

不同灌溉次数和灌溉量对冬小麦 氮素吸收转移的影响

金欣欣^{1,2}, 张喜英¹, 陈素英¹, 孙宏勇¹, 王彦梅¹, 邵立威^{1,2}, 高丽娜^{1,2}

(1. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:通过 6 个灌溉处理的田间试验, 研究了不同灌溉次数和灌溉量对麦田 60 cm 土层土壤硝态氮(NO_3^- -N)淋失以及冬小麦各个生育阶段氮素吸收转移的影响。试验结果显示, 水分条件影响土壤 NO_3^- -N 的含量和分布, 土壤 NO_3^- -N 含量随着灌水次数和灌水量的增多而降低, 而且集中分布在 20~40 cm 土层。冬小麦植株在返青期不灌水处理积累的氮素最高, 拔节期后显著低于其他灌水处理($P < 0.05$)。开花-成熟期, 灌 1 水、2 水和 3 水处理植株积累氮高于灌 4 水和 5 水处理。花后叶中氮向穗部的转移率为 82% 左右, 且随着灌溉量的增大而升高, 茎中氮的转移率偏低, 平均 75%。成熟期, 花后叶茎(未考虑根)及花后植株同化氮素对穗部的贡献率分别为 34%、32%、34%, 植株总氮在穗部的分配比之间无显著差异, 灌 3 水处理氮素吸收效率最高。上述结果表明, 灌水量促进土壤 NO_3^- -N 向下淋溶, 使土壤 60 cm 以上 NO_3^- -N 含量降低, 不利于作物吸收。适度干旱有利于冬小麦植株氮素的积累和吸收利用效率的提高。花后营养器官氮向穗部的转移率叶 > 茎, 穗中氮约 66% 来源于营养器官的转移, 34% 来源于花后同化氮量。权衡水分利用效率和氮素吸收利用率, 灌 2 水或 3 水是华北地区较好的灌溉选择。

关键词: 冬小麦; 土壤硝态氮; 氮素转移; 氮素吸收率

中图分类号: S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7091(2009)04-0112-07

Effect of Different Irrigation Frequency and Amount on Nitrogen Uptake, Translocation of Winter Wheat

JIN Xin-xin^{1,2}, ZHANG Xi-ying¹, CHEN Su-ying¹,
SUN Hong-yong¹, WANG Yan-mei¹, SHAO Li-wei^{1,2}, GAO Li-na^{1,2}

(1. Center for Agriculture Resource Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Science, Shijiazhuang 050021, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field experiment involving six irrigation treatments (from none to five irrigation application), was to determine the effects of irrigation amount and frequency on the nitrate nitrogen (NO_3^- -N) in soil layers (0-60 cm) and the translocation of accumulation nitrogen in wheat plants. The experimental results showed that the water condition had an impact on the amount and distribution of NO_3^- -N in soil. NO_3^- -N amount significantly decreased as irrigation frequency increased when partial NO_3^- -N can be collected in soil depth of 20-40 cm. The irrigation none treatment had a highest nitrogen accumulation at the stage of sowing to rejuvenating, then remarkably lower than the other treatments at 0.05 probability level. Irrigation frequency from one to three had a higher nitrogen accumulation amount than four and five after anthesis. The post-anthesis nitrogen translocation rates from leaves and stems to spikes were 82% and 75% respectively. Rate of leaf nitrogen translocation rose with increasing irrigation frequency, but stem translocation rate reversely. Contribution of nitrogen from leaves, stems and post-anthesis assimilation nitrogen to spikes were 34%, 32% and 34% after anthesis. The distribution rate of nitrogen accumulation in spikes had no significant difference between treatments at maturity. Irrigation two and three had a higher uptake and utilization efficiency of nitrogen from soil. From above we concluded sufficient irrigation amount led soil NO_3^- -N to leak and low soil nitrate had no helpful for nitrogen assimilation in wheat plants. Moderate water deficit was favorable for nitrogen accumulation, nitrogen uptake efficiency and water utilization effi-

收稿日期: 2009-05-12

基金项目: 国家“863”项目 (2006AA10Z228)

作者简介: 金欣欣 (1984-), 女, 河北冀州人, 硕士, 主要从事土壤环境及水肥耦合研究。

通讯作者: 张喜英 (1965-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事农田节水机理与技术研究。

ciency to increase. The translocation rate from leaves was larger than from stems ,and 66 % of spike nitrogen came from vegetative organs nitrogen mobilization ,the other 34 % was derived from post-anthesis assimilation nitrogen. So irrigation two or three was a reasonable irrigation method for balancing water-nitrogen utilization efficiency in north china plain.

