

土壤肥力和施氮方式对冬小麦不同生育期 两类氮源吸收利用的影响

徐凤娇,田奇卓,裴艳婷,李慧,刘鑫,李娜娜,石玉华

(作物生物学国家重点实验室,山东农业大学,山东泰安 271018)

摘要:为明确土壤肥力和施氮方式与冬小麦对两种氮源吸收利用的关系,采用¹⁵N示踪技术研究了高、中两种土壤肥力和不同施氮方式下小麦植株对两种氮源的吸收利用特点。结果表明,在八个试验处理中,以高肥土壤、氮肥基施深度20 cm、底追各50%处理的籽粒产量及构成三因素最高,是提高产量和氮肥利用率的最好处理组合。越冬、拔节、开花、花后20 d和成熟期小麦吸收肥料氮的平均比例随生育进程逐步递减,吸收土壤氮的比例则随生育进程逐步递增。提高土壤肥力可增加各生育阶段氮素吸收总量,使成熟期肥料氮当季利用率提高10.51个百分点,肥料氮损失率降低4.6个百分点,但同时也降低了生育中后期对肥料氮的吸收及向籽粒的分配比例。施肥深度仅对拔节前氮素吸收积累和不同氮源比例影响显著,但深施可显著提高成熟期肥料氮的利用率并降低损失率。氮肥全部底施可提高越冬和拔节期的总吸氮量,并降低土壤氮的吸收比例;底追各50%施氮方式有利于生育后期氮素吸收积累,使成熟期肥料氮的当季利用率和损失率分别提高和降低2.72和13.5个百分点,但来自肥料氮和分配到籽粒中的比例却显著低于全部底施处理。

关键词:冬小麦;土壤肥力;施氮方式;不同氮源;吸收积累;分配利用

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2011)02-0257-08

Effect of Soil Fertility and Nitrogen Application Types on Absorption and Utilization Rate of Two Types of Nitrogen Sources in Wheat at Different Growth Stages

XU Feng-jiao, TIAN Qi-zhuo, PEI Yan-ting, LI Hui, LIU Xin, LI Na-na, SHI Yu-hua

(Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Cultivation, Ministry of Agriculture,
Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: In order to clarify the effects of soil fertility and nitrogen application types on fertilizer distribution and use efficiency at different growth stages, winter wheat were cultivated with pipe using ¹⁵N tracer technique. The results showed that: treatment A₂B₂C₂ (high soil fertility, N basal dressing depth of 20 cm, 50% of N fertilizer as basal fertilizer and 50% as topdressing) of eight treatments was with the highest grain yield and balanced combination of yield components. The average percentage of absorption of nitrogen fertilizer at winter, jointing, flowering, 20 d after flowering and maturity were gradually decreasing with the growth process, respectively, the proportion of uptake of soil nitrogen fertility process with progressively. Fertile soil can increase the total amount of nitrogen absorption at each growth stage, the mature season fertilizer nitrogen use efficiency increased by 10.51 percentage points, lowered loss rate by 4.6 percentage points, but reduced the absorption of nitrogen fertilizer at the middle-late growth and proportion to the distribution of grain. Only deep application of nitrogen

* 收稿日期:2010-11-02 修回日期:2010-12-03

基金项目:国家“973”项目(2009CB118602)。

作者简介:徐凤娇(1983-),女,硕士研究生,主要从事作物栽培生理研究。E-mail:591610918@qq.com

通讯作者:田奇卓(1953-),男,教授,博士生导师,主要从事小麦高产栽培生理研究。E-mail:tianqizhuo@163.com

fertilizer have the significant effect on fertilizer nitrogen uptake and accumulation before jointing and different nitrogen sources; but deep application of fertilizer can significantly increase the maturity of nitrogen utilization and reduce the loss rate. Basal dressing of nitrogen fertilizer can increase the total N uptake and reduce the proportion of soil nitrogen uptake at winter and jointing stage; 50% of N fertilizer applied as basal fertilizer and 50% applied in ways that favor the accumulation of N uptake at late growth stages, the mature season nitrogen fertilizer use increased by 2.72 percentage points, the loss rate decreased by 13.5 percentage points, but the proportion allocated to the grain was significantly lower than all the basal treatment.

