 等. 磷、钾对冬小麦养分吸收、分配及运转规律的影响[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(5): 1–6
- [20] Liang Z Z. Efficient management of nitrogen fertilizer for flooded rice in relation to nitrogen transformations in flooded soils [J]. Pedosphere, 1992, 2(2): 97–114
- [21] Strong W M. Effect of late application on nitrogen on the yield and protein content of wheat[J]. Aust J Exp Ag, 1982, 22(115): 54–61
- [22] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. Eur J Agron, 2007, 26(3): 179–186
- [23] Przulj N, Momcilovic V. Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barley: II. Nitrogen translocation[J]. Eur J Agron, 2001, 15(4): 255–265
- [24] 朱新开, 郭文善, 周正权, 等. 氮肥对中筋小麦扬麦 10 号氮素吸收、产量和品质的调节效应[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1831–1837
- [25] Spiertz J H J, Ellen J. Effects of nitrogen on crop development and grain growth of winter wheat in relation to assimilation and utilization of assimilates and nutrients[J]. Neth J Agric Sci, 1978, 26: 210–231
- [26] Papakosta D K, Gagianas A A. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling[J]. Agron J, 1991, 83: 864–870
- [27] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收运转及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1868–1872
- [28] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1027–1034
- [29] Barbottin A C, Lecomte C, Bouchard C, et al. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: Genotypic and environment effects[J]. Crop Sci, 2005, 45: 1141–1150
- [30] Muurinen S, Kleemola J, Peltonen-Saito P. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency[J]. Agron J, 2007, 99(2): 441–449
- [31] 张法全, 王小燕, 于振文, 等. 公顷产 10000 kg 小麦氮素和干物质积累与分配特性[J]. 作物学报, 2009, 35(6): 1086–1096
- [32] 刘景辉, 刘克礼. 春玉米需氮规律的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1994, 15(3): 12–18
- [33] Haeder H E, Beringer H. Analysis of yield of winter wheat grown at increasing levels of potassium[J]. J Sci Food Agric, 1981, 32(6): 547–551
- [34] 李学军, 李立群, 张瑞轩, 等. 高产优质小麦新品种西农 979 叶面积、叶绿素含量及干物质积累的特点[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1054–1057