

不同生育时期干旱对冬小麦氮素吸收与利用的影响

刘恩科^{1,2} 梅旭荣^{1,2*} 龚道枝^{1,2} 严昌荣^{1,2} 庄 严^{1,2}

¹中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; ²农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081

摘要 以抗旱性强的‘石家庄8号’和抗旱性弱的‘偃麦20’冬小麦(*Triticum aestivum*)为材料, 在田间遮雨棚条件下, 研究返青-拔节期、拔节-开花期和灌浆后期3个生育期不同干旱程度对冬小麦产量、氮素吸收、分配和利用的影响。结果表明, 在干旱条件下, 抗旱性强的‘石家庄8号’产量高于抗旱性弱的‘偃麦20’, 并且其3个生育时期轻度干旱均可提高产量。拔节-开花期干旱对两个冬小麦品种氮素的吸收和运转影响均最大, 其次为返青-拔节期, 而灌浆后期影响较小。不同生育期中度和重度干旱均降低了花前贮藏氮素向籽粒中的转移, 并且氮肥利用效率和生产率也较低, 而在返青-拔节和灌浆后期轻度干旱有利于营养器官的氮素向籽粒中转移, 提高了氮肥利用效率和生产率。在干旱条件下, 抗旱性强的‘石家庄8号’籽粒氮素积累对花前贮藏氮素再运转的依赖程度高, 而‘偃麦20’对花后氮素的积累和转移依赖较高。综合产量和氮素的转移特点, 在生产实践中, 返青-拔节期和灌浆后期要注意对小麦进行适度的干旱处理, 在拔节-开花期要保证冬小麦的充分灌溉, 从而有利于氮素的积累和分配。

关键词 不同生育期, 氮素吸收, 利用, 水胁迫, 冬小麦

Effects of drought on N absorption and utilization in winter wheat at different developmental stages

LIU En-Ke^{1,2}, MEI Xu-Rong^{1,2*}, GONG Dao-Zhi^{1,2}, YAN Chang-Rong^{1,2}, and ZHUANG Yan^{1,2}

¹Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; and ²Key Laboratory of Dryland Agriculture, MOA, Beijing 100081, China

Abstract

Aims Our objective was to investigate the effects of different water stress levels on yield, N absorption, allocation and utilization in winter wheat cultivars ‘Shijiazhuang 8’ (drought resistant) and ‘Yanmai 20’ (drought sensitive) during different growth durations.

Methods We divided the growing stages of winter wheat into recovering-jointing, jointing-flowering and late filling. Soil water levels based on field capacity were 75%–80% (control, full water supply or well-watered), 65%–70% (light drought stress), 55%–60% (medium drought stress) and 40%–45% (severe drought stress) from winter wheat seeding to maturity and were controlled by irrigation and mobile rain shelters.

Important findings The drought resistant cultivar ‘Shijiazhuang 8’ had a higher grain yield than ‘Yanmai 20’ under drought stress, and medium drought stress in all the three durations can increase winter wheat yield. Drought stress in the jointing-flowering stage has the greatest effects on N assimilation and translocation in winter wheat, the second greatest being in the recovering-jointing stage, while that in late filling stage has few effects. Both medium and severe drought stress during different growth durations will lower the translocation of stored nitrogen before anthesis into grain, as well as N utilization rate and productivity; on the other hand, light drought stress in the recovering-jointing and late filling stages can improve the translocation of stored N into grain as well as N utilization rate and productivity. Under drought stress, N accumulation in grain of drought-resistant ‘Shijiazhuang 8’ relies more on the retranslocation of stored N before anthesis, while that of ‘Yanmai 20’ relies more on the N accumulation and translocation after anthesis. Considering yield and N translocation of wheat, light drought stress during the recovering-jointing and late filling stages is necessary, as well as sufficient irrigation during jointing-flowering stage, so as to improve N accumulation and partitioning.

Key word different growth durations, N absorption, utilization, water stress, winter wheat

