

咸淡水交替灌溉对冬小麦生长及产量的影响

翟亚明^{1,2},程秀华¹,黄明逸¹,闵勇³,强超¹,吕雯¹

(1.河海大学农业工程学院,南京210098;2.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京210098;
3.江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司,江苏苏州215128)

摘要:【目的】探究不同咸淡水交替灌溉方式对冬小麦生长及产量的影响,并通过通径分析在高产的基础上选择适宜冬小麦的咸淡水交替灌溉方式。【方法】采用避雨测坑试验,灌溉咸水矿化度设为1、3、5 g/L NaCl,以全生育期灌溉淡水(0.12 g/L NaCl)为对照(CK),分别在冬小麦的拔节—抽穗期、抽穗—开花期、灌浆期设置咸-淡-淡(BFF)、淡-咸-淡(FBF)和淡-淡-咸(FFB)3种咸淡水交替灌溉方式,研究了冬小麦生长指标、产量及其构成因子。【结果】BFF处理对冬小麦生长及产量具有较大的抑制作用,其次是FBF处理,FFB处理影响最小。在相同的咸淡水交替灌溉处理下,微咸水矿化度越大,对冬小麦生长及产量抑制作用越大;通径分析表明对冬小麦产量形成直接影响最大的性状是穗粒数,决策系数为0.697 0,其次是秸秆质量、千粒质量和穗数,决策系数分别为0.377 5、0.322 8和0.286 6,株高和单株地上干物质累积质量对冬小麦产量影响较小。【结论】在灌浆期采用较低矿化度微咸水灌溉对冬小麦穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数影响不明显,从而对产量影响较小,因此在冬小麦拔节—开花期采取淡水灌溉并于灌浆期转换为3 g/L微咸水灌溉,可保证较高产量并实现微咸水资源的合理利用。

关键词:微咸水;交替灌溉;冬小麦;通径分析

中图分类号:S274

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.2019097

翟亚明,程秀华,黄明逸,等.咸淡水交替灌溉对冬小麦生长及产量的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(11):1-7.

0 引言

我国是典型的农业大国,人口众多,农业淡水资源需求大,但国内淡水资源严重短缺,供需矛盾愈来愈突出。咸水和微咸水等非常规水资源越来越多地被重视。国内外大量试验表明微咸水可以用来灌溉^[1-5],对微咸水资源进行合理的开发与利用可以有效保障淡水资源短缺下的农业生产发展。但当微咸水灌溉导致土壤盐分超过作物耐盐阈值时,会造成盐分胁迫,导致作物生长速度和光合作用降低,造成产量减损^[6-8]。马俊永等^[9]、曹彩云等^[10]研究表明小麦的株高、叶面积和产量随微咸水矿化度的增高而降低。张展羽等^[11]研究了不同质量浓度微咸水灌溉对玉米生理生长指标的影响,发现当微咸水矿化度超过3 g/L时会对玉米生产产生危害。张勇等^[12]研究指出在同一生育期,灌溉水矿化度越高,玉米株高、叶面积、干物质质量和产量越低。

咸淡水轮灌作为将微咸水与淡水联合运用的一种灌溉模式,既可以节约淡水资源,提高水资源利用率,又可以控制土壤盐分的积累,降低盐分对作物的抑制作用。米迎宾等^[13]通过对0~100 cm深度土壤的盐分分布状况以及作物产量进行了分析,综合土壤的积盐状况和作物产量,淡-淡-咸的轮灌顺序为最优方案。马中昇等^[14]认为对于耐盐性强的作物,如棉花和大麦,在苗期受盐分影响较大,会对生长及产量造成不良影响,而采用咸淡水轮灌的方式,可避免在作物苗期等盐分敏感时期受到盐分的胁迫,进而保障作物生长。

冬小麦是我国主要农作物之一,由于其生育期常处于干旱季节,农业灌溉是保证冬小麦高产的重要手段。咸淡水交替灌溉可以弥补淡水资源的不足对小麦生长影响并促进微咸水的合理高效利用。目前对冬小麦的咸淡水交替灌溉研究大多是针对土壤水盐的累积变化^[13,15]及土壤理化性质变化^[16-17],而对其生长及产量的影响也有一定研究^[18-19]。此外,小麦产量高低与其生长指标及产量构成因子之间有着直接或间接的关

收稿日期:2019-06-17

基金项目:中央高校基本科研业务费(B19020180);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400208)

