

河套灌区春小麦适宜秋浇模式的模拟研究

薛 静, 陈军锋, 郑秀清, 吕泽浩, 李旭强
(太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘 要:【目的】在河套灌区尺度探讨相对适宜的秋浇模式有利于保证作物正常生长和节省引黄灌溉水量。【方法】基于已构建并率定验证后的分布式 SWAP-WOFOST 模型, 在灌区尺度上模拟分析 2000—2010 年春小麦适宜的秋浇模式。【结果】以提高春小麦水分生产力(WP)为目标所得到的推荐秋浇模式, 灌区 5 个旗县区的秋浇定额均较基本情景有所减少, 且秋浇的时间均建议提前至每年的 9 月 30 日。灌区春小麦的多年平均产量较基本情景增大 6.47%, 多年平均 WP 提高约 6.32%。【结论】基于数值模拟所得到的灌区春小麦种植条件下相对适宜的秋浇模式为内蒙古河套灌区维持粮油生产稳定的同时进一步节省灌溉水资源提供了一定参考。

关 键 词: 河套灌区; 秋浇模式; 水分生产力; 春小麦; 分布式 SWAP-WOFOST 模型

中图分类号: TV213.4; S271

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2020139

薛静, 陈军锋, 郑秀清, 等. 河套灌区春小麦适宜秋浇模式的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 136-144.

XUE Jing, CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, et al. Simulation of Proper Autumn Irrigation Modes for Spring Wheat in Hetao Irrigation District [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 136-144.

0 引 言

【研究意义】秋浇是河套灌区在特定的自然气候条件下, 每年秋季在作物非生育期进行的一次较大规模灌溉^[1], 其目的在于淋洗田间盐分和调整土壤墒情, 为来年春播创造良好的土壤水盐条件^[2-3]。然而, 灌区秋浇存在灌水定额过大、水利用效率低的问题, 不仅造成水资源浪费, 而且还会造成土壤潮塌返浆, 导致土壤表层积盐^[4], 不适宜的秋浇时间和水量或许还会加剧土壤次生盐渍化并危害作物生长^[5]。春小麦是河套灌区主要的粮食作物^[6], 尽管近年来受市场的影响, 种植面积剧减, 探讨春小麦种植条件下, 相对适宜的秋浇模式对保证灌区粮油生产稳定和节水仍具有重要意义。【研究进展】已有学者在灌区某一试验点围绕不同秋浇条件下土壤剖面的水盐分布情况开展了相应研究^[7], 或依据相应的地下水埋深和水质的变化来反映秋浇对地下水环境的综合影响^[8]。同时, 针对灌区适宜的秋浇模式, 研究者们也分别从灌溉时间、秋浇定额、盐分淋洗、节水覆膜等方面进行了积极的讨论^[9]。以上研究结果均为灌区制定科学合理的秋浇模式奠定了基础。然而, 传统的田间试验方

法需耗费大量人力物力, 利用模型开展相应研究已成为一种有效的途径, 其中 SHAW 模型已被用于分析河套灌区沙壕渠试验站相对适宜的秋浇模式^[10]。【切入点】灌区秋浇的效果在一定程度上受气象条件、土壤类型、作物种类、土壤盐碱化程度和灌溉排水条件的影响, 不同地区适宜的秋浇制度有所差异, 农田尺度分析得到的结论并不能代表整个区域, 因此, 探讨区域尺度上灌区因地制宜的秋浇模式, 才能为灌区制定科学合理的秋浇制度提供一定的参考。农业水文模型 (Soil-Water-Atmosphere-Plant, SWAP 和 WOFOST) 结合田间试验和地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 技术及遥感数据, 采用分布式模式可有效地实现对区域水资源管理的定量评价^[11-12]。【拟解决的关键问题】本研究运用该农业水文模型及 GIS 技术, 在河套灌区尺度模拟分析春小麦种植条件下, 不同秋浇模式对作物水分生产力 (Water Productivity, WP) 的影响, 进而探讨灌区春小麦种植条件下相对适宜的秋浇模式, 从而进一步为灌区水土资源的合理利用提供定量化的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区是我国 3 个特大型灌区之一, 为黄河冲积平原, 地势平坦、耕作性良好、自然坡度为 1/8 000~1/5 000、地面高程为 1 018~1 050 m, 且光能

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51909183); 中国博士后科学基金项目 (2017M620098)

作者简介: 薛静 (1986-), 女, 山西太原人。副教授, 博士, 主要从事土壤水文学和区域水土资源的模拟与评价研究。E-mail: xuejing051@126.com

资源丰富, 适宜于农业生产^[13]。灌区属于温带大陆性干旱-半干旱气候区, 降水稀少且蒸发强烈, 是一个典型的没有灌溉就没有农业的地区。多年来灌区农业生产依赖黄河水实现灌溉, 由于工程配套差和粗放管理, 灌区的灌溉方式主要以地面渠灌为主且大部分依旧是采用大水漫灌, 目前仍存在用水定额过大、用水效率低的问题。灌区土壤封冻期长达 180 d, 冻结厚度为 1.1 m^[14]。

