植物营养与肥料学报 2013,19(5):1037-1047
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0502

超高产冬小麦对氮素的吸收、积累和分配

党红凯[1,2], 李瑞奇[1], 李雁鸣[1*], 孙亚辉[1,3], 张馨文[1], 刘梦星[1]
(1 河北农业大学农学院, 河北省作物生长调控重点实验室,河北保定 071001; 2 河北省农林科学院旱作农业研究所,河北衡水 053000; 3 河北联合大学轻工学院,河北唐山 063000)

摘要: 为明确超高产(9000 kg/hm^2 左右)栽培条件下冬小麦的氮素营养特点,于 2004～2005 年、2005～2006 年 2 个小麦生长季主要生育时期,取样分析小麦各器官氮的含量,总结出超高产冬小麦氮素的吸收、积累和分配特点。结果表明,小麦全生育期各器官的氮含量为 0.22%～3.55%(干重)。生育前期叶片中氮的含量和积累量最高,生育后期籽粒中氮的含量和积累量最高。小麦生育期间氮的总积累量为 232.48～285.18 kg/hm^2,每生产 100 kg 籽粒吸收氮 2.63～3.13 kg。小麦吸收的氮孕穗期前主要分配在叶片中,一般都在 50% 以上,成熟期氮在籽粒中的分配率最高,各品种均在 80% 以上。成熟期籽粒中积累的氮 68.02%～73.31% 来自营养器官中氮的再分配。出苗到起身期、拔节到孕穗期、开花到成熟期都是小麦氮素吸收的重要阶段。根据小麦的氮素吸收积累特点,河北平原冬小麦实现 9000 kg/hm^2 的超高产,需要土壤全氮不低于 0.75 g/kg,秸秆全量还田后施 N 260 kg/hm^2 左右。

关键词: 超高产; 冬小麦; 氮素; 吸收; 积累; 分配
中图分类号: S512.1$^+$1.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)05-1037-11

Absorption, accumulation and distribution of nitrogen in super-highly yielding winter wheat

DANG Hong-kai[1,2], LI Rui-qi[1], LI Yan-ming[1*], SUN Ya-hui[1,3], ZHANG Xin-wen[1], LIU Meng-xing[1]
(*1 College of Agronomy, Agricultural University of Hebei/Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China; 2 Dryland Farming Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui, Hebei 053000, China; 3 College of Light Industry, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063000, China*)

Abstract: In order to clarify the characteristics of nitrogen nutrition in winter wheat with yields of above 9000 kg/ha, field experiments were conducted in Gaocheng County, Hebei Province during 2004-2006. Eight winter wheat cultivars: Shimai14, Jifeng703, Shimai12 and Shixin828 during 2004-2005, and Temai1, Shimai12, Shixin531 and Shixin828 during 2005-2006, were used for the experiments. Plant samples were collected at 8 growth stages and the nitrogen contents in different parts of wheat were determined. The results showed that the N contents in the tested parts of wheat were in the range of 0.22% -3.35% (dry weight). The highest nitrogen contents and accumulation were occurred in leaf blades during the early growing period and in grains during the mature period. The total amount of accumulated N in whole plants were in the range of 232.48 to 285.18 kg/ha, the amount of N needed for forming 100 kg of grain yield was in the range of 2.63 to 3.13 kg. Before booting stage, more than 50% of the absorbed N was stored in leaf blades, and in maturity stage, more than 80% of the N was stored in grains in all the cultivars. 68.02% -73.31% of the nitrogen in grains at maturity stage came from the redistribution from vegetative organs. From seedling emergence to erecting stage, jointing to booting stage, and anthesis to maturity stage are important for winter wheat to absorb nitrogen. According to the characteristics of nitrogen absorption and accumulation, it is essential for winter wheat to yield 9000 kg/ha in Hebei Plain that the soil total N be higher than 0.75 g/kg, and the total fertilizing N be about 260 kg/ha.

收稿日期: 2013-01-06 **接受日期:** 2013-03-14
基金项目: 国家科技支撑计划项目"粮食丰产科技工程"课题(2006BAD02A08,2011BAD16B08)资助。
作者简介: 党红凯(1979—),男,河北巨鹿人,博士,助理研究员,主要从事作物节水节肥栽培生理研究。E-mail:wheatcrop@126.com
* 通信作者 E-mail:liym315@126.com

Key words: supper-highly yielding; winter wheat; nitrogen; absorption; accumulation; distribution

氮是小麦需求量最大的营养元素,在体内起着重要生理作用。施氮显著改善小麦叶片对光合能量的利用[1],影响光合物质积累和产量形成[2],并调节籽粒蛋白质及其组分含量,影响加工品质[3]。在一定范围内,氮素利用效率与小麦植株含氮量和积累量同步提高[4-5]。赵万春等[6]研究发现,施氮能显著提高小麦各器官的含氮量和积累量。李世清等[7]研究表明,小麦花后的营养器官氮素水平是决定产量、籽粒氮积累量和蛋白质含量的重要因素。张法全等[8]研究表明,在一定范围内随施氮量增加,营养器官积累的氮开花后向籽粒的转移量呈先增加后降低的趋势。李瑞奇等[4]、潘庆民等[9]和张法全等[8]分别对小麦 4666.5 ~ 7833.0 kg/hm^2、9000 kg/hm^{2}和 10000 kg/hm^2 产量水平的氮利用效率进行了研究,发现随小麦产量提高,氮利用效率也有提高趋势。河北平原是我国小麦的重要产区之一,近年来不断出现冬小麦 9000 kg/hm^2 以上超高产的报道[10],但关于该地区超高产冬小麦的氮素营养特点尚未见报道。本研究测定并分析了河北平原超高产冬小麦氮素营养吸收、积累和分配的状况,旨在明确超高产冬小麦的氮素营养特点,为指导施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2004 ~ 2006 年在河北省藁城市进行。试验田长期作为石家庄新品种新技术研究所的繁种田,经多年培肥和采取匀地措施,地力基本一致。前茬作物夏玉米收获后秸秆粉碎还田。施肥前 0—20 cm 耕层土壤基础地力为:有机质含量 16.9 ~ 22.4 g/kg,全氮 0.75 ~ 0.97 g/kg,碱解氮 117.9 ~ 145.4 mg/kg,速效磷 18.8 ~ 34.4 mg/kg,速效钾 108.3 ~ 154.5 mg/kg。整地前施尿素(含 N 46%) 150 kg/hm^2,磷酸二铵(含 N 18%,P_2O_5 46%) 300 kg/hm^2,氯化钾(含 K_2O 60%) 150 kg/hm^2;拔节期追施尿素 300 kg/hm^2。折合总施肥量为 N 261 kg/hm^2,P_2O_5 138 kg/hm^2,K_2O 90 kg/hm^2。

