植物营养与肥料学报 2009,15(6): 1324-1332
Plant Nutrition and Fertilizer Science

灌水量和时期对高产小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响

郑成岩[1], 于振文[1*], 王西芝[2], 武同华[2]
(1 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,山东泰安 271018;
2 山东省兖州市农业科学研究所,山东兖州 272000)

摘要: 在每公顷产 9000 kg 小麦的高产条件下,以济麦 22 为试验材料,设置全生育期不灌水(W0)、底墒水(W1)、底墒水+拔节水(W2)、底墒水+拔节水+开花水(W3)、底墒水+开花水(W4)5 个灌溉处理,每次灌水 60 mm,研究了灌水量和时期对高产小麦氮素积累、分配和转运及土壤硝态氮含量的影响。结果表明: 1)与不灌水处理(W0)相比较,灌水处理显著增加了小麦植株氮素积累量、子粒氮素积累量和开花后营养器官氮素向子粒的转移量; 随着灌水量的增加,成熟期小麦植株氮素积累量、开花后营养器官积累的氮素向小麦子粒转移量和转移率均呈现先增加后降低的趋势,以 W2 处理最高。2)随着小麦生育进程的推进,0—200 cm 土层土壤硝态氮含量先降低后回升再降低,在拔节期最低。成熟期,W0 处理 0—40 cm 土层的土壤硝态氮含量显著高于灌水处理; 随灌水量的增加,100—160 cm 土层土壤硝态氮含量增加,W2 处理显著低于 W3 和 W4 处理; 160—200 cm 土层的土壤硝态氮含量无显著差异。3)随灌水量的增加,氮素吸收效率、氮素收获指数和氮肥生产效率先增加后降低,W2 处理最高; 而氮素利用效率则呈逐渐降低趋势,其中 W0 处理的氮素利用效率显著高于其他处理,W2、W3、W4 处理间无显著差异。在本试验条件下,综合考虑氮素利用、子粒产量和土壤中硝态氮的淋溶,底墒水和拔节水各灌 60 mm 的 W2 为最佳处理,可供生产中参考。

关键词: 灌水量和时期; 小麦; 氮素积累、分配和转运; 土壤硝态氮含量
中图分类号: S512.1+1.07　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2009)06-1324-09

Effects of irrigation amount and stage on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO_3^--N content in high-yield wheat

ZHENG Cheng-yan[1], YU Zhen-wen[1*], WANG Xi-zhi[2], WU Tong-hua[2]
(*1 Key Laboratory of Wheat Cultivation Physiology and Genetic Improvement, Ministry of Agriculture/ Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China;*
2 Institute of Agricultural Sciences of Yanzhou City, Yanzhou, Shandong 272000, China)

Abstract: Irrigation is one of the most important measures to regulate plant metabolism in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). However, unsuitable irrigation will cause the decline of nitrogen use efficiency and grain yield. To determine the effects of irrigation amount and stage on nitrogen accumulation, distribution, translocation and soil NO_3^--N content under the condition of high yield at the level of 9000 kg per hectare, the field experiment was carried out on high fertility soil with organic matter 15.20 g/kg, alkali-hydrolysable N 77.13 mg/kg, available P 29.70 mg/kg, and available K 121.58 mg/kg in Shiwang village, Yanzhou city, Shandong province, China, using the wheat cultivar Jimai 22 which has high yield and medium gluten potential. Five treatments were set with no irrigation (W0), irrigated before sowing (W1), irrigated before sowing and at jointing stage, respectively (W2), irrigated before sowing, at jointing and anthesis stages, respectively (W3), irrigated before sowing and at anthesis stage, respectively (W4). The irrigation amount each

收稿日期: 2008-09-10　　**接受日期**: 2009-01-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(30871478); 农业部现代小麦产业技术体系项目资助。
作者简介: 郑成岩(1982—),男,山东即墨人,博士研究生,主要从事小麦优质高产生理生态研究。E-mail: qdjmzcy@163.com
* 通讯作者 Tel: 0538-8241484, E-mail: yuzw@sdau.edu.cn

time was 60 mm. There were three replicates for each treatment. The plot area was 2 m × 6 m and a 1 m wide protective belt was left between every two adjacent experimental plots. The basic seedling number was 180 plant/m^2.

The results indicated that, the nitrogen accumulation amount in plant and grain and the nitrogen translocation amount (nitrogen accumulation in vegetative organs at anthesis stage—nitrogen accumulation in vegetative organs at maturity, NTA) from vegetative organs to grain after anthesis in treatments which irrigation were supplied were significantly higher than those of treatment W0. With the increasing of irrigation amount, the nitrogen accumulation amount of wheat plant, NTA and nitrogen translocation efficiency (NTA/nitrogen accumulation in vegetative organs at anthesis stage, TE) from vegetative organs to grain after anthesis were increased at first then decreased, and those of treatment W2 were the highest. The soil NO_3^--N content in 0-200 cm soil layer decreased first, increased then, and decreased again as wheat growth process progress, and reached its lowest content at jointing stage. At maturity stage, the soil NO_3^--N content in 0-40 cm soil layer of treatment W0 was significantly higher than that of treatments which irrigation were supplied. With the increasing of irrigation amount, the soil NO_3^--N content in 100-160 cm soil layer was increased, that of treatment W2 was significantly lower than treatment W3 and W4, and there were no significant differences in 160-200 cm soil layer among these treatments. With the increasing of irrigation amount, nitrogen uptake efficiency, nitrogen harvest index and nitrogen fertilizer productive efficiency were increased at first then decreased, and those of treatment W2 were the highest. But nitrogen use efficiency was gradually decreased, and that of treatment W0 was the highest while there was no significant difference among treatment W2, W3 and W4.