作者简介:翟亚明(1982-),男,江苏泰州人。副教授,主要从事节水灌溉理论与技术、农田灌溉排水等方面研究。E-mail:zhaiymhhu@163.com

系^[20-21]。通径分析可将冬小麦农艺性状对产量的关系分为直接贡献和间接贡献,有助于发掘对产量直接贡献最大的农艺性状,进而优化微咸水灌溉效率。综上,以冬小麦为研究对象,通过不同微咸水矿化度及不同轮灌方式组合试验,研究不同矿化度微咸水-淡水交替灌溉对冬小麦生长及产量的影响,并利用相关和通径分析方法,研究冬小麦生长指标及产量构成因子与产量之间的相关性及对产量的影响,以探求适合作物生长及满足产量要求的灌溉方式。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016年12月—2017年6月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室节水园区大型蒸渗仪中进行。试验区位于南京市江宁区,地理坐标为北纬31°86',东经118°60',属亚热带湿润气候。节水园区自来水电导率50 $\mu\text{S}/\text{cm}$,矿化度约0.12 g/L。试验土壤类型为黄棕壤土,土壤基本物理性质见表1。试验用蒸渗仪面积为5.0 m^2 (2.5 $\text{m} \times 2.0 \text{ m}$),各蒸渗仪间通过混凝土墙体隔开。

表1 供试土壤基本物理性质

土层深度 <i>H/cm</i>	土壤粒径分布/%			土壤体积质量 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	田间体积 持水率/%	土壤电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)
	砂粒(>0.02~2 mm)	粉粒(>0.002~0.02 mm)	黏粒(<0.002 mm)			
0~30	43.37	37.36	19.27	1.25	31.11	146.2
30~60	35.62	38.91	25.47	1.45	29.50	103.7
60~90	27.83	42.49	29.68	1.58	28.19	86.4

1.2 试验设计

试验以苏麦1号为供试对象,于2016年12月13日播种,播量为300 kg/hm^2 ,2017年6月5日收获,全生育期共175 d。根据当地种植经验和灌溉习惯,播种前对蒸渗仪内0~20 cm土壤进行翻耕,并施复合肥作为底肥,施量为750 kg/hm^2 ,次年抽穗期均匀喷洒除草剂并均匀喷洒农药防治蚜虫。冬小麦生育期划分为越冬期(1~67 d)(时间自冬小麦播种日始计,下同)、返青期(68~110 d)、拔节—抽穗期(111~132 d)、抽穗—开花期(133~154 d)、灌浆期(155~166 d)、成熟期(167~175 d)。除播前灌溉足量底墒水(淡水)和返青期灌溉80 mm淡水以确保小麦正常发育外,冬小麦生育期内灌水3次,分别为拔节—抽穗水(111 d),抽穗—开花水(133 d)和灌浆水(155 d)。每次灌水量设定为80 mm。微咸水处理在同1 d用等量的盐水灌溉。灌溉用水是通过使用塑料管和低压泵的地面灌溉,并用流量计记录灌溉量。为控制降雨带来的影响,冬小麦生育期内非雨天开棚,雨天关棚。其他管理措施同一般大田。咸淡水轮灌为咸-淡-淡、淡-咸-淡和淡-淡-咸3种方式,分别在冬小麦的拔节—抽穗期、抽穗—开花期、灌浆期使用微咸水和淡水进行灌溉,其中咸水设置1、3、5 g/L NaCl 3种不同矿化度,并以全生育期灌溉淡水(节水园区内自来水,0.12 g/L NaCl)处理为对照,共10组处理,随机排列。BFF表示“咸-淡-淡”,即拔节—抽穗期灌溉微咸水,其他2个生育期灌溉淡水;FBF表示“淡-咸-淡”,即抽穗—开花期灌溉微咸水,其他2个生育期灌溉淡水;FFB表示“淡-淡-咸”,即灌浆期灌溉微咸水,其他2个生育期灌溉淡水。代表微咸水的灌溉水由NaCl(AR)与淡水配制而成。各处理具体灌溉制度如表2所示。

表2 冬小麦灌溉制度

处理	灌溉方案			灌水定额/mm		
	拔节—抽穗期	抽穗—开花期	灌浆期	111 d	133 d	155 d
BFF1	B ₁	F	F	80 ^B	80	80
BFF3	B ₃	F	F	80 ^B	80	80
BFF5	B ₅	F	F	80 ^B	80	80
FBF1	F	B ₁	F	80	80 ^B	80
FBF3	F	B ₃	F	80	80 ^B	80
FBF5	F	B ₅	F	80	80 ^B	80
FFB1	F	F	B ₁	80	80	80 ^B
FFB3	F	F	B ₃	80	80	80 ^B
FFB5	F	F	B ₅	80	80	80 ^B
CK	F	F	F	80	80	80