2 年中均选用 4 个冬小麦新品种,并采用审定时推荐的适宜基本苗。2004 年为石麦 14、石麦 12、冀丰 703、石新 828,10 月 4 日播种,翌年 5 月 6 日开花,6 月 11 日收获;2005 年为特麦 1 号、石新 531、石新 828、石麦 12,10 月 6 日播种,翌年 5 月 7 日开花,6 月 12 日收获。每个品种的总面积均为 1 hm^2,分为面积相等的 3 个地块(3333 m^2),取样时作为 3 次重复。2 年的籽粒产量均达到或接近超高产(9000 kg/hm^2)水平(表 4)。

1.2 测定项目和方法

各主要时期在每个品种各重复中按 5 点法取样,每个样本苗期取样 50 株,拔节后取样 30 株。将植株按叶片、叶鞘、茎秆(拔节期开始)、穗(孕穗期开始,开花后 10 d 以后不包括籽粒)、籽粒分解,105℃烘箱中杀青 30 min,然后降温至 80℃烘干至恒重,冷却后称量各器官重量,并根据取样株数和每公顷基本苗数计算每公顷该器官的总重量,用于计算氮的总积累量。土壤速效氮含量采用碱解定氮法[11]。植株全氮含量用比色法[11],U2001 型紫外分光光度计测定。

1.3 数据处理与统计分析

营养器官氮素转移量 = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量;

营养器官氮素转移率(%) = 该阶段营养器官氮素转移量/营养器官氮素总积累量 ×100;

营养器官氮素贡献率(%) = 营养器官氮素转移量/成熟期籽粒氮素积累量 ×100。

采用 Microsoft Excel 2000 处理数据,采用 DPS2000 数据处理系统进行统计分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 小麦植株体内氮浓度的变化动态

由表 1 可知,各生育时期不同器官氮含量为 0.22% ~ 3.55%(干重)。不同品种同时期同类器官氮含量的差异较小。同类器官不同时期比较,除籽粒以外的各器官中都是在形成初期或早期的氮含量最高,叶片、叶鞘、茎秆、穗部氮含量最高的时期分别在起身或拔节期、冬前或起身期、拔节期、孕穗期最高,达到最高值后即逐渐下降,尤其是开花后 10 d 开始叶片和叶鞘中的氮含量明显下降,表明叶片中由以氮素代谢为主转化为以碳素代谢为主。籽粒氮含量一般在形成初期(花后 10 d)较高,花后 20 d 有所降低,成熟期达到最高。成熟期不同器官中氮的含量表现为籽粒 > 叶片 > 叶鞘 > 穗部 > 茎秆。不同品种成熟期各器官氮含量差别不大,显示不同品种器官中氮含量的相似性。

表 1　小麦不同器官总干物质中的氮含量(%,干重)

Table 1　N contents in different parts of wheat (dry matter)

年份 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Prewinter	起身期 Erecting	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 DAA(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	叶片 Leaf blade	石麦 14 Shimai 14	3.02 ab	3.51 a	3.23 a	2.85 a	2.43 a	1.94 a	1.42 a	0.77 a
		石麦 12 Shimai 12	3.16 a	3.39 a	3.23 a	2.57 b	1.97 b	1.82 ab	1.67 a	0.79 a
		冀丰 703 Jifeng 703	2.67 b	3.17 ab	2.89 b	2.61 b	2.09 b	1.87 ab	1.58 a	0.80 a
		石新 828 Shixin 828	2.79 b	2.85 b	2.86 b	2.76 ab	1.89 b	1.75 b	1.59 a	0.84 a
	叶鞘 Leaf sheath	石麦 14 Shimai 14	2.81 a	2.78 a	2.71 a	1.70 a	1.18 a	0.97 a	0.81 a	0.60 a
		石麦 12 Shimai 12	3.06 a	2.74 a	2.46 a	1.35 b	1.12 a	0.92 a	0.91 a	0.58 a
		冀丰 703 Jifeng 703	2.39 b	2.51 a	2.16 b	1.41 b	1.09 ab	1.01 a	0.95 a	0.54 a
		石新 828 Shixin 828	2.49 b	2.20 b	1.73 c	1.32 b	0.99 b	0.84 a	0.85 a	0.59 a
	茎秆 Stem	石麦 14 Shimai 14			2.60 ab	1.44 a	0.89 a	0.63 a	0.38 a	0.28 a
		石麦 12 Shimai 12			2.54 ab	1.17 b	0.72 a	0.54 ab	0.40 a	0.30 a
		冀丰 703 Jifeng 703			2.75 a	1.22 ab	0.73 a	0.44 b	0.37 a	0.29 a
		石新 828 Shixin 828			2.35 b	1.16 b	0.83 a	0.55 ab	0.35 a	0.31 a
	穗部 Spike	石麦 14 Shimai 14				3.25 a	1.23 b	1.14 a	0.96 a	0.37 a
		石麦 12 Shimai 12				3.16 a	1.26 b	1.09 a	0.84 a	0.38 a
		冀丰 703 Jifeng 703				3.47 a	1.25 b	1.01 a	0.90 a	0.41 a
		石新 828 Shixin 828				3.18 a	1.54 a	1.19 a	0.92 a	0.40 a
	籽粒 Grain	石麦 14 Shimai 14						2.30 a	2.06 a	2.24 b
		石麦 12 Shimai 12						2.27 a	2.07 a	2.26 b
		冀丰 703 Jifeng 703						2.18 a	2.10 a	2.52 a
		石新 828 Shixin 828						2.30 a	2.01 a	2.34 ab
2005～2006	叶片 Leaf blade	特麦 1 号 Temai 1	3.13 a	3.36 a	2.92 ab	1.93 b	1.87 ab	1.36 c	0.98 b	0.68 a
		石麦 12 Shimai 12	3.21 a	3.41 a	3.13 a	2.86 a	1.70 b	1.29 c	1.00 b	0.70 a
		石新 531 Shixin 531	2.97 ab	3.11 ab	2.97 ab	2.65 a	1.88 ab	1.61 b	1.31 a	0.77 a
		石新 828 Shixin 828	2.67 b	2.99 b	2.63 b	2.72 a	2.02 a	1.91 a	1.33 a	0.76 a
	叶鞘 Leaf sheath	特麦 1 号 Temai 1	2.13 c	2.22 c	2.18 c	1.13 b	1.09 a	0.96 a	0.64 b	0.34 b
		石麦 12 Shimai 12	2.33 b	2.48 b	2.53 b	1.65 a	1.13 a	0.89 a	0.79 a	0.48 a
		石新 531 Shixin 531	2.69 a	2.80 a	2.75 a	1.71 a	1.11 a	0.97 a	0.79 a	0.40 ab
		石新 828 Shixin 828	2.63 a	2.74 a	2.54 b	1.26 b	1.20 a	0.85 a	0.62 b	0.30 b
	茎秆 Stem	特麦 1 号 Temai 1			3.04 ab	1.11 b	0.50 a	0.44 a	0.44 a	0.22 b
		石麦 12 Shimai 12			2.88 b	1.19 ab	0.40 a	0.38 a	0.41 a	0.33 a
		石新 531 Shixin 531			3.30 a	1.26 a	0.44 a	0.43 a	0.41 a	0.29 ab
		石新 828 Shixin 828			3.30 a	1.19 b	0.50 a	0.35 a	0.31 b	0.23 b
	穗部 Spike	特麦 1 号 Temai 1				3.55 a	1.82 a	1.04 a	0.42 b	0.28 b
		石麦 12 Shimai 12				3.02 b	1.39 c	1.01 a	0.59 a	0.38 a
		石新 531 Shixin 531				3.34 ab	1.69 b	1.08 a	0.60 a	0.37 a
		石新 828 Shixin 828				3.51 a	1.62 b	0.97 a	0.46 b	0.26 b
	籽粒 Grain	特麦 1 号 Temai 1						2.19 b	2.32 a	2.45 a
		石麦 12 Shimai 12						2.62 a	2.09 b	2.19 b
		石新 531 Shixin 531						2.36 ab	2.23 ab	2.23 b
		石新 828 Shixin 828						2.28 b	2.00 b	2.32 ab