Based on a comprehensive consideration of nitrogen use efficiency, grain yield and soil NO_3^--N content, the irrigation amount and stage recommended under the condition of this research was the treatment W2 which irrigated before sowing and at jointing stage respectively, the irrigation amount each time was 60 mm.

Key words: irrigation amount and stage; wheat; nitrogen accumulation, distribution and translocation; soil NO_3^--N content

小麦产量和品质与氮素的吸收、积累及转运有密切关系，遗传特性和栽培措施等因素都对其有重要影响。小麦子粒蛋白质含量是由其对肥料氮、土壤氮的吸收量及其在各器官的分配量和分配比例以及开花前营养器官中积累的氮素向子粒的转移量和转移比例 3 个因素共同决定的[1]；开花期和成熟期植株各器官的含氮量和氮素积累量的基因型间差异显著[2]。有研究认为，高蛋白品种具有将开花前营养体中储存氮素更完全与有效地转化利用和开花后吸收同化较多氮素的特性[3]。灌水是调控小麦氮素营养和产量的有效手段，Sinclair 等[4]研究指出，土壤干旱促进了氮素从叶片向子粒的转移，提高了子粒氮素含量。有研究表明，中产条件下，干旱胁迫能减少小麦吸氮量，干旱胁迫程度越大，小麦吸氮量越小[5]；改善土壤水分状况可以促进氮素自营养器官向子粒的转移，增加总氮素产量[6]；亦有研究指出，在小麦产量 7754～8322 kg/hm^2 范围内，其全氮吸收量随灌水量的增加而提高，灌水促进了小麦对氮素养分的吸收，但是氮素生理效率降低[7]。

硝态氮淋洗是土壤氮素的主要损失途径，也是引起地下水污染的主要原因。土壤中累积的硝态氮如不及时被作物吸收利用，在夏季持续降雨和大量灌溉条件下，会向下运移出作物根区，生物有效性降低，而且增加土壤深层 NO_3^--N 累积量或直接进入浅层地下水[8-9]。

有关不同小麦品种氮素代谢的差异和人工控制的水分条件下氮素代谢的研究较多，但对每公顷产 9000 kg 的高产条件下研究灌水量和时期对小麦植株氮素积累、分配和转运及土壤中硝态氮含量影响的报道较少。为此，进行了相关的研究，旨在为制定提高产量和氮素利用效率的小麦栽培技术提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2006～2007 生长季在兖州市小孟镇史王村大田进行，供试小麦品种为济麦 22。播种前试验田 0—20 cm 土层养分含量为：有机质 15.20 g/kg、碱解氮 77.13 mg/kg、速效磷 29.70 mg/kg、速效钾 121.58 mg/kg。试验设 5 个灌水处理：全生育期不灌水（W0）、底墒水（W1）、底墒水 + 拔节水（W2）、底墒水 + 拔节水 + 开花水（W3）、底墒水 + 开花水

(W4),每次灌水 60 mm,用水表控制灌水量。小区面积为 2 m×6 m,不同灌水处理间设置 1 m 隔离带,随机区组设计,重复 3 次。

播前底肥为每公顷施 N 135 kg、P_2O_5 150 kg、K_2O 135 kg;拔节期开沟追施氮肥,每公顷施 N 135 kg。氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 $P_2O_5$14%),钾肥为硫酸钾(含 K_2O 47%)。播种前 0—20、20—60、60—100、100—140、140—200 cm 5 层土壤含水量分别为 18.56%、18.84%、19.81%、21.41%、23.51%。本试验区域常年平均降水量为 725.0 mm, 2006～2007 小麦生长季属于平水年型,小麦生育期间降水量为:播种至越冬期 46 mm、越冬至返青期 73 mm、返青至拔节期 0 mm、拔节至开花期 19.9 mm、开花至成熟期 107.5 mm。2006 年 10 月 8 日播种,三叶期定苗,基本苗为 180 株/m^2。其余管理措施同一般大田栽培。

1.2 田间取样与测定方法

于越冬、返青、拔节、开花和成熟期进行群体动态调查和取样,其中越冬、返青、拔节期留取整株样品。开花期植株样品分为叶片、茎秆+叶鞘、穗 3 部分;成熟期分为子粒、叶片、茎秆+叶鞘、颖壳+穗轴 4 部分。样品于 70°C 烘至恒重,测定干物质重;采用浓硫酸消煮,半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量,计算植株氮素积累量。

