

调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响

万文亮^{1,2}, 郭鹏飞^{1,2}, 胡语妍^{1,2}, 张筱茜^{1,2}, 张坤^{1,2}, 刁明^{1,2}

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000; 2. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 2017年和2018年在新疆滴灌春小麦栽培中, 额定施氮量为纯氮 300 kg/hm², 设置3个调亏灌溉水量(水分不调亏 E1:100% ET₀; 水分中度调亏 E2:80% ET₀; 水分重度调亏 E3:60% ET₀)和2个小麦品种(水分敏感型 X1:新春 22; 水分不敏感型 X2:新春 44), 灌溉频率为7天1次。研究不同处理对滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响。结果表明:(1)水分重度调亏(E3)可以缓解0—40 cm土壤水分和土壤硝态氮向深层流失, 减少作物耗水量, 提高水分利用效率。(2)新春 22和新春 44在土壤质量含水量、土壤硝态氮含量指标上无显著的品种间差异, 小麦品种对于土壤理化性质的影响较小。(3)在水分中度调亏(E2)处理下, 新春 44(X2)能在节约大量灌水同时, 提高水分利用效率, 保持最适的氮素营养指数(NNI), 进而使产量得到了显著的补偿, 而新春 22(X1)通过中度和重度调亏不能使产量得到有效的补偿。(4)在同一灌溉频率、施氮量水平下, 品种对滴灌春小麦水分利用效率的影响大于调亏灌溉水平对滴灌春小麦水分利用效率的影响。(5)水分不敏感型品种新春 44(X2)更适合在北疆地区采用调亏灌溉模式生产, 综合考虑氮素营养指数(NNI)、耗水量、水分利用效率及产量, 其最适的调亏灌溉水平为E2。

关键词: 调亏灌溉; 品种; 土壤质量含水量; 硝态氮含量; 氮素营养诊断; 水分利用效率; 产量

中图分类号: S275.6; S512.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0166-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.025

Distribution and Yield of Spring Wheat Under Drip Irrigation in Xinjiang

WAN Wenliang^{1,2}, GUO Pengfei^{1,2}, HU Yuyan^{1,2},

ZHANG Xiaoqian^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2}, DIAO Ming^{1,2}

(1. Department of Horticulture, College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000;

2. Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Special Fruits and

Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In 2017 and 2018, a field experiment with three regulated deficit irrigation amounts (non-deficit E1:100% of ET₀, moderate deficit E2:80% of ET₀, severe deficit E3:60% of ET₀) and two wheat varieties (water-sensitive type X1: Xin Chun 22, water-insensitive type X2: Xin Chun 44) were conducted with drip irrigation for spring wheat in northern Xinjiang. The same nitrogen level of 300 kg/hm² and same irrigation frequency of one irrigation every 7 days were implemented. The soil moisture, nitrate nitrogen distribution and yield of spring wheat were studied. The results showed that: (1) These water deficit (E3) could alleviate soil water and nitrate nitrogen loss from 0—40 cm to the deep, it also reduced crop water consumption and improved water use efficiency. (2) There was no significant difference in soil mass moisture contents and soil nitrate nitrogen contents between Xin Chun 22 and Xin Chun 44, and wheat varieties had little influence on soil physical and chemical properties. (3) In moderate water deficit (E2), Xin Chun 44 (X2) saved a lot of water, and simultaneously, it improved water use efficiency and maintained the optimum nitrogen nutrition index (NNI). And consequently, the output was significantly compensated. But Xin Chun 22 (X1) could not be effectively compensated by moderate and severe water deficit. (4) With the same level of the nitrogen application and irrigation frequency, the wheat varieties had greater effects than the levels of regulated deficit irrigation on drip irrigation water use efficiency of spring wheat. (5) Taking into account NNI, water consumption, water utilization efficiency and yield, Xin Chun 44 (X2) was more suitable plant with regulated deficit irrigation model in northern Xinjiang, and its optimal regulated deficit irrigation treatment was E2.

Keywords: regulated deficit irrigation; varieties; soil mass moisture content; nitrate nitrogen content; nitrogen nutrition diagnosis; water use efficiency; yield

水资源短缺是中国北方旱区农业生产面临的主要问题^[1]。新疆气候干旱、水资源极度匮乏、降水和地表水分散失间极度失衡,小麦是该区域主要的粮食作物之一,如何利用合理的灌溉模式增加小麦产量、保持土壤养分和提高水分利用效率是发展干旱绿洲区节水农业的关键^[2-4]。

如何选择合适的灌溉模式达到节水和高产的目的是当前研究最多的问题,随着农业科技的进步,新的节水理论和技术不断应用于小麦生产,调亏灌溉(regulated deficit irrigation, RDI)就是其中一种。调亏灌溉的特点在于兼顾产量的同时充分节水^[5],国内外学者对调亏灌溉条件下作物水肥高效利用的机理进行了初步研究: Pandey 等^[6]的田间试验表明,在小麦苗期进行亏缺灌溉,作物对氮素的吸收能力降低,而在生长中期复水后,小麦对氮素的吸收有强烈的补偿效应;孟兆江等^[7]对小麦根冠生长进行研究时发现,在水分调亏期间根系的生长受到严重的抑制,而复水后则表现出补偿效应或超补偿效应,且返青—拔节阶段这种补偿效应随水分亏缺程度的增加呈现增强趋势; Chalmers 等^[8]对调亏期间巴特利特梨的生长及光合产物的分配进行了研究,结果表明,尽管花期水分亏缺会直接威胁到果树的长势使之产生萎蔫现象,但光合作用和有机物由叶片向果实的运输过程所受影响甚小; Dioufa 等^[9]研究表明,小麦生育前期和后期增加水分胁迫程度能提高蛋白质含量的 25%。调亏灌溉的生育期不同,作物对氮肥的吸收和利用状况也不同,适宜时期的亏水和复水对促进水分和养分的吸收、提高水肥利用效率有重要作用^[10]; 黄高宝等^[11]采用池栽法,对不同水分调亏水平下水、肥与根系的时空协调性进行了研究,结果表明,在小麦拔节后期(玉米苗期)以土壤相对含水率(soil relative water content, SRW)的 50%进行亏缺灌水,可明显提高春小麦/春玉米间套系统总的生产力;张步琮等^[12]认为,在春小麦两叶一心期、拔节期水分中度调亏(土壤含水量为田间持水量的 50%~60%),孕穗

