

长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响

郭丽¹ 郑春莲^{1,2} 曹彩云^{1,2} 党红凯^{1,2} 李科江^{1,2} 马俊永^{1,3}

(1. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 衡水 053000; 2. 河北省农作物抗旱研究重点实验室, 衡水 053000;
3. 农业部河北南部耕地保育科学观测实验站, 衡水 053000)

摘要: 于2013—2015年研究了不同咸水利用方式(CK, 淡水; T1, 咸水与淡水混配为1.8 g/L的混合水灌溉; T2, 3.6 g/L咸水与淡水交替灌溉; T3, 3.6 g/L咸水灌溉; T4, 无灌溉)对冬小麦光合特征及土壤盐分的影响。结果表明: T3和T4处理的株高、叶面积指数、叶面积持续期、叶绿素含量、最大净光合速率(P_{nmax})、表观光量子效率(φ)、暗呼吸速率(R_d)和产量较淡水处理显著下降, 且连续灌溉3.6 g/L的咸水导致土壤发生积盐, 不宜连续灌溉。T1和T2处理与CK的株高、光合特性无显著差异, 土壤盐分虽有一定积累, 但未影响作物的生长。可见, T1(咸淡混灌)和T2(咸淡水交替灌溉)处理的咸水利用方式对冬小麦生长无负调控效应。从土壤生态环境及小麦产量的影响角度考虑, 混灌和轮灌既能保证作物产量较淡水灌溉不减产, 土壤未发生次生盐渍化, 同时节约淡水资源。

关键词: 冬小麦; 咸水灌溉; 光合特性; 土壤盐分

中图分类号: S273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0183-08

Effect of Long-term Saline Water Irrigation on Photosynthetic Characteristics of Winter Wheat and Soil Salt Content

GUO Li¹ ZHENG Chunlian^{1,2} CAO Caiyun^{1,2} DANG Hongkai^{1,2} LI Kejiang^{1,2} MA Junyong^{1,3}

(1. Institute of Dry-land Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China

2. Key Laboratory of Crop Drought Resistance Research of Hebei Province, Hengshui 053000, China

3. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation South Hebei, Ministry of Agriculture, Hengshui 053000, China)

Abstract: In order to make full use of saline water resources, the impacts of different patterns (totally five treatments: CK, fresh water irrigation; T1, blended irrigation by mixing fresh water and saline water into 1.8 g/L salty water; T2, rotated irrigation of 3.6 g/L saline water with fresh water; T3, direct irrigation with 3.6 g/L salty water and T4, no irrigation) of salty water irrigation on photosynthetic characteristics and soil salt of winter wheat were studied in 2013—2015 based on a long-term saline water irrigation experiment. The results showed that treatments T3 and T4 significantly decreased plant height, leaf area index, leaf area duration, chlorophyll content, maximum photosynthetic rate (P_{nmax}), apparent quantum yield (φ), dark respiration rate (R_d) and grain yield compared with fresh water irrigation (CK). Continuous irrigation with 3.6 g/L salty water (T3) led to soil salt accumulation, thus it was not suitable for directly continuous irrigation of winter wheat. In comparison with CK, treatments T1 and T2 had no significant differences in plant height and photosynthetic characteristics, while there was an increasing tendency in soil salt content, the plant growth was not impacted. From the aspects of soil ecological environment and grain yield, the rotated irrigation pattern and the blended irrigation pattern of saline water utilization did not cause yield reduction and obvious soil secondary salinization, but it can save fresh water, therefore they were comparatively better ways for salty water utilization in winter wheat irrigation. The study provided an important reference for developing saline water irrigation of winter wheat.

Key words: winter wheat; salty water irrigation; photosynthetic characteristics; soil salt

收稿日期: 2016-05-16 修回日期: 2016-07-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD05B0203、2013BAD05B0502)、农业部公益性行业科研专项(201203030)和河北省农林科学院高层次人才创新工程项目(F16E14001)

作者简介: 郭丽(1979—),女,助理研究员,博士,主要从事作物栽培研究, E-mail: guolisoil@163.com

通信作者: 马俊永(1965—),男,研究员,主要从事节水农业研究, E-mail: mjydf@126.com

引言

华北平原淡水资源紧缺与深层地下淡水超采日趋严峻密切相关,而农田灌溉用水是导致深层地下水超采的主要因素。该区农业灌溉用水占总用水量的70%左右,严重超采区的水资源承载力与农业用水强度之间极度失衡,引发河北平原形成一个面积达4万 km^2 的地下水“漏斗群”,因此,在农业生产上寻找开发替代深层淡水资源(如微咸水)的水资源是缓解深层地下水超采的重要途径。华北平原黑龙港流域浅层咸水资源丰富,矿化度在2~5 g/L的微咸水有 $5.4 \times 10^9 \text{ m}^3$,其面积占总浅层咸水区的80%,年可利用量约22亿 m^3 ,且浅层地下水具有补给快、易开采的特点,但目前咸水利用量仅3.3亿 m^3 [1-4]。可见,对浅层咸水资源充分利用,以咸补淡对缓解华北平原深层地下水超采具有重要意义。

微咸水用于农田灌溉,虽然作物的干旱胁迫有所缓解,但灌溉的同时盐分也被带入土壤中,连续多年灌溉容易引发土壤次生盐渍化,使耕层土壤含盐量超过作物生长的阈值,从而影响作物的生长发育及产量[5-8]。咸水和微咸水虽然属于劣质水资源,但土壤具有一定的缓冲作用,作物也存在不同程度的耐盐能力,只要采取合理灌溉措施,以可持续利用为指导准则,合理安全利用微咸水灌溉,达到抗旱增产的效果是完全可能的[9-10]。

