植物营养与肥料学报 2011,17(4):831 -837
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# $^{15}$N 示踪法研究不同灌水处理对小麦氮素吸收分配及利用效率的影响

孟维伟[1,2], 王 东[1*], 于振文[1], 石 玉[1]
(1 山东农业大学农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室,山东泰安 271018;
2 山东省无棣县农业局, 山东无棣 251900)

**摘要**: 通过田间试验,采用$^{15}$N 示踪法,设置全生育期不灌水(W0)、冬水 + 拔节水(W1)、冬水 + 拔节水 + 开花水(W2) 3 个灌水处理,每次灌水 60 mm,每个灌水处理下,设置$^{15}$N 尿素作底肥 + 普通尿素作追肥、普通尿素作底肥 + $^{15}$N 尿素作追肥 2 个$^{15}$N 示踪处理的微区,研究不同灌水处理对小麦氮素吸收分配及利用效率的影响。结果表明,成熟期地上部植株氮素积累量及来源于土壤的氮素的积累量均为 W2 > W1 > W0; 肥料氮的积累量为 W0、W1 > W2。W1 处理基肥氮积累量及比例均显著低于 W0 处理,追肥氮的积累量及比例均显著高于 W0 处理; W2 处理基肥氮和追肥氮的积累量均显著低于 W0 处理。成熟期肥料氮在植株各器官的分配量为子粒 > 茎秆 + 叶鞘 > 叶 > 穗轴 + 颖壳; 各处理营养器官中基肥氮的比例高于追肥氮,子粒中追肥氮的积累量及比例高于基肥氮。子粒中分配的肥料氮量为 W0、W1 > W2。W1 处理子粒产量最高,植株中肥料氮的积累量及利用率均高于 W2 处理。说明灌溉冬水 + 拔节水促进了小麦对追肥氮和土壤氮素的吸收积累,提高了肥料氮的积累量和利用率; 在此基础上增灌开花水,地上部积累的追肥氮量及其向子粒中的分配比例均显著降低,这是花后供水多导致产量和氮肥利用效率显著降低的生理原因。

**关键词**: 小麦; $^{15}$N 示踪; 灌水量和时期; 氮素吸收分配; 肥料氮利用率
**中图分类号**: S512.1.071; S311　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008 -505X(2011)04 -0831 -07

# Effects of irrigation on nitrogen uptake and distribution of wheat using the $^{15}$N tracer technique

MENG Wei-wei[1,2], WANG Dong[1*], YU Zhen-wen[1], SHI Yu[1]
(*1 Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture/Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2 Agricultural Bureau of Wudi County, Wudi, Shandong 251900, China*)

**Abstract**: Field experiments were conducted to determine the effects of irrigation amounts on nitrogen uptake and distribution in wheat by using $^{15}$N tracer technique in Wanghai village, Yanzhou, Shandong, China. Jimai 20 was selected as the cultivar. Three irrigation regimes were designed with no irrigation during the whole growth season (W0); irrigated 2 times, before wintering and at the jointing stage (W1); irrigated 3 times, before wintering, at jointing and anthesis stages (W2), and the irrigation amount is 60 mm every time. The results show that the total amount of nitrogen accumulation in wheat at maturity and the amount of nitrogen derived from soil are both ranked as W2 > W1 > W0, while the amount of nitrogen derived from fertilizer in wheat at maturity is ranked as W0 and W1 > W2. The amounts and proportion of nitrogen derived from basal fertilizer in wheat of W1 are lower than those of W0, the amount and proportion of nitrogen derived from top dressing fertilizer in wheat of W1 are higher than those of W0. The amounts of nitrogen derived from basal and top dressing fertilizer in wheat of W2 are lower than those of W0. At the maturity stage, the amounts of nitrogen distribution derived from fertilizer are ranked as Kernel

**收稿日期**: 2010 -11 -17　　**接受日期**: 2011 -03 -24
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(30871478); 农业部小麦现代农业产业技术体系项目(nycytx -03)资助。
**作者简介**: 孟维伟 (1981—),女,山东滨州人,博士研究生,主要从事小麦生理生态研究工作。E-mail: mengweiwei1314@ yeah. net
* 通讯作者 E-mail: wangd@ sdau. edu. cn