注(Note)：DAA—Days after anthesis. 同列数据后字母相同表示每年度 4 个品种间在 0.05 水平差异不显著 Values followed by the same letter within a column are not significantly at the 0.05 level among the four cultivars at the same growing year.

2.2 小麦地上部各器官对氮的吸收积累和分配

2.2.1 地上部各器官中氮的积累量 由表2可见，在拔节期以前的各生育时期，不同品种同类器官中氮积累量的差异较大，拔节以后品种间的差异逐渐变小。不同品种各器官氮积累量达到最高值的时期有所不同，叶片和叶鞘中氮的积累量在拔节期、孕穗期或开花期达到最高值，茎秆氮的积累量在孕穗期或开花期达到最高值，穗部均在开花期达到最高值，籽粒氮的积累量在成熟期最高。除籽粒以外的各器官氮积累量达最高值后，即随生育进程逐渐降低。各器官氮积累量比较，生育前期叶片中最高，生育后期籽粒中最高。成熟期不同器官中氮的积累量表现为籽粒 > 叶片 > 茎秆 ≥ 叶鞘 ≥ 穗部。成熟期不同品种各器官中氮的积累量仍存在一定差异，2005年冀丰703和石新828籽粒氮积累量显著高于石麦14和石麦12的，2006年特麦1号籽粒氮积累量显著高于其他3个品种。

2.2.2 不同生育时期氮在各器官中的分配 由表3可见，不同品种各生育时期同类器官中氮的分配率差异较小。生育前期氮在叶片中的分配率最高，孕穗期之前一般都在50%以上，但拔节期以后呈下降趋势，成熟期均降到8%以下。冬前和起身期氮在叶鞘中的分配率较高，以后也逐渐降低。氮在茎秆中的分配率2005年以开花期最高，2006年在孕穗期最高，最高值出现后即逐渐降低。穗部的氮素分配率在开花期最高，之后逐渐降低。氮在籽粒中的分配率，从开花后10 d到成熟期逐渐增高，成熟期达到80%以上。成熟期氮在不同器官的分配顺序为：籽粒 > 叶片 ≥ 茎秆 ≥ 叶鞘 ≥ 穗部。

2.2.3 小麦氮的总积累量和积累进程 由表4可见，小麦全株氮的积累量随生育进程而增加，成熟期达到最大值232.48 ~ 285.18 kg/hm^2，同一年份品种间的差异较大。越冬前各品种氮的积累量为32.98 ~ 60.61 kg/hm^2。起身到拔节期氮积累量较大，拔节期达到112.04 ~ 159.72 kg/hm^2。拔节到孕穗期氮积累量也较大，孕穗期到开花期大部分品种的氮积累趋于稳定。开花期到花后10 d氮素缓慢积累。花后10 d到成熟期氮积累量进入另一快速增长期。总体来看，氮阶段积累量以拔节到孕穗期和灌浆期间较高。按成熟期积累量计算，每形成100 kg籽粒吸收氮2.63 ~ 3.13 kg。氮的积累百分率（表5），在越冬前、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期分别达到总积累量的13.36% ~ 24.71%、45.28% ~ 61.40%、62.69% ~ 77.26%、67.13% ~ 80.99%和100%。2个年度不同品种的积累百分率有一定差异。

由表4还可以看出，2个年度比较，2005 ~ 2006年拔节期以前4个品种的平均氮积累量高于2004 ~ 2005年，孕穗期以后则以2004 ~ 2005年的平均积累量较高，但只有开花后10 d 2年的平均积累量差异显著。2年中氮平均积累百分率的差异与积累量的趋势相似，但只有越冬前和拔节期差异显著。

2.3 小麦不同生育阶段氮的净吸收和净转移

表6显示，叶片和叶鞘在拔节前，茎秆和穗部在开花前分别是氮的净吸收器官，之后则转为氮的转移器官。2年中上述器官对氮的总净吸收量和总净转移量均以叶片最高；对籽粒的贡献率表现为叶片 > 叶鞘 ≥ 穗部 ≥ 茎秆。2年中各器官对籽粒氮的贡献率分别为68.02%和73.31%，说明籽粒氮的吸收和积累在很大程度上取决于营养器官中氮的再分配。

3 讨论

3.1 关于小麦植株中氮的含量和积累量及其与产量水平的关系

小麦植株中氮的含量和积累量与产量及品质形成有密切关系。本研究中小麦各器官的含氮量范围为0.22% ~ 3.51%，与Bar-Tal等报道的0.26% ~ 3.59%相近[12]。本研究发现，小麦开花后10 d开始，叶片和叶鞘的含氮量都明显下降，这有利于叶片中由以氮素代谢为主转化为以碳素代谢为主，在高产条件下是形态上正常落黄、生理代谢上叶片中的物质向籽粒输出与籽粒灌浆协调进行的表现[13-14]。