氮素是土壤养分中影响作物生长的重要因子, 其与作物生长发育和器官建成密切相关(Guitman *et al.*, 1991; Hirel *et al.*, 2005)。氮代谢是植物生理活动的基本过程, 提高冬小麦(*Triticum aestivum*)氮肥利用效率是增加产量和改善品质的关键途径之一(Fischer, 1993; 孙振元等, 1996)。而水分不仅影响土壤中氮素的有效性, 而且影响着作物生长发育中氮素的吸收、转运和同化(Kang *et al.*, 2002; 王朝辉等, 2004; Schahram *et al.*, 2008)。Barber和Jessop (1987)及许振柱等(2004)研究认为适度的干旱有利于叶片氮素向籽粒中转移, 从而提高氮素的积累。范雪梅等(2006)研究发现, 在水分胁迫下, 冬小麦开花前营养器官贮藏的氮素再转运量和再转运率降低, 从而减少了籽粒氮素积累量和籽粒产量。杨晓亚等(2009)在田间试验条件下研究认为, 在拔节期和开花期各灌溉60 mm水, 而灌浆期不灌水, 籽粒氮素积累量较高。张永丽和于振文(2008)分析了在冬小麦生育期间降水量为196.10 mm条件下, 两种不同面筋弹性的冬小麦品种的氮素吸收效率、籽粒的氮素积累量和氮肥生产效率均为不灌水处理低于灌水处理。

前人对水分与冬小麦氮素吸收、分配和利用的关系多集中在冬小麦生长的某一生长阶段或生育期, 而对不同生育期不同干旱程度对冬小麦氮素吸收和利用的研究较少, 对不同基因型冬小麦的氮素代谢更鲜见报道, 因此本文选择两个抗旱性不同的冬小麦品种, 采用田间遮雨棚试验, 研究不同生育期不同干旱程度条件下, 冬小麦产量、氮素吸收、分配和利用的规律, 以为冬小麦水肥高效利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2007年10月–2008年6月在河北省农林科学院衡水旱作节水农业试验站内进行。该试验站位于深州市护驾迟镇北。深州市位于河北省东南部, 河北平原中部。该市属暖温带半湿润区, 四季分明, 冷热干湿差异明显, 是典型的大陆性季风气候。年平均温度为12.6 °C, 年平均日照时数为2 600.5 h, 年日照百分率为59%。5–9月各月平均日照均在210 h以上, 适宜农作物生长发育。全年太阳辐射总量为517.8 kJ·cm⁻², 年平均降水量为497 mm, 且季节和

年际分布不均。试验区土壤类型为潮土, 播前各小区土壤理化性质为: 有机质16.38 g·kg⁻¹、全氮0.677 g·kg⁻¹、速效磷4.83 g·kg⁻¹、速效钾90.0 mg·kg⁻¹、pH值8.12。

试验采用防雨池栽的方式, 防雨栽培池面积为6.66 m² (2.00 m × 3.33 m), 深3 m; 土层厚度为280 cm, 底层是20 cm的粗砂层, 并设有抽水管延出池外, 可将底层多余水分排出; 旱池四周及底部通过混凝土防渗结构与周边土体隔离, 可有效地排除垂向和侧向水分交换对试验的影响。旱池设有自动遮雨棚, 试验采用水表测定灌水量和排水量。

从生育进程和成熟期相近的北方地区22份冬小麦品种(基因型) (河北省农林科学院衡水旱作节水室提供)中, 筛选出典型的抗旱性强和抗旱性弱的2个品种作为供试品种: 抗旱性强的‘石家庄8号’和抗旱性弱的‘偃麦20’。对其3个主要生育阶段: 返青-拔节期、拔节-开花期和灌浆后期分别做不同梯度的水分处理。试验共设10个处理(表1), 3次重复。各处理统一定量灌溉播前水和越冬水, 时间分别为10月10日和12月1日。返青期、拔节-开花期以及灌浆期分别在次年3月2日、4月15日和5月15日进行灌溉, 从而使得各处理达到不同程度的干旱。其中, 在返青-拔节期灌水量分别为20、30、40、50 mm以及拔节-开花期和灌浆期灌水量分别为40、60、80、100 mm。分别相当于田间持水量的40%–45% (重度干旱)、55%–60% (中度干旱)、65%–70% (轻度干旱)和75%–80% (充分灌溉)。为保持小麦各生育期轻、中、重度干旱水平, 各处理在开始进行水分处理后, 每隔5天测量1.6 m深土壤相对含水量, 补充水分达到各处理要求, 并保持稳定的含水量。

冬小麦播种时间为2007年10月24日, 收获时间为2008年6月8日。化肥于播种前一次性施入, 施肥量为: 硝酸磷肥(N 26.5%, P₂O₅ 11.5%) 830 kg·hm⁻², 钾镁肥(K₂O 8%, MgO 6%) 375 kg·hm⁻², 有机肥为豆粕有机肥600 kg·hm⁻² (折合养分含量: N 5.0 kg·hm⁻², P₂O₅ 1.5 kg·hm⁻², K₂O 1.2 kg·hm⁻²)。处理时每个栽培池种12行, 每个品种6行, 平均行距为25 cm, 播种密度为2.98 × 10⁶株·hm⁻², 其余管理措施同一般高产大田。

