生 态 学 报 2010,30(8):1955—1965
Acta Ecologica Sinica

不同施氮量下灌水量对小麦耗水特性和氮素分配的影响

马兴华[1], 王 东[1,*], 于振文[1], 王西芝[2], 许振柱[3]

(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, 泰安 271018;
2. 山东省兖州市农业科学研究所, 兖州 272000; 3. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 10009)

摘要:研究了不同施氮量条件下灌水量对高产小麦耗水特性和氮素分配利用的影响。设置4个施氮水平:0 kg·hm^{-2}(N0)、120 kg·hm^{-2}(N1)、210 kg·hm^{-2}(N2)和300 kg·hm^{-2}(N3),在每个施氮水平下设置4个灌水量处理:不浇水(W0)、底墒水+拔节水(W1)、底墒水+拔节水+开花水(W2)、底墒水+拔节水+开花水+灌浆水(W3),每次灌水量60 mm。结果表明:(1)在N0水平下W0处理日耗水量以拔节至开花期最高,在N1水平下,拔节至开花期日耗水量与开花至成熟期的无显著差异。同一施氮水平下,小麦开花后总耗水量、耗水模系数和日耗水量随灌水量的增加而提高,但产量随灌水量的增加先升高后降低。(2)同一施氮水平下,成熟期W1处理20—140 cm各土层土壤含水量低于W2和W3处理,140—200 cm土层土壤含水量与W2处理无显著差异;W1处理0—40 cm土层土壤硝态氮含量及植株氮素在籽粒中的分配比例高于W2和W3处理,100—140 cm土层土壤硝态氮含量及植株氮素在营养器官中的分配量和分配比例低于W2和W3处理。表明灌溉底墒水和拔节水的W1处理,促进了小麦对20—140cm土层土壤水的吸收利用,减少了土壤硝态氮向100 cm以下土层的淋溶,而且有利于营养器官中氮素向籽粒的再分配,水分和氮素利用效率较高。(3)在试验条件下,施纯氮210kg·hm^{-2}、灌溉底墒水和拔节水的N2W1处理,籽粒产量最高,水分利用效率和氮素利用效率较高,可供生产中参考。

关键词:小麦;灌水量;施氮量;耗水特性;水分和氮素利用效率

Effect of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen distribution in wheat at different nitrogen applications

MA Xinghua[1], WANG Dong[1,*], YU Zhenwen[1], WANG Xizhi[2], XU Zhenzhu[3]

1 *Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Production, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong* 271018, *China*

2 *Institute of Agricultural Sciences of Yanzhou City, Yanzhou* 272000, *China*

3 *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100093, *China*

Abstract: The irrigation effects on water consumption characteristics and nitrogen distribution and utilization in wheat plants at different nitrogen application rates in the high-yielding conditions were studied. Four treatments of nitrogen levels were set: 0 kg hm^{-2}(N0), 120 kg·hm^{-2}(N1), 210 kg·hm^{-2}(N2), and 300 kg·hm^{-2}(N3); and four irrigation rates were set under each nitrogen level: no water (represented as W0), basal + jointing water (W1), basal + jointing + anthesis water (W2), basal + jointing + anthesis + filling stage water (W3), at 60mm every time. The results show that: (1) On W0 conditions, the water consumption amount (WCA) per day of N0 treatment during the period from jointing to anthesis was higher than those during other periods, the WCA per day of N1 treatment during the period from jointing to anthesis had no significant difference from those during the period from anthesis to maturity. At the same nitrogen application rate, the total WCA, module index, WCA per day after anthesis and the yield were increased as the irrigation rate increased, but the yield was decreased as more water was irrigated at the middle of filling stage. (2) At the same

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30871478);农业部现代农业小麦产业技术体系资助项目(nycytx-03)

收稿日期:2009-03-02; **修订日期**:2009-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:

nitrogen application rate, soil water content in 20—140 cm soil layer of W1 treatment at maturity was lower than those of W2 and W3 treatments, but that in 140—200 cm had no significant difference from that of the W2 treatment. Soil NO_3-N content in 0—40cm soil layer of W1 treatment at maturity was higher than those of W2 and W3 treatments, whereas that in100—140 cm soil layer was lower than those of W2 and W3 treatments; the amount and the percentage of nitrogen distributed in vegetative organs of W1 were lower than those of W2 and W3, but those distributed in kernels were higher relative to W2 and W3. It was showed that irrigation at pre-sowing and jointing promoted the absorption and utilization of water from 20 — 140cm soil layer, reduced soil nitrate leaching below 100 cm soil layer, and increased the nitrogen redistributed from vegetative organs to kernels, water/nitrogen-use efficiencies. (3) In the experiment, with irrigation at pre-sowing and jointing and nitrogen application at 210 kg·hm^{-2} rate, the highest yield and greater water/nitrogen-use efficiencies would be achieved.

Key Words: wheat; irrigation; nitrogen application; water consumption characteristics; water-use efficiency; nitrogen use efficiency

水分和氮素是调控小麦籽粒产量的重要因素;二者之间存在明显的交互作用[1-3]。一方面土壤水分状况影响小麦的氮素吸收、转运和利用[4];另一方面适当增施氮肥可以在一定程度上减小土壤水分不足对产量的负效应[5]。但目前小麦生产中,为了追求高产,存在水肥投入量过大,小麦产量、水分和氮肥利用率低的问题[6-7]。