期、抽穗期水分不亏缺(土壤含水量为田间持水量 65%~70%),灌浆中期、生理成熟前水分中度亏缺(土壤含水量为田间持水量的 50%~60%),这种调亏模式土壤养分持续利用性最好,能量代谢及生物合成得到加强,小麦持水量也得以提高。

目前关于调亏灌溉对小麦生长发育已有不少研究,但研究对象多以大田漫灌或盆栽为主,水肥流失依然严重^[13-14],且不能代表新疆特殊的滴灌小麦种植模式。因此,本研究利用大田气象数据精确计算麦田蒸散量以指导灌溉为手段,探究了调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响,为新疆滴灌小麦节水、高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况与设计

试验 1 和试验 2 于 2017 年 4 月至 2018 年 8 月在新疆石河子市天业生态园进行(86°04'N, 44°21'E)进行,海拔 450 m,属典型的温带大陆性气候,土壤类型为灌耕灰漠土,土壤质地为壤土, pH 7.8,有机质 9.89 g/kg,全氮 0.83 g/kg,碱解氮 65.06 mg/kg,有效磷 15.48 mg/kg,速效钾 323 mg/kg。

试验供试品种为水分敏感型新春 22 号和水分不敏感型新春 44 号(种子由昌吉市军属农场八连提供),分别用 X1、X2 表示;设置 100% ET₀、80% ET₀、60% ET₀ 3 个调亏灌溉水平,分别用 E1、E2、E3 表示。试验田灌溉系统配置为“一管四”(一条滴灌带两边各 2 行小麦),试验共设置 6 个处理(表 1)。滴管带为贴片内嵌式,滴头流量为 2.6 L/h,滴头与滴头之间距离 30 cm。播种量为 700 万粒/hm²,保苗 550 万株/hm²,小区面积为 18 m²(长×宽为 5 m×3.6 m),3 次重复,以品种为主区随机区组排列,各个小区之间隔离 50 cm 宽防渗带,防止养分和水分横向侧移。试验 1 于 2017 年 4 月 6 日人工条播,4 月 15 日出苗,7 月 6 日收获;试验 2 于 2018 年 3 月 28 日人工条播,4 月 12 日出苗,7 月 5 日收获。

表 1 试验设计

品种	处理	各生长阶段水分调亏灌溉水平					
		两叶一心期	拔节期	孕穗期	抽穗期	灌浆中期	生理成熟前
新春 44 (XC 44)	E1X2	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀
	E2X2	80% ET ₀	80% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	80% ET ₀	80% ET ₀
	E3X2	60% ET ₀	60% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	60% ET ₀	60% ET ₀
新春 22 (XC 22)	E1X1	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀
	E2X1	80% ET ₀	80% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	80% ET ₀	80% ET ₀
	E3X1	60% ET ₀	60% ET ₀	100% ET ₀	100% ET ₀	60% ET ₀	60% ET ₀

氮肥(含氮量为 46%的尿素)20%作基肥施入,80%作为追肥随水施入,不同时期的追肥量根据新疆北疆地区滴灌春小麦临界稀释氮浓度曲线计算施入,彭新新

等^[10]根据滴灌春小麦地上部干物质与对应氮浓度值,构建出北疆地区滴灌春小麦的临界氮浓度幂指数函数:

$$N_c = 5.03W^{-0.38} \quad (R^2 = 0.95) \quad (1)$$

式中： N_c 为植株临界氮浓度值(%)； W 为地上部干物质重最大值(t/hm^2)；

根据公式(1)计算出的各生育期 N_c 的占比为苗期—拔节期 39.34%、孕穗期 13.95%、抽穗期 9.72%、灌浆中期 8.64%、生理成熟前 8.35%，本试验中的氮肥依据此比例施入。钾(K_2O)肥、磷(P_2O_5)肥均作为基肥一次性施入，施肥量分别为 120,150 kg/hm^2 。分别于两叶一心期、拔节期、灌浆中期、生理成熟前进行对应水分调亏，孕穗期、抽穗期

(小麦生长水分敏感期)水分不亏缺，灌溉频率为 7 d/次，每次灌溉前参考 7 天 TAWS1000—SW 室外自动气象站自动记录的每天的最高温度、最低温度、平均风速、相对湿度、日照时间等数据计算作物蒸发蒸腾量，再利用 ET0 Calculator(ET0 Calculator 是联合国粮农组织水资源与土地发展司开发的一个计算参考作物蒸发蒸腾量的软件)计算每次对应调亏灌水量，本试验 ET0 Calculator 测定数据见表 2。其他田间管理措施按照当地高产麦田进行。

表 2 本试验 7 d/次 TAWS1000—SW 记录值及对应调亏灌水量

年份	时间	降雨量/ mm	总辐射/ ($MJ \cdot m^{-2}$)	光照 时间/h	作物 蒸量/mm	E1 处理调亏 灌水量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	E2 处理调亏 灌水量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	E3 处理调亏 灌水量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)
2017	04-06—04-12	0	101.6	36	26.9	269	215	161
	04-12—04-19	16.5	105.4	41	33.2	332	266	199
	04-19—04-26	0.3	148.3	61	38.8	388	310	233
	04-26—05-03	13.9	136.7	53	37.8	378	302	227
	05-03—05-10	5.6	169.1	76	36.0	360	288	216
	05-10—05-17	0.1	195.8	79	48.8	488	488	488
	05-17—05-24	14.2	163.6	76	46.2	462	462	462
	05-24—05-31	3.2	164.5	56	48.1	481	481	481
	05-31—06-07	3.2	160.4	51	43.4	434	353	265
	06-07—06-14	18.5	168.7	81	44.2	442	354	265
2018	06-14—06-21	4.0	186.2	72	49.9	499	399	299
	04-06—04-12	17.7	116.7	51	22.2	222	177	133
	04-12—04-19	8.9	131.7	51	28.6	286	229	172
	04-19—04-26	0	152.2	64	32.6	326	261	197
	04-26—05-03	1.5	150.9	59	43.3	433	347	260
	05-03—05-10	18.7	161.1	66	37.5	375	301	226
	05-10—05-17	12.2	131.3	42	35.4	354	355	355
	05-17—05-24	22.8	181.1	69	34.9	349	349	349
	05-24—05-31	1.0	170.4	66	45.7	457	457	457
	05-31—06-07	5.9	186.8	77	38.7	387	310	232
	06-07—06-14	0	158.4	58	50.9	509	407	305
	06-14—06-21	2.0	190.3	84	56.6	566	453	340