微咸水安全灌溉利用仍是干旱少雨地区研究的热点,形成以华北和西北为重点的研究区域。针对西北地区吴忠东等[11-13]通过田间和室内试验模拟,探讨了微咸水灌溉对作物产量及土壤水盐运移的影响;乔玉辉等[14]在华北平原河北曲周中国农业大学试验站研究了微咸水灌溉对土壤环境的影响,并运用PS123模型对咸水灌溉进行了模拟研究。曹彩云等[15]在黑龙港区以小麦为对象研究了不同矿化度咸水灌溉对产量的影响。有关咸水利用已有较多报道,以上大多基于室内和田间短期试验进行研究,而微咸水利用对作物生长和土壤生态环境的影响是一个长期过程,有必要对长期咸水灌溉定位试验进行评价。因此,本文研究黑龙港区连续6~7年采用不同咸水灌溉方式对小麦干物质积累和土壤盐分含量及运移规律的影响,评价不同微咸水灌溉方式的科学性和合理性,对微咸水安全利用提供理论依据。

1 材料与试验方法

1.1 试验概况

试验在河北省农林科学院旱作农业研究所护驾迟试验站进行。该区属黑龙港平原区($37^{\circ}54'13''\text{N}$ 、

$115^{\circ}42'11''\text{E}$,海拔高度20 m),土壤类型属于粘质土壤,试验初始(2008年)土壤有机质含量12.9 g/kg,碱解氮含量67.3 mg/kg,速效磷含量18.1 mg/kg,速效钾含量136 mg/kg,0~20 cm耕层土壤盐分含量0.45 g/kg(均为质量比)。种植制度为冬小麦-夏玉米复种连作。2013—2015年小麦季降水量分别为128.4 mm和147.7 mm,见图1。年平均气温12.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

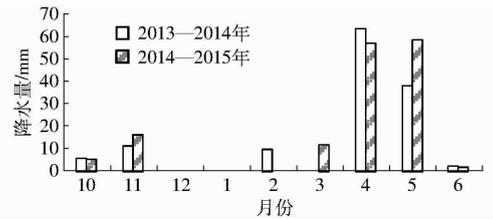


图1 试验年度小麦生育期降水量

Fig. 1 Precipitation in wheat growing seasons

1.2 试验设计

咸水不同利用方式定位试验始于2008年,本试验在定位试验基础上于2013—2015年对冬小麦进行研究。试验共设5个处理,淡水(CK)、1.8 g/L混灌微咸水(T1)、3.6 g/L咸水与淡水轮灌(T2)、3.6 g/L咸水(T3)和春季无灌溉(T4)。试验用不同矿化度灌溉水的离子组成见表1。每小区长10 m、宽7 m,3次重复。从试验开始一直采用造墒水和春季1水(拔节期)的灌溉制度。于2013年10月8日和2014年10月7日造墒,2013年10月15日、2014年10月14日播种。2014年3月29日和2015年3月27日浇春季1水(不同咸水灌溉)。灌溉采用的不同矿化度咸水为淡水与工业用盐配制而成,水表控制灌溉量,每次灌溉量60 mm。每公顷施N 180 kg、 P_2O_5 120 kg、 K_2O 75 kg,磷肥和钾肥均在小麦播种整地前一次底施,氮素化肥用量为底、追各1/2,小麦品种为衡4399。2014年6月13日、2015年6月12日收获,种植制度为冬小麦-夏玉米复种连作方式。

表1 试验用不同矿化度灌溉水的离子组成

Tab. 1 Ion compositions of irrigation water with different salinities used in experiment

灌溉水矿化度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	离子浓度/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)						
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}
淡水(CK)	0.715	0.805	0.15	10.73	2.94	1.04	7.63
1.8	0.845	1.550	0.17	24.62	5.06	1.12	20.45
3.6	0.955	2.205	0.19	50.44	15.91	1.21	43.27

1.3 测定项目和方法

1.3.1 植株株高和叶面积指数

分别选择不同咸水灌溉处理小麦植株30株,测定单株干株高,用直尺量取分蘖节到拉直后叶片顶端的距离测得株高,收获期量取分蘖节到穗顶端距

离。采用 SUN-SCAN 型冠层分析仪 (Delta-T, 英国) 测定叶面积指数 (LAI), 分别于冬小麦拔节期 (4 月 8 日)、拔节后 15 d、拔节后 30 d 和拔节后 50 d 测定叶面积指数。叶面积指数持续期计算式^[16]为

$$LAD = \sum (LAI_2 + LAI_1) (t_2 - t_1) / 2 \quad (1)$$

式中 LAI_1 、 LAI_2 —— t_1 、 t_2 时间测定的小麦群体叶面积指数

1.3.2 叶片叶绿素含量

小麦灌浆前期、灌浆中期和灌浆后期分别选取具有代表性的植株 30 株, 于晴天 09:50—11:30, 选择旗叶中部用 SPAD-502 型 (柯尼卡, 日本) 叶绿素仪测定叶绿素含量。

1.3.3 光合响应曲线

采用 Li-6400 型光合系统分析仪 (Li-COR, 美国), 选择晴天 09:00—11:00 测定净光合速率 (P_n), 每区选取向光性一致的 3 片旗叶。光合有效辐射 (PAR) 利用 Li-6400 人工光源, 光量子通量密度从 1 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 开始, 依次降为 1 500、1 200、900、600、400、200、150、100、50、25 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。每个叶片在不同光照强度下照射 3 min 后读数记录。光照强度由高到低测定可减少气孔开放和光诱导所需的平衡时间。测定前对仪器进行校正, 以保证数据的合理性。

