

考虑盐分累积及冬小麦产量品质的井渠结合灌溉模式优选

乔冬梅, 韩 洋, 齐学斌^{*}, 黄仲冬, 李 平, 梁志杰

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 新乡 453002; 3. 中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 新乡 453002)

摘 要: 为探究井渠结合灌区地表水与地下水适时适量灌溉模式, 以田间小区为研究尺度, 探索不同渠井灌水比例 (0、33%、67%、100%)、不同灌水定额 (600、900、1 200 m³/hm²) 对 2013—2016 年冬小麦产量、品质及根层土壤盐分动态变化特征的影响。结果表明: 1) 不同灌溉定额对纯渠水灌溉模式下冬小麦产量的影响较纯井水灌溉模式大。高定额纯渠水 (灌水定额为 1 200 m³/hm², 渠井灌水比例为 100%) 灌溉模式下的冬小麦产量最大, 2015 年为 9 195 kg/hm²。2) 增大灌水定额有利于冬小麦容重、湿面筋和稳定时间的增加, 而对蛋白质含量的影响不明显。井水有利于蛋白质含量、湿面筋和稳定时间的增加, 有利于弱化度的降低。在地表水资源相对充足且追求产量最大化的情况下, 可选择高定额纯渠水灌溉模式; 在地表水资源不充足的情况下, 可选择中、高定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式。3) 连续 4 a 年灌溉后冬小麦根层土壤盐分有小幅增加趋势, 纯渠水灌溉模式下冬小麦根层土壤盐分增量最小, 其次是井水+渠水+渠水灌溉模式, 纯井水灌溉模式下冬小麦根层土壤盐分增量最大。在地表水量相对充足且以产量最大化为目标的情况下, 可选取高定额纯渠水灌溉模式。地表水资源不充足的地区, 可选择高定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式, 而在水资源紧缺地区, 可选择中定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式。

关键词: 灌溉; 地下水; 盐分; 冬小麦; 渠井灌水比; 产量; 品质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.010

中图分类号: S274; S153.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0078-08

乔冬梅, 韩 洋, 齐学斌, 黄仲冬, 李 平, 梁志杰. 考虑盐分累积及冬小麦产量品质的井渠结合灌溉模式优选[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 78—85. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.010 http://www.tcsae.org

Qiao Dongmei, Han Yang, Qi Xuebin, Huang Zhongdong, Li Ping, Liang Zhijie. Optimization of well-canal irrigation mode considering salt accumulation and winter wheat yield and quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 78—85. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.010 http://www.tcsae.org

0 引 言

根据《全国农业可持续发展规划 (2015—2030)》中的区域布局, 黄淮海平原是中国重要的农业优化发展区之一, 但其资源环境与发展规划要求不相适应。该地区可利用淡水资源紧缺, 农业用水尤为紧张, 供需缺口已超 100 亿 m³^[1], 地下浅层蕴藏的大量咸水资源是农业生产重要的可利用性资源。黄淮海平原土壤盐渍化由来已久, 经多年改良虽在一定程度上有所改观^[2], 但其潜在风险仍不容忽视; 不合理灌溉导致农作物减产、减质及土壤次生盐渍化发生。因此, 开展井渠结合灌区粮食安全生产及基于土壤环境安全性的高效灌溉模式研究, 对于黄淮海区域农业可持续发展具有重要的现实意义。

在井渠结合灌区, 渠灌用水量、井灌用水量及渠井

用水比例是影响作物根层土壤盐分变化和作物产量、品质的重要指标。适宜的渠井用水比例对于调节灌区地下水位、调控作物根层土壤盐分、满足作物用水需求等至关重要, 也是农业水资源优化配置与调控的前提。以往相关研究指出, 渠井灌水配比是冬小麦干物质质量累积的重要影响因素^[3]; 渠井结合灌溉对地下水埋深会造成直接影响^[4]; 王璐瑶等^[5]基于地下水补给量与开采量之间的均衡方程得出渠井结合比的合理范围为 2.3~3.4; 代锋刚等^[6]研究表明, 当渠首有效引水量控制在 3.7~4.1 亿 m³, 井渠灌水比例控制在 0.35~0.55 时, 基本可以实现灌区地下水采补平衡; 此外, 渠首有效引水量介于 1.5~2.0 亿 m³之间, 井渠灌水比例控制在 0.5~0.7, 同样可实现灌区地下水采补平衡; 也有类似研究指出, 将人民胜利渠灌区井渠用水比例调整为 1/0.78, 上游调整为 1/1.24, 中游调整为 1/0.85, 下游调整为 1/0.41, 基本可实现该区域地下水采补平衡^[7]。长期井渠结合灌溉模式对灌区土壤盐分特别是作物根层土壤积盐、粮食质量安全等方面均产生显著影响^[8]。不合理的井渠结合灌溉模式不但会使地下水采补失衡, 更易导致根层土壤积盐, 危害作物健康, 进而严重影响灌区作物产量及生态型灌区的可持续发展。截至目前, 围绕灌区渠井结合灌溉模式的一系列相关研究多以实现

收稿日期: 2019-06-06 修订日期: 2019-08-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51879268); “十二五”公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201203077); 中国农业科学院基本科研业务费专项 (FIRI2016-11)