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤质量含水率测定 烘干法测定，小麦出苗后每隔 7 天用土钻采集各试验小区滴灌带边 2 行(2 条滴灌带中间)0—80 cm 土壤，每 20 cm 一个土层，取少量土样装铝盒于烘箱中 105 ℃烘至恒重。

$$C=(M_b-M_l)/M_s \times 100\% \tag{2}$$

式中： C 为土壤质量含水率(%)； M_b 为烘干前总质量(g)； M_l 为烘干后总质量(g)； M_s 为烘干后土样的质量(g)。

1.2.2 土壤硝态氮测定 每隔 7 天用土钻采集各试验小区滴灌带边 2 行(2 条滴灌带中间)0—80 cm 土壤，每 20 cm 一个土层。后用 2 mol/L 的 KCl 溶液 50 mL 浸提鲜土样 1 h，然后用双波长分光光度法(UV—2401 紫外分光光度计)测定。

1.2.3 植株含氮量的测定及氮素营养指数(NNI)的计算 植株地上部分的干样分器官用小型粉碎机粉

碎过筛，利用海能凯氏定氮仪测定植株各器官的含氮量。各器官氮累积量=各器官含氮量×器官干物质质量，各个器官氮累积量相加得到地上部植株氮素累积量。植株含氮量(氮浓度)=植株氮素累积量/植株地上部分干物质质量。

根据北疆地区滴灌春小麦的临界氮浓度幂指数函数($N_c=5.03W^{-0.38}$ ，相关系数 $R^2=0.95$)计算氮素营养指数。NNI 用以定量反映作物体内氮素营养状况。若 NNI 小于 1，则氮素不足；NNI 等于 1，恰好合适；NNI 大于 1，则氮素供应过盛。

$$NNI=N_T/N_c \tag{3}$$

式中： N_T 为地上部生物量氮浓度的实测值； N_c 为根据临界氮浓度稀释曲线模型求得的在地上部生物量相同时的氮浓度值。

1.2.4 产量的测定 在小麦成熟期分别在各处理每个重复内选取长势均匀一致的 3 个点，收获边一行和

边二行小麦,每行收获 200 cm(面积为 0.6 m²)长的小麦。2 行取平均值计算出每个处理的产量。

1.2.5 耗水量 应用农田水量平衡法计算生育期的耗水量。

$$ET = Pr + I + U - R - D - \Delta W \quad (4)$$

式中: Pr 为有效降雨量(mm); I 为滴灌量(mm); U 为地下水补给量(mm); R 为径流量(mm); D 为深层渗漏量(mm); ΔW 为试验末期土壤贮水量与初期土壤贮水量之差(mm)。

由于滴灌,每次滴灌量较少,故 R 和 D 可以忽略不计,地下水位在 50 m 以下,故 U 也可忽略不计,上式简化为:

$$ET = Pr + I - \Delta W \quad (5)$$

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件进行数据处理,SPSS 17.0 统计分析软件进行方差分析,Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同调亏处理对土壤质量含水率的影响

由图 1 可以看出,调亏灌溉处理改变了各土层水分的分布,2 年滴灌春小麦 0—80 cm 土壤水分垂直变化趋势基本一致,各土层土壤质量含水率均随着调亏灌水量的增加而增大,表现为: $E1 > E2 > E3$ 。新春 44 各土层土壤质量含水率略高于新春 22,说明敏感型品种新春 22 对水分的需求量更大。0—20 cm 土

层土壤质量含水率在 $E1$ 调亏水平下,随着小麦生育期的推进前期平缓,在 35~49 天(拔节、孕穗期)时间段缓慢下降,后期又增高,而 $E2$ 、 $E3$ 调亏水平下则表现为前期缓慢降低,在 35~49 天时明显增加,后期又降低。20—40 cm 土层土壤质量含水率在各调亏灌溉水平下变化趋势与 0—20 cm 土层基本一致,一方面说明拔节期和孕穗期是小麦生长需水最大期,另一方面看出中期复水对 $E2$ 、 $E3$ 调亏水平 0—40 cm 土层土壤质量含水率影响显著。相较于 0—40 cm 土层,40—60 cm 土层土壤质量含水量在各调亏灌溉水平间水分波动性降低,但各调亏水平间土壤质量含水率差异更为显著,说明 $E1$ 调亏水平会造成大量水分向土壤深层渗漏。60—80 cm 土层土壤质量含水率变化趋势最为平缓,波动性最小,最为稳定,且中期复水对该土层的影响也最弱。

总体来看,相较于 40—80 cm 土层,0—40 cm 土层水分波动更大,中期复水的影响也更为显著,如 2017 年新春 22 在 60% ET_0 调亏水平下,0—40 cm 土层土壤质量含水率变化幅度达到 9.42%,而下层(40—80 cm)变化相对较为平缓,如 2017 年新春 22 在 60% ET_0 调亏水平下,40—80 cm 土层土壤质量含水率变化幅度只有 5.10%。这可能因为 0—40 cm 土层土壤水分受到灌溉、根区小环境、作物根系活动的共同影响造成的。 $E3$ 调亏水平虽然减小了土壤水分向深层运移的风险,但各土层整体水分含量偏低。