1.3.4 非直角双曲线模型拟合

采用非直角双曲线的 Farquhar 模型^[17]进行拟合, 应用 SPSS 19.0 软件通过拟合方程获得表观量子效率 (φ)、最大净光合速率 ($P_{n\text{max}}$) 和暗呼吸速率 (R_d) 等指标。然后对 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 进行线性回归, 回归直线的净光合速率为零和 $P_{n\text{max}}$ 时的 2 个交点分别为光补偿点 (LCP) 和光饱和点 (LSP)。计算式为

$$P_n = \frac{\varphi I + P_{n\text{max}} - \sqrt{(\varphi I + P_{n\text{max}})^2 - 4k\varphi P_{n\text{max}}}}{2k} - R_d \quad (2)$$

式中 P_n ——净光合速率

I ——光合有效辐射通量密度

k ——光响应曲线曲角

1.3.5 小麦考种及籽粒产量

每处理选取 3 个具有代表性的 1 m 双行植株读取其穗数, 计算合成每公顷穗数; 随机选取 30 穗计算穗粒数; 随机数取 3 个 1 000 粒籽粒测定千粒质量, 每个处理千粒质量重复间误差小于 0.1 g; 成熟后采用小区联合收割机收获全部小区产量。

1.3.6 土壤盐分

各小区选择具有代表性地点, 自 2014 年和

2015 年小麦起身期 (3 月 15 日) 开始取样, 75 d 后 (5 月 30 日) 结束, 每 15 d 取 0~80 cm 土壤土样一次, 每 10 cm 为一层, 3 次重复。将土样风干磨碎, 称取 10 g 过 1 mm 筛的风干土样置于三角瓶中, 加入 50 mL 蒸馏水, 振荡 10 min 后静置 5 min 并过滤。采用 DDS-11A 型电导率仪测定电导率 (EC)。

采用干燥残渣法确定土壤含盐量与电导率之间的标定关系式为

$$S = (0.2881E_c / 1000 - 0.0044) \times 100\% \quad (3)$$

式中 S ——土壤含盐量, %

E_c ——电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$

1.4 数据统计方法

采用 SPSS 7.05 统计学分析软件进行数据平均值、标准差、显著性测定。采用 SigmaPlot 绘图软件和 Excel 2007 进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 小麦株高变化动态

不同咸水利用方式对小麦株高的影响见表 2。2 年测定结果表明, 起身期 T3 处理株高较 CK 显著下降; 拔节期和收获期均表现为 T3 和 T4 处理的株高较 CK 显著下降, 但 T3 和 T4 处理相比较, 表现为 T4 处理株高显著低于 T3; T1 和 T2 处理在上述 3 个时期中与 CK 不存在统计学差异。上述分析表明混灌和轮灌处理对株高的影响较小, 3.6 g/L 微咸水处理的株高与淡水处理相比, 呈下降趋势, 但生育后期较春季不灌水处理的株高显著增加。

表 2 不同咸水利用方式下株高的变化

Tab.2 Changes of plant height under condition of different ways of salty water irrigation cm

年份	处理	起身期	拔节期	收获期
2013—2014	CK	17.32 ± 1.19 ^a	53.85 ± 4.04 ^a	61.70 ± 3.44 ^a
	T1	17.01 ± 0.92 ^a	53.70 ± 3.56 ^a	60.83 ± 3.05 ^a
	T2	16.89 ± 1.21 ^a	52.98 ± 3.26 ^a	61.89 ± 2.90 ^a
	T3	14.16 ± 1.02 ^b	49.58 ± 2.51 ^b	57.22 ± 2.05 ^b
2014—2015	T4	16.92 ± 1.24 ^a	46.32 ± 2.21 ^c	44.41 ± 2.35 ^c
	CK	16.53 ± 1.19 ^a	51.85 ± 3.24 ^a	62.83 ± 2.34 ^a
	T1	14.73 ± 0.92 ^a	49.70 ± 2.67 ^a	60.88 ± 2.25 ^a
	T2	15.21 ± 1.21 ^a	49.70 ± 2.36 ^a	61.40 ± 2.10 ^a
	T3	13.23 ± 1.02 ^b	46.98 ± 2.01 ^b	56.95 ± 2.05 ^b
	T4	15.47 ± 1.24 ^a	43.33 ± 2.21 ^c	53.98 ± 2.35 ^c

注: 数据为平均值 ± 标准差, 同列数值后不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

2.2 小麦叶面积指数和叶面积持续期的变化

叶面积指数和叶面积持续期是评价叶片光合面积和生产光合产物的重要指标。不同咸水利用方式对小麦单株叶面积的影响见表 3, 2 年结果表明小麦拔节期 (4 月 8 日) T3 和 T4 处理的叶面积指数较

CK 显著下降, T1 和 T2 处理与 CK 相比无明显变化; 拔节 15~50 d 期间, T1 和 T2 处理的叶面积指数和叶面积持续期与 CK 无显著差异, T3 和 T4 处理的叶面积指数和叶面积持续期较 CK 显著下降, 但 T4 处理的降低幅度显著大于 T3 处理。该结果表

明混灌和轮灌处理的叶面积指数和叶面积持续期与淡水处理无明显差异, 3.6 g/L 微咸水灌溉虽较淡水、混灌和轮灌处理显著下降, 但生育后期较春季不灌水处理的叶面积指数和叶面积持续期显著提高。

表 3 不同咸水利用方式对叶面积指数和叶面积持续期的影响

Tab.3 Effects of different ways of salty water irrigation on leaf area index and leaf area duration