采用半微量凯氏定氮法测定子粒全氮含量,乘以 5.7 为子粒蛋白质含量[10]。

分层取 0—200 cm 土层(20 cm 为一层)土样,立即装入铝盒于 110℃ 烘干至恒重,计算土壤质量含水量。

在越冬、返青、拔节、开花和成熟期的灌水前,按 20 cm 一层(共 10 层)取土样混匀后,立即置于 -20℃冰冻保存。土壤样品解冻后,将样品充分混匀过 2 mm 筛,称取 5 g 土壤样品,加入 50 mL 0.01 mol/L的 $CaCl_2$ 溶液,振荡 30 min 后过滤,浸提液用 AA3 型流动分析仪(德国 BRAN + LUEBBE 公司产)测定土壤硝态氮含量。

1.3 数据处理与统计分析

冬小麦植株氮素积累与转运及氮素利用效率的计算公式[11-12]:

各时期不同器官氮素累积量 = 氮素含量(%)×干物质质量;

各器官的氮素分配比例(%) = 各器官的氮素积累量/单茎总含氮量×100;

营养器官氮素转移量 = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量;

营养器官氮素转移率(%) = 营养器官氮素转移量/开花期营养器官氮素积累量×100;

营养器官氮素贡献率(%) = 营养器官氮素转移量/成熟期子粒氮素积累量×100;

氮素吸收效率(kg/kg) = 植株氮素积累量/施氮量;

氮素收获指数 = 子粒氮素积累量/植株氮素积累量;

氮素利用效率(kg/kg) = 子粒产量/植株氮素积累量;

氮肥生产效率(kg/kg) = 子粒产量/施氮量。

农田耗水量的计算:采用测定土壤含水率计算作物耗水量的方法[13],计算 0—200 cm 土层的土壤耗水量。计算公式:

$$ET_{1-2} = 10\sum_{i=1}^{n}\gamma_i H_i(\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K$$

式中:ET_{1-2}为阶段耗水量;i 为土层编号;n 为总土层数;γ_i 为第 i 层土壤干容重;H_i 为第 i 层土壤厚度;θ_{i1} 和 θ_{i2}为第 i 层土壤时段初和时段末的含水率,以占干土重的百分数计;M 为时段内的灌水量;P_0为有效降水量;K 为时段内的地下水补给量。当地下水埋深大于 2.5 m 时,K 值可以不计;本试验的地下水埋深在 5 m 以下,因此无地下水补给。

水分利用效率 WUE = Y/ET_α[14]

式中:Y 为子粒产量;ET_α 为小麦生育期间耗水量。

试验数据用 Microsoft Excel 和 Origin 软件进行图形处理,采用 DPS 统计分析软件进行显著性检验(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 灌水量和时期对小麦植株氮素积累、分配和转运的影响

2.1.1 不同生育时期的植株氮素积累量 图 1 看出,植株氮素的积累量随生育进程逐渐增加。越冬期植株氮素积累量以 W0 处理最高,返青期后,W0 处理低于其他处理,说明土壤干旱不利于小麦返青以后植株氮素的积累。开花期 W2 和 W3 处理的植株氮素积累量显著高于其他处理,成熟期以 W2 处理的氮素积累量最高,W2 > W3、W4 > W1 > W0。表明灌底墒水和拔节水的 W2 处理越冬前植株氮素积累量少,返青以后植株氮素积累量均最高;在此基础上增加开花水降低了成熟期植株氮素积累量。

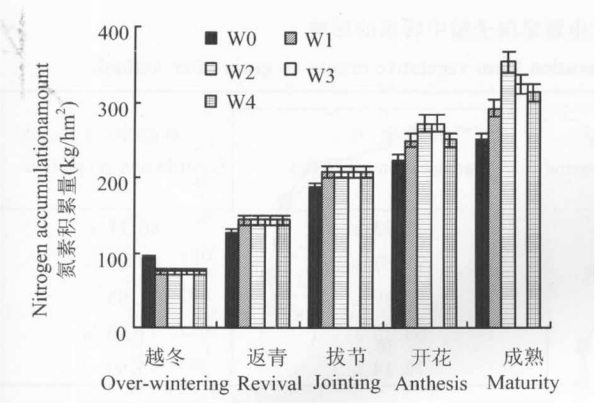

图 1　不同处理对小麦各生育时期氮素积累量的影响

Fig.1　Effect of different treatments on nitrogen accumulation amount in wheat at different growth stages

2.1.2　成熟期氮素在小麦器官中的分配　表 1 看出，成熟期小麦各器官中氮素积累量为：子粒 > 茎鞘 > 叶片 > 穗轴 + 颖壳。随着灌水量的增加，子粒的氮素积累量呈现先增加后降低的趋势，W0 处理显著低于其他处理，以 W2 处理最高。叶片和茎鞘的氮素积累量 W3 处理显著高于其他处理；W4 处理茎鞘的氮素积累量显著高于 W2 和 W1，叶片的氮素积累量差异不显著。穗轴 + 颖壳的氮素积累量为：W1 > W3 > W0、W2、W4。说明适量适期灌水的 W2 处理可以显著提高植株和子粒的氮素积累量；干旱条件降低了营养器官和子粒的氮素积累量。