Key words: Winter wheat; Soil fertility; Nitrogen application types; Different nitrogen sources; Nitrogen fertilizer; Nitrogen utilization

根据环境条件和作物生长需求合理施用氮肥可同时提高产量和氮肥利用率,不合理施用不仅会造成资源浪费,而且对农业生态环境产生不良影响^[1-4]。因此,在提高施肥的增产效应和经济效益的同时,最大限度地降低施肥对环境的负面效应,成为农业可持续发展的必然要求^[5]。前人为此做了大量工作,认为氮肥利用率主要受土壤肥力、施氮水平、氮肥底追施比例等多种因素的影响^[6-7]。施氮方式对小麦籽粒产量、植株氮素吸收积累和氮素利用率等有明显的调控效应^[8-9]。在高、低肥力土壤上施用氮肥均能显著提高小麦产量,但在增产效果、氮肥利用率、氮素分配等方面均存在差异^[10-12]。施氮深度也影响小麦氮素吸收利用^[13-14]。合理安排氮肥底追比例可提高小麦单产,促进氮素的吸收利用。研究表明,超高产小麦在 160 或 240 kg · hm⁻² 施氮量下,均以底施与拔节期追施比例为 1 : 1 产量最高^[15];但也有研究认为,施氮量为 168 kg · hm⁻²、底追肥比例为 1 : 2 时籽粒产量、氮肥利用率均高,损失率小,为最佳氮肥运筹方式^[16]。前人的研究主要局限于不同地力水平、施肥量、底追比例和灌水量等栽培措施及其对小麦成熟期肥料氮吸收利用、残留及分配的影响方面,而关于不同土壤肥力及施氮方式下小麦整个生育阶段对不同氮源吸收和利用特点的研究甚少。本试验应用¹⁵N 示踪技术^[14-20]研究了土壤肥力和施氮方式对小麦主要生育阶段两种氮源吸收利用的影响,以期为不同土壤肥力条件下的合理施氮提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计与实施

试验于 2008—2009 年在山东农业大学试验农场进行(36°10'19"N,117°9'03"E),小麦生育期

间常年平均日照时数为 1 749 h, ≥ 0℃ 积温 2 084℃,本年度整个生育期降水 173.1 mm。供试品种为济麦 20,示踪氮肥为上海化工研究院产尿素(丰度 10.15%);采用不封底瓷管栽培(直径 25 cm、深 1 m),为三因素二水平裂区设计。主区为土壤肥力(A 因素),设中肥和高肥两个水平,两种肥力土壤耕层基础养分见表 1,各处理 30 cm 以下土壤均与大田同层土壤相同。裂区为底施氮肥的施用深度(B 因素),设 10 cm(B₁)和 20 cm(B₂)两个水平。复裂区为氮肥底追比例(C 因素),C₁ 为氮肥全部底施,每管底施纯氮 240 kg · hm⁻²(即 1.176 g · pipe⁻¹);C₂ 为底追肥各 50%,每管底施和拔节期追施纯氮各 120 kg · hm⁻²(0.588 g · pipe⁻¹),结合灌水施入。八个处理分别为: A₁B₁C₁、A₁B₁C₂、A₁B₂C₁、A₁B₂C₂、A₂B₁C₁、A₂B₁C₂、A₂B₂C₁、A₂B₂C₂。每个处理 10 次重复(每次取样 2 次重复),共 80 个瓷管(紧密排列)。各处理五氧化二磷施用量为 120 kg · hm⁻²(0.37 g · pipe⁻¹),氧化钾施用量为 105 kg · hm⁻²(0.86 g · pipe⁻¹)。

试验实施时,首先将取自栽培池的两种肥力表层土壤混匀过筛备用,然后将瓷管原有土壤统一挖至 35 cm 处(土壤表面距离瓷管上沿 5 cm),并按照不同土壤分别回填 10 cm。第二步施底肥,B₁ 处理添加 12.5 kg(约 10 cm)土壤后施肥,B₂ 处理直接施肥。第三步,分别添加不同肥力的土壤至 24.5 kg。第四步每管灌水 1 000 mL;第五步每管播种 20~25 粒,播种后覆土 2 cm。试验于 2008 年 10 月 9 日播种,三叶期定苗,每管 10 株,折合基本苗 204 万株 · hm⁻²。整个生育期间灌水量 2 700 m³ · hm⁻²,分越冬期、拔节期和开花期三次,每次每管浇 4 400 mL。2009 年 6 月 2 日收获。

表 1 两种土壤肥力的基础养分状况

Table 1 Based on nutrient status of both soil fertility

土壤肥力类型 Soil fertility type	有机质/% Organic matter	全氮/% Total nitrogen	碱解氮 Alkali-hydrolysabl N /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)
A ₁ (中肥) Medium soil fertility	1.17	0.07	69.38	42.85	64.11
A ₂ (高肥) High soil fertility	1.24	0.11	96.64	43.83	84.95