注 B表示微咸水灌溉;F表示淡水灌溉;1、3、5表示微咸水矿化度(g/L)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 作物生长指标

小麦越冬期后,在第109、120、131、142、153、164和175天测定冬小麦株高、叶面积、干物质累积量等生长指标。

1)株高。随机选取不同处理蒸渗仪中小麦植株5株,在抽穗期前期,采用精度为0.001 m的直尺测量从旗叶叶尖到地面根茎部的距离,抽穗期开始测量自然生长状态下最高的穗顶(不连麦芒)至地面根茎部的距离,取其平均值作为各处理下小麦株高。

2)叶面积指数LAI。每个处理小区选取5点采用Sun-Scan型冠层分析仪(Delta-T Devices Ltd,U.K.)测定冬小麦叶面积指数LAI,取其平均值。

3)地上干物质累积质量。在各处理小区中随机采集冬小麦植株(地上部分)5株,样品取回后放入烘箱在105℃下杀青30 min,75℃烘干至恒定质量,测定其干质量。

1.3.2 产量

2017年6月5日收获后,在各处理蒸渗仪中随机取3个小区(面积为1 m²)对冬小麦进行考种,测量其穗长、每穗粒数、单位面积穗数、千粒质量、秸秆质量、单位面积产量等指标。

1)穗长。用直尺测量自穗节基部至穗尖处(不连麦芒)的长度,每个小区随机测量10株,取平均值。

2)每穗粒数。每个小区随机取10株小麦计算其穗粒数,取平均值。

3)单位面积有效穗数。计算各小区(1 m²)冬小麦的穗数,取平均值,并推算单位面积的有效穗数(万穗/hm²)。

4)单位面积产量。各小区(1 m²)的麦穗进行脱粒后,称量得到实际产量,每个处理重复3次,取平均值,并推算单位面积的实际产量(kg/hm²)。

5)千粒质量。从已收获的各处理冬小麦籽粒中随机选取1 000粒称千粒质量,每处理重复3次,取平均值。

6)秸秆质量。收获时将各小区冬小麦从地表处割断,小麦茎秆穗分离后,将秸秆部分在105℃下烘30 min,75℃条件下烘至恒定质量,测定1 m²内的秸秆质量,并推算单位面积上的秸秆质量(kg/hm²)。

1.4 数据分析

试验数据采用Excel进行记录和整理,并运用SPSS进行方差分析,采用Duncan法进行多重比较($P=0.05$),同时采用双变量相关法分析各参数之间的相关性。所有数据分析均在SPSS 20中进行,采用Origin 9.0作图,通径分析在AMOS中进行。

2 结果与分析

2.1 咸淡水轮灌对冬小麦生长及产量的影响

2.1.1 咸淡水轮灌对冬小麦生长的影响

不同咸淡水交替灌溉对冬小麦生长指标的影响如图1所示。随着微咸水矿化度的增加,与CK相比,冬小麦的株高(图1(a)—图1(c))、叶面积指数(图1(d)—图1(f))和单株地上干物质累积质量(图1(g)—图1(i))降幅不断增大。BFF处理在拔节—抽穗期灌溉微咸水之后,冬小麦株高、叶面积指数和单株地上干物质累积质量数值较CK均有所降低;FBF处理中的冬小麦生长指标在抽穗—开花期之前与CK无明显差异,但在抽穗—开花期之后与CK相比有所减小,但相较于BFF处理降幅较小;FFB处理相较CK对冬小麦生长指标的影响不显著。其中,冬小麦株高、叶面积指数、单株地上干物质累积质量相比CK最大降幅均出现在BFF5处理中。

2.1.2 咸淡水轮灌对冬小麦产量及其构成因子的影响

表3为不同咸淡水轮灌处理对冬小麦产量及其构成因子的影响。从表3可以看出,BFF5处理对冬小麦穗长影响显著,与CK相比降低了7.20%,其余处理与CK差异不显著。不同咸淡水轮灌方式及不同微咸水矿化度对穗数、穗粒数及千粒质量有着较为一致的影响。BFF5、FBF5及FFB5处理的穗数、穗粒数及千粒质量与CK差异显著($P<0.05$)。与CK相比,最大降幅出现在BFF5处理降幅最大,其穗数、穗粒数及千粒质量与CK相比分别降低了12.90%、17.52%、20.36%;相对于CK,FBF5处理的穗数、穗粒数及千粒质量分别降低了7.26%、6.36%、7.42%;FFB5处理的穗数、穗粒数及千粒质量降幅较小,分别为3.74%、5.57%、4.59%。

