植物营养与肥料学报 2014,20(5):1084-1093
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0504

不同管理方式对小麦氮素吸收、分配及去向的影响

徐明杰[1], 董娴娴[1], 刘会玲[1], 张丽娟[1,2*], 巨晓棠[3]
(1 河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071000; 2 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071000;
3 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

摘要:【目的】随着氮肥在农业生产中的广泛应用,已有许多通过不同施氮水平调控,分析作物养分吸收,提高氮素利用率的相关研究,但是关于高产体系下作物花前花后氮素利用、转移规律的研究相对较少。本文探讨传统(CT)和优化(YH)两种栽培体系对冬小麦氮素吸收、分配及去向的影响。分析高产条件下化肥氮的"作物吸收—土壤残留—损失"的新变化,解析小麦花前花后氮素利用、转移规律,探讨肥料氮、土壤氮与作物氮之间的关系。**【方法】**在传统和优化两种栽培体系定位试验中设置^{15}N微区,采用将^{15}N标记的尿素表施的方法,通过测定植株、土壤样品分析氮素利用特征。新鲜土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量采用TRACCS 2000型流动分析仪测定。^{15}N土壤及植物全氮用美国THERMO finnigan公司的稳定同位素质谱仪Delta ^{plus}XP测定。**【结果】**在该试验条件下,优化管理小麦籽粒产量和吸氮量均显著高于传统处理,分别比传统管理高35%和34%。优化管理^{15}N利用率比传统管理高,差异达显著水平。小麦各器官中氮素的累积量及向籽粒中的转移量均表现为来自土壤氮高于来自肥料中的氮,说明土壤氮是小麦生长的主要氮源。传统管理籽粒氮素大部分来源于花前累积,转运氮的贡献率为81.65%,优化管理为62.14%。优化管理土壤硝态氮及^{15}N含量显著低于传统管理;开花期传统管理土壤表层硝态氮及^{15}N大量累积;收获后40—60 cm土层^{15}N出现累积峰,氮肥随水向下运移。两种管理方式的小麦当季化肥去向均表现为土壤残留>作物吸收>损失;传统管理土壤氮肥残留率高达69.33%,优化管理较低,为39.17%。**【结论】**在优化栽培体系中冬小麦施氮量为139 kg/hm^{2}时,小麦籽粒产量达到高产且氮肥高效利用。合理调控氮素投入量以及适度的水分胁迫可以实现水氮高效前提下的作物高产。

关键词: ^{15}N; 冬小麦; 管理方式; 氮素去向
中图分类号: S512.1.05.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)04-1084-10

Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in wheat

XU Ming-jie[1], DONG Xian-xian[1], LIU Hui-ling[1], ZHANG Li-juan[1,2*], JU Xiao-tang[3]
(*1 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China;*
2 Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071000, China;
3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract:【Objectives】Nitrogen fertilizer having been widely used in agricultural production, many studies illustrated the efficiency of nitrogen, however, few studies showed the nitrogen accumulation and transport at the anthesis and maturity stages of winter wheat in high-yielding system. A field experiment was conducted to determine effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in winter wheat. We indicated impacts of optimizing nitrogen and water management on "N uptake-soil residues-loss", explored nitrogen accumulation and transport at the anthesis and maturity stages, and identified fate of nitrogen. **【Methods】**Two management patterns [i.e., conventional pattern (CT) and optimized pattern (YH) in nitrogen and water

收稿日期: 2013-08-18 **接受日期:** 2013-09-13
基金项目: "十二五"国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B08, 2012BAD04B06, 2013BAD07B05)资助。
作者简介: 徐明杰(1985—),女,河北迁安人,硕士研究生,主要从事土壤环境质量方面的研究。E-mail: xumingjie2010@163.com
* 通信作者 Tel: 0312-7528210, E-mail: lj_zh2001@163.com

management] were designed through establishing ^{15}N-micropolt experiments in the field. We analyzed the characteristics and nitrogen utilization by measuring soil and plant samples. NH_4^+-N and NO_3^--N in the fresh soil samples were analyzed using continuous flow analysis (TRAACS 2000) in laboratory. ^{15}N in the soil and plant were determined using the Delta ^{plus}XP. **【Results】** Under the experimental conditions, the differences in grain yields and nitrogen uptakes of wheat between the optimized and conventional treatments are significant. Compared to the conventional treatment, the grain yield and nitrogen uptake under YH are increased by 35.23% and 34.39%, respectively. The rate of ^{15}N utilization of the conventional treatment (18.19%) is significantly lower than that of the optimized treatment (34.81%). The amounts of accumulated nitrogen in the crop aboveground organs and the amounts of transferred nitrogen to grain from soil nitrogen are significantly higher than those from fertilizer nitrogen. Therefore, soil nitrogen is the main nitrogen source of wheat. The nitrogen in seed mostly comes from the accumulation before the flowering, and the contribution rates of transporting nitrogen by organs of the conventional and optimized patterns are 81.65% and 62.14% respectively. After the wheat harvest, the contents of nitrate and ^{15}N in 0–100 cm soil of the optimized pattern are significantly lower than those of the conventional pattern. The ^{15}N contents under CT with soil depth increase at the first and then decrease, with the accumulation peak in 40–60 cm. The amount of nitrogen fertilizer is as follows: soil residual > crop uptake > loss. The residual nitrogen rate in soil of the conventional pattern is up to 69.33% which is significantly higher than that of the optimized pattern (39.17%). **【Conclusions】** It can be reached that high levels of grain yield and use efficiency of nitrogen with nitrogen controlled at around 139 kg/ha. Thus, we conclude that less nitrogen and reasonable water stress not only raise the efficiency of nitrogen fertilizer but also increase food production.

