

# 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

石 玉, 于振文\*

(山东农业大学农业部小麦栽培生理与遗传改良重点开放实验室, 泰安 271018)

**摘要:**研究了高产麦田中施氮量和底追比例对冬小麦籽粒产量、土壤硝态氮含量和氮素平衡的影响。田间试验在山东省龙口市  
中村进行, 试验区小麦各生育阶段的降雨量和零度以上的积温分别为: 82.9mm, 649.8 °C (播种~冬前)、33.3mm, 578.7 °C (冬前  
~拔节)、28mm, 359 °C (拔节~开花)、84.3mm, 837.6 °C (开花~成熟)。试验设 3 个施氮量: 0 kg · hm<sup>-2</sup> (CK)、168 kg · hm<sup>-2</sup> (A)、  
240 kg · hm<sup>-2</sup> (B); 在施氮量 168 kg · hm<sup>-2</sup> 和 240 kg · hm<sup>-2</sup> 条件下分别设 3 个底追比例: 1/2 : 1/2 (A1 和 B1)、1/3 : 2/3 (A2 和 B2)、0 : 1 (A3  
和 B3)。结果表明: 不同施氮处理之间植株氮积累量无显著差异; 与不施氮处理相比, 施氮可显著提高籽粒产量和蛋白质含量,  
施氮量为 168 kg · hm<sup>-2</sup>、底追比例为 1/3 : 2/3 的处理 A2 与处理 B2、B3 差异不显著, 但处理 A2 显著提高了氮肥利用率, 降低了土壤  
残留量和氮素表观损失量; 施氮量相同, 适当增加追施氮肥的比例可显著提高籽粒产量、蛋白质含量和氮肥利用率。试验还表  
明, 在拔节期, 底施氮量为 84 kg · hm<sup>-2</sup> 和 120 kg · hm<sup>-2</sup> 的处理 A1、B1, 在 80~100cm 和 100~160cm 土层分别出现硝态氮的累积; 而  
底施氮量为 56 kg · hm<sup>-2</sup> 的处理 A2, 在 0~200cm 土层硝态氮含量和累积量与不施氮处理无显著差异。在成熟期, 追施氮量大于  
160 kg · hm<sup>-2</sup> 的处理 B3、A3 和 B2, 硝态氮在 120~180cm 土层出现累积高峰, 已下移到小麦根系可吸收范围之外, 易于造成淋溶损  
失; 而追氮量为 112 kg · hm<sup>-2</sup> 的处理 A2, 在 100~200cm 土层硝态氮累积量与对照无显著差异。试验中, 施氮量为 168 kg · hm<sup>-2</sup> 底  
追比例为 1/3 : 2/3 的处理 A2 的籽粒产量、蛋白质含量、地上部植株氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率和籽粒氮肥吸收利用率均  
较高, 100~200cm 土层未出现硝态氮的明显累积, 氮素表观损失量最少, 为最佳氮肥运筹方式。

**关键词:** 施氮量; 底追比例; 小麦; 产量; 土壤硝态氮; 氮平衡

文章编号: 1000-0933(2006)11-3661-09 中图分类号: Q938 文献标识码: A

## Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance

SHI Yu, YU Zhen-Wen\* (Key Laboratory of Wheat Physiology and Genetics Improvement, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3661~3669.

**Abstract:** Application of nitrogen (N) fertilizer is one of the most important measures that increase grain yield and improve grain quality in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production, so there is a huge number of investigation experiments in this field on the different nitrogen fertilizer applying regimes. However, currently, still there exists a serious problem of low nitrogen use efficiency, especially under winter wheat high yield condition: unsuitable nitrogen fertilizer often leads to lower income benefit and the larger accumulation of nitrate in soil, bringing potential risk to environment. A lot of previous studies are mostly involved in the effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on wheat grain yield. Now in wheat production, a shortage still is the effects of nitrogen fertilizer applying regimes on wheat grain yield, N utilization, N balance and residual soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N under

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (30471026); 国家“十五”科技攻关资助项目 (2002BA516A12)

**收稿日期:** 2005-12-01; **修订日期:** 2006-08-20

**作者简介:** 石玉 (1979~), 女, 山东肥城人, 博士生, 主要从事小麦生理生态研究. E-mail: sdauno42@sdau.edu.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuzw@sdau.edu.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30471026) and the National “Tenth Five-year Plan” Key Project of Science and Technology of China (No. 2002BA516A12)

**Received date:** 2005-12-01; **Accepted date:** 2006-08-20

**Biography:** SHI Yu, Ph.D. candidate, mainly engaged in wheat physiology and ecology. E-mail: sdauno42@sdau.edu.cn

high yield field. In order to explore the optional regime of nitrogen fertilizer application suitable for environment and economy, a field experiment on the different rate and ratio of base and topdressing of nitrogen fertilizer at the different growth period of winter wheat was conducted.

The field experiment was conducted from the fall of 2003 to the summer of 2004 in Zhongcun village, Longkou city, Shandong province, China. The brown soil nutrient components were: organic matter at  $13.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and available nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) at  $87.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $10.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Winter wheat Variety: Jimai 20, typical strong gluten cultivar currently used locally was selected for this experiment.

The field experiment of three replicates for each treatment was randomly arranged in a splitplot design. The major plot was nitrogen fertilizer rate as urea at the three level of  $0 \text{ kg N per hm}^2$  (CK),  $168 \text{ kg N per hm}^2$  (A), and  $240 \text{ kg N per hm}^2$  (B); sub-plot was ratio of base and topdressing nitrogen fertilizer at the different development period of wheat, which are  $1/2 : 1/2$  (A1 and B1),  $1/3 : 2/3$  (A2 and B2) and  $0 : 1$  (A3 and B3). Treatment B1 is a regime applied now in local region. Basal N fertilizer, total  $\text{P}_2\text{O}_5$  ( $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and  $\text{K}_2\text{O}$  ( $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) was applied before sowing; topdressing N fertilizer was at jointing stage. Each plot size was 3 by 8 m. At the three-leaf stage of seeding, plants each plot were thinned to a density of 150 plants per  $\text{m}^2$ . The date of sowing wheat seeds was October 4, 2003 and harvested date was June 15, 2004. Totally, 3 times irrigation (before winter stage, jointing stage and 28d after flowering) were taken through wheat life.