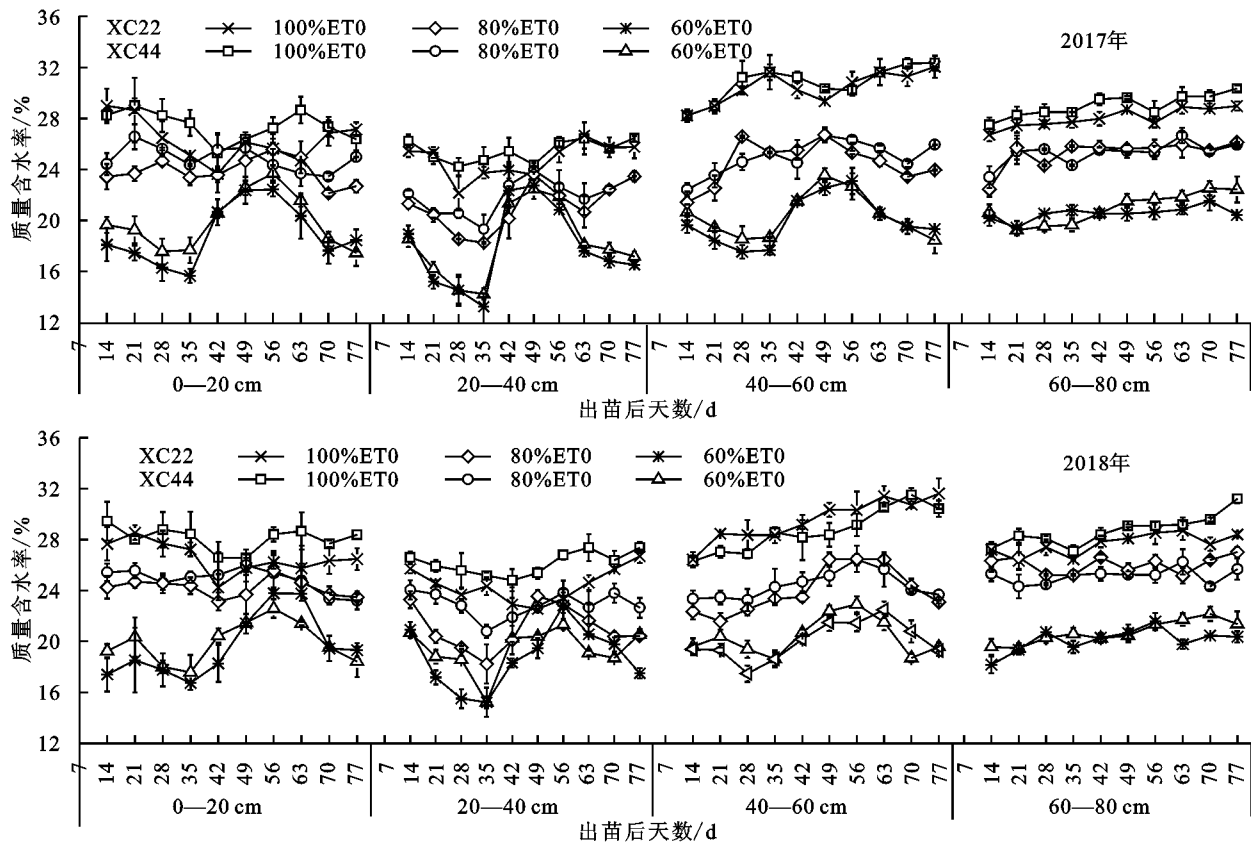


图 1 不同调亏灌溉处理对滴灌春小麦各土层土壤体积含水量的影响

2.2 不同调亏处理对土壤硝态氮的影响

由图 2 可知,在施氮量一定时,2 年不同调亏灌水处理下 0—80 cm 土层土壤硝态氮运移规律基本相同,随着施氮滴水次序的推进,各土层土壤硝态氮含量总体呈现增加趋势。在相同的水分调亏处理下,新春 22 和新春 44 各土层硝态氮含量变化趋势一致,品种间差异不明显。0—20,20—40 cm 土层硝态氮含量在中期复水后呈现先降后增趋势,而 40—60,60—80 cm 土层硝态氮含量在中期复水后呈现先急剧增加后平缓,这说明中期复水在一定程度上增加了土壤硝态氮向深层淋失的风险。

各土层土壤硝态氮含量在 E1、E2、E3 调亏水平下各不相同,0—20 cm 土层土壤硝态氮含量在 E1 调亏水平下表现为缓慢增加的趋势,变幅小,如 2017 年新春 22 号硝态氮含量变幅为 14.78 mg/kg;E2、E3 处理下则表现为先增加,后降低,再增加的趋势,且变幅大,如 E2 调亏水平下,2017 年新春 44 号硝态氮含量变幅为 24.58 mg/kg,E3 调亏水平下,2017 年新春 44 号硝态氮含量变幅为 24.39 mg/kg,成熟期硝态氮含量表现为 E2、E3 调亏水平大于 E1,差异显

著。20—40 cm 土层土壤硝态氮含量变化趋势和表层土壤基本相同,2017 年新春 44 号在成熟期硝态氮含量为: $E3 > E2 > E1$, 分别达到 50.00, 46.00, 35.66 mg/kg。40—60 cm 土层土壤硝态氮含量在 E1、E2 调亏水平下随着施肥滴水的次序推进持续增加,在小麦成熟期达到最大值,如 2017 年新春 22 硝态氮含量分别达到 54.66, 47.22 mg/kg;E3 处理下则表现为先缓慢增加,中期快速增加,最后又缓慢增加的趋势,相较于 E1、E2 处理,硝态氮含量最低,差异显著。60—80 cm 土层土壤硝态氮含量变化在 E1 处理下与 40—60 cm 土壤基本相同;E1、E2 调亏水平则增加缓慢,2 年试验中,成熟期硝态氮含量均表现为 E1 调亏水平大于 E2 和 E3,且差异显著。

由此可知,过多的灌水会加剧表层土壤硝态氮向深层淋失的风险,而较低的灌水量又无法将足量的硝态氮带入小麦深根区,进而抑制了小麦深处根系对氮素的吸收。整体来看,E2 调亏水平各土层土壤硝态氮含量均保持在适宜范围,尤其在小麦需水需氮关键期通过中期(孕穗期、抽穗期)复水,将足量的表层土壤硝态氮带入小麦根区。

