

# 不同氮肥管理措施在华北平原冬小麦上的应用效果

赵士诚, 沙之敏, 何萍\*

(农业部作物营养与施肥重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 在河北省衡水和辛集试验点, 采用田间试验研究了氮肥不同用量和不同基追比对冬小麦生长、产量和土壤氮素变化的影响。结果表明, 衡水试验点的土壤本底供氮量能满足小麦返青前的正常生长, 施氮肥对小麦增产无效, 但与施基肥处理相比, 不施基肥、仅在拔节和孕穗期 2:1 分次追肥显著提高了氮肥利用率。在辛集, 不施基肥显著影响小麦返青前的生长, 施 N 60 kg/hm<sup>2</sup> 能满足小麦拔节前的正常生长, 不施基肥、仅在拔节后追肥不能消除前期氮缺乏对小麦生长和高产的影响; N 240 kg/hm<sup>2</sup> 以基追比 1:3 施用能获得较高的产量和氮肥利用率。冬小麦生育期田间氮肥表观损失主要来源于基肥, 但中后期追肥比例过大也增加了收获后土壤的无机氮残留。由于土壤肥力和质地不同, 相同氮肥管理方法下两试验点小麦的生长、产量和氮肥利用率的差异较大, 因此, 为达到作物高产和氮肥高效, 对氮肥的同步调控应结合作物养分阶段需求、土壤养分供应特征和土壤肥力、质地的区域分异特征分区进行。

**关键词:** 冬小麦; 氮肥管理; 基肥; 追肥

中图分类号: S512.1<sup>+</sup>1.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)03-0517-08

## Response of winter wheat to different nitrogen managements in North Central China

ZHAO Shi-cheng, SHA Zhi-min, HE Ping\*

(Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/

Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The field experiments were conducted to investigate the effects of different nitrogen (N) fertilizer rates and the ratio of basal N and topdressing N on winter wheat growth, grain yield and the change of soil N content in Hengshui and Xinji, Hebei province, respectively. The results show that indigenous N supply could meet the demand of N for winter wheat normal growth before the revival stage, and the applied N fertilizer do not significantly increase wheat grain yield in Hengshui site, while compared with the treatments of applying basal N and topdressing N, the applications of topdressing N only at shooting and booting stages at the ratio of 2:1 increase N use efficiency significantly. In Xinji site, N 60 kg/ha could meet the demand of N for wheat growth before the shooting stage, all N are applied as topdressing at the shooting stage do not eliminate the effect of N deficient at the early growth stage on wheat growth and high grain yield, and the application of N 240 kg/ha at the ratio of 1:3 (basal N and topdressing N) at the shooting stage could achieve higher grain yield and N use efficiency compared with other treatments. The apparent N loss during winter wheat growth season mainly comes from the basal N, while high topdressing N rates at mid-later stages also increase soil N residual after the harvest. Because of the variations of soil fertility and texture, the effects of the same N management method on winter wheat growth, yield and N use efficiency in two sites are different, so for higher crop yield and higher N use efficiency, the synchronizing regulation of N fertilizer should combine crop nutrient demand, nutrient supply from soil and regional variation characters of soil fertility and texture.

**Key words:** winter wheat; nitrogen fertilizer management; basal nitrogen; topdressing nitrogen

收稿日期: 2010-07-23

接受日期: 2010-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题 (2007CB109306); 国家科技支撑计划课题 (2006BAD02A14) 资助。