作者简介: 乔冬梅, 博士, 副研究员, 主要从事农业水资源与水环境研究。

Email: qiaodongmei78@163.com

*通信作者: 齐学斌, 研究员, 博士生导师, 研究方向为水资源与水环境。

Email: qxb6301@yahoo.com.cn

地下水采补平衡、合理调控地下水位为目标，而针对不同井渠结合灌溉模式对作物产量、品质及土壤盐分动态变化特征的影响研究尚不多见。鉴于此，本研究以冬小麦产量、品质及根层土壤盐分累积为表征指标，探究井渠结合灌区地表水与地下水适时适量灌溉模式，进而寻求地表水与地下水的适宜灌水比例，以期为井渠结合灌区选取绿色生产灌溉模式及灌区水资源联合调度提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在人民胜利渠灌区开展，灌区位于河南省北部，113°31′~114°25′E，35°00′~35°30′N。属暖温带大陆性季风型气候，年均气温 14.5℃，最高 41℃，最低-16℃；无霜期约 210 d，早霜多出现在 10 月下旬，晚霜出现在 3 月中、下旬；多年平均水面蒸发量约 1 860 mm，降雨量约 600 mm，降雨量少且年内分布不均，6—9 月降雨量占全年降雨量的 70%~80%。因而具有冬春干旱，夏秋多雨，先旱后涝，涝后又旱，旱涝交替的气候特点。试验区土壤质地为粉黏壤，结构不均，0~15 cm 土层容重 1.52 g/cm³，>15~45 cm 容重 1.47 g/cm³，>45~100 cm 容重 1.43 g/cm³。试验区土壤理化性质参考文献[9]。地表水充足的时候灌地表水，地表水不足的时候灌地下水，灌溉方式是大水漫灌，灌溉定额在 900~1 200 m³/hm² 范围。不同年份人民胜利渠灌区地下水平均埋深见图 1a，多

年平均地下水埋深为 6.13 m，总体呈下降趋势。2013—2016 年降雨量如图 1b 所示。

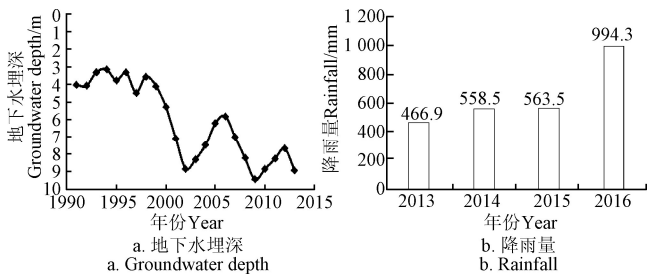


图 1 研究区地下水埋深及降雨量
Fig.1 Groundwater depth and rainfall in study area

1.2 试验设计

在当地现行灌溉定额（900~1 200 m³/hm²）的基础上，体现节水，设低、中、高 3 个灌水定额，分别为 600、900、1 200 m³/hm²；2 种灌溉水源，即地下水（井水）和地表水（渠水）。2013 年各处理设计 6 次重复，但其中 3 个重复受边界条件影响，故 4 a 试验各处理均设 3 个重复。小区面积为 40 m²，小区布置见图 2。供试作物为冬小麦（豫麦 57），整个生育期灌水 3 次，2013—2016 年 4 a 试验期间灌水时间一致，均为返青水（3 月 8 日—12 日），拔节水（4 月 19 日—22 日），灌浆水（5 月 14 日—18 日），试验设计见表 1。灌溉水质见表 2，其中阳离子表面活性剂、硫化物、镉、总砷、铬（六价）、铅、铜、锌、蛔虫卵数均未检出。

保护行 Protection zone											
A600(1)	A900(1)	A1200(1)	B600(1)	B900(1)	B1200(1)	C600(1)	C900(1)	C1200(1)	D600(1)	D900(1)	D1200(1)
保护行 Protection zone											
A600(2)	A900(2)	A1200(2)	B600(2)	B900(2)	B1200(2)	C600(2)	C900(2)	C1200(2)	D600(2)	D900(2)	D1200(2)
保护行 Protection zone											
A600(3)	A900(3)	A1200(3)	B600(3)	B900(3)	B1200(3)	C600(3)	C900(3)	C1200(3)	D600(3)	D900(3)	D1200(3)
保护行 Protection zone											

图 2 4 a 田间试验 12 个处理各 3 次重复的小区布置示意图
Fig.2 Schematic diagram of plot layout for 12 treatments with 3 replicates each in 4 years

表 1 2013—2016 年冬小麦渠井灌溉试验设计
Table 1 Design for irrigation experiment by using canal and well water from year of 2013 to 2016

处理 Treatment	灌水定额 Irrigation quota/ (m ³ ·hm ⁻²)	水源 Water sources			渠井 用水比 Water ratio of canal to well/%
		返青 Green return period	拔节 Jointing stage	灌浆 Filling stage	
A600	600	井水	井水	井水	0
A900	900	井水	井水	井水	0
A1200	1200	井水	井水	井水	0
B600	600	渠水	井水	井水	33
B900	900	渠水	井水	井水	33
B1200	1200	渠水	井水	井水	33
C600	600	井水	渠水	渠水	67
C900	900	井水	渠水	渠水	67
C1200	1200	井水	渠水	渠水	67
D600	600	渠水	渠水	渠水	100
D900	900	渠水	渠水	渠水	100
D1200	1200	渠水	渠水	渠水	100

表 2 冬小麦试验灌溉水质
Table 2 Irrigation water quality for winter wheat experiments
mg·L⁻¹

指标 Index	井水 Well water	渠水 Canal water
全盐量 Salinity	1220	411
NO ₃ ⁻	0.19	4.34
Ca ²⁺	32.7	65.41
Mg ²⁺	48.59	37.19
SO ₄ ²⁺	163.72	400.69
CO ₃ ⁻	41.58	12.23
HCO ₃ ⁻	457.62	206.42
Cl ⁻	153.53	127.94
K ⁺	2.9	5.9
Na ⁺	1 100	790

1.3 指标测定与计算

土壤盐分：冬小麦根层土壤盐分采用电导率 (electrical conductivity, EC) 来表征, 定期取土测定土壤 EC 值, 取土深度为 0~100 cm, 每 10 cm 1 层取样, 采用 1:5 的土水比浸提液测定 EC 值, 测定仪器为电导率仪 (DDB-303A 型便携式电导率仪, 上海雷磁, 精度为 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。

根层土壤盐分增量：小麦收获后土壤 0~100 cm EC 值平均值减前 1 a 小麦收获后土壤 EC 值平均值与前 1 年小麦收获后土壤 EC 值平均值的百分数, %。