Key words: ^{15}N; winter wheat; management pattern; anthesis; fate of nitrogen

施用氮肥是提高小麦产量的主要措施,但过量或不合理的施氮不仅不会达到高产的目的,还会降低当季氮肥利用率,带来一系列的环境问题[1]。巨晓棠等[2]认为,华北地区冬小麦的氮肥当季利用率只有26.9%,基于土壤养分测定和目标产量的优化施肥是作物高产高效的基础,由于我国人多地少,只有逐年提高作物单产,才能有效缓解土地日益减少而人口逐年增长带来的对粮食需求的持续压力[3]。氮素是作物生长的重要因子,小麦植株对氮素吸收、同化、转运及利用显著影响籽粒产量[4]。Wang等[5]的研究指出,较高的籽粒产量来自于较高的氮素利用效率和氮素再分配效率。王小燕和于振文[6]的研究也表明,灌溉量不变,施氮量增加,小麦各营养器官中氮素的积累量增加,但开花后营养器官中积累的氮素向籽粒的转移率降低,最终籽粒蛋白质含量并未增加。赵俊晔等[7]的研究表明,适量施氮提高小麦氮素积累量可以增加籽粒产量和蛋白质含量,开花至成熟阶段是小麦氮素吸收分配的关键时期,开花后营养器官氮素的转移对籽粒氮素积累有较大贡献。

关于小麦对氮素的吸收利用规律及氮肥效应的研究较多[8-11],巨晓棠等[2]的研究表明,北京郊区冬小麦-夏玉米轮作体系中,冬小麦季氮肥利用率为23.8%～44.5%,残留率为20.9%～45.3%,损失率为10.3%～55.2%。氮肥当季利用率低,收获后残留在土壤中的大量氮肥主要以 NO_3^--N 的形式存在[12],并随灌水或降雨向下迁移,当淋溶到2 m以下,极易对地下水造成污染[13-14]。施氮水平对高产麦田氮素利用及氮平衡具有积极的调控效应,适当增施氮肥,有利于提高籽粒产量[3]。有研究表明,作物产量、吸氮量和施氮量均呈抛物线关系,施氮量超过240 kg/hm^2,产量和吸氮量随施氮量的增加略有降低[15]。开花至成熟阶段是小麦籽粒产量形成的重要时期[16],而在高产条件下施氮量对该阶段植株的氮素吸收、积累、转运、分配以及对产量影响方面的研究目前还相对较少。

目前国内外已有许多通过氮肥调控,促进作物养分吸收,提高氮素利用率的相关研究,但是关于高产体系下作物花前花后氮素利用、转移规律的研究相对较少。因此,本文以曲周为代表的华北平原为研究对象,应用^{15}N示踪技术,布置^{15}N微区试验,分析高产条件下化肥氮的"作物吸收—土壤残留—损失"的新变化,解析小麦花前花后氮素利用、转移规律,探讨肥料氮、土壤氮与作物氮之间的关系,为该地区高产体系氮肥优化管理提供合理依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在河北省邯郸市中国农业大学曲周实验基地进行。2007 年 10 月在试验基地布设“华北平原可持续高产作物生产体系及资源优化利用”长期定位试验,在主试验开展 3 年的基础上,于 2010 年 10 月至 2011 年 6 月进行本试验。该基地位于河北省南部太行山东麓海河平原的黑龙港流域,曲周县地处东经 114°50′～115°13′,北纬 36°34′～36°57′之间,平均海拔 39.6 m,地下水埋深 10～20 m,属温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 13.4℃,全年无霜期平均 201 d,年平均降水量 494 mm,主要集中于 6～8 月,年际间变化大。供试土壤为山前平原冲积性潮褐土,土壤的基本理化性状如表 1,试验期间的降雨情况见图 1。

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 The major chemical characteristics of the experimental soil

土层 Soil depth (cm)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	铵态氮 NH_4^+-N (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N (mg/kg)	pH	全碳 Total C (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	容重 Density (g/m³)	颗粒组成 Particle(%) 砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
0—30	34.40	72.70	3.10	14.60	7.72	16.30	0.70	1.37	39.34	58.25	2.41
30—60	21.20	35.60	2.20	5.90	7.85	15.10	0.40	1.35	24.81	72.57	2.62
60—90	17.10	26.00	1.30	2.60	7.84	14.60	0.20	1.44	64.26	33.97	1.77