作者简介: 赵士诚 (1974—), 男, 河南永城人, 助理研究员, 主要从事植物营养与生理生化研究。E-mail: sczhao@caas.ac.cn

\* 通讯作者 Tel: 010-82108000, E-mail: phe@caas.ac.cn

华北平原是我国高度集约化农业生产区之一,冬小麦是该区重要的粮食作物,其产量约占我国总产量的 61%<sup>[1]</sup>,对我国粮食安全起着重要作用。为满足日益增长的人口对粮食的需要,人们通过增加肥料投入来提高粮食产量。在华北平原的许多地方,农民在冬小麦季的氮肥用量超过  $N\ 300\ \text{kg}/\text{hm}^2$ <sup>[2-3]</sup>,远远超过达最高产量的最优施肥量<sup>[4]</sup>,导致土壤  $N_{\text{min}}(NH_4^+ -N + NO_3^- -N)$  大量积累,氮肥利用率显著降低<sup>[5]</sup>。Ju 等<sup>[6]</sup>发现,山东省惠民县冬小麦收获后 0—90 cm 和 90—180 cm 土层硝态氮积累分别达 275 和 213  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;刘宏斌等<sup>[7]</sup>发现,北京郊区冬小麦收获后 0—200 和 200—400 cm 土层的硝态氮积累达 314 和 145  $\text{kg}/\text{hm}^2$  ( $n = 93$ ),造成严重的地下水污染。同时,冬小麦的氮肥利用率也由上世纪 80 年代的 30%—35% 下降为目前的 10%—20%<sup>[8-10]</sup>。受传统思想影响,人们重基肥轻追肥现象十分普遍。王激清等<sup>[11]</sup>发现,在华北地区的冬小麦生产中,所有基肥氮用量都超过总施氮量的 50%,其余氮肥多在拔节期一次追施。重施基肥在土壤肥力较低的几十年前可能是合适的,而近年来的高施氮量已使土壤肥力大大提高,且返青前冬小麦的生物量和氮素积累均不超过全生育期的 5%<sup>[12]</sup>,拔节后才开始快速增加对养分的吸收,对氮素的需求具有“前轻后重”的特点<sup>[13]</sup>。因此养分的供求不同步也是氮肥利用率降低的一个重要原因。对此,王激清等<sup>[11]</sup>认为,在高肥力地区应采用降低基肥量,加大追肥量的施肥方式,然而基追比如何确定却缺乏相应的依据。由于分散的个体经营,耕作制度和成土母质等不同,华北平原区域和田块间的土壤肥力和质地存在较大变异<sup>[14-15]</sup>;而不同质地土壤的保肥保水能力差异较大,在不同肥力和质地土壤上施肥的肥效和作物经济回报等也各不相同,固定的施肥模式在不同肥力土壤上无差别应用的效果并不理想<sup>[16-17]</sup>。如何针对土壤的养分和质地区域变异特征进行精准肥料管理,成为保证农业可持续发展,协调作物高产、肥料高效和环境友好的关键。为此,我们设计不同氮肥用量和不同基追比处理,在衡水和辛集两个土壤肥力和质地不同的试验点开展田间试验,评价不同的田间氮肥管理措施,为优化氮肥管理、减肥增效和农田可持续利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验于 2008 年 10 月至 2009 年 6 月在河北省农

林科学院旱作农业研究所衡水试验站(115.32°E, 37.19°N)和辛集市马庄农场(115.22°E, 37.47°N)同时进行。两试验点相距约 25 公里,该区域海拔 20 m,均属北温带季风半湿润气候,年降水量 500—600 mm,主要分布在 6—9 月,年平均气温 12.6℃。衡水试验站供试土壤为壤质潮土,播前 0—20 cm 土壤基础肥力为:有机质 13.7 g/kg,速效磷 7.0 mg/kg,速效钾 84.8 mg/kg, pH 8.5;播前 0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层  $NO_3^- -N$  含量分别为 13.8、14.1、13.6、11.7 和 10.2 mg/kg,  $NH_4^+ -N$  含量分别为 8.7、7.4、5.2、2.8 和 2.5 mg/kg;容重分别为 1.35、1.40、1.35、1.36 和 1.35  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。马庄农场的土壤为砂质潮土,0—20 cm 土壤基础肥力为:有机质 8.5 g/kg、速效磷 11.2 mg/kg、速效钾 97 mg/kg、pH 8.6;播种前 0—20、20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层  $NO_3^- -N$  含量分别为 16.2、13.0、14.4、8.4 和 6.4 mg/kg,  $NH_4^+ -N$  含量分别为 0.9、1.2、1.0、1.1 和 0.9 mg/kg;容重为 1.40、1.42、1.38、1.35 和 1.35  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。前茬作物为夏玉米。

试验设 7 个处理,其中衡水试验点氮肥追施分两次进行,马庄点仅在拔节后追一次,详见表 1。各处理随机区组排列,小区面积 36—40  $\text{m}^2$ ,4 次重复。磷、钾肥均播前一次基施,施用量分别为  $P_2O_5\ 90\ \text{kg}/\text{hm}^2$  和  $K_2O\ 90\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,以过磷酸钙和氯化钾为肥源,小麦生育期不施用有机肥,前茬玉米秸秆全部粉碎后还田。基肥为撒施后旋地,追肥为撒施后浇水,每次灌水量为 600  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。供试小麦品种为衡观 35,于 2008 年 10 月 9 日(10 月 13 日,辛集)播种,2009 年 6 月 10 日(6 月 14 日,辛集)收获,基本苗为  $4.3 \times 10^6$  株/ $\text{hm}^2$ ,生育期间除追肥外,其它田间管理由农民按常规方法进行。