> Stem + Sheath > Leaf > Spike axis + glume. The percentages of nitrogen derived from basal fertilizer in vegetative organs are higher than those derived from topdressing fertilizer, but opposite phenomenon occurs in grains. The amounts of nitrogen derived from fertilizer in grains are ranked as W0 and W1 > W2. W1 treatment gains the highest grain yield. The amount of nitrogen derived from fertilizer and the recovery of fertilizer nitrogen in plant of W1 are higher than those of W2. These is indicate that irrigation before wintering and at the jointing stage can improve the absorption and accumulation of top dressing nitrogen and soil nitrogen, and increase the fertilizer nitrogen accumulation amount and use efficiency. Adding irrigation at the anthesis stage based on W1 treatment, the amount of top dressing nitrogen accumulation in shoot and the proportion of that distribution to grain are decreased significantly. This is the physiological reason why the yield and nitrogen use efficiency are decreased as more water applied after anthesis.

**Key words**: wheat; $^{15}N$ tracer; irrigation amount and stage; nitrogen uptake and distribution; fertilizer nitrogen use efficiency

水分和氮素是调控小麦生长的重要因素,前人做了较多的研究,但结果存在较大差异。Ercoli等[1]研究表明,在严重干旱条件下,小麦植株氮素积累量和营养器官氮素向子粒的转移量均显著降低。补充灌溉 90 mm 显著提高了小麦对肥料氮和来自于土壤的氮素的吸收积累量[2]。灌溉频率由每 30 d 灌溉一次增至每 15 d 一次,植株吸收的肥料氮向子粒中的分配比例由 49.7% 增至 62.8%[3]。Behera 和 Panda[4]则认为,增加灌溉量只是增加了氮素淋溶损失,对植株氮素吸收积累量无显著影响。开花后水分过多会导致各营养器官花前贮藏氮素再运转量和再运转率降低[5]。翟丙年和李生秀[6]研究认为,水分对小麦氮素吸收利用的影响,不仅与灌水量有关,而且与灌溉水在不同生育时期的分配有关。拔节期和开花期灌水可显著增加小麦在拔节至孕穗、开花至成熟阶段的吸氮量[7]。有研究表明,改氮肥全部底施为一部分于播种前底施,一部分在拔节期追施亦可促进小麦对肥料氮的吸收,显著提高植株对氮素的吸收量[8-10]。而有关施氮时期和灌水时期之间的配合效应及其互作关系的研究报道不多。为探讨不同灌水量和灌水时期处理下,冬小麦对土壤氮素、基施氮素和追施氮素吸收分配与利用的差异,本试验利用$^{15}N$同位素示踪技术,在分期施氮条件下研究不同灌水处理对小麦氮素吸收分配及利用效率影响,以期为确定小麦节水省肥的高效灌溉模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

田间试验于 2005 ~ 2006 年小麦生长季在山东省兖州市小孟镇王海村(35.41°N, 116.41°E)进行。该地区属半湿润暖温带气候区,全年光照时数 2406 ~ 2903 h,年太阳辐射总量 124.7 kcal/cm$^2$,常年平均气温 13.6℃,全年≥0℃积温 5025℃d,无霜期 210 ~ 240 d。常年平均降水量 733 mm,主要集中在 7 ~ 9 月。小麦生育期降水量为播种至冬前期 11.2 mm,冬前至拔节期 38.6 mm,拔节至开花期 11.9 mm,开花至成熟期 67.1 mm,总计 128.8 mm。播种前试验田 0—20 cm 土层土壤有机质 14.2 g/kg、全氮 0.13 g/kg、水解氮 83.7 mg/kg、速效磷 55.9 mg/kg、速效钾 90.6 mg/kg。

供试材料为强筋冬小麦品种济麦 20,子粒粗蛋白含量 13.2%,湿面筋含量 29.3%,面团稳定时间 14.9 min,具有 7500 kg/hm$^2$ 左右的产量潜力。

试验设 3 个灌水处理,分别为:全生育期不灌水(W0)、灌冬水 + 拔节水(W1)、冬水 + 拔节水 + 开花水(W2),每次灌水 60 mm,用水表计量灌水量。不同灌水处理间设置 2 m 隔离带,随机区组设计,重复 3 次。小区面积为 2 m × 6 m,播种前随耕地底施 N 70 kg/hm$^2$、$P_2O_5$ 105 kg/hm$^2$、$K_2O$ 105 kg/hm$^2$,拔节期(雌雄蕊原基分化期)追施 N 140 kg/hm$^2$。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。2005 年 10 月 23 日播种,4 叶期定苗,基本苗为 150 株/m$^2$。其他管理措施同一般高产田。

