

# 施氮对小麦产量和氮素径流损失及氮肥投入阈值的研究

徐云连<sup>1</sup>, 吴靓<sup>1</sup>, 吴蔚君<sup>1</sup>, 马友华<sup>1</sup>, 徐宏军<sup>2</sup>, 范松<sup>2</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 巢湖市农业环保工作站, 安徽 巢湖 238000)

**摘要:** 为明确巢湖流域小麦季氮肥投入阈值, 在连续3年田间试验条件下, 研究了(2012—2014年)不同氮肥水平下( $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ 、 $N_5$  分别为 0, 157.5, 210.0, 262.5, 310.0, 420.0 kg/hm<sup>2</sup>) 小麦产量、植株氮素积累量、氮肥利用率、土壤无机氮残留量(0—20 cm)及氮素径流损失; 同时, 利用回归方程模型对其间的相关关系进行拟合。结果表明: (1) 与不施氮肥相比, 施用氮肥可不同程度提高小麦产量, 其中以  $N_3$  处理增加的比例最大, 为 64.8%。利用二次函数分析, 当施用氮肥超过 290.9 kg/hm<sup>2</sup> 时, 小麦产量下降。(2) 植株氮素积累量和氮肥利用率随施氮量的增加均呈先上升后下降的趋势, 当实际施氮量为 296.6 kg/hm<sup>2</sup> 时, 小麦地上部植株氮素积累量最高; 当施氮量为 158.5 kg/hm<sup>2</sup> 时, 氮肥利用率最高。(3) 随着施氮量的增加, 土壤中无机氮的残留量(0—20 cm)和氮素的径流损失逐渐升高, 但是在 310.0 kg/hm<sup>2</sup> 之前积累量无显著变化, 当施氮量达到 420.0 kg/hm<sup>2</sup> 时, 土壤中无机氮的残留量及氮素的径流损失变化明显, 积累量平均达 67.0 kg/hm<sup>2</sup>, 流失量平均达 8.3 kg/hm<sup>2</sup>。因此, 施氮量过高时, 会增加土壤无机氮残留及氮素径流损失的风险, 对环境造成污染。结合巢湖地区土壤肥力条件, 综合考虑试验施肥处理、施氮量对小麦产量、植株氮素积累量、氮肥利用率、土壤无机氮残留量(0—20 cm)及氮素径流损失因素, 提出适宜巢湖地区的氮肥投入阈值为 157.5~262.5 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 小麦; 氮肥; 农田; 径流; 氮损失; 氮阈值

**中图分类号:** S143.1; S512.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)02-0246-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.036

## Effects of Nitrogen Application on Wheat Yield and Runoff Loss of Nitrogen and Application Threshold of Nitrogen Fertilizer

XU Yunlian<sup>1</sup>, WU Liang<sup>1</sup>, WU Weijun<sup>1</sup>, MA Youhua<sup>1</sup>, XU Hongjun<sup>2</sup>, FAN Song<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Chaohu Agricultural Environmental Protection Station, Chaohu, Anhui 238000)

**Abstract:** In order to clarify the input threshold of nitrogen fertilizer in the wheat season in Chaohu Lake Basin, the effects of different nitrogenous fertilizer levels (treatments of  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$  and  $N_5$ , applied 0, 157.5, 210.0, 262.5, 310.0, 420.0 kg/hm<sup>2</sup>) on yield, nitrogen accumulation in plant, nitrogen utilization, residual inorganic nitrogen amount in 0—20 cm soil and nitrogen loss in runoff were studied. At the same time, regression model was used to fit the correlation between them. The results showed that: (1) Compared with no nitrogen fertilizer, nitrogen fertilizer increased wheat yield, and the yield increased by 64.8% in the treatment of  $N_3$ , which was the maximum. While, wheat yield declined when applying nitrogen fertilizer over 290.9 kg/hm<sup>2</sup> through the analysis used quadratic function. (2) Nitrogen accumulation in plant and nitrogen use efficiency both showed a trend of increasing first and then decreasing with the increasing of nitrogen application, and when the actual nitrogen application amount was 296.6 kg/hm<sup>2</sup>, the nitrogen accumulation amount in the aboveground of wheat was the highest, and nitrogen utilization efficiency was the highest when the nitrogen application was 158.5 kg/hm<sup>2</sup>. (3) With the increasing of nitrogen application amount, the residual inorganic nitrogen in 0—20 cm soil and the nitrogen loss in runoff both increased gradually, but there was no significant change before nitrogen application amount was 310.0 kg/hm<sup>2</sup>. However, when the