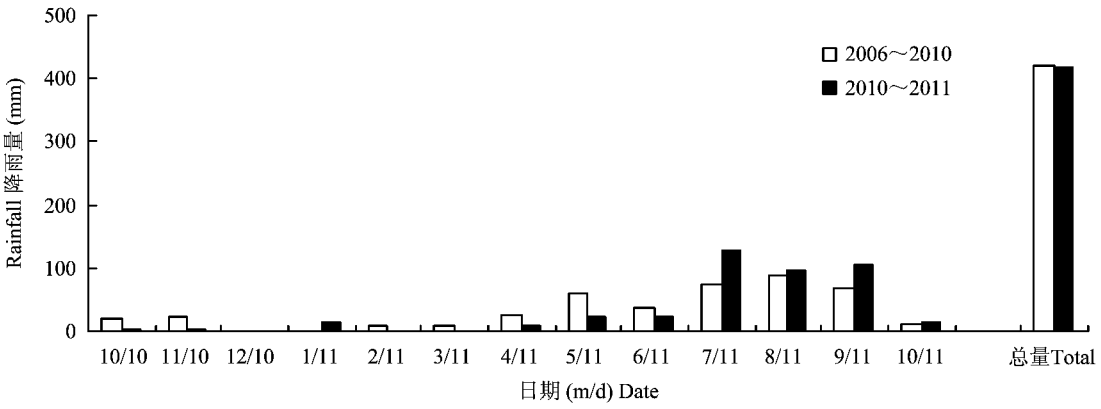

图 1 试验期间日降水量和 2006～2010 年该时期降水量的比较

Fig.1 Comparison of precipitation in the experiment period of 2010-2011 with same period of average precipitation from 2006 to 2010

1.2 田间试验设计

1.2.1 试验设计与布置 长期定位试验设传统处理(CT)和优化处理(YH)两种栽培体系。传统管理为小麦播种前翻耕,玉米贴茬播种,秸秆不还田,传统的肥水管理、播量和播期,特点是农田耗水量大,农田水分、养分利用率低。优化管理为秸秆还田、优化施肥、节水灌溉、晚播精播,特点是水分、养分利用率相对提高[17]。每个处理重复 4 次,主试验大区面积 30 m×60 m,处理间间隔 2 m,区组间间隔 5 m。

1.2.2 ^{15}N 微区田间设置及施肥方法 在主试验大区内设置^{15}N 微区。微区用长 1 m,宽 1 m,高 0.4 m 的铁皮框制成。整好地后,划出微区所在位置,将铁皮框放到微区所在的位置,外围垂直挖出 0.35 m,将铁皮框套入土中,使其周围与土壤紧贴,铁皮框上方露出地表 0.05 m。每季作物设置 2 个微区,一个作为开花期破坏性取样,一个作为收获取样。微区施用的氮肥为 5.22% 丰度的^{15}N 标记尿素,播种前在微区内取出 1 kg 左右的土,过 5 mm 筛,再与做基肥的^{15}N 标记的尿素和磷钾肥混匀,均匀撒施到微区,翻耕后播种;追肥时,先将^{15}N 标记的尿素溶解于水中,再用喷壶将溶液均匀喷洒到微区,最后灌溉,灌水量与大田相同。

1.2.3 种植方式和田间管理　两处理供试小麦品种为“良星九九”,行距 15 cm,传统处理播种量为 300 kg/hm^2, 于 2010 年 10 月 5 日播种;优化处理播种量为 180 kg/hm^2,于 2010 年 10 月 8 日播种。2011 年 6 月 12 日收获。传统灌水分别于小麦播前、拔节、开花期按传统方式灌水;优化灌溉则根据土壤水分监测结果,土壤含水量低于田间持水量的 50% 时,补灌至土壤田间持水量,用水表控制灌溉量。传统处理氮肥施用量是通过各区域农户调查来确定,代表了该地区内农民平均习惯施肥量,为 300 kg/hm^2,1/2 作基肥,1/2 在拔节期作追肥;优化处理通过土壤测试进行施肥,以土壤有机质含量来决定氮肥的施用量,同时以土壤有效氮含量 N_{min} (NO_3^--N + NH_4^+-N) 作为参考。磷、钾肥施用量相同,分别为 P_2O_5 120 kg/hm^2、K_2O 100 kg/hm^2。具体灌溉和施肥量见表 2。

表 2　冬小麦不同管理方式的水、氮管理

Table 2　Chemical N fertilizer input and irrigation for wheat under different management patterns

处理 Treatment	施氮量 N rate (kg/hm^2)			灌水量 Irrigation rate (mm)			
	基肥 Base fertilizer	追肥 Top application	合计 Total	播前 Before sowing	拔节期 Jointing stage	开花期 Anthesis	合计 Total
CT	150	150	300	90	90	90	270
YH	32	107	139	25	90	90	205

1.3　样品采集与测定

1.3.1 植株与土壤样品采集　在作物花期及成熟期,将^{15}N 微区的植株地上部全部收获。所有植株沿地面全部割下称鲜重,风干后称风干重,之后 65℃下烘干,称干重。将用于测定的植株样品全部粉碎过 0.15 mm 筛,混匀后,连续用四分法取出测定所需的样品量,用于测定植株含氮量和^{15}N 丰度。