在本研究的产量水平下，氮的最高积累量为232.48 ~ 285.18 kg/hm^2，每生产100 kg籽粒吸收氮2.63 ~ 3.13 kg。张法全等[8]研究结果为，在8952.5 ~ 10647.0 kg/hm^{2}产量水平下，氮的积累量为305.5 ~ 351.7 kg/hm^2，每生产100 kg籽粒吸收氮3.30 ~ 3.53 kg[8]。李瑞奇等得出，在产量5161.5 ~ 7671.0 kg/hm^{2}水平下，氮的积累量为193.57 ~ 290.72 kg/hm^2，每生产100 kg籽粒吸收氮3.53 ~ 3.78 kg[4]。比较这些产量水平差异较大的研究可见，随单位面积产量提高，小麦的总吸氮量有增加趋势，而单位籽粒产量的吸氮量有降低趋势。这与在差异较大的产量范围内总结的小麦总吸氮量和单位籽粒产量吸氮量的变化趋势[15]相一致。

表 2　不同生育时期氮在地上部器官中的积累量(kg/hm²)

Table 2　Accumulated amounts of N in above-ground parts of wheat at main growth stages

年份 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Prewinter	起身期 Erecting	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 DAA(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	叶片 Leaf blade	石麦 14 Shimai 14	17.32 b	29.32 b	73.05 b	91.53 a	92.72 b	88.56 b	54.49 b	11.32 b
		石麦 12 Shimai 12	24.61 ab	23.70 b	76.95 b	97.31 a	92.20 b	87.15 b	57.32 ab	15.67 ab
		冀丰 703 Jifeng 703	30.61 a	64.78 a	91.88 a	100.71 a	103.92 a	102.90 a	63.41 a	20.82 a
		石新 828 Shixin 828	28.53 a	55.36 a	86.76 ab	102.87 a	90.88 b	83.09 b	57.96 ab	15.93 ab
	叶鞘 Leaf sheath	石麦 14 Shimai 14	15.66 b	22.04 a	34.31 a	49.74 a	31.87 ab	23.18 a	17.09 b	11.78 a
		石麦 12 Shimai 12	14.95 b	14.48 b	24.80 b	31.19 b	33.78 a	23.95 a	23.49 a	10.03 a
		冀丰 703 Jifeng 703	20.08 a	25.91 a	32.17 a	43.15 ab	30.46 ab	27.49 a	25.37 a	11.81 a
		石新 828 Shixin 828	17.04 ab	23.38 a	31.39 a	37.48 b	28.53 b	24.42 a	22.31 ab	13.01 a
	茎秆 Stem	石麦 14 Shimai 14			11.68 a	39.61 a	46.95 a	35.32 a	22.82 a	11.55 b
		石麦 12 Shimai 12			10.28 ab	21.60 b	43.43 a	32.82 a	24.28 a	10.57 b
		冀丰 703 Jifeng 703			8.45 b	26.05 ab	32.50 b	24.00 b	23.09 a	12.62 ab
		石新 828 Shixin 828			10.50 ab	23.33 b	36.08 ab	30.94 ab	25.50 a	14.66 a
	穗部 Spike	石麦 14 Shimai 14				9.87 b	28.41 ab	27.15 a	23.63 a	9.37 a
		石麦 12 Shimai 12				9.68 b	28.58 ab	25.59 a	24.38 a	6.89 b
		冀丰 703 Jifeng 703				12.91 a	25.60 b	23.73 b	22.95 a	10.09 a
		石新 828 Shixin 828				12.83 a	32.01 a	26.01 a	24.08 a	9.09 a
	籽粒 Grain	石麦 14 Shimai 14						32.97 a	92.69 ab	202.89 b
		石麦 12 Shimai 12						25.61 b	82.63 b	204.28 b
		冀丰 703 Jifeng 703						27.38 b	95.88 ab	229.84 a
		石新 828 Shixin 828						29.88 ab	110.36 a	219.62 a
2005～2006	叶片 Leaf blade	特麦 1 号 Temai 1	41.13 a	47.51 a	100.81 a	93.01 b	80.17 a	75.44 ab	53.32 a	18.87 a
		石麦 12 Shimai 12	41.71 a	48.72 a	100.28 a	91.50 b	77.23 ab	69.47 b	46.09 b	13.39 ab
		石新 531 Shixin 531	28.97 b	35.78 b	89.16 b	100.39 a	84.85 a	78.70 a	53.25 a	11.01 b
		石新 828 Shixin 828	27.25 b	46.51 a	71.65 c	101.37 a	70.14 b	69.82 b	48.46 b	10.95 b
	叶鞘 Leaf sheath	特麦 1 号 Temai 1	19.29 a	23.58 a	43.64 a	41.02 a	33.21 b	30.37 ab	27.38 a	8.40 a
		石麦 12 Shimai 12	18.91 a	25.97 a	39.01 ab	34.46 b	31.23 b	24.30 b	20.20 b	8.57 a
		石新 531 Shixin 531	18.60 a	22.34 a	41.18 a	41.87 a	32.05 b	26.48 b	18.15 bc	7.31 ab
		石新 828 Shixin 828	17.00 a	22.18 a	32.01 b	34.83 b	49.69 a	34.16 b	12.76 c	5.99 b
	茎秆 Stem	特麦 1 号 Temai 1			15.27 a	29.61 a	27.74 a	26.69 a	24.52 a	10.06 ab
		石麦 12 Shimai 12			11.02 b	24.59 ab	20.46 b	20.10 b	19.79 ab	12.98 a
		石新 531 Shixin 531			12.39 ab	23.70 b	21.22 ab	20.31 b	17.79 b	9.09 ab
		石新 828 Shixin 828			9.65 b	20.72 b	19.48 b	17.57 b	14.98 b	8.44 b
	穗部 Spike	特麦 1 号 Temai 1				12.29 a	47.46 a	26.57 b	15.71 b	6.87 b
		石麦 12 Shimai 12				10.02 a	39.25 ab	28.86 ab	20.01 a	8.78 a
		石新 531 Shixin 531				11.91 a	42.30 a	30.42 a	19.29 a	7.61 ab
		石新 828 Shixin 828				10.08 a	32.82 b	25.52 b	20.21 a	5.52 b
	籽粒 Grain	特麦 1 号 Temai 1						31.21 a	110.28 a	236.45 a
		石麦 12 Shimai 12						28.88 a	95.74 b	201.54 b
		石新 531 Shixin 531						30.84 a	94.15 b	197.46 b
		石新 828 Shixin 828						30.06 a	92.05 b	202.97 b

注(Note)：DAA—Days after anthesis. 同列数据后字母相同表示每年度 4 个品种间在 0.05 水平差异不显著 Values followed by the same letter within a column are not significantly at the 0.05 level among the four cultivars at the same growing year.