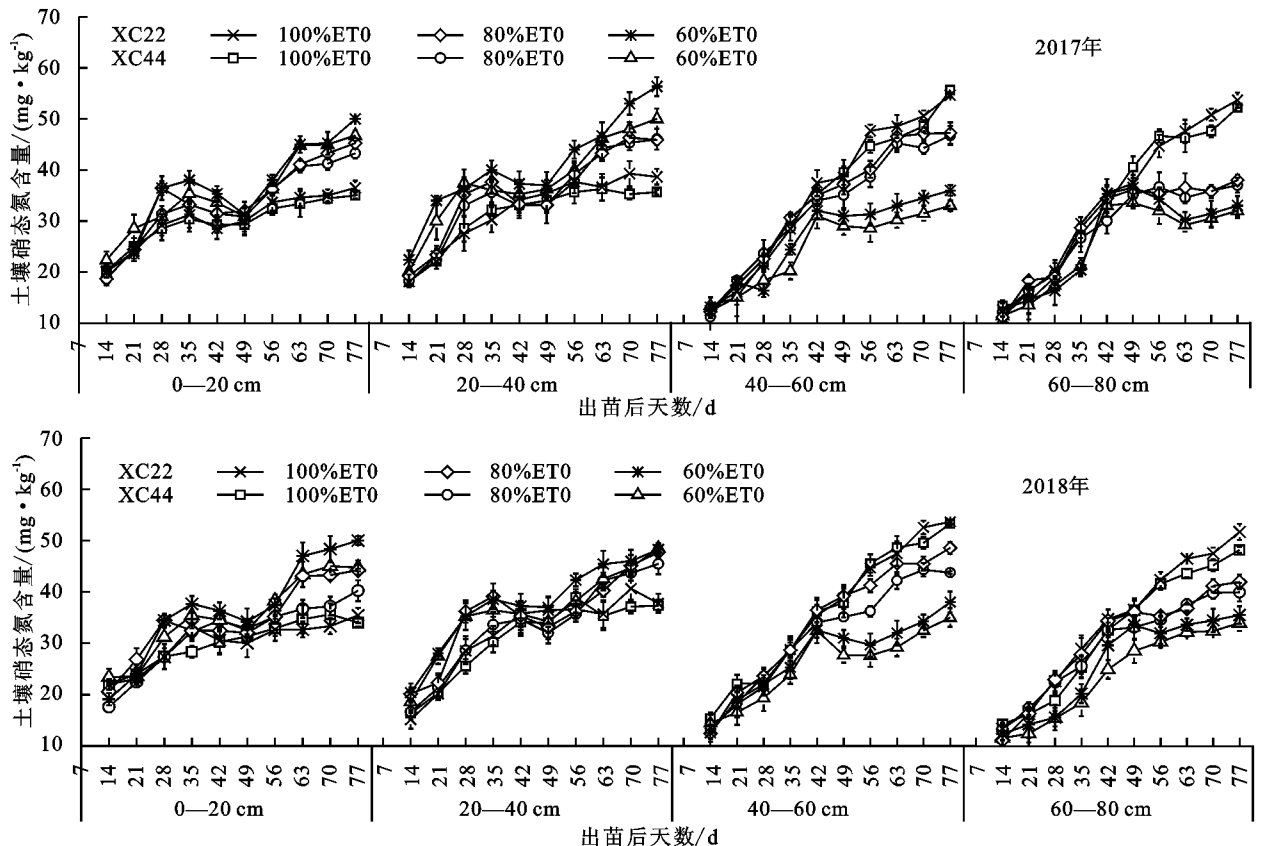


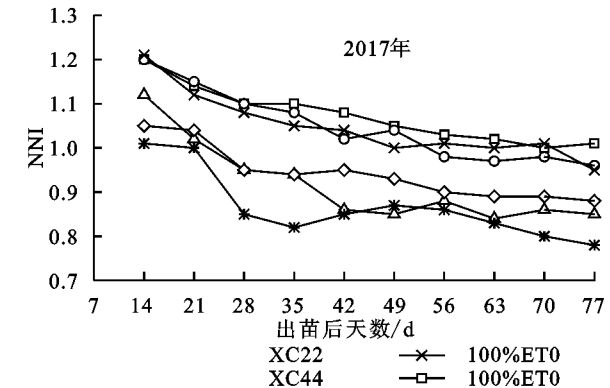
图 2 不同调亏灌溉处理对滴灌春小麦各土层土壤硝态氮含量的影响

2.3 不同调亏处理对滴灌春小麦氮素营养指数 (NNI) 的影响

基于临界氮浓度曲线,利用 NNI 可以对 2 年滴灌春小麦氮营养状况做出直观地判断。根据公式(2)

可以计算出新春 44、新春 22 两个滴灌春小麦品种在不同调亏灌溉处理下 NNI 随出苗后天数的动态变化。由图 3 可知,2 年试验中滴灌春小麦 NNI 随着时间的推进变化趋势基本相同,并且在出苗后 20 天

左右(拔节期)明显下降,表明在拔节期,小麦对氮素的需求量相对较大。当 $NNI < 1$ 时,说明春小麦生长受到了氮素不足的制约;当 $NNI > 1$ 时,说明春小麦生长环境不受氮素限制,但造成氮素浪费;当 $NNI = 1$ 时,则说明春小麦生长环境既不受氮素限制,也不造成氮素浪费。如图 3 所示,水分不敏感型品种新春 44 在 E1 调亏水平下 NNI 的值在出苗后 63 天内均大于 1,而在 E2 调亏水平下 NNI 的值在整个生育时



期均接近于 1,氮素吸收表现最佳,而在 E3 调亏水平下,氮素营养指数 NNI 的值在整个生育时期普遍小于 1,说明水分重度调亏会造成新春 44 氮素吸收匮乏。水分敏感型品种新春 22 在 E1 调亏水平下 NNI 的值在整个生育时期均接近于 1,而在 E2、E3 调亏水平下 NNI 的值在整个生育时期普遍小于 1,说明水分中度调亏和水分重度调亏均会造成敏感型品种新春 22 氮素吸收匮乏。

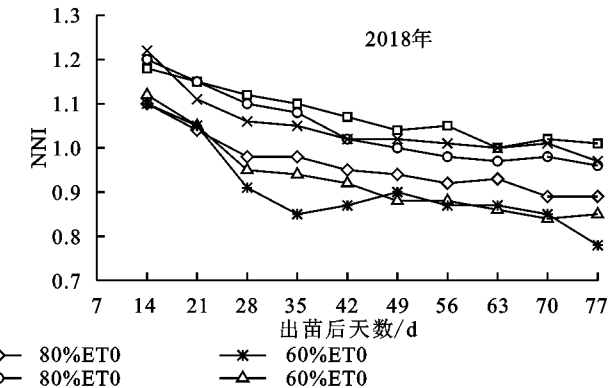


图 3 滴灌春小麦植株地上部氮素营养指数(NNI)的动态变化

2.4 不同调亏灌溉处理对滴灌春小麦经济产量的影响

从表 3 可以看出,2 年试验中,新春 44 籽粒产量普遍高于新春 22,且差异显著,这可能与品种遗传因素有关。新春 22 号在 E1 调亏水平下产量最高,如 2017 年达到 $7\,916.07\text{ kg/hm}^2$,E2、E3 调亏水平下均显著低于 E1,2017 年产量分别为 $7\,516.07$ 、 $6\,088.68\text{ kg/hm}^2$,说明新春 22 产量对水分反应敏感,水分中度调亏和重度调亏都抑制了新春 22 产量的提升。新春 44 在 E1 调亏水平下产量达到最高,但与 E2 相比,产量间无显著差异,说明新春 44 在 E2 调亏水平下能够在较大程度节水的情况下,使产量得到较大补偿。新春 44 在 E1、E2 调亏水平产量均高于 E3,且差异显著,E3 调亏水平不能使产量得到有效的补偿。

