

氮肥运筹对稻茬冬小麦土壤无机氮时空分布 及氮肥利用的影响

石祖梁, 李丹丹, 荆 奇, 姜 东, 曹卫星, 戴廷波*, 李建辉, 李向楠,
陈 琳, 杜 红, 赫英俊

(南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 江苏南京 210095)

摘要:以宁麦 9 号和豫麦 34 号为材料,研究了氮肥基追比对土壤无机氮时空变化、氮素表观盈亏和氮肥利用率的影响。结果表明,施用基肥提高了越冬期 0—60cm 土层 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量,拔节期追肥对孕穗期各土层无机氮含量无显著影响,追施孕穗肥显著提高了开花期 0—60cm 土层硝态氮含量和 0—20cm 土层铵态氮含量。不施氮处理各生育阶段均表现为氮素亏缺,施氮处理氮素盈亏呈明显的阶段性,播种至孕穗阶段出现氮素盈余,孕穗至成熟阶段出现氮素亏缺;全生育期氮素表观盈余量两品种平均以 5:5 处理最低,7:3 处理最高。两品种氮肥农学效率、氮肥表观回收率和产量均随基肥比例的增加呈先增后降的趋势,均以 5:5 处理最高。因此,在小麦生产中应适当减少基施氮肥用量,在小麦拔节孕穗期适当增加追肥比例有利于提高产量和氮肥利用效率,并降低土壤氮素损失。

关键词:冬小麦;氮肥运筹;硝态氮;铵态氮;氮素表观盈亏量;氮肥利用率

Effects of nitrogen fertilization on temporal-spatial distribution of soil inorganic nitrogen and nitrogen utilization in wheat in rice-wheat rotation

SHI Zuliang, LI Dandan, JING Qi, JIANG Dong, CAO Weixing, DAI Tingbo*, LI Jianhui, LI Xiangnan, CHEN Lin, DU Hong, HE Yingjun

Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract: Field experiments with two cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L. cv Ninmai9 & cv Yumai34) were conducted in Nanjing during 2006 and 2008 to investigate the effects of nitrogen fertilizer regimes on temporal-spatial distribution of soil inorganic nitrogen content, soil nitrogen apparent surplus amount and nitrogen use efficiencies. The results showed that high basal nitrogen fertilizer application rate enhanced NO_3^- -N and NH_4^+ -N content in the soil layer of 0—60cm during the period before the start of stem elongation. Topdressing nitrogen fertilizer at jointing did not affect significantly the soil inorganic nitrogen content at booting stage whereas the NO_3^- -N content of 0—60cm soil layer and NH_4^+ -N content of 0—20cm soil layer increased at anthesis with the increase of nitrogen fertilizer application rates at booting. Nitrogen deficit occurred throughout wheat growth season in soil without N fertilizer application where apparent N surplus (ANS) was minus. In soil with N fertilizer applications, ANS was positive from sowing to booting, thereafter (from booting till maturity) ANS was minus. During the whole growing season, ANS was averagely the lowest when the basal to topdressing fertilization ratio was at 5:5 and the highest when the basal to topdressing fertilization ratio at 7:3. Grain yield, nitrogen agronomic efficiency (NAE) and nitrogen apparent recovery efficiency (NRE) all reached the highest at the basal to topdressing fertilization ratio of 5:5 and decreased with the basal to topdressing fertilization ratio lower and higher 5:5. It can be concluded that properly reducing basal nitrogen rate and increasing topdressing nitrogen can improve grain yield and

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30871481);农业部公益性行业科研专项资助项目(200803037)

收稿日期:2009-02-25; 修订日期:2010-01-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tingbod@njau.edu.cn

nitrogen use efficiency, hence decreasing soil nitrogen surplus and lose.

Key Words: winter wheat; nitrogen fertilization; nitrate; ammonia; apparent N surplus amount; nitrogen use efficiency

施用氮肥是提高小麦产量和改善品质的重要措施之一,大量研究表明,随着氮素营养水平的提高,小麦籽粒产量和蛋白质含量显著提高^[1]。但大量施用氮肥使农田生态系统氮素盈余不断增加,一旦超出了作物的吸收能力和土壤的固持能力,盈余氮素损失严重,不仅造成氮肥利用率低,经济效益下降,而且长期大量施用氮肥及不合理的施用方法能导致硝态氮在根区以下土层的无效积累,成为水体和大气污染的重要来源,严重影响了生态环境^[2-4]。因此,在保证产量和品质的同时,如何进行氮肥的优化管理,实现较高的氮肥利用率,降低硝态氮在深层土壤的残留,保护生态环境,是小麦生产中一个亟待解决的问题。前人对华北平原夏玉米-冬小麦轮作系统中土壤无机氮时空动态、土壤氮素盈亏和平衡及氮肥利用状况已进行了大量研究^[5-7],提出合理施肥应按照土壤供氮水平和作物的氮素需求分阶段进行氮肥推荐^[8],并提出高肥力土壤条件下进行氮肥后移的施氮策略^[9]。