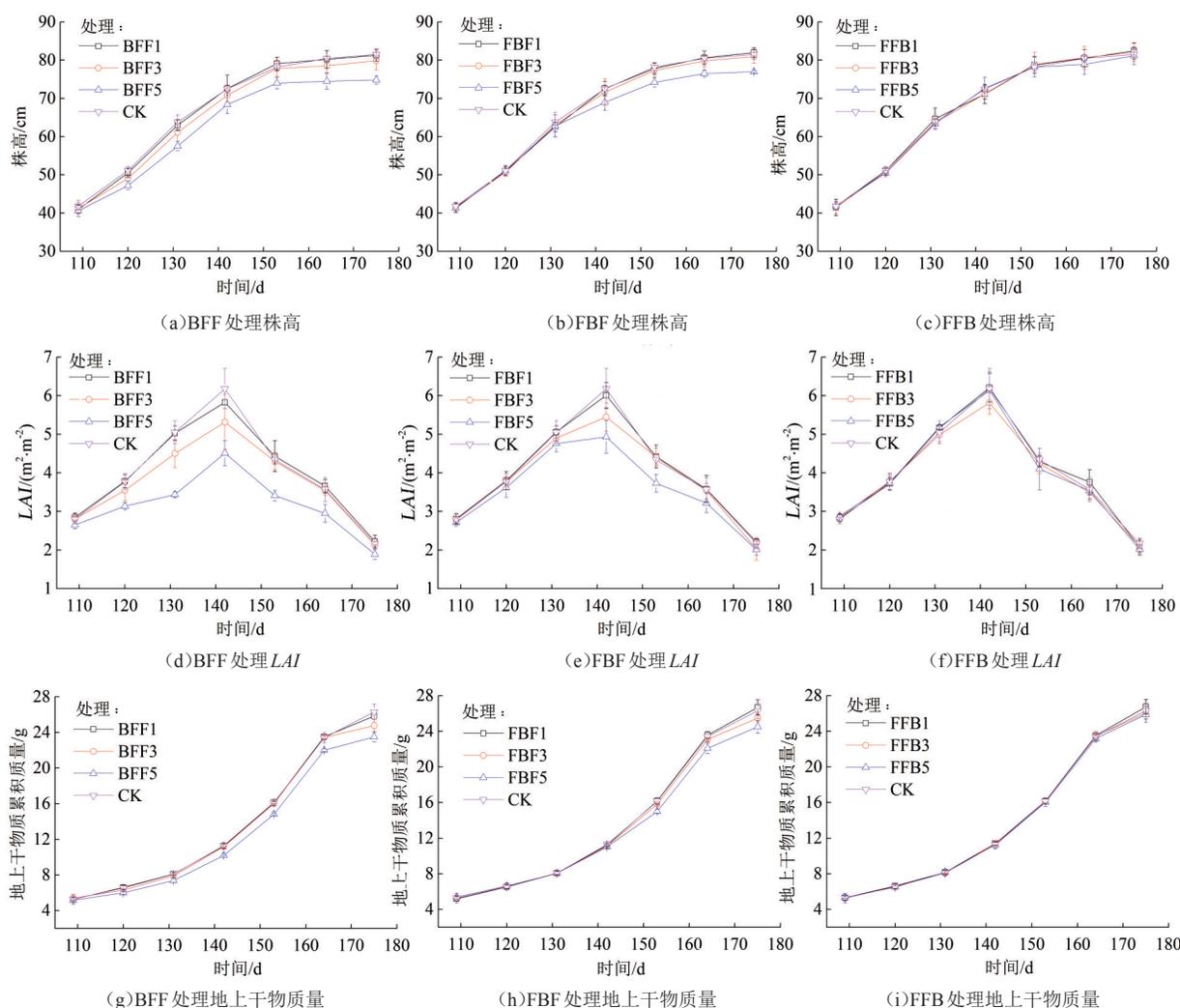


图1 不同咸淡水轮灌处理对冬小麦生长指标的影响

表3 不同咸淡水轮灌处理冬小麦产量及其构成因子

处理	穗长/cm	穗数/(万穗·hm ²)	穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)	千粒质量/g	秸秆质量/(kg·hm ²)	产量/(kg·hm ²)
CK	8.20±0.30a	514.67±12.89a	41.83±1.69a	43.81±1.13a	13 542.55±780.61a	9 269.60±822.38a
BFF1	8.15±0.56a	517.82±12.48a	41.50±3.80a	43.67±0.60a	13 431.63±710.60a	9 156.80±1 194.35a
BFF3	7.92±0.25a	506.45±13.49a	41.16±2.21a	43.01±0.79ab	12 547.81±715.21ab	8 883.31±837.59a
BFF5	7.56±0.28b	448.30±36.19b	34.50±1.59b	34.89±1.80c	9 542.42±1 017.49c	5 319.46±921.69b
FBF1	8.19±0.48a	505.26±20.89a	42.50±2.20a	43.75±0.29a	13 492.09±982.11a	9 237.23±904.44a
FBF3	8.09±0.36a	498.12±24.10ab	41.17±1.91a	43.31±1.54a	12 689.91±831.76ab	8 741.20±1 048.08a
FBF5	8.06±0.20a	477.29±21.79ab	39.17±2.08ab	40.56±0.90b	11 096.41±857.54bc	7 455.69±899.45ab
FFB1	8.13±0.10a	514.61±8.39a	41.17±2.58a	44.08±1.20a	13 252.94±908.12a	9 191.85±1 234.49a
FFB3	8.10±0.37a	497.70±34.00ab	41.83±3.38a	43.36±1.43a	13 400.46±591.00a	8 850.41±1 094.05a
FFB5	8.08±0.17a	495.44±20.90ab	39.50±3.31ab	41.80±1.20ab	12 092.96±1 277.93ab	8 125.32±1 452.58a

咸淡水轮灌相较于淡水灌溉降低了冬小麦秸秆质量和产量。BFF5、FBF5处理的冬小麦秸秆质量与CK相比减少了29.54%和18.06%，差异显著($P<0.05$)。在相同的灌溉方式下，微咸水矿化度越高，冬小麦秸秆质量越低。BFF5处理的冬小麦产量与CK相较减产42.61%，差异显著，其他不同咸淡水轮灌处理与CK无显著差异。由表3可以看出，在相同的灌溉方式下，微咸水矿化度越高，冬小麦产量及其构成因子数值越低。不同咸淡水轮灌方式对冬小麦产量及其构成因子造成抑制影响从大到小依次为BFF、FBF、FFB处理。