冬小麦产量：选取 2 m² (1 m×2 m) 冬小麦产量为实际产量, 然后换算为单位面积产量, kg/hm²。

冬小麦品质：出粉率、形成时间、吸水量指标均采用国家标准方法测定, 蛋白质含量采用 GB5009.5-2010, 容重采用 GB/T5498-2013, 湿面筋采用 GB/T5506.2-2008, 稳定时间、弱化度采用 GB/T14614-2006。

1.4 统计分析方法

应用 Excel 2010 和 DPS 进行数据的方差分析; 选取 95% 置信水平, 应用最小显著差异法 (least significance difference, LSD) 进行不同处理间的多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式及灌水定额对冬小麦产量的影响

不同灌溉模式下冬小麦产量见表 3。纯渠水灌溉模式下的冬小麦产量最大, 2015 年为 9 195 kg/hm²。低灌溉定额 (600 m³/hm²) 下, 2013—2016 年 4 种灌溉模式下的冬小麦产量差异不显著 ($P>0.05$)。中灌溉定额 (900 m³/hm²) 下, 2014 年纯渠水灌溉模式下冬小麦产量显著高于井水+渠水+渠水灌溉模式 ($P<0.05$)。高灌溉定额 (1 200 m³/hm²) 下, 2014 年纯渠水灌溉模式下冬小麦产量显著高于其他灌溉模式 ($P<0.05$)。可见, 低灌溉定额下, 渠井灌水比例对冬小麦产量影响不明显; 而中高灌溉定额下, 渠井灌水比例对冬小麦产量的影响可能较大。

相同灌溉模式不同灌溉定额下冬小麦产量分析表明, 纯井灌模式下, 2013—2016 年高灌溉定额下的冬小麦产量与中、低灌溉定额均无显著差异 ($P>0.05$)。“渠水+井水+井水”灌溉模式下, 2013 年高灌溉定额下冬小麦产量显著高于低灌溉定额 ($P<0.05$); 2016 年高、中灌溉定额下的冬小麦产量均显著高于低灌溉定额 ($P<0.05$), 分别较低灌溉定额提高了 22.4% 和 16.5%; 2014—2015 年, 3 种灌溉定额下的冬小麦产量差异不明显 ($P>0.05$)。“井水+渠水+渠水”灌溉模式下, 2013—2015 年度 3 种灌溉定额下冬小麦产量差异均不显著 ($P>0.05$), 2016 年高、中灌溉定额下的冬小麦产量均显著高于低灌溉定额 ($P<0.05$), 分别较低灌溉定额提高了 36.1% 和 32.3%。纯渠水灌溉模式下, 2014 年高灌溉定额下的冬小麦产量显著高于低灌溉定额 ($P<0.05$), 较之提升 25.0%; 其他年份中 3 个灌溉定额下的冬小麦产量无明显差异 ($P>0.05$)。综上, 灌溉定额对纯渠水灌溉模式下冬小麦产量的影响较纯井水灌溉模式大。

表 3 不同灌溉处理下冬小麦产量

Table 3 Winter wheat yield under different irrigation treatments

处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)			
	2013	2014	2015	2016
A600	8 385 ab	7 080 cd	7 020 ab	7 365 ab
A900	8 340 ab	7 335 cd	6 960 ab	7 050 ab
A1200	8 760 a	7 770 bcd	7 860 ab	8 490 ab
B600	6 900 b	6 945 cd	7 485 ab	6 630 b
B900	8 190 ab	7 215 cd	7 485 ab	7 725 a
B1200	8 550 a	7 425 bc	6 975 ab	8 115 a
C600	7 275 ab	6 600 d	6 195 b	6 270 b
C900	7 395 ab	6 870 d	7 620 ab	8 295 a
C1200	7 515 ab	7 065 cd	8 130 ab	8 535 a
D600	8 175 ab	7 215 cd	7 980 ab	8 685 ab
D900	8 595 a	8 130 abc	8 730 ab	8 535 a
D1200	9 165 a	9 030 a	9 195 a	8 970 a

注：同列不同字母表示不同处理之间存在显著性差异 ($P<0.05$)，下同。
Note: Different letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), same as below.

2.2 不同灌溉模式及灌水定额对冬小麦品质的影响

为探究不同灌溉模式的累积效应, 本研究以连续灌溉 4 a 后 (2016 年) 冬小麦品质作为分析指标 (表 4)。不同处理间冬小麦的出粉率、形成时间、吸水量指标差异均不显著 ($P>0.05$), 因此仅针对差异显著的指标进行分析。

表 4 2016 年不同灌溉处理下冬小麦品质

Table 4 Winter wheat quality in different irrigation treatments in 2016

处理 Treatment	蛋白质质量 分数 Protein content/%	容重 Bulk density/ (g·L ⁻¹)	湿面筋 Wet gluten/%	稳定时间 Settling time/min	弱化度 Weakening grade/FU
A600	13.5ab	760.3d	21.4bcd	3.3cd	95.7cd
A900	13.6ab	783.3abc	23.5ab	6.1a	67.0e
A1200	12.5bc	785.7abc	26.3a	6.4ab	79.7de
B600	12.5bc	774.0cd	21.6bcd	3.2cd	105.7bc
B900	11.9cd	787.0abc	21.8bcd	3.4cd	114.7ab
B1200	11.8cd	796.0a	23.3ab	4.5bc	95.3cd
C600	11.7cd	780.0abc	18.0de	1.7d	82.3de
C900	11.0cd	784.7abc	18.6cde	2.1d	125.3a
C1200	11.1cd	790.7abc	22.3b	3.4cd	122.3ab
D600	11.5cd	784.7abc	17.9de	1.6d	127.0a
D900	11.3cd	777.7bc	18.6cde	2.8cd	108.7abc
D1200	11.8cd	792.3ab	21.8bc	2.9cd	122.0ab