收稿日期: 2017-10-17

资助项目: 国家重点研发计划项目“水稻主产区氮磷流失综合防控技术与产品研发”(2016YFD0800503)

第一作者: 徐云连(1992—), 女, 山东潍坊人, 在读硕士, 主要从事土壤生态环境与农业源污染控制研究。E-mail: 1175683459@qq.com

通信作者: 马友华(1962—), 男, 安徽霍邱人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: yhma@ahau.edu.cn

application amount reached 420.0 kg/hm<sup>2</sup>, the residual amount of inorganic nitrogen and nitrogen in runoff changed obviously, with an average accumulation amount of 67.0 kg/hm<sup>2</sup> and an average loss rate of 8.3 kg/hm<sup>2</sup>. Therefore, when the nitrogen application amount was too high, it would increase the risks of soil inorganic nitrogen residues and nitrogen loss in runoff, and cause pollution to the environment. Combined with soil fertility conditions in Chaohu Lake, considering the effects of integrated fertility test and application amount on wheat yield, nitrogen accumulation in plant, nitrogen use efficiency, residual inorganic nitrogen in soil and runoff loss in this study, we thought the input threshold of nitrogen fertilizer was 157.5 to 262.5 kg/hm<sup>2</sup> in Chaohu Lake Basin.

**Keywords:** wheat; nitrogen fertilizer; farmland; runoff; nitrogen loss; nitrogen threshold

小麦作为我国的主要粮食作物,其产量高低对我国粮食安全起着重要作用。施用氮肥能够提高小麦的产量<sup>[1-2]</sup>。长期以来,为了提高小麦产量,在实际生产中人们大量投入氮肥<sup>[3]</sup>;然而,随着施氮量的不断增加,小麦的产量并未一直提高,甚至有减产的趋势。同时,过度的施用氮肥导致氮肥利用率低,大量的氮肥在土壤中累积对土壤环境质量造成了严重破坏,并加大了氮肥的流失风险,农业面源污染问题也日益加剧<sup>[4-5]</sup>。有研究报道,目前世界范围的氮肥利用效率平均为33%<sup>[6]</sup>,朱兆良<sup>[7]</sup>研究发现,我国的主要农作物小麦和水稻对氮肥的平均利用率为28%~41%。因此,如何合理施用氮肥一直以来都是学者们研究的重要方向,并取得了一些成果<sup>[8-10]</sup>。英国洛桑试验站的研究表明,小麦季氮素主要通过硝酸盐淋失损失,淋失量随施氮量的增加而增加,当氮肥用量超过最佳经济投入量时淋失更严重<sup>[11]</sup>;Halborson等<sup>[12]</sup>研究表明,当施氮量大于90 kg/hm<sup>2</sup>时,0—180 cm土层中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的累积量随氮肥用量的增加而显著增加;王曙光等<sup>[13]</sup>基于小麦产量得出太湖流域的施氮范围为168.8~225.0 kg/hm<sup>2</sup>;赵靛等<sup>[14]</sup>结合玉米产量和土壤氮素平衡得出新疆石河子地区的氮肥投入阈值为260~340 kg/hm<sup>2</sup>。

目前的研究主要集中在施氮对作物经济产量的影响和对环境风险的分析,兼顾氮肥施用的经济效益和环境效益探究麦区氮肥阈值的研究则鲜有报道。本文选择巢湖流域农田区为研究对象,通过2012—2014年田间肥料定位试验,在巢湖流域当前氮肥用量的基础上,参考试验得到的数据,分析不同施氮量对小麦产量、小麦植株氮素积累量、氮肥利用率、土壤无机氮残留量(0—20 cm)以及氮素径流损失的影响,提出巢湖流域地区小麦生产的合理氮肥阈值,为巢湖流域小麦生产和农业面源污染防治提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验设在巢湖市居巢区烔炀镇唐嘴村西宋圩(117°40′48″E,31°39′57″N)试验田,该地海拔17 m,

距离巢湖仅500 m,属于北亚热带湿润季风气候区,地势平坦,年平均温度16.8℃,年均降水量1360 mm。监测点所属土壤类型为潜育型水稻土,土壤理化特性为:pH 6.2,有机质含量34.4 g/kg,全氮含量1.3 g/kg,有效磷含量5.6 mg/kg,有效钾含量179.8 mg/kg,物理性黏粒490 g/kg。