已有试验表明在一定灌溉条件下,每公顷施氮量由 0 kg 增至 240 kg,随施氮量增加,小麦植株总吸氮量、氮肥吸收量、氮肥耕层残留量、氮肥损失量以及损失率均升高,而氮肥利用率和耕层残留率下降[8]。同时,灌水促进施氮处理土壤硝态氮向下迁移[9-10]。在 378—504 mm 灌溉水平下,当施氮量大于 221 kg·hm^{-2}时会导致收获期硝态氮在根层土壤剖面的显著积累;在灌溉量为 630 mm 时,收获期各处理根层土壤硝态氮的积累量均低于播种前[11]。赵炳梓等[12]的研究表明,小麦的水分利用率随灌溉水量的增加而降低。但当灌溉水平较低时,水分利用率随着施氮量增加呈上升趋势。杨晓亚等[13]的研究表明,随灌水量的增加,总耗水量逐渐增加,土壤耗水量和降水量占总耗水量的比例降低。适当灌溉提高了小麦对降水的利用比例,降低了对灌溉水的利用比例。但有关小麦耗水特性与水氮利用的关系,及灌水量与施氮量交互作用对小麦耗水特性和水肥利用效率影响的研究尚少。本文在前人研究的基础上,探讨高产麦田不同水氮处理条件下 0—200cm 土层土壤水分变化动态、小麦耗水特性、氮素积累与分配及土壤硝态氮淋溶特点,以期明确不同施氮量条件下灌水量对水分和氮素利用效率影响的机理,为确定小麦高产高效的水、氮适宜用量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2005—2006 小麦生长季,在山东兖州小孟镇王海村大田(35.4N,116.4E)进行,属暖温带大陆性半湿润季风气候区。供试品种为高产强筋小麦济麦 20。试验地播种前 0—20cm 土层土壤含有机质 1.42%,全氮 0.13%,水解氮 83.7mg·kg^{-1},速效磷 55.9mg·kg^{-1},速效钾 90.6mg·kg^{-1}。采用裂区设计,主区为施氮水平,副区为灌水量。设置 4 个施氮水平:0 kg·hm^{-2}(N0)、120 kg·hm^{-2}(N1)、210 kg·hm^{-2}(N2)、300 kg·hm^{-2}(N3)。在每个施氮水平下设置 4 个灌水量处理:不浇水(W0)、底墒水 + 拔节水(W1)、底墒水 + 拔节水 + 开花水(W2)、底墒水 + 拔节水 + 开花水 + 灌浆水(W3),每次灌水量 60 mm,用水表计量灌水量。小区面积为 3m × 6m = 18m^2,重复 3 次。各灌水处理间设 1m 的隔离带。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。基肥按 P_2O_5 105kg·hm^{-2}、K_2O 105kgkg·hm^{-2}和 50% 的氮肥于耕前施入;拔节期追施剩余的 50% 氮肥。2005 年 10 月 22 日播种,4 叶期定苗,基本苗为 225 株 · m^{-2}。播种前 0—20、20—60、60—100、100—140、140—200cm 土层土壤含水量分别为 26.56%、23.53%、24.69%、23.18%、26.03%。各生育阶段的降水量分别为:播种至冬前期 10.4mm,冬前至拔节期 38.6mm,拔节至开花期 11.9mm,开花至成熟期 67.1mm。

1.2　测定项目与方法

土壤含水量测定:用土钻分层取 0—200cm 土层的土,20cm 为一层,样品取后装入铝盒称鲜重,再于 110℃烘干至恒重,称干重,计算土壤质量含水量。

植株全氮含量和籽粒蛋白质含量测定:于开花期和成熟期取样,将植株按器官分样后,在 70℃下烘干至恒重,称重、粉碎后用于植株和籽粒氮素含量测定。采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮,半微量凯氏定氮法测氮,按籽粒含氮量 ×5.7 计算籽粒粗蛋白含量[15]。

土壤硝态氮含量测定:小麦成熟期分别在各处理小区内取两个土壤样点,每 20 cm 一层,用土钻取 0—200 cm 土层土样,分别混匀,于 -20℃条件下保存。测定前将冰冻土壤样品解冻、混匀,过 2 mm 筛,称取 10 g 土壤样品,加入 100 ml 的 0.01 mol·L^{-1} $CaCl_2$ 溶液,振荡 30 min 后过滤,制成浸提液[14]。用德国 BRAN + LUEBBE 公司产 AA3 流动分析仪(AA3 Digital Colorimeter)测定土壤硝态氮含量(mg·kg^{-1}),并根据各土层土壤容重将硝态氮单位换算成 kg·hm^{-2}。同时测定土壤含水量。

1.3　计算方法

试验数据利用 DPS(Data Processing System)2003 和 Originpro 7.0 软件进行处理。氮素积累与转运的计算公式如下[16-17]:

各器官的氮素分配比例(%) = 各器官的氮素积累量/单茎氮素积累量 ×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

营养器官转移氮素对籽粒氮素的贡献率(%) = 营养器官氮素转移量/成熟期籽粒氮素积累量 ×100

氮素吸收效率(kg·kg^{-1}) = 植株氮素积累量/施氮量

氮素利用效率(kg·kg^{-1}) = 籽粒产量/植株氮素积累量

水分利用效率的计算方法为[18]:

水分利用效率(kg·hm^{-2}·mm^{-1}) = 作物籽粒产量/作物生育期耗水量

作物耗水量用农田水分平衡法[19]计算,水分平衡方程式为:

$$ET = \Delta S + I + P$$

式中,P 为降水量;I 为灌水量,由水表测定;ΔS 为土壤贮存水变化量,用水层厚度 $\triangle h$ 表示:

$$\Delta h(\text{mm}) = 10\sum(\triangle\theta i \times Zi), i(1, m)$$

式中,$\Delta\theta i$ 为土壤某一层次在给定时段内体积含水量变化,Zi 为土壤层次厚度(cm),i、m 是从土壤第 i 层到第 m 层。

耗水模系数(%) = 阶段耗水量/总耗水量 ×100

2　结果与分析

2.1　不同生育时期麦田 0—200cm 土层土壤水分变化动态

从表 1 可以看出,冬前期,同一施氮水平下,各灌水处理 0—20cm 土层土壤含水量显著低于播种前,其它层次无显著差异;W1 处理 0—20cm 土层土壤含水量显著高于 W0 处理,说明灌溉底墒水在播种至冬前期对表层土壤的含水量有显著影响。

拔节期,同一施氮水平下,各灌水处理 0—20cm、20—60cm、60—100cm 土层土壤含水量均低于冬前期,100cm 以下土层无显著变化;W0 处理 0—20cm 土层土壤含水量显著低于 W1 处理。在 N2 和 N3 水平下,各灌水处理 0—20cm、20—60cm 土层土壤含水量低于在 N0 和 N1 水平下的处理,说明增加施氮量促进了植株对 0—60cm 土层土壤水分的消耗。

开花期,同一施氮水平下,W0 处理 0—20cm、20—60cm、60—100cm 土层土壤含水量和 W1 处理 0—20cm 土层土壤含水量显著低于拔节期;W1 处理 0—100cm 各土层土壤含水量显著高于 W0 处理,说明拔节期灌水显著提高了开花期土壤供水能力。在 N2 水平下,各灌水处理 20—60cm、60—100cm 土层土壤含水量与在 N3