年份	处理	叶面积指数				叶面积持续期/d		
		拔节期	拔节 15 d 后	拔节 30 d 后	拔节 50 d 后	拔节-拔节 15 d	拔节 15~30 d	拔节 30~50 d
2013—2014	CK	2.56 ± 0.14 ^a	5.29 ± 0.24 ^a	6.29 ± 0.40 ^a	4.11 ± 0.32 ^a	58.87 ± 4.26 ^a	86.85 ± 4.41 ^a	104.01 ± 4.23 ^a
	T1	2.67 ± 0.11 ^a	5.18 ± 0.29 ^a	6.15 ± 0.31 ^a	4.25 ± 0.23 ^a	58.87 ± 3.89 ^a	84.98 ± 5.49 ^a	104.00 ± 4.85 ^a
	T2	2.61 ± 0.16 ^a	5.21 ± 0.31 ^a	6.17 ± 0.35 ^a	4.19 ± 0.26 ^a	58.65 ± 3.31 ^a	85.35 ± 5.03 ^a	103.60 ± 5.12 ^a
	T3	2.13 ± 0.10 ^b	4.61 ± 0.22 ^b	5.28 ± 0.32 ^b	3.63 ± 0.24 ^b	50.55 ± 2.98 ^b	74.18 ± 4.37 ^b	89.10 ± 4.09 ^b
	T4	2.09 ± 0.12 ^b	3.94 ± 0.26 ^c	4.59 ± 0.28 ^c	2.87 ± 0.21 ^c	45.23 ± 2.12 ^c	63.98 ± 3.12 ^c	74.60 ± 2.56 ^c
2014—2015	CK	2.47 ± 0.13 ^a	5.43 ± 0.24 ^a	6.71 ± 0.41 ^a	4.39 ± 0.22 ^a	59.25 ± 4.92 ^a	91.05 ± 4.89 ^a	111.00 ± 4.75 ^a
	T1	2.39 ± 0.11 ^a	5.23 ± 0.26 ^a	6.68 ± 0.36 ^a	4.43 ± 0.25 ^a	57.15 ± 4.36 ^a	89.32 ± 4.02 ^a	111.10 ± 4.67 ^a
	T2	2.54 ± 0.15 ^a	5.39 ± 0.28 ^a	6.56 ± 0.34 ^a	4.18 ± 0.21 ^a	59.47 ± 3.95 ^a	89.62 ± 3.95 ^a	107.40 ± 5.02 ^a
	T3	2.07 ± 0.12 ^b	4.71 ± 0.23 ^b	5.48 ± 0.32 ^b	3.61 ± 0.28 ^b	50.85 ± 2.26 ^b	76.43 ± 4.10 ^b	90.90 ± 4.34 ^b
	T4	1.92 ± 0.11 ^b	4.12 ± 0.21 ^c	4.80 ± 0.39 ^c	3.24 ± 0.24 ^c	45.30 ± 2.79 ^c	66.90 ± 3.54 ^c	80.40 ± 3.16 ^c

2.3 小麦旗叶绿素含量的变化

叶绿素含量是研究植物耐逆性的重要指标。不同灌水利用方式下 2013—2015 年小麦叶绿素含量 (以 SPAD 值计) 的平均值如图 2 所示。旗叶绿素含量在灌浆前期不同处理间无显著差异, 但随着生育期延长, 受盐分和干旱胁迫加重, 导致 T3 和 T4 处理灌浆中后期的叶绿素含量显著低于 CK, 而 T1 和 T2 处理与 CK 无显著差异。这表明长期采用矿化度在 1.8 g/L 的咸淡混灌和 3.6 g/L 的咸水与淡水轮灌对小麦旗叶绿素含量影响较小, 但长期利用 3.6 g/L 的咸水灌溉和春季不灌水使灌浆中后期的小麦旗叶绿素降解加速。

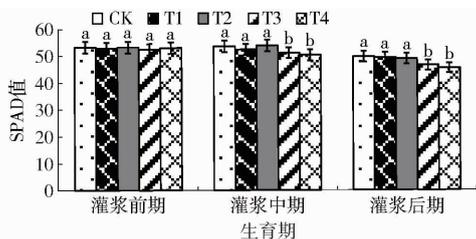


图 2 不同咸水利用方式下 SPAD 值的变化

Fig.2 Changes of SPAD value under condition of different ways of salty water irrigation

2.4 小麦旗叶光合响应曲线的变化

光合响应曲线反映植物光照强度与光合速率间的变化规律, 是评价植物光合能力的重要手段。由 2 年光合响应曲线试验结果平均值分析可知 (图 3), 在 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的有效辐射强度范围内净光合速率 (P_n) 迅速提高, 随着有效辐射增强, 植株达到最大净光合速率 ($P_{n\text{max}}$) 和光饱和点 (LSP)。各

处理间在高于 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照强度后净光合速率开始出现明显差异, 光合速率表现为 T3 和 T4 处理显著低于 CK, T1 和 T2 处理与 CK 相比, 变化差异较小。

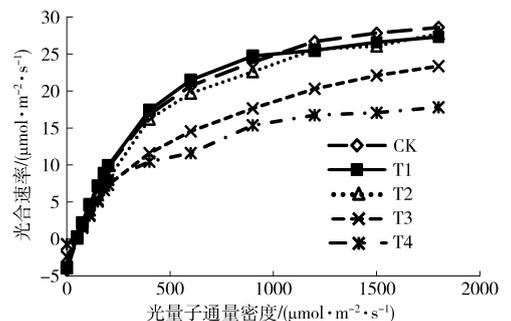


图 3 不同咸水利用方式对光合响应曲线的影响

Fig.3 Effects of different ways of salty water irrigation on wheat leaf light response curve