### 1.2 试验方法与设计

试验于2012年11月至2014年6月小麦季进行,共设置6个处理:(1)N<sub>0</sub>:不施氮肥;(2)N<sub>1</sub>:施氮肥157.5 kg/hm<sup>2</sup>;(3)N<sub>2</sub>:施氮肥210 kg/hm<sup>2</sup>;(4)N<sub>3</sub>:施氮肥262.5 kg/hm<sup>2</sup>;(5)N<sub>4</sub>:施氮肥315 kg/hm<sup>2</sup>;(6)N<sub>5</sub>:施氮肥420 kg/hm<sup>2</sup>。每个处理3次重复,各处理施磷钾肥为90,135 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥的施用比例为基肥:分蘖肥:穗肥为4:4:2,钾肥分基肥和穗肥施入,施入比例为7:3,磷肥作基肥一次性施入。试验用氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),钾肥为氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)。

试验地田埂用水泥堆砌,每个小区30 m<sup>2</sup>,试验所用径流池为水泥浇筑,其中径流池的长、宽、高分别为2,1.03,1.33 m。各小区分布在径流池两侧。2012年小麦品种为宁麦6号;2013年小麦品种为扬麦16;2014年小麦品种为宁麦16。田间管理按优质小麦栽培进行,小麦的播种日期为前一年的11月下旬,收获日期为5月底或6月初。

### 1.3 样品采集与测定

在小麦播种前和成熟后用土钻采集各小区0—20 cm土壤样品,采用“X”形5点采样法采集鲜土样,用封口袋冷冻保存,用于测定硝态氮和铵态氮含量。

小麦收获期用“X”形5点采样方法采集植株混合样品,带回实验室对植株进行分离,分为秸秆和籽粒,分别烘干,称重,制备植物样品,用于测定全氮。同时,按籽粒和秸秆部分实际收获记录产量。

每次降水并产生径流时,记录各径流池水面高度(mm),计算径流量。在记录径流量后采集径流水样。采样前,先用清洁工具(竹竿)充分搅匀径流池中的径流水,然后利用清洁容器在径流池的不同部位、

不同深度多点采集水样,每瓶水样约 500 mL,如果不是当天进行水样分析,将水样进行了冷冻保存。

测定径流水中的总氮、铵态氮和硝态氮含量参照文献[15]。新鲜土样硝态氮、铵态氮含量的测定采用 2 mol/L CaCl<sub>2</sub> 浸提,硝态氮采用紫外分光光度计法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定;植株中全氮含量的测定方法:先用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,然后用蒸馏法测定[16]。

#### 1.4 数据计算与分析

植株地上部氮素吸收量 = 秸秆产量 × 秸秆含氮量 + 籽粒产量 × 籽粒含氮量

氮肥利用率 = (氮肥施用区地上部分植株氮素吸收量 - 不施氮区地上部分吸收量) / 施氮量 × 100%

地表径流氮素流失总量等于每次径流样品中氮的浓度与径流水的体积乘积之和。计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i$$

式中:  $P$  为氮素流失量;  $C_i$  为第  $i$  次径流水中氮的浓度;  $V_i$  为第  $i$  次径流水的体积

利用 Excel 软件处理计算数据并作图,用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析和显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮量对小麦经济产量的影响

2012 年由于径流池的建设,小麦的播种日期推迟,导致其减产。由表 1 可知,2012—2014 年,与 N<sub>0</sub> 空白处理 N<sub>0</sub> 相比,氮肥施用处理 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 均不同程度地提高了小麦产量,增幅为 46.8%~74.7%。其中,2012 年,与 N<sub>0</sub> 处理相比,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 和 N<sub>5</sub> 处理分别增加 74.1%,71.5%,74.6%,74.84%和 73.0%,处理 N<sub>4</sub> 产量最高,且与处理 N<sub>0</sub> 和 N<sub>2</sub> 有显著差异;2013 年,与 N<sub>0</sub> 处理相比,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 和 N<sub>5</sub> 处理分别增加 46.8%,46.8%,58.9%,57.9%和 51.1%,处理 N<sub>3</sub> 产量最高,且与处理 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 和 N<sub>5</sub> 有显著差异;2014 年,与 N<sub>0</sub> 处理相比,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 和 N<sub>5</sub> 处理分别增加 59.2%,52.4%,60.8%,54.5%和 50.0%,处理 N<sub>3</sub> 产量最高,除 N<sub>1</sub> 处理外,与其他处理都有显著差异。3 年的结果表明,随着施氮量的增加,小麦产量呈先增加后降低的趋势,而且氮肥的施入量趋向于 N<sub>3</sub> 处理。