2.2.1 蛋白质含量

食品种类不同对小麦蛋白质含量的要求也不同, 蛋白质含量高的小麦适合制作面包, 蛋白质含量低的小麦适合制作饼干和糕点。相同灌水定额不同灌溉模式下冬小麦蛋白质含量分析表明: 低灌溉定额下, 纯井水灌溉模式下的冬小麦蛋白质含量最高, 显著高于纯渠水和“井水+渠水+渠水”灌溉模式 ($P<0.05$), 较之分别提高 17.4% 和 15.4%; 中灌溉定额下, 纯井水灌溉模式下冬小麦蛋白质含量显著高于其他灌溉模式 ($P<0.05$), 相比分别提升 14.3%、23.6% 和 20.4%; 高灌溉定额下, 4 种灌溉模式下的冬小麦蛋白质含量均无明显差异 ($P>0.05$)。总体上,

井水有利于冬小麦蛋白质含量的增加, 纯井水灌溉模式下的冬小麦蛋白质含量相对较高; 相同灌溉模式下灌溉定额对冬小麦蛋白质含量影响均不明显 ($P>0.05$)。可见, 灌溉水质对蛋白质含量的影响大于灌溉定额对其的影响。

2.2.2 容重

小麦容重能综合反映籽粒形态、整齐度、胚乳质地和含水量等指标, 其值越大, 面粉质量越好, 出粉率越高。相同灌水定额不同灌溉模式冬小麦容重分析表明: 低灌溉定额下, 纯井水灌溉模式下冬小麦容重显著低于“井水+渠水+渠水”及纯渠水灌溉模式 ($P<0.05$), 相比分别降低 2.6%、3.2%; 而在中、高灌溉定额下, 4 种灌溉模式下的冬小麦容重差异均不显著 ($P>0.05$)。可见, 灌溉模式对低定额灌溉下的冬小麦容重影响较为明显; 低定额灌溉条件下, 渠井灌水比例越大则越有利于冬小麦容重的提升。相同灌溉模式下不同灌溉定额下冬小麦容重分析表明: 纯井水灌溉模式下, 低灌溉定额下的冬小麦容重显著低于中、高灌溉定额 ($P<0.05$), 相比降低 3.0%、3.3%; “渠水+井水+井水”灌溉模式, 低灌溉定额下的冬小麦容重显著低于高灌溉定额 ($P<0.05$), 相比降低 2.8%; “井水+渠水+渠水”及纯渠水灌溉模式下的 3 种灌溉定额冬小麦容重均差异不明显 ($P>0.05$)。可见, 渠井灌水比例越小, 灌溉定额对冬小麦容重影响越大, 即不同灌溉定额对纯井灌、“渠水+井水+井水”灌溉模式影响较明显。增加灌溉定额有利于增加冬小麦容重, 各种灌溉模式下, 高灌溉定额下冬小麦容重最大。

2.2.3 湿面筋

根据湿面筋含量将面粉分为高筋粉 (湿面筋质量分数 $>30\%$)、中筋粉 (湿面筋质量分数 $>25\%\sim30\%$)、中低筋粉 (湿面筋含量 $20\%\sim25\%$) 和低筋粉 (湿面筋质量分数 $<20\%$) 4 等。不同食品对面筋含量的要求不同。面包需选用高筋面粉, 饼干需选用低筋面粉, 面条、馒头等食品需选用中筋面粉。相同灌水定额不同灌溉模式下冬小麦湿面筋分析表明: 低灌溉定额下, 不同灌溉模式对冬小麦湿面筋影响不显著 ($P>0.05$)。中灌溉定额下, 纯井水灌溉模式下的冬小麦湿面筋含量显著高于纯渠水和“井水+渠水+渠水”灌溉模式 ($P<0.05$), 相比提高 74.7%。高灌溉定额下, 纯井水灌溉模式显著高于纯渠水和“井水+渠水+渠水”灌溉模式 ($P<0.05$), 相比分别提升 20.6% 和 17.9%。相同灌溉模式不同灌溉定额下冬小麦湿面筋分析表明: 纯井水灌溉模式下, 高灌溉定额下冬小麦湿面筋最高, 显著高于低灌溉定额 ($P<0.05$), 较之提升 22.9%; “渠水+井水+井水”灌溉模式下, 高灌溉定额下冬小麦湿面筋最高; “井水+渠水+渠水”灌溉模式下, 高灌溉定额下冬小麦湿面筋最高, 显著高于中、低灌溉定额 ($P<0.05$), 较之分别提升 19.9% 和 23.9%; 纯渠水灌溉模式下, 高灌溉定额下冬小麦湿面筋最高, 显著高于低灌溉定额 ($P<0.05$), 较之提升 21.8%。综上, 纯井水灌溉模式和“渠水+井水+井水”灌溉模式下的冬小麦属于中低筋粉, “井水+渠水+渠水”灌溉模式和纯

渠水灌溉模式下的冬小麦属于低筋粉 (高定额除外)。可见, 井水灌溉更有利于提升冬小麦湿面筋; 不同灌溉模式下随灌溉定额的增加, 湿面筋量增大。

2.2.4 稳定时间

面粉稳定时间与面粉的适用性密切相关, 面包等发酵食品要求稳定时间 8 min 以上, 馒头、面条类食品要求稳定时间 3~5 min, 糕点食品要求稳定时间小于 2.5 min。相同灌水定额不同灌溉模式冬小麦稳定时间分析表明: 低灌溉定额下, 纯渠水灌溉下的冬小麦稳定时间最短; 中灌溉定额下, 纯井水灌溉下的冬小麦稳定时间最长, 显著高于其他 3 种灌溉模式 ($P<0.05$)。高灌溉定额下, 纯井水灌溉下的冬小麦稳定时间最长, 显著高于纯渠水和“井水+渠水+渠水”灌溉模式 ($P<0.05$)。相同灌溉模式不同灌水定额下冬小麦稳定时间分析表明: 纯井水灌溉模式下, 低灌溉定额下冬小麦稳定时间显著低于中、高灌溉定额 ($P<0.05$), 分别较之缩短了 48.4%、45.9%; “渠水+井水+井水”、“井水+渠水+渠水”和纯渠水灌溉模式下, 3 种灌溉定额冬小麦稳定时间均无明显差异 ($P>0.05$)。综合分析, 不同灌溉模式下, 冬小麦稳定时间均随灌溉定额的增加而增大; 冬小麦稳定时间随渠井灌水比例的增加呈降低趋势, 纯井水灌溉下冬小麦稳定时间最长, 灌溉定额对其影响最大。纯井水和“渠水+井水+井水”灌溉模式下的冬小麦适合制作馒头、面条类食品, 井水+渠水+渠水灌溉模式和纯渠水灌溉模式的小麦适合制作糕点食品。