水平下的处理无显著差异,但低于在 N0 和 N1 水平下的处理,说明适当增加施氮量促进了拔节至开花期植株对深层土壤水分的消耗,过多施氮对土壤水分无显著影响。

成熟期,同一施氮水平下,W1、W2 和 W3 处理 60—100cm、100—140cm 和 140—200cm 土层土壤含水量显著低于开花期,W3 处理 0—20cm、20—60cm、60—100cm、100—140cm 土层土壤含水量均显著高于 W0、W1、W2 处理,W2 处理 20—60cm、60—100cm、100—140cm 的土壤含水量均高于 W1 处理,W2 处理 140—200cm 土层的土壤含水量与 W1 处理无显著差异,说明灌溉底墒水和拔节水,开花后不再灌溉,促进了小麦对 20—140cm 土层土壤水的吸收利用。在 N2 和 N3 水平下 W1 处理 60—100cm 和 100—140cm 土层土壤含水量显著低于在 N0 和 N1 水平下的含水量,说明在低定额灌溉条件下适量增施氮肥有利于植株吸收利用深层土壤水分。

表 1 不同处理对小麦各生育时期 0—200cm 土层土壤水分含量的影响/%

Table 1 Effects of different treatment on soil water content in 0—200 cm soil layer at different growth stages

处理 Treatment		冬前期 Pre-winter					拔节期 Jointing				
		0—20cm	20—60cm	60—100cm	100—140cm	140—200cm	0—20cm	20—60cm	60—100cm	100—140cm	140—200cm
N0	W0	19.30b	23.43a	23.69b	24.34a	25.24a	18.86b	19.19a	22.17a	23.45a	26.26a
	W1	21.85a	23.44a	24.64a	23.93a	25.83a	19.48a	19.38a	22.66a	23.25a	26.17a
	W2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N1	W0	19.38b	22.97a	25.30a	25.27a	25.83a	18.14b	18.77b	21.54b	25.01a	25.73a
	W1	21.76a	22.47a	23.64b	23.84b	25.51a	19.10a	19.59a	22.96a	23.80b	25.54a
	W2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N2	W0	18.95b	22.79a	25.23a	24.95a	25.42a	16.99b	18.07a	21.51a	23.77b	23.85b
	W1	21.66a	22.74a	23.81b	24.50a	25.92a	18.23a	18.18a	21.59a	24.43a	25.44a
	W2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N3	W0	20.63b	22.84a	23.61b	24.57a	25.27a	16.41b	18.83a	22.06a	24.49a	24.93a
	W1	22.76a	23.27a	24.57a	24.34a	25.82a	18.89a	18.42a	21.93a	23.31b	25.45a
	W2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

处理 Treatment		开花期 Anthesis					成熟期 Maturity				
		0—20cm	20—60cm	60—100cm	100—140cm	140—200cm	0—20cm	20—60cm	60—100cm	100—140cm	140—200cm
N0	W0	12.30b	15.85b	18.33b	22.25b	24.52b	14.68d	15.46d	17.30c	19.43c	22.88b
	W1	16.44a	20.74a	23.40a	23.19a	25.88a	16.22c	16.00b	19.39b	20.88b	23.55a
	W2	–	–	–	–	–	17.90b	19.27a	20.68a	21.74a	23.70a
	W3	–	–	–	–	–	18.60a	19.67a	20.69a	21.24a	23.80a
N1	W0	12.68b	15.97b	18.80b	22.27b	25.66a	14.68c	14.37c	18.26c	19.01c	23.03b
	W1	15.89a	20.17a	23.03a	23.42a	26.06a	14.23c	13.53d	17.90d	19.49c	23.87ab
	W2	–	–	–	–	–	16.29b	15.96b	19.48b	20.59b	24.39a
	W3	–	–	–	–	–	19.34a	20.44a	22.04a	21.24a	24.19a
N2	W0	12.28b	15.74b	17.87b	22.69b	24.72b	14.41d	13.04d	17.83c	18.70b	22.00c
	W1	15.38a	19.01a	22.70a	23.58a	26.49a	14.84c	14.59c	17.00d	18.30b	23.45b
	W2	–	–	–	–	–	15.43b	15.08b	18.25b	21.27a	23.27b
	W3	–	–	–	–	–	18.48a	18.76a	20.25a	21.79a	24.24a
N3	W0	12.63b	14.86b	17.55b	22.67b	25.07b	14.38c	14.07c	17.48c	17.53c	21.59c
	W1	15.33a	18.95a	22.66a	23.86a	26.84a	15.43b	13.66d	17.61c	18.76b	24.08b
	W2	–	–	–	–	–	15.17b	15.34b	18.22 b	21.21a	24.10b
	W3	–	–	–	–	–	17.86a	19.18a	20.34a	21.47a	24.83a

注:同一列数据后带不同英文字母,表示在同一施氮水平下不同灌水处理间比较,差异达 0.05 显著水平

表 2　不同处理对小麦各生育阶段的耗水量、耗水模系数和日耗水量的影响

Table 2　Effects of different treatment on water consumption amount (WCA), module index and water consumption amount per day at different growth stages

处理 Treatment		播种-冬前期 Planting-before winter			冬前-拔节期 Before winter-jointing		
		耗水量 WCA /mm	耗水模系数 Module index /%	日耗水量 WCA per day /mm	耗水量 WCA /mm	耗水模系数 Module index /%	日耗水量 WCA per day /mm
N0	W0	25.9b	8.7b	0.46b	71.5b	24.0a	0.53b
	W1	69.2a	18.5a	1.23a	84.3a	22.6b	0.62a
	W2	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–
N1	W0	7.3b	2.4b	0.13b	94.1a	31.3a	0.69a
	W1	85.1a	20.8a	1.52a	68.8b	16.9 b	0.51b
	W2	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–
N2	W0	16.0b	5.0b	0.29b	106.1a	32.8a	0.78a
	W1	74.9a	17.4a	1.34a	95.8b	22.3b	0.70b
	W2	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–
N3	W0	24.3b	7.3b	0.43b	95.7b	29.0a	0.70b
	W1	65.4a	15.6a	1.17a	106.5a	25.5b	0.78a
	W2	–	–	–	–	–	–
	W3	–	–	–	–	–	–