Two soil sites were sampled randomly each plot in 20cm increments to a depth of 200cm at five growth stages [sowing, before winter, jointing (before fertilization), flowering and maturity] with a soil auger and the sample was obtained after mixing and frozen immediately. The procedure for treating sample was: (1) sifting after mixing the defrosted sample with a 2mm sieve; (2) 5g each sample was weighted and was extracted in 0.05L of 0.01mol/L  $\text{CaCl}_2$  on a horizontal shaker for 0.5 hour; (3) Nmin were determined using an auto analyzer (AA3) after filtering. Soil water content each sample was measured as well.

Plant samples taken at jointing and maturity stage were oven dried at 70 degree up to a constant weight. The nitrogen content in plant tissue and grain were determined by the standard macro Kjeldahl digestion method.

It was showed that the amount of N accumulation in plant have no significant difference between treatments with applying nitrogen fertilizer. Grain yield and grain protein content were all elevated remarkably by applying nitrogen fertilizer compared with those of treatment CK; there was no significant difference of grain yield and grain protein content between treatment A2 and treatment B2 and B3. However, compared with those of treatment B2 and B3, treatment A2 increased nitrogen using efficiency and reduced residual soil  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  and N losses. On the condition of the same rate of nitrogen fertilizer, increasing topdressing nitrogen rate clearly elevate grain yield, grain protein content and nitrogen using efficiency markedly. The results indicated that residual soil  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  amount in treatment A1 and B1 accumulated higher than those in treatment CK at 80~100cm and 100~160cm soil layers at jointing stage, but that of treatment A2 have no significant difference compared with that of treatment CK at 0~200cm soil layers. At maturity stage, in treatments B2, B3 and A3 more residual soil  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  were detected than those in treatment CK in 120~180cm soil layers, which could not be absorbed by roots of wheat, and lead to be eluviated easily. But soil  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  accumulation amount in treatment A2 have no significant difference compared with that of treatment CK at 100~200cm soil layers. In conclusion, treatment A2, whose nitrogen fertilizer rate is  $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and the ratio of base and topdressing is  $1/3 : 2/3$ , had higher grain yield and grain protein content, and heightened N using efficiency and minimized the risk of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  leaching, which will be one of the most appropriate nitrogen fertilizer applying regimes in wheat production in local region, China.

**Key words:** nitrogen fertilizer rate; ratio of base and topdressing; wheat; yield; soil nitrate; nitrogen balance

氮肥在我国农业生产中发挥了重要的作用,但氮肥的不合理施用也造成了利用率低,损失严重,污染环境等不良后果<sup>[1~3]</sup>。关于施氮量和追肥时期对小麦产量的影响前人研究较多,有人报道高产麦田施纯氮量应在  $225 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,底追比例  $2/3 : 1/3$  为宜<sup>[4]</sup>;另有研究指出超高产小麦施氮量为  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以底施与拔节期追施比例为  $5 : 5$  产量最高<sup>[5]</sup>;岳寿松研究表明在施纯氮总量  $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  条件下,以底施与拔节期追施比例为

5.5 为宜<sup>[6]</sup>。可见前人的研究主要侧重于施氮量和底肥与追肥的比例对小麦产量的影响,而对于在保证产量和品质的同时,降低硝态氮在深层土壤的残留,提高氮肥利用率,保持高产麦田中的氮素平衡的研究尚少见报道。尤其是在高产田上,底肥和追肥的比例如何分配,二者对产量、氮素利用率、土壤硝态氮含量变化有何影响,尚缺乏综合研究。本试验研究了高产条件下施氮量和底追比例对小麦籽粒产量、蛋白质含量、氮肥利用率和氮素平衡的影响,以及土壤剖面硝态氮含量的变化,旨在提出兼顾小麦产量、品质、效益、生态的氮肥运筹方式,为小麦生产中氮肥的合理调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于山东省龙口市市中村进行。试验点位于东经 120.3°、北纬 37.3°。该地区属于温带季风型气候带,海拔 10m 左右,历年平均全年降雨量为 600mm,主要分布在 7~8 月份。年平均气温为 12℃,无霜期约为 190d。冬小麦/夏玉米轮作是该地区主要的粮食种植方式。2003 年 10 月至 2004 年 6 月冬小麦生长期间的降雨和气温情况见表 1。

表 1 冬小麦不同生育阶段降雨和气温情况  
Table 1 Precipitation and air temperature during different winter wheat growth period

| 项目 Item                            | 播种~冬前<br>Sowing~before<br>winter | 冬前~拔节<br>Before winter<br>~jointing | 拔节~开花<br>Jointing~<br>anthesis | 开花~成熟<br>Anthesis~<br>maturity | 合计<br>Sum |
|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 降雨量 Amount of precipitation(mm)    | 82.9                             | 33.3                                | 28                             | 84.3                           | 228.5     |
| 占全期比例 PW(%)                        | 36.3                             | 14.6                                | 12.2                           | 36.9                           | 100.0     |
| 积温 Accumulation temperature(∑t≥0℃) | 649.8                            | 578.7                               | 359                            | 837.6                          | 2425.1    |
| 占全期比例 PW(%)                        | 26.8                             | 23.9                                | 14.8                           | 34.5                           | 100.0     |

占全期比例 PW The precipitation amount or accumulation temperature proportion of each growth period to whole wheat growth stage