$^{15}N$ 微区设在大田试验的各小区内,分别设$^{15}N$尿素作底肥 + 普通尿素作追肥、普通尿素作底肥 + $^{15}N$ 尿素作追肥。微区的浇水处理、施肥量、播种期和基本苗与试验小区一致。每个小区的微区处理重复 2 次,一个用于开花期取样,另一个用于成熟期取样,以便计算地上部植株自底施氮肥和追施氮肥吸收的氮量。微区用长 × 宽 × 高为 44.5 cm × 15 cm × 30 cm 的镀锌铁板做成铁框,套两行小麦,框体

高出地面 5 cm,防止$^{15}N$ 流失或外部氮素进入。微区外氮肥采用普通尿素,微区内氮肥按设计要求规划实施。$^{15}N$ 尿素的$^{15}N$ 丰度为 10.24%(上海化工研究院生产)。每个微区基施和追施尿素分别为 1.0145、2.0290 g,磷钾肥与所在大田中试验小区的处理一致。

### 1.2　测定项目与方法

植株含氮量及$^{15}N$ 丰度测定:开花期按叶片、茎秆+叶鞘、穗分样;成熟期按叶片、茎秆+叶鞘、颖壳+穗轴、子粒分样。每次取样包含微区中的所有植株,在烘干箱中于 80℃烘至恒重,粉碎后备用。各器官含氮量用半微量凯式定氮法测定;$^{15}N$ 丰度用 ZHO-$O_2$ 型质谱仪测定。

氮素相关指标的计算方法　地上部植株来自底肥、追肥和土壤的氮量及比例参照 Zanetti 等的方法计算[11]。公式如下:

地上部氮素积累量=地上部植株干重×植株含氮量(%);

植株积累的氮素来自底肥或追肥氮的比例(%)=(器官中$^{15}N$ 丰度-0.3663)/(肥料中$^{15}N$ 丰度-0.3663)×100;

地上部植株积累的氮素来自肥料氮的比例(%)=来自底肥氮的比例+来自追肥氮的比例;

地上部植株积累的氮素来自底(追)肥氮的量=地上部氮素积累量×地上部植株积累的氮素来自底(追)肥氮的比例(%);

地上部植株自土壤吸收的氮量=地上部氮素积累量-地上部植株积累的氮素来自(底+追)肥氮的量;

肥料氮利用率(%)=地上部植株积累的氮素来自肥料氮的量/总施氮量×100;

氮肥偏生产力(kg/kg)=子粒产量/总施氮量。

数据、表格用 Excel 2003 处理;差异显著性检验在 DPSv7.05 版数据处理系统下进行。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同灌水处理对植株中不同来源氮素积累的影响

2.1.1 对开花期植株中不同来源氮素积累的影响　开花期小麦地上部植株积累的氮素 72.21%～78.70%来自土壤氮,21.30%～27.79%来自肥料氮(表 1),说明开花前小麦植株吸收的氮素大部分来自土壤氮。其中 W0 处理植株基肥氮的积累量占地上部氮素积累量的比例为 13.9%,追肥氮为 7.41%;W1、W2 处理植株基肥氮的积累量占地上部氮素积累量的比例为 8.91%～10.15%,显著低于 W0 处理,追肥氮为 16.84%～17.63%,显著高于 W0 处理,表明灌水促进了植株对追肥氮的吸收积累。