通过采用非直角双曲线方程对光合响应曲线进行拟合, 结果显示决定系数 R^2 均达到 0.99 以上, 可以很好地说明各处理间的差异情况。最大净光合速率 ($P_{n\text{max}}$) 可衡量植物群体光合能力。T3 和 T4 处理的最大净光合速率、表观光量子效率和暗呼吸效率较 CK 显著下降, T1 和 T2 处理较 CK 无显著变化; 不同处理间光饱和点和光补偿点无明显差异。表明长期采用 3.6 g/L 咸水灌溉和春季不灌水处理下表观光量子效率显著下降, 进而影响最大光合速率 (表 4)。

2.5 不同咸水利用方式对小麦产量的影响

不同咸水利用方式对产量及产量构成因素的影响见表 5。从 2 年试验结果分析可知, T4 处理的单

表 4 不同咸水利用方式对小麦旗叶光合响应曲线特征参数的影响

Tab. 4 Effect of different ways of salty water irrigation on wheat leaf photosynthetic parameters of light response curve

处理	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	表观光量子效率/ ($\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	决定系数
CK	36.09 ^a	0.10 ^a	595.85 ^a	44.86 ^a	4.29 ^a	0.996
T1	35.99 ^a	0.09 ^a	588.26 ^a	42.96 ^a	3.92 ^a	0.997
T2	34.81 ^a	0.08 ^a	583.65 ^a	44.17 ^a	3.67 ^a	0.994
T3	30.27 ^b	0.04 ^b	582.97 ^a	50.05 ^a	2.41 ^b	0.991
T4	24.99 ^c	0.02 ^b	563.69 ^a	43.08 ^a	1.08 ^c	0.993

位面积穗数较 CK 处理显著降低;其他处理与 CK 无显著差异,2013—2014 年小麦穗粒数表现为 T1 处理较 CK 显著提高,T4 处理穗粒数较 CK 显著降低,2014—2015 年穗粒数表现为 T4 处理显著低于其他处理,T1、T2 和 T3 处理与 CK 无明显差异,不同处理下不同年份间的穗粒数结果差异较大,可能与单位面积穗数和千粒质量有关;不同处理的千粒质量表现为 T3 处理显著低于 CK,其他处理间的千粒质量变化幅度较小。2 年试验的产量结果均表现为 T3 和 T4 处理的产量显著低于 CK,但 T3 较 T4 处理的

产量显著提高,而 T1 和 T2 处理的籽粒产量与 CK 无显著差异。2 年中 T4 处理的产量差异较大,该处理为无灌溉旱地处理,产量差异主要由降水量不同引起。2015 年小麦生育期总降水量高于 2014 年,另外,2015 年 4 月份降水主要在 10 d 前正值小麦拔节期,降水及时,而 2014 年 4 月份降水主要在 25 d 之后,降水偏晚,造成生物量偏小。

由上可见,长期采用矿化度 3.6 g/L 咸水灌溉小麦产量较淡水、混灌和轮灌处理显著降低,但较春季无灌溉处理的小麦产量大幅度增加。

表 5 不同咸水利用方式下产量及产量构成因素的变化

Tab. 5 Changes of grain yield components and yield under condition of different ways of salty water irrigation

年份	处理	穗数/(穗·hm ⁻²)	穗粒数	千粒质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)
2013—2014	CK	(6.08 ± 0.41) × 10 ⁶ ^a	24.68 ± 2.12 ^b	41.95 ± 0.84 ^a	6 592.5 ± 235.3 ^a
	T1	(5.88 ± 0.38) × 10 ⁶ ^a	28.10 ± 2.68 ^a	40.38 ± 0.89 ^a	6 741.0 ± 359.4 ^a
	T2	(6.33 ± 0.45) × 10 ⁶ ^a	24.03 ± 2.27 ^b	41.83 ± 0.94 ^a	6 519.0 ± 311.9 ^a
	T3	(6.12 ± 0.37) × 10 ⁶ ^a	21.98 ± 1.69 ^b	37.53 ± 0.88 ^b	6 049.5 ± 212.8 ^b
	T4	(3.95 ± 0.33) × 10 ⁶ ^b	18.61 ± 1.51 ^c	40.56 ± 0.69 ^a	2 370.0 ± 138.7 ^c
2014—2015	CK	(5.32 ± 0.38) × 10 ⁶ ^a	32.31 ± 1.93 ^a	38.37 ± 0.81 ^a	5 980.5 ± 248.2 ^a
	T1	(5.30 ± 0.40) × 10 ⁶ ^a	32.62 ± 2.26 ^a	37.98 ± 0.53 ^a	6 069.0 ± 327.4 ^a
	T2	(5.20 ± 0.39) × 10 ⁶ ^a	32.13 ± 2.14 ^a	38.67 ± 0.68 ^a	5 869.5 ± 261.6 ^a
	T3	(5.13 ± 0.31) × 10 ⁶ ^a	30.80 ± 1.77 ^a	36.54 ± 0.51 ^b	5 446.5 ± 231.2 ^b
	T4	(4.57 ± 0.24) × 10 ⁶ ^b	27.26 ± 1.65 ^b	37.78 ± 0.49 ^a	4 620.0 ± 208.7 ^c