处理 Treatment		拔节-开花期 Jointing-anthesis			开花-成熟期 Anthesis-maturity		
		耗水量 WCA /mm	耗水模系数 Module index /%	日耗水量 WCA per day /mm	耗水量 WCA /mm	耗水模系数 Module index /%	日耗水量 WCA per day /mm
N0	W0	100.0a	33.5a	4.00a	101.1d	33.9d	2.89d
	W1	71.4b	19.1b	2.85b	148.8c	39.8c	4.25c
	W2	–	–	–	177.6b	44.1b	5.07b
	W3	–	–	–	213.9a	48.8a	6.11a
N1	W0	80.5a	26.8a	3.22a	118.6c	39.5c	3.39c
	W1	75.2b	18.4b	3.01b	179.3b	43.9b	5.12b
	W2	–	–	–	206.8a	47.4a	5.91a
	W3	–	–	–	211.7a	48.0a	6.05a
N2	W0	74.0a	22.9a	2.96a	127.5d	39.4d	3.64d
	W1	70.5b	16.6b	2.82b	182.5c	43.1c	5.22c
	W2	–	–	–	210.6b	46.6b	6.02b
	W3	–	–	–	232.1a	47.7a	6.27a
N3	W0	79.6a	24.1a	3.19a	130.9c	39.6c	3.74c
	W1	58.8b	14.1b	2.35b	187.6b	44.8b	5.36b
	W2	–	–	–	219.0a	48.7a	6.26a
	W3	–	–	–	225.7a	49.4a	6.45a

注:同一列数据后带不同英文字母,表示在同一施氮水平下不同灌水处理间比较,差异达 0.05 显著水平

2.2　不同生育阶段麦田耗水量、耗水模系数和日耗水量

表 2 示出,同一施氮水平下,W1 与 W0 处理相比,小麦播种至冬前期的耗水量和耗水模系数显著升高;冬前至拔节期的耗水量和耗水模系数在 N1 和 N2 水平下均显著降低,在 N0 和 N3 水平下,冬前至拔节期的耗水量则显著升高;拔节至开花期的耗水量和耗水模系数均显著降低。说明适量增施氮肥并灌溉底墒水,显著降低了冬前至拔节期麦田耗水量;拔节期增加水氮供应可降低拔节至开花期小麦耗水量。同一施氮水平下,小麦开花至成熟期耗水量和耗水模系数均随灌水量的增加而增加,说明在灌溉底墒水和拔节水的基础上,增灌开花水或开花水 + 灌浆水显著增加了小麦对水分的消耗。

在 N0 水平下 W0 处理的日耗水量以拔节至开花期最高;在 N1 水平下,拔节至开花期的日耗水量与开花至成熟期的无显著差异,均显著高于其他生育阶段;在 N2 和 N3 水平下,日耗水量以开花至成熟期最高。同一施氮水平下,W1、W2 和 W3 处理日耗水量均以开花至成熟期最高;且 W2 和 W3 处理显著高于 W1 处理,W1 处理显著高于 W0 处理。随施氮量的增加,W1、W2 和 W3 处理开花至成熟期日耗水量均呈升高趋势。说明开花后籽粒形成和灌浆阶段是小麦需水的重要时期;在 W0N0 处理条件下,小麦拔节至开花期的营养生长需水量显著提高;随水分和氮素供应水平的提高,小麦开花后的日耗水量增加。

2.3 麦田耗水量的水分来源及其占耗水量的百分率

由表 3 可以看出,同一施氮水平下,灌水量占耗水量的比例随灌水量的增加显著升高,降水和土壤供水量占耗水量的比例随灌水量的增加而降低,说明增加灌水量不利于小麦对土壤供水的吸收利用。随施氮水平的提高,各灌水处理的降水量和灌水量占耗水量的比例均降低,土壤供水量占耗水量的比例增加,N2 与 N3 水平之间无显著差异,说明适量施氮提高了小麦对土壤贮水的利用能力。

表 3 不同处理对不同来源水分消耗量占总耗水量的百分率的影响

Table 3 Effects of different treatment on the ratio of different water resource consumption amount to total water consumption amount

处理 Treatment		耗水量 WCA/mm	降水量 Precipitation		灌水量 Irrigation rate		土壤供水量 Soil water amount	
			/mm	/%	/mm	/%	/mm	/%
N0	W0	298.5 d	128	42.9 a	0	–	170.5 a	57.1 a
	W1	373.6 c	128	34.3 b	120	32.1 c	125.6 b	33.6 b
	W2	402.4 b	128	31.8 c	180	44.7 b	94.4 c	23.5 c
	W3	438.7 a	128	29.2 d	240	54.7 a	70.7 d	16.1 d
N1	W0	300.5 c	128	42.6 a	0	–	172.5 a	57.4 a
	W1	408.5 b	128	31.3 b	120	29.4 c	160.5 b	39.3 b
	W2	435.9 a	128	29.4 c	180	41.3 b	127.9 c	29.4 c
	W3	440.9 a	128	29.0 c	240	54.4 a	72.9 d	16.5 d
N2	W0	323.6 d	128	39.6 a	0	–	195.6 a	60.5 a
	W1	423.8 c	128	30.2 b	120	28.3 c	175.8 b	41.5 b
	W2	451.8 b	128	28.3 c	180	39.8 b	143.8 c	31.8 c
	W3	461.0 a	128	27.8 d	240	52.1 a	93.00 d	20.2 d
N3	W0	330.5 c	128	38.7 a	0	–	202.5 a	61.3 a
	W1	418.3 b	128	30.6 b	120	28.7 c	170.3 b	40.7 b
	W2	449.7 a	128	28.5 c	180	40.0 b	141.7 c	31.5 c
	W3	456.4 a	128	28.0 c	240	52.6 a	88.4 d	19.4 d

注:同一列数据后带不同英文字母,表示在同一施氮水平下不同灌水处理间比较,差异达 0.05 显著水平

2.4 成熟期不同处理小麦氮素在各器官中的分配

由表 4 可以看出,同一施氮水平下,氮素在叶片、茎秆 + 叶鞘和穗轴 + 颖壳中的分配量和分配比例随灌水量的增加而增加。氮素在籽粒中的分配量随灌水量的增加先升高后降低,分配比例随灌水量的增加而降低,W1 处理籽粒中分配的氮素量最高,说明适量灌溉底墒水和拔节水促进了氮素向籽粒的分配,W0、W2 和 W3 处理对氮素向籽粒的转运分配不利。