1.2 田间取样及测定方法

于越冬、拔节、开花、花后 20 d 和成熟五个时期分别取样,每次各处理取出管中全部植株,冲洗剪根,在 80℃ 烘箱烘 30 min,然后降至 45℃ 低温烘干称重保存;成熟期各处理取样后带回实验室,将植株分为叶片、茎鞘、颖壳+穗轴和籽粒四部分,45℃ 低温烘干称重保存;不同时期所取样品统一粉碎保存待测。土壤取样与各时期植株取样同时进行,各处理统一取 30 cm 深土壤风干称重,从中取 500 g 统一粉碎后待测。植株和土壤样品全氮的测定采用凯氏定氮法,¹⁵N 丰度测定采用改进型 ZHT-03 质谱仪测定,均由河北省农林科学院遗传生理研究所测定。

1.3 数据处理与统计分析

整株和不同器官的氮素积累量=氮素含量(%)×干物重;不同器官的氮素分配比例(%)=各器官的氮素积累量÷植株氮素总积累量×100%;植株中来自于肥料的氮(NF)=样品重量×样品含氮量×(标记样品¹⁵N 丰度-c₁)÷(肥料¹⁵N 丰度-c₂),式中,c₁和c₂分别为对照样品和非标记肥料¹⁵N 丰度;植株中来自于土壤的氮(NS)=样品重量×样品含氮量-植株中来自于

肥料的氮(NDFN);肥料氮吸收率(%)=植株肥料氮素积累量÷施氮量×100%,籽粒总氮=籽粒重×籽粒氮含量,肥料氮残留率(%)=土壤中残留肥料氮÷施氮量×100%,肥料氮损失率(%)=100%-吸收率-残留率。

试验数据用 Microsoft Excel 2003 进行数据统计分析,采用 DPS 3.01 数据处理系统进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对小麦生长发育及产量构成的影响

试验结果(表 2)表明,土壤肥力和施氮方式对小麦各生育期的分蘖数(穗数)和地上部干物重具有明显的调控作用。两种土壤肥力相比较,每管分蘖数(穗数)和地上部干物重均表现为 A₂>A₁,说明高肥力土壤有利于各生育期分蘖数(穗数)的提高和地上部干物重的积累。施肥深度对分蘖数(穗数)和地上部干物重的影响均表现为 B₂>B₁,但分蘖数(穗数)差异不显著,地上部干物重差异显著,说明施肥深度对分蘖数和穗数影响不大,但有利于地上部干物质积累。氮肥底追

表 2 单因素对小麦分蘖数(穗数)和地上部干物质积累量的影响

Table 2 Effect of single factor on wheat tillers and dry matter accumulation

处理 Treatments	越冬期 Wintering		拔节期 Jointing		开花期 Flowering		花后 20 d 20 d after flowering	成熟期 Maturity
	分蘖数 Tillers /(No. · pipe ⁻¹)	干物重 Dry weight (g · pipe ⁻¹)	分蘖数 Tillers /(No. · pipe ⁻¹)	干物重 Dry weight (g · pipe ⁻¹)	穗数 Ears /(No. · pipe ⁻¹)	干物重 Dry weight (g · pipe ⁻¹)	干物重 Dry weight (g · pipe ⁻¹)	干物重 Dry weight (g · pipe ⁻¹)
A ₁	59b	12.36b	103b	30.57b	55a	89.71a	125.39b	138.74b
A ₂	68a	16.25a	128a	42.59a	74a	136.95a	169.12a	187.29a
B ₁	63a	13.84b	114a	35.39b	63a	111.21a	140.44b	160.20b
B ₂	64a	14.77a	117a	37.77a	66a	115.45a	154.07a	165.84a
C ₁	66a	15.02a	122a	38.3a	60b	102.16b	136.38b	146.72b
C ₂	61b	13.58b	109b	34.87b	69a	124.50a	158.14a	179.32a

数值后不同字母表示不同处理的差异显著性达 0.05 水平。下同。

Values followed by a different letter within the same column are significantly different at 0.05 probability level.

比例对分蘖数和干物重的影响,越冬期和拔节期表现为 $C_1 > C_2$,开花期(C_2 已追肥)开始至成熟表现为 $C_2 > C_1$,说明氮肥全部底施有利于小麦生育前期的生长发育,而底追各 50%的施氮方式有利于提高成穗率和开花后地上部干物质积累。

在三个试验因素中,土壤肥力对产量及其构成的影响最大(表 3),其中 A_2 的籽粒产量和生物产量分别比 A_1 提高 62.26%和 34.99%,每管穗数和粒数分别提高 35.78%和 54.37%;其次是底追比, C_2 上述四项指标比 C_1 依次提高 20.35%、22.21%、16.88%和 18.57%,但影响程度远低于土壤肥力;施肥深度对各项指标的影响不明显;这可能是导致小麦植株对氮肥吸收利用率呈现差异的根本原因。八个试验处理中以 $A_2B_2C_2$ 处理的穗数、粒数、千粒重、籽粒产量、生物产量和经济系数最高。表明在高肥力土壤条件下,氮肥适当深施(20 cm),并以底追各 50%的方式施用,是提高产量和氮肥利用率的最佳组合(表 4)。