### 2.2 不同施氮处理下小麦氮素的吸收利用

从表 2 可以看出,相对于 N<sub>0</sub> 处理,增施氮肥能显著促进小麦地上部分氮素的吸收量,且呈现出随施氮量增加而增加的趋势。不同施氮水平下,2012 年、2013 年、2014 年小麦地上部吸氮量分别为 20.8~96.1,44.7~121.4,36.0~115.6 kg/hm<sup>2</sup>。处理 N<sub>2</sub> 的植株氮素积累量最高,比 N<sub>0</sub> 处理平均提高了 70.0%。

2012 年、2014 年处理 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 之间的吸氮量达显著水平,2012 年和 2014 年处理 N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 和 N<sub>5</sub> 之间差异不显著;2013 年处理 N<sub>1</sub>、N<sub>4</sub> 和 N<sub>5</sub> 之间差异不显著。氮肥的利用率为 14.0%~37.9%,且 N<sub>2</sub> 处理的氮肥利用率最高。

表 1 2012—2014 年不同施氮处理对小麦产量的影响

| 处理             | 单位:kg/hm <sup>2</sup> |             |             |
|----------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                | 2012 年                | 2013 年      | 2014 年      |
| N <sub>0</sub> | 881±28.9c             | 1757±43.5c  | 1667±0.0d   |
| N <sub>1</sub> | 3404±63.5a            | 3300±100.0b | 4084±83.5a  |
| N <sub>2</sub> | 3089±161.5b           | 3304±103.5b | 3500±96.4bc |
| N <sub>3</sub> | 3467±0.0a             | 4270±163.0a | 4250±83.0a  |
| N <sub>4</sub> | 3502±56.4a            | 4172±33.6a  | 3667±0.0b   |
| N <sub>5</sub> | 3260±125.1ab          | 3592±97.4b  | 3334±83.5c  |

注:各列数据为产量±标准误差,每一列数据后的字母表示各处理差异达 5% 的显著水平。下同。

表 2 2012—2014 年小麦季不同施氮处理对氮素积累量及氮素利用率的影响

| 年份   | 处理             | 植株氮素积累量/               | 氮肥    |
|------|----------------|------------------------|-------|
|      |                | (kg·hm <sup>-2</sup> ) | 利用率/% |
| 2012 | N <sub>0</sub> | 20.8±1.7c              | —     |
|      | N <sub>1</sub> | 66.0±2.4b              | 28.7  |
|      | N <sub>2</sub> | 96.1±3.8a              | 35.9  |
|      | N <sub>3</sub> | 90.7±3.0a              | 26.7  |
|      | N <sub>4</sub> | 88.7±2.1a              | 21.6  |
|      | N <sub>5</sub> | 88.7±1.1a              | 16.2  |
| 2013 | N <sub>0</sub> | 44.7±2.0c              | —     |
|      | N <sub>1</sub> | 89.9±3.4b              | 28.7  |
|      | N <sub>2</sub> | 121.4±2.5a             | 36.5  |
|      | N <sub>3</sub> | 120.8±9.0a             | 29.0  |
|      | N <sub>4</sub> | 103.8±3.4b             | 18.8  |
|      | N <sub>5</sub> | 103.4±3.9b             | 14.0  |
| 2014 | N <sub>0</sub> | 36.0±1.5c              | —     |
|      | N <sub>1</sub> | 78.9±1.4b              | 27.3  |
|      | N <sub>2</sub> | 115.6±5.0a             | 37.9  |
|      | N <sub>3</sub> | 112.8±2.1a             | 29.3  |
|      | N <sub>4</sub> | 105.0±5.3a             | 21.9  |
|      | N <sub>5</sub> | 104.5±5.1a             | 16.3  |