2.2.5 弱化度

弱化度可反映面团在搅拌过程中的破坏速率, 也代表表面筋强度。弱化度越大, 面筋越弱, 面团越易流变。相同灌水定额不同灌溉模式冬小麦弱化度分析表明: 低灌溉定额下, 纯渠水灌溉模式下的冬小麦弱化度显著高于其他 3 种灌溉模式 ($P<0.05$), 分别较纯井水、“渠水+井水+井水”、“井水+渠水+渠水”灌溉模式提高了 33.7%、20.9% 和 54.9%; 中灌溉定额下, 纯井水灌溉下冬小麦弱化度显著低于其他 3 种灌溉模式 ($P<0.05$), 分别较“渠水+井水+井水”、“井水+渠水+渠水”、纯渠水灌溉模式降低了 41.8%、46.6% 和 38.5%, 其中“井水+渠水+渠水”灌溉模式弱化度最高, 但与“渠水+井水+井水”和纯渠水灌溉模式差异不明显 ($P>0.05$); 高灌溉定额下, “井水+渠水+渠水”、纯渠水灌溉下的冬小麦弱化度显著高于纯井水和“渠水+井水+井水”灌溉模式 ($P<0.05$)。相同灌溉模式不同灌水定额冬小麦弱化度分析结果表明: 纯井灌模式下, 低灌溉定额下弱化度最高, 显著高于中灌溉定额 ($P<0.05$), 较之提升 42.8%; “渠水+井水+井水”灌溉模式下, 中灌溉定额下弱化度最高, 显著高于高灌溉定额 ($P<0.05$), 较之提升 21.1%; “井水+渠水+渠水”灌溉模式下, 低灌溉定额下冬小麦弱化度显著低于中、高定额灌溉 ($P<0.05$), 分别较之降低 34.4% 和 32.8%; 纯渠水灌溉模式下, 3 种灌溉定额无明显差异 ($P>0.05$)。综合分析, 冬小麦弱化度随渠井灌水比例的增大而增加的趋势。

2.3 不同灌溉模式和灌水定额下冬小麦根层土壤盐分逐年累积效应

2013—2016 年不同灌溉模式冬小麦根层土壤盐分累积增量见图 3。相同灌溉定额不同灌溉模式对比分析表明：低灌溉定额下，2013 年冬小麦根层土壤盐分增量随渠井灌水比例的增加呈逐渐降低趋势；2014—2016 年根层土壤盐分增量随渠井灌水比例的增加呈先升高后降低趋势。中灌溉定额下，2013 年冬小麦根层土壤盐分增量随渠井灌水比例的增加呈逐渐降低趋势；2014 年根层土壤盐分增量随渠井灌水比例的增加呈先升高后降低趋势，而 2015—2016 年根层土壤盐分增量均随渠井灌水比例的增加呈递减趋势。高灌溉定额下，2013 年根层土壤盐分增量随渠井灌水比例的增加呈先升高后降低趋势，原因可能是 2013 年降雨量较小，蒸发蒸腾量较大。2014—2015 年根层土壤盐分增量随渠井灌水比例的增加呈逐渐降低趋势。综合分析，纯井水灌溉和“渠水+井水+井水”灌溉模式下的冬小麦根层土壤盐分增量较大，而纯渠水灌溉及“井水+渠水+渠水”灌溉模式下的冬小麦根层土壤盐分增量相对较小；其中 2014 年纯渠水灌溉模式下根层土壤盐分累积增量均低于其他灌溉模式，且在较高灌溉定额下，“井水+渠水+渠水”和纯渠水灌溉模式下根层土壤盐分累积增量均远低于纯井水和“渠水+井水+井水”灌溉模式，2015 年纯渠水灌溉模式下根层土壤盐分增量最低。

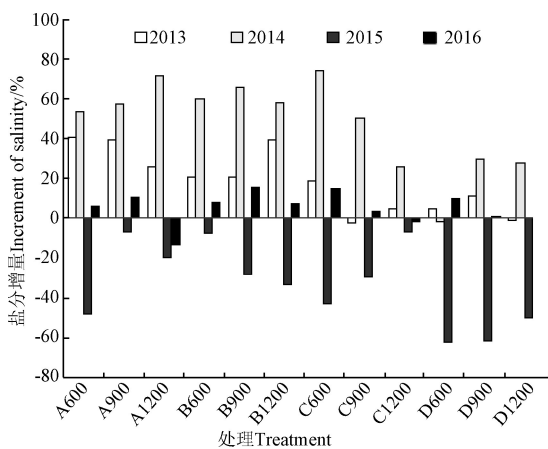


图3 2013—2016 年不同灌溉处理下土壤 0~100 cm 土壤盐分增量

Fig.3 Salinity increment in soil at 0-100 cm under different irrigation treatments from 2013 to 2016

相同灌溉模式不同灌水定额对比分析表明：纯井水灌溉模式下，不同灌水定额下冬小麦根层土壤盐分增量在各年份间的变化规律不尽相同。2013 年根层土壤盐分增量随灌溉定额的增加呈递减趋势，2014 年盐分增量随灌溉定额的增加呈递增趋势，而 2015—2016 年盐分增量随灌溉定额的增加呈先升高后降低趋势。“渠水+井水+井水”灌溉模式下，2013 年根层土壤盐分增量随灌溉定额的增加呈递增趋势，其中高定额灌溉下根层土壤盐分增量最大；2014 年根层土壤盐分增量随灌溉定额的增加呈先升高后降低趋势，中定额灌溉下根层土壤盐分增量