2.2 不同处理对各生育期总吸氮量及氮源比例

的影响

不同生育期植株吸收总氮量随生育时期的推进逐渐增加,越冬和拔节期各处理平均吸氮量分别达到总吸氮量的 21.66%和 48.16%,到开花和花后 20 d 分别达到 86.87%和 90.55%(表 5)。不同生育阶段吸收肥料氮的比例不同,越冬、拔节、开花、花后 20 d 和成熟期依次为 42.1%(变幅 29.55%~51.81%)、32.0%(变幅 18.68%~50.21%)、27.2%(变幅 22.14%~32.74%)、26.9%(变幅 21.00%~34.48%)和 26.1%(变幅 22.47%~30.03%),而来自土壤氮的比例则依次递增。说明越冬前小麦对肥料氮的依赖性较强,而生育中后期植株吸收的氮素主要来自土壤。

两种土壤肥力比较,各生育阶段氮素吸收总量均表现为 $A_2 > A_1$,除花后 20 d 外均达到 5%显著水平,说明高肥力土壤有利于冬小麦各生育期对氮素的吸收积累。在总吸氮量中来自肥料氮(NF)的比例仅越冬期表现为 $A_2 > A_1$;拔节至成熟期均为 A_1 高于 A_2 ,拔节期和花后 20 d 差异显

表 3 单因素对小麦成熟期产量及产量构成因素的影响

Table 3 Effect of single factor on wheat yield and its components

处理 Treatments	穗数 Ears /(No. · pipe ⁻¹)	粒数 Grains (No. · pipe ⁻¹)	千粒重 1000-grain weight /g	籽粒产量 Grain yield /(g · pipe ⁻¹)	生物产量 Biological yield /(g · pipe ⁻¹)	经济系数 Economic coefficient
A1	54.5b	1 383b	36.15a	50.08b	138.74b	0.36b
A ₂	74.0a	2 135a	38.06a	81.28a	187.29a	0.44a
B ₁	62.5a	1 727a	36.81a	63.98a	160.20a	0.39a
B ₂	66.0a	1 791a	37.41a	67.38a	165.84a	0.41a
C ₁	59.3b	1 610b	36.80a	59.61b	146.72b	0.39a
C ₂	69.3a	1 909a	37.42a	71.74a	179.31a	0.40a

表 4 不同处理对小麦产量及产量构成因素的影响

Table 4 Effect of treatment on wheat yield components

处理 Treatments	穗数 Ears /(No. · pipe ⁻¹)	粒数 Grains (No. · pipe ⁻¹)	千粒重 1000-grain weight /g	籽粒产量 Grain yield /(g · pipe ⁻¹)	生物产量 Biological yield /(g · pipe ⁻¹)	经济系数 Economic coefficient
A ₁ B ₁ C ₁	44f	1 175 h	35.84f	42.12h	112.42h	0.35b
A ₁ B ₁ C ₂	61d	1 517f	35.85f	54.39f	159.67e	0.34b
A ₁ B ₂ C ₁	52e	1 245g	35.78g	44.56g	126.11g	0.35b
A ₁ B ₂ C ₂	61d	1 595e	37.13d	59.23e	156.77f	0.38b
A ₂ B ₁ C ₁	68c	2 036c	36.79e	74.9d	171.54d	0.44a
A ₂ B ₁ C ₂	77a	2 181b	38.74b	84.47b	197.17b	0.43a
A ₂ B ₂ C ₁	73b	1 983d	38.77a	76.87c	176.82c	0.43a
A ₂ B ₂ C ₂	78a	2 341a	37.95c	88.85a	203.64a	0.44a

著,开花期和成熟期差异不显著,说明高肥力土壤有利于越冬期对肥料氮的吸收,中肥力土壤有利于拔节期和花后 20 d 对肥料氮的吸收,对开花期和成熟期影响不显著。

两种施肥深度相比较,各生育阶段氮素吸收总量均表现为 $B_2 > B_1$,但差异较小,拔节后差异不显著,说明施氮深度对生育中后期总氮素的吸收积累无显著影响。不同施氮深度对总吸收氮中肥料氮(NF)比例的影响与对氮素吸收总量的影响相反,从越冬至花后 20 d 均表现为 $B_1 > B_2$ (成熟期 $B_2 > B_1$),但只有拔节期之前差异显著,说明施氮深度对不同生育期肥料氮吸收均有一定影