### 2.3 不同施氮处理对小麦季土壤氮素养分残留的影响

0—20 cm 土层不同处理成熟期土壤氮素含量见表 3。小麦收获后,土壤中的无机氮积累以硝态氮为主,占 54.0%~79.0%,且无机氮积累量随施氮量的增加而增加,与 N<sub>0</sub> 处理相比,其他各施肥处理平均提高了 46.9%。土壤中的无机氮积累量基本呈现随年限增加而上升的趋势,2013 年较 2012 年无机氮积累量平均增加 30.0%,2014 年较 2013 年无机氮的累积量平均只增加了 1.0%,与 2013 年相比并无明显增加。不同施氮量处理的结果显示,在 0—20 cm 的表层土壤中,N<sub>0</sub>~N<sub>4</sub> 处理之间无机氮累积量相差不大,N<sub>5</sub> 处理明显增加。说明氮肥施用过多会造成土壤中无机氮的积累,增加氮素的流失风险,对环境造成污染。

表 3 2012—2014 年小麦收获后各施氮处理下土壤中氮素含量

单位: kg/hm<sup>2</sup>

| 处理             | 硝态氮    |        |        | 铵态氮    |        |        | 无机氮积累量 |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 |
| N <sub>0</sub> | 14.6   | 24.8   | 24.1   | 12.7   | 14.9   | 15.6   | 27.4   | 39.7   | 39.7   |
| N <sub>1</sub> | 19.1   | 29.3   | 33.3   | 10.9   | 18.0   | 16.0   | 30.0   | 47.3   | 49.2   |
| N <sub>2</sub> | 17.2   | 30.8   | 35.1   | 14.5   | 17.9   | 18.2   | 31.7   | 48.7   | 53.2   |
| N <sub>3</sub> | 20.2   | 35.4   | 37.9   | 13.2   | 20.7   | 14.0   | 33.4   | 56.1   | 51.9   |
| N <sub>4</sub> | 31.1   | 39.2   | 40.8   | 8.4    | 19.6   | 16.6   | 39.5   | 58.8   | 57.4   |
| N <sub>5</sub> | 35.8   | 42.1   | 48.4   | 18.1   | 29.3   | 27.2   | 53.9   | 71.4   | 75.6   |

2.4 不同施氮处理对小麦氮素径流损失影响

本试验的监测周期内径流监测由于径流池原因,缺乏 2012 年和 2014 年 N<sub>5</sub> 处理的监测数据。由表 4 可见,与不施氮肥相比,施用氮肥明显增加了氮素的径流损失量,2013 年增幅为 43.5%~71.5%,2014 年增幅为 54.5%~77.0%,2 年间总氮的流失差异不大。

表 4 2013—2014 年不同施氮处理下小麦总氮流失量

单位: kg/hm<sup>2</sup>

| 处理             | 2013 年   | 2014 年   |
|----------------|----------|----------|
| N <sub>0</sub> | 2.2±0.1c | 2.0±0.0d |
| N <sub>1</sub> | 4.0±0.5b | 4.4±0.1c |
| N <sub>2</sub> | 6.9±0.1a | 6.8±0.6b |
| N <sub>3</sub> | 7.1±0.3a | 6.9±0.6b |
| N <sub>4</sub> | 7.8±0.0a | 8.7±0.3a |

2.5 小麦投入阈值的确定

以 2012—2014 年每年的施氮量为横坐标,以小麦产量、小麦植株氮素吸收量、氮肥利用率、小麦收获后土壤中无机氮的积累量以及麦田的氮素径流流失量为纵坐标,采用回归方程模型对它们之间的相关关系进行回归拟合(图 1、图 2)。由图 1 可知,小麦产量最高时对应的施氮量为 290.9 kg/hm<sup>2</sup>,与本试验设置的 N<sub>3</sub>(262.5 kg/hm<sup>2</sup>)和 N<sub>4</sub>(315.0 kg/hm<sup>2</sup>)处理施肥量基本一致;当实际施氮量为 296.6 kg/hm<sup>2</sup>时,小麦地上部植株氮素积累量最高,这与本试验设置的 N<sub>3</sub>(262.5 kg/hm<sup>2</sup>)和 N<sub>4</sub>(315 kg/hm<sup>2</sup>)处理施肥量基本一致。此结果说明,适量增施氮肥有利于小麦植株氮素的累积量,得到当施氮量为 158.5 kg/hm<sup>2</sup>时,氮肥的利用率最高,与本试验设置的 N<sub>1</sub>(157.5 kg/hm<sup>2</sup>)处理基本一致。假设氮素径流损失为 0,从施氮量与土壤氮素径流损失的关系出发,得到最佳的施氮量为 104.0 kg/hm<sup>2</sup>;而当施氮量为 104.0 kg/hm<sup>2</sup>时,小麦经济产量为 2 680.0 kg/hm<sup>2</sup>,大大降低了小麦的产量,而且在实际生产中存在其他的损失,平衡值应略大于理想平衡值。因此,从小麦产量、地上部植株氮素积累量、氮肥利用率、小麦收获后 0—20 cm 土壤中无机氮的积累量以及小麦田的氮素径流流失量分析,过量增施氮肥不仅会降低小麦产量,减少小麦地上部植株对氮素的吸收累积量,还导致氮肥的利用率