2.2 冬小麦产量的综合评价

2.2.1 冬小麦主要性状与产量及各性状之间的相关分析

表4为8个冬小麦性状因子与冬小麦产量及每2个因子间的相关系数。从表4可以看出，冬小麦叶面积指数、单株地上干物质累积质量、穗数、穗粒数、千粒质量、秸秆质量与冬小麦产量极显著正相关($P<0.01$)，穗长

与冬小麦产量显著正相关($P < 0.05$),株高与冬小麦产量正相关但未达到显著水平($P > 0.05$)。

表4 产量与其他主要农艺性状的相关系数

指标	株高	叶面积指数	单株地上干物质累积质量	穗长	穗数	穗粒数	千粒质量	秸秆质量	产量
株高	1								
叶面积指数	0.664**	1							
单株地上干物质累积质量	0.709**	0.863**	1						
穗长	0.228	0.417*	0.388*	1					
穗数	0.245	0.439*	0.537**	0.268	1				
穗粒数	0.159	0.420*	0.562**	0.329	0.848**	1			
千粒质量	0.485**	0.768**	0.811**	0.463*	0.820**	0.813**	1		
秸秆质量	0.380*	0.628**	0.757**	0.365*	0.931**	0.899**	0.918**	1	
产量	0.268	0.545**	0.656**	0.370*	0.928**	0.966**	0.907**	0.968**	1

注 *,**分别表示在0.05水平(双侧)和0.01水平(双侧)上显著相关。

从表4可以看出,株高与叶面积指数、单株地上干物质累积质量、千粒质量、秸秆质量显著正相关,与其他性状因子的相关性均未达到显著水平。穗长与穗数、穗粒数的相关性未达到显著水平。除此以外,其余性状因子之间均呈显著正相关,说明这些性状因子之间相互影响。

2.2.2 冬小麦各性状因子与产量的通径分析

所有测定的性状因子中,只有株高与冬小麦产量性状间的相关性未达到显著水平($P > 0.05$),其他性状因子与冬小麦产量均显著相关,同时冬小麦性状因子间存在一定相关性,需要进一步采用通径分析方法对8个性状因子间的联系进行分析,确定不同因子对冬小麦产量的直接与间接影响。

先将所有的自变量(株高 X_1 、叶面积指数 X_2 、单株地上干物质累积质量 X_3 、穗长 X_4 、穗数 X_5 、穗粒数 X_6 、千粒质量 X_7 、秸秆质量 X_8)和因变量(产量 Y)分别导入SPSS中的数据视图,对冬小麦产量进行正态性检验,得出因变量(产量 Y)的分布接近于正态分布,为进一步比较性状因子对冬小麦产量的直接贡献大小,利用AMOS软件进行通径分析,结果如表5所示。