1.2 分布式 SWAP-WOFOST 模型构建

以分布式应用 SWAP-WOFOST 模型对河套灌区的模拟研究需要划分均匀的模拟单元, 每个模拟单元是由气象-土壤-土地利用-作物-灌溉排水-地下水埋深等信息叠加而成。利用模型对形成的各个组合分别进行模拟, 并将模拟结果通过 GIS 技术^[14]在区域上展示, 从而实现区域尺度的分布式模拟^[15]。具体对每种主要作物生长条件下的耕地, 有 135 个土壤水分运动参数分区、2 个气象要素分区、5 个作物生长参数分区、5 个灌溉制度分区、2 个土壤盐分运移参数分区、5 个土壤剖面初始水压力头分区和 2 个土壤剖面初始盐分浓度分区及 5 个地下水矿化度分区, 共形成 165 个分布式模拟分析单元。分别对模型中土壤水力学参数、盐分运移参数、作物生长参数进行了率定和区域尺度的验证。模拟研究中所利用的主要数据详见文献[6]。本研究选取 2000—2010 年为模拟情景分析阶段, 此阶段多年平均降水量处于灌区平水年的水平, 因此, 模拟研究结果代表灌区平水年的一般水平。

1.3 模拟情景设置

本模拟研究基于王康^[13]所给定的灌区现状灌溉制度, 设定春小麦生育期均采用现状灌溉制度。兼顾考虑灌区秋收时间(9 月 20 日以后)和灌区土壤上冻时间(11 月 15 日左右), 模拟中将秋浇时间分别设定为: 9 月 30 日、10 月 16 日和 11 月 1 日。秋浇水量则结合王康^[13]所给出的灌区一般秋浇定额(150 mm)和前人在灌区试验站开展研究所得到的适宜秋浇定额(150 mm), 在此基础上尝试进一步减少秋浇定额以实现节省灌区秋浇灌水量的目标, 具体设定秋浇水量分别为: 90、120 和 150 mm。将不同的秋浇时间和水量交叉组合, 共形成 9 种不同的秋浇模拟情景(表 1)。

在河套灌区 5 个旗县区, 利用已构建的分布式 SWAP-WOFOST 模型, 在不同秋浇模式下, 对 2000—2010 年春小麦单一种植条件下作物水分生产力的时空分布进行了模拟分析。通过分析不同秋浇时间和水量组合下灌区作物的 WP, 以提高春小麦 WP 为目标, 初步探讨灌区各旗县区春小麦种植条件下相对适宜

的秋浇模式。研究中假设 2000—2010 年间秋浇模式均保持不变, 秋浇所用灌溉水源均为引黄水, 其矿化度由所收集的年动态数据逐年确定。

表 1 2000—2010 年不同秋浇模拟情景设置

模拟情景设置 Simulation scenarios setting	秋浇日期 Autumn irrigation date	秋浇灌水量/mm Autumn irrigation amount
基本情景 Basic scenario	10 月 16 日	150
情景一 Scenario 1	10 月 16 日	120
情景二 Scenario 2	10 月 16 日	90
情景三 Scenario 3	9 月 30 日	150
情景四 Scenario 4	9 月 30 日	120
情景五 Scenario 5	9 月 30 日	90
情景六 Scenario 6	11 月 1 日	150
情景七 Scenario 7	11 月 1 日	120
情景八 Scenario 8	11 月 1 日	90

2 结果与分析

2.1 不同秋浇模式下春小麦水分生产力

2.1.1 时间尺度分析

河套灌区不同秋浇模式下 2000—2010 年春小麦的 WP 表现出一定的差异(图 1)。2004 年各秋浇模式下春小麦的 WP 均处于较高水平, 平均值达到 1.47 kg/m³, 而 2010 年则均处于相对较低的水平, 平均值仅为 0.80 kg/m³。根据灌区年降水量差异可知, 降水量相对较低的年份内, 不同秋浇模式下春小麦的 WP 基本保持在 1.11~1.33 kg/m³; 降水量相对较高的年份内, 春小麦的 WP 则基本保持在 1.20~1.37 kg/m³(图 1)。整体而言, 不同秋浇模式下 2000—2010 年春小麦的多年平均 WP 保持在 1.21~1.28 kg/m³, 当采用 9 月 30 日灌水 90 mm 的秋浇模式下, 春小麦的多年平均 WP 达到最大, 而采用 11 月 1 日灌水 150 mm 的秋浇模式, 春小麦的多年平均 WP 则最小。

通过比较灌区逐年各秋浇模式下春小麦的 WP 可知, 在模拟时段内 2005 年和 2007 年, 采用 9 月 30 日灌水 120 mm 的秋浇模式春小麦的 WP 最高, 相比基本情景春小麦的平均 WP 分别提高了约 2.33%和 4.32%; 2008 年和 2009 采用 9 月 30 日灌水 150 mm 的秋浇模式下春小麦的 WP 最高, 相比基本情景春小麦的平均 WP 分别提高了约 1.91%和 2.07%; 其余年份则均采用 9 月 30 日灌水 90 mm 的秋浇模式春小麦的 WP 相对最高, 相比基本情景春小麦的平均 WP 分别提高了约 3.14%~10.07%(表 2)。综上所述, 在 2000—2010 年间, 以提高春小麦 WP 为目标, 河套灌区逐年所推荐的秋浇模式如表 4 所示。其中 9 月 30