表3 不同生育时期氮在地上部不同器官中的分配率(%)

Table 3 Percentages of N stored in different parts of wheat at main growth stages

年份 Year	器官 Organ	品种 Cultivar	冬前期 Prewinter	起身期 Erecting	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 DAA(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	叶片 Leaf blade	石麦14 Shimai 14	52.52 b	57.08 b	61.37 a	47.98 b	46.37 a	42.75 b	25.86 a	4.58 c
		石麦12 Shimai 12	62.21 a	62.08 ab	68.69 a	60.90 a	45.17 a	46.06 ab	27.03 a	6.33 b
		冀丰703 Jifeng 703	60.39 a	71.43 a	69.34 a	55.09 ab	53.75 a	50.31 a	27.48 a	7.30 a
		石新828 Shixin 828	62.61 a	70.31 a	67.44 a	58.28 a	48.47 a	42.76 b	24.13 a	5.85 b
	叶鞘 Leaf sheath	石麦14 Shimai 14	47.48 a	42.92 a	28.82 a	26.08 a	15.94 a	11.19 a	8.11 a	4.77 a
		石麦12 Shimai 12	37.79 b	37.92 ab	22.14 a	19.52 b	17.51 a	11.96 a	11.07 a	4.05 a
		冀丰703 Jifeng 703	39.61 ab	28.57 b	24.28 a	23.60 ab	15.91 a	13.57 a	11.00 a	4.14 a
		石新828 Shixin 828	37.39 b	29.69 b	24.40 a	21.23 b	15.22 a	12.56 a	9.29 a	4.78 a
	茎秆 Stem	石麦14 Shimai 14			9.81 a	20.77 a	23.48 a	17.05 a	10.83 a	4.68 a
		石麦12 Shimai 12			9.18 a	13.52 b	22.51 a	16.40 a	11.45 a	4.27 a
		冀丰703 Jifeng 703			6.38 b	14.25 b	16.98 b	11.65 b	10.01 a	4.42 a
		石新828 Shixin 828			8.16 ab	13.22 b	19.24 ab	15.92 a	10.62 a	5.38 a
	穗部 Spike	石麦14 Shimai 14				5.17 c	14.21 b	13.10 a	11.21 a	3.79 a
		石麦12 Shimai 12				6.06 b	14.81 b	12.78 a	11.49 a	2.79 a
		冀丰703 Jifeng 703				7.06 a	13.37 b	11.49 b	9.95 a	3.54 a
		石新828 Shixin 828				7.27 a	17.07 a	13.38 a	10.03 a	3.34 a
	籽粒 Grain	石麦14 Shimai 14						15.91 a	43.99 a	82.17 a
		石麦12 Shimai 12						12.80 b	38.96 b	82.56 a
		冀丰703 Jifeng 703						13.22 ab	41.56 ab	80.59 a
		石新828 Shixin 828						15.37 a	45.94 a	80.65 a
2005～2006	叶片 Leaf blade	特麦1号 Temai 1	68.08 a	66.83 a	63.12 a	52.86 b	42.51 b	39.65 a	23.06 ab	6.72 a
		石麦12 Shimai 12	68.81 a	65.23 a	66.71 a	56.99 ab	45.92 ab	40.49 a	22.84 b	5.46 ab
		石新531 Shixin 531	60.90 b	61.56 a	62.46 a	56.44 ab	47.03 a	42.14 a	26.28 a	4.74 b
		石新828 Shixin 828	61.58 b	67.71 a	63.23 a	60.70 a	40.75 b	39.42 a	25.71 a	4.68 b
	叶鞘 Leaf sheath	特麦1号 Temai 1	31.92 b	33.17 a	27.32 a	23.32 a	17.61 b	15.96 ab	11.84 a	2.99 a
		石麦12 Shimai 12	31.19 b	34.77 a	25.95 a	21.46 a	18.57 b	14.16 b	10.01 a	3.49 a
		石新531 Shixin 531	39.10 a	38.44 a	28.85 a	23.54 a	17.76 b	14.18 b	8.96 ab	3.15 a
		石新828 Shixin 828	38.42 a	32.29 a	28.25 a	20.85 a	28.87 a	19.29 a	6.77 b	2.56 a
	茎秆 Stem	特麦1号 Temai 1			9.56 a	16.83 a	14.71 a	14.03 a	10.61 a	3.59 b
		石麦12 Shimai 12			7.33 b	15.31 ab	12.17 ab	11.71 ab	9.80 a	5.29 a
		石新531 Shixin 531			8.68 a	13.32 b	11.76 b	10.88 b	8.78 a	3.91 b
		石新828 Shixin 828			8.51 a	12.41 b	11.32 b	9.92 b	7.95 b	3.61 b
	穗部 Spike	特麦1号 Temai 1				6.98 a	25.17 a	13.97 b	6.80 b	2.45 b
		石麦12 Shimai 12				6.24 a	23.34 ab	16.82 a	9.92 a	3.58 a
		石新531 Shixin 531				6.70 a	23.45 ab	16.29 a	9.52 a	3.27 a
		石新828 Shixin 828				6.04 a	19.07 b	14.41 b	10.72 a	2.36 b
	籽粒 Grain	特麦1号 Temai 1						16.40 a	47.70 a	84.25 a
		石麦12 Shimai 12						16.83 a	47.44 a	82.17 a
		石新531 Shixin 531						16.52 a	46.46 a	84.93 a
		石新828 Shixin 828						16.97 a	48.84 a	86.79 a

注(Note): DAA—Days after anthesis. 同列数据后字母相同表示每年度4个品种间在0.05水平差异不显著 Values followed by the same letter within a column are not significantly at the 0.05 level among the four cultivars at the same growing year.