### 1.2 样品采集与测定

每小区一半用于生育期间采样,一半用于收获期单收测产。分别于小麦返青、拔节、抽穗、灌浆和成熟期采植株样测定生物量和氮素含量。收获期在每小区中间选取 10  $\text{m}^2$  单收测产。

播前每试验田取 8 个 0—100 cm 土样,每 20 cm 一层,将同层土样过筛后混合,收获后每小区采 5 个 0—100 cm 土样,每 20 cm 一层,同层土样过筛后混合,混合后的新鲜湿土样放入冰盒中运回实验室。称取湿土样 12 g 加入 100 mL 0.01 mol/L 的  $CaCl_2$  溶液振荡浸提 50 min,用流动分析仪(FIAstar 5000, 丹麦)测定  $NH_4^+ -N$  和  $NO_3^- -N$  含量;用烘干法测定土壤含水量;根据土壤容重计算土壤无机氮含量。

表 1 两试验点的试验设计及氮肥处理 (kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 1 The experimental design for N treatments in two sites

地点 Sites	处理 Treatments	总施氮量 Total N rates	基肥量 Basal N	拔节期追肥 Topdressing N at shooting	孕穗期追肥 Topdressing N at booting
衡水 Hengshui	N0	0	0	0	0
	N180 (0/120/60)	180	0	120	60
	N180 (30/90/60)	180	30	90	60
	N180 (60/60/60)	180	60	60	60
	N240 (0/160/80)	240	0	160	80
	N240 (40/120/80)	240	40	120	80
	N240 (80/80/80)	240	80	80	80
辛集 Xinji	N0	0	0	0	
	N180 (0/180)	180	0	180	
	N180 (45/135)	180	45	135	
	N180 (90/90)	180	90	90	
	N240 (0/240)	240	0	240	
	N240 (60/180)	240	60	180	
	N240 (120/120)	240	120	120	

注 (Note): 处理中括号内数据表示基肥/追肥/追肥量 The data in brackets indicated basal N/topdressing N/topdressing N rate in treatments.

氮肥利用率是指施入的氮肥被当季作物吸收利用的百分率,采用差值法计算,公式为:

氮肥回收利用率 (RE<sub>N</sub>, %) = (施氮区植株吸氮量 - 无氮区植株吸氮量) / 施氮量 × 100;

氮肥农学效率 (AE<sub>N</sub>, kg/kg) = (施氮区产量 - 无氮区产量) / 施氮量;

氮肥偏生产力 (PFP<sub>N</sub>, kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量;

收获指数 (HI, %) = 子粒产量 / 地上部总生物量 × 100。

氮素矿化根据无氮区作物吸氮量与试验前后土壤无机氮的净矿化加以计算<sup>[18]</sup>,由于不考虑氮肥的激发效应,故假定施肥处理的土壤氮素矿化量和无肥区相同,即:生育期土壤氮素净矿化量 = 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;

氮素表观损失 (kg/hm<sup>2</sup>) = 氮输入量 (施入氮肥量 + 播前无机氮含量 + 土壤氮矿化量) - 作物氮吸收量 - 收获后土壤残留无机氮量<sup>[19]</sup>。

数据采用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮肥处理对小麦生育期生物量的影响

在衡水试验点,返青期所有处理的植株生物量无差异,从拔节至抽穗期,不施基肥处理的生物量较基肥处理降低,说明播前土壤起始氮能满足

小麦返青期前的生长,从拔节后开始影响小麦的生长;但从灌浆至成熟期,除 N240 (0/160/80) 处理较不施氮对照显著增加外,所有施肥处理间差异不显著。在辛集试验点,返青期不施基肥处理的植株生物量显著低于施基肥处理,说明播前土壤起始氮不能满足小麦返青期前的生长;返青至拔节期, N240 (60/180) 和 N240 (120/120) 处理间差异不显著,说明基肥氮 60 kg/hm<sup>2</sup> 能满足小麦拔节前正常生长;拔节期追肥后,所有施基肥处理的生物量均高于无基肥处理,成熟期 N240 (60/180) 和 N240 (120/120) 处理间差异不显著,但显著高于其它氮肥处理 (表 2)。

小麦拔节期植株生物量和氮肥基施量的关系可以用“线性加平台”模型模拟,在衡水和辛集试验点,达到平台期的氮肥基施量分别为 10 和 60 kg/hm<sup>2</sup> (图 1)。