1.2 测定项目和方法

在开花期和成熟期取样, 按叶、茎鞘+颖壳+穗轴、籽粒等器官分样, 105 °C杀青20 min, 80 °C下烘

表1 不同干旱水平的冬小麦处理

Table 1 Different drought levels of winter wheat treatments

处理 Treatment	生育阶段 Growth duration		
	返青-拔节期 Recovering-jointing	拔节-开花期 Jointing-flowering	灌浆后期 Late filling
	T ₁	40%–45%	75%–80%
T ₂	55%–60%	75%–80%	75%–80%
T ₃	65%–70%	75%–80%	75%–80%
T ₄	75%–80%	40%–45%	75%–80%
T ₅	75%–80%	55%–60%	75%–80%
T ₆	75%–80%	65%–70%	75%–80%
T ₇	75%–80%	75%–80%	40%–45%
T ₈	75%–80%	75%–80%	55%–60%
T ₉	75%–80%	75%–80%	65%–70%
T ₁₀	75%–80%	75%–80%	75%–80%

表2 不同生育期不同水分条件下对冬小麦产量的影响(kg·hm⁻²)Table 2 Effects of different water treatments on yields in winter wheat during different growth durations (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	‘偃麦20’ ‘Yanmai 20’	‘石家庄8号’ ‘Shijiazhuang 8’
T1	5 375 ^d	6 100 ^e
T2	6 725 ^c	7 150 ^c
T3	7 675 ^a	8 250 ^b
T4	6 475 ^c	7 275 ^{cd}
T5	6 725 ^c	7 550 ^c
T6	7 125 ^b	8 200 ^b
T7	6 500 ^c	7 100 ^c
T8	6 550 ^c	7 575 ^c
T9	7 425 ^a	8 450 ^a
T10	7 450 ^a	8 150 ^b

处理同表1。表中小写字母表示5%水平的差异显著性。

Treatments see Table 1. The small letters represent significant different at 5% level.

干至恒重, 称重。采用浓硫酸消煮, 半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量(鲍士旦, 2002), 计算植株各器官氮素含量积累总量和运移量(霍中洋等, 2004)。

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 (1)

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% (2)

营养器官氮素贡献率(%)=营养器官氮素转移量/成熟期籽粒氮素积累量×100% (3)

氮肥生产效率(kg·kg⁻¹)=籽粒产量(kg·hm⁻²)/施氮量(kg·hm⁻²) (4)

氮肥利用效率(%)=(施肥区地上植株氮积累量-不施肥区地上植株氮积累量)/施氮量×100% (5)

土壤氮贡献率(%)=不施肥区地上植株氮积累量/施肥区地上植株氮积累量×100% (6)

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2003 处理数据、图表, 采用SPSS17.0数据处理系统进行统计分析和差异显著性检验。

2 结果和分析

2.1 产量

从表2中可以看出, 与全生育期充分灌溉相比, 抗旱性弱的‘偃麦20’在返青期轻度干旱时产量高于全生育期充分灌溉, 其他各时期干旱缺水均会造成产量的降低。抗旱性较强的‘石家庄8号’在返青期-拔节期、拔节期-开花期和灌浆期轻度干旱时, 均可提高冬小麦的产量, 其中灌浆期轻度干旱可显著提高冬小麦产量, 与全生育期充分灌溉相比, 冬小麦产量提高了3.68%。两个冬小麦品种均为返青期-拔节期不同程度干旱处理冬小麦平均产量最低, 其次为拔节期-开花期, 灌浆期最高, 说明返青期-拔节期灌溉对小麦产量具有重要的影响。

品种间比较, ‘石家庄8号’各处理的小麦产量均高于‘偃麦20’的相应处理。不同生育期中度和重度干旱条件下, ‘石家庄8号’处理的小麦产量的下降幅度低于‘偃麦20’处理。

2.2 冬小麦各器官氮含量

从表3中可以看出, 不同生育期干旱影响冬小麦各部位氮的含量, ‘偃麦20’和‘石家庄8号’均为拔节-开花期不同程度干旱籽粒中氮含量最低, 而灌浆期不同干旱处理籽粒中氮含量平均值最高; 与全生育期充分灌溉相比(T10), 两个品种在返青期不同程度干旱均提高了冬小麦叶片和茎鞘+颖壳+穗轴中氮的含量, 说明这个生育期间的干旱不利于冬小麦后期氮素向籽粒中的转移。在拔节-开花期、灌浆期不同干旱处理中, 重度干旱籽粒中的氮含量最低, 而轻度干旱籽粒中的氮含量最高, 并且其含量高于全生育期充分灌溉的处理, 说明冬小麦适度干旱有利于提高籽粒中的氮含量。