表 1 还看出，氮素在子粒中的分配比例随灌水量增加呈现先增加后降低的趋势。W2 处理分配比例最高，W3 处理最低，W4 处理显著低于 W2 处理。氮素在茎和叶中的分配比例均以 W2 处理最低，W3 处理最高，W4 处理高于 W2 处理；穗轴 + 颖壳中的分配比例为 W0 > W1 > W3、W4 > W2。以上结果说明，灌水量和时期对成熟期氮素向营养器官和生殖器官的分配比例有调控效应。随灌水量的增加，氮素向营养器官特别是茎鞘的分配比例增大，降低了向子粒中的分配比例，氮素过多地滞留于营养器官中，不利于子粒氮素的积累；同一灌水量，底墒水 + 拔节水的 W2 处理与底墒水 + 开花水的 W4 处理相比，W2 处理提高了氮素向子粒中的分配比例，利于子粒氮素的积累。

表 1　不同处理对成熟期氮素在不同器官中分配的影响

Table 1　Effects of different treatment on distribution of nitrogen in different organs at maturity

处理 Treatment	氮素积累量 N accumulation amount(kg/hm²)					分配比例 Distribution proportion (%)			
	总和 Total	子粒 Kernel	叶片 Leaves	茎鞘 SS[1)]	穗轴 + 颖壳 SaG[2)]	子粒 Kernel	叶片 Leaves	茎鞘 SS	穗轴 + 颖壳 SaG
W0	249.77 d	186.91 d	17.78 c	27.49 d	17.59 c	74.83 bc	7.12 b	11.01 b	7.04 a
W1	291.91 c	221.76 c	20.44 b	31.29 c	20.44 a	75.97 b	7.00 b	10.72 b	6.31 b
W2	353.20 a	291.01 a	17.48 c	27.51 c	17.21 c	82.39 a	4.95 d	7.79 c	4.87 d
W3	324.32 b	237.75 b	25.25 a	43.07 a	18.26 b	73.31 c	7.79 a	13.28 a	5.63 c
W4	312.76 b	243.24 b	18.36 c	34.29 b	16.87 c	77.77 b	5.87 c	10.96 b	5.39 c

注(Note)：1)SS—Stem & sheath；2)SaG—Spike axis & glume；同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平，下同。Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level. The same symbol is used for other tables.

2.1.3　开花后营养器官中的氮素向子粒中的转运　子粒中的氮素来源于两部分，一部分为开花前吸收并贮存在营养器官中于开花后转移到子粒中的氮素，一部分为开花后植株吸收同化的氮素。表 2 表明，不灌水的 W0 处理子粒氮素积累量和营养器官中的氮素向子粒的转移量显著低于灌水处理，对子粒的贡献率显著高于灌水处理。灌水处理间比较，随灌水量的增加，开花后营养器官积累的氮素向子粒的转移量呈现先增加后降低的趋势，W2 处理的氮素转移量显著高于其他处理，W1 与 W4 处理之间差异不显著；氮素转移率也随灌水量的增加呈先增加后降低，W2 处理最高，W1 与 W4 之间差异不显著，但均显著高于 W3 处理。开花后营养器官氮素转移量对子粒的贡献率以 W1 处理最高，W2、W3 与 W4 处理之间无显著差异。说明在本试验条件下，底墒水和拔节水各灌 60 mm 的 W2 处理，促进了开花期营养器官中贮存的氮素向子粒中转运，提高转移率；过多的灌溉水(W3)和时期不当的灌溉(W4)均不利于小麦植株中氮素向子粒中转移。

表2 不同处理对开花后营养器官中氮素向子粒中转运的影响

Table 2 Effects of different treatments on nitrogen translocation from vegetative organs to grain after anthesis

处理 Treatment	成熟期子粒氮素积累量(kg/hm²) N accumulation amount of grain at maturity	转移量(kg/hm²) N translocation amount	转移率(%) Translocation efficiency	贡献率(%) Contribution proportion
W0	186.91 d	161.06 d	71.93 b	86.17 a
W1	221.76 c	179.20 c	71.87 b	80.81 b
W2	291.01 a	209.40 a	77.10 a	71.95 c
W3	237.75 b	185.24 b	68.15 c	77.92 bc
W4	243.24 b	179.98 c	72.14 b	73.99 c

2.2 灌水量和时期对0—200 cm土层土壤硝态氮含量的影响

图2看出,越冬期,0—20 cm土层的土壤硝态氮含量W0处理高于W1,而20—40 cm土层W1处理高于W0;40—200 cm土层的土壤硝态氮含量处理之间差异不显著。说明在越冬期,灌底墒水的处理,降低了0—20 cm土层的土壤硝态氮含量,提高了20—40 cm土层的土壤硝态氮含量,对40 cm以下土层无显著影响。