表5 产量与各性状因子的通径分析结果

因素	与Y简单相关系数 r_{iy}	直接通径系数 P_{iy}	间接效果								总间接效果	决策系数
			$X_1 \rightarrow Y$	$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	$X_5 \rightarrow Y$	$X_6 \rightarrow Y$	$X_7 \rightarrow Y$	$X_8 \rightarrow Y$		
X_1	0.268 0	-0.020 0	-	0.019 9	-0.035 5	0.000 2	0.041 7	0.076 3	0.097 0	0.083 6	0.283 3	-0.011 1
X_2	0.545 0	0.030 0	-0.013 3	-	-0.043 2	0.000 4	0.074 6	0.201 6	0.153 6	0.138 2	0.512 0	0.031 8
X_3	0.656 0	-0.050 0	-0.014 2	0.025 9	-	0.000 4	0.091 3	0.269 8	0.162 2	0.166 5	0.701 9	-0.068 0
X_4	0.370 0	0.001 0	-0.004 6	0.012 5	-0.019 4	-	0.045 6	0.157 9	0.092 6	0.080 3	0.364 9	0.000 7
X_5	0.928 0	0.170 0	-0.004 9	0.013 2	-0.026 9	0.000 3	-	0.407 0	0.164 0	0.204 8	0.757 5	0.286 6
X_6	0.966 0	0.480 0	-0.003 2	0.012 6	-0.028 1	0.000 3	0.144 2	-	0.162 6	0.197 8	0.486 2	0.697 0
X_7	0.907 0	0.200 0	-0.009 7	0.023 0	-0.040 6	0.000 5	0.139 4	0.390 2	-	0.202 0	0.704 9	0.322 8
X_8	0.968 0	0.220 0	-0.007 6	0.018 8	-0.037 9	0.000 4	0.158 3	0.431 5	0.183 6	-	0.747 1	0.377 5

从表5可以看出,穗粒数对冬小麦产量的直接正效应最大,为0.480;秸秆质量、千粒质量、穗数的直接正效应次之,分别为0.220 0、0.200 0和0.170 0,单株地上干物质累积质量、叶面积指数、株高和穗长对产量的直接影响较弱,分别为-0.050 0、0.030 0、0.020 0和0.000 1。这说明在不考虑其他性状因子的影响时,直接对冬小麦产量起积极作用的因子主要为穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数。叶面积指数和株高对产量的直接影响较小,但通过其他性状因子对产量的间接影响较高。通过决策系数可得到冬小麦不同性状因子对产量影响的综合排序为:穗粒数>秸秆质量>千粒质量>穗数>叶面积指数>穗长>株高>单株地上干物质累积质量,其中,穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数对冬小麦产量起明显促进作用,株高和单株地上干物质累积质量对冬小麦产量影响较小。故适宜的冬小麦咸淡轮灌方式需保证良好的穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数,以获取较高产量,提高微咸水利用效率。

3 讨论

微咸水灌溉会改变土壤水盐分布,给土壤带来一定 Na^+ ,这些有害离子会被冬小麦吸收积累,而 K^+ 、 Ca^{2+} 等离子势必减少,维持土壤平衡的离子关系被打破^[23],影响其他离子的渗透调节机制,从而抑制冬小麦生长发育;此外,土壤溶液的渗透势与土壤含盐量正相关,当土壤盐分增加时,土壤溶液的渗透势增加,降低了土

壤-植物根系-植物叶片的水势梯度,同时降低了叶片细胞的膨压,引起气孔关闭,导致蒸腾作用和光合作用降低,这就降低了土壤水分的有效性,从而抑制植物生长^[24]。微咸水灌溉导致的Na⁺毒害与渗透胁迫最终影响冬小麦的株高和叶面积,导致生育期内地上干物质累积质量表现出不同差异。生育前期,冬小麦株高增长迅速,拔节期增长最快,进入灌浆期后,株高增长缓慢^[25]。拔节—抽穗期是小麦叶茎生长的关键时期,在抽穗期之前,冬小麦受微咸水矿化度影响较为明显,在抽穗—灌浆期,微咸水对株高和叶面积的影响减弱。在不同咸淡水轮灌处理下,淡-淡-咸处理的冬小麦株高和叶面积最大,咸-淡-淡处理最小。同时,在拔节—抽穗期灌溉微咸水的矿化度越高,小麦叶片衰老速度越快,叶片越容易出现萎蔫及叶片发黄现象。这与龚雨田等^[26]的研究结果一致。地上干物质累积质量随着生育期的推进而增加,在生育后期由于株高增长缓慢,叶面积开始萎缩发黄,地上干物质累积质量增长缓慢,不同咸淡水轮灌处理间的差异显著性与株高表现出较为一致的规律。