2.5 不同调亏灌溉处理对耗水量和水分利用效率的影响

从表 3 可以看出,2 年试验中小麦耗水量和水分利用效率基本趋势一致,随灌水量增加,农田耗水量增加,灌溉水的利用效率逐渐减小,本试验中耗水量为: $E1 > E2 > E3$,如 2017 年新春 22 分别为 $4\,251.76$ 、 $3\,747.92$ 、 $3\,232.15\text{ m}^3/\text{hm}^2$,水分利用效率为: $E3 > E2 > E1$ 。新春 44 水分利用率最高的调亏水平为 E3,2017、2018 年水分利用效率分别为 2.43% 、 2.55% ,均高于 E2 水平,但差异不显著。说明新春 44 在中度调亏处理下节约灌溉用水的同时,起到了增产作用,进而补偿了水分利用效率(2 年平均节水 $616.32\text{ m}^3/\text{hm}^2$)。E3 处理水分利用效率最低,说明过多的灌水造成了

水资源浪费;水分敏感型品种新春 22 虽然在 E2 调亏灌溉水平下小麦水分利用效率表现出了更强的补偿性,但小麦水分利用效率普遍较低,与新春 44 相比,具有显著的品种间差异。

表 3 不同处理对滴灌春小麦产量、耗水量及水分利用效率的影响

年份	处理	灌溉量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用 效率/%
2017	E1X1	4533.26	7916.07b	4251.76a	1.86d
	E2X1	3918.42	7516.07c	3747.92b	2.01b
	E3X1	3296.65	6088.68d	3232.15c	1.88d
	E1X2	4533.26	8176.83a	4194.26a	1.95c
	E2X2	3918.42	8115.67ab	3749.92b	2.16ab
	E3X2	3296.26	7601.50c	3127.76d	2.43a
2018	E1X1	4264.42	8000.15b	4107.12a	1.95d
	E2X1	3646.62	7553.28d	3578.32c	2.11bc
	E3X1	3026.66	6214.75e	2867.36f	2.17b
	E1X2	4264.42	8164.64a	3904.12b	2.09c
	E2X2	3646.62	8139.15a	3487.32cd	2.33ab
	E3X2	3026.66	7759.41c	3041.36e	2.55a

3 讨论

灌溉量是影响土壤水分分布的主要因素^[15],薛丽华等^[16]通过研究滴灌量对小麦耗水特性和干物质积累分配的影响认为,随着小麦田滴灌量的增加,0—80 cm 土层土壤含水量明显升高。本试验研究发现,在滴灌频率、施氮量一致的情况下,不同水分调亏水平下各土层土壤质量含水率变化显著,随着调亏灌水量的增加,

0—80 cm 土层土壤质量含水率表现为 $100\% \text{ ET}_0 > 80\% \text{ ET}_0 > 60\% \text{ ET}_0$ 。孟维伟等^[17]认为,土壤含水量受灌水影响较大,但受小麦品种的影响较小。而本试验研究发现,新春 44 与新春 22 各土层土壤质量含水率虽差异不显著,但普遍高于新春 22,这可能是由于在等量灌水条件下,水分敏感型品种新春 22 相较于水分不敏感型品种新春 44 能吸收更多的土壤水分。张伟等^[18]在对不同灌水量对滴灌春小麦水分利用率及产量的影响研究中发现,0—40 cm 土层是各处理根量值(根质量、根体积、根长密度)的最大层,也是根系活动最为旺盛的区域,该土层土壤水分变化剧烈。本试验中,上层(0—40 cm)土壤水分变化幅度较大,如 2017 年新春 22 在 $60\% \text{ ET}_0$ 调亏水平下,0—40 cm 土层土壤质量含水率变化幅度达到 9.42% ,而下层水分(40—80 cm)变化相对平缓,如 2017 年新春 22 在 $60\% \text{ ET}_0$ 调亏水平下,40—80 cm 土层土壤质量含水率变化幅度只有 5.10% 。孟兆江等^[19]通过研究调亏灌溉对小麦不同生育阶段水分蒸散的影响认为,适时适度的水分调亏水平能够保持较为适宜土壤含水量,进而提高小麦水分利用效率。本试验研究发现,E1 调亏水平下,深层(40—80 cm)土壤质量含水率显著高于 E1、E2, $100\% \text{ ET}_0$ 调亏灌溉水平虽然可以保持较高水平的土壤水分,但同时增加了水分向土壤深层流失的风险;E2 水平各土层质量含水率均保持在平缓状态,如 2017 年新春 44 号在 0—20, 20—40, 40—60, 60—80 cm 土层土壤质量含水率变化幅度分别为 3.42% , 5.45% , 5.18% , 1.82% ,整体保持在 5.50% 以内, $80\% \text{ ET}_0$ 调亏水平既能保证适量的土壤含水量,同时又能够减少水分向深层渗漏。E3 水平下,土壤水分下渗风险最低,但深层土壤水分含量匮乏,最终限制了小麦的生长发育。小麦在出苗后 35 天和 49 天(孕穗期和抽穗期)补水显著增加了各处理 0—40 cm 土层的土壤水分,使中度(E2)和重度(E3)水分调亏在 0—40 cm 土层土壤水分得到补充,这与张步狲等^[20]的研究结果一致。