日灌水 90 mm 的秋浇模式在多数年份中均表现理想, 年) 则在提早秋浇的同时保持灌水量为 120~150 mm 对于降水量相对较少的年份(2005、2007 年和 2009 年) 较为适宜。

表 2 不同秋浇模式下春小麦平均 WP 的变幅

Table 2 Differences in spring wheat WP between the different autumn irrigation

年份 Year	情景一 Scenario 1	情景二 Scenario 2	情景三 Scenario 3	情景四 Scenario 4	情景五 Scenario 5	情景六 Scenario 6	情景七 Scenario 7	情景八 Scenario 8
2000	3.66	5.04	3.75	5.56	8.89	-2.59	1.46	6.09
2001	2.03	2.15	2.40	2.79	3.14	0.15	1.19	2.31
2002	2.61	3.06	3.74	4.65	6.13	-2.00	0.54	3.42
2003	3.19	3.97	5.08	6.53	9.13	-4.17	-0.11	4.54
2004	2.67	2.04	3.63	2.68	4.11	-0.26	1.24	2.34
2005	1.54	0.91	1.71	2.33	1.30	1.57	1.41	1.09
2006	5.70	5.43	3.51	8.25	10.07	-2.46	3.98	8.35
2007	2.83	1.50	3.82	4.32	3.99	-1.13	0.80	1.57
2008	1.48	0.18	1.91	1.75	0.43	1.08	1.17	-0.06
2009	1.82	0.52	2.07	2.01	0.75	1.16	1.65	0.40
2010	6.30	3.21	4.43	7.33	9.67	-3.81	4.04	6.68
平均值	2.91	2.45	3.23	4.18	4.95	-0.99	1.46	3.10

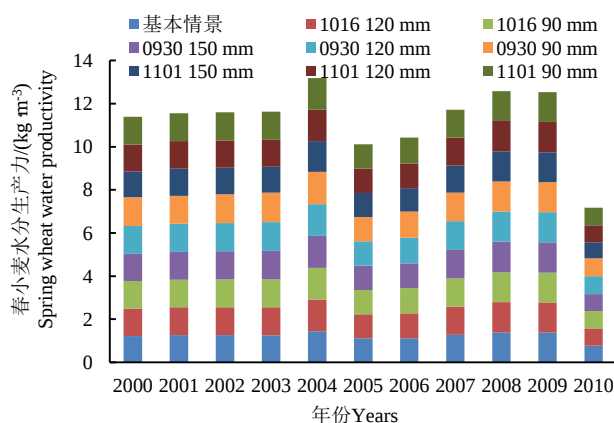
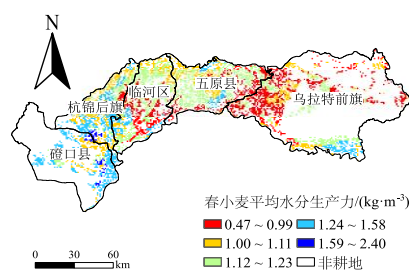


图 1 不同秋浇模式下春小麦的平均 WP

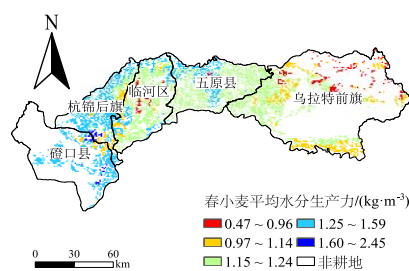
Fig. 1 Average spring wheat WP under different autumn irrigation modes

2.1.2 空间尺度分析

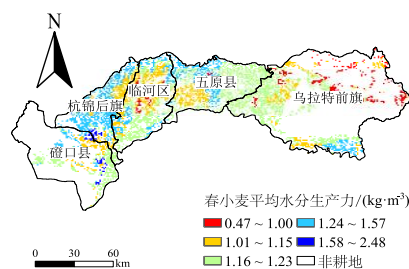
河套灌区不同秋浇模式下春小麦的 WP 表现出一定的空间变异性, 具体分析可知, 不同秋浇模式下春小麦 WP 较高的地区主要集中在磴口县、杭锦后旗、临河区南部和五原县东部的大部分耕地, WP 较低的地区则主要分布在临河区中部、五原县南部和乌拉特前旗的部分耕地(图 2)。对于灌区大部分耕地面积而言, 采用每年 9 月 30 日灌水 90 mm 的秋浇模式, 春小麦的 WP 相对较为理想。在磴口县和杭锦后旗的大部分耕地上采用每年 11 月 1 日灌水 120 mm 的秋浇模式, 春小麦的 WP 相对较高(图 2)。