长江中下游平原是典型的稻麦两熟轮作区,其轮作方式、气候条件、土壤质地、土壤肥力等与北方明显不同,但对此地区小麦的研究多限于施氮对产量和品质的调节效应^[10-11],而已有研究表明由农田迁移至水体中的氮素累积是水体富营养化的最重要的污染因素之一^[12]。因此亟需开展对小麦生长季氮素运移状况及不同生育阶段氮素吸收规律和土壤氮素盈亏状况的系统研究,明确稻茬小麦生育期土壤供氮能力的变化规律,探索氮素损失机制和再利用途径,这对于提高产量、氮肥利用效率和保护环境均具有重要意义。因此,本试验设置不同的氮肥基追比例,系统研究了稻茬小麦生育期内土壤氮素盈亏量及其对产量、氮肥利用效率和无机氮残留量的影响,以期对稻茬小麦高产、高效、生态安全的栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

大田试验于2006—2007和2007—2008年度在南京农业大学江宁试验田进行。供试土壤0—20cm土层土壤养分状况为:有机质 $17.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $13.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $90.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2006—2007年供试小麦品种为低蛋白品种宁麦9号和高蛋白品种豫麦34号,2007—2008年仅选用宁麦9号。

小麦全生育期施纯氮 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施磷(P_2O_5) $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,钾(K_2O) $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷、钾肥全部作为底肥一次性施入。试验设不同的氮肥基追比处理: N_0 为全生育期不施氮肥; $\text{N}_1 = 1:9$; $\text{N}_2 = 3:7$; $\text{N}_3 = 5:5$; $\text{N}_4 = 7:3$;追肥分别于拔节期和孕穗期施入,各占追肥量的50%。小区面积 14 m^2 ,随机区组设计,3次重复。2a均于11月4日播种,基本苗 $18 \times 10^5 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他田间管理同一般大田。

1.2 田间取样与测定方法

分别于播种前、越冬期(播种后76d)、起身期(播种后120d)、拔节期(播种后131d)、孕穗期(播种后154d)、开花期(播种后170d)和成熟期(播种后207d)以20cm为一层分3层取0—60cm土样,每小区随机取3个点,相同层次的土壤混合为1个样,装入自封袋混匀后,置于 -20°C 冰柜中冷冻保存,同时环刀法测定各层土壤容重。土壤样品解冻后,称取相当于10g烘干土的新鲜土样,用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的KCl浸提(水土比5:1),振荡30min后过滤,浸提液中的硝态氮和铵态氮用法国产的Alliance/PROXIMA连续流动分析仪测定,同时烘干法测定土壤含水量。

在采集土壤样品的同时取地上部植物样品20株(孕穗期及以后取单茎),鲜样在 105°C 下杀青30min后, 70°C 烘干至恒重称重,计算地上部干物重。样品粉碎后半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量。

成熟期于每小区取 2 m^2 小麦脱粒,晒干后测定实产,同时调查产量构成因素。

1.3 计算方法

氮素表观盈亏量(Apparent nitrogen surplus amount) = (土壤无机氮起始总量 + 施氮量 + 土壤氮素的矿化

量) - (土壤无机氮残留量 + 作物吸氮量 + 土壤中生物固定的化肥氮) = (土壤无机氮起始总量 + 施氮量) - (土壤无机氮残留总量 + 作物吸氮量)^[6,13]。

土壤无机氮积累量($N_{\min}$ accumulation amount) = 土层厚度(cm) × 土壤容重($g \cdot cm^{-3}$) × 土壤无机氮含量($mg \cdot kg^{-1}$)/10;

土壤氮素净矿化量(Nitrogen net mineralization) = 不施氮肥区地上部分氮积累量 + 不施氮肥区土壤残留无机氮量 - 不施氮肥区土壤起始无机氮量

植株氮积累量(Nitrogen accumulation amount, NAA) = 植株干物重 × 植株含氮量;

氮肥农学效率(Nitrogen agronomic efficiency, NAE) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量)/施氮量;

氮肥表观回收效率(Apparent nitrogen recovery efficiency, NRE) = (施氮区植株氮素积累量 - 不施氮区植株氮素积累量)/施氮量。

1.4 数据分析

数据采用 Office 软件和 DPS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹对土壤硝态氮含量变化的影响

由图 1 可以看出,两品种各施氮处理不同土层硝态氮含量表现出相同的变化趋势。与 N0 相比,施用氮肥显著提高了 0—60cm 土层土壤硝态氮含量,但不同生育时期各土层土壤硝态氮含量随施氮方式不同存在差异。