2.6 不同咸水利用方式对土壤盐分的影响

2014 年和 2015 年从起身期(3 月 15 日)开始,每隔 15 d 监测土壤含盐量变化的平均值(图 4)。从不同时期分析可知,起身期开始至监测 60 d(5 月 15 日),T1、T2 和 T3 处理土壤含盐量表现为随生育期延长而增加的趋势,该结果不仅与春季灌水有关,还与小麦植株蒸腾作用增强土壤盐分随水分上移密切相关,而 CK 和 T4 处理在不同生长阶段土壤盐分变化较小。从不同土壤层次分析可知,各处理 0 ~ 20 cm 土壤含盐量均处于较低水平,20 ~ 80 cm 土层表现为随土壤深度加深含盐量也呈增加趋势,除 T4 处理外其他处理均以 50 ~ 80 cm 土层含盐量最高。各处理每一土层含盐量均表现为:T4 < CK < T2 < T1 < T3。可见,长期采用 3.6 g/L 咸水灌溉明显增加土壤盐分累积量,加大土壤盐渍化的风险,而长期

采用混灌和轮灌的咸水灌溉利用方式虽然也增加了土壤含盐量,但经 6 ~ 7 年不同咸水利用方式灌溉定位试验,土壤含盐量未超过 0.2%,导致土壤盐渍化的风险明显降低,可作为提高咸水资源利用效率的灌溉方式。有关各处理 80 cm 以下土壤含盐量的变化有待进一步研究。

3 讨论

国内外开发利用微咸水灌溉农田已有 100 多年的历史,对微咸水矿化度、适宜灌溉土壤质地及作物、田间管理等方面也进行了大量的实践,YOSHINOBU 等^[18]认为选择恰当的灌溉方式是咸水安全合理灌溉的关键。FLOWERS 等^[19]认为混灌不仅提高咸水灌溉的水质,也增加了农田可灌溉用水的总量,使以前不能使用的咸水合理利用。

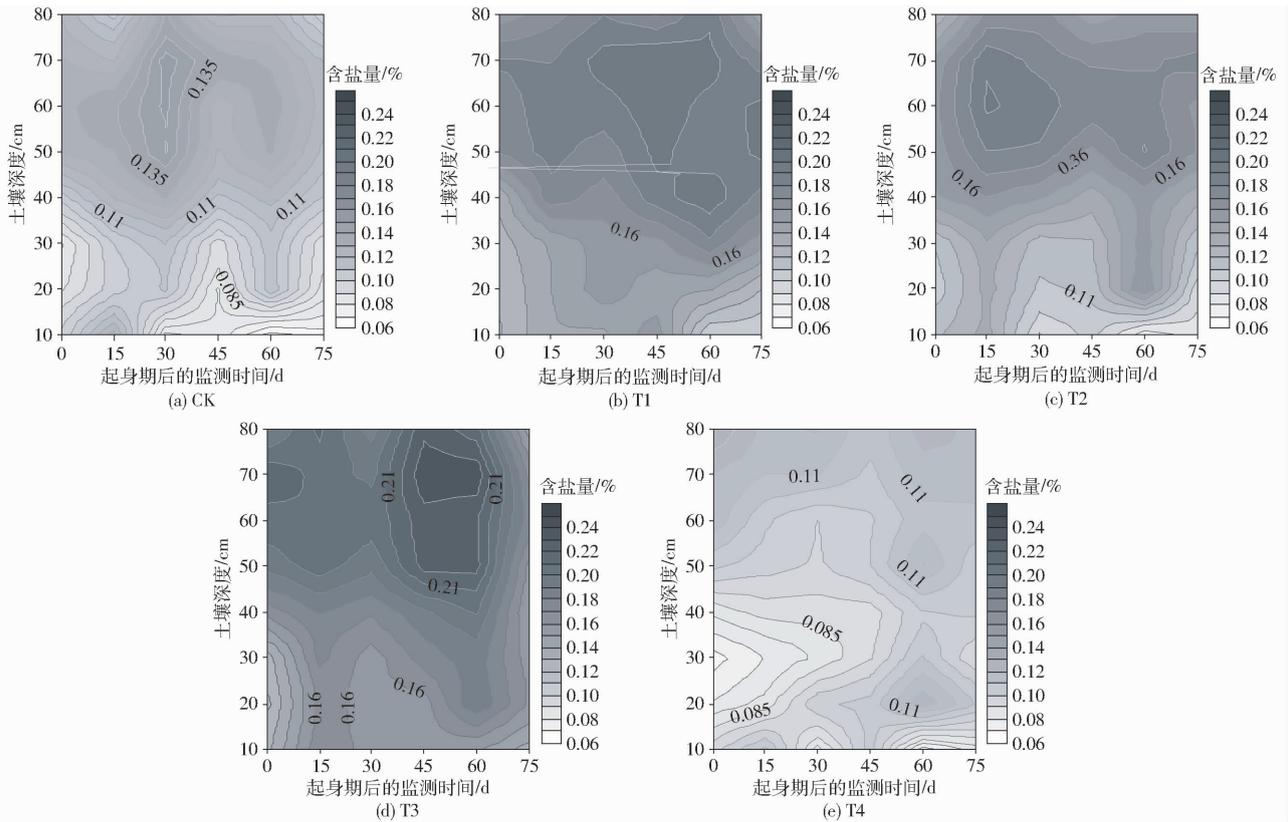


图4 不同咸水灌溉方式下土壤盐分变化

Fig. 4 Changes of soil salt content under condition of different ways of salty water irrigation after setting stage