### 2.2 不同氮肥处理对小麦产量和氮肥利用率的影响

衡水试验点所有处理间产量差异不显著,所有氮肥处理植株氮积累差异也不显著,但均显著高于不施氮对照。氮肥利用率随总氮量的增加而降低,等氮用量下,氮肥利用率和氮肥农学效率随基肥量的增加而降低,氮肥偏生产力随总施氮量的增加而降低,但等氮用量处理间差异不显著。而在辛集,所有施氮处理的产量均显著高于不施氮对照,而 N240 (60/180) 和 N240 (120/120) 处理的产量又显著高于其它氮肥处理,植株氮积累量和氮肥偏生产力也

表 2 不同氮处理对小麦生育期生物量的影响 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 The effect of different N treatments on wheat biomass during growing season

地点 Sites	处理 Treatments	返青期 Regreen	拔节期 Shooting	抽穗期 Heading	灌浆期 Milking	成熟期 Maturity
衡水 Hengshui	N0	937.9 a	1645.7 b	8902.7 b	14355.9 b	16311.1 b
	N180 (0/120/60)	964.6 a	1852.9 ab	9601.5 ab	15047.2 ab	17777.8 a
	N180 (30/90/60)	968.4 a	2070.4 a	10572.0 a	14752.3 b	16951.1 ab
	N180 (60/60/60)	976.5 a	2036.3 a	9731.5 ab	14701.1 b	17284.4 ab
	N240 (0/160/80)	968.4 a	1724.3 b	8949.8 b	15740.2 a	17724.4 a
	N240 (40/120/80)	948.9 a	2009.5 a	10233.1 a	15036.1 ab	17200.0 ab
	N240 (80/80/80)	978.4 a	2011.1 a	10320.2 a	15212.1 ab	17048.9 ab
辛集 Xinji	N0	532.4 c	1422.7 c	4153.1 c	10838.8 c	10038.4 c
	N180 (0/180)	608.7 c	1445.5 c	5705.8 b	14255.8 b	11564.1 b
	N180 (45/135)	699.9 b	1687.8 b	6411.1 a	15216.3 a	11801.5 b
	N180 (90/90)	698.9 b	1779.5 ab	6283.3 ab	15213.6 a	11741.4 b
	N240 (0/240)	612.6 c	1550.6 c	6062.4 b	13196.6 b	12199.4 b
	N240 (60/180)	751.5 ab	1861.5 a	6685.5 a	14994.1 a	13537.9 a
	N240 (120/120)	799.4 a	1785.6 a	6371.0 a	15455.7 a	13622.8 a

注 (Note): 处理中括号内数据表示基肥/追肥/追肥量 The data in brackets indicated basal N/topdressing N/topdressing N rate in treatments. 同列数值后不同字母表示同一试验点处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant among different treatments in the same experiment site at 5% level.

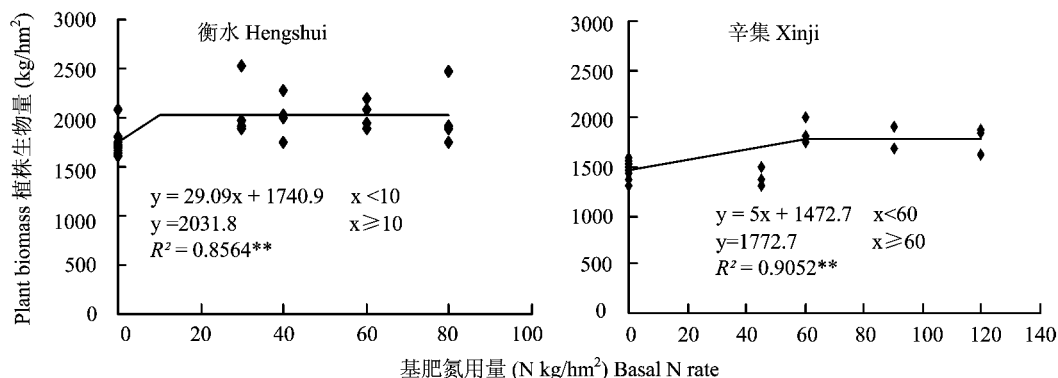


图 1 拔节期植株生物量与基肥氮用量的关系

Fig. 1 The relationship between plant biomass and basal N rate at shooting stage

呈现相似的变化趋势。与衡水点不同,氮肥利用率和农学效率随总氮量的增加而增加,且等氮量下以基追比 1:3 施用显著高于其它处理。两试验点所有处理间收获指数差异均不显著,但辛集点的值高于衡水(表 3)。

### 2.3 不同氮肥处理小麦生育期的氮素平衡

衡水试验点播前 0—100 cm 土层无机氮和生育期表观矿化氮量、等氮量处理的植株氮积累和收获后 0—100 cm 土层无机氮残留均高于辛集;收获后土壤无机氮残留和生育期氮素表观损失随施氮量的增加而增加,等氮用量下,无机氮残留随基肥用量的