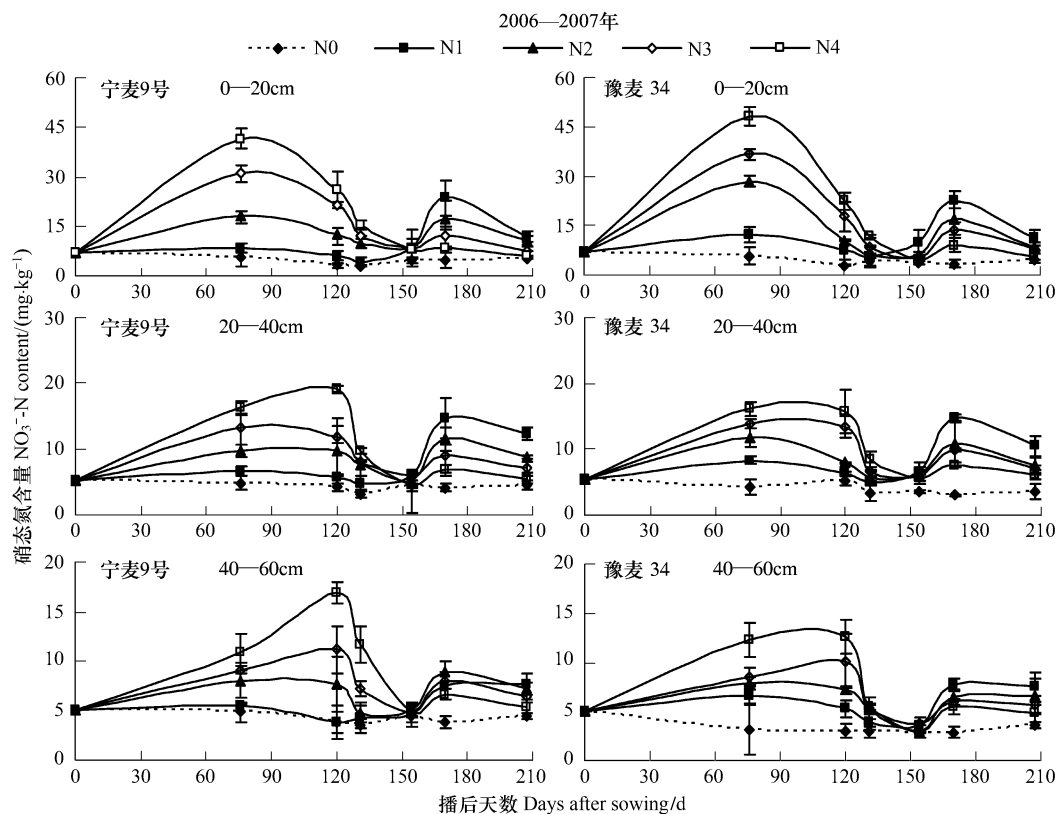


图 1 氮肥运筹对不同生育时期宁麦 9 号和豫麦 34 0—60cm 土壤硝态氮含量的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen fertilization on dynamics of soil NO_3^- -N contents in 0—60cm soil layers

越冬期,施用基肥显著提高了 0—60cm 土层硝态氮含量,且随基施氮肥量的增加而增加;起身期,各处理 0—40cm 土层硝态氮含量显著下降,基施氮较小的 N1 处理 40—60cm 土层硝态氮含量较越冬期下降,而基施氮较大的处理较越冬期升高,说明基施氮较高的处理 0—40cm 土壤硝态氮继续下移至 60cm 土层;拔节期,由

于植株开始大量吸收氮素,各土层土壤硝态氮含量均呈下降趋势;拔节期追施氮肥,对孕穗期各土层硝态氮含量影响不大,这可能与拔节至孕穗期是小麦吸收积累氮素最快的时期有关,也可能与此段时期内大量降水,硝态氮向 60cm 土层以下淋洗有关;孕穗期追施氮肥,显著提高了开花、成熟期 0—60cm 土层土壤硝态氮含量,且硝态氮含量随着追肥比例的增加而增加。

从空间分布来看,不同生育时期土壤硝态氮含量在土壤剖面的分布整体表现为从土壤表层到 60cm 土层硝态氮含量呈下降趋势。同时随生育进程的推进,土层间硝态氮含量差异逐渐减小,这除了与作物吸收有关外,也表明,由于 NO_3^- -N 带有负电荷,不易被土壤胶体所吸附^[14],极易随水迁移进入土壤剖面的下层,有向 60cm 以下土层淋洗的可能性。

2.2 氮肥运筹对土壤铵态氮含量变化的影响

图 2 可以看出,土壤铵态氮含量变化因生育时期、土层和品种的不同而异。施用基肥显著提高了越冬期两品种 0—60cm 土层铵态氮含量,0—20cm 土层铵态氮含量随基肥比例的增大而增大,20—40cm 土层铵态氮含量施肥处理间差异不显著,但显著高于空白。起身至孕穗期,各土层铵态氮含量无显著变化;追施孕穗肥显著提高了宁麦 9 号开花期 0—40cm 土层及豫麦 34 号 0—20cm 土层土壤铵态氮含量;成熟期,不同处理各土层铵态氮含量无显著差异。