MURTAZA 等^[20]认为咸淡轮灌可显著减小咸水灌溉的不利影响,有助于控制土壤中的盐分积累。吴忠东等^[21]以冬小麦为材料开展了2年田间微咸水灌溉试验,研究结果表明3 g/L的微咸水连续使用会导致土壤积盐,采用拔节期和抽穗期灌淡水、灌浆期灌咸水的咸淡交替顺序为最优组合,其株高、叶面积指数及叶绿素含量与淡水相近。本研究结果表明,连续6~7年矿化度控制在1.8 g/L咸淡混灌和3.6 g/L咸水与淡水轮灌处理的株高、叶面积指数、叶面积持续期与淡水处理无显著差异,而3.6 g/L咸水和春季不灌水处理较淡水处理明显下降。此外,通过研究长期不同咸水利用方式下小麦旗叶光合响应曲线的变化结果表明,长期采用3.6 g/L咸水灌溉和春季不灌水处理的表观光量子效率显著下降,进而影响植株叶片的光合速率。

曹彩云等^[15]以小麦为材料开展了连续4年采用不同矿化度咸水灌溉的定位试验,结果表明连续4年灌溉矿化度为4 g/L的咸水产量下降,但较不灌水处理产量显著增加。FLOWERS 等^[19]研究表明咸淡混灌较无灌水处理提高作物产量。本试验表明连续7年采用矿化度为3.6 g/L的咸水灌溉导致小麦单位面积穗数、穗粒数及产量较淡水处理降低,但较春季不灌水处理有所增加,而T1和T2处理籽粒产量与淡水处理无显著差异,该结果与前人研究基本

一致。

马文军等^[22]以8年冬小麦微咸水灌溉田间长期定位试验为基础,研究表明整个试验期间主要在非常干旱年型发生盐分积累现象,正常年型并未出现严重的盐分积累,从土壤水盐运移规律分析,认为3 g/L的微咸水用于田间灌溉是可行的,在降雨较少年型适当增加淡水灌溉可使土壤盐分充分淋洗。本试验研究表明,连续6~7年矿化度控制在1.8 g/L咸淡混灌和3.6 g/L咸水与淡水轮灌处理土壤含盐量较淡水处理虽有增加趋势,但未导致产量及光合作用下降,而3.6 g/L咸水长期直接灌溉则造成小麦光合与产量下降。该结果与前人研究作物生长对土壤盐分反应符合分段函数特征的结果相吻合,即当土壤盐分低于作物耐盐阈值时,对作物生长未产生危害,当土壤盐分高于植株耐盐阈值时才受影响,并且影响程度与超出阈值的土壤含盐量呈正比^[23-24]。在本研究中,咸淡水混灌和轮灌处理与咸水处理单独连续灌溉相比,进入土壤的盐分减少,土壤盐分积累未高出小麦的耐盐阈值,光合速率与产量未受影响,而单独采用3.6 g/L咸水连续灌溉,土壤盐分积累超出耐盐阈值,导致光合速率与产量均下降。因此,从对土壤生态环境及小麦产量的影响角度考虑,矿化度3.6 g/L的咸水不适宜长期直接灌溉,连续7年采用T1和T2处理的咸水灌溉方

式既能保证作物产量达到淡水处理水平, 还避免土壤次生盐渍化的发生, 同时节约深层淡水资源, 对缓解深层地下水严重超采具有指导意义。由于咸水灌溉时刻影响着土壤水盐分布及运移特征, 有关连续 7 年以上采用上述不同咸水利用方式对小麦产量、光合特性及土壤盐分的影响尚需进一步研究。

4 结论

(1) 在不同咸水利用方式 6~7 年定位试验下, 采用 3.6 g/L 咸水与淡水轮灌(T2)和矿化度控制在 1.8 g/L 咸淡混灌(T1)的灌溉方式对小麦株高、叶面积指数和叶面积持续期及产量较淡水(CK)灌溉

无显著影响, 3.6 g/L 咸水和不灌水处理较淡水处理上述指标显著下降, 但 3.6 g/L 咸水处理较春季不灌水处理显著提高。

(2) 与淡水灌溉相比, T3 和 T4 处理的小麦旗叶最大净光合速率、表观光量子效率和暗呼吸效率较 CK 显著下降, T1 和 T2 处理与 CK 相比, 上述指标变化幅度较小, 无显著差异。

(3) 连续 6~7 年灌溉 3.6 g/L 咸水明显增加土壤盐分累积量, 导致土壤盐渍化程度增加, 但长期采用矿化度控制在 1.8 g/L 咸淡混灌和 3.6 g/L 咸水与淡水轮灌的灌溉方式下土壤含盐量虽有一定增加, 但增加幅度较小, 导致土壤盐渍化的风险明显降低, 可作为提高咸水资源利用效率的灌溉方式。