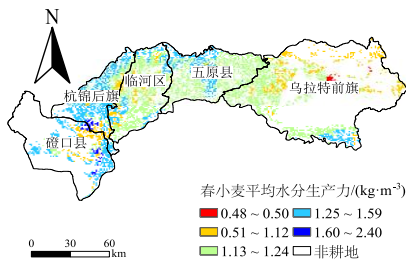
(a) 基本情景



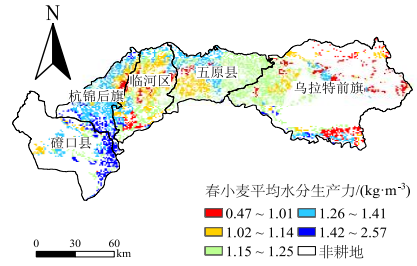
(b) 10月16日, 120 mm



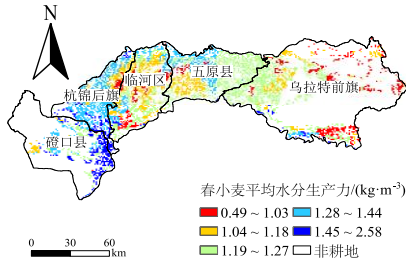
(c) 10月16日, 90 mm



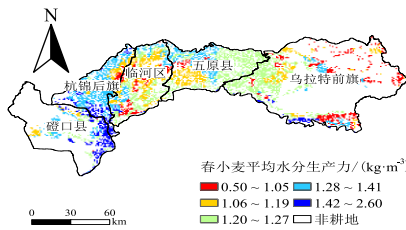
(d) 9月30日, 150 mm



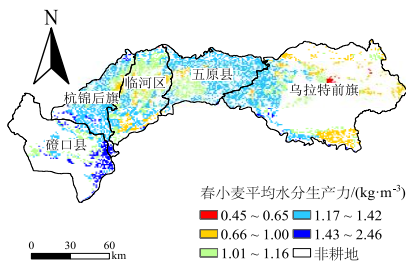
(i) 11月1日, 90 mm



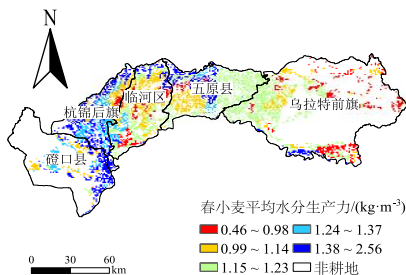
(e) 9月30日, 120 mm



(f) 9月30日, 90 mm



(g) 11月1日, 150 mm



(h) 11月1日, 120 mm

图2 不同秋浇模式下春小麦平均 WP 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of spring wheat WP under different autumn irrigation modes

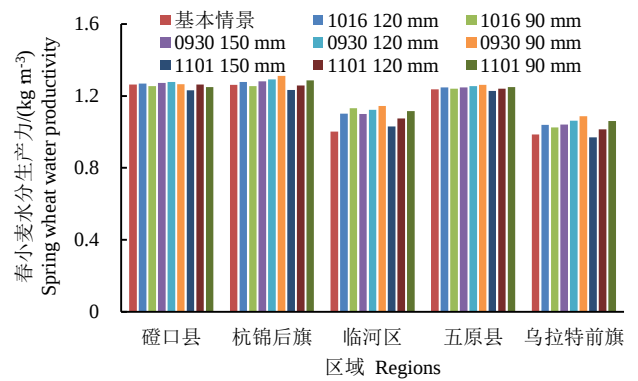


图3 河套灌区不同秋浇模式下春小麦的平均 WP

Fig. 3 Annual average spring wheat WP under different autumn irrigation modes in the Hetao Irrigation District

基于分布式模拟结果,将河套灌区5个旗县区各自的耕地分别进行统计汇总,通过比较各旗县区不同秋浇模式下春小麦的 WP,以春小麦 WP 最高为选择依据,进而确定了春小麦种植条件下各旗县区相对适宜的秋浇模式。结果表明,基本情景下河套灌区春小麦多年平均 WP 约为 1.15 kg/m^3 ,其中杭锦后旗各秋浇模式下春小麦的 WP 均相对较高,基本保持在 $1.23\sim 1.31 \text{ kg/m}^3$,而乌拉特前旗各秋浇模式下春小麦的 WP 则相对较低,基本保持在 $0.97\sim 1.09 \text{ kg/m}^3$ (图3)。灌区除磴口县外,其余各旗县区采用9月30日灌水90 mm的秋浇模式,春小麦的 WP 均处于较高水平,最高达到 1.31 kg/m^3 ,而磴口县则采用9月30日灌水120 mm的秋浇模式相对较为适宜(表4)。相比基本情景,采用9月30日灌水90 mm的秋浇模式,杭锦后旗、临河区、五原县和乌拉特前旗耕地上春小麦的 WP 分别提高了约3.88%、14.24%、1.91%和10.36%,而采用9月30日灌水120 mm的秋浇模式,磴口县内耕地上春小麦的 WP 则仅提高了约1.18%(表3)。整体而言,春小麦单一种植条件下,基于水分生产力优先推荐的秋浇模式中灌区5个旗县区的秋浇水量均较基本情景有所减少,同时秋浇的时间均建议提前至每年的9月30日。

表 3 河套灌区相对基本情景不同秋浇模式下春小麦平均 WP 的变幅Table 3 Differences in spring wheat WP between the different autumn irrigation and basic scenarios in the Hetao Irrigation District %