拔节—抽穗期是决定穗粒数、单位面积穗数和成穗率的重要时期,是栽培管理的关键时期^[27],且冬小麦在拔节—抽穗期对土壤盐分比较敏感,盐分胁迫强度大;在该时期灌溉盐水使得盐分在土壤中累积时间越长,对冬小麦的盐分胁迫持续时间也就越长,因此在拔节—抽穗期灌溉微咸水对冬小麦产量及其构成因子的影响最显著。在灌浆期灌溉微咸水相对其余2个生育期内灌溉微咸水对冬小麦产量及其构成因子影响较小,但由于该生育期的土壤盐分胁迫导致作物籽粒形成较差,从而一定程度上影响产量。

通径分析结果显示,冬小麦穗粒数、千粒质量、穗数对冬小麦产量起明显促进作用,这与樊明等^[28]研究结果较为一致,也与理论上形成小麦产量构成决定因素(由穗粒数、亩穗数和千粒质量决定)相符合;此外,秸秆质量与穗粒数、穗数、千粒质量极显著相关(表4),秸秆质量主要通过穗粒数、千粒质量和穗数间接对冬小麦产量起促进作用。因此,适宜的冬小麦咸淡轮灌方式需保证良好的穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数,以获取较高产量,提高微咸水利用效率。本试验中,BFF处理和FBF处理的轮灌方式较强地抑制了冬小麦生长,导致穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数大幅降低,进而造成严重减产,因此高矿化度微咸水不适宜用于冬小麦生育前期的灌溉。而FFB处理即在灌浆期灌溉微咸水对冬小麦穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数影响较小,可在保障较高产量的前提下实现微咸水资源的合理利用。

4 结论

1)拔节—抽穗期是小麦株高、叶面积生长的关键时期,BFF处理对株高、叶面积指数的生长抑制作用最大,其次是FBF处理,FFB处理对其生长发育影响最小;灌溉微咸水矿化度越高,抑制作用越大。

2)在拔节—抽穗期灌溉微咸水对冬小麦产量及其构成因子的影响最显著,灌浆期灌溉微咸水对冬小麦产量及其构成因子影响最小。作物产量会随矿化度升高而降低。

3)不同性状因子对冬小麦产量影响的综合排序为:穗粒数>秸秆质量>千粒质量>穗数>叶面积指数>穗长>株高>单株地上干物质累积质量,其中,穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数对冬小麦产量起促进作用。适宜的冬小麦咸淡轮灌方式需保证良好的穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数,以获取较高产量,提高微咸水利用效率。

4)在灌浆期灌溉较低矿化度微咸水对冬小麦穗粒数、秸秆质量、千粒质量和穗数影响较小,因此可选择FFB处理作为冬小麦的灌溉方式,选择矿化度为3 g/L的微咸水进行咸水灌溉以保证在较高产量的前提下合理利用微咸水资源。

参考文献:

- [1] BOYKO H. Saline irrigation for agriculture and forestry[M]. Hague:World Academy of Art and Science, 1968:325.
- [2] VAN Hoorn J W. Quality of irrigation water, limits of use and prediction of long quality of irrigation water[R]. Baghdad: Salinity Seminar, 1970.
- [3] ARAGUES R, MEDINA E T, CLAVERIA I I, et al. Regulated deficit irrigation, soil salinization and soil sodification in a table grape vineyard drip irrigated with moderately saline waters[J]. Agricultural Water Management, 2014, 134(2): 84-93.
- [4] 王全九,徐益敏,王金栋,等.咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J].灌溉排水,2002,21(4):73-77.
- [5] 陆红飞,郭相平,甄博,等.成熟期水盐胁迫对番茄产量和贮藏期品质的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(6):15-19.
- [6] AYARS J E, CHRISTEN E W, HORNBUCKLE J W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture[J]. Agricultural Water Management. 2006, 86(1/2): 128-139.
- [7] NORTHEY J E, CHRISTEN E W, AYARS J E, et al. Occurrence and measurement of salinity stratification in shallow groundwater in the Murrumbidgee

Irrigation Area, south-eastern Australia[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 23-40.