随施氮水平的提高,各灌水处理叶片、茎秆 + 叶鞘、穗轴 + 颖壳的氮素分配量增加,籽粒中的氮素分配量先增高后降低,籽粒中的氮素分配比例降低。各灌水处理在 N2 水平下籽粒中的氮素分配量最高。说明适量施氮提高了籽粒中的氮素分配量,施氮量过多,导致小麦成熟期营养器官中的氮素残留量增加,氮素向籽粒中的分配量减少。

2.5 不同处理小麦开花后营养器官中氮素向籽粒的转运

表 5 示出,同一施氮水平下,W1、W2 和 W3 处理与 W0 处理相比,营养器官的氮素转运量及其对籽粒的贡献率均显著升高,但转运率显著降低;W1、W2 和 W3 处理间营养器官氮素向籽粒的转运量和转运率无显著差异。小麦营养器官氮素转运量对籽粒的贡献率在 N0 水平下随灌水量的增加先增高后降低,在 N1、N2 和

N3 水平下则随灌水量的增加而提高。随施氮水平的提高,各灌水处理营养器官的氮素转运量及其对籽粒的贡献率均增加,但 N2W3 与 N3W3 处理之间无显著差异。说明适量施氮或在施氮的条件下适量灌水均有利于提高营养器官氮素转运量对籽粒的贡献率。

表 4　不同处理对成熟期植株氮素在各器官中分配的影响

Table 4　Effects of different treatment on nitrogen distribution in different organs at maturity

处理 Treatment		叶片 Leaf		茎秆+叶鞘 Stem & sheath		穗轴+颖壳 Sa & kh		籽粒 Kernel		合计 Total /(mg·stalk^{-1})
		分配量 DA/(mg·stalk^{-1})	分配比例 DP/%	分配量 DA/(mg·stalk^{-1})	分配比例 DP/%	分配量 DA/(mg·stalk^{-1})	分配比例 DP/%	分配量 DA/(mg·stalk^{-1})	分配比例 DP/%	
N0	W0	0.94 c	3.06 d	1.40 d	4.55 c	0.98 c	3.19 a	27.44 c	89.19 a	30.76 c
	W1	1.17 b	3.10 c	1.74 c	4.58 c	1.05 b	2.78 c	33.90 a	89.53 a	37.87 a
	W2	1.25 a	3.37 b	1.90 b	5.12 b	1.15 a	3.10 b	32.82 ab	88.40 b	37.13 a
	W3	1.26 a	3.51 a	2.13 a	5.94 a	1.18 a	3.30 a	31.30 b	87.25 c	35.87 b
N1	W0	1.31 c	3.37 d	2.05 d	5.29 d	1.19 c	3.07 d	34.28 c	88.27 a	38.83 c
	W1	1.56 b	3.57 c	2.49 c	5.72 c	1.50 b	3.45 c	38.04 a	87.26 b	43.59 a
	W2	1.64 a	3.82 b	2.84 b	6.65 b	1.50 b	3.50 b	36.79 b	86.03 c	42.76 a
	W3	1.69 a	3.90 a	3.15 a	7.29 a	1.62 a	3.74 a	36.74 b	85.06 d	43.19 a
N2	W0	1.51 c	3.43 d	2.44 d	5.53 d	1.31 c	2.97 b	38.77 b	88.06 a	44.03 b
	W1	1.77 b	3.57 c	3.19 c	6.45 c	1.79 a	3.62 a	42.69 a	86.36 b	49.43 a
	W2	1.83 a	3.78 b	3.24 b	6.70 b	1.77 a	3.66 a	41.52 a	85.85 c	48.36 a
	W3	1.88 a	4.17 a	3.38 a	7.47 a	1.66 b	3.67 a	38.31 b	84.70 d	45.23 b
N3	W0	1.53 b	3.58 c	2.65 c	6.20 d	1.42 c	3.31 c	37.20 b	86.91 a	42.80 b
	W1	1.56 b	3.35 d	3.53 b	7.58 c	1.79 a	3.86 b	39.64 a	85.21 b	46.51 a
	W2	1.98 a	4.54 b	3.61 ab	8.26 b	1.69 b	3.87 b	36.38 bc	83.33 bc	43.66 b
	W3	2.05 a	4.85 a	3.74 a	8.84 a	1.78 a	4.22 a	34.69 c	82.08 c	42.27 b

Note: Sa & kh = Spike axis and kernel husk;

注:同一列数据后带不同英文字母,表示在同一施氮水平下不同灌水处理间比较,差异达 0.05 显著水平

表 5　不同处理对开花后营养器官氮素向籽粒中转运的影响

Table 5　Effects of different treatment on nitrogen translocation from vegetative organ to kernel after anthesis

处理 Treatment		成熟期营养器官氮素积累量 NAAVOM /(kg·hm^{-2})	成熟期籽粒氮素积累量 NAAKM /(kg·hm^{-2})	开花期氮素积累量 NAAA /(kg·hm^{-2})	营养器官氮素转运量 NTAA /(kg·hm^{-2})	营养器官氮素转运率 NTE /%	营养器官氮素转运量对籽粒贡献率 CNTAK /%
N0	W0	13.21 b	115.50 c	95.18 b	81.97 b	86.12 a	70.97 c
	W1	20.51 a	147.44 b	133.30 a	112.79 a	84.61 b	76.50 a
	W2	20.81 a	156.01 a	135.22 a	114.41 a	84.61 b	73.34 b
	W3	21.21 a	153.62 a	135.09 a	113.88 a	84.30 b	74.13 b
N1	W0	21.87 b	161.11 b	130.64 b	108.77 b	83.26 a	67.51 c
	W1	32.01 a	181.26 a	167.64 a	135.63 a	80.90 b	74.83 b
	W2	32.39 a	181.88 a	170.02 a	137.63 a	80.95 b	75.67 b
	W3	33.30 a	176.00 a	170.87 a	137.57 a	80.51 b	78.17 a
N2	W0	29.02 c	178.27 d	160.72 b	131.70 b	81.94 a	73.87 c
	W1	39.91 a	202.26 a	191.70 a	151.79 a	79.18 b	75.05 c
	W2	39.80 a	191.02 b	189.72 a	149.92 a	79.02 b	78.49 b
	W3	38.10 b	180.93 c	188.62 a	150.52 a	79.80 b	83.19 a
N3	W0	32.28 d	180.61 c	168.45 b	136.17 b	80.84 a	75.39 c
	W1	41.54 c	193.48 a	195.40 a	153.85 a	78.74 b	79.52 b
	W2	44.25 b	186.95 b	196.83 a	152.58 a	77.52 bc	81.61 ab
	W3	46.53 a	179.57 c	196.59 a	150.06 a	76.33 c	83.56 a