**表 1　不同处理对开花期和成熟期植株吸收土壤氮和肥料氮的影响**

**Table 1　Effects of different treatments on uptake of soil N and fertilizer N by wheat at the anthesis and maturity stages**

| 处理 Treatment | 地上部氮素积累量 N accum. in shoot (kg/hm²) | 来自肥料氮 Ndff | | | | | | 来自土壤氮 Ndfs (kg/hm²) | 占总氮百分数 % of tot. N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 基肥氮 From basal (kg/hm²) | 占总氮百分数 % of tot. N | 追肥氮 From topdressing (kg/hm²) | 占总氮百分数 % of tot. N | 总肥料氮 Tot. N (kg/hm²) | 占总氮百分数 % of tot. N | | |
| 开花期 Anthesis stage | | | | | | | | | |
| W0 | 162.47 c | 22.58 a | 13.90 a | 12.03 b | 7.41 b | 34.61 b | 21.30 c | 127.86 c | 78.70 a |
| W1 | 227.66 a | 20.29 c | 8.91 c | 38.34 a | 16.84 a | 58.63 a | 25.75 b | 169.04 a | 74.25 b |
| W2 | 210.05 b | 21.32 b | 10.15 b | 37.04 a | 17.63 a | 58.37 a | 27.79 a | 151.69 b | 72.21 c |
| 成熟期 Maturity stage | | | | | | | | | |
| W0 | 264.62 c | 28.68 a | 10.84 a | 62.98 b | 23.80 a | 91.66 a | 34.64 a | 172.96 c | 65.36 c |
| W1 | 282.06 b | 19.92 c | 7.06 c | 69.73 a | 24.72 a | 89.64 a | 31.78 b | 192.42 b | 68.22 b |
| W2 | 310.59 a | 26.87 b | 8.65 b | 43.04 c | 13.86 b | 69.90 b | 22.51 c | 240.69 a | 77.49 a |

注(Note):Ndff—N derived from fertilizer; Ndfs—N derived from the soil. 同列中不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters within a column mean significant at the 5% level.

地上部氮素积累量为 W1 > W2 > W0。植株吸收的土壤氮量为 W1 > W2 > W0,吸收的肥料氮总量为 W1、W2 > W0; W1、W2 处理间无显著差异。说明与不灌水处理相比,W1 处理促进了开花期植株对土壤氮和肥料氮的吸收,再增加开花水的 W2 处理植株吸收的肥料氮量无显著增加,吸收的土壤氮量显著降低。

2.1.2 对成熟期植株中不同来源氮素积累的影响 表1还看出,成熟期小麦植株从土壤中吸收的土壤氮量占地上部氮素积累量的65.31%～77.49%,吸收的肥料氮量占22.51%～34.64%。与开花期比较,W0、W1 处理植株吸收的追肥氮量占地上部氮素积累量的比例增加至23.80%～24.83%,基肥氮量占的比例降至7.06%～10.84%; W2 处理植株吸收的基肥氮量与追肥氮量的比例均显著降低,分别为8.65%、13.86%。说明开花后 W0、W1 处理增加了对追肥氮的吸收,对基肥氮的吸收比例下降; W2 处理植株对基肥氮和追肥氮的吸收比例均降低。

地上部氮素积累量及来自土壤的氮素的积累量均随灌水量的增加而增高,来自肥料的氮素的积累量为 W0、W1 > W2, W0、W1 处理间无显著差异。W1 处理小麦植株对基肥氮的吸收量低于 W0,而对追肥氮的吸收量高于 W0 处理; W2 处理对基肥氮和追肥氮吸收量均显著低于 W0 处理。表明全生育期不灌水条件下,小麦对肥料氮素的吸收比例较高;随灌水次数和灌水量增加,小麦植株吸收肥料氮的比例显著降低,吸收土壤氮的比例显著增加(表1),这是适量灌溉保持较高肥料氮利用效率的生理基础。

## 2.2 不同灌水处理对肥料氮在小麦各器官中分配的影响

2.2.1 开花期肥料氮在各器官中的分配 开花期肥料氮在小麦各器官的分配量为:茎秆 + 叶鞘 > 叶 > 穗。不灌水的 W0 处理植株各器官氮素来自基肥氮的分配量及比例高于追肥氮; W1、W2 处理叶片中的氮素来自基肥氮的分配量与追肥氮无显著差异,而分配比例高于追肥氮;茎秆 + 叶鞘和穗中来自基肥氮的分配量及比例低于追肥氮(表2)。说明灌水处理在开花期促进了追肥氮在茎秆 + 叶鞘和穗中的分配。