Key words : Winter wheat ;Soil nitrate ;Nitrogen translocation ;Uptake efficiency

灌溉和施肥是小麦高产的重要措施,合理灌溉能提高小麦产量和水分利用效率,减少氮肥损失,增加小麦对氮素的吸收积累量^[1-3]。关于灌溉供水对土壤硝态氮(NO₃⁻-N)的变化以及冬小麦氮素吸收转移的影响,前人已经做了很多研究。王晓英等^[4]研究结果表明,灌水次数是导致0~100 cm土层残留硝态氮积累量变化的主导因素,水氮互作是决定100~200 cm硝态氮积累量变化的主导因素,且灌水效应大于施氮效应。增加灌溉次数和灌溉量,氮肥耕层残留量显著降低^[5]。不合理的灌溉制度,使土壤剖面中积累的硝态氮不断向下淋溶,对地下水质量安全带来了极大威胁^[4]。灌水是调控小麦氮素代谢的有效手段,水分亏缺显著降低了小麦的氮素吸收量,降低了氮素利用效率和籽粒产量^[6],开花前控制灌水而开花后灌水可显著提高籽粒产量^[7]。大量研究结果表明,干旱胁迫和过量灌溉均不利于小麦植株氮素的积累,适量灌溉可以促进氮素吸收,提高氮素利用效率^[8-11],同时也有研究表明,氮素利用效率因小麦品种不同而有差异^[12,13]。王小燕等^[14]研究结果表明,增加灌溉量抑制开花后营养器官中积累的氮素向籽粒的转移,不利于籽粒氮含量的提高,籽粒中氮素1/3来源于开花后植株吸收同化,2/3来源于开花前营养器官中积累氮素的转移^[15,16],改善土壤水肥状况可以促进氮素自营养器官向籽粒的转移,花后同化的氮素和花前营养器官转移的氮素在籽粒中所占的比例因小麦的基因型而异^[17,18]。在大田条件下研究灌水制度对小麦氮素代谢的影响,对提高水氮利用效率,实现小麦高产有重要意义。本试验在前人的基础上,研究了在不同灌溉次数和灌水量条件下,0~60 cm土壤层NO₃⁻-N

的含量变化与分布特征以及冬小麦地上部分对氮素的吸收、转移与分配,旨在为华北平原冬小麦节水灌溉,减少氮素的损失量,提高氮素利用效率提供一定的理论依据和技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验于2006年10月至2007年6月在中国科学院栾城农业生态系统试验站进行。该站位于太行山前平原(37°53'N,114°41'E;海拔50.1 m),是华北平原地区冬小麦高产的典型代表区域,属暖温带半湿润半干旱季风气候,平均气温12.3℃,雨热同期。土壤类型为壤质潮褐土,耕层(0~30 cm)有机质含量为14.0~19.0 g/kg,土层平均容重为1.46 g/m³,全氮0.8~1.0 g/kg,碱解氮60~80 mg/kg,速效磷15~20 mg/kg,速效钾150~170 mg/kg,平均田间持水量34%(V/V)。多年平均降水量是480.7 mm,月降雨分布不均,70%的降水集中在7~9月份,冬小麦生长季节10月至翌年6月,其平均降水量仅129.8 mm,远远满足不了冬小麦的生长需要。

所用试验地长期定位,自2000年至2009年每年的灌溉施肥及各种管理措施都相同。该试验设6个灌溉处理,分别为全生育期不灌水(I0)、灌1水(I1)、灌2水(I2)、灌3水(I3)、灌4水(I4)和灌5水(I5),灌溉时期和灌溉量详见表1。灌溉通过地下管道输水,用水表计量灌溉水量。小麦品种为石麦7221,田间处理采用随机区组设计,每个处理设3个重复,小区面积5 m×8 m=40 m²,各小区之间有2 m宽的保护行不进行灌溉,以减少小区间的相互影响。

表 1 灌溉试验设计
Tab.1 Irrigation design

处理 Treatment	灌溉时期和灌水量/mm Irrigation timing and amount				
	越冬前 Before-winter	拔节期 Jointing	抽穗期 Booting	开花期 Anthesis	灌浆期 Filling
I0					
I1		80			
I2		80			
I3	70	80		70	70
I4	70	80	70		70
I5	70	75	70	70	70

试验地前茬为玉米,于9月底收获。旋耕后于2006年9月29日浇底墒水备播,播种前施底肥(磷

酸二铵 375 kg/hm²,尿素 450 kg/hm²),拔节期追肥(尿素 525 kg/hm²)。试验于2006年10月9日机械

播种,行距 15 cm,10 月 16 日出苗,2007 年 6 月 10 - 12 日收获。冬小麦全生育期降雨情况:播种 - 拔节期 75.1 mm,拔节 - 开花期 16.7 mm,开花 - 成熟期 48.2 mm,全生育期降雨 140 mm。