1.2 试验设计与材料

田间试验于 2003~2004 年度在山东省龙口市北马镇中村高产田进行。试验地为棕壤。小麦播种前试验地 0~20cm 土层土壤养分含量为:有机质 13.1g·kg<sup>-1</sup>、全氮 1.14g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 87.5mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 10.49mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 84mg·kg<sup>-1</sup>。品种选用强筋小麦济麦 20。

试验采用裂区设计,施氮量为主区,氮肥底追比例为副区,主副区内随机排列,3 次重复。磷肥用量为每公顷 135kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,钾肥为每公顷 105kg K<sub>2</sub>O,在磷钾肥用量一致的条件下,设置 3 个施氮量处理即不施氮肥、施氮 168kg·hm<sup>-2</sup>和 240kg·hm<sup>-2</sup>,分别用 CK、A、B 表示。在施氮量为 168 kg·hm<sup>-2</sup>和 240 kg·hm<sup>-2</sup>条件下,设置底追比例为 1/2、1/2、1/3、2/3、0 的处理,分别为 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3。其中处理 B1 为当地高产麦田常规施肥量和底追比例。氮肥施用尿素(N%, 46%),磷肥为过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 17%),钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O, 60%)。底施氮肥、全部磷肥和钾肥均匀撒于小区后翻入地下;追施氮肥于拔节期(雌雄蕊原基分化期)开沟施入,覆盖后采用畦灌方式灌溉。播种前前茬玉米秸秆全部翻压还田。2003 年 10 月 4 日播种,小区面积为 3m×8m=24m<sup>2</sup>,基本苗为 150 株/m<sup>2</sup>,田间管理同高产田。2004 年 6 月 15 日收获。小麦全生育期共灌水 3 次,包括冬水(12 月 1 日)、拔节水(4 月 15 日)、灌浆水(6 月 4 日),每次灌水量为 600m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

1.3 田间取样与测定方法

在小麦播种前、冬前期、拔节期(施肥前)、开花期、成熟期,分别在各小区按 20cm 为一层分 10 层取 0~200cm 土样,每小区随机取两点,相同层次的土壤混合为 1 个样,置于 -20℃冰柜冷冻保存。样品处理和测定步骤为,解冻后,将样品充分混匀过 2mm 筛,称取 5g 鲜土样 3 份,0.01mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提(水土比 10:1),振荡 30min 过滤,用德国产 AA3 型流动分析仪同时测定土壤硝态氮和铵态氮含量<sup>[7,8]</sup>。土壤处理的同时,测定土壤含水量。

在小麦拔节期(施肥前)、成熟期调查群体,取样,样品 70℃烘至恒重后称重计算地上部干物重。收获时取 6m<sup>2</sup> 脱粒晒干计产。样品粉碎过筛后,用国标 GB2905-82(半微量凯氏定氮法)方法测定植株全氮含量和籽

粒蛋白质含量。

#### 1.4 计算方法

土壤硝态氮累积量 = 土层厚度 (cm) × 土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>) × 土壤硝态氮含量 (mg/kg) / 10

氮素矿化是根据无氮区作物吸氮量与试验前后土壤无机氮的净矿化来加以计算<sup>[9]</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

根据氮平衡模型计算氮的表观损失<sup>[8]</sup>, 即根据氮素输入输出平衡的原理:

氮表观损失 = 氮输入量 - 作物吸收量 - 土壤残留无机氮量

而氮输入包括施入氮肥、起始无机氮和氮矿化 3 项, 氮输出包括作物吸收、残留无机氮和表观损失 3 项。因此运用氮平衡模型计算<sup>[8]</sup>氮表观损失率为:

氮肥表观损失率 (%) = 氮表观损失量 / 施氮量 × 100 %

氮收获指数 = 籽粒氮积累量 / 植株总氮积累量<sup>[10]</sup>

氮肥农学利用率 (kg grain · kg<sup>-1</sup>) = (施氮肥区产量 - 不施氮肥区产量) / 施氮量<sup>[10]</sup>

地上部植株氮肥吸收利用率 (%) = (施氮肥区地上部分氮积累量 - 不施氮肥区地上部分氮积累量) / 施氮量 × 100 %<sup>[10]</sup>

籽粒氮肥吸收利用率 (%) = (施氮肥区籽粒氮积累量 - 不施氮肥区籽粒氮积累量) / 施氮量 × 100 %

数据统计分析采用 DPS 软件, 作图采用 Originpro. V7.0 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量及底追比例对土壤硝态氮含量和累积量的影响

从图 1 可以看出, 冬前期, 施氮处理 0~40cm 土层土壤硝态氮含量显著大于不施氮的处理, 60~80cm 土层处理间无显著差异, 而 80~120cm 土层, 处理 B1 土壤硝态氮含量显著高于其它处理, 120~200cm 土层各处理无显著变化, 说明由于前期小麦植株营养体小, 需氮量少, 底施氮肥过多导致土壤硝态氮下移, 但未影响到 120cm 以下土层硝态氮含量变化。

拔节期, 与冬前相比, 0~60cm 土层各处理土壤硝态氮含量降低, 处理间差异变小; 80~100cm 土层处理 B1 和 A1 土壤硝态氮含量显著高于其他处理; 在 100~160cm 土层, 处理 B1 土壤硝态氮含量显著高于其他处理, 说明从冬前到拔节期, 处理 A1 已淋洗到 80~100cm 土层, 底施氮量为 120kg · hm<sup>-2</sup> 的处理 B1 硝态氮已下移到 160cm 深处, 形成氮素淋溶损失的隐患。

开花期, 由于拔节期追施氮肥, 施氮处理与对照相比 0~80cm 土层的土壤硝态氮含量显著增加, 处理间也随追肥氮的增加而增加。与拔节期追肥前相比, 施肥处理硝态氮已下移到 80cm 处, 一方面有利于下层根系的吸收, 另一方面也增加了淋溶损失的可能性。