**表2 开花期肥料氮在植株各器官中的分配**

**Table 2 Distribution of fertilizer nitrogen in different organs at the anthesis stage**

| 处理 Treatment | 肥料来源 Fertilizer source | 氮素积累量(kg/hm²) Nitrogen accumulation amount | | | | 分配比例(%) Distribution proportion | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 叶片 Leaf | 穗 Spike | 茎+叶鞘 Stem and sheath | 合计 Total | 叶片 Leaf | 穗 Spike | 茎+叶鞘 Stem and sheath |
| W0 | 基肥氮 From basal | 8.42 | 6.02 | 8.14 | 22.58 | 12.04 | 8.61 | 11.65 |
| | 追肥氮 From topdressing | 3.6 | 3.77 | 4.67 | 12.03 | 2.78 | 2.91 | 3.61 |
| | 合计 Total | 12.01 | 9.78 | 12.81 | 34.61 | 5.87 | 4.81 | 6.29 |
| W1 | 基肥氮 From basal | 7.2 | 4.6 | 8.49 | 20.29 | 10.65 | 6.81 | 12.55 |
| | 追肥氮 From topdressing | 7.9 | 12.72 | 17.72 | 38.34 | 5.65 | 9.09 | 12.67 |
| | 合计 Total | 15.1 | 17.32 | 26.21 | 58.63 | 7.31 | 8.33 | 12.63 |
| W2 | 基肥氮 From basal | 8.16 | 5.02 | 8.03 | 21.22 | 11.05 | 6.8 | 10.88 |
| | 追肥氮 From topdressing | 8.41 | 11.35 | 17.39 | 37.15 | 5.8 | 7.83 | 11.99 |
| | 合计 Total | 16.57 | 16.38 | 25.42 | 58.37 | 7.55 | 7.49 | 11.62 |

2.2.2 成熟期肥料氮在各器官中的分配 成熟期肥料氮在小麦各器官的分配量为子粒 > 茎秆 + 叶鞘 > 叶 > 穗轴 + 颖壳,各处理营养器官中氮素来自基肥氮的分配比例高于追肥氮;子粒中来自基肥氮的分配量和比例低于追肥氮,说明追肥氮对子粒贡献大于基肥氮。不同灌水量处理之间比较,小麦子粒中分配的肥料氮量表现为 W0、W1 > W2,说明灌水次数多的 W2 处理不利于小麦植株对肥料氮的吸收利用。成熟期子粒中积累的肥料氮量占地上部植株吸收肥料氮总量的比例为87.71%～91.05%,且随着灌水次数和灌水量的增加而降低(表3)。说明灌水过多不利于肥料氮向子粒的分配。

表 3　成熟期肥料氮在植株各器官中的分配

Table 3　Distribution of fertilizer nitrogen in different organs at maturity

| 处理 Treatment | 肥料来源 Fertilizer source | 氮素积累量(kg/hm²) Nitrogen accumulation amount | | | | | 分配比例(%) Distribution proportion | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 叶片 Leaf | 穗轴+颖壳 Spike axis and husk | 茎+叶鞘 Stem and sheath | 子粒 Kernel | 合计 Total | 叶片 Leaf | 穗轴+颖壳 Spike axis and husk | 茎+叶鞘 Stem and sheath | 子粒 Kernel |
| W0 | 基肥氮 From basal | 1.64 | 1.30 | 2.20 | 23.55 | 28.68 | 2.29 | 1.82 | 3.07 | 32.91 |
| | 追肥氮 From topdressing | 0.67 | 0.94 | 1.48 | 59.90 | 62.98 | 0.48 | 0.67 | 1.06 | 42.84 |
| | 合计 Total | 2.30 | 2.24 | 3.67 | 83.45 | 91.66 | 1.08 | 1.05 | 1.73 | 39.53 |
| W1 | 基肥氮 From basal | 1.06 | 0.97 | 1.48 | 16.40 | 19.92 | 1.14 | 1.39 | 2.11 | 23.46 |
| | 追肥氮 From topdressing | 1.01 | 2.11 | 2.82 | 63.79 | 69.73 | 0.88 | 1.38 | 1.83 | 41.57 |
| | 合计 Total | 2.07 | 3.08 | 4.29 | 80.20 | 89.64 | 0.96 | 1.38 | 1.93 | 35.53 |
| W2 | 基肥氮 From basal | 1.38 | 1.16 | 1.76 | 22.56 | 26.87 | 1.77 | 1.49 | 2.25 | 28.91 |
| | 追肥氮 From topdressing | 0.79 | 1.55 | 1.95 | 38.75 | 43.04 | 0.63 | 1.25 | 1.57 | 31.18 |
| | 合计 Total | 2.17 | 2.71 | 3.71 | 61.31 | 69.90 | 1.01 | 1.33 | 1.80 | 30.42 |