最大，相比高、低定额分别增加 9.7% 和 12.8%；2015 年 3 种定额灌溉下根层土壤盐分含量均有所下降，且盐分减幅随灌溉定额的增大而增大；2016 年中定额灌溉下根层土壤盐分增量最大，相比高、低定额分别提升 116% 和 102%。“井水+渠水+渠水”灌溉模式下，2014 年根层土壤盐分增量随灌溉定额的增加呈递减趋势；2015 年根层土壤盐分含量均有所下降，其中低定额灌溉下盐分降幅最大，随着灌溉定额的提高，盐分降幅逐渐降低，2016 年根层土壤盐分增量随灌溉定额的增加呈递减趋势。纯渠水灌溉模式下，2013 年高定额灌溉下根层土壤盐分含量有所下降，而中、低定额灌溉下盐分存在一定累积；2014 年低定额灌溉下盐分含量有所降低，而中、高定额灌溉下盐分累积增幅相当；2015 年 3 种定额灌溉下根层土壤盐分含量均大幅度降低，且随着灌溉定额的提高，盐分减幅呈递减趋势；至 2016 年，3 种定额灌溉下根层土壤盐分含量又表现为轻度回升，中定额灌溉下盐分增量最小。

总之，连续 4 a 灌溉后冬小麦根层土壤盐分有小幅增加趋势，其中纯渠水灌溉模式 (D) 下冬小麦根层土壤盐分增量最小，其次是“井水+渠水+渠水”灌溉模式 (C)，纯井水灌溉模式下冬小麦根层土壤盐分增量最大 (A)。相对而言，高定额灌溉模式下盐分累积较小。因此，在地表水资源相对充足的地区可选择高定额纯渠水灌溉模式，地表水资源相对不充足的地区，可选择高定额井水+渠水+渠水灌溉模式，而在水资源紧缺地区，可选择中定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式。

3 讨论

充足的土壤水分条件是灌区作物高产稳产的基础。在一定范围内，冬小麦产量与灌水量呈正相关^[10-11]；但灌水过度则易导致冬小麦产量显著下降^[12]，过度的水分亏缺同样会严重抑制冬小麦生长，致使其产量降低^[13]。本研究结果表明，灌溉定额对纯渠水灌溉模式下的冬小麦产量的影响较纯井水灌溉模式大，高灌溉定额下的冬小麦产量显著高于低灌溉定额，原因可能是渠水当中氮、磷等营养物质含量远高于井水，不同渠灌灌水量输入土壤中的营养物质含量差异较大，因而对冬小麦产量影响差异明显。以往研究表明，相同灌溉定额条件下，纯渠水灌溉下冬小麦产量高于纯井水灌溉及渠井结合灌溉^[3]。本研究结果表明，低灌水定额下，渠井灌溉模式对冬小麦产量的影响不明显；随着灌溉定额的提高，不同渠井灌溉模式下的冬小麦产量差异性逐渐增大，其中纯渠水灌溉模式下的冬小麦产量最大，与以往研究结果相似。一方面，渠水相比井水富含多种营养成分，更有利于促进冬小麦增产；另一方面，与井水相比，渠水温度更接近于冬小麦根系层温度，可提供更适宜冬小麦根系生长的温度和养分条件。此外，长期井水灌溉易造成土壤积盐，对土壤微生物量、有机质等土壤生化指标均存在一定的负面影响，不利于作物生长^[14-16]。高定额纯渠水灌溉模式下的冬小麦产量最大；因此，在地表水量相对充

足且以产量最大化为目标的情况下, 可选取高定额纯渠水灌溉模式。

灌溉水质、灌水量及灌水时间等因素对冬小麦品质的影响错综复杂, 土壤水分条件不仅制约冬小麦产量, 同时也会影响土壤中的养分释放, 进而影响冬小麦品质。研究表明, 井矿水灌溉一定程度上不利于冬小麦产量的提升, 但对小麦品质的负面影响较小甚至可改善其品质^[17]。本研究中, 井水灌溉更有利于提升冬小麦蛋白质与湿面筋含量, 纯井水灌溉模式下的冬小麦蛋白质与湿面筋含量最高, 稳定时间最长, 其次为“渠水+井水+井水”灌溉模式。以往研究表明, 土壤中绝大部分盐分离子与小麦籽粒蛋白质含量之间呈正相关; 灌溉水及土壤中的盐分离子浓度越高, 越有利于促进小麦籽粒蛋白质含量的提升^[18]。此外, 小麦蛋白质含量、湿面筋含量、稳定时间三者间均具有显著正相关性^[19-21]。与渠水相比, 井水中的盐分离子浓度更高, 因而更有利于提升冬小麦籽粒中蛋白质和湿面筋含量, 延长其稳定时间。冬小麦产量和品质是基因与外界环境因素互作下的综合体现, 只有将二者有机结合才能实现粮食优质与高产相统一。综合分析不同灌溉处理下的冬小麦产量与品质特征, 在地表水资源相对充足且追求产量最大化的情况下, 可选择中或高定额纯渠水灌溉模式; 在地表水资源不充足的情况下, 可选择中、高定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式; 此 2 种情况下的冬小麦生产用途应主要集中于制作饼干、糕点等农副产品。在地表水资源紧缺且不追求产量最大化的情况下, 可选择中定额纯井水或“渠水+井水+井水”灌溉模式, 该种情况下的冬小麦生产用途应主要集中于制作馒头、面条等传统主食类产品。

微咸水灌溉会导致土壤积盐及作物减产, 而咸水与淡水交替组合灌溉效果较为理想^[22-23]; 咸、淡水组合灌溉下土壤盐分累积量与淡水灌溉相比差异较小, 显著低于纯咸水灌溉^[24]; 在地下水矿化度稳定的条件下, 不同咸、淡水组合灌溉模式下土壤盐分含量由大到小分别为淡淡咸、淡咸淡、咸淡淡^[25]。本研究中冬小麦根层土壤盐分累积增量随渠井灌水比例的增加而降低, 原因可能是渠井灌水比例高的灌溉模式, 尤其是在高定额灌溉下, 渠水灌溉对冬小麦根层土壤盐分的淋洗效果明显, 根层土壤盐分随水而下^[26], 导致纯渠水高定额灌溉下土壤盐分累积较小。土壤盐分长期累积效应的影响因素较复杂, 灌溉水矿化度^[27]、灌溉制度^[28-29]、土壤耕作方式^[30-31]及土壤结构空间异质性^[32]等多重因素均会在不同程度上影响土壤积盐规律, 在不同因素交互作用下, 土壤盐分累积特征差异较大^[33]。