成熟期, 与开花期相比, 0~60cm 土层各处理土壤硝态氮含量降低, 处理间差异变小, 但追肥处理明显高于未施氮处理 CK, 处理间也随追氮量的增加而显著增加。在 120~180cm 土层, 处理 B1、B2、B3 和 A3 土壤硝态氮含量出现累积高峰, 说明这 4 个处理硝态氮已下移到该层, 易于淋溶出小麦根系吸收范围以外, 造成淋溶损失。

表 2 示出了拔节期和成熟期不同处理的土壤硝态氮累积量。从表中可知, 拔节期, 在 0~100cm 和 0~200cm 土层中, 处理 B1、A1、B2 的土壤硝态氮累积量显著高于对照; 在 100~200cm 土层, B1 处理显著高于其它处理。表明, 当底肥氮大于 80kg · hm<sup>-2</sup> 时, 会显著增加土壤中硝态氮累积量, 增加淋溶的可能性。成熟期, 在 0~100cm 土层, 施氮处理土壤硝态氮累积量显著高于不施氮处理, 其中处理 B3 最高; 在 100~200cm 土层, 处理 A3、B1、B2、B3 的土壤硝态氮累积量显著高于处理 CK、A1、A2; 在 0~200cm 土层中, 处理 B3 最高, 其次为

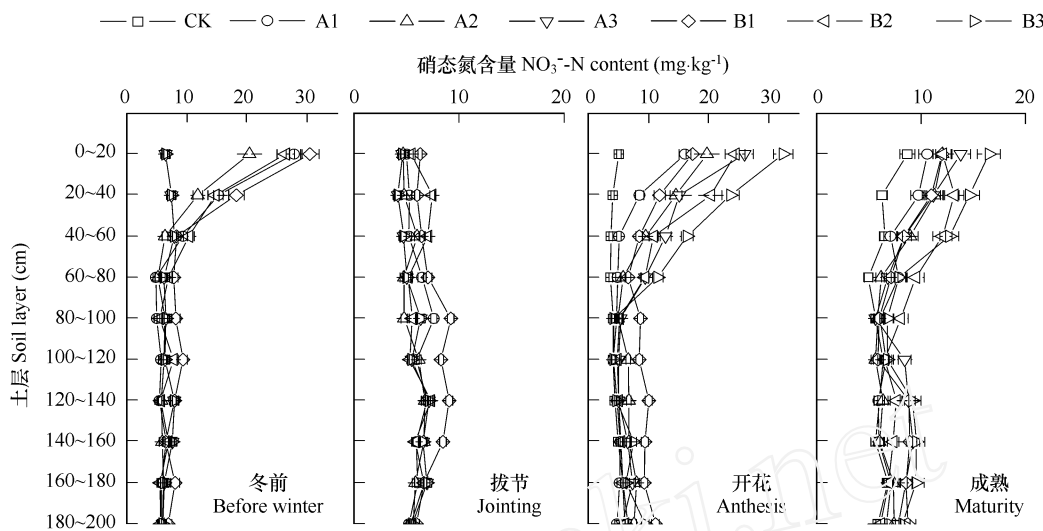


图 1 小麦不同生育期 0~200cm 土层硝态氮含量

Fig. 1 The content of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in 0~200cm soil layers at different growth stage of wheat

B2、A3、B1。表明追肥氮大于  $120\text{kg hm}^{-2}$  时,可显著增加 0~200cm 土层中土壤硝态氮累积量,尤其增加 100~200cm 土层中的累积量,易于造成淋溶损失。

表 2 施氮量及底追比例对拔节期和成熟期土壤硝态氮累积量的影响( $\text{N kg hm}^{-2}$ )

| 处理<br>Treatment | 土层 Soil layer      |           |         |                    |           |         |
|-----------------|--------------------|-----------|---------|--------------------|-----------|---------|
|                 | 拔节期 Jointing stage |           |         | 成熟期 Maturity stage |           |         |
|                 | 0~100cm            | 100~200cm | 0~200cm | 0~100cm            | 100~200cm | 0~200cm |
| CK              | 63.68c             | 83.30b    | 146.99c | 81.00c             | 80.92b    | 161.92d |
| A1              | 81.74a             | 79.17b    | 160.91b | 104.21b            | 85.13b    | 189.34c |
| A2              | 63.93c             | 81.53b    | 145.46c | 111.28b            | 86.24b    | 197.53c |
| A3              | 63.68c             | 80.32b    | 144.00c | 114.49b            | 112.30a   | 226.79b |
| B1              | 89.17a             | 100.67a   | 189.84a | 111.68b            | 107.32a   | 219.00b |
| B2              | 78.31ab            | 80.22b    | 158.53b | 128.48ab           | 100.71a   | 229.20b |
| B3              | 63.68c             | 81.73b    | 145.41c | 146.18a            | 113.43a   | 259.62a |

同一列数字无相同字母间差异达 5 % 的显著水平 Values without the same letters in the same column are significant at 5 % level

以上结果说明,在拔节期,底施氮量为  $84\text{kg hm}^{-2}$  和  $120\text{kg hm}^{-2}$  的处理 A1、B1,在 80~100cm 土层和 100~160cm 土层分别出现硝态氮的累积;而底施氮量为  $56\text{kg hm}^{-2}$  的处理 A2,在小麦拔节期各土层土壤硝态氮含量和累积量与对照相比均无显著差异,发生淋洗损失的可能性较小。在成熟期,追施氮量大于  $160\text{kg hm}^{-2}$  的处理 B3、A3、B2 土壤硝态氮含量在 120~180cm 土层出现高峰,容易淋洗到 200cm 以外的土层中;而追施氮量为  $112\text{kg hm}^{-2}$  的处理在 100~200cm 土层土壤硝态氮累积量与对照无显著差异。表明在本试验条件下,底施氮量控制在  $56\text{kg hm}^{-2}$  以内,追施氮量控制在  $120\text{kg hm}^{-2}$  以内,土壤硝态氮不会在 100~200cm 土层出现明显累积,发生淋洗损失的可能性较小。