1.2 测定内容及方法

翌年春天小麦返青后,在冬小麦主要生育期(返青期、拔节期、开花期、灌浆期、成熟期)取样测定土壤 NO_3^- -N 和小麦植株全氮。

土壤硝态氮的测定:分别在各小区按 20 cm 一层,分 3 层取 0~60 cm 的土样,每小区随机取 3 点,相同层次的土壤混合为一个样,保存回实验室分析。土样混匀后称取 10 g 2 份,用浓 KCl 浸提(水土比 10:1),震荡 45 min 过滤后用流动分析仪(FLOW SOLUTION IV)测定土壤 NO_3^- -N 含量。

小麦植株全氮含量测定:在各小区测出 1 m² 冬小麦的茎数,取 20 个有代表性的单茎,按叶片、茎秆 + 叶鞘、穗三部分分开。样品于烘箱内 80 °C 高温杀青,测定干物质质量。然后样品采用浓硫酸 - 凯氏法得到消煮溶液,利用凯氏定氮仪测定植株全氮量。

计算公式如下^[14,19]:

植株吸收的总氮量 = 植株干质量 × 植株全氮含量;

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;

氮素转移效率 = 营养器官氮素转移量 / 开花期营养器官氮素积累量;

贡献率 = 营养器官氮素转移量(或花后同化氮量) / 成熟期穗中氮积累量;

氮素的吸收效率 = 植株氮素积累量 / 施氮量;

氮素的利用效率 = 籽粒产量 / 植株氮素积累量

1.3 数据处理

数据基于 SPSS Ver. 16.0 软件和 Microsoft excel 进行计算和作图分析。

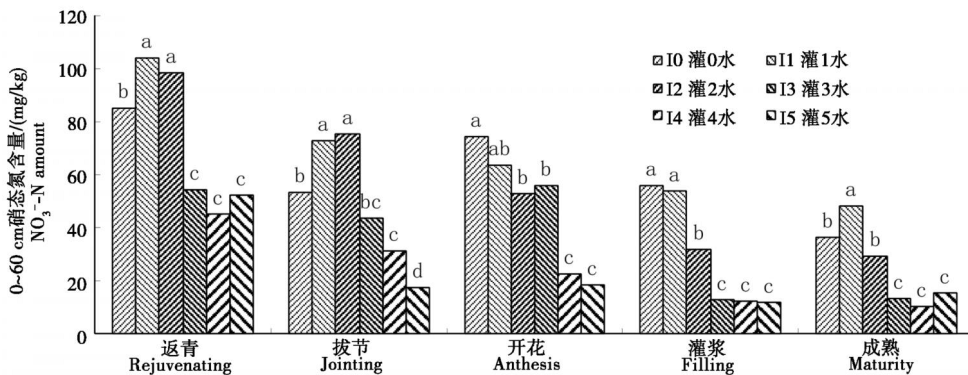
2 结果与分析

2.1 各处理冬小麦主要生育期土壤 NO_3^- -N 的变化

硝态氮是植物能够直接吸收利用的速效性氮,不易被土壤胶体吸附,易随水淋洗到下部土层^[20]。由图 1 可看出随着冬小麦生育期的进程,土壤 NO_3^- -N 含量逐渐降低。各处理之间,灌水量越多, NO_3^- -N 含量越少。返青期,灌越冬水的 I3、I4、I5 处理 NO_3^- -N 含量显著低于不灌越冬水处理 I0、I1、I2 ($P < 0.05$),拔节期变化趋势与返青期相似。其中, I0 处理 NO_3^- -N 含量低于 I1、I2 处理,是因为 I0 处理作物在播种 - 返青期对氮素吸收量大的缘故。拔节期作物施肥,所以开花期土壤 NO_3^- -N 含量与拔节期相当,但 I4、I5 处理由于灌抽穗水,使其含量显著低于其他处理,分别为 22.75 mg/kg 和 18.42 mg/kg。灌浆期籽粒成熟对土壤氮素有一定的吸收,其中 I3 处理灌灌浆水,含量降低最大。成熟期,大量 NO_3^- -N 被作物利用或随水向下渗,使得土壤 NO_3^- -N 进一步降低。试验结果表明在施肥量相同条件下,灌水是影响 0~60 cm 土壤中 NO_3^- -N 含量变化的主要因素,灌水量和灌水次数越多,土壤 NO_3^- -N 含量越低。水分亏缺,不利于土壤中氮素的矿化硝化,水分充分,加速了 NO_3^- -N 的运移,两者都不利于 NO_3^- -N 在土壤中的滞留和被吸收。

2.2 各处理冬小麦主要生育期 0~60 cm 土层土壤 NO_3^- -N 的分布

冬小麦各生育期 0~60 cm 土层 NO_3^- -N 的分布趋势一致(图 2)。返青期,土壤 NO_3^- -N 在 0~20 cm



不同字母表示不同处理的差异显著性检验达 0.05 水平,下同。

Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level of probability. The same indication was made in the following.