品种间比较, ‘偃麦20’的籽粒平均氮含量略高于‘石家庄8号’, 而叶片和茎鞘+颖壳+穗轴中氮的含量差异不大。

表3 不同生育期不同水分条件下对冬小麦各器官氮含量的影响(g·kg⁻¹)**Table 3** Effects of different water treatments on nitrogen content in different organs at maturity in winter wheat during different growth durations (g·kg⁻¹)

品种 Cultivar	处理 Treatment	籽粒 Grain	叶 Leaf	茎鞘+颖壳+穗轴 Stem, spike and glume
‘偃麦20’ ‘Yanmai 20’	T1	23.7 ^c	10.7 ^a	4.8 ^b
	T2	23.8 ^c	9.9 ^{ab}	4.6 ^{bc}
	T3	23.6 ^c	10.7 ^a	4.3 ^c
	T4	19.2 ^d	9.4 ^b	4.7 ^b
	T5	22.6 ^c	9.2 ^b	4.9 ^b
	T6	23.1 ^c	8.4 ^c	4.1 ^c
	T7	27.7 ^b	6.8 ^c	4.8 ^b
	T8	29.6 ^a	7.9 ^c	5.6 ^a
	T9	28.1 ^b	7.6 ^{cd}	5.1 ^b
	T10	28.2 ^b	8.0 ^c	4.0 ^c
‘石家庄8号’ ‘Shijiazhuang 8’	T1	21.6 ^c	10.3 ^a	5.8 ^a
	T2	20.0 ^d	9.9 ^a	3.9 ^c
	T3	20.4 ^{cd}	10.1 ^a	4.9 ^b
	T4	18.3 ^e	7.8 ^b	5.2 ^{ab}
	T5	18.8 ^e	8.2 ^b	4.4 ^b
	T6	19.8 ^d	8.5 ^b	4.6 ^b
	T7	22.6 ^b	8.5 ^b	4.3 ^b
	T8	23.6 ^b	8.7 ^b	4.8 ^b
	T9	24.7 ^a	8.3 ^b	4.5 ^b
	T10	24.1 ^{ab}	8.2 ^b	4.4 ^b

表注见表2。

Notes see Table 2.

2.3 氮素在不同器官中的分配

从表4中可以看出,两个冬小麦品种均为轻度干旱时植株氮素总积累量最高,其次为中度干旱,而严重干旱时植株氮素总积累量最低。籽粒氮素积累量的变化规律与植株氮素总积累量相似,说明干旱程度越严重越不利于植株积累较多的氮素,并且影响到籽粒中氮素的积累。籽粒中氮素积累量的变化与氮含量变化不同(表3),籽粒中氮含量并不完全是随着干旱程度的加重而降低的,所以在研究氮素的分配规律时,从群体的角度更能有效地分析冬小麦各器官氮素积累和分配规律。由于拔节-开花期不同干旱程度的冬小麦植株中各器官的氮素含量较低,所以这两个冬小麦品种植株氮积累并不高。灌浆后期不同干旱程度的植株氮积累量显著高于返青-拔节和拔节-开花期不同干旱程度的植株中的氮积累量,这说明开花前不同程度的干旱均影响冬小

麦对氮素的吸收和利用。

不同抗旱性冬小麦品种比较,虽然‘石家庄8号’各处理的产量较高,但由于籽粒中的氮含量比‘偃麦20’低,所以其群体氮的积累并不高。

2.4 花前植株贮藏氮素向籽粒转移

从表5中可以看出,两个冬小麦品种开花前营养器官氮素向籽粒中的转移量、转移率和贡献率均为轻度干旱>中度干旱>重度干旱,这表明干旱程度越严重,越不利于开花前贮藏的氮素向籽粒中转移。但是,在返青-拔节和灌浆后期的轻度干旱条件下氮素转运率和贡献率高于全生育期灌溉,说明在冬小麦的某些生育期,适度干旱有利于营养器官的氮素向籽粒中转移。

拔节-开花期干旱胁迫,开花前营养器官氮素向籽粒中的平均转移量、转移率和贡献率最低,说明在此生育期干旱显著影响氮素的转移。与拔节-开花期相比,灌浆期干旱条件下,开花前营养器官氮素向籽粒中的平均转移量、转移率和贡献率最小,其次为返青-拔节期。

抗旱性不同的两个冬小麦品种比较,抗旱性强的‘石家庄8号’各处理的平均氮素转运率和贡献率分别为67.4%和77.6%,高于抗旱性弱的‘偃麦20’,这表明抗旱性强的‘石家庄8号’在干旱时开花前植株贮藏氮素向籽粒转运的能力大于抗旱性弱的‘偃麦20’。