2.2 施氮量及底追比例对土壤-小麦体系中氮素平衡的影响

根据土壤无机氮和小麦吸氮动态,运用氮平衡原理分别计算了小麦播种至拔节期和拔节至成熟期两个生育阶段的氮素平衡(表 3)。氮输入包括氮肥、起始无机氮和氮矿化 3 部分;氮输出包括作物吸收、残留无机氮和表观损失 3 部分,其中表观损失是氮输入总量与作物吸收和残留无机氮两项输出之差,指各处理肥料氮相对于对照处理(CK)的损失数量。在氮平衡计算中,将土壤无机氮所在层次定义为 0~100cm 深度,即小麦根系吸收养分的主要层次。

由表 3 可知,从播种到拔节,随底施氮量的增加,表观损失量增加,而施氮处理间植株的氮素积累量无显著差异。因此,氮肥的吸收利用效率从 A2 的 34 % 降至 B1 的 24 %。表明在本试验条件下,减少底施氮量可有效地提高小麦在此生育阶段的氮肥表观利用率,减少氮素损失。从拔节至成熟,底追比例相同,随施氮量的增加,氮素表观损失率增加,土壤氮素残留量显著增加。施氮量相同,随追施氮量的增加,氮肥表观利用率增加,氮肥损失率呈先降低后升高的趋势。可见适当减少底施氮量增加追施氮量,有利于氮肥的吸收利用。在本试验中,处理 A2 氮肥表观利用率最高,表观损失量最小。

表 3 小麦不同生育阶段的氮素平衡 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )Table 3 Nitrogen balance during different wheat growth period ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 项目 Item                          | 处理 Treatment |       |      |      |      |       |      |
|----------------------------------|--------------|-------|------|------|------|-------|------|
|                                  | CK           | A1    | A2   | A3   | B1   | B2    | B3   |
| 播种~拔节 From sowing to jointing    |              |       |      |      |      |       |      |
| (A) 氮输入 Nitrogen input           |              |       |      |      |      |       |      |
| (1) 施氮量 Nitrogen fertilizer rate | 0            | 84    | 56   | 0    | 120  | 80    | 0    |
| (2) 起始无机氮 Initial Nmin           | 237          | 237   | 237  | 237  | 237  | 237   | 237  |
| (3) 净矿化 Net mineralization       | 25           | 25    | 25   | 25   | 25   | 25    | 25   |
| (B) 氮输出 Nitrogen output          |              |       |      |      |      |       |      |
| (4) 作物携出 Crop uptake             | 129b         | 152a  | 148a | 128b | 158a | 153a  | 127b |
| (5) 残留无机氮 Residual Nmin          | 133a         | 139b  | 135b | 133b | 156a | 144ab | 135b |
| (6) 表观损失 Apparent losses         | 0d           | 55b   | 35c  | 1d   | 68a  | 45b   | 0d   |
| 拔节~成熟 From jointing to maturity  |              |       |      |      |      |       |      |
| (A) 氮输入 Nitrogen input           |              |       |      |      |      |       |      |
| (1) 施氮量 Nitrogen fertilizer rate | 0            | 84    | 112  | 168  | 120  | 160   | 240  |
| (2) 起始无机氮 Initial Nmin           | 133a         | 139a  | 135a | 133a | 156a | 144a  | 135a |
| (3) 净矿化 Net mineralization       | 85           | 85    | 85   | 85   | 85   | 85    | 85   |
| (B) 氮输出 Nitrogen output          |              |       |      |      |      |       |      |
| (4) 作物携出 Crop uptake             | 97c          | 117b  | 125b | 142a | 112b | 125b  | 148a |
| (5) 残留无机氮 Residual Nmin          | 121e         | 167cd | 178c | 175c | 189b | 209a  | 211a |
| (6) 表观损失 Apparent losses         | 0d           | 24c   | 29c  | 69b  | 60b  | 55b   | 101a |

\* 同一行数字无相同字母间差异达 5 % 的显著水平 Values without the same letters in the same row are significant at 5 % level

表 4 列出了小麦全生育期土壤-小麦体系中的氮素平衡。从表中可知,小麦全生育期土壤氮素的矿化量加上播前无机氮的数量,土壤自身供氮量可达  $347 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,已高于小麦全生育期的总需氮量,这表明在本试验条件下减少施氮量是可行的。从成熟期土壤表观损失来看,随施氮量的增加,损失量和损失率均增加;随追肥量的增加,损失量和损失率呈先降低后增加的趋势。在成熟期,施氮各处理土壤残留量仍达  $167 \sim 211 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,尤其施氮量为  $240 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的处理显著高于施氮量为  $168 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的处理,较高的残留无机氮尤其是硝态氮容易淋洗出土壤-小麦体系,造成对环境的污染。

表 4 小麦全生育期的氮素平衡 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )Table 4 Nitrogen balance during the whole wheat growth stage ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 项目 Item                          | 处理 Treatment |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|
|                                  | CK           | A1   | A2   | A3   | B1   | B2   | B3   |
| (A) 氮输入 Nitrogen input           |              |      |      |      |      |      |      |
| (1) 施氮量 Nitrogen fertilizer rate | 0            | 168  | 168  | 168  | 240  | 240  | 240  |
| (2) 起始无机氮 Initial Nmin           | 237          | 237  | 237  | 237  | 237  | 237  | 237  |
| (3) 矿化 Net mineralization        | 110          | 110  | 110  | 110  | 110  | 110  | 110  |
| (B) 氮输出 Nitrogen output          |              |      |      |      |      |      |      |
| (4) 作物携出 Crop uptake             | 226b         | 269a | 273a | 270a | 270a | 278a | 275a |
| (5) 残留无机氮 Residual Nmin          | 121d         | 167c | 178c | 175c | 189b | 209a | 211a |
| (6) 表观损失 Apparent losses         | 0e           | 79c  | 64d  | 70cd | 128a | 100b | 101b |