增加而降低,而施氮量 180 kg/hm<sup>2</sup> 的 3 个处理间差异不显著。辛集点 0—100 cm 土壤无机氮残留和生育期氮素表观损失同样随施氮量的增加而增加,但等氮用量处理间土壤无机氮残留差异不显著;而基追比 1:1 处理的氮素表观损失显著高于其它两个处理(表 4)。

## 3 讨论与结论

由于缺乏正确的氮肥管理方法,过量和粗放的施用氮肥已成为华北平原的普遍现象,且已导致土壤硝酸盐大量积累和氮肥利用效率显著下降。本研

表3 不同氮肥处理对小麦产量和氮肥利用率的影响  
Table 3 The effect of different N treatments on wheat grain yield and N use efficiency

地点 Sites	处理 Treatments	产量 Grain yield (kg/hm <sup>2</sup> )	植株氮积累 Crop N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥利用率 RE <sub>N</sub> (%)	氮肥农学效率 AE <sub>N</sub> (kg/kg)	氮肥偏生产力 PFP <sub>N</sub> (kg/kg)	收获指数 Harvest index (%)
衡水 Hengshui	N0	6479.4 a	185.3 b				50.2 a
	N180 (0/120/60)	6853.2 a	228.8 a	24.2 a	2.1 a	38.1 a	48.7 a
	N180 (30/90/60)	6742.1 a	223.3 a	21.1 b	1.5 b	37.5 a	47.8 a
	N180 (60/60/60)	6521.5 a	212.5 a	14.4 d	0.2 c	36.2 a	47.1 a
	N240 (0/160/80)	6914.7 a	228.5 a	18.1 c	1.8 a	28.8 b	49.9 a
	N240 (40/120/80)	6858.7 a	219.7 a	14.3 d	1.6 b	28.6 b	47.4 a
辛集 Xinji	N240 (80/80/80)	7009.9 a	222.3 a	15.4 d	2.2 a	29.2 b	47.7 a
	N0	5379.5 c	123.6 c				53.5 a
	N180 (0/180)	6416.1 b	157.2 b	18.7 c	5.8 c	35.6 a	54.2 a
	N180 (45/135)	6653.5 b	162.7 b	21.7 ab	7.1 b	37.0 a	54.7 a
	N180 (90/90)	6555.4 b	154.9 b	17.4 c	6.5 b	36.4 a	53.7 a
	N240 (0/240)	6527.2 b	169.7 ab	19.2 bc	4.8 d	27.3 b	52.1 a
	N240 (60/180)	7289.1 a	181.1 a	23.9 a	8.0 a	31.2 b	53.5 a
	N240 (120/120)	7179.9 a	173.8 a	20.9 b	7.6 ab	30.0 b	52.4 a

注( Note): 处理中括号内数据表示基肥/追肥/追肥量 The data in brackets indicated basal N/topdressing N/topdressing N rate in treatments. RE<sub>N</sub>—Nitrogen recovery efficiency; AE<sub>N</sub>—Nitrogen agronomy efficiency; PFP<sub>N</sub>—Partial factor productivity from applied nitrogen. 同列数值后不同字母表示同一试验点处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant among different treatments in the same experiment site at 5% level.

表4 不同氮肥处理的小麦生育期氮素平衡(kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 4 Apparent N balance of different N treatments in wheat growing season

地点 Sites	处理 Treatments	氮输入 N input			氮输出 N output		氮素表现 损失 Apparent N loss
		施氮量 N rates	起始 Nmin Initial Nmin	表观矿化氮 Apparent N mineralization	吸氮量 Crop N uptake	残留 Nmin Residual Nmin	
衡水 Hengshui	N0	0	246.1	109.6	185.3 c	170.4 c	0
	N180 (0/120/60)	180	246.1	109.6	228.8 a	271.9 b	35.0 f
	N180 (30/90/60)	180	246.1	109.6	223.3 ab	261.8 b	50.6 e
	N180 (60/60/60)	180	246.1	109.6	212.2 a	247.8 b	75.6 c
	N240 (0/160/80)	240	246.1	109.6	228.5 a	303.2 a	67.3 d
	N240 (40/120/80)	240	246.1	109.6	219.7 ab	293.2 a	82.7 b
辛集 Xinji	N240 (80/80/80)	240	246.1	109.6	222.3 a	273.8 b	99.6 a
	N0	0	176.1	67.4	123.6 c	119.9 c	0
	N180 (0/180)	180	176.1	67.4	157.2 b	188.9 b	77.5 d
	N180 (45/135)	180	176.1	67.4	162.7 ab	183.3 b	77.6 d
	N180 (90/90)	180	176.1	67.4	154.9 b	180.8 b	87.8 c
	N240 (0/240)	240	176.1	67.4	169.7 ab	214.0 a	99.9 b
	N240 (60/180)	240	176.1	67.4	181.1 a	204.8 ab	97.6 b
	N240 (120/120)	240	176.1	67.4	173.8 a	191.2 b	118.5 a