图 1 各处理冬小麦主要生育期 0~60 cm 土壤总 NO_3^- -N 含量

Fig. 1 NO_3^- -N amount under different treatments in 0 - 60 cm soil layers at main growth stage of wheat :Rejuvenating,Jointing,Anthesis,Filling,Maturity

土层含量较低,主要集中在 20~40 cm,且灌 I0,I1,I2 处理明显高于 I3,I4,I5 处理,40~60 cm 含量有所降低。拔节期,0~60 cm 土层 NO_3^- -N 含量有不同程度的降低,分布趋势与返青期一致,但 20~40 cm 积累峰明显变小,说明植株对 20~40 cm 土壤 NO_3^- -N 吸收强度大。I4、I5 处理 0~60 cm 土壤 NO_3^- -N 含量无明显积累分布,含量一致且低。开花期,I1、I2、I3 处理 0~60 cm 土层土壤 NO_3^- -N 含量无积累分布状态,但可明显看出,灌溉量越多,各层含量越低。I0 处理表层含量较低,20~60 cm 含量较高,与其它处理形成鲜明对比,水分条件影响了 NO_3^- -N 的下渗和吸收。处理 I4、I5 与拔节期相比无显著差异,说明植株对 60 cm 以上吸收潜力较小,主要是对

60 cm 以下氮的吸收。I2 处理,0~60 cm 硝态氮 NO_3^- -N 含量变化较大,说明灌开花水对冬小麦吸收养分有一定的促进作用。成熟期 NO_3^- -N 含量在各层都有所降低,分布趋势与开花一致,其中 I3,I4,I5 处理 20~60 cm NO_3^- -N 含量低于 0~20 cm。试验结果表明,从土壤 NO_3^- -N 的分布可以看出,土壤 NO_3^- -N 主要集中在分布在 20~40 cm 土层,而冬小麦植株氮素的吸收也主要集中在该土层。灌水量越多,在土壤 0~60 cm 分布的氮素越少,作物需要消耗自身的能量吸收 60 cm 以下的养分,不利于作物自身的生长。灌水相对少时,上层滞留氮素较多,返青后氮素矿化加速,使得 0~60 cm 氮养分丰富,有利于作物根系对氮素的吸收利用。

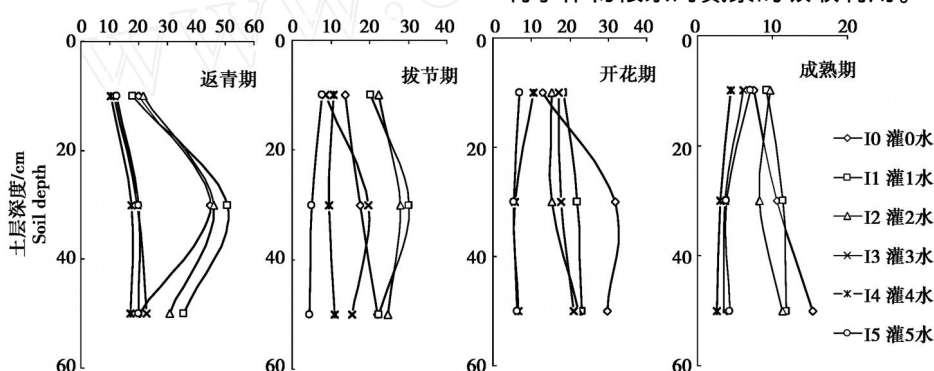


图 2 各处理冬小麦在返青、拔节、开花、成熟期 0~60 cm 土层土壤 NO_3^- -N 的分布

Fig. 2 The distributions of soil nitrate nitrogen in 0 - 60 cm soil layers under different treatments at main growth stage of wheat :Rejuvenating ,Jointing ,Anthesis ,Maturity

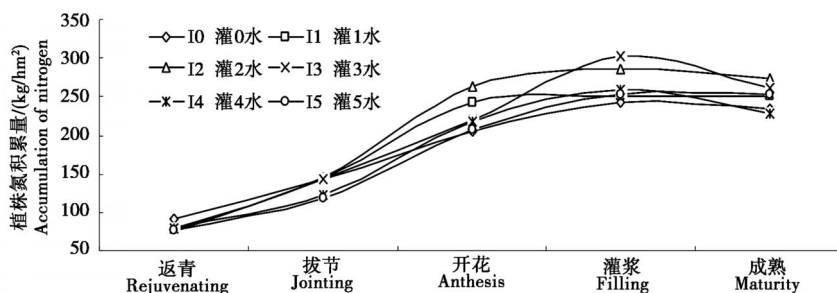


图 3 各处理冬小麦主要生育期植株氮积累量

Fig. 3 The accumulation of nitrogen under different treatments at main growth stage of wheat :Rejuvenating ,Jointing ,Anthesis ,Grain filling ,Maturity