参 考 文 献

- 胡亚南, 李阔, 许吟隆. 1951—2010 年华北平原农业气象灾害特征分析及粮食减产风险评估[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 197-203.
HU Ya'nán, LI Kuo, XU Yinlong. Characteristic analysis of agricultural meteorological disasters and risk assessment of the crop loss in North China Plain during 1951—2010 [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 197-203. (in Chinese)
- 张光辉, 刘中陪, 费宇红, 等. 华北平原区域水资源特征与作物布局结构适应性研究[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 17-22.
ZHANG Guanghui, LIU Zhongpei, FEI Yuhong, et al. The relationship between the distribution of irrigated crops and the supply capability of regional water resources in North China Plain [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(1): 17-22. (in Chinese)
- LETEY J, FENG L. Dynamic versus steady-state approaches to evaluate irrigation management of saline waters[J]. Agricultural Water Management, 2007, 91(1-3): 1-10.
- 潘洁, 肖辉, 王立艳, 等. 咸水冰融化与土壤入渗过程不同盐离子迁移规律研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 210-214.
PAN Jie, XIAO Hui, WANG Liyan, et al. Study on migration of different salt ions in melting and infiltration processes of saline water ice[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(1): 210-214. (in Chinese)
- 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151217&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017.
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126. (in Chinese)
- 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64-69.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64-69. (in Chinese)
- 彭致功, 刘钰, 许迪, 等. 农业节水措施对地下水涵养的作用及其敏感性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 36-41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120707&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.007.
PENG Zhigong, LIU Yu, XU Di, et al. Effect of agricultural water-saving measures on the quantity of groundwater extraction and recharge and its sensitivity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 36-41. (in Chinese)
- 马海燕, 王昕, 张展羽, 等. 基于 HYDRUS-3D 的微咸水膜孔沟灌水盐分布数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 137-144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150221&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.021.
MA Haiyan, WANG Xin, ZHANG Zhanyu, et al. Numerical simulation of water-salt distribution under brackish water film hole furrow irrigation based on HYDRUS-3D model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 137-144. (in Chinese)
- FANG S, CHEN X L. Developing drainage as the basis of comprehensive control of drought, waterlogging, salinity and saline groundwater[J]. Irrigation and Drainage, 2007, 56(Supp.1): 227-244.
- 张俊鹏, 冯棣, 郑春莲, 等. 咸水灌溉对土壤水热盐变化及棉花产量和品质的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 162-167. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140927&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.027.
ZHANG Junpeng, FENG Di, ZHENG Chunlian, et al. Effects of saline water irrigation on soil water-heat-salt variation and cotton yield and quantity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 162-167. (in Chinese)
- 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.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effects of deficit irrigation with brackish water on soil water-salt distribution and winter wheat

- yield [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 36–42. (in Chinese)
- 12 雪静, 王全九, 毕远杰. 微咸水间歇供水土壤入渗特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 14–19.
XUE Jing, WANG Quangu, BI Yuanjie. Soil infiltration properties with slight saline water intermittent application [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 14–19. (in Chinese)
- 13 毕远杰, 王全九, 雪静. 微咸水造墒对油葵生长及土壤盐分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 39–44.
BI Yuanjie, WANG Quangu, XUE Jing. Effect of saline water for increasing soil water before sowing on helianthus growth and saline distributional characteristics of soil [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 39–44. (in Chinese)
- 14 乔玉辉, 宇振荣. 灌溉对土壤盐分的影响及微咸水利用的模拟研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2050–2056.
QIAO Yuhui, YU Zhenrong. Simulation study on the effects of irrigation on soil salt and saline water exploration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2050–2056. (in Chinese)
- 15 曹彩云, 郑春莲, 李科江, 等. 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.
CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, LI Kejiang, et al. Impact of saline water irrigation with different salinities on yield and physiological indices of wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 347–355. (in Chinese)
- 16 杜世州, 乔玉强, 李玮, 等. 淮东北地区小麦超高产群体生长特性分析[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2): 231–238.
DU Shizhou, QIAO Yuqiang, LI Wei, et al. Research on growth characteristics of super-high-yielding wheat populations in Huaibei area [J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(2): 231–238. (in Chinese)
- 17 YE Z P, YU Q. A coupled model of stomatal conductance and photosynthesis for winter wheat [J]. Photosynthetica, 2008, 46(4): 637–640.
- 18 YOSHINOBU K, TOMOHISA Y, TOSHIMASA H, et al. Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Seabasin—research on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land [J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1): 1–14.
- 19 FLOWERS T J, RAGAB R, MALASH N, et al. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean; SALTMED [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(1–2): 3–14.
- 20 MURTAZA G, CHAFOOR A, QADIR M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton wheat rotation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1): 98–114.
- 21 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71–76.
WU Zhongdong, WANG Quangu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese)
- 22 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73–80.
MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 73–80. (in Chinese)
- 23 冯棣, 张俊鹏, 曹彩云, 等. 咸水畦灌条件下土壤水盐运移规律[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 48–52.
FENG Di, ZHANG Junpeng, CAO Caiyun, et al. Soil water and salt migration under border irrigation with saline water [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5): 48–52. (in Chinese)
- 24 STEPPUHN H, VAN M T, GRIEVE C M. Crop ecology, management and quality, root-zone salinity: I. selecting a product-yield index and response function for crop tolerance [J]. Crop Science, 2005, 45(1): 209–220.

(上接第 197 页)

- 23 孙园园, 孙永健, 陈林, 等. 不同播期和抽穗期弱光胁迫对杂交稻生理性状及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2734–2744.
SUN Yuanyuan, SUN Yongjian, CHEN Lin, et al. Effects of different sowing dates and low-light stress at heading stage on the physiological characteristics and grain yield of hybrid rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2734–2744. (in Chinese)
- 24 彭强. 遮阴与土壤水分对结果期辣椒果实及叶片生理特性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
PENG Qiang. Effects of shading and soil water content on physiology characters of fruit and leaf of pepper during fruiting stage [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 25 刘学娜, 刘彬彬, 崔青青, 等. 交替滴灌施氮对日光温室黄瓜生长, 光合特性, 产量及水氮利用效率的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(6): 905–916.
LIU Xuena, LIU Binbin, CUI Qingqing, et al. Effects of alternative drip irrigation and nitrogen fertilization on growth, photosynthesis, yield, and water-nitrogen use efficiency of cucumbers in solar greenhouse [J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(6): 905–916. (in Chinese)
- 26 董志强, 张丽华, 李谦, 等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性[J/OL]. 作物学报, 2016, 42(5): 725–733.
http://zwxb.chinacrops.org/CN/Y2016/V42/I05/725. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2016.00725.
DONG Zhiqiang, ZHANG Lihua, LI Qian, et al. Grain yield and water use characteristics of winter wheat under micro-sprinkler irrigation [J/OL]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(5): 725–733. (in Chinese)