杜军等^[21]通过研究灌溉、施肥对小麦土壤硝态氮淋溶损失认为,硝态氮是农田氮素淋失的主要形式,且灌溉量对硝态氮淋溶量的影响程度要显著高于施氮量。同时,土壤剖面硝态氮的积累和运移因灌溉量和灌溉时期的不同而异。本试验研究发现,不同调亏灌溉水平调节了土壤硝态氮含量在 0—80 cm 土层的分布,随灌溉量增加,土壤含水量逐渐增加,土壤硝态氮向下层土壤运移加深,0—80 cm 土层土壤硝态氮含量表现为: $\text{E1} > \text{E2} > \text{E3}$, 差异显著,成熟期新春

22 和新春 44 在 E1 水平下, 60—80 cm 土层土壤硝态氮含量最高, 分别达到 $53.16, 52.16 \text{ mg/kg}$, 与苗期相比, 增加近 4 倍, 这与石玉等^[22]的研究结果一致。同时, 随灌水量的增加, 成熟期表层(0—20 cm)土壤硝态氮含量降低, 土壤剖面中的硝态氮由上层向下层移动加重, E1 调亏水平表层土壤硝态氮不足而深层累积, 而 E3 调亏水平表层土壤硝态氮累积而深根区匮乏, 这与栗雨等^[23]的研究结果一致。本试验研究发现, 中度调亏(E2X1、E2X2)根区硝态氮含量能够保持在适宜水平, 可见, 适宜的灌溉既能降低硝态氮向深层土壤淋溶的风险, 亦有利于滴灌春小麦对深层水分和硝态氮的吸收利用, 以达到节水和氮素高效率利用的目的, 这与刘新宇等^[24]的研究结果一致。本试验研究发现, 在相同的调亏灌溉水平下, 2 种滴灌春小麦品种各土层土壤硝态氮含量无显著差异, 说明作物品种对土壤硝态氮动态影响较低。

氮素营养指数(NNI)是基于作物临界氮浓度提出的, 有其合理的生物学意义, 能定量反映作物体内的氮素营养状况^[10]。李国安等^[25]通过研究水氮分布对小麦产量的影响认为, 在小麦拔节期重施氮肥能显著提高小麦籽粒产量。本试验中, 小麦出苗后 14~28 天(两叶一心期、拔节期)NNI 下降趋势较大, 说明该时期为小麦对氮素需求量增大期, 这与前人^[26]研究结果一致。俗话说“有收无收在于水, 收多收少在于肥”, 充分说明养分和水分对小麦生长的作用是相互调控的。水分能够影响氮素在土层中的纵向和横向转化和迁移, 进而影响小麦对氮素的吸收利用。低水灌溉会限制氮素肥效的正常发挥, 而高水灌溉又会增加氮素向土壤深层淋溶损失的风险, 进而限制小麦氮素吸收^[27]。本试验研究发现, 小麦氮素营养指数(NNI)保持在 $0.78 \sim 1.21$, 整个生育期 NNI 整体表现为: $\text{E1} > \text{E2} > \text{E3}$, E1 水平虽然造成硝态氮深层淋失严重, 但氮素营养指数 NNI 却表现最高, 这可能是因为该调亏水平下边二行小麦获得了较为适宜的水肥状态, 进而总体提升了该水平的氮素利用率。2 年试验中, 新春 44 在 E2 水平下 NNI 值在小麦整个生育期一直接近 1, 说明在额定施氮量为 300 kg/hm^2 水平下, 新春 44 在 E2 调亏水平下能充分吸收利用氮素。

在经历一定的水分亏缺后给予复水, 作物会呈现生产量快速恢复的现象, 山仑^[28]把这种现象称为补偿效应。本试验中, 新春 44 在 E1 水平下产量最高, E2 水平与 E1 水平相比, 产量有所下降, 但差异不显著, 说明 2 个滴灌春小麦品种通过苗期中度干旱锻炼、中期复水、后期中度干旱的调亏水平, 能够对小麦

籽粒产量起到明显的补偿效应,这与郭相平等^[29]的研究结果一致。霍东亮等^[30]通过研究调亏灌溉对作物土壤含水量及生长特性的影响认为,对小麦进行重度亏水处理,与对照组相比较小麦的生长受到严重影响,主要表现为小麦穗长最小,单穗重量最轻。本试验中,E3与E1、E2调亏水平相比,产量较低且差异显著,春小麦在整个生育期持续受旱,虽然中期复水,但产量补偿效果不明显,说明过低的灌溉量会抑制小麦籽粒产量的形成,这与魏虹等^[31]的研究结果一致。吴金芝等^[32]研究发现,调亏灌溉对不同小麦品种的产量影响差异可以达到44.86%。在本试验中,同等调亏灌溉处理下,新春44产量普遍高于新春22号,存在显著的品种间差异,这可能是由于水分敏感型品种新春22的边二行小麦(滴灌带旁第2行小麦)相较于水分不敏感型品种新春44产量过低造成的。新春22在不同调亏水平下产量差异均显著,而新春44能在E2调亏水平下使籽粒产量得到有效的补偿,与E1调亏水平相比,无显著差异,由此说明,灌溉调亏对新春44籽粒产量的补偿效果优于新春22号。

董宝娣等^[33]通过研究小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应指出,不同小麦品种的水分利用效率相差可达42.18%,水分利用效率与品种抗旱性呈正相关,且随品种的改良相关性提高,不同抗旱类型小麦品种耗水量为343~350 mm,不同品种间耗水量无显著差异。本试验中,农田耗水量随着调亏灌溉量的增加而增加,表现为:E1>E2>E3,同一调亏灌溉水平下,2个滴灌春小麦品种耗水量无显著差异,而水分利用效率存在显著的品种间差异。Panda等^[34]指出,在一定的水分胁迫下,小麦可以获得较高的水分利用效率。本试验研究发现,水分不敏感型品种新春44水分利用效率随着调亏灌水量的增加而减小,但E1与E2调亏灌溉水平间无显著差异,说明E2调亏灌溉水平能够有效提高小麦水分利用效率,而水分敏感型品种新春22虽然在E2调亏灌溉水平下小麦水分利用效率表现出了更强的补偿性,但小麦水分利用效率普遍较低,这可能由于两方面原因造成的:一方面可能是品种遗传因素决定;另一方面可能由于敏感型品种在特殊的滴灌模式下,边二行小麦产量过低造成的。Li等^[35]认为,适当的水分胁迫可以减少小麦的耗水量,而对产量的影响不大。本试验中,新春44在号E3调亏水平下水分利用效率最高,但与E2处理相比,差异不显著,新春44通过中度调亏(E2),在节约灌溉用水约616.32 m³/hm²的同时,使产量得到了显著的补偿。