同一行数字无相同字母间差异达 5 % 的显著水平 Values without the same letters in the same row are significant at 5 % level

## 2.3 施氮量及底追比例对小麦氮素吸收利用的影响

底追比例相同,随施氮量的增加,小麦植株总吸氮量和氮收获指数均无显著差异,表明在本试验条件下,施氮量 A 已满足作物生长需求。在相同施氮量条件下,随追肥量的增加氮收获指数显著提高,说明植株吸收的氮素更多的转移到籽粒中去。相反,底施氮肥量增加,提高了氮素在小麦秸秆中的比例,导致了小麦植株无

效耗氮现象的发生(表 5)。

表 5 施氮量及底追比例对小麦氮素利用率的影响

| Table 5 Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing nitrogen on nitrogen using efficiency |                                                   |                              |                                                                                   |                             |                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                                                                     | 总吸氮量 Total N<br>absorption (kg hm <sup>-2</sup> ) | 氮收获指数<br>N harvest index (%) | 氮肥农学利用率 Agronomic<br>efficiency of N fertilizer<br>(kg grain · kg <sup>-1</sup> ) | 地上部植株氮肥<br>吸收利用率<br>PRE (%) | 籽粒氮肥吸<br>收利用率<br>GRE (%) |
| CK                                                                                                                  | 226.17b                                           | 76.43c                       | —                                                                                 | —                           | —                        |
| A1                                                                                                                  | 268.67a                                           | 75.60c                       | 4.36b                                                                             | 25.30ab                     | 18.02b                   |
| A2                                                                                                                  | 272.72a                                           | 80.97ab                      | 4.92a                                                                             | 27.71a                      | 28.54a                   |
| A3                                                                                                                  | 270.38a                                           | 81.20a                       | 4.27b                                                                             | 26.32a                      | 27.80a                   |
| B1                                                                                                                  | 270.11a                                           | 75.47c                       | 2.43d                                                                             | 18.31d                      | 12.91c                   |
| B2                                                                                                                  | 278.15a                                           | 79.22b                       | 3.55c                                                                             | 21.66c                      | 19.79b                   |
| B3                                                                                                                  | 274.82a                                           | 82.02a                       | 3.49c                                                                             | 20.27c                      | 21.12b                   |

同一列数字无相同字母间差异达 5 % 的显著水平,下同;地上部植株氮肥吸收利用率(%)=(施氮肥区地上部分氮积累量-不施氮肥区地上部分氮积累量)/施氮量×100%;籽粒氮肥吸收利用率(%)=(施氮肥区籽粒氮积累量-不施氮肥区籽粒氮积累量)/施氮量×100%; Values without the same letters in the same column are significant at 5 % level , the same as below; PRE(%)=[total aboveground plant N accumulation in the plot received N fertilizer-total aboveground plant N accumulation in grain in the zero-N control]/nitrogen fertilizer rate×100%; GRE(%)=[total N accumulation in grain in the plot received N fertilizer-total N accumulation in grain in the zero-N control]/nitrogen fertilizer rate×100 %

由表 5 还可以看出,氮肥农学利用率、地上部植株氮肥吸收利用率、籽粒氮肥吸收利用率均随施氮量的增加而显著降低。在相同施氮量条件下,适当增加追肥氮的比例可提高上述氮肥利用率的指标值,其中氮肥农学利用率和籽粒吸收利用率分别反映了氮肥对籽粒产量和籽粒氮积累量的贡献。在本试验中,施氮量为 168kg hm<sup>-2</sup>,底追比为 1/3 :2/3 的处理 A2 各项指标均较高。

2.4 施氮量及底追比例对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响

由表 6 可以看出,与对照相比,施氮均显著增加小麦的籽粒产量、蛋白质含量和蛋白质产量,但处理 A2 与处理 B2、B3 差异不显著,说明在本试验条件下,处理 A2 即可满足冬小麦生长发育和高产优质的需要。在相同施氮量条件下,适当增加追肥氮的比例,产量增加,即 A2 > A1 > A3 ,B2 > B3 > B1 ,蛋白质含量、蛋白质产量和收获指数均显著增加。表明,增加拔节期追肥量,可促进更多的氮素转运到籽粒中去,从而提高籽粒蛋白质含量和蛋白质产量。在本试验中,施氮量为 168kg ·hm<sup>-2</sup>,底追比为 1/3 2/3 的处理 A2 可获得较高的籽粒产量、蛋白质含量和蛋白质产量,同时提高了氮素利用率,减少了氮素损失量,为最佳氮肥运筹方式。