情景	磴口县 Dengkou	杭锦后旗 Hangjinhouqi	临河区 Linhe	五原县 Wuyuan	乌拉特前旗 Wulatqianqi	河套灌区 Hetao Irrigation District
情景一 Scenario1	0.42	1.24	9.83	0.77	5.42	3.54
情景二 Scenario2	-0.67	-0.56	12.87	0.31	3.97	3.18
情景三 Scenario3	0.75	1.50	9.67	0.79	5.50	3.64
情景四 Scenario4	1.18	2.35	12.09	1.35	7.74	4.94
情景五 Scenario5	0.11	3.88	14.24	1.91	10.36	6.10
情景六 Scenario6	-2.52	-2.21	2.77	-0.76	-1.62	-0.87
情景七 Scenario7	0.03	-0.27	7.16	0.20	2.94	2.01
情景八 Scenario8	-1.10	2.01	11.30	1.03	7.59	4.17

表 4 2000—2010 年河套灌区基于春小麦 WP 优先推荐的秋浇模式

mm

Table 4 The suggested autumn irrigation mode based on optimal spring wheat WP in the Hetao Irrigation District during 2000—2010

年份 Years	磴口县 Dengkou		杭锦后旗 Hangjinhouqi		临河区 Linhe		五原县 Wuyuan		乌拉特前旗 Wulateqianqi		河套灌区 Hetao Irrigation District	
	时间	定额	时间	定额	时间	定额	时间	定额	时间	定额	时间	定额
2000	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90
2001	0930	120	0930	90	0930	90	1101	150	0930	90	0930	90
2002	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90
2003	0930	90	0930	90	0930	90	1101	150	0930	90	0930	90
2004	1016	150	1016	150	0930	90	0930	120	0930	90	0930	90
2005	1101	150	0930	120	0930	120	1101	150	0930	120	0930	120
2006	0930	120	0930	120	0930	90	1101	150	0930	90	0930	90
2007	0930	150	0930	90	0930	120	0930	120	0930	120	0930	120
2008	0930	150	0930	90	0930	150	1016	90	0930	150	0930	150
2009	0930	150	1016	150	0930	150	1016	90	0930	150	0930	150
2010	1016	150	0930	90	0930	120	0930	90	0930	90	0930	90
平均	0930	120	0930	90	0930	90	0930	90	0930	90		

2.2 以提高 WP 为目标的秋浇模式选优

基于水分生产力优先的秋浇模式下，分别对 2000—2010 年灌区春小麦种植条件下作物的平均产量和 WP 的空间分布进行分析。结果表明，采用推荐的秋浇模式，河套灌区春小麦多年平均产量为 4 385 kg/hm²， WP 为 1.22 kg/m³（表 5）。春小麦产量较高的地区主要集中在磴口县、杭锦后旗、临河区南部和五原县北部，产量达到 4 461~5 912 kg/hm²，相对较低的地区主要分布在临河区中部、五原县西南部和乌拉特前旗部分地区，产量为 2 026~3 810 kg/hm²（图 4（a））。春小麦 WP 较高的地区主要集中在磴口县、杭锦后旗和五原县北部地区， WP 达到 1.27~2.40 kg/m³， WP 较低地区的分布与产量基本保持一致（图 4（b））。

相比基本情景，采用推荐的秋浇模式下河套灌区春小麦多年平均产量增大 6.47%，多年平均 WP 提高 6.32%（表 5）。除临河区中部、五原县西部和乌拉特前旗部分耕地外，灌区其余地区采用推荐的秋浇模式后春小麦的产量均有所提高，其中磴口县东南部、杭锦后旗北部、临河区北部产量的提升幅度相对较高（图 5（a））。同时，春小麦的 WP 也有所增大，增效较为明显的地区主要分布在磴口县、杭锦后旗、临河区南部、五原县东部和乌拉特前旗西部地区（图 5（b））。整体而言，灌区单一种植春小麦条件下，采用水分生产力优先推荐的秋浇模式时能够保证灌区在节省一定秋浇水量的同时作物的产量和 WP 均有所提高。

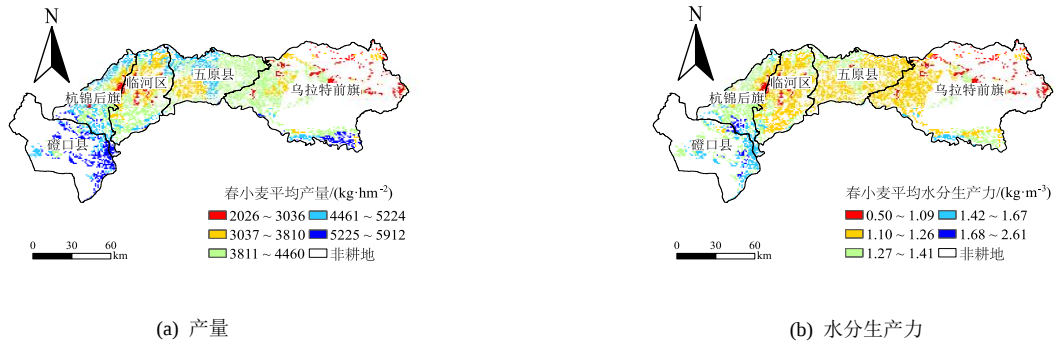


图4 河套灌区推荐秋浇模式下春小麦平均产量和 WP 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of spring wheat yield and WP under the suggested autumn irrigation modes in the Hetao Irrigation District