注( Note): 处理中括号内数据表示基肥/追肥/追肥量 The data in brackets indicated basal N/topdressing N/topdressing N rate in treatments. 同列数值后不同字母表示同一试验点处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant among different treatments in the same experiment site at 5% level.

究中,由于衡水试验点土壤基础肥力较高,土壤本底供氮量(不施氮肥时的土壤供氮量)能满足小麦返青前的正常生长,基肥氮  $10 \text{ kg/hm}^2$  即可满足拔节前的正常生长;拔节期追肥后所有施氮处理间生物量和产量差异基本不显著。说明土壤基础肥力较高时,不施基肥对小麦前期生长影响不大或没有影响,仅返青后追肥可消除前期土壤供氮稍不足对小麦生长和高产的影响。而在辛集,不施基肥在返青期就影响小麦正常生长,基肥氮  $60 \text{ kg/hm}^2$  才能满足拔节期的正常生长(图 1),拔节期追肥后所有施基肥处理的生物量仍显著高于无基肥处理,施氮  $240 \text{ kg/hm}^2$  的两基肥处理的成熟期生物量和产量显著高于其它处理,说明播前土壤肥力较低时,一定量的氮肥基施是必要的,仅拔节后追肥并不能消除前期氮缺乏对小麦生长和高产的影响。在衡水点的等氮用量处理中,氮肥利用率随追肥量的增加而显著增加,且以不施基肥,氮肥在拔节和孕穗期 2:1 追施时最高,说明此种方法能较好地与作物氮需求和土壤氮供应同步。赵荣芳等<sup>[2]</sup> 试验也表明,在高肥力土壤上,冬小麦不施基肥,仅在返青和拔节期追肥就能实现氮肥的高效利用。由于前期需氮很少,美国小麦一般都不施基肥,只在非常瘠薄的砂质土壤上才推荐当季施氮量的 1/3 作基肥<sup>[20]</sup>。而辛集由于低的土壤肥力限制小麦前期的生长,且拔节后追肥不能弥补前期氮缺乏的影响,等氮用量下,植株生物量、产量、植株氮积累和氮肥利用率均以基追比 1:3 处理较高,小麦产量、植株氮积累和氮肥利用率均以 N240(60/180) 处理最高。说明在辛集,基追比 1:3 能较好地与作物氮需求和土壤氮供应相同步,且 N  $240 \text{ kg/hm}^2$  能进一步满足小麦高产的需要,这与氮肥分期施入有利于小麦不同生育阶段的氮素吸收相一致<sup>[21]</sup>。蒋家慧<sup>[22]</sup> 也指出,在氮磷钾合理配施的前提下,总氮量的 1/3 基施、2/3 追施能促进小麦营养器官贮存同化物在花后向子粒的运转,有效地提高产量。相同氮肥管理方式下,两试验点小麦的生长和产量差异较大,说明要保证作物高产和高效,氮肥的用量和基追比例应根据土壤基础肥力决定。小麦拔节后 40—80 cm 土层根系快速发育,氮素吸收迅速增加,拔节期即可吸收该层的无机氮<sup>[23]</sup>。衡水点 40—80 cm 土层有较高的无机氮积累(其中铵态氮占有较大比例),所以不施肥对照成熟期的生物量和产量并没有较施肥处理显著下降,且其收获指数较高;而辛集点土壤

氮严重缺乏,且 40—80 cm 土层无机氮含量低,其砂质土壤的保肥性也较差,不施氮对照的产量和生物量显著低于施氮处理。

两试验点等施氮量处理的产量相似,但衡水的植株氮积累显著高于辛集。张福锁等<sup>[24]</sup> 研究看出,华北高产冬小麦的氮素需求量为  $174 \text{ kg/hm}^2$ ,与衡水不施氮对照和辛集最高产量的植株吸氮量相似,说明辛集最高产量的吸氮量已可满足该点小麦高产的需要;而衡水点不施肥就可满足小麦高产的需要,过量的氮肥供应(N 180 和  $240 \text{ kg/hm}^2$ ) 只能导致作物的奢侈吸收,积累过量的同化物形成较大的生物量,导致低的收获指数。刘学军<sup>[25]</sup> 在产量水平  $4400 \sim 4450 \text{ kg/hm}^2$  的草甸褐土上的研究认为,施氮肥对冬小麦增产无效,但可显著促进植株对氮素的吸收,这与衡水点的试验结果相似。