4 结 论

1) 灌溉定额对纯渠水灌溉模式下冬小麦产量的影响较纯井水灌溉模式大。高定额纯渠水灌溉模式下的冬小麦产量最大。

2) 增大灌溉定额有利于冬小麦容重、湿面筋和稳定时间的增加, 而对蛋白质含量的影响不明显。井水有利于蛋白质含量、湿面筋和稳定时间的增加, 有利于弱化

度的降低。在地表水资源相对充足的情况下, 可选择高定额纯渠水灌溉模式; 在地表水资源不充足的情况下, 可选择中、高定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式; 此 2 种情况下的冬小麦生产用途主要用于制作饼干、糕点等农副产品。在地表水资源紧缺的情况下, 可选择中定额纯井水或“渠水+井水+井水”灌溉模式, 该种情况下的冬小麦生产用途应主要用于制作馒头、面条等传统主食类产品。

3) 2013—2016 年盐分累积情况, 冬小麦根层土壤盐分有小幅增加趋势, 其中纯渠水灌溉模式下冬小麦根层土壤盐分增量最小, 其次是“井水+渠水+渠水”灌溉模式, 纯井水灌溉模式下冬小麦根层土壤盐分增量最大。从冬小麦根层土壤盐分调控的角度出发, 在地表水资源相对充足的地区可选择高定额纯渠水灌溉模式, 地表水资源不充足的地区, 可选择高定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式, 而在水资源紧缺地区, 可选择中定额“井水+渠水+渠水”灌溉模式。

[参 考 文 献]

- [1] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6): 1149—1157.
Mei Xurong, Kang Shaozhong, Yu Qiang, et al. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the north China plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1149—1157. (in Chinese with English abstract)
- [2] 魏由庆. 从黄淮海平原水盐均衡谈土壤盐渍化的现状和将来[J]. 土壤学进展, 1995, 23(2): 18—25.
Wei Youqing. Discuss the present situation and future of soil salinization base on water salt balance in huang-huai-hai plain[J]. Progress in Soil Science, 1995, 23(2): 18—25. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张现超, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 不同井渠配比灌水模式对土壤盐分及冬小麦生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 49—54.
Zhang Xianchao, Qiao Dongmei, Qi Xuebin, et al. Effects of irrigation models with different wei-canal water percentages on the growth of winter wheat and soil salt[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(4): 49—54. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙贯芳. 河套灌区不同灌溉模式水热盐效应及井渠结合区水盐变化规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
Sun Guanfang. Study on the Effect of Water, Heat and Salt of Different Irrigation Schemes in Hetao Irrigation Area and the Variation Law of Water and Salt in Well-canal Junction Area[M]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王璐瑶, 彭培艺, 郝培静, 等. 基于采补平衡的河套灌区井渠结合模式及节水潜力[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 18—24.
Wang Luyao, Peng Peiyi, Hao Peijing, et al. well-canal conjunctive irrigation mode and potential of water-saving amount bater on the balance of exploitation and supplement for hetao ieeigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 18—24. (in Chinese with English abstract)
- [6] 代锋刚, 蔡焕杰, 刘晓明, 等. 利用地下水模型模拟分析灌区适宜井渠灌水比例[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 45—51.

- Dai Fenggang, Cai Huanjie, Liu Xiaoming, et al. Analysis of suitable irrigation water ratio of well to channel based on groundwater model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 45–51. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张嘉星, 齐学斌, Magzum Nurolla, 等. 人民胜利渠灌区适宜井渠用水比研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 58–63.
- Zhang Jiaying, Qi Xuebin, Manzum Nurolla, et al. Appropriate well-canal irrigation proportion in irrigation district based on MODFLOW and GIS[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(2): 58–63. (in Chinese with English abstract)
- [8] 毛威, 杨金忠, 朱焱, 等. 河套灌区井渠结合膜下滴灌土壤盐分演化规律[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 93–101.
- Mao Wei, Yang Jinzhong, Zhu Yan, et al. Soil salinity process of Hetao Irrigation District after application of well-canal conjunctive irrigation and mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 93–101. (in Chinese with English abstract)
- [9] 乔冬梅, 齐学斌, 张现超, 等. 沿黄井渠结合灌区作物适宜灌水模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 32–38.
- Qiao Dongmei, Qi Xuebin, Zhang Xianchao, et al. Suitable crop irrigation model in well-canal irrigation district along yellow river basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(8): 32–38. (in Chinese with English abstract)
- [10] Sun H, Shen Y, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1139–1145.
- [11] Zhang X, Chen S, Sun H, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat [J]. Irrigation Science, 2008, 27(1): 1–10.
- [12] Li Q, Bian C, Liu X, et al. Winter wheat grain yield and water use efficiency in wide-precision planting pattern under deficit irrigation in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 153: 71–76.
- [13] 张凯, 陈年来, 顾群英, 等. 不同抗旱性小麦气体交换特性和生物量积累与分配对水氮的响应[J]. 核农学报, 2016, 30(4): 797–804.
- Zhang Kai, Chen Nianlai, Gu Qunying, et al. Responses of gas exchanges characteristics and biomass accumulation and allocation of Spring wheat with different drought tolerance to water and nitrogen treatments[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(4): 797–804. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969–973.
- Zhang Yuliang, Lu Wenlong, Zhang Wei, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969–973. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王国栋, 褚贵新, 刘瑜, 等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 44–48.
- Wang Guodong, Chu Guixin, Liu Yu, et al. Effects of long-term irrigation with brackish groundwater on soil microbial biomass in cotton field in arid oasis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 44–48. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曹荷莉, 丁日升, 薛富岚. 不同水盐胁迫对番茄生长发育和产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 29–35.
- Cao Heli, Ding Risheng, Xue Fulan. Growth and yield of tomato as impacted by salinity stress[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 29–35. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王辉. 我国微咸水灌溉研究进展[J]. 节水灌溉, 2016(6): 59–63.
- [18] 李树华, 许兴, 惠红霞, 等. 不同小麦品种(系)对盐碱胁迫的生理及农艺性状反应[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(4): 63–67.
- [19] Gaines C. S. Influence of chemical and physical modification of soft wheat protein on sugar-snap cookie dough consistency, cookie size, and hardness[J]. Cereal Chemistry, 1990, 67(1): 73–77.
- [20] 王瑞, 张永科, 郭勇, 等. 小麦不同阶段产品品质性状的变异及其关系[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(8): 900–905.
- [21] 任蓉. 小麦湿面筋与粗蛋白含量的相关性分析[J]. 粮油仓储科技通讯, 2018(4): 52–53.
- [22] 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.
- Mi Yingbin, Qu Ming, Yang Jingsong, et al. Effects of rotational irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 83–86. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘小媛, 高佩玲, 杨大明, 等. 咸淡水间歇组合灌溉对盐碱耕地土壤水盐运移特性的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1404–1413.
- Liu Xiaoyuan, Gao Peiling, Yang Daming, et al. Effects of intermittent combined irrigation on the characteristics of soil water and salt movement in farm land of salt-affected soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1404–1413. (in Chinese with English abstract)
- [25] 朱成立, 舒慕晨, 张展羽, 等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 220–228.
- Zhu Chengli, Shu Muchen, Zhang Zhanyu, et al. Effect of alternate irrigation with fresh and brackish water on saline distribution characteristics of soil and growth of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 220–228. (in Chinese with English abstract)
- [26] 郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 84–87.
- Guo Tailong, Chi Daocai, Wang Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(5): 84–87. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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 In filtration characteristics and ionMobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64–69. (in Chinese with English abstract)