2.5 氮肥利用

表6显示,在冬小麦返青-拔节期、拔节-开花期以及灌浆后期严重干旱条件下,冬小麦的氮肥利用效率和氮肥生产效率最低,其次为中度干旱,而轻度干旱条件下氮肥利用效率和氮肥生产效率最高,并且在返青-拔节期和灌浆后期轻度干旱条件下,氮肥利用效率和氮肥生产效率显著高于全生育期充分灌溉。土壤氮贡献率的规律与氮肥利用效率和氮肥生产效率相反,干旱程度越严重,土壤氮贡献率越高,说明在水分充足的条件下,冬小麦更多地利用施入的外源氮。

‘偃麦20’的平均氮肥利用效率和氮肥生产效率高于‘石家庄8号’,但土壤氮贡献率低于‘石家庄8号’。

3 讨论

不同生育期不同程度的干旱,影响冬小麦物质

表4 不同生育期不同水分条件下对成熟期氮素在冬小麦不同器官中的分配的影响

Table 4 Effects of different water treatments on nitrogen distribution in different organs at maturity in winter wheat during different growth durations

品种 Cultivar	处理 Treatment	籽粒 Grain		叶片 Leaf		茎鞘+颖壳+穗轴 Stem, spike and glume		总积累量 Total accumulation amount (kg·hm ⁻²)
		积累量 Accumulation amount (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion (%)	积累量 Accumulation amount (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion (%)	积累量 Accumulation amount (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion (%)	
'偃麦20' 'Yanmai 20'	T1	127.2 ^c	81.1	10.2 ^d	6.5	19.4 ^c	12.4	156.8
	T2	160.4 ^c	81.8	11.2 ^d	5.7	24.4 ^d	12.5	196.0
	T3	181.0 ^c	82.7	16.1 ^b	7.3	21.8 ^e	9.9	218.9
	T4	124.4 ^c	76.8	10.8 ^d	6.7	26.8 ^d	16.5	161.9
	T5	151.8 ^d	79.5	11.0 ^d	5.8	28.2 ^d	14.8	191.0
	T6	164.3 ^d	83.6	10.1 ^d	5.2	22.1	11.2	196.4
	T7	179.8 ^c	78.2	13.2 ^d	5.7	37.0 ^b	16.1	230.0
	T8	194.0 ^b	76.6	14.6 ^{cd}	5.8	44.6 ^a	17.6	253.2
	T9	208.6 ^a	78.2	20.1 ^a	7.5	38.2 ^b	14.3	266.8
	T10	210.2 ^a	82.1	15.8 ^b	6.2	30.0 ^c	11.7	256.0
'石家庄8号' 'Shiji-anzhuang 8'	T1	131.6 ^c	76.6	8.9 ^d	5.2	31.3 ^c	18.2	171.8
	T2	143.0 ^c	79.4	11.7 ^c	6.5	25.4 ^d	14.1	180.1
	T3	168.1 ^d	78.6	12.0 ^c	5.6	33.8 ^b	15.8	213.8
	T4	133.0 ^c	80.0	6.9 ^c	4.1	26.3 ^d	15.8	166.2
	T5	141.9 ^c	81.5	8.1 ^d	4.7	24.0 ^d	13.8	174.0
	T6	162.0 ^d	81.8	9.5 ^d	4.8	26.5 ^d	13.4	198.1
	T7	160.4 ^d	76.1	15.5 ^a	7.3	34.8 ^a	16.5	210.7
	T8	178.7 ^c	77.7	15.5 ^a	6.7	35.7 ^a	15.5	229.9
	T9	208.5 ^a	80.7	14.6 ^a	5.6	35.4 ^a	13.7	258.5
	T10	196.1 ^b	81.7	13.8 ^b	5.7	30.2 ^c	12.6	240.0

表注见表2。

Notes see Table 2.