Note: NAAVOM = Nitrogen accumulation amount of vegetative organ at maturity; NAAKM = Nitrogen accumulation amount of kernel at maturity; NAAA = Nitrogen accumulation amount at anthesis; NTAA = Nitrogen translocation amount after anthesis; NTE = Nitrogen translocation efficiency; CNTAK = Contribution of nitrogen translocation amount to kernel

注:同一列数据后带不同英文字母,表示在同一施氮水平下不同灌水处理间比较,差异达 0.05 显著水平

2.6 不同处理 0—200cm 土层土壤硝态氮含量变化

图 1 示出,在 N0 水平下,0—20cm 土层土壤硝态氮含量随灌水量的增加而降低;W0 处理与其他处理相比,0—80cm 各土层土壤硝态氮含量较高,100—140cm 各土层土壤硝态氮含量较低,W1 与 W2 处理各土层土壤硝态氮含量无显著差异。

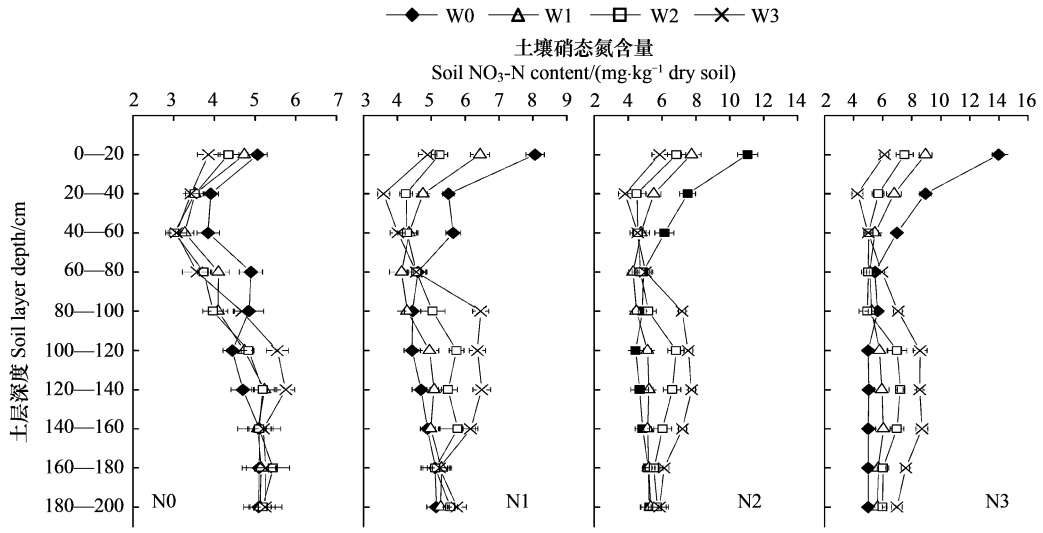

图 1 不同处理对成熟期 0—200cm 土层土壤 NO_3-N 含量的影响

Fig. 1 Effects of different treatment on soil NO_3-N content in 0—200cm soil layer at maturity

在 N1 和 N2 水平下,0—40cm 各土层土壤硝态氮含量随灌水量的增加而降低,100—140cm 各土层土壤硝态氮含量随灌水量的增加而升高,W0 处理 0—60cm 各土层土壤硝态氮含量显著高于其他处理。

在 N3 水平下,0—40cm 各土层土壤硝态氮含量随灌水量的增加而降低,100—200cm 各土层土壤硝态氮含量随灌水量的增加而升高,W0 处理 0—60cm 各土层土壤硝态氮含量亦显著高于其他处理。说明在 300 $kg\cdot hm^{-2}$施氮水平下,随灌水量增加土壤硝态氮在 100—200cm 土层土壤积累增多。

2.7 不同处理的小麦籽粒产量、蛋白质含量及水分和氮素利用效率

由表 6 可以看出,在 N0 水平下随灌水量增加,氮素积累量和籽粒产量升高,但 W2 与 W3 处理之间无显著差异,氮素收获指数各处理间无显著差异;在 N1 水平下,W1、W2 和 W3 处理的氮素积累量显著高于 W0 处理,W1、W2 和 W3 处理之间无显著差异,W0、W1 和 W2 处理的籽粒产量无显著差异,均显著高于 W3 处理;在 N2 和 N3 水平下,氮素积累量和籽粒产量均随灌水量的增加先升高后降低,W1 处理最高,氮素收获指数随灌水量的增加而降低。同一施氮水平下,W1、W2 和 W3 处理的籽粒蛋白质含量均显著高于 W0 处理,W1、W2 与 W3 处理之间无显著差异;随灌水量增加,灌水效率和水分利用效率降低,氮素吸收效率先升高后降低。在 N1 和 N2 水平下氮素利用效率随灌水量的增加而降低,W1 与 W2 处理之间无显著差异;在 N3 水平下,氮素利用效率随灌水量的增加显著降低。

上述结果说明在 N1 和 N2 水平下,适当增加灌水量(W1 和 W2)有利于促进氮素吸收,提高氮素吸收效率、籽粒产量和蛋白质含量;在较高氮素供应水平(N3)下,灌水量过多(W3)对籽粒蛋白质含量无显著影响,但籽粒产量、植株氮素积累量、水分和氮素利用效率均显著降低。在本试验条件下,每公顷施纯氮 210kg、灌溉底墒水和拔节水的 N2W1 处理籽粒产量最高,水分和氮素利用效率较高。

3 讨论

前人研究表明,抽穗至成熟期是小麦生殖生长阶段,该阶段气温高,蒸腾、蒸发量大,是麦田耗水的重要时期[20-21]。本试验 W0 处理在 N0 水平下日耗水量以拔节至开花期最高;在 N1 水平下拔节至开花期日耗水量与开花至成熟期的无显著差异,说明在水分和氮素供应受限的条件下,小麦耗水高峰前移,不利于籽粒产量