2.3 冬小麦植株对氮素的吸收、转移和分配

2.3.1 冬小麦植株氮素的积累量 随着生育期的进行,冬小麦植株积累氮量逐渐增加(图 3)。返青期,植株氮素积累量为 I0 处理最高,因为灌水处理越冬期降低了土壤的温度,影响了土壤中微生物及酶的活性,导致氮素在土壤中的矿化硝化受阻。返青后,作物氮素吸收强度逐渐提高,拔节期 I4、I5 植株氮积累量显著低于其他处理,I0,I1,I2,I3 无显著差异。拔节期后,I0 处理植株体内氮的积累量低于其他处理。开花期 I1,I2 处理的植株氮素积累量较

高,I3,I4,I5 无显著差异,说明开花前适当干旱有利于植株氮素的积累。灌浆期,植株氮积累量与开花期趋势相似,I3 积累量最高,显著高于 I4,I5,说明灌浆期灌水有利于植株氮素的积累,但水分的过度补充效果并不好。成熟期 I2,I3 氮积累量较高,其次是 I4>I5>I1>I0。此结果表明,在此季度降雨条件下,灌水小于 150 mm 有利于植株开花前氮素积累,灌水 220 mm 有利于开花后氮素积累,灌水量较充分的 290 mm 和 350 mm 处理,并不利于冬小麦植株整个生育期氮素的积累。播种至返青期,适度干旱有

利于作物氮素的积累,开花后至成熟期,将水分控制在一定范围内,既有利于作物氮素的吸收,又不会造成水资源的浪费。

2.3.2 不同生育期氮素在各器官中分配 由表2可以看出,拔节期,植株叶中氮的分配比随灌水量的增加而增大,茎中氮的分配比则趋势相反。开花期,除I0外各灌水处理叶茎中氮分配比逐渐减小,但变化趋势与拔节期一致。开花后,叶茎中氮开始向穗部转移,花期各处理穗中氮分配比成先升高后降低趋势,I2、I3高于其他处理。灌浆期,随着灌水量的增大,叶茎中氮分配比增大,穗中分配比例递减。成熟期,各处理穗中氮的分配比无显著差异,I5处理穗中氮的分配比明显高于灌浆期,叶中氮分配比显

著低于其他处理,而I0处理穗中氮分配比在各生育期一直比较高。开花-成熟期,叶茎穗中全氮含量逐渐减少,成熟期不灌水处理,全氮含量最高。开花后全氮含量降低的现象,主要由于孕穗后郁蔽较严重,加上病害影响植株正常生长,导致植株吸氮量降低,并且幅度超过了干质量的降低^[21]。该试验结果表明,灌水量影响氮在茎叶穗氮的分配比,开花前充分灌水提高叶中氮分配比,有利于光合作用的进行,而相对干旱则提高了茎中氮的分配比。充分灌水有利于氮在叶茎中的滞留,使植株贪青,延缓氮素向穗中的转移。干旱有利于氮素在穗部的积累和全氮含量的提高,这对提高籽粒品质有一定的作用。