在播种前以及采集植物样品的同时,在微区采集 0—100 cm 的土壤(以 20 cm 为间隔,每区取两钻,等层混合),用于测定各层次中 NH_4^+-N、NO_3^--N 的含量及全氮^{15}N 丰度。

1.3.2 样品测定方法　土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^- - N 含量的测定: 采集的新鲜土壤过 5 mm 筛后,称取 24.00 g 的土样于 200 mL 的塑料瓶中,加入 100 mL 1 mol/L KCl 浸提,振荡,过滤,用 TRACCS 2000 型连续流动分析仪测定。

土壤及植物全氮和^{15}N 丰度的测定: 烘干样品过 0.15 mm 筛,然后用美国 THERMO finnigan 公司型号为 Delta^{Plus} XP 的^{15}N 仪器进行测定。

土壤水分含量采用烘干法测定。

1.4　计算方法

土壤各层全氮来自标记^{15}N 的量: Ndff (%) = $\frac{\text{土壤各层全氮的}^{15}\text{N 原子百分超}}{\text{标记的}^{15}\text{N 原子百分超}} \times 100$

土壤各层来自^{15}N 肥料的氮量: Ndff(kg/hm^2) = 土壤各层全氮含量(kg/hm^2) × 土壤各层 Ndff(%)

植株氮素来自化肥氮的量: Ndff(kg/hm^2) = 植物 Ndff(%) × 植物吸氮量(kg/hm^2)

化肥氮损失量(kg/hm^2) = 标记氮肥施用量(kg/hm^2) - 植株吸收 Ndff(kg/hm^2) - 土壤残留 Ndff(kg/hm^2)

$$\text{化肥氮残留率}(\%) = \frac{\text{化肥氮残留量}}{\text{标记氮肥施用量}} \times 100$$

$$\text{化肥氮损失率}(\%) = \frac{\text{化肥氮损失量}}{\text{标记氮肥施用量}} \times 100$$

各器官氮素转移量(kg/hm^2) = 开花期各器官氮素吸收量(kg/hm^2) - 收获期各器官含氮量(kg/hm^2)

$$\text{各器官氮素贡献率}(\%) = \frac{\text{各器官氮素转移量}}{\text{籽粒含氮量}} \times 100$$

试验数据采用 SAS 8.0 统计软件进行统计分析,做单因素方差分析。

2　结果与分析

2.1　地上部生物量及吸氮量

不同管理条件下,小麦在开花期和成熟期生物量呈现显著差异(表 3),均表现为优化处理(YH)高于传统处理(CT)。与开花期相比,成熟期秸秆生物量明显减少,而籽粒干物质则大量积累。优化处理

籽粒产量达6165 kg/hm^2,显著高于传统处理,比传统处理增产35%。由此表明,基于土壤测试的优化水、氮管理可促进小麦根系下扎,充分吸收养分和水分,在低施氮条件下产量较高施氮传统管理明显提高。在小麦开花期,YH与CT处理的吸氮量差异不显著,可见传统处理高量氮肥基施促进了前期秸秆对氮素的累积;小麦成熟时籽粒和整个地上部的吸氮量优化处理均显著高于传统处理,分别高34%和30%。小麦开花前期优化处理虽然施氮量低,但开花后吸氮量却显著高于传统处理,表明优化的栽培体系可提高作物的吸氮量。

表3 小麦生物量及吸氮量(kg/hm^2)

Table 3 Aboveground biomass and N uptake of wheat in micro-plots

生育期 Growth stage	处理 Treatment	生物量 Biomass yield			吸氮量 N uptake		
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total	秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total
开花期	CT	5744.83 b		5744.83 b	116.11 a		116.11 a
Anthesis	YH	7308.29 a		7308.29 a	131.56 a		131.56 a
成熟期	CT	4244.60 b	4558.64 b	8803.24 b	25.61 a	118.93 b	144.54 b
Maturity	YH	5970.00 a	6164.84 a	12134.84 a	28.70 a	159.80 a	188.52 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.2 小麦氮肥利用率

开花期和成熟期小麦各部位对^{15}N的吸收量处理间并无显著差异(表4)。小麦成熟时传统处理地上部^{15}N总吸收量为54.57 kg/hm^2,优化处理为48.38 kg/hm^2,较开花期分别增长8.49 kg/hm^2、14.47 kg/hm^2。花后小麦对氮肥的吸收量优化处理高于传统处理,可见在前期营养生长阶段适当的节肥能够促进后期生殖生长阶段对氮素的吸收。与^{15}N吸收量不同,小麦两个生育期优化处理各部位的^{15}N利用率都显著高于传统处理。成熟期优化处理籽粒^{15}N利用率为30.29%,约为传统处理(15.22%)的2倍。小麦成熟期较开花期^{15}N利用率分别提高了3个百分点(传统处理)和10个百分点(优化处理),传统处理虽然基施高量氮,但小麦^{15}N利用率并不高;优化处理花期追施氮肥,氮肥利用率明显提高。