响,并以拔节前影响较大,随着生育进程的推进逐渐降低。

氮肥底追施比例对植株总吸氮量和氮源比例的影响显著, C_1 不仅可提高越冬和拔节期的总吸氮量,而且可大幅度提高土壤氮的吸收比例;当 C_2 处理拔节期追肥后,总吸氮量也随之变化,开花至成熟期 C_2 的总吸氮量反高于 C_1 ,说明底追各 50% 的施氮方式有利于生育后期氮素吸收积累。总吸收氮中肥料氮(NF)比例始终表现为 $C_1 > C_2$,但生育前期差异幅度较大,从开花期开始差异逐渐缩小。这一现象可能与各处理间的交互作用影响有关,有待于进一步研究。

表 5 单因素对小麦各生育时期吸氮量的影响

Table 5 Effect of single factor on N absorption and nitrogen sources at different growth stages

处理 Treatments	越冬期 Over-wintering			拔节期 Jointing			开花期 Flowering			花后 20 d 20 d after flowering			成熟期 Maturity		
	TN	NFR	NSR	TN	NFR	NSR	TN	NFR	NSR	TN	NFR	NSR	TN	NFR	NSR
A ₁	0.40b	41.67b	58.33a	0.93b	32.63a	67.37b	1.44b	27.82a	72.18a	1.61a	29.06a	70.94a	1.85b	27.00a	73.00b
A ₂	0.54a	42.48a	57.52b	1.16a	31.44b	68.56a	2.23a	26.63a	73.37a	2.32a	24.67b	75.33a	2.49a	25.07a	74.93a
B ₁	0.43b	44.33a	55.67b	0.97b	36.05a	63.95b	1.81a	27.68a	72.32a	1.84a	27.36a	72.64a	2.11a	25.85a	74.15a
B ₂	0.50a	39.82b	60.18a	1.12a	28.02b	71.98a	1.86a	26.77a	73.23a	1.89a	26.37a	73.63a	2.23a	26.21a	73.79a
C ₁	0.49a	49.29a	50.71b	1.11a	43.25a	56.75b	1.69b	29.88a	70.12b	1.70b	29.22a	70.78b	1.95b	27.99a	72.01b
C ₂	0.44b	34.86b	65.14a	0.99b	20.83b	79.17a	1.98a	24.57b	75.43a	2.02a	24.51b	75.49a	2.39a	24.08b	75.92a

TN、NFR 和 NSR 分别为氮素积累总量($g \cdot pipe^{-1}$)、肥料氮(NF)吸收率(%)和土壤氮(NS)吸收率(%); $TN = NF + NS$ 。

TN: Total N; NFR: Nitrogen ratio from fertilizer (%); NSR: Nitrogen ratio from soil (%); $TN = NF + NS$

表 6 不同氮源在小麦成熟期植株各器官中的分配

Table 6 Distribution of different nitrogen sources in different organs of plant at maturity

氮素来源 N sources	处理 Treatments	茎秆+叶鞘 Stems + leaf sheath		叶片 Leaf		颖壳+穗轴 Ear axis + Grain husk		籽粒 Grains	
		分配量 DA /($g \cdot pipe^{-1}$)	分配比例 DP/%	分配量 DA /($g \cdot pipe^{-1}$)	分配比例 DP/%	分配量 DA /($g \cdot pipe^{-1}$)	分配比例 DP/%	分配量 DA /($g \cdot pipe^{-1}$)	分配比例 DP/%
肥料氮 NF	A ₁	0.05b	25.71a	0.04a	24.71a	0.035a	24.94a	0.37b	27.69a
	A ₂	0.07a	24.50a	0.04a	22.76a	0.033a	23.17a	0.47a	25.54b
土壤氮 NS	A ₁	0.15a	74.29a	0.13b	75.29a	0.108a	75.06b	0.97b	72.31b
	A ₂	0.22a	75.50a	0.14a	77.24a	0.111a	76.83a	1.39a	74.46a
肥料氮 NF	B ₁	0.056b	24.77a	0.038b	23.35a	0.033a	24.94a	0.41b	26.49a
	B ₂	0.065a	25.44a	0.043a	24.12a	0.035a	23.17a	0.43a	26.75a
土壤氮 NS	B ₁	0.18a	75.23a	0.13a	76.65a	0.107a	76.15a	1.16b	73.51a
	B ₂	0.20a	74.56a	0.14a	75.88a	0.112a	75.74a	1.21a	73.25a
肥料氮 NF	C ₁	0.06a	28.23a	0.044a	28.62a	0.030a	25.53a	0.41b	28.06a
	C ₂	0.06a	21.98b	0.037b	18.85b	0.038a	22.58b	0.44a	25.18b
土壤氮 NS	C ₁	0.15b	71.77b	0.11b	71.38b	0.089b	74.47b	1.05b	71.94b
	C ₂	0.22a	78.02a	0.16a	81.15a	0.129a	77.42a	1.31a	74.82a

DA: distribution amount; DP: distribution proportion.