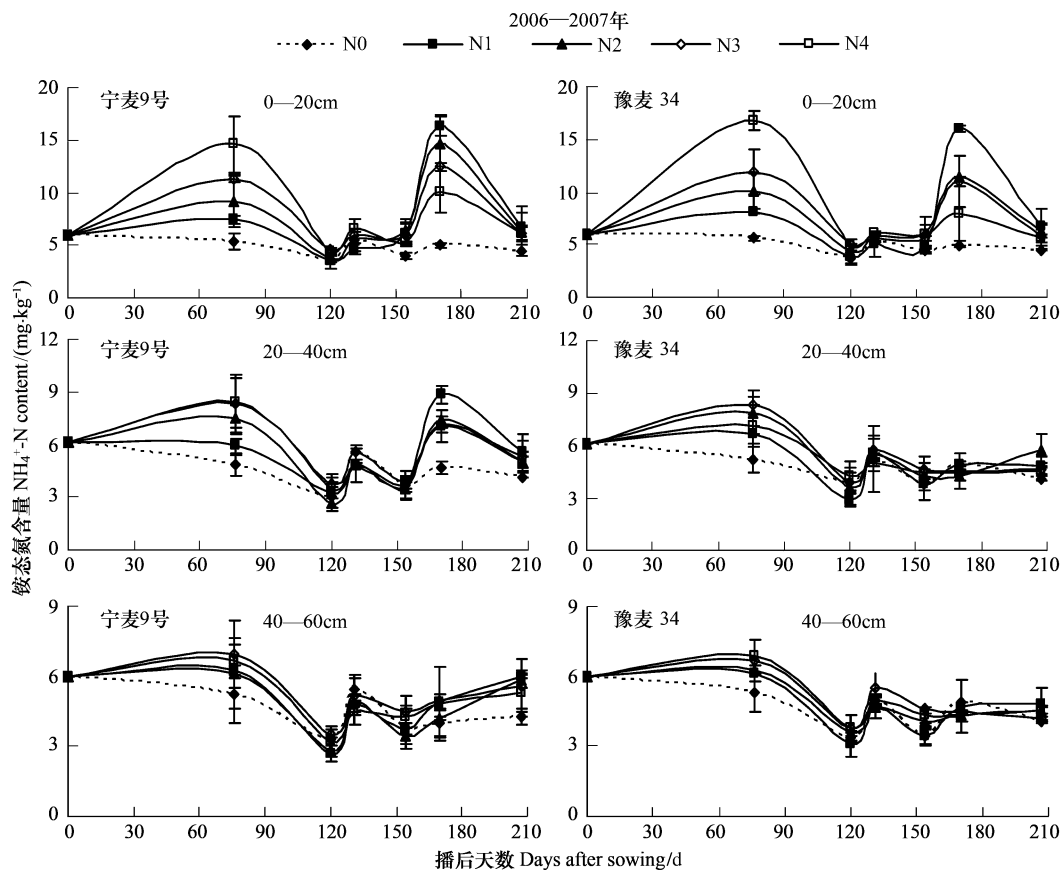


图 2 氮肥运筹对不同生育时期宁麦 9 号和豫麦 34 0—60cm 土壤铵态氮含量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen fertilization on the dynamics of soil NH_4^+ -N contents in 0—60cm soil layers

铵态氮含量在土壤垂直剖面中的变化基本上是由上层到下层呈逐渐下降趋势,施肥点的表层含量最高,从表层到 40cm 左右急剧下降,在 40cm 以下基本上趋于稳定。这主要是因为土壤颗粒和土壤胶体对铵态氮具有很强的吸附作用,同时也因土壤中所进行的交换反应及无机态氮的有机化、硝化和反硝化作用,使土壤铵态氮难以迁移至更深层次,因此表施氮肥后转化为铵态氮会随浓度梯度不断在土壤剖面中下降^[14]。同时,随生育进程的推进,铵态氮在硝化作用下迅速转化为硝态氮,各土层间铵态氮无显著差异。

2.3 氮肥运筹对小麦不同生育阶段氮素表观盈亏量的影响

氮肥施入后减去被作物吸收和残留在土壤中无机氮外的那部分氮素被称作氮素的表观盈余^[7]。由表 1 可以看出,两品种播种至成熟阶段,施氮显著增加了植株氮素积累量、0—60cm 土层无机氮残留量及土壤氮素盈余量,但不同处理氮素表观盈亏量在不同生育阶段表现不同。

表 1 氮肥运筹对小麦不同生育阶段 0—60cm 土层氮素表观盈亏量的影响(2006—2007 年)

Table 1 Apparent nitrogen surplus amount in 0—60cm soil layers at different growth periods of two wheat cultivars under different nitrogen fertilizer treatments