的形成。本研究还表明,同一施氮量条件下,小麦开花后总耗水量、耗水模系数和日耗水量随灌水量的增加而提高,但产量随灌水量的增加先升高后降低。相关分析表明,籽粒产量与开花后日耗水量呈显著二次曲线关系($y = 926.4 + 2717.2x - 269.8x^2$, $r = 0.6108$, $P < 0.05$, $df = 15$),说明花后日耗水量并非越高越好。

表 6　不同处理对籽粒产量、蛋白质含量、灌水效率、水分利用效率及氮素利用率的影响

Table 6　Effects of different treatment on grain yield, protein content, irrigation efficiency, water-use efficiency and nitrogen utilization efficiency

处理 Treatment		氮素积累量 NAA/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	籽粒产量 Grain yield/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	氮素收获指数 NHI	籽粒蛋白质含量 Grain protein content/%	氮素吸收效率 Nitrogen uptake efficiency/ ($kg \cdot kg^{-1}$)	氮素利用效率 Nitrogen use efficiency/ ($kg \cdot kg^{-1}$)	灌水效率 Irrigation efficiency/ ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)	水分利用效率 WUE/ ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)
N0	W0	128.71 c	5941.7 c	0.897 a	11.08 b	–	46.2a	–	19.91 a
	W1	167.95 b	6832.5 b	0.878 a	12.30 a	–	40.7b	7.42	17.87 b
	W2	176.82 a	7183.0 a	0.882 a	12.38 a	–	40.6b	1.95	17.85 b
	W3	174.82 a	6900.0 ab	0.879 a	12.69 a	–	39.5c	-1.18	15.72 c
N1	W0	182.98 b	7514.1 ab	0.881 a	12.98 b	1.52b	41.1a	–	25.01 a
	W1	213.27 a	7658.8 ab	0.850 b	13.49 a	1.78a	35.9bc	1.21	18.74 b
	W2	214.27 a	7748.1 a	0.849 b	13.38 a	1.79a	36.2b	0.50	17.77 c
	W3	209.29 a	7425.4 b	0.841 b	13.51 a	1.74a	35.5c	-1.34	16.84 d
N2	W0	207.29 d	7711.7 b	0.860 a	13.18 b	0.99c	37.2a	–	23.83 a
	W1	242.17 a	8187.3 a	0.835 b	14.08 a	1.15a	33.8b	3.96	19.32 b
	W2	230.82 b	7769.5 b	0.828 b	14.01 a	1.10ab	33.7b	-2.32	17.20 c
	W3	219.03 c	7381.8 c	0.826 b	13.97 a	1.04bc	33.7b	-1.62	16.01 d
N3	W0	212.89 c	7787.3 ab	0.848 a	13.22 b	0.71b	36.6a	–	23.57 a
	W1	235.02 a	7819.2 a	0.823 b	14.10 a	0.78a	33.3b	0.27	18.69 b
	W2	231.21 ab	7584.6 ab	0.809 bc	14.05 a	0.77a	32.8c	-1.13	16.87 c
	W3	226.10 b	7269.7 c	0.794 c	14.00 a	0.75ab	32.2d	-1.31	15.93 d

Note: NAA = Nitrogen accumulaiton amount; NHI = Nitrogen harvest index; WUE = Water use efficiency

注:同一列数据后带不同英文字母,表示在同一施氮水平下不同灌水处理间比较,差异达 0.05 显著水平

适宜的灌溉时期和灌水量,有利于实现节水高产,过多灌水导致籽粒产量和水分利用率显著降低[22],但不同地区适宜的灌溉时期和灌水量不同。有研究表明在河北藁城灌溉底墒水 + 拔节水 + 开花水处理的产量显著高于灌溉底墒水 + 拔节水的处理[4];而在山东龙口小麦生育期内总降水量 228.5mm 的条件下,仅灌溉拔节水的处理与灌溉冬水 + 拔节水的处理产量无显著差异,但均显著高于冬水 + 拔节水 + 开花水的处理[8]。本试验在山东兖州小麦生育期内降水量 128mm,开花期至成熟期降水量 67.1mm 的条件下,N0 和 N1 水平下灌溉底墒水 + 拔节水 + 开花水的处理籽粒产量最高;N2 和 N3 水平下灌溉底墒水 + 拔节水的处理籽粒产量最高,继续增加灌水量籽粒产量降低。说明适宜的灌水量不仅受降水多少的影响,而且与氮素施用量存在耦合效应,适宜的氮素用量可以补偿因灌水不足对籽粒产量的影响,适量施氮提高了小麦对土壤贮水的利用能力,降低了对自然降水和灌水的依赖。

一般认为,较低的氮肥用量不会导致土壤硝态氮的大量淋失[23],随施氮量增加,硝态氮下移并在深层土壤累积,氮素淋溶损失显著增加[24-26]。也有研究结果表明,随施氮量增加,土壤剖面中残留的硝态氮含量显著增加,但对硝态氮在土体中的移动深度没有影响[27]。Arregui 和 Quemada 研究认为,土壤中水分含量和无机氮素含量是决定土壤氮素损失的主要因素[28],小麦生育期灌水过多,约有 14%—26% 的氮肥被淋洗出小麦根区进入深层土壤,氮素损失量显著增加[29],本试验结果表明,适当增加灌水量促进了小麦对 0—60cm 土层土壤硝态氮的吸收利用,提高了 100—200cm 土层土壤的硝态氮含量;高施氮水平下,随灌水量的增加土壤硝态氮在深层土壤的积累增多。在 210 $kg \cdot hm^{-2}$ 施氮水平下,灌溉底墒水 + 拔节水的处理与在灌底墒水 + 拔节

水的基础上增加开花水和开花水 + 灌浆水的处理相比,促进了小麦对 20—140cm 土层土壤水的吸收利用,减少了土壤硝态氮向 100 cm 以下土层的淋溶,而且植株氮素在籽粒中的分配量和分配比例增高,是其水分和氮素利用效率较高的原因。

References:

[1] Wang M, Zhang S Q, Fang B T, Zheng Q, Zhang Y H. Effect of nitrogen applications on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat in limited water supply. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(7): 349-353.

[2] Sharma B D, Jalota S K, Kar S, Singh C B. Effect of nitrogen and water uptake on yield of wheat. Fertilizer Research, 1992, 31(1): 5-8

[3] Cabrera-Bosquet L, Molero G, Bort J, Nogues S, Araus J L. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and 13C in durum wheat potted plants. Annals of Applied Biology, 2007, 151(3): 277-289.