### 2.3　不同灌水处理对不同来源氮素在 0—20 cm 土层土壤中残留的影响

表 4 看出,开花期 0—20 cm 土层土壤内残留的基肥氮和追肥氮均为 W0 > W2 > W1,说明全生育期不灌水增加了开花前肥料氮在 0—20 cm 土层土壤中的残留; 而成熟期残存的追肥氮为 W0 > W2 > W1,基肥氮为 W0、W1 > W2,与开花期比较,追肥氮减少的比例大于基肥氮,说明开花后植株对肥料氮的吸收主要为追肥氮,灌水次数多的 W2 处理显著降低了基肥氮在 0—20 cm 土层土壤中的残留。

表 4　不同处理对开花期和成熟期土壤残留氮中来自基肥氮、追肥氮及土壤氮的影响(kg/hm²)

Table 4　Effects of different treatments on the N from basal, topdressing and soil residual in 0–20 cm soil layer at the anthesis and maturity stages

| 处理 Treatment | 开花期 Anthesis | | | | 成熟期 Maturity | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 底肥氮 Basal N | 追肥氮 Topdressing N | 土壤氮 Soil N | 总氮量 Total N | 底肥氮 Basal N | 追肥氮 Topdressing N | 土壤氮 Soil N | 总氮量 Total N |
| W0 | 33.28 a | 116.04 a | 3078.76 a | 3228.07 a | 19.96 a | 49.82 a | 2713.34 a | 2783.13 a |
| W1 | 20.99 c | 79.08 c | 2771.59 b | 2871.66 b | 19.89 a | 30.79 c | 2540.89 b | 2591.57 b |
| W2 | 26.77 b | 110.78 b | 2829.38 b | 2966.92 b | 15.47 b | 39.36 b | 2507.53 b | 2562.37 b |

注(Note): 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters within a column mean significant at the 5% level.

### 2.4　不同灌水处理对子粒产量和肥料氮利用率的影响

W0 处理植株吸收的肥料氮量最多,肥料氮利用率最高,但氮肥偏生产力显著低于 W1 和 W2 处理。W1 吸收的肥料氮量、肥料氮利用率和氮肥偏生产力均显著高于 W2 处理。灌水次数多的 W2 处理减少了小麦植株对肥料氮的吸收,降低了子粒产量和肥料氮的利用率(表 5)。本试验条件下,以灌 2 水的 W1 处理子粒产量和氮肥偏生产力最高,肥料氮利用率较高,是高产高效的灌水处理。

## 3　讨论

有研究表明,小麦一生吸收的氮素 1/3 来自当季肥料氮,2/3 来自土壤氮[12-13]。Ju 等[14]的试验结果表明,在 4680 ~ 5428 kg/hm² 产量水平下,小麦吸收的氮素 45% 来自肥料氮,55% 来自土壤氮。本试验表明,在 7215.1 ~ 7744.1 kg/hm² 产量水平下,成熟期小麦植株吸收的氮素 22.51% ~ 34.64% 来自肥

表5 不同处理对小麦子粒产量和肥料氮利用率的影响

Table 5 Effects of different treatments on grain yield and fertilizer nitrogen use efficiency of wheat

| 处理 Treatment | 施氮量 N rate ($kg/hm^2$) | 子粒产量 Grain yield ($kg/hm^2$) | 肥料氮吸收量 Uptake from fertilizer N ($kg/hm^2$) | 肥料氮利用率 Fertilizer N use efficiency (%) | 氮肥偏生产力 Partial factor productivity from N (kg/kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| W0 | 210 | 7215 c | 91.66 a | 43.65 a | 34.36 c |
| W1 | 210 | 7744 a | 89.64 a | 42.69 a | 36.88 a |
| W2 | 210 | 7433 b | 69.90 b | 33.29 b | 35.39 b |

注(Note)：同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters within a column mean significant at the 5% level.