- [28] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144—152.
Sun Guanfang, Qu Zhongyi, Du Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 144—152. (in Chinese with English abstract)
- [29] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70—75.
Ma Zhongsheng, Tan Junli, Wei Tong. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in china[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 70—75. (in Chinese with English abstract)
- [30] Pang H C, Li Y Y, Yang J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1971—1977.
- [31] 韩晓宇, 万书勤, 李晓彬, 等. 河西走廊辣椒滴灌水盐调控施肥灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 35—45.
Han Xiaoyu, Wan Shuqin, Li Xiaobin, et al. A drip fertigation schedule to manage soil water and salt in hot pepper field in Hexi corridor[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 35—45. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44—51.
Chen Lijuan, Feng Qi, Wang Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 44—51. (in Chinese with English abstract)
- [33] 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 126—135.
Tian Fuqiang, Wen Jie, Hu Hongchang, et al. Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 126—135. (in Chinese with English abstract)

Optimization of well-canal irrigation mode considering salt accumulation and winter wheat yield and quality

Qiao Dongmei, Han Yang, Qi Xuebin^{*}, Huang Zhongdong, Li Ping, Liang Zhijie

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Agricultural Water Soil Environmental Field Research Station of Xinxiang, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 3. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Huang-Huai-Hai Plain is one of the most important agricultural development zones in China. A large number of saline water resources in shallow underground layer are important available resources for agricultural production. It is of great practical significance for the sustainable development of agriculture in Huang-Huai-Hai region to study the efficient irrigation mode of well-canal irrigation area. In order to explore the suitable irrigation mode of surface water and groundwater in well-canal irrigation area, the effects of different irrigation proportion (0, 33%, 67%, 100%) and different irrigation quota (600, 900, 1 200 m³/hm²) on the winter wheat yield, quality and dynamic change characteristics of salinity in root soil of winter wheat from 2013 to 2016 were studied on the scale of field plots. The results showed that: 1) The effect of different irrigation quotas on winter wheat yield under pure channel irrigation mode was greater than that under pure well water irrigation mode. Winter wheat yield under high quota pure channel irrigation (The irrigation quota was 1 200 m³/hm² and the proportion of canal and well irrigation was 100%) was the highest, the yield of winter wheat under this irrigation treatment was 9 195 kg/hm². 2) Higher irrigation quota was beneficial to the increase of bulk density, wet gluten and stable time of winter wheat, but had no obvious effect on protein content. Well water was beneficial to the increase of protein content, wet gluten and stabilization time, and to the decrease of weakening degree. In the case of relatively sufficient surface water resources and the pursuit of maximum yield, high-quota pure channel irrigation mode was suggested; in the case of insufficient surface water resources, medium-quota and high-quota “well water, canal water, canal water” irrigation mode was to be selected; In these 2 cases, winter wheat mainly was well to make biscuits, pastries and the other agricultural by-products. In the case of shortage of surface water resources and no pursuit of maximum yield, medium-quota pure well water or “canal water, well water, well water” irrigation mode was to be selected. In this case, the production of winter wheat should mainly make steamed bread, noodles and the other traditional staple food products. 3) The soil salinity of winter wheat root layer increased slightly after 4 years of irrigation. The soil salinity increment of winter wheat root layer under pure channel water irrigation mode was the smallest, followed by irrigation mode “well water, channel water, channel water”, and the soil salinity increment of winter wheat root layer under pure well water irrigation mode was the largest. For those areas with relatively sufficient surface water aiming at maximizing yield, high quota pure channel irrigation mode could be selected. In areas with insufficient surface water resources, the irrigation mode “high quota well water, canal water, canal water” could be selected. In the area of water shortage, the irrigation mode of well water + canal water + canal water with medium quota can be selected. It is of great practical significance for the sustainable development of agriculture in Huang-Huai-Hai region to carry out well-canal combined irrigation area food security production and efficient irrigation mode based on soil environmental security.

Keywords: irrigation; groundwater; salinity; winter wheat; percentage of channel and well water; yield; quality