降低,对环境存在潜在威胁。在当前土壤肥力水平下,根据试验设置处理提出巢湖地区小麦氮肥的投入阈值为 157.5~262.5 kg/hm<sup>2</sup>。在此投入阈值范围内,计算出小麦产量为 3 342.5~3 820.0 kg/hm<sup>2</sup>,地上部植株氮素积累量为 87.7~102.7 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥利用率为 30.0%~31.1%,小麦收获后 0—20 cm 土壤中的无机氮积累量为 41.6~50.8 kg/hm<sup>2</sup>,氮素径流流失量为 11.8~16.6 kg/hm<sup>2</sup>。

在本试验的肥力条件下,综合小麦产量、小麦植株氮素吸收量、氮肥利用率、小麦收获后土壤中无机氮的积累量以及麦田的氮素径流流失量,得到的小麦施氮量阈值为 157.5~262.5 kg/hm<sup>2</sup>。

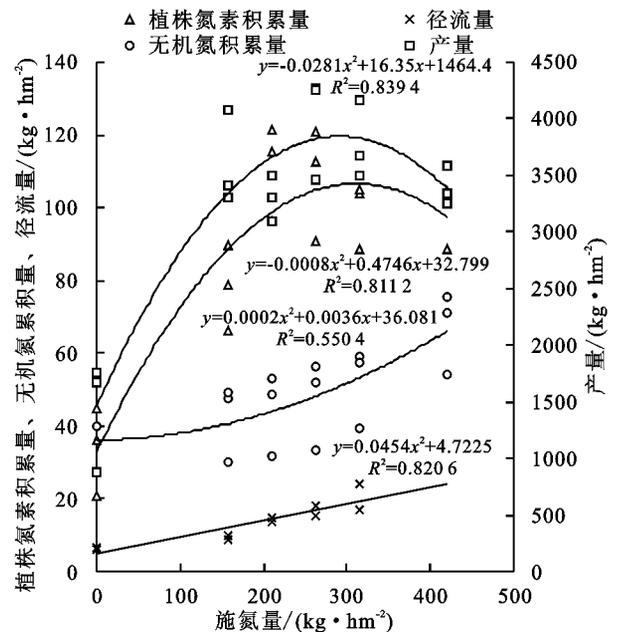


图 1 2012—2014 年小麦产量、植株氮素积累量、无机氮积累量、径流量与施氮量的关系

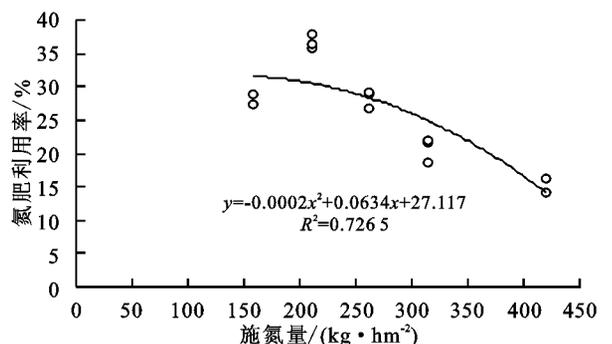


图 2 氮肥利用率与施氮量的关系

### 3 结论与讨论

#### 3.1 施氮量对小麦产量、植株氮素积累量及氮肥利用率的影响

施用氮肥对小麦产量有不同程度的促进作用,但不随施氮量的增加而一直增加。研究表明,在一定范围内,小麦产量随施氮量的增加而增加,但当超过一定范围时,其增产作用会大幅下降,甚至出现减产情况<sup>[17-21]</sup>。本试验研究表明,在施氮量为 290.9 kg/hm<sup>2</sup> 时,小麦产量最高,继续增施氮肥产量有降低趋势。