2.3 不同处理对两种氮源在植株各器官中分配的影响

成熟期不同处理平均吸收积累总氮量的74.39%(中肥73.09%,高肥75.68%)分配到籽粒中,茎秆+叶鞘、叶片和颖壳+穗轴的分配比例分别为11.08%、7.73%和6.59%(表6)。两种土壤肥力相比较,肥料氮(NF)分配到籽粒和营养器官的分配比均表现为 $A_1 > A_2$,土壤氮(NS)分配比例则表现为 $A_2 > A_1$,说明高肥力土壤肥料氮分配到籽粒中的比例显著低于中肥力土壤。两种施肥深度相比较,不同器官来自于肥料氮素分配量均表现为 $B_2 > B_1$,其中茎秆+叶鞘、叶片和籽粒氮素分配量差异显著,颖壳+穗轴氮素分配量差异不显著。来自于土壤氮素分配量和氮素分配比例与来自于肥料的规律基本一致。 B_2 处理分配到籽粒中的肥料氮比例略高于 B_1 处理,但未达到显著水平。氮肥底追比例对两种氮源向各器官的分配率有显著影响,肥料氮分配到各器官的比例在整个生育期均表现为 $C_1 > C_2$,而土壤氮则相反。与表5两种处理总吸氮量结合分析表明,底追各50%处理虽然有利于生育后期植株对总氮的吸收积累,但不利于肥料氮向籽粒中的分配。

2.4 不同处理对肥料氮吸收利用和残留的影响

由表7可知,冬小麦不同生育阶段对肥料氮的吸收利用率差异甚大,并随着生育进程的推进

逐渐提高,不同处理平均值在越冬、拔节、开花、花后20 d和成熟期分别为23.84%、34.31%、41.91%、41.76%和47.43%。两种土壤肥力相比较,不同生育阶段的肥料氮素吸收率始终表现为 $A_2 > A_1$,说明提高土壤肥力可促进不同生育时期肥料氮素的吸收利用率。肥料氮残留率在越冬期最大,随着植株生长量的增加,肥料氮不断被吸收,氮素残留率逐渐减小,但始终是 $A_1 > A_2$,与肥料氮吸收利用率呈明显的负相关。施肥深度对肥料氮吸收利用的影响程度较小,且不同生育阶段表现不同,但拔节期和成熟期深施显著高于浅施;成熟期的残留率和损失率表现为 $B_1 > B_2$ 。氮肥底追比例对吸收利用率的影响,因生育时期而异,除了越冬期 C_2 显著高于 C_1 之外,其他时期虽然互有高低,但均未达到显著水平;成熟期的氮素利用率 C_2 略高于 C_1 ,残留率 C_2 显著高于 C_1 ,但损失率 C_2 又显著低于 C_1 。分析原因,越冬期 C_2 吸收率高于 C_1 ,显然与 C_2 总氮量仅施入50%有关,而对成熟期的氮素利用率、残留率和损失率三项指标的影响过程比较复杂,可能与植株对两种氮素的吸收强度和肥料氮的渗漏有关,因为 C_1 处理氮肥于播种前一次施入,经过越冬和拔节期两次灌水,渗透到深层土壤的氮素高于 C_2 ,而本试验的氮肥回收率仅限定在30 cm土层。

表7 单因素对氮肥吸收、残留及损失率的影响

Table 7 Effect of single factor on nitrogen utilization efficiency, soil residual rate and loss rate

处理 Treatments	越冬期 Wintering		拔节期 Jointing		开花期 Flowering		花后20 d 20 d after flowering		成熟期 Maturity		
	吸收率 NUE/%	残留率 RRS/%	吸收率 NUE/%	残留率 RRS/%	吸收率 NUE/%	残留率 RRS/%	吸收率 NUE/%	残留率 RRS/%	吸收率 NUE/%	残留率 RRS/%	损失率 Loss/%
A_2	19.66b	80.34a	29.63b	70.37a	33.55b	66.45a	39.54a	60.46a	42.17b	38.53a	19.3a
A_2	28.02a	71.98b	38.98a	61.02b	50.26a	49.74b	43.97a	56.03a	52.68a	32.65a	14.7b
B_1	23.96a	76.04a	32.25b	67.75a	41.79a	58.21a	41.79a	58.21a	46.01b	36.33a	17.7a
B_2	23.72a	76.28a	36.36a	63.64b	42.02a	57.98a	41.72a	58.28a	48.84a	34.85a	16.3b
C_1	18.39b	81.61a	34.49a	65.51a	42.69a	57.31a	41.94a	58.06a	46.06a	30.19b	23.7a
C_2	29.29a	70.71b	34.12a	65.88a	41.12a	58.88a	41.56a	58.44a	48.78a	40.99a	10.2b

NUE: N uptake efficiency; RRS: Residual rate of soil.