3 讨论

3.1 施氮量及底追比例对土壤硝态氮含量变化的影响

土壤剖面硝态氮含量的变化因施氮量和施氮时期的不同而异。许多研究指出,农田土壤长期大量施用氮肥会造成硝态氮在土壤中的累积,土体硝态氮含量随施氮量的增加显著增加<sup>[11~15]</sup>;也有研究报道,不同施氮量对粘壤土及沙壤土硝态氮移动没有影响<sup>[16]</sup>,施氮量高于最佳施氮量的用量时,收获后土壤无机氮含量没有变化<sup>[17]</sup>。在追施氮肥方面,Jaime Lloveras 等研究认为追施氮量为 200kg ·hm<sup>-2</sup>时,收获期未发现硝态氮的大量累积<sup>[18]</sup>。可见前人所得结论不尽相同,而且在底肥和追肥对土壤硝态氮影响方面报道较少。在本试验中,当底施氮量大于 84kg hm<sup>-2</sup>或追施氮量大于 160kg ·hm<sup>-2</sup>时,小麦生育期内发现有明显的硝态氮累积高峰,尤其是处理 B1、B2、B3 和 A3,成熟期在 120~180cm 土层出现明显硝态氮累积。施氮量为 168 kg ·hm<sup>-2</sup>底追比例为 1/3 2/3 的处理 A2,在小麦全生育期内在 0~100cm 土层硝态氮累积量较少,在 100~200cm 土层与对照无显著差异。以上结果表明,随氮肥施入量的增加,土壤中硝态氮含量和累积量增加,硝态氮在土体中移动加深,显

表 6 施氮量及底追比例对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响

| Table 6 Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing nitrogen on grain yield and protein content |                                                |                                 |                                                  |                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                                                                           | 籽粒产量<br>Kernel yield<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 蛋白质含量<br>Protein content<br>(%) | 蛋白质产量<br>Protein yield<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 收获指数<br>Harvest index<br>(%) |
| CK                                                                                                                        | 7325.57e                                       | 13.45d                          | 985.29d                                          | 46.38ab                      |
| A1                                                                                                                        | 8057.21c                                       | 14.37c                          | 1157.82c                                         | 45.78bc                      |
| A2                                                                                                                        | 8151.71ab                                      | 15.44ab                         | 1258.62ab                                        | 46.55a                       |
| A3                                                                                                                        | 8042.85c                                       | 15.56a                          | 1251.47ab                                        | 46.13b                       |
| B1                                                                                                                        | 7909.80d                                       | 14.69c                          | 1161.95c                                         | 44.27d                       |
| B2                                                                                                                        | 8177.21a                                       | 15.36b                          | 1259.09ab                                        | 45.50c                       |
| B3                                                                                                                        | 8162.54ab                                      | 15.61a                          | 1274.17a                                         | 46.72a                       |

著增加了 100~200cm 土层硝态氮累积量。可见,生产中应避免一次大量施用氮肥,分期施肥有利于小麦吸收利用,减少损失;选择合理施氮量,还应严格控制底肥量和追肥量,在保证小麦高产优质的同时,减少深层土壤硝态氮的累积,避免发生淋洗损失。

### 3.2 施氮量及底追比例对氮肥利用率及氮平衡的影响

许多研究报道随施氮量增加冬小麦氮肥利用率递减,损失量显著增加<sup>[8,19,20]</sup>。另有人指出,施氮量在 75~150kg  $\text{hm}^{-2}$  范围内,土壤中氮素残留量随施氮量增加而增加,损失率变化不大,当施氮量为 300kg  $\text{hm}^{-2}$  时,损失率显著增加<sup>[21]</sup>。在不同底追比对氮肥利用率的影响方面,有研究认为基追比为 5:5、追肥分药隔期和开花期两次施用可以增加氮的积累量并提高氮肥利用率<sup>[22]</sup>。本试验结果表明,施氮处理之间植株氮积累量无显著差异;拔节期,随底肥氮的增加,氮肥表观损失量显著增加;在成熟期,底追比例相同,减少施氮量可显著提高氮肥利用率,降低氮肥表观损失量和土壤残留量;在相同施氮量条件下,适当增加追施氮量可提高氮肥利用率,降低土壤残留率和损失率。处理 A2 获得了最高的氮肥利用率,表观损失量和土壤残留量均较少,有利于维持土壤-小麦体系中的氮素平衡。可见,在本试验土壤起始无机氮含量较高的条件下,少施底肥可显著减少播种至拔节期氮肥的表观损失量,提高氮肥利用率;适当加大追施氮量,有利于氮素的吸收运转,提高氮肥农学利用率、籽粒吸收利用率和氮收获指数,获得较高的籽粒产量和蛋白质产量。

### 3.3 施氮量及底追比例对小麦产量和蛋白质含量的影响

研究表明施氮量对小麦籽粒产量的影响表现为在一定范围内随施氮量的增加籽粒产量提高,超过一定范围籽粒产量增加不显著甚至降低<sup>[23~25]</sup>;有报道指出,超高产小麦施氮量以 240kg  $\text{hm}^{-2}$ ,底追比例 5:5 为宜<sup>[5]</sup>,另有报道指出在施纯氮总量 160kg  $\text{hm}^{-2}$  条件下,以拔节期追氮基追比 5:5 处理产量最高,并提高了籽粒蛋白质含量<sup>[6]</sup>。本研究结果表明,与不施氮处理相比,施氮可显著增加籽粒产量、蛋白质含量和蛋白质产量,但处理 A2 与处理 B2、B3 差异不显著;施氮量相同,随追施氮量的增加蛋白质含量显著增加。在本试验中,施氮量为 168kg  $\text{hm}^{-2}$ ,底追比为 1/3 2/3 的处理 A2 产量构成 3 因素较协调,籽粒产量和蛋白质含量均较高。可见,在龙口市当地生产常规施氮量为 240kg  $\text{hm}^{-2}$  的条件下可通过减少施氮量且适当减少底肥氮增加追肥氮达到高产优质高效的目标。综合考虑小麦的产量、蛋白质含量、氮肥利用率以及土壤氮素平衡和 0~200cm 土层硝态氮累积状况,在本试验条件下,施氮量为 168kg  $\text{hm}^{-2}$ ,底追比例为 1/3 2/3 的处理 A2 是兼顾小麦产量、品质、效益、生态的合理氮肥运筹方式。