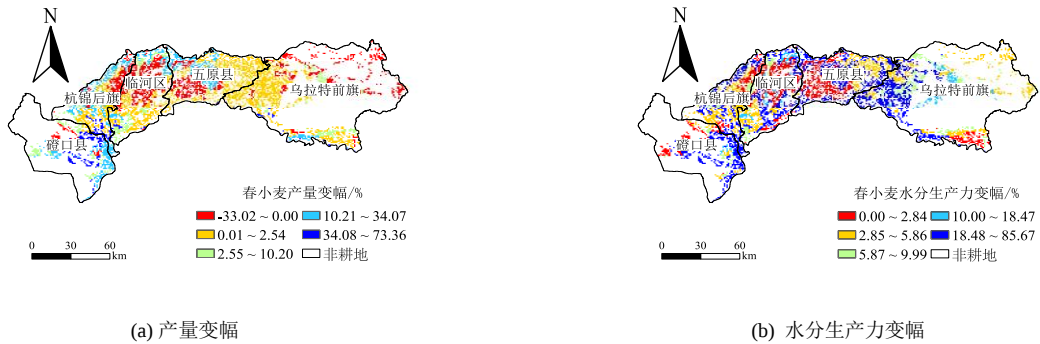


图5 河套灌区推荐秋浇模式相比基本情景春小麦产量和 WP 变幅的空间分布

Fig. 5 Change of spring wheat yield and WP under the suggested autumn irrigation modes in the Hetao Irrigation District

表5 优选秋浇模式下春小麦的平均产量和 WP

Table 5 Average yield and WP of spring wheat of optimized autumn irrigation mode

灌溉区域 Regions	推荐的秋浇模式 Suggested autumn irrigation mode		变幅 Change range	
	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	WP/ (kg·m ⁻³)	产量/% Yield	WP/%
磴口县	4 359	1.28	4.96	1.18
杭锦后旗	4 812	1.31	3.18	3.88
临河区	4 725	1.14	2.35	14.24
五原县	4 252	1.26	11.63	1.91
乌拉特前旗	3 781	1.09	10.21	10.36
河套灌区	4 385	1.22	6.47	6.32

3 讨论

3.1 不同秋浇时间对春小麦 WP 的影响

河套灌区不同秋浇模式下春小麦的 WP 表现出一定差异,当灌区秋浇水量保持 150 mm 不变时,将秋浇时间提前至 9 月 30 日,灌区 5 个旗县区春小麦的 WP 均有不同程度的提高,而将秋浇时间推后至 11 月 1 日,除临河区外,其余各旗县区春小麦 WP 均出现不同程度的降低。当秋浇水量保持 120 mm 时,相

比基本情景,不同秋浇时间下灌区 5 个旗县区春小麦的 WP 均有所提升或基本保持稳定,其中秋浇时间为 9 月 30 日时,灌区 5 个旗县区春小麦的 WP 相对最高,其次为 10 月 16 日,11 月 1 日进行秋浇时春小麦的 WP 相对最低。当秋浇水量保持 90 mm 时,相比基本情景,秋浇时间为 9 月 30 日时,灌区 5 个旗县区春小麦的 WP 均有所提高;秋浇时间为 10 月 16 日时,临河区和乌拉特前旗春小麦的 WP 有所提高,其余地区基本保持稳定;秋浇时间为 11 月 1 日时,除磴口县外,其余地区春小麦的 WP 均有不同程度的增大。

由此可见,对于春小麦而言,当设定秋浇水量分别为 150、120、90 mm 不变时,将灌区秋浇时间提前至每年 9 月 30 日在一定程度上均能够提高作物的 WP,相对较为理想。以上结果与郭素珍^[16]根据实测资料,探讨不同秋浇时间对河套灌区水盐运移和农业环境影响的结果保持一致。秋浇时间提前在一定程度上能够提高春小麦的 WP 主要是由于冻结土壤具有明显的减渗特性^[17],提早进行秋浇会延长土壤冻结前水分向下渗漏的时间,从而使得第二年春季作物根系带土壤水分相对较少,有效缓解了作物根系带土壤通气性不良,影响作物根系吸水、不利于其生长的状况。

3.2 不同秋浇水量对春小麦 WP 的影响

当灌区秋浇时间固定为每年 10 月 16 日时,减少秋浇灌水量的 20%或 40%,基本能够保证灌区春小麦的 WP 有所提高或基本稳定。这可能主要是由于适当减少秋浇灌水量后改善了第二年春季分蘖期由于渗漏量增大所导致的地下水埋深迅速变浅,进而造成根系带土壤通气性不良,影响作物根系吸水、不利于其生长的状况。