表2 各处理冬小麦植株积累氮在叶茎穗中的分配比

Tab.2 The distribution rate of nitrogen accumulation under different treatments in wheat plants										
时期 Timing	处理 Treatment	叶 Leaf			茎 Stem			穗 Spike		
		氮积累量 /(g/m ²) NAA	氮分配比 NPR	氮含量 /% NC	氮积累量 /(g/m ²) NAA	氮分配比 NPR	氮含量 /% NC	氮积累量 /(g/m ²) NAA	氮分配比 NPR	氮含量 /% NC
拔节期 Jionting	I0	845.26b	0.52b	3.55b	787.73a	0.48a	1.38b	-	-	-
	I1	870.91b	0.53b	3.72ab	762.45a	0.47ab	1.58a	-	-	-
	I2	967.55a	0.56ab	3.87a	748.95a	0.44ab	1.55ab	-	-	-
	I3	958.71a	0.57ab	3.36b	713.91a	0.43b	1.34b	-	-	-
	I4	893.75b	0.56ab	3.45b	713.93a	0.44ab	1.41b	-	-	-
开花期 Anthesis	I5	930.68ab	0.59a	3.31c	641.44b	0.41b	1.35b	-	-	-
	I0	836.51b	0.41a	3.80a	745.94b	0.36b	1.05b	470.73a	0.23a	2.04b
	I1	885.25ab	0.37b	3.92a	1059.90a	0.44a	1.47a	473.62a	0.20b	2.01b
	I2	926.17a	0.35b	3.84a	1202.36a	0.46a	1.63a	507.70a	0.19b	2.08ab
	I3	912.27ab	0.41a	3.84a	791.45b	0.36b	1.12b	496.99a	0.23a	2.28a
灌浆期 Filling	I4	860.28b	0.40ab	3.72a	850.97b	0.39b	1.21b	461.69a	0.21ab	2.10ab
	I5	881.86ab	0.43a	3.71a	787.56b	0.38b	1.10b	402.47b	0.19b	2.05b
	I0	513.58c	0.21c	2.76b	503.12c	0.21bc	0.94a	1404.66b	0.58a	1.74ab
	I1	553.02c	0.22c	2.79b	438.60c	0.18c	0.73c	1511.90ab	0.60a	1.70ab
	I2	651.68b	0.23c	2.92b	552.97b	0.19c	0.83b	1647.98a	0.58a	1.82a
成熟期 Maturity	I3	784.10a	0.26b	3.40a	612.45b	0.20c	0.88ab	1619.61a	0.54ab	1.83a
	I4	664.67b	0.26b	2.98b	677.06a	0.26a	0.94a	1243.66c	0.48b	1.61b
	I5	751.09a	0.30a	3.40a	570.40b	0.23b	0.88ab	1205.16c	0.48b	1.74ab
	I0	129.99c	0.06c	0.91c	153.43d	0.07c	0.33c	2050.76ab	0.88a	2.09a
	I1	193.39a	0.08a	1.26a	204.77c	0.08b	0.39b	2116.05a	0.84a	1.96ab
	I2	202.90a	0.07b	1.12b	252.17ab	0.09b	0.45ab	2269.34a	0.83a	1.83b
	I3	170.76b	0.07b	0.93c	281.01a	0.11a	0.47a	2160.59a	0.83a	1.76b
	I4	147.10b	0.06c	0.88c	220.00b	0.10a	0.40b	1905.96b	0.84a	1.90ab
	I5	130.68c	0.05d	0.91c	235.99b	0.09b	0.37b	2173.03a	0.86a	1.81b

注:NAA.氮积累量;NPR.氮分配比;NC.氮含量。
Note:NAA. Nitrogen accumulation amount;NPR. Nitrogen distribution rate;NC. Nitrogen content.

2.3.3 植株营养器官氮素向穗部的转移 冬小麦抽穗-开花后,穗渐渐膨大,储存在营养器官茎叶中的氮素开始向穗部转移。由表3可看出,叶中氮转移率达到80%以上,且随着灌水量的增加,氮的转移率越高。高含水量延长了冬小麦的生育期,绿叶枯黄晚,I5在其他处理叶全部枯黄时,8.4%为绿叶,有利于后期叶中氮的转移。I1,I2,I3处理茎氮的转移率显著高于I4,I5处理,说明适度干旱有利于花

后茎中氮向穗部的转移。成熟期叶对穗的氮贡献率平均达到34%,I4,I5贡献率最高。茎对穗的氮贡献率与茎中氮的转移率趋势相似,灌水多的处理贡献率偏低,平均32%,叶片对穗的氮贡献率大于茎秆。花后至成熟期,冬小麦对土壤NO₃⁻-N有一定的吸收,花后同化氮素对的穗氮贡献率平均达34%,且随灌水量的增多有升高的趋势,但规律性不是很明显,有待于认真完善试验进一步研究。

表 3 成熟期冬小麦叶茎氮及花后同化氮量向穗的转移

处理 Treatment	叶 Leaf		茎 Stern		穗 Spike
	氮转移率	氮贡献率	氮转移率	氮贡献率	花后同化氮贡献率
	NTP	NCP	NTP	NCP	PNCP
I0	0.85ab	0.34a	0.79a	0.29c	0.37b
I1	0.78b	0.33a	0.81a	0.40a	0.27d
I2	0.79ab	0.32a	0.79a	0.42a	0.26d
I3	0.82ab	0.34b	0.64b	0.24d	0.42a
I4	0.84ab	0.37ab	0.74ab	0.33b	0.29c
I5	0.86a	0.35b	0.70b	0.25d	0.40ab

注：NTP. 氮转移率；NCP. 氮贡献率；PNCP. 花后同化氮贡献率。
Noe：NTP. Nitrogen translocation proportion；NCP. Nitrogen contribution proportion；PNCP. Post-anthesis nitrogen contribution proportion.