返青期,W0处理0—60 cm土层和W1处理0—40 cm土层的土壤硝态氮含量与越冬期相比显著降低,说明越冬至返青期,W0处理主要利用了0—60 cm土层的土壤硝态氮,而W1处理主要利用了0—40 cm土层的土壤硝态氮。处理之间相比较,20—60 cm土层的土壤硝态氮含量W1显著高于W0,说明越冬至返青期W0处理对20—60 cm土层的土壤硝态氮利用量高于W1处理。

拔节期,各处理0—80 cm土层的土壤硝态氮含量与返青期相比显著降低,80 cm以下土层的土壤硝态氮含量与返青期相比差异不显著,说明随着小麦根系吸收能力的增强,0—80 cm土层为此阶段主要的土壤硝态氮供应层。处理之间,W0处理0—20 cm土层的土壤硝态氮含量显著高于W1处理,20—80 cm土层的土壤硝态氮含量差异不显著,但是W1处理20—80 cm土层的土壤硝态氮含量降低幅度大于W0处理,说明,W1处理显著增加了对20—80 cm土层的土壤硝态氮的利用。

开花期,拔节期追施氮肥后,开花期表层土壤的硝态氮含量显著高于拔节期。处理之间0—20 cm,20—40 cm土层的土壤硝态氮含量均表现为W0 > W1 > W2,40—120 cm土层的土壤硝态氮含量均为W2 > W0、W1,120—200 cm土层的土壤硝态氮含量处理之间差异不显著,说明,施拔节肥后灌水的处理显著降低了0—40 cm土层的土壤硝态氮含量,促进了硝态氮向深层土壤的运移,在40—120 cm土层形成了积累峰,土壤硝态氮含量显著高于W0处理。

成熟期,各处理0—160 cm土层的土壤硝态氮含量显著低于开花期,而对160—200 cm土层的土壤硝态氮含量无显著影响。处理之间,W0处理0—40 cm土层的土壤硝态氮含量显著高于其他处理,100—160 cm土层的土壤硝态氮含量随着灌水量的增加而增加,W3和W4处理显著高于其他处理,160—200 cm土层的土壤硝态氮含量处理之间无显著差异。说明灌水量多的W3处理促进了硝态氮向深层土壤的运移,使大量的硝态氮累积于100—160 cm土层的土壤中,而小麦根系在土壤中的垂直分布构型是自上而下呈锥形递减,根系条数也是自上而下层层递减[15],因此不利于小麦根系的吸收利用。

2.3 灌水量和时期对氮素利用效率的影响

随灌水量的增加,氮素利用率呈现下降趋势(表3),W0处理最高,W2、W3、W4处理间无显著差异;氮素吸收效率和氮肥生产效率随灌水量的增加先增加后降低,W2处理最高;氮素收获指数反映成熟期氮素在子粒和营养器官中的分配状况,氮素收获指数亦呈现随灌水量的增加先增加后降低的趋势。表明在本试验条件下,灌底墒水和拔节水的W2处理提高了氮素吸收效率、氮素收获指数和氮肥生产效率,促进了小麦对氮肥的吸收利用及向子粒的分配,能协调小麦子粒产量和氮素利用率的关系,获得高产高效。

2.4 灌水量和时期对子粒产量、蛋白质含量和产量及水分利用效率的影响

随灌水量的增加,子粒蛋白质含量和产量均呈现先增加后降低的趋势。蛋白质含量以W4处理最高,W2与W1处理间差异不显著;而子粒蛋白质产量则以W2处理最高(表4)。表明在本试验条件下,