3 讨论与结论

韩燕来等^[16]在不同土壤肥力条件下的研究表明,小麦成熟期吸收积累氮素的17.43%~38.75%来自肥料,61.25%~82.72%来自土壤;

巨晓棠等^[1]和艾应伟等^[14]的研究结果分别为45%和38.7%~44.1%来自肥料。本研究结果表明,生育期内冬小麦对两种氮源的吸收是一个动态变化过程,且不同时期差异较大。越冬期有42.1%来自肥料,57.9%来自土壤,随着生育进程的推延,植株对两种氮源吸收比例逐步发生逆转;

至成熟期,来自肥料的氮比例平均仅为 26.1%,来自土壤的氮比例却提高到 73.9%。这与前人对成熟期的研究结果类似,而对越冬至花后 20 d 不同氮源的分离结果,进一步明确了小麦不同生育阶段植株吸收氮素的不同来源,对指导配方施肥和肥料氮的科学运筹更具有应用价值。

关于氮肥底追比对小麦产量和氮素吸收积累及分配的影响,前人已经做过大量研究,但由于基础地力和产量水平的差异,其结论也不尽一致,但总趋势是随着产量水平的提高,基追比逐步由前重后轻转向前轻后重。有学者认为氮肥施肥模式为 50% 作为基肥,50% 返青后追施比较合理,但也有研究认为,底追肥比例为 1:2 时最佳^[16,21]。本试验结果表明,C₂(底追各 50%)较之 C₁(全部底施),经济产量和生物产量分别提高 20.35% 和 22.21%,成熟期的氮素吸收总量和吸收利用率均显著高于 C₁;这与前人研究结果基本一致。但是 C₂ 处理的肥料氮在总吸氮量中的比例始终显著低于 C₁ 处理,虽然降低幅度随生育进程推延逐渐缩小,但与常规的理论推断分析有悖,也未见相关研究报道。究其原因,拔节之前主要由于 C₂ 尚未施入另外 50% 氮素所致,而开花、花后 20 d 和成熟期仍然低于 C₁ 处理 17.77%、16.12% 和 13.97%,则可能与 C₂ 处理在促进生物产量大幅度提高的同时,也激发了小麦植株对土壤氮的吸收强度和吸收量,这在土壤供氮能力较强(碱解氮 69.38~96.64 mg·kg⁻¹)的情况下,是很有可能。也可从前人“增施氮肥不仅促进了小麦植株对肥料氮的吸收,而且也促进了对土壤氮的吸收”的研究结论^[11]中得到印证。

前人在氮肥利用效率领域的研究甚多,但由于试验设计和环境条件的差异,其结果也不尽相同。张福锁等多年多点研究表明,小麦的平均氮肥利用率为 28.2%^[22],但不同地区间差异很大,山东和山西省平均为 40.5%(变化范围为 0.29%~88.9%);而河北和天津平均为 16.4%(变化范围为 2.39%~61.5%)^[23]。闫湘等^[24]对全国多点试验结果进行了统计分析,氮肥平均利用率为 28.7%(变化范围为 8.9%~78.0%)。王月福等^[11]研究表明,不同处理的氮肥利用率为 22.0%~51.5%,其中在施氮 240 kg·hm⁻² 条件下,高肥地的氮肥利用率为 50.6%~51.5%,中肥地为 39.3%~40%。石玉等^[15]研究表明,在施氮总量为 168 kg·hm⁻² 时,三种不同底追比处理的平

均氮肥利用率 45.33%。本研究收获期平均氮肥利用率为 47.43%,远高于闫湘的研究结果,而与王月福和石玉的相近。分析原因,一方面与研究对象的土壤肥力水平及试验设计的肥水运筹差异有关,另一方面可能与对氮肥利用率的表征方法有关,因为目前研究氮肥利用率多数采用空白对照法,也有采用¹⁵N 示踪法^[1,14,15,23,25,26]。