的运转和分配,进而影响冬小麦的产量。郑成岩等(2008)和Yang等(2000)研究认为,在某些生育期适当的干旱可促进同化物的运转,提高作物的收获指数。本研究结果表明,返青-拔节期两个冬小麦品种轻度干旱控制均可提高产量,这表明在拔节前适当控水有利于控制冬小麦营养生长过旺,促进光合产物向根分配,加快分蘖两极分化,改善群体结构。不同基因型的冬小麦品种干旱程度不同对产量的影响也不同,抗旱性强的'石家庄8号'品种在拔节-开花期和灌浆期轻度干旱也可提高产量,而抗旱性弱的'偃麦20'仅在返青期-拔节期轻度干旱控制才可提高产量。

许振柱等(2004)和Palta等(1994)研究认为土壤水分亏缺可促进叶片氮素向籽粒中转移,提高籽粒氮素水平。王朝辉等(2004)研究认为不同生育期缺

水均会降低冬小麦的氮吸收和积累。李世娟等(2002)在不遮雨条件下进行试验,结果表明拔节和开花期各灌水750 m³·hm⁻²比返青、拔节、开花、灌浆期各灌水750 m³·hm⁻²有利于氮素向籽粒的转移。本研究认为,水分对冬小麦氮素的吸收和利用的影响,要根据不同生育期干旱程度而定。严重干旱可导致植株提早进入成熟期,降低对水分胁迫的适应性(许振柱等,1995),从而影响植株对氮素的吸收利用,这与前人的研究结果一致(杨晓亚等,2009)。而在返青-拔节期以及灌浆后期轻度干旱,两种不同抗旱性的冬小麦品种籽粒和植株中氮的积累并没有降低,并且显著高于全生育期充分灌溉的处理,这是由于轻度干旱限制了叶片早衰,促进了光合性能,形成了较高的产量(许振柱等,2004),从而氮的积累也较高。

表5 不同生育期不同水分条件下对冬小麦花前植株贮藏氮素向籽粒转移的影响**Table 5** Effects of different water treatments on translocation of stored nitrogen before anthesis in winter wheat during different growth durations

品种 Cultivar	处理 Treatment	转移量 Translocation (kg·hm ⁻²)	转移率 Translocation efficiency (%)	贡献率 Contribution proportion (%)
‘偃麦20’ ‘Yanmai 20’	T1	88.0 ^c	60.7 ^d	69.2 ^c
	T2	116.8 ^d	66.5 ^b	72.8 ^c
	T3	141.4 ^{bc}	69.0 ^{ab}	78.1 ^b
	T4	71.3 ^f	52.3 ^f	57.3 ^e
	T5	96.4 ^e	54.2 ^f	63.5 ^d
	T6	115.2 ^d	57.5 ^e	70.1 ^c
	T7	136.3 ^c	62.5 ^{cd}	75.8 ^b
	T8	150.4 ^b	66.4 ^b	77.6 ^b
	T9	169.1 ^a	71.9 ^a	81.1 ^a
	T10	162.0 ^a	67.4 ^b	77.1 ^b
‘石家庄8号’ ‘Shijiaz- huang 8’	T1	96.4 ^f	62.3 ^d	73.2 ^d
	T2	108.5 ^e	68.5 ^{cd}	75.9 ^{cd}
	T3	140.9 ^c	72.0 ^b	83.8 ^{ab}
	T4	90.8 ^f	59.3 ^e	68.3 ^c
	T5	100.4 ^e	65.2 ^d	70.8 ^d
	T6	122.9 ^d	66.5 ^d	75.9 ^{cd}
	T7	125.5 ^d	64.7 ^d	78.3 ^c
	T8	146.0 ^c	70.2 ^b	81.7 ^b
	T9	180.0 ^a	74.8 ^a	86.3 ^a
	T10	161.2 ^b	70.0 ^b	82.2 ^b

表注见表2。

Notes see Table 2.

对多数冬小麦品种而言,籽粒氮素的主要来源是利用开花前营养器官贮藏氮素的再运转,开花后吸收同化的氮素也占一定比例(Smith & Whitfield, 1990; 许振柱等, 2004)。赵辉等(2007)研究发现干旱提高了冬小麦营养器官花前贮藏氮素的运转量和运转率。张永丽和于振文(2008)研究认为在冬小麦生育期间降水量为196.10 mm的条件下,不灌水处理比灌水处理提高了两品种开花前植株贮存氮素向籽粒的转移率。而Seligman和Sinclair (1995)研究认为花后干旱不利于氮素的转移,降低了籽粒中的氮积累量。本试验研究表明,干旱程度不同对花前营养器官氮素向籽粒的转运量和转运率也不同。不同生育期中度和重度干旱均影响花前贮藏氮素向籽粒中的转移,而在返青-拔节和灌浆后期轻度干旱有利于营养器官的氮素向籽粒中转移。干旱条件

表6 不同生育期不同水分条件下对冬小麦氮素利用效率的影响**Table 6** Effects of different water treatments on nitrogen use efficiency in winter wheat during different growth durations