当灌区秋浇时间提前至每年 9 月 30 日,秋浇灌水量保持 150 mm 不变时,灌区各旗县区春小麦的 WP 均出现不同程度的提高,当秋浇灌水量减少 20%或 40%时,临河区和乌拉特前旗春小麦的 WP 均出现 7.74%~14.24%的增大,而其余地区则基本保持稳定。可见在提前秋浇的同时再减少灌水量,对不同土壤质地表现出不同的效果。这主要是由于土壤冻结对重质土壤入渗能力的影响要大于轻质土壤^[16],对于土壤质地相对偏砂的地区,延长土壤冻结前的水分入渗时间并减少灌水量,冻结过程对土壤减渗特性又相对弱,则可能会造成第二年作物根系带水分较少的状况,而土壤持水性较好的地区,当延长水分的下渗时间并减少秋浇灌水量后,能够更好地避免第二年作物分蘖期灌溉后根系带水分过高的问题,从而更有利于作物的生长。

当灌区秋浇时间推迟至每年的 11 月 1 日,秋浇水量保持 150 mm 不变时,除临河区外,其余各旗县区春小麦的 WP 均出现不同程度的降低,当秋浇灌水量减少 20%或 40%时,临河区和乌拉特前旗春小麦的 WP 均出现 2.94%~11.30%的增大,而其余地区则基本保持稳定。这可能是由于仅推迟秋浇时间,会缩短土壤冻结前水分下渗的时间,使得第二年春季作物根系带土壤水分相对较高。然而,在推迟秋浇时间的同时减少秋浇水量则可以在一定程度上缓解这一问题,尤其是土壤容水量相对较高的地区表现出的优势更为明显。

整体而言,通过在区域尺度尝试对不同秋浇模式下春小麦的 WP 进行模拟评价,进而给出灌区 5 个旗县区以提高作物 WP 为目标的相对适宜的秋浇模式,从而为灌区秋浇制度的调整 and 实现区域节水增效战略目标提供了一定的理论参考。

4 结 论

1) 河套灌区 2000—2010 年春小麦单一种植条件下,调整秋浇定额和时间对不同旗县区作物的水分生产力均有一定程度的影响。

2) 以提高春小麦的 WP 为目标,得到灌区相对适宜的秋浇模式:磴口县推荐采用每年 9 月 30 日,

灌水 120 mm 的秋浇模式;其余旗县区均推荐采用每年 9 月 30 日,灌水 90 mm 的秋浇模式。在该推荐的秋浇模式下,灌区 5 个旗县区的秋浇灌定额均较基本情景有所减少,且秋浇的时间均提前至每年的 9 月 30 日。

3) 在推荐秋浇模式下灌区春小麦的多年平均产量较基本情景增大约 6.47%,多年平均 WP 提高约 6.32%。整体而言,采用水分生产力优先推荐的秋浇模式能够保证灌区在节省一定的秋浇水量的同时春小麦的产量和 WP 均有所提高。

致谢:感谢中国农业大学任理教授对本工作的指导。感谢内蒙古农业大学屈忠义教授,巴彦淖尔市水利科学研究所的张义强、夏玉红和范泽华高级工程师,武汉大学王修贵、王康和伍靖伟教授,中国农业科学院姚艳敏副研究员,西北农林科技大学王玉宝副教授对本工作的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 刘媛超. 内蒙古河套灌区秋浇灌水作用及秋浇节水潜力浅析[J]. 内蒙古水利, 2017(5): 51-52.
LIU Y C. Analysis on the effect of autumn irrigation water and its water-saving potential in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2017, (5): 51-52
- [2] LI R P, SHI H B, FLERCHINGER G N, et al. Modeling the effect of antecedent soil water storage on water and heat status in seasonally freezing and thawing agricultural soils[J]. Geoderma, 2013, 206: 70-74.
- [3] 彭振阳, 伍靖伟, 黄介生. 内蒙古河套灌区局部秋浇条件下农田水盐运动特征分析[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 110-118.
PENG Zhenyang, WU Jingwei, HUANG Jiesheng. Water and salt movement under partial irrigation in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 110-118.
- [4] 孟春红, 杨金忠. 河套灌区秋浇定额合理优选的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(5): 23-25.
MENG Chunhong, YANG Jinzhong. Experimental research on the rational selection of autumn irrigation norm in Hetao irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(5): 23-25.
- [5] 倪东宁, 李瑞平, 史海滨, 等. 秋灌对冻融期土壤水盐热时空变化规律影响及灌水效果评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 141-145.
NI Dongning, LI Ruiping, SHI Haibin, et al. Temporal and spatial variation of soil water-salt-heat during freezing and thawing period and the irrigation effect under the autumn irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 141-145.
- [6] 薛静, 任理. 提高小麦单产的田间排水暗管规格模拟[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 1-9.
XUE Jing, REN Li. Simulation of drainage design parameters for