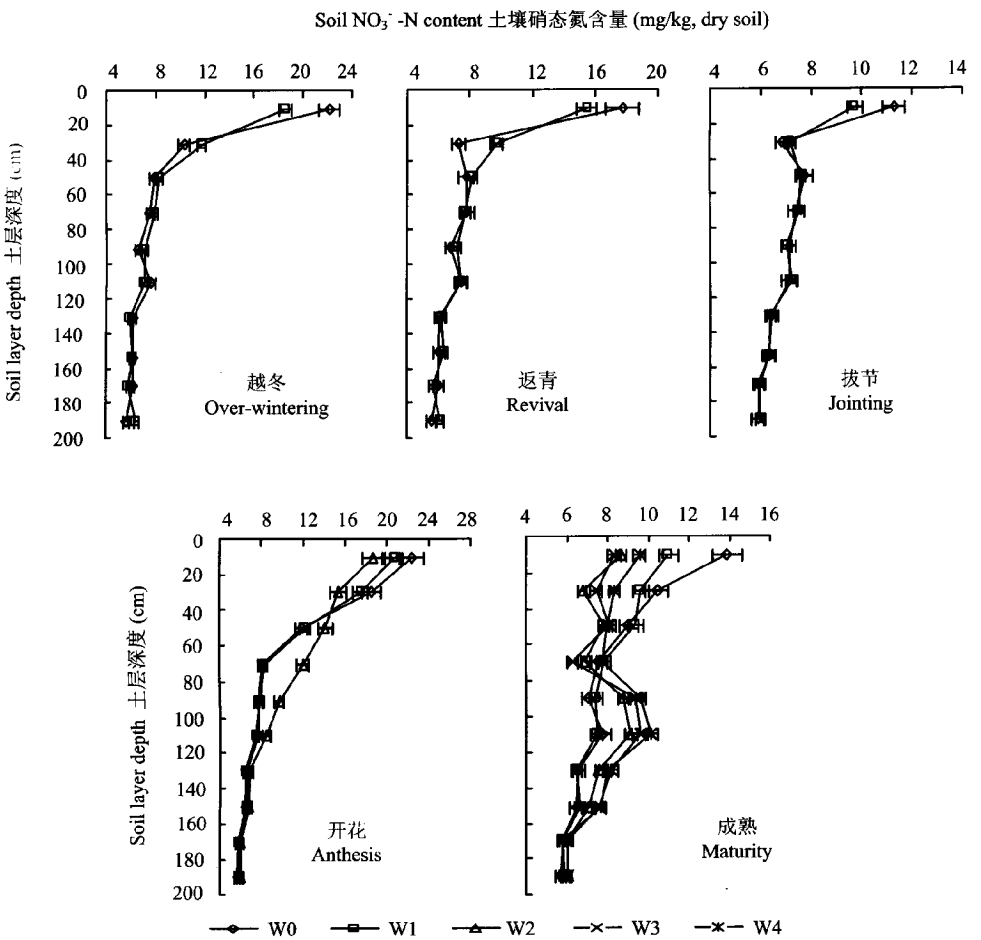

图 2　不同处理对不同生育时期 0—200 cm 土层土壤 NO_3^--N 含量的影响

Fig.2　Effect of different treatments on soil NO_3^--N content in 0 – 200 cm soil layers at different growth stages

表 3　不同处理对小麦氮素利用效率的影响

Table 3　Effect of different treatments on nitrogen use efficiency in wheat

处理 Treatment	氮素吸收效率(kg/kg) N uptake efficiency	氮素收获指数 N harvest index	氮素利用效率(kg/kg) N use efficiency	氮肥生产效率(kg/kg) N productive efficiency
W0	0.93 d	0.75 c	33.88 a	31.34 c
W1	1.08 c	0.76 bc	30.14 b	32.58 bc
W2	1.31 a	0.82 a	27.72 c	36.26 a
W3	1.20 b	0.73 c	29.25 bc	35.31 ab
W4	1.16 bc	0.78 b	28.66 bc	33.19 b

灌 2 水的 W2 和 W4 处理均有利于子粒蛋白质的合成与积累，但 W2 处理获得高的子粒蛋白质产量，而 W4 处理获得高的子粒蛋白质含量。

表 4 还看出，W0 处理的子粒产量显著低于灌水处理，水分利用效率显著高于灌水处理。灌水处理之间，随灌水量的增加，子粒产量和水分利用效率均先增加后降低，以 W2 处理获得最高子粒产量和水分利用效率，分别为 9790.38 kg/hm^2 和 18.80 kg/(hm^2·mm)。表明灌底墒水和拔节水的 W2 处理促进了子粒蛋白质的合成与积累，提高了子粒产量和水分利用效率，子粒产量和蛋白质产量同步提高。

表4 不同处理对子粒产量、蛋白质含量、蛋白质产量及水分利用效率的影响

Table 4 Effect of different treatments on grain yield, protein content, protein yield and water use efficiency

处理 Treatment	子粒产量(kg/hm²) Grain yield	蛋白质含量(%) Protein content	蛋白质产量(kg/hm²) Protein yield	水分利用效率[kg/(hm²·mm)] Water use efficiency
W0	8461.96 d	13.67 d	1157.02 e	19.38 a
W1	8797.73 c	14.05 b	1235.80 d	17.96 c
W2	9790.38 a	13.96 b	1366.41 a	18.80 b
W3	9485.87 b	13.78 c	1307.45 b	17.26 d
W4	8962.35 c	14.28 a	1280.09 c	17.49 cd