2.3.4 各处理氮素的吸收利用效率 由表 4 可看出,冬小麦成熟期灌水 I3 与不灌水 I0 处理间产量差异显著,I1、I2、I3、I4 之间无显著差异,I5 产量最高。随着灌水量的增多,氮素吸收效率、利用效率、水分利用效率各呈显先升高后降低、先降低后升高、逐渐降低的趋势。成熟期 I2、I3 处理氮的吸收效率显著高于其他处理,I0、I1 氮素的吸收效率低,是因为水分亏缺影响了氮肥的矿化和转移,而 I4、I5 灌水次数频繁,造成 NO₃⁻-N 的淋溶较严重,使得上层土壤 NO₃⁻-N 含量较低,两者都导致氮素的吸收受影响。I2、I3 氮利用效率较低,但氮的积累量较大,所以对作物最后产量没有影响。

表 4 灌水量对氮吸收利用效率的影响

处理 Treatment	产量	氮最大积累量	氮吸收效率	氮利用效率	水分利用效率
	/ (kg/ hm ²)	/ (kg/ hm ²)	/ (kg/ kg)	/ (kg/ kg)	/ (kg/ (hm ² ·mm))
	Yield	NAA	NIE	NUE	WUE
I0	6 892.71c	242.14b	1.08b	28.47a	27.00a
I1	6 953.54bc	250.35b	1.12b	27.93a	21.45b
I2	6 945.97bc	285.26a	1.27a	24.35b	19.35b
I3	6 992.47b	301.62a	1.35a	23.05b	15.15c
I4	7 213.90ab	258.54b	1.15b	27.90a	15.15c
I5	7 396.20a	252.67b	1.13b	29.27a	13.80c

注：NAA. 氮最大积累量；NE. 氮吸收效率；NUE. 氮利用效率；WUE. 水分利用效率。
Note：NAA. Nitrogen accumulation amount；NIE. Nitrogen absorption efficiency；NUE. Nitrogen utilization efficiency；WUE. Water utilization efficiency.

3 结果与讨论

许多水氮试验结果表明,施肥和灌水都影响 NO₃⁻-N 的积累和淋失,土壤供水量越大,土体 NO₃⁻-N 的淋洗量越大^[14,22]。郑成岩等^[23]研究表明,灌水处理 0~80 cm 的硝态氮含量显著低于不灌水处理,而 80 cm 以下显著高于不灌水处理。王晓英等^[4]试验结果显示,全生育期不灌水显著提高了 0~60 cm 土壤 NO₃⁻-N 的含量,灌水强度影响土壤 NO₃⁻-N 的淋失,每次灌水 60 cm,因为大量重力水下渗加剧了 NO₃⁻-N 的运移。本试验结果表明,在相同的施肥条件下,水分条件影响 0~60 cm 土层 NO₃⁻-N 含量和分布。土壤 NO₃⁻-N 含量随着灌溉量的增大而逐渐降低,灌 3 水至 5 水的处理,NO₃⁻-N 向下淋溶较厉害,在冬小麦返青后 0~60 cm 硝态氮含量较低,不利于作物对土壤氮素的吸收。土壤 NO₃⁻-N 主要集中分布在 20~40 cm 土层,灌 1 水和 2 水可以减缓 NO₃⁻-N 的下渗,且有利于冬小麦根系充分利用土壤上层养分。

开花至成熟阶段是小麦氮素吸收分配的关键时期,开花后营养器官氮素的转移对穗部氮素积累有较大贡献。前人有研究结果显示,小麦品种不同,植株氮素的积累量和转移率有很大差异,对多数小麦品种而言,籽粒氮素主要来源于花前营养器官贮藏氮素的转移,花后同化氮素也占一定比例^[24,25]。有研究表明,含水量高促进叶中氮向穗部的转移,而适度干旱有利于茎中氮的转移^[8-10],灌冻水可以提高植株花后吸收氮向籽粒中的转移量^[24]。李世娟等^[26]研究表明,各营养器官对籽粒氮的贡献率依次为叶片>茎秆>叶鞘>根系,其中叶片的氮素转移量最高。本试验结果表明,在播种至返青期降水量为 75.1 mm 的条件下,灌一次冬水与未灌冬水处理相比,石麦 7221 降低了开花前植株氮素积累量,分配比例处理间无显著差异。成熟期灌 2 水和 3 水的处理氮的积累量较高,但在穗部的分配比无显著差异。在开花至成熟期降水量为 48.1 mm 的条件下,灌浆水(70 mm)延缓了营养器官氮素向穗部的转移时期。灌水充分有利于叶氮向穗部的转移,