料氮,65.31%～77.49%来自土壤氮,植株积累的氮素中土壤氮的比例高于前人的研究结果,说明随产量水平的增加,小麦吸收的土壤氮量增加,进一步表明培肥地力是获得高产的基础。

小麦植株氮素积累量随灌水量的增加而提高[15-16]。相同施氮量条件下,小麦全生育期灌溉返青水+拔节水+开花水+灌浆水的处理植株氮素吸收积累量高于灌拔节水+开花水的处理[17]。本试验结果也表明,随灌水次数和灌水量增加,地上部植株氮素积累量及来源于土壤氮素的积累量显著增加。但随灌水量增加,地上部植株吸收的肥料氮量占地上部氮素积累量的比例显著降低,氮肥利用率亦随之降低。杨世丽等[18]研究认为,花后土壤含水量和施氮量较高时会降低小麦旗叶硝酸还原酶活性和吸氮量。与灌溉拔节水+开花水的处理相比,灌溉返青水+拔节水+开花水+灌浆水的处理肥料氮损失率显著增加,氮肥当季利用率显著降低[19]。本试验看出,灌溉冬水+拔节水处理的氮肥偏生产力显著高于不灌水和增灌了开花水的处理；在灌溉冬水+拔节水的基础上增灌开花水,小麦对肥料氮的吸收量和产量均显著降低。说明在本试验条件下,开花期灌水60 mm,开花至成熟期降水67.1 mm已导致开花后土壤供水过多,不利于小麦对肥料氮素的吸收和子粒产量的提高。

土壤水分不足不利于小麦营养器官开花前贮存氮素向子粒的转移[20]。在无灌溉条件下,子粒中的氮素约有60%来自开花前营养器官贮存的氮素；而在灌溉条件下,则有80%来自营养器官贮存的氮素,灌溉显著促进了开花后营养器官氮素向子粒中的再分配[21]。Lalla等[3]研究了肥料氮素在植株体的再分配,结果表明,每隔30 d灌溉一次的低灌溉频率处理的地上部植株吸收积累的肥料氮量在子粒和营养体中的分配比例各为50%,灌溉频率增加至每15 d一次,肥料氮在子粒中的分配比例显著提高。在本试验中,各灌水处理地上部植株吸收积累的肥料氮主要分配在子粒中,占植株吸收肥料氮总量的87.71%～91.05%；在同一灌水处理下,追肥氮对子粒氮素的贡献大于基肥氮。与全生育期不灌水处理相比,灌冬水+拔节水显著增加了地上部植株对追肥氮的吸收积累量和向子粒的分配量,在此基础上增灌开花水反而不利于小麦对追肥氮的吸收和向子粒中的分配,这是开花后供水多导致氮肥利用率显著降低的生理原因。

## 参考文献：


[1] Ercoli L, Lulli L, Mariotti M *et al*. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability [J]. Eur. J. Agron., 2008, 28(2): 138-147.

[2] Garabet S, Ryan J, Wood M. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate II. Fertilizer-use efficiency with labelled nitrogen [J]. Field Crop Res., 1998, 58: 213-221.

[3] Lalla L I, Mohamed I, Oswald V. Effect of organic and mineral fertilizers on N-use by wheat under different irrigation frequencies [J]. Plant Biol. Pathol., 2003, 326: 391-399.

[4] Behera S K, Panda R K. Effect of fertilization and irrigation schedule on water and fertilizer solute transport for wheat crop in a sub-humid sub-tropical region [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2009, 130: 141-155.

[5] 范雪梅,戴廷波,姜东,等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6): 63-67.
Fan X M, Dai T B, Jiang D *et al*. Effects of nitrogen rates on carbon and nitrogen assimilate translocation in wheat grown under drought and water logging from anthesis to maturity [J]. J. Soil Water Conserv., 2004, 18(6): 63-67.

[6] 翟丙年,李生秀. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定[J]. 中国农业科学,2005,38(6): 1188-1195.
Zhai B N, Li S X. Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination [J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(6): 1188-1195.

[7] 张胜全,方保停,张英华,等. 冬小麦节水栽培三种灌溉模式的

水氮利用与产量形成[J]. 作物学报,2009,35(11): 2045-2054.
Zhang S Q, Fang B T, Zhang Y H *et al*. Utilization of water and nitrogen and yield formation under three limited irrigation schedules in winter wheat [J]. Acta Agron. Sin., 2009, 35(11): 2045-2054.