表 4　小麦植株氮的总积累量和 100 kg 籽粒吸收量

Table 4　Total N accumulation in wheat plants and N adsorption for 100 kg grain yield

年份 Year	品种 Cultivar	总积累量 Total N accumulation (kg/hm²) 冬前 Prewinter	起身期 Erecting	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 DAA(d) 0	10	20	成熟期 Maturity	籽粒产量 Grain yield (kg/hm²)	100 kg 籽粒吸 N 量 N for 100 kg grain yield (kg)
2004～2005	石麦 14 Shimai 14	32.98 c	51.36 c	119.04 ab	190.75 a	199.95 a	207.18 a	210.72 b	246.90 b	9057.7 a	2.73 b
	石麦 12 Shimai 12	39.56 b	38.18 d	112.04 b	159.78 b	192.93 a	200.18 ab	212.09 b	247.44 b	9029.0 a	2.74 b
	冀丰 703 Jifeng 703	50.68 a	90.69 a	132.50 a	182.82 a	191.46 a	206.52 a	230.70 ab	285.18 a	9122.7 a	3.13 a
	石新 828 Shixin 828	45.56 ab	78.74 b	128.65 a	176.51 ab	187.50 a	194.34 b	240.22 a	272.30 a	9400.5 a	2.90 ab
	平均 Mean	42.20 a	64.74 a	123.06 a	177.46 a	192.96 a	202.05 a	223.43 a	262.96 a		
2005～2006	特麦 1 号 Temai 1	60.42 a	71.09 a	159.72 a	175.94 a	188.58 a	190.28 a	231.21 a	280.65 a	9637.7 a	2.91 a
	石麦 12 Shimai 12	60.61 a	74.69 a	150.31 ab	160.57 b	168.18 b	171.60 b	201.83 b	245.27 b	8855.1 a	2.67 a
	石新 531 Shixin 531	47.57 b	58.12 b	142.73 b	177.88 a	180.42 ab	186.75 ab	202.63 b	232.48 b	9195.0 a	2.63 a
	石新 828 Shixin 828	44.25 b	68.69 a	113.31 c	167.00 b	172.13 ab	177.12 b	188.46 b	233.87 b	8751.0 a	2.67 a
	平均 Mean	53.21 a	68.15 a	141.52 a	170.35 a	177.33 a	181.44 b	206.03 a	248.07 a		

注(Note)：DAA—Days after anthesis. 同列数据后字母相同表示每年度 4 个品种间在 0.05 水平差异不显著 Values followed by the same letter within a column are not significantly at the 0.05 level among the four cultivars at the same growing year. “平均”行的小写字母表示 2 年度 4 个品种平均值的差异显著性 The small letters in rows “Mean” show the significance between the averages of the four cultivars in each growing year.

表 5　不同生育时期小麦植株氮的积累百分率 (%)

Table 5　The accumulative percentages of N in wheat plants at main growth stages

年份 Year	品种 Cultivar	冬前期 Prewinter	起身期 Erecting	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花后天数 DAA(d) 0	10	20	成熟期 Maturity
2004～2005	石麦 14 Shimai 14	13.36 a	20.80 b	48.21 a	77.26 a	80.99 a	83.91 a	85.35 a	100.00 a
	石麦 12 Shimai 12	15.99 a	15.43 c	45.28 a	64.57 b	77.97 a	80.90 a	85.72 a	100.00 a
	冀丰 703 Jifeng 703	17.77 a	31.80 a	46.46 a	64.11 b	67.13 b	72.42 b	80.90 a	100.00 a
	石新 828 Shixin 828	16.73 a	28.92 a	47.24 a	64.82 b	68.86 ab	71.37 b	88.22 a	100.00 a
	平均 Mean	15.96 b	24.24 a	46.80 b	67.69 a	73.74 a	77.20 a	85.04 a	100.00 a
2005～2006	特麦 1 号 Temai 1	21.53 ab	25.33 a	56.91 a	62.69 b	67.20 a	67.80 b	82.39 a	100.00 a
	石麦 12 Shimai 12	24.71 a	30.45 a	61.29 a	65.47 b	68.57 a	69.96 b	82.29 a	100.00 a
	石新 531 Shixin 531	20.46 ab	25.00 a	61.40 a	76.52 a	77.61 a	80.33 a	87.16 a	100.00 a
	石新 828 Shixin 828	18.92 b	29.37 a	48.45 b	71.41 ab	73.60 a	75.74 ab	80.58 a	100.00 a
	平均 Mean	21.41 a	27.54 a	57.01 a	69.02 a	71.74 a	73.46 a	83.10 a	100.00 a

注(Note)：DAA—Days after anthesis. 同列数据后字母相同表示每年度 4 个品种间在 0.05 水平差异不显著 Values followed by the same letter within a column are not significantly at the 0.05 level among the four cultivars at the same growing year. “平均”行的小写字母表示 2 年度 4 个品种平均值的差异显著性 The small letters in rows “Mean” show the significance between the averages of the four cultivars in each growing year.

表6 小麦植株各器官氮的净吸收与净转移

Table 6 Net absorption and transfer of N of different organs of wheat

器官 Organ	年度 Year	拔节前 Pre-jointing	拔节～开花 Jointing to anthesis (kg/hm²)	开花后 0～20 d 0–20 days after anthesis (kg/hm²)	20 d～成熟 20 days after anthesis to maturity (kg/hm²)	各时期总净吸收量 Total net absorption (kg/hm²)	各时期总净转移量 Total net transfer (kg/hm²)	转移率 Transfer rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)
叶片 Leaf blade	2004～2005	82.16 b	12.78 a	-36.64 b	-42.36 a	94.94 a	-79.00 a	83.21 a	36.89 a
	2005～2006	90.48 a	-12.38 b	-27.82 a	-36.73 a	90.48 a	-76.92 a	85.01 a	36.70 a
叶鞘 Leaf sheath	2004～2005	30.67 b	0.49 a	-9.10 a	-10.41 a	31.16 a	-19.50 a	62.58 b	9.11 b
	2005～2006	38.96 a	-2.42 a	-16.92 b	-12.06 a	38.96 a	-31.39 b	80.57 a	14.98 a
茎秆 Stem	2004～2005	10.23 a	29.51 a	-15.82 b	-11.57 a	39.74 a	-27.39 b	68.92 a	12.79 a
	2005～2006	12.08 a	10.14 b	-2.96 a	-9.13 a	22.22 b	-12.08 a	54.37 b	5.76 b
穗部 Spike	2004～2005		28.65 b	-4.89 a	-14.90 a	28.65 b	-19.79 a	69.08 b	9.24 b
	2005～2006		40.46 a	-21.65 b	-11.61 a	40.46 a	-33.26 b	82.20 a	15.87 a
籽粒 Grain	2004～2005			95.39 a	118.77 a	214.16 a			
	2005～2006			98.06 a	111.55 a	209.61 a			
净吸收量 Net absorption	2004～2005	123.06 b	71.43 a	95.39 a	118.77 a	408.63 a			
	2005～2006	141.52 a	50.60 b	98.06 a	111.55 a	401.73 a			
净转移量 Net transfer	2004～2005		0 a	-66.44 a	-79.24 a		-145.68 a		
	2005～2006		-14.79 b	-69.35 a	-69.52 a		-153.66 a		
转移率(%) Transfer rate	2004～2005		0 b	34.16 a	40.74 a			74.90 a	
	2005～2006		7.70 a	36.10 a	36.19 a			79.98 a	
贡献率(%) Contribution rate	2004～2005		0 b	31.02 a	37.00 a				68.02 a
	2005～2006		7.06 a	33.09 a	33.17 a				73.31 a

注(Note)：正值表示积累量 Plus values mean net absorption；负值表示转移量 Negative values mean net transfer. 同列不同小写字母表示同一测定项目或器官两年度间在 0.05 水平差异显著 Different small letters in the same column mean that the same parameter or organ between the two years are significant at the 0.05 level.