生育时期 Growth stage	指标 Trait	宁麦 9 号 Ningmi9				
		N0	N1	N2	N3	N4
播种-拔节 Sowing to jointing	施氮量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)	0	22.5	67.5	112.5	157.5
	起始无机氮总量 Initial Nmin/(kg·hm ⁻²)	75.04	75.04	75.04	75.04	75.04
	植株氮素积累量 NAA/(kg·hm ⁻²)	35.76d	45.07cd	58.58bc	71.62ab	81.18a
	无机氮残留总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	50.77c	55.35c	75.95b	88.08b	105.27a
拔节-孕穗 Jointing to booting	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-11.49d	-2.88cd	8.00c	27.84b	46.09a
	施氮量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)	0	101.25	78.75	56.25	33.75
	植株氮素积累量 NAA/(kg·hm ⁻²)	34.04b	66.47a	67.57a	70.47a	59.32a
	残留无机氮总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	54.88a	65.73a	64.67a	68.17a	62.87a
孕穗-成熟 Booting to maturity	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-38.15c	24.4a	22.46ab	5.69b	16.83ab
	施氮量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)	0	101.25	78.75	56.25	33.75
	植株氮素积累量 NAA/(kg·hm ⁻²)	22.58d	54.46a	48.31b	41.93c	39.16c
	残留无机氮总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	53.9d	109.34a	98.8ab	87.61bc	79.48c
播种-成熟 Sowing to maturity	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-21.60c	3.18a	-3.70b	-5.12b	-22.02c
	小麦吸氮量 N uptake/(kg·hm ⁻²)	92.37d	165.99c	174.46bc	184.02a	179.66ab
	残留无机氮总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	53.9d	109.34a	98.8ab	87.61bc	79.48c
	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-71.24c	24.71b	26.78b	28.41b	40.90a
生育时期 Growth stage	指标 Trait	豫麦 34 号 Yumi34				
		N0	N1	N2	N3	N4
播种-拔节 Sowing to jointing	施氮量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)	0	22.5	67.5	112.5	157.5
	起始无机氮总量 Initial Nmin/(kg·hm ⁻²)	75.04	75.04	75.04	75.04	75.04
	植株氮素积累量 NAA/(kg·hm ⁻²)	34.37d	39.40cd	56.88bc	77.21ab	84.59a
	无机氮残留总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	53.37c	61.98bc	66.5bc	74.02ab	83.46a
拔节-孕穗 Jointing to booting	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-12.70c	-3.84c	19.16b	36.31b	64.49a
	施氮量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)	0	101.25	78.75	56.25	33.75
	植株氮素积累量 NAA/(kg·hm ⁻²)	41.09b	74.84a	74.68a	69.97a	61.34a
	残留无机氮总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	44.46b	60.72a	56.99a	59.37a	52.04b
孕穗-成熟 Booting to maturity	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-32.18c	27.67a	13.58ab	0.93b	3.83b
	施氮量 Nitrogen rate/(kg·hm ⁻²)	0	101.25	78.75	56.25	33.75
	植株氮素积累量 NAA/(kg·hm ⁻²)	21.30c	63.74a	55.79ab	56.33a	45.90b
	残留无机氮总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	48.77d	105.03a	94.87ab	85.01b	72.84c
播种-成熟 Sowing to maturity	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-25.61b	-6.79a	-14.92a	-25.72b	-32.95b
	小麦吸氮量 N uptake/(kg·hm ⁻²)	96.77d	177.98c	187.35bc	203.52a	191.83ab
	残留无机氮总量 Residual Nmin/(kg·hm ⁻²)	48.77d	105.03a	94.87ab	85.01b	72.84c
	氮素盈亏量 Apparent N surplus amount/(kg·hm ⁻²)	-70.50c	17.03b	17.82b	11.51b	35.37a

注:小写字母表示在 5% 水平上差异显著

不施氮处理在各生育阶段均出现氮素表观亏缺,这主要与土壤供氮量无法满足小麦全生育期吸氮量有关。施氮处理在播种至拔节期,除 N1 处理外均出现氮素表观盈余,且氮素盈余量、植株氮素积累量及土壤无机氮残留量均随基肥比例的增加而增加,但盈余的氮素存在向深层淋洗的可能。拔节期至孕穗期,植株氮素

积累量和土壤无机氮残留量在处理间无显著差异,各施氮处理均出现氮素的表观盈余,但盈余量并不随追施氮量的增加呈规律性的增减变化;孕穗期至成熟期,植株氮素积累量及土壤无机氮残留量均随追肥比例的增加而增加,除宁麦 9 号 N1 处理外,其余处理均出现氮素表观亏缺,且亏缺量随追肥比例的减少而增加。在整个生育时期两品种平均氮素盈余总量均以 5:5 处理最低,7:3 处理最高。同时发现,在相同处理下豫麦 34 号氮素盈余总量要小于宁麦 9 号,这可能与豫麦 34 号为高蛋白小麦品种,其吸氮总量高于宁麦 9 号有关。

2.4 氮肥运筹对小麦氮肥利用效率的影响

陈佑良认为小麦在雌、雄蕊分化期会完成对基施氮的吸收,而追肥后 25d,可以完成对追施氮的吸收^[15]。因此,可以对施氮处理各生育阶段氮肥回收率做表观分析,即:各阶段氮肥表观回收率=(各阶段施氮处理吸氮量-不施氮处理吸氮量)/该阶段的施氮量。由表 2 可以看出,氮肥农学效率与氮肥总表观回收率均随追肥比例的增加呈先增后降的趋势,以基追比 5:5 处理最高。但不同生育阶段氮肥表观回收效率表现趋势存在差异。播种至拔节阶段,基肥表观回收率随基施氮量的增加而下降;拔节至孕穗及孕穗至成熟阶段,拔节肥和孕穗肥表观回收率均随追施氮量的增加而下降;计算拔节至成熟期总追施氮肥的表观回收率也表现为随追施氮量的增加而下降。总体看来,基施氮量较高的处理对追肥利用率较高,而追施氮量较高的处理对基肥利用率较高。品种之间比较,豫麦 34 号氮素总回收率要高于宁麦 9 号,这主要与其对孕穗肥的回收率较高有关。