品种 Cultivar	处理 Treatment	氮肥利用 效率 N fertilizer utilization rate (%)	氮肥生产 效率 N fertilizer productive efficiency (kg·kg ⁻¹)	土壤氮 贡献率 Soil N contribution rate (%)
‘偃麦20’ ‘Yanmai 20’	T1	24.7 ^f	23.9 ^e	64.6 ^a
	T2	42.1 ^d	29.9 ^b	51.7 ^b
	T3	52.3 ^e	34.1 ^a	46.3 ^c
	T4	26.9 ^f	28.8 ^b	62.6 ^a
	T5	39.9 ^e	29.9 ^b	53.0 ^b
	T6	42.3 ^d	31.7 ^b	51.6 ^b
	T7	57.2 ^c	28.9 ^b	44.0 ^c
	T8	67.5 ^b	29.1 ^b	40.0 ^c
	T9	73.6 ^a	33.0 ^a	38.0 ^c
	T10	68.7 ^b	33.1 ^a	39.6 ^c
‘石家庄 8号’ ‘Shijiaz- huang 8’	T1	36.3 ^f	27.1 ^c	52.4 ^{ab}
	T2	40.1 ^d	31.8 ^b	50.0 ^b
	T3	55.0 ^c	36.7 ^a	42.1 ^c
	T4	33.9 ^f	32.3 ^b	54.2 ^a
	T5	37.3 ^e	33.6 ^b	51.7 ^b
	T6	48.0 ^d	36.4 ^a	45.4 ^c
	T7	53.6 ^c	31.6 ^b	42.7 ^c
	T8	62.2 ^b	33.7 ^b	39.2 ^d
	T9	74.9 ^a	37.6 ^a	34.8 ^d
	T10	66.7 ^b	36.2 ^a	37.5 ^d

表注见表2。

Notes see Table 2.

下抗旱性不同的冬小麦品种对花前贮藏氮素的转移也有影响,抗旱性较强的‘石家庄8号’,氮素转运率和贡献率高于抗旱性较弱的‘偃麦20’,说明‘石家庄8号’籽粒氮素积累对花前贮藏氮素再运转的依赖程度高,而‘偃麦20’对花后氮素的积累和转移依赖程度较高。

不同生育期干旱对氮素的吸收和利用影响也不同。王朝辉等(2004)研究认为在分蘖、越冬、拔节和灌浆期缺水时,冬小麦吸氮量依次降低40.6%、11.5%、72.0%和49.4%。本研究认为,不同的抗旱品种均在拔节-开花期干旱对冬小麦氮素的吸收和运转影响最大,其次为返青-拔节期,而灌浆后期影响较小。这主要是因为,在拔节-开花期冬小麦是营养生长与生殖生长并进时期,对水肥的需求量较大且反应较为敏感,因此影响了氮素的吸收和转移。灌

溉后期适度干旱不仅可以促进开花前营养器官氮素向籽粒中的转移, 还可以有效地利用开花后氮素的转移, 所以灌溉后期干旱各处理的植株氮素的积累量并不低, 特别是轻度干旱还有利于氮素的积累。返青-拔节期适度的干旱可以有效地调节冬小麦的群体结构, 当冬小麦后期进行充分灌溉时, 也有利于氮素的积累, 但在此时期严重干旱时, 降低了冬小麦有效分蘖的成活率, 虽然单茎营养器官可以积累较多的氮素, 但由于冬小麦群体数量降低, 所以氮的吸收和利用率也不高。

张永丽等(2008)研究认为不同灌水处理对氮素吸收利用和产量的影响因品种而异, 适宜的灌水处理可提高冬小麦的籽粒产量和氮素利用效率。本研究表明两种不同抗旱品种的冬小麦氮肥利用率和生产效率没有显著的差别, 但干旱程度不同对两个冬小麦品种的氮肥利用率和生产效率具有显著的影响。返青-拔节期、拔节-开花期以及灌浆后期干旱程度越轻, 氮肥利用效率和生产率越高, 特别是在返青-拔节期和灌浆后期轻度干旱条件下氮肥利用效率和生产率高于全生育期充分灌溉的处理。

本研究是在遮雨棚中进行的, 在试验过程中严格控制土壤水分含量, 从而使得设计达到轻、中、重度干旱水平。并且本试验各种管理措施均按照大田条件下进行, 所以本试验的结果可以有效地在大田中应用。因此在生产实践中, 返青-拔节期和灌浆后期要注意对冬小麦进行适度的干旱处理, 这样有利于冬小麦生长前期的群体结构调整以及防止生长后期灌水过多引起冬小麦贪青晚熟, 在拔节-开花期要保证冬小麦的充分灌溉, 以利于干物质和养分的转移。

致谢 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006-BAD29B01和2006BAD29B02)、国家自然科学基金(30871447)、中国博士后科学基金(20080440461)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目共同资助。