3.2 超高产冬小麦植株中氮的吸收分配特点与栽培环境的关系

本研究表明，小麦生育前期氮主要分布在叶片中，生育后期主要分布在籽粒中，成熟期氮在不同器官的分配率由高到低的顺序为：籽粒 > 叶片 ≥ 茎秆 ≥ 叶鞘 ≥ 穗壳。本研究中小麦成熟期氮在籽粒中的分配率为 80.59% ～ 86.79%，稍高于赵俊晔等的 77.81% ～ 80.59%[5]，但明显高于李雁鸣等 63.47% ～ 75.35%[16] 和张法全等 69.39% ～ 79.25%[8] 的结果。综上可见，氮在小麦体内的分配中心随生长中心的转移而变化。

本研究的 2 年中小麦开花期氮在不同器官的分配率不同，2005 年为叶片 > 茎秆 ≥ 叶鞘 ≥ 穗，2006 年为叶片 ≥ 穗 ≥ 叶鞘 > 茎秆。在地力、施肥相同的条件下，2005 年小麦茎秆中的氮浓度明显高于 2006 年，氮积累量(32.50 ～ 46.95 kg/hm²)也高于 2006 年(19.48 ～ 27.74 kg/hm²)。分析其原因，2005 年小麦拔节期和抽穗期的日平均气温分别为 17.6℃ 和 19.4℃，而 2006 年相应生育时期平均气温为 14.1℃和 19.2℃。可见，小麦对氮的吸收不仅与其自身生长有关，还与氮吸收阶段的气温有关。这与小麦对锰[17]等营养元素的吸收分配特点相同。本研究条件下，开花前后茎秆中氮的分配率差异较大，但最终产量相当，表明开花期氮在茎秆中分布的差

异对产量没有直接影响。但结合各器官对籽粒的贡献率发现，茎秆中氮的分配多，对籽粒氮的贡献率就高。因此，适当提高开花期及其以后营养器官的氮素同化量，有利于氮收获指数的提高[18]。

在本研究中土壤全氮 0.75 ～ 0.97 g/kg 条件下，小麦植株氮的最高积累量为 232.48 ～ 285.18 kg/hm^2。张永丽等[3]在土壤全氮 0.65 ～ 0.89 g/kg 条件下对小麦进行不同灌水量处理，最高氮积累量为 210.97 ～ 409.60 kg/hm^2。杜世州等[19]在土壤全氮为 0.96 g/kg 的条件下进行小麦氮肥不同基追比处理，最高氮积累量为 245.70 ～ 324.67 kg/hm^2。比较上述研究可见，水肥措施对小麦氮积累量的影响远大于土壤氮本身。本研究的不同品种的水肥管理措施相同，产量差异也较小，但小麦的氮积累量仍存在一定差异，可能与品种对氮的敏感程度和吸收能力有关。

3.3　超高产冬小麦氮素吸收关键期与施肥的关系

本研究条件下，小麦冬前到起身期、拔节到孕穗期、开花到成熟期是氮吸收量较高的 3 个阶段，这与潘庆民等的结果[9]相似。冬前到起身期氮积累量虽然较少，器官含氮量却最高或较高，是冬小麦氮素营养临界期[20]。拔节到孕穗期是营养生长与生殖生长并进阶段，也是氮素快速积累期，是吸收氮的重要时期[21]。开花到成熟是产量形成阶段，该阶段积累全生育期 19.01% ～ 32.87% 的氮，是氮素吸收分配的关键期[3]。本研究中的氮肥底施 47%，用于保证起身期之前的氮肥供应；拔节期追肥 53%，保证拔节期之后的氮素需求。关于最适于小麦超高产栽培的氮肥施用时期分配，还需要在不同施氮水平下做进一步研究。

按土壤全氮丰缺指标，含氮量高于 1.5 g/kg 为丰富，1.0 ～ 1.5 g/kg 为中等，小于 1.0 g/kg 为缺乏[22]。但本研究在土壤全氮为 0.75 ～ 0.97 g/kg 条件下，产量达到 8751.0 ～ 9637.7 kg/hm^2。张永丽等在土壤全氮为 0.65 ～ 0.89 g/kg 的条件下，产量为 7779.6 ～ 9698.6 kg/hm^2[3]。潘庆民等在土壤全氮 0.82 g/kg 的条件下，产量达 9000 kg/hm^2[9]。本研究与上述 2 项研究都在土壤全氮较低水平下实现 9000 kg/hm^2 左右的超高产，充分说明适宜的氮肥施用技术的重要性。有研究[23]将施氮量分为 3 个等级，小于 N 150 kg/hm^2 为不足，150 ～ 250 kg/hm^2 为适量，大于 250 kg/hm^2 为超量。在不同基础地力条件下，目前推荐的超高产冬小麦施氮量为 N 240 ～ 270 kg/hm^2[8-9,20]。本研究中小麦总施氮量为 N 261 kg/hm^2，也在上述推荐范围内，且高于黄淮海麦区目前生产中的平均施氮量 207 kg/hm^2[24]。本研究中小麦成熟期氮的总积累量为 232.48 ～ 285.18 kg/hm^2，部分品种的总积累量高于施氮量。但是，成熟期除籽粒以外的还田秸秆中氮的总量为 30.90 ～ 55.34 kg/hm^2，加上施用化肥氮 261 kg/hm^2，则进入土壤的总氮量为 291.9 ～ 316.3 kg/hm^2，高于小麦成熟期氮的最高积累量，能够维持土壤氮平衡。可见，河北平原冬小麦实现 9000 kg/hm^2 的超高产，需要土壤全氮不低于 0.75 g/kg，秸秆全量还田并施纯氮 260 kg/hm^2 左右。但关于本区域冬小麦实现超高产的最适宜施氮量，还需要进行更深入的研究。

参 考 文 献：

[1] 张绪成，于显枫，马一凡，上官周平. 高大气 CO_2 浓度下小麦旗叶光合能量利用对氮素和光强的响应[J]. 生态学报，2011，31(4)：1046-1057.
Zhang X C, Yu X F, Ma Y F, Shangguan Z P. The responses of photosynthetic energy use in wheat flag leaves to nitrogen application rates and light density under elevated atmospheric CO_2 concentration[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(4): 1046-1057.