3 讨论和结论

关于对小麦植株氮素积累动态的分析,有研究认为随生育进程,氮素不断在植株中积累,至成熟期达峰值[16];亦有研究认为,成熟期比开花期氮积累量有所下降[17-18]。水分不足会限制肥效的正常发挥,不利于小麦营养器官开花前贮存氮素向子粒的转移,降低了子粒氮素积累量,影响氮肥的作用[19-20];增加灌水量可以提高小麦植株氮素积累量[21]。据报道,灌水量为300 mm,小麦产量可达7050 kg/hm²,并且随灌水量的增加营养器官中的氮素向子粒的转移量和转移率提高[22];亦有学者认为,在小麦产量7754~8322 kg/hm²范围内,灌水促进了小麦对氮素养分吸收的同时也促进了营养器官的生长代谢,导致开花后植株吸收的氮素不能充分转移到子粒中,而是保存在叶片等营养器官中[7]。本试验结果表明,小麦植株氮素的积累量随生育进程逐渐增加;灌水量为120 mm(W2)时,小麦子粒产量达到9790.38 kg/hm²,其开花后的氮素积累量显著高于其他处理。土壤水分状况影响小麦植株对氮素的吸收、转运和分配,随着灌水量的增加,成熟期小麦植株氮素积累量、开花后营养器官积累的氮素向小麦子粒转移量和转移率均呈现先增加后降低的趋势,以灌底墒水和拔节水的W2处理最高。开花期再增加60 mm灌水,降低了成熟期植株氮素的积累量,氮素过多地滞留于营养器官中,向子粒中的转运率降低。应该说明的是,在本试验条件下,开花至成熟期降水107.5 mm,有效地补充了小麦开花后的需水量,浇开花水的处理没有表现增产效应。在开花后降水量少的年型,适宜灌水量和时期有待于进一步研究。

硝态氮是农田氮素淋失的主要形式,损失的氮包括来源于土壤的氮,残留的肥料氮和当季施入的肥料氮[23]。不同生育时期缺水及分蘖期补充灌水均降低冬小麦的氮素吸收,增加矿质态氮的土壤残留;越冬、拔节、灌浆期补充灌水可以显著提高冬小麦对土壤氮素的吸收能力,不同程度地降低氮素残留[24]。旱作土壤中硝态氮每年随水分下渗的深度为1.0~1.5 m,一般不超过2 m;平均2~3 mm降水可使土壤中的硝态氮下渗深度向下延伸1 cm[25]。本试验结果表明,随着小麦生育进程的推进,0—200 cm土层土壤硝态氮含量先降低后回升再降低,拔节期最低。在成熟期,W0处理在0—100 cm土层中的硝态氮含量显著高于其他处理;100—160 cm土层的土壤硝态氮含量随着灌水量的增加而增加,W2处理显著低于W3和W4处理;160—200 cm土层的土壤硝态氮含量处理之间无显著差异。说明灌水量过多促进了硝态氮向深层土壤的运移,使大量的硝态氮累积于深层土壤。但是小麦的根系90%左右集中在100 cm以上土层[26],硝态氮运移至深层土壤不利于小麦根系的吸收利用,降低氮肥的利用效率。本试验中,与其他灌水处理相比较,W2处理在0—100 cm土层硝态氮含量较高,在100—200 cm土层硝态氮含量低,有利于小麦根系的吸收利用。说明灌底墒水和拔节水的处理硝态氮向深层土壤的淋溶少,产量和水分利用效率高,可供生产中参考。

关于氮素利用的调控,有研究表明,改进肥料品质和施用技术是提高氮素利用效率的有效手段[27],施氮水平和基追比例对提高高产麦田氮素利用效率具有调控效应[28]。有学者把选育高效吸收利用氮素的新品种作为提高氮素利用效率的新型途径[29]。本试验结果表明,随灌水量的增加,氮素吸收效率、氮素收获指数和氮肥生产效率先增加后降低,W2处理最高;而氮素利用效率逐渐降低,W0处理显著高于其他处理,W2、W3、W4处理间无显著差异。表明灌水量和时期对小麦植株的氮素吸收利用有显著的调控效应。

根据小麦不同生育时期的需水量和降水量进行调亏灌溉,既能满足小麦高产对水分的需求,又能提高水分利用效率,这是进一步深入研究的内容。

参 考 文 献：

[1] 王小燕，于振文．不同冬小麦品种氮素吸收运转特性及其与子粒蛋白质含量的关系[J]．植物营养与肥料学报，2006，12(3)：301-306.

Wang X Y, Yu Z W. The absorption and translocation of nitrogen and their relationship to grain protein content in different winter wheat cultivars[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(3): 301-306.

[2] 张国平，张光恒．小麦氮素利用效率的基因型差异研究[J]．植物营养与肥料学报，1996，2(4)：331-336.

Zhang G P, Zhang G H. Studies on variation among wheat genotypes in N utilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1996, 2(4): 331-336.

[3] 杜金哲，李文雄，胡尚连，等．春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与子粒产量和蛋白质含量的关系[J]．作物学报，2001，27(2)：253-260.

Du J Z, Li W X, Hu S L *et al*. Nitrogen assimilation, transfer and utilization in relation to grain protein content and yield of spring wheat genotypes differing in quality[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(2): 253-260.

[4] 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.

[5] 樊小林，李玲，何文勤，等．氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应[J]．植物营养与肥料学报，1998，4(2)：131-137.

Fan X L, Li L, He W Q *et al*. Effect of nitrogen fertilizer, water stress and the genotypes on nitrogen uptake of winter wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(2): 131-137.

[6] 赵广才，何中虎，刘利华，等．肥水调控对强筋小麦中优9507品质与产量协同提高的研究[J]．中国农业科学，2004，37(3)：351-356.