适当的施氮量,促进了小麦植株的氮素积累量,提高氮肥利用率。我国的小麦田氮肥利用率为 28%,远低于世界平均水平 54%<sup>[22]</sup>,本试验得到的氮肥利用率最高为 37%,高于我国的平均水平,但离世界水平还差较多。研究指出,过量施用氮肥使得植株氮素积累量和氮肥利用率均呈下降趋势<sup>[23-25]</sup>,与本研究的结果一致。张铭等<sup>[26]</sup>发现,当肥力水平较低时,随着施氮量的增加,氮肥利用效率呈先增加后降低的趋势。

在本试验中,植株氮素积累量与施氮量之间存在二次方程关系,小麦植株的吸氮量随着施氮量的增加呈先减后增的趋势。当实际施氮量为 296.6 kg/hm<sup>2</sup> 时,小麦地上部植株氮素积累量最高。在全球农业中,土壤系统氮的利用率很少超过 50%<sup>[27]</sup>,本试验的氮肥利用率为 14%~38%,基本相符。由二次曲线方程得,当施氮量为 158.5 kg/hm<sup>2</sup> 时,氮肥的利用率最高。

#### 3.2 施氮量对土壤无机氮积累量及土壤氮素径流流失的影响

施用氮肥是土壤无机氮积累及氮素径流流失的前提条件,当施氮量低于小麦产量最高时的需氮量时,土壤无机氮不会大量积累,氮素径流流失量也不会太高,而当施氮量大于最佳施氮量时,不仅会使土壤中的无机氮大量积累,还会造成氮素径流损失的显著提高<sup>[28-29,12]</sup>。有研究认为,考虑硝态氮在土壤中的累积情况,当施氮量高于 180 kg/hm<sup>2</sup> 时,土壤中的硝态氮含量会大幅增加,因此其推荐小麦施用氮肥为 157.5~180.0 kg/hm<sup>2</sup><sup>[30]</sup>。本研究结果显示相似规律。随着施氮量的增加,土壤中无机氮的残留量(0—20 cm)和氮素的径流损失逐渐升高,但在 N<sub>4</sub> (315 kg/hm<sup>2</sup>) 处理之前累积量无显著变化,当施氮量达到 420 kg/hm<sup>2</sup> 时,土壤中无机氮的残留量及氮素的径流流失变化明显,累积量平均达 67.0 kg/hm<sup>2</sup>,流失量平均达 8.3 kg/hm<sup>2</sup>。因此,施氮量过高时,会增加土壤无机氮残留及氮素径流损失的风险,对环境造成污染。前人的研究大多集中在不同土层的无机氮累

积量,而本文研究主要是表层土,下一步研究将考虑深层土壤的无机氮累积量。

#### 3.3 麦田氮肥投入阈值研究

麦田氮肥的合理施用量因土壤肥力、气候环境、种植模式等因素的不同而不同。北方小麦建议氮肥施用量通常为 N 180~250 kg/hm<sup>2</sup><sup>[31-33]</sup>,淮北地区小麦推荐用量为 N 195~225 kg/hm<sup>2</sup><sup>[34]</sup>,在晋南地区,冬小麦推荐氮肥施用量为 N 180 kg/hm<sup>2</sup><sup>[35]</sup>。四川丘陵地区在考虑产量和氮肥利用率的前提下,推荐的施氮量为 N 135~180 kg/hm<sup>2</sup>。一些学者对太湖麦区的氮肥投入阈值进行研究,林忠成等<sup>[36]</sup>提出太湖麦区的适宜施氮量为 225 kg/hm<sup>2</sup>;李妍等<sup>[37]</sup>通过对小麦的产量和氮的流失风险进行叠加,得出太湖地区的施氮阈值 190.8 kg/hm<sup>2</sup>。

本试验在巢湖地区土壤肥力条件下,综合考率试验施肥处理、施氮量对小麦产量、植株氮素积累量、氮肥利用率、土壤无机氮残留量及氮素径流流失的因素,并对其与施氮量之间的关系进行回归模型的拟合,提出巢湖地区既能保证小麦稳产,又能减少麦季氮素径流损失的氮肥投入阈值为 157.5~262.5 kg/hm<sup>2</sup>。但是,本研究仅考虑了麦季农田氮素的地表径流流失,尚需对氮素的氨挥发及地下淋溶损失进行监测,得出更明确的结论。