[2] Evans J R, Poorter H. Photosynthetic acclimation to growth irradiance: the relative importance of plants specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain[J]. Plant Cell Environ., 2001, 24: 755-767.

[3] 张永丽，于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响[J]. 作物学报，2008，34(5)：870-878.
Zhang Y L, Yu Z W. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat [J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 870-878.

[4] 李瑞奇，李雁鸣，何建兴，等. 施氮量对冬小麦氮素利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报，2011，31(2)：270-275.
Li R Q, Li Y M, He J X *et al*. Effect of nitrogen application rate on nitrogen utilization and grain yield of winter wheat[J]. J. Tritic. Crops, 2011, 31(2): 270-275.

[5] 赵俊晔，于振文，李延奇，王雪. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响[J]. 西北植物学报，2006，26(1)：98-103.
Zhao J Y, Yu Z W, Li Y Q, Wang X. Effects of different nitrogen rates of fertilization on nitrogen, phosphorous and potassium uptakes and utilizations as well as kernel yield of wheat under

high-yield circumstances[J]. Acta Bot. Bo.-Oc. Sin., 2006, 26(1): 98-103.

[6] 赵万春，董剑，高翔，张改生. 施氮对杂交小麦不同器官氮素积累与转运及其杂种优势的影响[J]. 作物学报，2007，33(1): 57-62.
Zhao W C, Dong J, Gao X, Zhang G S. Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation and translocation as well as their heterosis in different organs of hybrid wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(1): 57-62.

[7] 李世清，王瑞军，张兴昌，等. 小麦氮素营养与籽粒灌浆期氮素转移量的研究进展[J]. 水土保持学报，2004，18(3): 106-111.
Li S Q, Wang R J, Zhang X C *et al*. Research advancement of wheat nitrogen nutrition and nitrogen transportation in wheat grain filling[J]. J. Soil Water Conserv., 2004, 18(3): 106-111.

[8] 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.
Zhang F Q, Wang X Y, Yu Z W *et al*. Characteristics of accumulation and distribution of nitrogen and dry matter in wheat at yield level of ten thousand kilograms per hectare[J]. Acta Agron. Sin., 2009, 35(6): 1086-1096.

[9] 潘庆民，于振文，王月福，田奇卓. 公顷产9000 kg小麦氮素吸收分配的研究[J]. 作物学报，1999，25(5): 541-547.
Pan Q M, Yu Z W, Wang Y F, Tian Q Z. Studies on uptake and distribution of nitrogen in wheat at level of 9000 kg per hectare[J]. Acta Agron. Sin., 1999, 25(5): 541-547.

[10] 孙亚辉，李瑞奇，党红凯，等. 河北省超高产冬小麦群体和个体生育特性及产量结构特点[J]. 河北农业大学学报，2007，30(3): 1-8.
Sun Y H, Li R Q, Dang H K *et al*. Population and individual characteristics of growth and development and yield components of super-high-yielding winter wheat in Hebei Province[J]. J. Hebei Agric. Univ., 2007, 30(3): 1-8.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000. 49-52, 263-268.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 49-52, 263-268.

[12] Bar-Tal A, Yermiyahu U, Berahd M *et al*. Nitrogen, phosphorus, and potassium uptake by wheat and their distribution in soil following successive, annual compost applications[J]. J. Envir. Qual., 2004, 33(5): 1855-1865.

[13] 陆贵生，梁振兴，梅楠. 小麦熟相与粒重形成[J]. 北京农业大学学报，1987，13(3): 263-271.
Lu G S, Liang Z X, Mei N. The maturing phases and the formation of grain weight in wheat[J]. Acta Agric. Univ. Pek., 1987, 13(3): 263-271.

[14] 李雁鸣，梁振兴，梅楠. 冬小麦叶片衰亡及其形态生理变化[J]. 北京农学院学报，1988，3(2): 58-69.
Li Y M, Liang Z X, Mei N. Leaf senescence and its morphological, anatomical and physiological changes in winter wheat[J]. J. Beijing Agric. Col., 1988, 3(2): 58-69.

[15] 王树安. 作物栽培学各论[M]. 北京：中国农业出版社，1995. 50-51.
Wang S A. Crop cultivation science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. 50-51.

[16] 李雁鸣，张建平，王焕忠，等. 喷灌条件下高产冬小麦植株体内氮磷钾的时空分配特点[J]. 河北农业大学学报，2002，25(3): 1-5.
Li Y M, Zhang J P, Wang H Z *et al*. Properties of spatial and temporal distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in the plant of high yield winter wheat under the conditions of sprinkling irrigation[J]. J. Hebei Agric. Univ., 2002, 25(3): 1-5.

[17] 党红凯，李瑞奇，孙亚辉，等. 超高产栽培条件下冬小麦对锰的吸收、积累和分配[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(3): 575-583.
Dang H K, Li R Q, Sun Y H *et al*. Absorption, accumulation and distribution of manganese in winter wheat cultivated under super-high-yielding conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 575-583.

[18] 石玉，于振文，王东，等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. 作物学报，2006，32(12): 1860-1866.
Shi Y, Yu Z W, Wang D *et al*. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(12): 1860-1866.

[19] 杜世州，曹承富，张耀兰，等. 氮素运筹对淮北地区超高产小麦养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1): 9-15.
Du S Z, Cao C F, Zhang Y L *et al*. Effects of nitrogen application on nitrogen absorption, utilization in super-high-yielding wheat in Huaibei region[J]. Plant. Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(1): 9-15.

[20] 李春艳，张宏，马龙，李诚. 冬小麦苗期氮素吸收利用生理指标的综合评价[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(3): 523-530.
Li C Y, Zhang H, Ma L, Li C. Comprehensive evaluation on physiological indices of nitrogen absorption and utilization in winter wheat at seedling stage[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(3): 523-530.

[21] 王红光，于振文，张永丽，等. 推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响[J]. 生态学报，2012，32(6): 1861-1870.
Wang H G, Yu Z W, Zhang Y L *et al*. Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO_3-N migration in wheat[J]. Acta Ecol.

Sin., 2012, 32(6): 1861-1870.

[22] 胡承霖. 安徽麦作学[M]. 合肥：安徽科学技术出版社, 2009. 129-137.
Hu C L. Anhui wheat science[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2009. 129-137.

[23] 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 Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.

[24] 王旭，李贞宇，马文奇，张福锁. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2469-2476.
Wang X, Li Z Y, Ma W Q, Zhang F S. Effects of fertilization on yield increase of wheat in different agro-ecological regions of China[J]. Sci. Agri. Sin., 2010, 43(12): 2469-2476.