表4 冬小麦对标记^{15}N肥料的吸收

Table 4 Recovery of ^{15}N-labeled fertilizer by winter wheat

生育期 Growth stage	处理 Treatment	^{15}N吸收量 Uptake of ^{15}N (kg/hm^2)			^{15}N利用率 Recovery of ^{15}N (%)		
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Tota	秸秆 Straw	籽粒 Grain	合计 Total
开花期	CT	46.08 a		46.08 a	15.36 b		15.36 b
Anthesis	YH	33.91 a		33.91 a	24.40 a		24.40 a
成熟期	CT	8.92 a	45.65 a	54.57 a	2.97 b	15.22 b	18.19 b
Maturity	YH	6.28 a	42.10 a	48.38 a	4.52 a	30.29 a	34.81 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.3 土壤氮和肥料氮的吸收与分配

开花期和成熟期,两处理各营养器官(除叶片外)土壤氮的积累量及比例均显著高于肥料氮(表5),两处理各器官(除叶片外)对于肥料氮的吸收量没有显著差异,表明施氮量对各生育期不同营养器官肥料氮积累量无显著影响。优化处理各器官(除叶片外)的土壤氮吸收量均显著高于传统处理,可见前期控氮促进了作物对土壤中氮素的吸收利用;开花期小麦的茎及叶鞘是肥料氮及土壤氮累积量最大的营养器官;成熟期,籽粒对于肥料氮和土壤氮累

积量及其比例都高于其他器官,营养器官中氮累积量较开花期大幅度减少,大量转移到籽粒中。两时期各处理营养器官中肥料氮、土壤氮的分配比例与氮素的积累量趋势一致。由于传统处理基施的氮量高,植株对肥料氮的吸收比例明显高于优化处理,但从整个植株对于肥料氮和土壤氮的吸收比例来看,土壤氮所占的比例明显高于肥料氮,说明土壤氮是作物营养生长和生殖生长阶段的主要氮源。

各器官对于肥料氮的转运量基本趋势一致,即茎+叶鞘>叶片>颖壳+穗轴($P<0.05$,表6);除叶片肥料氮转移量传统处理高于优化处理外,其他无明显差异。土壤氮的转运量趋势为叶片>茎+叶鞘>颖壳+穗轴($P<0.05$);优化处理土壤氮的叶片转运量为 29.9 0 kg/hm^2,约为肥料氮(7.30 kg/hm^2)的4倍,其他各器官约为2倍,可见土壤氮是籽粒的主要氮源。小麦各器官的氮素贡献率与氮素转运量趋势一致,土壤氮显著高于肥料氮;传统处理转移氮的贡献率显著高于优化处理。两处理的转运氮贡献率分别为81.65%和62.14%,说明小麦籽粒氮素大部分来源于花前累积。

2.4　土壤剖面硝态氮运移与^{15}N丰度变化

在开花期和成熟期,优化处理土壤0—100 cm

表5　开花期、收获期不同来源氮素在各器官中的积累与分配

Table 5　Accumulation and distribution of nitrogen in different organs of wheat from different sources at the anthesis and maturity

生育期 Growth stage	氮素来源 N source	处理 Treat.	氮素累积量 N accumulation(kg/hm^2)					分配比例 Distribution proportion(%)				
			叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	颖壳+穗轴 SH	籽粒 Grain	合计 Total	叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	颖壳+穗轴 SH	籽粒 Grain	合计 Total
开花期 Anthesis	肥料氮 NDFF	CT	14.14 a	20.52 a	11.42 a		46.08 a	12.18 a	17.67 a	9.84 a		39.67 a
		YH	8.57 b	15.91 a	9.43 a		33.91 a	6.51 b	12.09 a	7.10 b		25.74 b
	土壤氮 NDFS	CT	26.83 a	28.09 b	15.10 b		70.02 b	23.11 a	24.19 b	13.01 a		60.33 a
		YH	36.72 a	39.25 a	21.67 a		97.64 a	27.91 a	29.83 a	16.47 a		74.26 a
成熟期 Maturity	肥料氮 NDFF	CT	2.14 a	4.05 a	2.73 a	45.65 a	54.57 a	1.48 a	2.80 a	1.89 a	31.58 a	37.77 a
		YH	1.27 b	2.89 a	2.12 a	42.10 a	48.38 a	0.67 b	1.53 b	1.12 b	22.33 b	25.67 b
	土壤氮 NDFS	CT	5.13 a	6.90 b	4.66 b	73.28 b	89.97 b	3.55 a	4.77 a	3.22 a	50.70 a	62.24 a
		YH	6.82 a	9.42 a	6.19 a	117.70 a	140.10 a	3.62 a	5.00 a	3.28 a	62.44 a	74.33 a

注(Note): NDFF—N derived from fertilizer; NDFS—N derived from the soil; SS—Stem + Sheath; SH—Spike axis + Husk. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

表6　开花后营养器官中氮素向籽粒的转移量及贡献率

Table 6　Nitrogen translocation amount and contribution proportion from vegetative organs to grain after the anthesis