#### 参考文献:

- [1] 张美微,谢旭东,王晨阳,等. 不同生态条件下品种和施氮量对冬小麦产量及氮肥利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(10): 1362-1368.
- [2] 徐凤娇,赵广才,田奇卓,等. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 300-306.
- [3] Yan X, Jin J Y, He P, et al. Recent advances on the technologies to increase fertilizer use efficiency[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(4): 469-479.
- [4] Cui Z, Chen X, Zhang F. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China[J]. Ambio, 2010, 39(5/6): 376.
- [5] Yang S M, Li F M, Sukhdew 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(4): 1039.
- [6] Raun W R, Johnson V G. Improving nitrogen use efficiency for cereal production [J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 357.
- [7] 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.
- [8] 李瑞奇,李雁鸣,何建兴,等. 施氮量对冬小麦氮素利用

- 和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 270-275.
- [9] 张磊, 邵宇航, 谷世禄, 等. 减量施氮下基肥后移对南方冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3953-3960.
- [10] 金忠宇, 翟丙年, 于昕阳, 等. 不同氮肥用量配施有机肥对渭北旱塬冬小麦水分利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 91-98.
- [11] Goulding K W T, Poulton P R, Webster C P, et al. Nitrate leaching from the Broadbalk Wheat Experiment, Rothamsted, UK, as influenced by fertilizer and manure inputs and the weather[J]. Soil Use and Management, 2000, 16(4): 244-250.
- [12] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system [J]. Agronomy Journal, 2001, 93(5): 836-841.
- [13] 王曙光, 许轲, 戴其根, 等. 氮肥运筹对太湖麦区弱筋小麦宁麦 9 号产量与品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 65-68.
- [14] 赵靛, 侯振安, 黄婷, 等. 新疆石河子地区玉米产量及氮素平衡的施氮量阈值研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 860-869.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 小麦-玉米轮作体系下氮肥对长期不同施肥处理土壤氮含量及作物吸收的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 748-757.
- [18] 邢丹. 氮磷水平对小麦玉米轮作体系产量和环境效应的影响研究[D]. 河北保定: 河北业大学, 2014.
- [19] Wang Q, Li F, Zhao L, et al. Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution and fertilizer nitrogen loss, wheat yield and nitrogen uptake on a recently reclaimed sandy farmland[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1/2): 325-339.
- [20] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3040-3048.
- [21] 潘庆民, 于振文, 王月福, 等. 公顷产 9000 kg 小麦氮素吸收分配的研究[J]. 作物学报, 1999, 25(5): 541-547.
- [22] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6664-6676.
- [23] 李朝苏, 汤永禄, 吴春, 等. 施氮量对四川盆地机播稻茬麦生长发育及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 271-279.
- [24] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1889-1898.
- [25] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, et al. Characterizing physiological-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. Field Crops Research, 2004, 88(2/3): 239-250.
- [26] 张铭, 蒋达, 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, 148.
- [27] Brenttrup F, Palliere C. Nitrogen use efficiency as an agro-environmental indicator[J]. OECD Workshop on Agri-Environmental Indicators, 2010, 3: 23-26.
- [28] Andraski T W, Bundy L G, Brye K R. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4): 1095-1103.
- [29] 赵俊晔, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量对土壤无机氮分布和微生物量氮含量及小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 466-472, 494.
- [30] 杨利, 张建峰, 张富林, 等. 长江中下游地区氮肥减施对稻麦轮作体系作物氮吸收、利用与氮素平衡的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(1): 195-202.
- [31] 赵淑章, 季书勤, 王绍中, 等. 不同施氮量和底追比例对强筋小麦产量和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2004(7): 57-59.
- [32] 冯波, 刘延忠, 孔令安, 等. 氮肥运筹对垄作小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 107-112.
- [33] 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.
- [34] 詹其厚, 张效朴, 王泽新, 等. 氮肥对小麦产量和品质的影响及其肥效研究[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(4): 544-545.
- [35] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 704-711.
- [36] 林忠成, 叶世超, 戴其根, 等. 太湖流域施氮量对小麦-土壤系统氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 141-148.
- [37] 李妍, 席运官, 张弛, 等. 太湖地区小麦生产氮和磷投入阈值的研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(9): 74-78.