相对干旱有利于茎中氮的转移。叶茎对穗部氮的贡献率以及花后植株同化氮的贡献率分别为 34 % , 32 % , 34 % , 这与前人的研究结果一致^[15,16,26]。小麦的籽粒产量与氮素吸收利用效率密切相关,灌溉主要增加了生育中、后期的氮素吸收量,增加开花后的吸氮量有利于提高小麦产量和品质^[19]。较高的籽粒产量来自较高的氮素吸收效率和氮素再分配效率,水分亏缺显著降低了小麦的氮素吸收量和籽粒产量^[23]。本试验结果显示,灌水量越少,穗部全氮含量越高,不灌水处理穗全氮含量达到 2.09 % ,全氮含量的高低在一定程度上代表了小麦品质的好坏。灌 2 水和 3 水的处理氮素向籽粒的分配率较小,但氮的吸收效率较高,相反,灌 4 水和 5 水处理氮的吸收效率较低,但利用效率较高,最终小麦产量无显著差异。增加灌水次数和灌水量在一定程度上提高冬小麦产量,但水量过大,对氮吸收无益,且造成硝态氮的残留,要达到提高水氮吸收效率和高产的目的,灌 2 水和 3 水是较好的选择。

根据小麦生育期间降水量及其在不同生育阶段的分布,适当减少灌水量,提高水分利用效率,减少氮素无效淋失,提高氮素的吸收利用效率,最终达到高产节水的目的。此试验结果表明,在降雨较丰富的年份,尤其是在播种至返青期降雨充分时,可省去越冬水,拔节水和开花水,则可以达到较好的收益效果。或者是灌越冬、拔节和灌浆水,能提高氮的积累量,减少氮素的淋溶,是较好的灌溉措施。

参考文献:

- [1] 张忠学,于贵瑞. 华北高产粮区农用水资源可持续利用对策研究[J]. 资源科学, 2002, 24(1): 68 - 71.
- [2] 李志勇,陈建军,陈明灿. 不同水肥条件下冬小麦的干物质积累、产量及水氮利用效率[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 80 - 83.
- [3] 王晓凤,刘文良,潘志勇. 不同水氮处理对冬小麦生长及土壤水分利用效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 741 - 745.
- [4] 王晓英,贺明荣,刘永环. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 685 - 694.
- [5] 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, 8(8): 1339 - 1343.
- [6] Plaut Z, Butow B J, Blumenthal C S, et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature[J]. Field Crops Research, 2004, 86: 185 - 198.
- [7] 王晨阳,郭天财,彭羽. 花后灌水对小麦籽粒品质性状及产量的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1031 - 1035.
- [8] 贾丽华,费良军,程东娟. 不同灌溉施肥方式的土壤硝态氮分布特性试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 44 - 48.
- [9] 王丽英,张国印,刘微,等. 施肥和灌溉对冬小麦土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 河北农业科学, 2005, 9(5): 12 - 15.
- [10] 彭正萍,王艳群,薛世川,等. 不同施肥处理对冬小麦干物质积累及土壤养分垂直分布的影响[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(6): 95 - 99.
- [11] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, et al. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J]. Agronomy and Crop Science, 2005, 191: 439 - 449.
- [12] 赵俊晔,于振文. 不同强筋小麦品种产量、品质、和氮素利用的差异[J]. 华北农学报, 2006, 21(4): 58 - 61.
- [13] 王树亮,田奇卓,李娜娜. 不同小麦品种对氮素吸收利用差异及其分类研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(增刊): 213 - 219.
- [14] 王小燕,于振文. 不同施氮条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3015 - 3024.
- [15] 王月福,姜东,于振文. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 513 - 520.
- [16] Palta J A, Kobata, Turner N C, Fillery I R. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post-anthesis water deficit[J]. Crop Science, 1994, 34: 118 - 124.
- [17] Lloberas J, Lopez A, Ferran J, et al. Bread-making wheat and soil nitrate as affected by nitrogen fertilization in irrigated mediterranean conditions[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 1183 - 1190.
- [18] 沈建辉,戴廷波,荆奇. 施氮时期对专用小麦干物质和氮素积累、转运及产量和蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(1): 55 - 59.
- [19] 赵俊晔,于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 484 - 490.
- [20] 陈晓远,罗远培. 土壤水分变动对冬小麦干物质分配及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(1): 96 - 103.
- [21] 李世娟,周殿玺,李建民. 限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(3): 86 - 91.
- [22] Diez J A, Caballero R, Roman R, et al. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain[J]. Journal of Environment Quality, 2000, 29: 1539 - 1547.
- [23] 郑成岩,于振文,马兴华. 高产小麦耗水特征及干物质的积累与分配[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1450 - 1458.
- [24] 张永丽,于振文. 水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 870 - 878.
- [25] Smith C J, Whitfield D M. Nitrogen accumulation and redistribution of late applied of ¹⁵N labeled fertilizer by wheat[J]. Field Crop Research, 1990, 24: 211 - 228.
- [26] 李世娟,周殿玺,诸叶平. 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.