关于土壤基础肥力对氮肥吸收利用及分配关系的研究也较多,王月福、赵俊晔等研究认为,小麦对基施和追施氮肥的吸收利用率均表现为高肥土壤高于低肥土壤,而土壤残留率和损失率则为低肥土壤高于高肥土壤,籽粒含肥料氮和土壤氮的量均表现为高肥高于低肥,同时还指出,高肥力条件下小麦植株的吸氮强度显著高于低肥土壤,尤以生育后期提高幅度大,土壤供氮能力强可促进小麦植株对氮素的吸收,但吸收土壤氮素较多,吸收的肥料氮量较少^[10,11,27]。本试验结果表明,高肥力土壤可增加小麦不同生育阶段的氮素吸收总量,提高成熟期肥料氮利用率,降低损失率;但同时也降低了生育中后期对肥料氮的吸收及向籽粒的分配比例,与前人研究结果相一致。不同之处在于本试验的中肥土壤各项指标(特别是速效磷)已经与多数研究的高肥相当,而且管栽的群体穗数每公顷仅为 397 万,远远低于高产大田群体,可能会给植株对氮素的吸收利用产生一定的积极影响。

综上所述,冬小麦不同生育阶段对两种氮源的吸收利用效率是个动态变化过程,随着生育进程的推延,植株对肥料氮的吸收由越冬期的 42.1% 逐步降低到成熟期的 26.1%,而对土壤氮的依赖逐步增加;吸收积累总氮量的 74.39% 分配到籽粒,其中肥料氮占 26.62%、土壤氮占 73.39%。高肥力土壤可促进各生育阶段生物产量的提高和氮素总吸收量的增加,使最终生物和经济产量分别比中肥土壤提高 34.99% 和 62.26%,肥料氮利用率提高 10.51 个百分点,肥料氮损失率降低 4.6 个百分点,但同时也降低了生育中后期对肥料氮的吸收及向籽粒的分配比例。说明培肥地力是提高小麦单产和氮肥吸收利用效率的关键。氮肥全部底施可提高越冬和拔节期的总吸氮量,并降低土壤氮的吸收比例;底追各 50% 施氮方式可使成熟期肥料氮的当季利用率提高 2.72 个百分点,肥料氮损失率降低 13.5 个百分点。施肥深度仅对拔节前氮素吸收积累和不同氮

源比例产生影响显著,但深施可使成熟期肥料氮的利用率和损失率分别显著提高和降低。在本试验的八个处理中,A₂B₂C₂处理的籽粒产量及其构成因素和氮素利用率均最高,是本试验的最佳组合。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨新泉,冯锋,宋长青,等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 373-376.
- [3] Dana L D, Douglas L K, Dan B J, *et al.* Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 153-171.
- [4] Yang S M, Li F M, Sukhdev S M, *et al.* Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in northwestern China [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 1039-1049.
- [5] 陈新平,张福锁. 可持续农业中的推荐施肥[J]. 化肥工业, 1996, 23(3): 7-10.
- [6] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [7] Willian R R, Solie J B, Johnson G V, *et al.* Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 815-820.
- [8] 韩胜芳,李淑文,吴立强,等. 不同小麦品种氮效率与氮素供应的响应及生理机制[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 807-812.
- [9] 赵满兴,周建斌,杨绒,等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 143-149.
- [10] 王月福,姜东,于振文,等. 高低土壤肥力下小麦基施和追施氮肥的利用效率和增产效应[J]. 作物学报, 2003, 29(4): 491-498.
- [11] 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.
- [12] 王月福,于振文,李尚霞,等. 不同土壤肥力下强筋小麦适宜施氮量的研究[J]. 山东农业科学, 2001(5): 14-15.
- [13] 王振华,张喜英,陈素英,等. 分层施肥及供水对冬小麦生理特性、根系分布和产量的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(6): 176-180.
- [14] 艾应伟,陈实,张先婉,等. N肥深施深度对小麦吸收利用N的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 146-151.
- [15] 韩燕来,葛东杰,汪强,等. 施氮量对豫北潮土区不同肥力麦田氮肥去向及小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 151-154.
- [16] 石玉,于振文,李延奇,等. 施氮量和底追肥比例对冬小麦产量及肥料氮去向的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 54-62.
- [17] 王巧兰,吴礼树,赵竹青. ¹⁵N示踪技术在植物N素营养研究中的应用及进展[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(1): 127-132.
- [18] 赵广才,何中虎,田奇卓,等. 应用¹⁵N研究施氮比例对小麦氮素利用的效应[J]. 作物学报, 2004, 30(2): 159-162.
- [19] 田奇卓,亓新华,王俊岭,等. 免耕稻茬麦植株、土壤系统氮素平衡研究[J]. 核农学报, 1997, 11(3): 157-162.
- [20] 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.
- [21] 陈祥,同延安,亢欢虎,等. 氮肥后移对冬小麦产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 450-455.
- [22] 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.
- [23] 张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687-694.
- [24] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- [25] 张铭,将达,缪瑞林,等. 不同土壤肥力条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收利用及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 135-140.
- [26] 崔振岭,石立委,徐久飞,等. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表现损失的影响研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2071-2075.
- [27] 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.