表 2 氮肥运筹对小麦不同生育阶段氮素利用的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiencies during different growth phases

品种 Cultivar	处理 Treatment	氮肥农学效率 NAE/(kg·kg ⁻¹)	氮肥表观回收率 NRE/%				
			播种-拔节 Sowing to jointing	拔节-孕穗 Jointing to booting	孕穗-成熟 Booting to maturity	拔节-成熟 Jointing to maturity	播种-成熟 Sowing to maturity
宁麦 9 号	N1	11.15c	41.36a	32.03b	31.48b	31.76c	32.72c
Ningmai9	N2	12.56bc	33.81ab	42.57ab	32.68b	37.62bc	36.48bc
	N3	15.26a	31.88ab	64.77ab	34.40ab	49.59ab	40.73a
	N4	14.26ab	28.84b	74.90a	49.13a	62.01a	38.79ab
豫麦 34	N1	15.80c	38.76a	33.33b	41.91b	37.62c	36.09b
Yumai34	N2	17.82b	36.82a	42.65ab	43.80b	43.22bc	40.26b
	N3	19.14a	36.61a	51.35ab	62.27a	56.80ab	47.44a
	N4	18.12b	32.80a	60.01a	72.90a	66.44a	42.25ab

注:小写字母表示在 5% 水平上差异显著

2.5 氮肥运筹对小麦籽粒产量的影响

由表 3 可以看出,两个生长季节的结果比较一致。与 N0 相比,施氮能显著增加小麦籽粒产量,不同氮肥基追比例对产量有显著影响,两品种籽粒产量均随追肥比例的增加呈先增后降趋势,以 N3 处理(基追比为 5:5)最高。从产量构因素来看,宁麦 9 号产量的差异主要是由于穗数的不同,而豫麦 34 号是由于穗数和千粒重的不同。

3 讨论

硝态氮和铵态氮是植株极易吸收利用的主要氮素形态,前人研究认为氮肥运筹对硝态氮和铵态氮含量有显著影响^[16],也有人研究认为对硝态氮和铵态氮含量影响不显著^[17-18],研究结果不尽一致,造成这种差异的主要原因可能与作物氮吸收动力学、氮肥管理、降雨量、灌溉管理、土壤质地和土壤氮转化等众多因素有关^[19]。本试验研究表明,施用氮肥能显著提高 0—60cm 土层硝态氮含量和 0—40cm 土层铵态氮含量,拔节前无机氮含量随基施氮肥比例的增加而增加,而拔节后则随追肥比例的增加而增加,由此可见,不同氮肥基追比会影响土壤剖面无机氮的含量,对土壤的供氮能力及土壤氮平衡产生影响。

由于作物不同生育阶段要求的氮素供应强度不一样^[20],因此,土壤氮素盈亏具有明显的阶段性^[21],不同处理在小麦不同生育阶段均会出现盈余和亏损。基施比例较大的处理氮素盈余主要发生在播种至拔节阶段、

表3 氮肥运筹对小麦籽粒产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of nitrogen fertilization on grain yield and yield components in winter wheat

年度 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Ears $/(\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2})$	每穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight/g	实产 Yield $/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
2006—2007	宁麦9号 Ningmai9	N0	214.67c	38.30b	41.06a	3421.33d
		N1	363.31b	41.12ab	41.58a	5930.22c
		N2	393.77ab	42.87a	41.98a	6247.56bc
		N3	425.33a	43.60a	41.73a	6854.23a
		N4	424.33a	41.98a	41.92a	6630.67ab
	豫麦34 Yumai34	N0	214.48c	30.43a	50.41c	3325.33c
		N1	361.01b	32.20a	56.11a	6880.11b
		N2	390.00b	34.30a	55.29ab	7335.12a
		N3	431.33a	34.80a	55.95a	7630.67a
		N4	424.49a	34.25a	52.80bc	7402.67a
2007—2008	宁麦9号 Ningmai9	N0	267.00c	42.50a	35.74a	3706.23d
		N1	362.33b	42.43a	36.57a	5544.27c
		N2	423.30a	42.83a	36.73a	6379.07b
		N3	459.00a	43.27a	36.40a	6680.30a
		N4	453.90a	42.52a	35.45a	6665.40a