[4] Yang S L, Jia X L, Zhang F L, Ma R K, Meng X F, Li A H. Effects of water and nitrogen coupling in winter wheat on leaves NRA, plant nitrogen absorption and yield. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(4): 124-129.

[5] Jia S L, Meng C X, Tang Y X, Liu C T. Efects of water stress on wheat yield and the characteristic of nutrient absorption. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(1): 6-8.

[6] Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.

[7] Cao C F, Kong L C, Wang J L, Zhao B, Zhao Z. Effects of nitrogen on yield, quality and nutritive absorption of middle and strong gluten wheat. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 46-50.

[8] Wang X Y, He M R, Liu Y H, Zhang H H, Li F, Hua F X, Meng S H. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 685-694.

[9] Elmi A A, Madramootoo C, Mohamud Egeh Hamel C. Water and fertilizer nitrogen management to minimize nitrate pollution from a cropped soil in Southwestern Quebec, Canada. Water, Air, & Soil Pollution, 2004, 151(1/4): 117-134.

[10] Diez J A, Caballero R, Roman R, Tarquis A, Cartagena M C, Vallejo A. Intergrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain. Journal of Environment Quality, 2000, 29: 1539-1547.

[11] Wang Q, Li F R. Effects of different irrigation and N supply levels on NO_3^--N accumulation and N use efficiency on a recently reclaimed sandy farmland in Heihe River basin. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2148-2159.

[12] Zhao B Z, Xu F A, Zhou L Z, Xu M X. Wheat yield and water-use efficiency as influenced by different combinations of irrigation water and nitrogen fertilizer. Soil, 2003, (2): 122-125.

[13] Yang X Y, Yu Z W, Xu Z Z. Effects of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen accum ulation and allocation in wheat. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 846-853.

[14] Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen Ⅰ. Winter wheat. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1782-1789.

[15] He Z F. Grain Quality and It's Analysis Technology. Beijing: Agicultural Press, 1985: 37-41.

[16] Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(4): 484-490.

[17] Zhao M X, Zhou J B, Yang R, Zheng X F, Zhai B N, Li S X. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 143-149.

[18] Jiang X D, Li Z J, Hou L T, Wang Y, Wang X, Yan H. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3-N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 20-24.

[19] Dong B D, Zhang Z B, Liu M Y, Zhang Y Z, Li Q Q, Shi L, Zhou Y T. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation schedulings. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 27-33.

[20] Shi Y, Lin Q, Wei D B, Yu Z W, Yu S L. Effect of soil water stress on law of water consumption and yield in winter wheat. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997, 12 (2): 76-81.

[21] Liao L J, Zhang L, Bengtsson L. Soil moisture variation and water consumption of spring wheat and their effects on crop yield under drip irrigation. Irrigation and Drainage Systems, 2008, 22(3/4): 253-270.

[22] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Pei D, Wang Y M. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. Irrigation Science, 2008, 27(1): 1-10.

[23] Cookson W R, Rowarth J S, Cameron K C. The effect of autumn applied ^{15}N-labelled fertilizer on nitrate leaching in a cultivated soil during winter.

Nutrient Cycling in Agroecosystems,2000, 56: 99-107.

[24] Li X X, Hu C S, Delgado J A, Zhang Y M, Ouyang Z Y. Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north china plain. Agricultural Water Management, 2007, 89 (1/2): 137-147.

[25] Thompson R B, Martinez-Gaitan C, Gallardo M, Gimenez C, Fernandez M D. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. Agricultural Water Management, 2007, 89: 261-274.

[26] Jayasundara S, Wagner-Riddle C, Parkin G, Bertoldi P von, Warland J, Kay B, Voroney P. Minimizing nitrogen losses from a corn-soybean-winter wheat rotation with best management practices. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(2): 141-159.

[27] Zhang S L, Tong Y A, Liang D L, Lü D Q, Ove E. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 270-277.

[28] Arregui L M, Quemada M. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. Plant Soil, 2006, 288: 57-69.

[29] Riley W J, Ortiz-Monasterio I, Matson P A. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 61(3): 223-236.

参考文献:

[1] 王敏, 张胜全, 方保停, 郑强, 张英华. 氮肥运筹对限水灌溉冬小麦产量及氮素利用的影响. 中国农学通报, 2007, 23(7): 349-353.

[4] 杨世丽, 贾秀领, 张凤路, 马瑞昆, 孟祥法, 李爱华. 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. 华北农学报, 2008, 23(4): 124-129.

[5] 贾树龙, 孟春香, 唐玉霞, 刘春田. 水分胁迫条件下小麦的产量反应及对养分的吸收特征. 土壤通报, 1995, 26(1): 6-8.

[6] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.

[7] 曹承富, 孔令聪, 汪建来, 赵斌, 赵竹. 施氮量对强筋和中筋小麦产量和品质及养分吸收的影响. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 46-50.

[8] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 张洪华, 李飞, 华芳霞, 孟淑华. 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. 生态学报, 2008, 28(2): 685-694.

[11] 王琦, 李锋瑞. 灌溉与施氮对黑河中游新垦农田土壤硝态氮积累及氮素利用率的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 2148-2159.

[12] 赵炳梓 徐富安 周刘宗 徐梦熊. 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率. 土壤, 2003, (2): 122-125.

[13] 杨晓亚, 于振文, 许振柱. 灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和氮素积累分配的影响. 生态学报, 2009, 29(2): 846-853.

[14] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究 Ⅰ. 冬小麦. 生态学报, 2001, 21(11): 1782-1789.

[15] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术. 北京:农业出版社, 1985: 37-41.

[16] 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. 作物学报, 2006, 32(4): 484-490.

[17] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 郑险峰, 翟丙年, 李生秀. 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. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 143-149.

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

[19] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 张依章, 李全起, 石磊, 周永田. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应. 农业工程学报, 2007, 23(9): 27-33.

[20] 石岩, 林琪, 位东斌, 于振文, 余松烈. 土壤水分胁迫对冬小麦耗水规律及产量的影响. 华北农学报, 1997, 12 (2): 76-81.

[27] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 吕殿青, Ove Emtery. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响. 土壤学报, 2004, 41(2): 270-277.