Zhao G C, He Z H, Liu L H *et al*. Study on the Co-enhancing regulating effect of fertilization and watering on the main quality and yield in zhongyou 9507 high gluten wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(3): 351-356.

[7] 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]. J. Nucl. Agric. Sci., 2002, 16(5): 315-319.

[8] Suprayogo D M, van Noordwijk K H, Cadisch G. The inherent safety net of Ultisols: Measuring and modeling retarded leaching mineral nitrogen[J]. Eur. J. Soil Sci., 2002, 53: 185-194.

[9] 吕殿青，杨进荣，马林英．灌溉对土壤硝态氮淋洗效应影响的研究[J]．植物营养与肥料学报，1999，5(4)：307-315.

Lü D Q, Yang J R, Ma L Y. Study on effect of irrigation on soil nitrate leaching and uptake[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(4): 307-315.

[10] 何照范．粮油子粒品质及其分析技术[M]．北京：农业出版社，1985.

He Z F. Analysis technique for grain quality of cereals and oils [M]. Beijing: Agricultural Press, 1985.

[11] 赵满兴，周建斌，杨绒，等．不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]．植物营养与肥料学报，2006，12(2)：143-149.

Zhao M X, Zhou J B, Yang R *et al*. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(2): 143-149.

[12] Stevens W B, Hoeft R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study Ⅱ. Nitrogen uptake efficiency [J]. Agron. J., 2005, 97: 1046-1053.

[13] 刘增进，李宝萍，李远华，崔运来．冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]．农业工程学报，2004，20(4)：239-249.

Liu Z J, Li B P, Li Y H, Cui Y L. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat [J]. Trans. CSAE, 2004, 20(4): 239-249.

[14] 江晓东，李增嘉，侯连涛，等．少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]．农业工程学报，2005，21(7)：20-24.

Jiang X D, Li Z J, Hou L T *et al*. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^--N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation [J]. Trans. CSAE, 2005, 21(7): 20-24.

[15] 王化岑，刘万兴，刘万代，等．超高产冬小麦根系生长动态与解剖学结构初步观察[J]．作物学报，1998，24(6)：952-956.

Wang H C, Liu W X, Liu W D *et al*. Preliminary observation on growth rhythm and inner structure of root system of supper-high-yielding wheat[J]. Acta Agron. Sin., 1998, 24(6): 952-956.

[16] 朱新开，郭文善，封超年，等．不同类型专用小麦氮素吸收积累差异研究[J]．植物营养与肥料学报，2005，11(2)：148-154.

Zhu X K, Guo W S, Feng C N *et al*. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different end uses [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(2): 148-154.

[17] Schenk M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level [J]. Plant Soil, 1996, 181: 131-137.

[18] Hou Y L, O'Brien L, Zhong G R. Study on the dynamic changes of the distribution and accumulation of nitrogen in different plant parts of wheat [J]. Acta Agron. Sin., 2002, 27(4): 493-499.

[19] 翟丙年，李生秀．水氮配合对冬小麦产量和品质的影响[J]．植物营养与肥料学报，2003，9(1)：26-32.

Zhai B N, Li S X. Effect of water and nitrogen cooperation on winter wheat yield and quality[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(1): 26-32.

[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] 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.

[22] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J]. J. Agron. Crop Sci., 2005, 191: 439-449.

[23] Tong Y A, Emteryd O, Lu D Q, Grip H. Effect of organic manure and chemical fertilizer on nitrogen uptake and nitrate leaching in a Eum-orthic anthrosols profile[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1997, 48(3): 225-229.

[24] 王朝辉,王兵,李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(8): 1339-1343.
Wang Z H, Wang B, Li S X. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(8): 1339-1343.

[25] 彭琳,彭祥林,卢宗藩. 塿土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用[J]. 土壤学报,1981,18(3): 212-222.
Peng L, Peng X L, Lu Z F. The seasonal variation of soil NO_3^--N and the effect of summer fallow on the fertility of manured loessial soil [J]. Acta Pedol. Sin., 1981, 18(3): 212-222.

[26] 赵秉强,张福锁,李增嘉,等. 间作冬小麦根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(2): 214-219.
Zhao B Q, Zhang F S, Li Z J *et al*. The vertical distribution and its change of root quantity and activity of the inter-planted winter wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(2): 214-219.

[27] 严小龙,张福锁. 植物营养遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社,1997. 1-17, 78-150.
Yan X L, Zhang F S. Genetics on plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1997. 1-17, 78-150.

[28] 郭天财,宋晓,冯伟,等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量[J]. 作物学报,2008,34(5): 886-892.
Guo T C, Song X, Feng W *et al*. Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high-yielding regions[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 886-892.

[29] 李继云,刘秀娣,周伟,等. 有效利用土壤营养元素的作物育种新技术研究[J]. 中国科学(B辑),1995,25(1): 41-48.
Li J Y, Liu X T, Zhou W *et al*. Research of new technology of crop breeding on availably using soil nutritional element[J]. Sci. China (Ser. B), 1995, 25(1): 41-48.