在冬小麦季,基施和追施氮肥的去向存在明显差异。追施氮肥的利用率和收获后残留率显著高于基施氮肥、而损失率则相反<sup>[21,26]</sup>,这与本研究中氮素田间表观损失随基肥氮量的增加而增加、主要来源于冬前基肥的结果一致。这是由于小麦拔节前对氮素吸收较少,而华北地区漫长干燥的冬季使氮素大量挥发损失<sup>[23,27-28]</sup>。因此,在低肥力条件下,适当降低基肥氮用量、加大追肥用量,在高肥力条件下,不施基肥、氮肥全部在返青后分次追施有利于提高小麦产量、氮肥利用率和减少氮素损失。然而,拔节后追肥量的增加也增加了收获后的 N<sub>min</sub> 残留和在随后多雨的夏玉米季向下层淋失的风险。因此过分增加追肥比例也是不科学的,应以达到作物养分吸收和土壤供求同步、土壤 N<sub>min</sub> 没有显著积累为宜。

相同施氮量下,辛集的植株吸氮量和收获后土壤氮残留量均低于衡水,而氮素田间表观损失高于衡水。主要是由于小麦生育期积累的氮 73%~88% 来自土壤,仅 12%~27% 来自肥料<sup>[21]</sup>;而辛集土壤基础肥力较低、保肥保水能力差和氮素易挥发、下淋损失等,即土壤肥力和质地显著影响氮肥施用效果。氮肥施用没有增加衡水点的小麦产量,而不施基肥、氮肥在拔节后分次追施能达到较好的供求同步效果;辛集点 N240(60/180) 和 N240(120/120) 处理获得较高产量,氮肥以基追比 1:3 施用能使供求同步,说明在不同条件土壤上以固定的基追比施用并不能达到肥料供求同步的精准调控。因此氮肥同步精准调控要根据作物

生长阶段需求特征和土壤供应状况确定氮肥基、追施用量;同时还要考虑氮肥在不同肥力和质地土壤上的施用效果<sup>[29]</sup>,即作物养分的时间供求同步和土壤空间分区管理相结合的管理方法方能取得较好的效果,而氮肥施用相关指标的确定还需要通过多点试验进一步研究。

### 参 考 文 献:

- [1] Cui Z L, Zhang F S, Dou Z X *et al.* Regional evaluation of critical nitrogen concentrations in winter wheat production of the North China Plain[J]. *Agron. J.*, 2009, 101: 159-166.
- [2] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 基于养分平衡和土壤测试的冬小麦氮素优化管理方法[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 211-225.  
Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Study on nitrogen optimized management at different growing stage of winter wheat based on nutrient balance and soil test [J]. *Chin. Agric. Sci. bull.*, 2005, 21(11): 211-225.
- [3] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X *et al.* On-farm evaluation of winter wheat yield response to residual soil nitrate-N in north china plain[J]. *Agron. J.*, 2008, 100: 1527-1534.
- [4] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策[A]. 李庆远,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1998. 38-51.  
Zhu Z L. The status, problems and countermeasures of nitrogen fertilizer application in China[A]. Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer issues of sustainable agriculture development in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998. 38-51.
- [5] Chen X P, Ji H J, Zhang F S. The integrated evaluation on effect of excess fertilization application on nitrate tent of vegetable in Beijing[A]. Li X L *et al.* (ed.). Fertilizing for sustainable production of high quality vegetables[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [6] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, Christie P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environ. Pollut.*, 2006, 143: 117-125.
- [7] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(5): 692-698.  
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G *et al.* Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2004, 37(5): 692-698.
- [8] 朱兆良. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理[A]. 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1992. 228-245.  
Zhu Z L. Fertilizer fate and N management in agroecosystem [A]. Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soil of China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 228-245.
- [9] 马文奇. 山东省作物施肥现状、问题与对策[D]. 北京:中国农业大学博士学位论文,1999.  
Ma W Q. Current status and evaluation of crop fertilization in Shandong Province[D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 1999.
- [10] 赵荣芳. 冬小麦夏玉米轮作中水氮资源的优化管理及其可持续性评价[D]. 北京:中国农业大学博士学位论文,2006.  
Zhao R F. Optimum management and sustainable evaluation on water and nitrogen resource in winter wheat-summer maize rotation system[D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 2006.
- [11] 王激清,马文奇,江荣凤,张福锁. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析[J]. *土壤通报*, 2008, 39(2): 329-334.  
Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, Zhang F S. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice, wheat, maize in China[J]. *Chin. J. Soil. Sci.*, 2008, 39(2): 329-334.
- [12] 裴雪霞,王秀斌,何萍,等. 氮肥后移对土壤氮素供应和冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 9-15.  
Pei X X, Wang X B, He P *et al.* Effect of postponing N application on soil N supply, plant N uptake and utilization in winter wheat[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2009, 15(1): 9-15.
- [13] 黄鸿程,皇甫湘荣,宝德俊,等. 冬小麦地上部器官氮磷钾的积累分配和转运的研究[J]. *土壤通报*, 2003, 31(4): 178-181.  
Huang H C, Huangfu X R, Bao D J *et al.* Study on NPK accumulation and transfer for above-ground organs of winter wheat [J]. *Chin. J. Soil. Sci.*, 2003, 31(4): 178-181.
- [14] 黄绍文,金继运,杨俐苹,程明芳. 粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(3): 297-302.  
Huang S W, Jin J Y, Yang L P, Cheng M F. Spatial distribution of soil nutrient and relationship between soil nutrient and soil granule composition for grain crop region[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(3): 297-302.
- [15] 王淑英,路苹,王建立,等. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征—以北京市平谷区为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 4957-4965.  
Wang S Y, Lu P, Wang J L *et al.* Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: a case study in Pinggu County Beijing[J]. *Acta. Ecol. Sin.*, 2008, 28(10): 4957-4965.
- [16] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X *et al.* On-farm evaluation of the improved soil Nmin-based nitrogen management for summer maize in North China Plain[J]. *Agron. J.*, 2008, 100: 517-525.
- [17] Gami S K, Lauren J G, Duxbury J M. Influence of soil texture and cultivation on carbon and nitrogen levels in soils of the eastern Indo-gangetic Plains [J]. *Geoderma.*, 2009, 153: 304-311.
- [18] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertiliz-