氮素来源 N source	处理 Treatment	氮素转移量 N translation (kg/hm^2)				转移氮贡献率 Contribution ratio of N for grain(%)			
		叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	颖壳+穗轴 SH	合计 Total	叶片 Leaf	茎+叶鞘 SS	颖壳+穗轴 SH	合计 Total
肥料氮 NDFF	CT	12.00 a	16.47 a	8.69 a	37.16 a	10.09 a	13.85 a	7.31 a	31.25 a
	YH	7.30 b	13.02 a	7.31 a	27.64 a	4.57 b	8.15 b	4.58 b	17.29 b
土壤氮 NDFS	CT	21.70 a	21.20 b	10.44 a	53.34 a	18.25 a	17.82 a	8.78 a	50.40 a
	YH	29.90 a	29.83 a	15.48 a	75.22 a	18.71 a	18.67 a	13.04 a	44.85 a

注(Note): NDFF—N derived from fertilizer; NDFS—N derived from the soil; SS—Stem + Sheath; SH—Spike axis + Husk. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

土层硝态氮含量均很少,自上而下并没有明显的变化趋势,在3～7 mg/kg之间波动(图2);传统处理土壤硝态氮含量变化幅度较大,0—20 cm土层土壤硝态氮最高为88.69 mg/kg,随深度增加硝态氮含量逐渐降低,但均显著高于优化处理。两处理^{15}N含量均表现为自上而下逐渐减小的趋势,传统处理各层含量高于优化处理;优化处理原子百分超在0.008%～0.062%之间波动,传统处理表层原子百分超较大,深层较小;收获时传统处理土壤硝态氮及^{15}N均在40—60 cm出现明显累积,可见农民传统的栽培模式,一季种植后氮会在土壤剖面累积并随水向下运移。

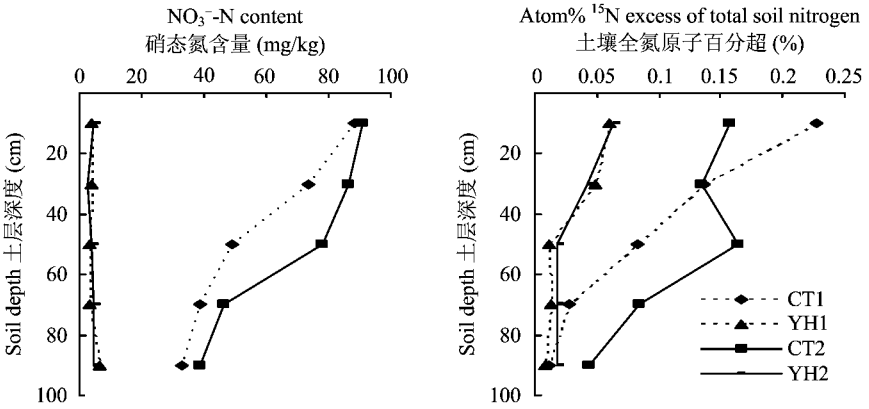

图2 不同生育期土壤硝态氮和^{15}N的动态变化

Fig. 2 The movement of nitrate and labeled ^{15}N in soil profile during different growth periods

[注(Note): CT1—传统处理开花期 Conventional treatment at the anthesis; YH1—优化处理开花期 Optimized treatment at the anthesis; CT2—传统处理收获期 Conventional treatment at the maturity; YH2—优化处理收获期 Optimized treatment at the maturity.]

2.5 小麦季化肥氮的总去向

小麦收获后两处理氮去向均表现为土壤残留>作物吸收>损失(表7)。传统处理氮肥残留量高达207.98 kg/hm^2,损失为37.45 kg/hm^2。与传统处理相比,优化处理土壤残留量显著减小,为54.44 kg/hm^2,作物吸收量优化处理与传统处理无显著差异,但吸收率约为传统处理的2倍。大量氮残留在土壤中成为土壤氮库的一部分,主要是因为冬小麦季气候干燥寒冷,氮肥以气态形式挥发或随水运移至根区外的损失量低。

表7 标记氮肥的去向

Table 7 The fate of ^{15}N-labeled fertilizer after the wheat harvest

处理 Treatment	施氮量 N rate (kg/hm^2)	作物吸收 Crop uptake		0—100 cm土壤残留 Soil reside		损失 Loss	
		(kg/hm^2)	(%)	(kg/hm^2)	(%)	(kg/hm^2)	(%)
CT	300	54.57 a	18.19 b	207.98 a	69.33 a	37.45 a	12.48 b
YH	139	48.38 a	34.80 a	54.44 b	39.17 b	36.18 a	26.03 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

3 讨论与结论

本试验在华北平原采用^{15}N示踪技术,研究不同栽培体系下作物花前花后氮素利用、转运规律的差异及高产体系化肥氮、土壤氮与作物氮之间的新变化,以期为小麦高产、氮素高效利用的水肥管理提供理论依据。李鑫等[18]研究表明,在华北平原施氮量为N 150 kg/hm^{2}时小麦产量达到最高,再增加氮肥施用量对作物产量无益。本试验的施氮量为N 139 kg/hm^{2}的小麦大田平均产量为5784.43 kg/hm^2,已达到高产,主要与土壤基础肥力状况有关。河北保定试验地0—90 cm土层土壤硝态氮含量为43.02 kg/hm^2,而本试验的为63.42 kg/hm^2。小麦优化处理地上部总生物量和籽粒产量均显著高