本试验是在 0~20cm 土层土壤碱解氮为 87.5mg  $\text{kg}^{-1}$  地力条件下进行的,我国黄淮冬麦区和北部冬麦区 0~20cm 土层土壤碱解氮含量在 80mg  $\text{kg}^{-1}$  以下的麦田仍有很大面积,不同土壤肥力条件下,施氮量及底追比例对小麦产量品质、土壤硝态氮变化及氮平衡的影响,有待于进一步研究。

### References:

- [1] Yang X Q, Feng F, Song C Q, *et al.* Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (3): 373~376.
- [2] 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.
- [3] Dana L D, Douglas L K, Dan B J, *et al.* Nitrogen management strategies to nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agronomy Journal*, 2002, 94: 153~171.
- [4] Kong L C, Wang Z S, Cao C F. Effects of nitrogen fertilizer applying on yield and quality in high quality wheat. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 1996, 24 (3): 214~216.
- [5] Han Y L, Jie X L, Tan J F, *et al.* Studies on absorption distribution and translocation of N, P and K of super-high-yielding winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24 (6): 908~915.
- [6] Yue S C, Yu Z W, Yu S L. Effect of nitrogen application at different growth stages on nitrogen distribution and leaves metabolism in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24 (5): 1~4.
- [7] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil  $\text{NO}_3^-$ -N and apparent budget of soil nitrogen in winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (11): 1782~1789.
- [8] Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance. *Acta*



- Ecologica Sinica, 2002, 33(7): 1122~1128.
- [9] 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, Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361~1368.
- [10] Liu L J, Sang D Z, Yang J C, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1456~1461.
- [11] Li X X, Hu Y S, Cheng Y S. Effects of different fertilizers on crop yields and nitrate accumulation. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 38~42.
- [12] Guillard K, Griffin G F, Allinson D W, et al. Nitrogen utilization of selected cropping system in the U. S. northeast: Soil profile nitrate distribution and accumulation. Agronomy Journal, 1995, 87: 199~207.
- [13] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China plain. Field Crops Research, 2003, 83: 111~124.
- [14] Malhi S S, Brandt S A, Ulrich D, et al. Accumulation in the soil profile under various alternative cropping system. J. Plant Nutr., 2002, 25: 2499~2520.
- [15] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, et al. Light fraction organic N, ammonium, nitrate and total N in a thin black chernozemic soil under brome grass after 27 annual applications of different N rates. Nutr. Cycling Agroecosyst., 2003, 65: 201~210.
- [16] Ottman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soils influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 1883~1892.
- [17] Raun W R, Johnson G V. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat. Agronomy Journal, 1995, 87: 827~834.
- [18] Jaime L, Antonio L, Javier F, et al. Bread-making wheat and soil nitrate as effected by nitrogen fertilization in irrigated Mediterranean condition. Agronomy Journal, 2001, 93: 1183~1190.
- [19] Huo Z Y, Ge X, Zhang H C, et al. Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(5): 449~454.
- [20] 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 suburban. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 264~270.
- [21] Zhang X, Zhu H X, Sun C H. Study on nitrogen recommendation system on middle and low yield wheat fields by  $^{15}\text{N}$ . Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30(5): 224~226.
- [22] Zhao G C, Li C X, Zhang B M, et al. Effects of different proportion and stage of nitrogen application on nitrogen utilization in winter wheat. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2000, 15(3): 99~102.
- [23] Xu Y C, Jiang T H, Zhang C L, et al. Responses of grain yield and protein content of bread-making wheat cultivars to nitrogen application rate. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(6): 731~737.
- [24] Pan Q M, Yu Z W, Wang Y F, et al. Studies on uptake and distribution of nitrogen in wheat at the level of 9000kg per hectare. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(5): 541~547.
- [25] Lin Q, Hou L B, Han W. Effects of nitrogen rates on grain yield and quality of wheat in different soil fertility. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 561~567.

## 参考文献:

- [1] 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. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 373~376.
- [2] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理. 生态学报, 2003, 23(10): 2041~2049.
- [4] 孔令聪, 汪芝寿, 曹承富. 氮肥运筹方式对优质小麦产量和品质的影响. 安徽农业科学, 1996, 24(3): 214~216.
- [5] 韩燕来, 介晓磊, 谭金芳, 等. 超高产冬小麦氮磷钾吸收、分配与运转规律的研究. 作物学报, 1998, 24(6): 908~915.
- [6] 岳寿松, 于振文, 余松烈. 不同生育时期施肥对冬小麦氮素分配及叶片代谢的影响. 作物学报, 1998, 24(5): 1~4.
- [7] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏研究 I 冬小麦. 生态学报, 2001, 21(11): 1782~1789.
- [8] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 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, 33(7): 1122~1128.
- [9] 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. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361~1368.
- [10] 刘立军, 桑大志, 杨建昌, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456~1461.
- [11] 李晓欣, 胡春胜, 程一松. 不同施肥处理对作物产量及土壤中硝态氮积累的影响. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 38~42.
- [19] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响. 作物学报, 2004, 30(5): 449~454.
- [20] 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. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 264~270.
- [21] 张翔, 朱洪勋, 孙春河. 应用  $^{15}\text{N}$  对中低产区冬小麦施氮推荐体系的研究. 土壤通报, 1999, 30(5): 224~226.
- [22] 赵广才, 李春喜, 张保明, 等. 不同施氮比例和时期对冬小麦氮素利用的影响. 华北农学报, 2000, 15(3): 99~102.
- [23] 徐阳春, 蒋廷惠, 张春兰, 等. 不同面包小麦品种的产量及蛋白质含量对氮肥用量的反应. 作物学报, 1998, 24(6): 731~737.
- [24] 潘庆民, 于振文, 王月福, 等. 公顷产 9000kg 小麦氮素吸收分配的研究. 作物学报, 1999, 25(5): 541~547.
- [25] 林琪, 侯立白, 韩伟. 不同肥力土壤下施氮量对小麦子粒产量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 561~567.