注:小写字母表示在5%水平上差异显著

追肥比例较大的处理氮素盈余主要发生在拔节至孕穗阶段,而氮素亏缺均主要发生在孕穗至成熟阶段,表明麦田土壤出现氮素损失的主要时期和损失量与氮肥基追比例有很大关系。氮素盈亏总量随基肥比例的增加而增加,这主要与小麦生育前期氮素盈余量较大有关,周顺利^[6]认为盈余的氮素主要是以硝态氮淋洗的方式损失;Boman^[22]也认为过高的硝态氮残留很容易通过淋洗或反硝化途径损失出土壤-作物体系,造成对环境的危害;Wehrmann 等人^[23]研究提出冬小麦生育期间土壤供氮量(无机氮和肥料氮)应控制在 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右。本试验研究表明基追比 7:3 的处理生育前期无机氮积累量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而且至拔节期,硝态氮明显下移至 60cm 土层以下;同时,生育前期土壤供氮量大虽然对拔节前氮素大量积累有利,但拔节后土壤供氮能力较弱,难以满足中后期植株对氮素的吸收、运转和分配的需要,使得氮素积累量亦较低,造成氮素利用效率的下降。因此,在小麦实际生产中应避免氮肥大量基施,而应该将氮肥施用后移,适当提高后期追肥比例,有利于提高氮肥利用率和降低土壤氮素的表观盈余量,从而减轻氮肥施用对环境的污染。而针对生育前期氮素如何损失及损失的具体数量,则需要结合¹⁵N 试验进一步进行研究。

国内外研究证明,氮肥后移可保证土壤氮素持续有效供应,协调群体与个体的矛盾,延缓小麦后期衰老,提高子粒产量及氮素利用率^[24-26],但也有学者提出前氮后移技术在实际生产中应做具体分析,在施肥不足或土壤肥力较低的情况下,减少前期氮肥施用量,会导致小麦产量的降低^[27]。同时施氮合理与否,除增产效果外,土壤中残留无机氮的高低也是一个重要指标,刘学军^[8]提出收获后无机氮残留量不超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜。本研究表明,适当减少前期施氮量,增加拔节孕穗期追氮比例,有利于提高小麦产量;但由于土壤起始供氮量较低为 $75.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远低于小麦全生育期的需氮量,因此小麦对肥料氮的依存率相对较高,过量减少前期施氮比例会影响小麦早期的生长发育,无法形成合理的群体,降低了群体有效穗数,从而造成产量的降低,同时也会造成小麦收获后无机氮的大量积累,基追比 1:9 的处理无机氮残留超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有淋洗损失的风险,以基追比 5:5 的效果最好。

4 结论

土壤剖面无机氮含量随基追比的不同而异,基施比例较大,增加了生育前期土壤无机氮含量,而增加后期追肥比例,则提高了收获后土壤无机氮的残留。小麦不同生育阶段土壤氮素表观盈余量随施氮量的增加而增加,提高追肥比例有利于降低氮素总盈余量。小麦籽粒产量、氮肥利用效率均随氮肥基追比例的增加呈先增

后降的趋势。因此,在小麦生产管理中,应当避免生育前期大量施用基肥,在小麦拔节孕穗期适当增加追肥比例,以满足小麦后期需氮量,减少氮肥损失,实现小麦高产、高效、安全的氮肥管理体系。

References:

- [1] Wang Y F, Yu Z W, Li S X, Yu S L. Effects of nitrogen application amount on content of protein components and processing quality of wheat grain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (9): 1071-1078.
- [2] Burkart M R, Kolpin D W, James D E. Assessing groundwater vulnerability to agrichemical contamination in the Midwest US. *Water Science and Technology*, 1999, 39: 103-112.
- [3] Dinnes D L, Karlen D L, Jaynes D B, Kaspar T C, Hatfield J L, Colvin T S, Cabardella C A. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 153-171.
- [4] Malhi S S, Brandt S A, Ulrich D, Lemke R, Gill K S. Accumulation and distribution of nitrate-nitrogen and extractable phosphorus in the soil profile under various alternative cropping system. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25: 2499-2520.
- [5] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The Spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen II. summer maize. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (1): 48-53
- [6] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (11): 1782-1789.
- [7] Shi Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, (26) 11: 3661-3669.
- [8] Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, Zhang F S. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, (22) 7: 1122-1128.
- [9] Ma X H, Yu Z W, Liang X F, Yan H, Shi G P. Effects of nitrogen application rate and ratio of base and topdressing on nitrogen utilization and soil NO_3^- -N content in winter wheat. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (5): 95-98.
- [10] Zhu X K, Guo W S, Zhou J L, Hu H, Zhang Y, Li C Y, Feng C N, Peng Y X. Effects of nitrogen on grain yield, nutritional quality and processing quality of wheat for different end uses. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36 (6): 640-645.
- [11] Li C Y, Feng C N, Zhang Y, Guo W S, Zhu X K, Peng Y X. Effects of the ratio between basal N and top dressing N on grain starch formation in weak gluten wheat variety Ningmai 9 and its enzymes activities. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38 (6): 1120-1125.
- [12] Li R G, Dai Q G, Pi J H. Ecological and economic nitrogen application amount of rice and wheat in tai lake area of Jiangsu Province. *Jiangsu Agricultural Research*, 2000, 21 (2): 30-35.
- [13] Dai M H, Tao H B, Wang L N, Xia L K, Liang Z J, Wang P. Spatial-temporal dynamics of soil mineral nitrogen and balance analysis during spring maize season. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (3): 417-423.
- [14] Chen X M, Wu H S, Sun J H. Time-Spatial variability of ammonium and nitrate in farmland soil of Taihu lake region. *Environmental Science*, 2006, 27 (6): 1217-1222.
- [15] Chen Y L, Zhang Q G, Liang Z X, Wang F J, Mei N. Studies on the influence of the application of fertilizers at different growth stages on the nitrogen absorption and organ formation of winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1986, 2 (12): 101-108.
- [16] Ma X H, Yu Z W, Liang X F, Yan H, Shi G P. Effects of nitrogen application rate and its basal-/top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (4): 630-634.
- [17] Ottaman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soil as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. *Soil Science of America*, 2000, 64: 1883-1892.
- [18] Wu J S, Guo S L, Dang T H. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (10): 2041-2049.
- [19] Zhang S L, Tong Y A, Liang D L, Lv D Q, Ove Emteryd. Nitrogen movement in the soil profile as influenced as by rate and timing of nitrogen application. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (2): 270-277.
- [20] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, Xu J F, Shi L W, Li J L. Appropriate soil nitrate N content for a winter wheat/summer maize rotation system in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (10): 2227-2232.
- [21] Wang Q X, Wang P, Shen L X, Wang X L, Zhang H F, Zhai Z X. Effect of nitrogen application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (8): 1582-1588.
- [22] Boman R K, Westerman R L, Raun W R, Jojola M E. Time of nitrogen application; Effects on winter wheat and residual soil nitrate. *Soil Science Society of America*, 1995, 59: 1364-1369.