- [8] QADIR M, SHARMA B R, BRUGGEMAN A, et al. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(1): 0-22.
- [9] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 不同矿化度咸水灌溉对小麦生长及产量的影响研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(S2):213-219.
- [10] 曹彩云, 郑春莲, 李科江, 等. 不同矿化度咸水灌溉对小麦产量和生理特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3):347-355.
- [11] 张展羽, 郭相平. 微咸水灌溉对苗期玉米生长和生理性状的影响[J]. *灌溉排水*, 1999, 18(1):19-23.
- [12] 张勇, 毕远杰, 郭向红, 等. 不同生育期微咸水灌溉对玉米生长影响研究[J]. *节水灌溉*, 2017(9): 43-46.
- [13] 米迎宾, 屈明, 杨劲松, 等. 咸淡水轮灌对土壤盐分和作物产量的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(6):83-86.
- [14] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3):70-75.
- [15] 杨树青, 丁雪花, 贾锦凤, 等. 盐渍化土壤环境下微咸水利用模式探讨[J]. *水利学报*, 2011, 42(4):490-498.
- [16] 黄金瓯, 靳孟贵, 栗现文. 咸淡水轮灌对棉花产量和土壤溶质迁移的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17):99-107.
- [17] 赵连东. 咸淡水组合灌溉模式下盐碱土水盐分布及改良效果的试验研究[D]. 济南: 山东理工大学, 2017.
- [18] 王海霞, 徐征和, 庞桂斌, 等. 微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):291-297.
- [19] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6):599-603.
- [20] 宋志伟, 杨伯乐. 春性小麦品种主要农艺性状与产量的相关及通径分析[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(5):174-176.
- [21] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析(农林类)[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [22] 张黛静, 王艳杰, 陈倩青, 等. 不同耕作与培肥对小麦氮吸收效率、根效率及产量的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(5):85-91.
- [23] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. *灌溉排水学报*, 2002, 21(4):73-77.
- [24] 郭太龙. 微咸水灌溉冬小麦试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.
- [25] 杨林林, 高阳, 申孝军, 等. 播前和不同生育阶段灌溉对冬小麦农艺性状及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(9):1-6.
- [26] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 微咸水灌溉对冬小麦产量及农艺性状的影响[J]. *节水灌溉*, 2017(9):33-37, 42.
- [27] 吴忠东, 王全九. 微咸水非充分灌溉对土壤水盐分布与冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 36-42.
- [28] 樊明, 张双喜, 李红霞, 等. 春小麦主要农艺性状与产量的相关及通径分析[J]. *宁夏农林科技*, 2017, 58(7):5-7.

Effects of Alternate Irrigation with Fresh and Brackish Water on Winter Wheat Growth and Yield

ZHAI Yaming^{1,2}, CHENG Xiuhua¹, HUANG Mingyi¹, MIN Yong³, QIANG Chao¹, LYU Wen¹

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources And Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu Taihu Planning Design Institute of Water Resources Co. Ltd, Suzhou 215228, China)

Abstract:【Objective】The purpose of this paper is to explore the effect of different alternate irrigation methods of brackish and fresh water on winter wheat growth and yield, and the path analysis was tested to select a suitable alternate irrigation method of brackish and fresh water for high production of winter wheat.【Method】The experiment was conducted in lysimeters under the rain shelter. Brackish water was treated with 3 different salinities (1, 3, 5 g/L NaCl). Fresh water (0.12 g/L NaCl) irrigation throughout the whole growth period was used as the control group. Three alternate irrigation methods of brackish and fresh water, i.e., brackish-fresh-fresh (BFF), fresh-brackish-fresh (FBF) and fresh-fresh-brackish (FFB), were set up at jointing-heading stage, heading-flowering stage and filling stage of winter wheat, respectively. The influence of alternate irrigation on wheat growth, yield and yield components was studied.【Result】BFF treatment had a greater negative effect on the growth and yield of winter wheat, followed by FBF treatment, and FFB treatment had the least effect. Under the same alternate irrigation method, brackish water with higher salinity caused greater inhibition on winter wheat growth and yield. Path analysis results revealed that the traits that had the greatest direct impact on the yield formation of winter wheat were the number of grains per spike, with a decision coefficient of 0.697 0, followed by straw weight, 1 000-grain weight and number of spikes, with decision coefficients of 0.377 5, 0.322 8 and 0.286 6, respectively. Plant height and accumulated dry matter per plant had little impact on the yield of winter wheat.【Conclusion】Irrigation with low salinity brackish water has no obvious effect on grain number per spike, straw weight, 1 000-grain weight and spike number of winter wheat during grain filling stage, thus having little effect on yield. Therefore, fresh water irrigation from jointing to flowering stage and conversion to 3 g/L brackish water irrigation during grain filling stage can ensure higher yield and realize reasonable utilization of brackish water resources.

Key words: brackish water; alternate irrigation; winter wheat; path analysis

责任编辑:陆红飞