[8] 沈建辉,戴廷波,荆奇,等. 施氮时期对专用小麦干物质和氮素积累、运转及产量和蛋白质含量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2004,24 (1): 55-58.
Shen J H, Dai T B, Jing Q *et al*. Effect of nitrogen topdressing time on the accumulation and transfer of nitrogen, yield and protein content in specialty wheat [J]. Acta Trit. Crops, 2004, 24 (1): 55-58.

[9] 石玉,于振文,王东,等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. 作物学报,2006,32(12): 1860-1866.
Shi Y, Yu Z W, Wang D *et al*. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake, translocation of nitrogen and yield in wheat [J]. Acta Agron. Sin., 2006, 32(12): 1860-1866.

[10] Demotes-Mainard S, Jeuffroy M H. Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat [J]. Field Crops Res., 2004, 87(2-3): 221-233.

[11] Zanetti S, Hartwig U A, Kessel C V *et al*. Does nitrogen nutrition restrict the $CO_2$ response of fertile grassland lacking legumes [J]. Oecologia, 1997,112: 17-25.

[12] 陈佑良,张启刚,梁振兴,等. 应用富集$^{15}N$研究冬小麦对氮素的吸收规律及器官建成的影响[J]. 作物学报,1986,12 (2): 101-108.
Chen Y L, Zhang Q G, Liang Z X *et al*. Studies on the influence of the application of fertilizers at different growth stages on the nitrogen absorption and organ formation of winter wheat [J]. Acta Agron. Sin., 1986, 12(2): 101-108.

[13] 党廷辉,蔡贵信,郭胜利,等. 黄土旱塬黑垆土—冬小麦系统中尿素氮的去向及增产效果[J]. 土壤学报,2002,39(2): 199-205.
Dang T H, Cai G X, Guo S L *et al*. Fate of and crop response to nitrogen applied to winter wheat growing on Heilu soil [J]. Acta Pedol. Sin., 2002, 39(2): 199-205.

[14] 巨晓棠,潘家荣,刘学军,等. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究. Ⅰ.冬小麦生长季肥料氮的去向 [J]. 核农学报,2002,16(6): 397-402.
Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al*. The fate of nitrogen fertilize in winter wheat growth season under high soil fertility condition [J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 2002, 16: 397-402.

[15] Sinclair T R, Pinter P J, Kimball B A *et al*. Leaf nitrogen concentration of wheat subjected to elevated [$CO_2$] and either water or N deficits[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2000, 79: 53-60.

[16] 王声斌,张起刚,彭根元. 灌溉水平对冬小麦氮素吸收及氮素平衡的影响[J]. 核农学报,2002,16(5): 310-314.
Wang S B, Zhang Q G, Peng G Y. Effect of different irrigation on nitrogen uptake of wheat and N balance [J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 2002, 16(5): 310-314.

[17] 李世娟,周殿玺,诸叶平,等. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响[J]. 华北农学报,2002,17(1): 69-75.
Li S J, Zhou D X, Zhu Y P *et al*. Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat [J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2002, 17(1): 69-75.

[18] 杨世丽,贾秀领,张凤路,等. 水氮耦合对小麦叶片硝酸还原酶活性、植株吸氮量及产量的影响[J]. 华北农学报,2008,23 (4): 124-129.
Yang S L, Jia X L, Zhang F L *et al*. Effects of water and nitrogen coupling in winter wheat on leaves NRA, plant nitrogen absorption and yield [J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2008, 23 (4): 124-129.

[19] 李世娟,周殿玺,兰林旺. 不同水分和氮肥水平对冬小麦吸收肥料氮的影响[J]. 核农学报,2002,16(5): 315-319.
Li S J, Zhou D X, Lan L W. The fate of fertilizer nitrogen in winter wheat under different water and nitrogen levels [J]. Acta Agric. Nucl. Sin., 2002, 16(5): 315-319.

[20] Seligman N G, Sinclair T R. Global environment change and simulated forage quality of wheat II. Water and nitrogen stress [J]. Field Crops Res., 1995, 40: 29-37.

[21] Garabet S, Wood M, Ryan J. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate I. Growth, water-use and nitrogen accumulation [J]. Field Crops Res., 1998, 57: 309-318.