于传统处理;小麦成熟时籽粒和整个地上部的吸氮量,优化处理显著高于传统处理。合理的控水节肥并不会减少作物的产量和吸氮量,甚至对产量和氮素吸收及利用有一定的促进作用,这与其他学者的研究结果一致[19]。

赵俊晔等[20]的研究表明冬小麦对肥料氮的吸收量随施氮量的增加而增加,但对肥料氮的吸收率却显著降低。李鑫等[21]认为前期少量的氮肥施入可以促使根系下扎,向下层吸收养分,提高^{15}N 利用率。本试验小麦对标记^{15}N 的吸收和利用结果表明,传统处理^{15}N 吸收量高于优化处理,而^{15}N 利用率显著低于优化处理,与以上研究结果相符。

小麦植株吸收的氮素主要来源于土壤和肥料中的氮素,作物生长过程中吸收的土壤氮高于肥料氮。李仁岗等[22]的研究表明,化肥氮对小麦的贡献率为 21.0%～25.1%。本试验中,小麦植株中肥料氮在传统与优化处理分别占 37.77% 和 25.67%,高于以上结果,这与本试验土壤肥力有关。王小燕和于振文[6]认为,小麦吸收土壤氮约占总吸氮量的 2/3。随施氮量增加作物对肥料氮的吸收也有所增加[23]。籽粒中的氮素一部分来源于开花前吸收并贮存在营养器官中,花后转移到籽粒中;另一部分来源于开花后植株的吸收[24]。开花期茎及叶鞘含氮量最高,处理间变化幅度为 41.86%～41.92%;成熟期籽粒含氮量最高,处理间变化幅度为 82.28%～84.55%。在本试验条件下,花前转运的贡献率为 81.65%(传统处理)和 62.14%(优化处理),而花后同化的贡献率仅为 18.35%(传统处理)和 37.86%(优化处理),氮素对子粒的贡献率表现为花前转运的贡献大于花后同化的贡献,可见优化处理前期低施氮量可促进植株花后吸收氮素。

周顺利等[25]试验表明,随着氮肥施用量的增加,土壤硝态氮含量越高,硝酸盐向深层淋洗也越严重。淮贺举等[26]认为,不同施氮量下作物收获后硝态氮在 180 cm 土层中的累积量随氮素输入量的增加而显著增加。本试验条件下,优化处理(N 139 kg/hm^2)的硝态氮含量显著低于传统处理(N 300 kg/hm^2),这一结果与 Cui 等[27]的研究结果相似。优化处理的硝态氮含量很低,变化幅度不大。与开花期相比,小麦成熟时传统处理 40—60 cm 处硝态氮含量明显增加,出现向下淋洗现象,这可能是因为大量氮肥施入土壤后极易转化成硝态氮,加上冬小麦在漫长的越冬期氮素吸收较少,拔节期和开花期的灌水使得硝态氮存在淋溶到深层土壤的风险。

吴永成等[28]研究表明,各土层中的^{15}N 残留量随施氮量的增多而显著增加,^{15}N 残留率为 40.75%～47.48%,总体表现为随土壤层次加深而明显下降。在本试验条件下优化处理各土层土壤中的残留^{15}N 量在空间分布上总体表现为随土壤深度增加而下降。传统处理各土层土壤中的残留^{15}N 量高于优化处理。小麦收获时,传统处理原子百分超自上而下先增加后降低,在 40—60 cm 处出现明显的累积,深层^{15}N 含量较少,大量施用氮肥会累积在土壤剖面中,随水分运移至土壤中下层。

氮肥施入土壤后有 3 个去向,一部分氮素被当季作物吸收利用,一部分残留于土壤中,另一部分通过不同的机制和途径损失[29]。Ju 等[23]的研究表明,氮肥损失量与土壤残留量随施氮量的增加而增加,作物吸收量增加到一定值时就不再增加。施氮量为 N 120 kg/hm^2 时,氮肥残留率达到 45.3%,损失率只有 11.3%[29]。

在本研究中优化处理(N 139 kg/hm^2)的氮肥利用率、残留率、损失率分别为 34.80%、39.17%、26.03%,传统处理(N 300 kg/hm^2)为 18.19%、69.33%、12.48%。氮肥利用率随施氮量的增加而降低[2],当季作物收获后,尚有 39.17%～69.33% 的氮残留在 0—100 cm 的土壤中。两处理氮的 3 个去向均表现为土壤残留 > 作物吸收 > 损失。冬小麦季气候干燥寒冷,氮肥损失量低,大量氮肥残留在土壤中成为土壤氮库的一部分。综上所述,合理调控氮素投入量、适度的水分胁迫可以实现水、氮高效前提下的作物高产。

参 考 文 献:

[1] Ju X T, Xing G X, Chen X P *et al*. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. PNAS, 2009, 106(9): 3041-3046.

[2] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 264-270.
Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al*. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburb[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 264-270.

[3] 郭天财, 宋晓, 冯伟, 等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 886-892.
Guo T C, Song X, Feng W *et al*. Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high-yielding regions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(5): 886-892.