- improving wheat yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(5): 1-9.
- [7] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 77-81.
- PENG Zhenyang, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Salt movement of seasonal freezing-thawing soil under autumn irrigation condition[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6): 77-81.
- [8] 刘显泽, 岳卫峰, 倪宝锋, 等. 秋浇对内蒙古义长灌域地下水动态的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 380-386.
- LIU Xianze, YUE Weifeng, NI Baofeng, et al. Impact of autumn irrigation on groundwater dynamics in Yichang Irrigation Sub-district, Inner Mongolia[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(3): 380-386.
- [9] 罗玉丽, 姜秀芳, 曹惠提, 等. 内蒙古引黄灌区适宜秋浇定额研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(3): 131-134.
- LUO Yuli, JIANG Xiufang, CAO Huiti, et al. Research on the suitable autumnal irrigation quota in Yellow River irrigation areas of Inner Mongolia[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(3): 131-134.
- [10] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 31-36.
- LI Ruiping, SHI Haibin, Takeo Akai, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(2): 31-36.
- [11] XUE J, REN L. Evaluation of crop water productivity under sprinkler irrigation regime using a distributed agro-hydrological model in an irrigation district of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 350-365.
- [12] XUE J, REN L. Assessing water productivity in the Hetao Irrigation District in Inner Mongolia by an agro-hydrological model[J]. *Irrigation Science*, 2017, 35(4): 357-382.
- [13] 王康. 灌区水均衡演算与农田面源污染模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- WANG Kang. *Water equilibrium calculus and field area source pollution simulation of irrigation district*[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [14] 左宪禹, 商东东, 葛强, 等. 基于五层十五级影像组织模型的 GIS 系统设计[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 102-110.
- ZUO Xianyu, SHANG Dongdong, GE Qiang, et al. Design of GIS system based on five-layer fifteen-level image organization model[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(6): 102-110.
- [15] 任理, 薛静. 内蒙古河套灌区主要作物水分生产力模拟及种植结构区划[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- REN Li, XUE Jing. *Simulation of water productivity and crop planting structure in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2017.
- [16] 郭素珍. 内蒙古河套灌区秋浇时间对水盐运移和农业环境的影响[J]. *中国农业大学学报*, 1997, 2(S1): 147-150.
- GUO Suzhen. Influence of autumn irrigation time upon moisture-salt movement and agricultural environment in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1997, 2(S1): 147-150.
- [17] 郑秀清, 樊贵盛, 邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- ZHENG Xiuqing, FAN Guisheng, XING Shuyan. *The movement of water in seasonal unsaturated freeze-thaw soils*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.

Simulation of Proper Autumn Irrigation Modes for Spring Wheat in Hetao Irrigation District

XUE Jing, CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, LYU Zehao, LI Xuqiang

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: 【Background】The Hetao Irrigation District (HID) is located in an arid and semi-arid region of Northwest China. It is one of the three largest irrigation districts in China, and it is an important food production area. Irrigation water accounts for almost 98% of total water consumption in the HID, which is a typical area where there would be no agricultural production without irrigation because of the low precipitation levels. The Yellow River is the main source of irrigation water for the HID, and supplied 97% of irrigation water to the HID before 2000. Long-term excessive water diversion is because of poor management of the field irrigation and water conveyance. However, with rapid economic development and growing demands for water, the amount of water in the Yellow River Basin has sharply decreased, which has led to decreased allocations of water for agriculture. To attempt to match the water demand to the reduced water supply in the Yellow River Basin, the annual amount of irrigation water from the

Yellow River will be reduced from $5.581 \times 10^9 \text{ m}^3$ to $4.369 \times 10^9 \text{ m}^3$ for the HID in the future, according to the irrigation management proposal from the Chinese Ministry of Water Resource. To maintain sustainable agriculture, it is important to improve crop water productivity (WP) when there is a limited water resource. The WP is an important indicator for evaluating water-saving irrigation practices in arid and semi-arid regions, because it reflects the relationship between water and production. Autumn irrigation is important for sustainable development of agriculture in the HID. The autumn irrigation area accounts for more than 75% of the cultivated land area in the HID, and the amount of autumn irrigation water is about $1.73 \times 10^9 \text{ m}^3$, accounting for about one third of the annual irrigation water consumption. Its purpose is to leach the soil salt and adjust the soil moisture in order to create a good soil water and salt conditions for the next spring sowing. However, the problems of excessive irrigation and low water utilization efficiency still exist, which not only cause the waste of water resources, but also cause the soil tidal collapse and backwash, and promote the accumulation of salt on the soil surface. **【Objective】** Therefore, it is significant to ensure crop growth and saved irrigation amount from Yellow River by adjusting autumn irrigation mode to local conditions at the regional scale. **【Method】** In this study, a distributed SWAP-WOFOST model was used to simulate the proper autumn irrigation modes for spring wheat in the HID during 2000—2010. **【Result】** The results showed: in order to improve spring wheat water productivity (WP), autumn irrigation modes were recommended. The autumn irrigation amounts were reduced compared with the basic scenario in Hangjinhouqi (HH), Linhe district (LH) and Wulateqianqi (WQQ). Meanwhile, except for LH, the autumn irrigation time in other areas were advanced to September 30th every year. The annual average yield of spring wheat was about 6.47% higher than the basic scenario, and the annual average WP was improved about 6.32%. **【Conclusion】** The numerical simulation analysis would provide a certain reference for adjusting autumn irrigation modes to local conditions at the regional scale.

Key words: Hetao Irrigation District; autumn irrigation modes; water productivity; spring wheat; distributed SWAP-WOFOST model

责任编辑：赵宇龙

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部