- [23] Wehrmann J, Scharpf H C. The Nmin-method: an aid to integrating various objectives of nitrogen fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1986, 149: 428-440.
- [24] Sharma D, Martin L, Anderson W. Response of wheat to split application of nitrogen on a leaching sandy soil. *The Australian Society of Agronomy*, 2006: 10-14.
- [25] Liang X Q, Li H, He M M, Chen Y X, Tian G M, Xu S Y. The ecologically optimum application of nitrogen in wheat season of rice wheat cropping system. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 67-72.
- [26] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, Miao Y X, Li J L, Shi L W, Xu J F, Ye Y L, Liu C S, Yang Z P, Zhang Q, Huang S M, Bao D J. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48-55.
- [27] Wang Y F, Jiang D, Yu Z W, Cao W X. Nitrogen use efficiency and yield of wheat with basal and top-dressed nitrogen fertilizers in soils with different fertility. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29 (7): 491-495.

参考文献:

- [1] 王月福, 于振文, 李尚霞, 余松烈. 施氮量对小麦籽粒蛋白质组分含量及加工品质的影响. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1071-1078.
- [5] 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 II. 夏玉米. *生态学报*, 2002, 22(1): 48-53.
- [6] 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. *生态学报*, 2001, 21(11): 1782-1789.
- [7] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响. *生态学报*, 2006, (26)11: 3661-3669.
- [8] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. *生态学报*, 2002, (22)7: 1122-1128.
- [9] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 颜红, 史桂萍. 施氮量和底追比例对小麦氮素利用和土壤硝态氮含量的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 95-98.
- [10] 朱新开, 郭文善, 周君良, 胡宏, 张影, 李春燕, 封超年, 彭永欣. 氮素对不同类型专用小麦营养和加工品质调控效应. *中国农业科学*, 2003, 36(6): 640-645.
- [11] 李春燕, 封超年, 张影, 郭文善, 朱新开, 彭永欣. 氮肥基追比对弱筋小麦宁麦9号籽粒淀粉合成及相关酶活性的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1120-1125.
- [12] 李荣刚, 戴其根, 皮家欢. 江苏太湖稻麦两熟地区生态、经济施氮量的初步研究. *江苏农业研究*, 2000, 21(2): 30-35.
- [13] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 夏来坤, 梁哲军, 王璞. 华北平原春玉米种植体系中土壤无机氮的时空变化及盈亏. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 417-423.
- [14] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异. *环境科学*, 2006, 27(6): 1217-1222.
- [15] 陈佑良, 张启刚, 梁振兴, 王福均, 梅楠. 应用富集¹⁵N研究冬小麦对氮素的吸收规律及其器官建成的影响. *作物学报*, 1986, 2(12): 101-108.
- [16] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 颜红, 史桂萍. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 630-634.
- [18] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤矿质氮积累与迁移机理. *生态学报*, 2003, 23(10): 2041-2049.
- [19] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 吕殿青, Ove Emteryd. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响. *土壤学报*, 2004, 41(2): 270-277.
- [20] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 徐久飞, 石立委, 李俊良. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2227-2232.
- [21] 王启现, 王璞, 申丽霞, 王秀玲, 张红芳, 翟志席. 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量变化及氮盈亏的影响. *生态学报*, 2004, 24(8): 1582-1588.
- [27] 王月福, 姜东, 于振文, 曹卫星. 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. *作物学报*, 2003, 29(7): 491-495.