参考文献

- Bao SD (鲍士旦) (2000). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* (土壤农化分析). China Agricultural Press, Beijing. (in Chinese)
- Barber JS, Jessop RS (1987). Factors affecting yield and quality in irrigated wheat. *Journal of Agricultural Science*, 109, 19–26.
- Fan XM (范雪梅), Jiang D (姜东), Dai TB (戴廷波), Jing Q (荆奇), Cao WX (曹卫星) (2006). Effects of nitrogen on grain yield and quality in wheat grown under drought or water logging stress from anthesis to maturity. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 30, 71–77. (in Chinese with English abstract)
- Fischer RA (1993). Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research*, 33, 57–80.
- Guitman MR, Arnozis PA, Barneix AJ (1991). Effect of source-sink relations and nitrogen nutrition on senescence and N remobilization in the flag leaf of wheat. *Physiologia Plantarum*, 82, 278–284.
- Hirel B, Andrieu B, Valadier MH, Renard S, Quillere I, Chelle M, Pommel B, Fournier C, Drouet JL (2005). Physiology of maize II. identification of physiological marker representative of the nitrogen status of maize (*Zea mays*) leaves during grain filling. *Physiologia Plantarum*, 124, 178–188.
- Huo ZY (霍中洋), Ge X (葛鑫), Zhang HC (张洪程), Xu K (许轲), Gong ZK (龚振恺) (2004). Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 30, 449–454. (in Chinese with English abstract)
- Kang SZ, Zhang L, Liang YL, Hu XT, Cai HJ, Gu BJ (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 55, 203–216.
- Li SJ (李世娟), Zhou DX (周殿玺), Zhu YP (诸叶平), Li JM (李建民), Lan LW (兰林旺) (2002). Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat. *Acta Agriculturae Boreall-Sinica* (华北农学报), 17(1), 69–75.
- Palta JA, Kobata T, Turner NC, Fillery IR (1994). Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. *Crop Science*, 34, 118–124.
- Schahram B, Sharyar B, Peter W, Konrad M (2008). Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 28, 1–7.
- Seligman NG, Sinclair TR (1995). Global environment change and simulated forage quality of wheat II. Water and nitrogen stress. *Field Crops Research*, 40, 29–37.
- Smith CJ, Whitfield DM (1990). Nitrogen accumulation and redistribution of late applications of ¹⁵N-labelled fertilizer by wheat. *Field Crops Research*, 24, 211–228.
- Sun ZY (孙振元), Han BW (韩碧文), Liu SL (刘淑兰), Wang HF (王华芳), Gao RF (高荣孚) (1996). Absorption and redistribution of nitrogen during grainfilling period of wheat and their regulation by 6-benzylaminopurine. *Acta Phytobiologica Sinica* (植物生理学报), 22, 258–264. (in Chinese with English abstract)

- Wang CH (王朝辉), Wang B (王兵), Li SX (李生秀) (2004). Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 15, 1339–1343. (in Chinese with English abstract)
- Xu ZZ (许振柱), Wang CA (王崇爱), Li H (李晖) (2004). Effects of soil drought on photosynthesis, nitrogen and nitrogen translocation efficiency in wheat leaves. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 22 (4), 75–79. (in Chinese with English abstract)
- Xu ZZ (许振柱), Yu ZW (于振文), Qi XH (齐新华), Yu SL (余松烈) (1995). Effect of soil drought on ethylene evolution, polyamine accumulation and cell membrane in flag leaf of winter wheat. *Acta Phytophysiologica Sinica* (植物生理学报), 21, 295–301. (in Chinese with English abstract)
- Yang JC, Zhang JH, Huang ZL, Zhu QS, Wang L (2000). Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. *Crop Science*, 40, 1645–1655.
- Yang XY (杨晓亚), Yu ZW (于振文), Xu ZZ (许振柱) (2009). Effects of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen accumulation and allocation in wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 846–853. (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL (张永丽), Yu ZW (于振文) (2008). Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 34, 870–878. (in Chinese with English abstract)
- Zhao H (赵辉), Dai TB (戴廷波), Jiang D (姜东), Jing Q (荆奇), Cao WX (曹卫星) (2007). Effects of drought and waterlogging on flag leaf post-anthesis photosynthetic characteristics and assimilates translocation in winter wheat under high temperature. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 18, 333–338. (in Chinese with English abstract)
- Zheng CY (郑成岩), Yu ZW (于振文), Ma XH (马兴华), Wang XZ (王西芝), Bai HL (白洪立) (2008). Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 34, 1450–1458. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 李晓林 责任编辑: 李 敏