4 结论

(1)在同一灌溉频率、施氮量水平下,加大调亏灌溉程度可以减轻0—40 cm土壤水分和土壤硝态氮向深层流失的风险,减少作物耗水量,提高了水分利用效率。但重度调亏灌溉会抑制小麦水分吸收,影响小麦生长发育,限制产量形成。

(2)在同一灌溉频率、施氮量水平下,新春22和新春44在土壤质量含水量和土壤硝态氮含量指标上无显著的品种间差异,小麦品种对于土壤理化性质影响较小。

(3)在同一灌溉频率、施氮量水平下,水分不敏感型品种新春44通过中度调亏(E2),在节约大量灌溉用水同时(与E1相比,2年平均节水616.32 m³/hm²),提高了水分利用效率,保持了最适的氮素营养指数(NNI),进而使产量得到了显著的补偿。而在同一灌溉频率、施氮量水平下,水分敏感型品种新春22通过中度和重度灌溉调亏均不能使产量得到有效的补偿。

(4)在同一灌溉频率、施氮量水平下,品种对滴灌春小麦水分利用效率的影响大于调亏灌溉水平对滴灌春小麦水分利用效率的影响。选择优良的小麦品种是获得高产的重要条件。

(5)水分不敏感型品种新春44更适合在北疆地区生产,综合考虑氮素营养指数(NNI)、耗水量、水分利用效率及产量,其最适调亏水平为E2。

参考文献:

- [1] Hui Y A, Tasheng D. Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest china[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 79: 193-204.
- [2] 张磊,李福生,王连喜,等.不同灌水处理对春小麦生长和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 46-49.
- [3] 成雪峰,张风云,柴守玺,等.不同灌溉模式对春小麦产量和水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(2): 80-82.
- [4] 管建慧,张永平,蒋安宁.不同灌溉对春小麦水分消耗特性和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(8): 272-276.
- [5] 胡相明,赵艳云.小麦调亏灌溉研究及其应用前景展望[J]. *山东农业科学*, 2010, 11(14): 47-50.
- [6] Pandey R K, Maraville J W, Admou A. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a Sahelian environment. I. Gain yield, yield components and water use efficiency[J]. *European Journal of Agronomy*, 2001, 15(2): 93-105.
- [7] 孟兆江,段爱旺,王景雷,等.调亏灌溉对冬小麦根冠生长影响的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4):

- 37-41.
- [8] Chalmers D J, Burge G, Jerie P H, et al. The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation with holding and regulated deficit irrigation[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1986, 111(6): 904-907.
- [9] Dioufa O, Broub Y C, Dioufa M, et al. Response of pearl millet to nitrogen as affected by water deficit[J]. *Agronomie*, 2004, 24(2): 77-84.
- [10] 彭新新, 刘琪, 刁明, 等. 基于临界氮浓度的滴灌春小麦氮素营养诊断[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(7): 1009-1015.
- [11] 黄高宝, 张恩和. 调亏灌溉条件下春小麦玉米间套农田水、肥与根系的时空协调性研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 53-57.
- [12] 张步舫, 赵文智, 张伟. 春小麦调亏灌溉对土壤氮素养分的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1095-1099.
- [13] 王冀川, 徐翠莲, 韩秀峰. 不同土壤水分对滴灌春小麦生长、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业现代化研究*, 2011, 32(1): 115-119.
- [14] 蒋光昱, 杨培岭, 任树梅. 调亏滴灌对土壤水盐分布与河套蜜瓜产量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 198-204.
- [15] 魏雅芬, 张春满. 不同灌溉方式下果园土壤水分分布规律及合理灌溉研究[J]. *北方园艺*, 2017, 41(3): 178-181.
- [16] 薛丽华, 胡锐, 赛力汗, 等. 滴灌量对冬小麦耗水特性和干物质积累分配的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(1): 78-83.
- [17] 孟维伟, 张微, 张永丽. 灌水对不同小麦品种耗水特性和土壤硝态氮运移的影响[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(6): 1123-1129.
- [18] 张伟, 李鲁华, 吕新, 等. 不同灌水量对滴灌春小麦根系时空分布、水分利用率及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(3): 361-371.
- [19] 孟兆江, 段爱旺, 王景雷. 调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段水分蒸散的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 198-202.
- [20] 张步舫, 李凤民. 调亏灌溉对春小麦土壤水分动态的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(4): 52-55.
- [21] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 57-64.
- [22] 石玉, 于振文, 何建宁, 等. 不同测墒补灌水对小麦水氮利用及土壤硝态氮淋溶的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 445-452.
- [23] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 氮素和灌溉交互对冬小麦氮素吸收和分布以及土壤中硝酸盐的积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 138-148.
- [24] 刘新宇, 张丽娟, 袁金丽, 等. 耕层水氮调控对小麦利用土壤深层累积硝态氮的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(17): 3564-3571.
- [25] 李国安, 蒋静, 马娟娟, 等. 咸水灌溉对土壤水盐分布和小麦产量的影响[J]. *排灌机械工程学学报*, 2018, 36(6): 544-552.
- [26] 李卫民, 周凌云. 水肥(氮)对小麦生理生态的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(2): 136-142.
- [27] 王小燕, 张永丽, 于振文. 水氮交互对小麦 20 籽粒蛋白质品质及氮素和水分利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(2): 318-325.
- [28] 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(7): 848-855.
- [29] 郭相平, 康绍忠, 索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. *灌溉排水*, 2001, 20(1): 25-27.
- [30] 霍东亮, 孔维萍. 调亏灌溉对作物土壤含水量及生长特性的影响[J]. *农艺农技*, 2017, 22(4): 72-73.
- [31] 魏虹, 林魁, 李凤民, 等. 有限灌溉对半干旱区春小麦根系发育的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 106-110.
- [32] 吴金芝, 王志敏, 李友军. 干旱胁迫下不同抗旱性小麦品种产量形成与水分利用特征[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 25-35.
- [33] 董宝娣, 师长海, 乔匀周, 等. 不同灌溉条件下不同类型冬小麦产量水分利用效率差异原因分析[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1096-1103.
- [34] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 66(3): 181-203.
- [35] Li F M, Liu X L, Guo A H. Effects of early soil moisture distribution on the dry matter partition between root and shoot of winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(2): 163-171.