[4] 王月福，于振文，李尚霞，余松烈. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收转运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.
Wang Y F, Yu Z W, Li S X, Yu S L. Effects of soil fertility and nitrogen application rate on nitrogen absorption and translocation, grain yield, and grain protein content of wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1868-1872.

[5] 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]. Canadian Journal of Plant Science, 2003, 83(4): 699-707.

[6] 王小燕，于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学，2008，41(10)：3015-3024.
Wang X Y, Yu Z W. Effect of irrigation rate on absorption and translocation of nitrogen under different nitrogen fertilizer rate in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3015-3024.

[7] 赵俊晔，于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报，2006，32(4)：484-490.
Zhao J H, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(4): 484-490.

[8] Zhang Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contribution to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63: 117-127.

[9] 范丙全，胡春芳，平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报，1998，49(1)：16-21.
Fan B Q, Hu C F, Ping J L. Effect of irrigation and fertilization on nitrate leaching in loamy fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 49(1): 16-21.

[10] 袁新民，同延安，杨学云. 施用磷肥对土壤 NO_3^--N 累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2000，6(4)：397-403.
Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 397-403.

[11] 刘敏超，曾长利，王兴仁，等. 氮肥施用对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面硝态氮含量动态分布的影响[J]. 农业现代化研究，2000，21(5)：309-312.
Liu M C, Zeng C L, Wang X R *et al*. Effects of nitrogen fertilizer in winter wheat on its utilization rate and dynamic distribution of NO_3^--N in soil layers [J]. Research of Agricultural Modernization, 2000, 21(5): 309-312.

[12] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, Roelcke M. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China [J]. A Journal of the Human Environment, 2004, 33(6): 330-305.

[13] 张玉铭，张佳宝，胡春胜，等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报，2006，43(1)：17-25.
Zhang Y M, Zhang J B, Hu C S *et al*.. Nitrate leaching in wheat-maize rotation field in the north China plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 17-25.

[14] 李东坡，武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报，2008，19(5)：1158-1165.
Li D P, Wu Z J. Impact of chemical fertilizers application on soil ecological environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1158-1165.

[15] 宁东峰，李志杰，孙文彦，等. 限水灌溉下施氮量对冬小麦产量、氮素利用及氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(6)：1312-1318.
Ning D F, Li Z J, Sun W Y *et al*. Effects of nitrogen application on grain yield, nitrogen utilization and balance of winter wheat under limited irrigation condition [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1312-1318.

[16] 郭文善，封超年，严六零，等. 小麦开花后源库关系分析[J]. 作物学报，1995，21(3)：334-340.
Guo W S, Feng C N, Yan L L *et al*. Analysis on source-sink relationship after anthesis in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21(3): 334-340.

[17] Meng Q F, Sun Q P, Chen X P *et al*. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2011, 146: 93-102.

[18] 李鑫. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系中肥料氮去向及氮素气态损失研究[D]. 保定：河北农业大学硕士学位论文，2007.
Li X. Fate of fertilizer nitrogen and gaseous N loss in winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain[D]. Baoding: MS thesis, Hebei Agricultural University, 2007.

[19] 巨晓棠，刘学军，张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学，2002，35(11)：1361-1368.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361-1368.

[20] 赵俊晔，于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报，2006，26(3)：815-822.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition of soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 815-8221.

[21] 刘新宇，巨晓棠，张丽娟，等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(2)：296-303.
Liu X Y, Ju X T, Zhang L J *et al*. Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 296-303.

[22] 李仁岗，王淑敏，王克武，等. 冬小麦对土壤和肥料氮的吸收及氮素平衡的研究[J]. 土壤通报，1982，13(4)：21-22.

Li R G, Wang S M, Wang K W *et al*. Study on winter wheat absorption and balance of N from soil and fertilizer[J]. Chinese Journal Soil Science, 1982, 13(4): 21-22.

[23] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case study on the North China Plain [J]. Field Crops Research, 2011, 124: 450-458.

[24] 王德梅, 于振文, 张永丽, 许振柱. 不同灌水处理条件下不同小麦品种氮素积累、分配与转移的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1041-1048.
Wang D M, Yu Z W, Zhang Y L, Xu Z Z. Changes in nitrogen accumulation, distribution, translocation and nitrogen use efficiency in different wheat cultivars under different irrigation condition[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16 (5): 1041-1048.

[25] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 Ⅰ. 冬小麦[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1782-1789.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variation of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1782-1789.

[26] 淮贺举, 张海林, 蔡万涛, 陈阜. 不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2651-2656.
Huai H J, Zhang H L, Cai W T, Chen F. Effect of different nitrogen rates on nitrogen utilization and residual soil nitrate of spring maize[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2651-2656.

[27] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P *et al*. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test [J]. Field Crops Research, 2008, 105: 48-55.

[28] 吴永成, 王志敏, 周顺利. ^{15}N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2446-2453.
Wu Y C, Wang Z M, Zhou S L. Studies on the characteristics of nitrogen fertilizer utilization in summer maize based on techniques of soil column and ^{15}N-label[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(12): 2446-2453.

[29] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态学报, 2003, 12(2): 192-197.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 12(2): 192-197.