- er and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Sci. Agri. Sin.*, 2002, 35 (11): 1361-1368.
- [19] Liu X J, Zhao Z J, Ju X T. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta. Ecol. Sin.*, 2002, 33(7): 1122-1128.
- [20] 张福锁, 江荣风, 陈新平, 等. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.  
Zhang F S, Jiang R F, Chen X P *et al.* Technology of fertilizer recommendation based on soil testing[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.
- [21] 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): 815-823.  
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[J]. *Acta. Ecol. Sin.*, 2006, 26(3): 815-823.
- [22] 蒋家慧. 氮肥运筹对小麦碳素同化、运转和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(3): 69-72.  
Jiang J H. Effects of nitrogen application on carbon assimilation, transfer and yield of the wheat[J]. *J. Trit. Crops*, 2004, 24(3): 69-72.
- [23] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 小麦各生育期对土壤不同深度标记硝态氮的利用[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(11): 2261-2267.  
Zhang L J, Ju X T, Zhang F S *et al.* Recovery of labeled nitrate-N in different soil layers by wheat in different growth stages [J]. *Sci. Agri. Sin.*, 2005, 38(11): 2261-2267.
- [24] 张福锁, 等. 协调作物高产和环境保护的养分资源管理技术研究与应[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.  
Zhang F S *et al.* Study and application of nutrient resource management technology harmonizing crop high yield and environment protection[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008.
- [25] 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[J]. *生态学报*, 2002, 22(7): 1122-1128.  
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 balance[J]. *Acta. Ecol. Sin.*, 2002, 22(7): 1122-1128.
- [26] Boman R K, Westerman R L, Raun W R *et al.* Time of nitrogen application: Effects on winter wheat and residual soil nitrate[J]. *SSSA. J.*, 1995, 59: 1364-1369.
- [27] Randall G W, Mulla D J. Nitrate-N in surface water as influenced by climatic conditions and agricultural practices[J]. *J. Environ. Qual.*, 2002, 30: 337-344.
- [28] 胡田田, 李岗, 韩思明, 等. 冬小麦氮磷营养特征及其与土壤养分动态变化的关系[J]. *麦类作物学报*, 2000, 20(4): 47-50.  
Hu T T, Li G, Han S M *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus absorption by winter wheat and its relation with dynamic change of soil nutrition[J]. *J. Trit. Crops*, 2000, 20(4): 47-50.
- [29] Jalota S K, Singh S, Chahal G B S. Soil texture, climate and management effects on plant growth, grain yield and water use by rainfed maize-wheat cropping system: Field and simulation study [J]. *Agric. Water Manag.*, 2010, 97: 83-90.