

井渠轮灌条件下永济灌域地下水环境的变化研究

王丽丽^{1,2}, 丁雪华^{1*}, 韩天凯³, 袁宏颖¹

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区水利事业发展中心, 呼和浩特 010020; 3.巴彦淖尔市水利科学研究所, 内蒙古 巴彦淖尔 015100)

摘要:【目的】探索推广使用地表水-地下水-地表水(QJQ)灌溉模式对河套灌区井渠双灌区农田地下水环境的影响。【方法】在2018—2019年对河套灌区永济灌域井渠双灌区开展区域监测,通过监测布置在灌域内的13眼观测井的地下水埋深、全盐量、总氮和总磷,研究其空间分布规律,分析区域地下水环境的变化。【结果】使用QJQ灌溉模式灌域地下水水平平均埋深减小0.15 m,平均变幅增加0.26 m,变异系数增加1.13%,对上游段地下水埋深影响最为明显;灌域高全盐量地下水区域面积减小,上游东南部和下流西北部地下水全盐量明显下降,全盐量由500~5 000 mg/L波动降低至500~3 500 mg/L;地下水中氮磷养分小幅下降,总氮量大于2 mg/L面积明显减少,平均减少了14.38%,地下水中总氮量在1~2 mg/L之间变化;总磷量小于0.09 mg/L的面积平均增加了29.04%,大于0.13 mg/L的面积平均减小了15.58%。【结论】通过推广QJQ的轮灌制度,增强了灌区地下水的利用效率,也增强了地下水的循环,改善了地下水水质,对减缓水资源短缺有积极作用。

关键词: 井渠轮灌; 地下水环境; 空间分布

中图分类号: S27.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023036

OSID: 

王丽丽, 丁雪华, 韩天凯, 等. 井渠轮灌条件下永济灌域地下水环境的变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 91-97.
WANG Lili, DING Xuehua, HAN Tiankai, et al. Assessing Groundwater Environment Changes in the Yongji Irrigation District under Rotational Well-canal Irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 91-97.

0 引言

【研究意义】随着社会的发展,水资源短缺和用水矛盾已严重影响了区域经济的可持续发展^[1],在干旱半干旱地区尤为明显,在全球地表水资源量下降的大趋势下^[2],人类活动所造成的水资源再分配,对流域水循环产生了严峻的影响^[3-4]。进入21世纪后,我国北方黄河、海河、辽河等地的地表水资源量明显减少^[5-6],人类活动、工业活动和其他社会经济活动改变了流域下垫面是导致北方河川径流减少的主要原因^[7]。而流域的“自然-社会”二元水循环理论,为解决流域水资源问题提供了方向^[8-9]。通过综合水资源的经济价值、社会价值和生态价值,引入合适的多目标决策,以及合理分配农业、工业、生活、生态之间的配水量,从而达到优化区域水资源配置的目的^[10-11]。

黄河流域水资源有限,黄河用水量占全河用水量的92%^[12]。河套灌区是黄河流域最大的一首制灌区,随着水资源日益紧缺,农业灌溉用水与生活、工业用水矛盾愈加凸显,严重制约着灌区农业的可持续发展^[13-14]。

【研究进展】地下水是水资源的重要组成部分^[15],灌

区地下微咸水较为丰富,有研究^[16-17]显示,淡水(黄河水)与微咸水(地下水)的联合灌溉模式,是缓解水资源紧缺的重要手段之一。井渠2种水源联合灌溉可以有效节约地表水资源,合适比例的井渠灌溉技术^[14,18]能够更好地保护生态平衡。有研究指出,采用井渠结合灌溉的区域应合理分配采补平衡及水资源的调度^[19],井灌结合渠灌可以充分利用地表水和地下水,又可以控制地下水位的下降^[20]。井灌结合渠灌能减少引黄水量,降低地下水超采和土壤盐碱化风险^[21-23]。【切入点】然而,目前区域尺度上井渠结合灌溉对地下水环境影响的研究相对较少。【拟解决的关键问题】因此,本文以永济灌域井渠双灌区为例,在区域尺度上揭示井渠轮灌模式对地下水埋深和水质的影响,为区域地下水开发利用和保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

永济灌域是内蒙古河套灌区灌域之一,地处东经107°13'—107°42',北纬40°36'—41°13',南与黄河岸相邻,北与乌拉山脚接壤,主要依靠黄河由南向北自流灌溉,灌域以西为解放闸灌域,以东为义长灌域,灌溉总面积约11.60×10⁵ hm²,灌域土壤类型主要为灌淤土。区域属温带大陆性干旱、半干旱气候,年均气温6.9℃,年均降水量144.95 mm,年均蒸发量2 272.1

收稿日期: 2023-02-05 修回日期: 2023-06-12 网络出版日期: 2023-10-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(52069023, 52179037)

作者简介: 王丽丽(1995-),女(蒙古),内蒙古兴安盟人。硕士研究生,主要从事农田水土环境方面的研究。E-mail: 2992519373@qq.com

通信作者: 丁雪华(1963-),男,内蒙古呼和浩特人。教授,主要从事节水灌溉研究。E-mail: nmnddxh@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

mm, 年际蒸发量变化较为稳定, 而年内蒸发量则呈季节性变化。光、热、水同期, 无霜期 130 d 左右, 该灌域以农业为主, 属轻中度盐碱地, 主要种植玉米、向日葵。地下水主要由引黄灌溉补给, 其次为降水入渗补给。地下水埋深在生育期内为 1.5~2 m, 非生育期内为 1.3~2 m, 呈冻融期和秋浇期逐渐变小, 夏灌期和封冻期逐渐增加的季节性变化趋势。

井渠双灌区位于永济灌域的中部及南部地区, 面积约 $8.38 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 农户的灌溉管理模式较为混乱, 主要灌溉方式有渠水灌溉、井水灌溉、渠水井水混合灌溉, 一水主要是渠水灌溉, 之后的灌水方式和灌水轮次均不固定。

1.2 试验设计

在永济灌域井渠双灌区采用潘春洋等^[14]提出的渠井渠 (QJQ) 灌溉模式。该灌溉模式为: 播种前采用地表水灌溉, 一水至三水采用 QJQ 灌溉模式。参照河套灌区节水灌溉制度研究成果, 灌水定额设为 90 mm, 灌水总量为 270 mm, 秋浇定额为 150 mm。施用肥料采用尿素 (46%N) 和磷酸二铵 (18%N, 46%P₂O₅), 其中氮肥施用量为 225 kg/hm², 磷肥施用量为 235 kg/hm²。观测时段为 2018—2019 年, 其中 2018 年未采用该灌溉模式, 2019 年采用该灌溉模式。将 2018 年作为对照, 分析使用 QJQ 灌溉模式前后的地下水环境变化。在研究区内通过栅格法定位, 按照上、中、下游分区设置了 13 眼地下水观测井 (图 1), 其中 10#、11#、12#和 13#控制灌域上游段, 5#、6#、7#、8#和 9#控制灌域中游段, 1#、2#、3#和 4#控制灌域下游段。每年对观测井监测 4 次, 分别在夏灌前 (4 月)、夏灌 2 水后 (6 月)、夏灌后 (8 月) 和秋浇前 (10 月) 通过对比 2 年灌域地下水埋深及水质观测数据, 揭示 QJQ 模式对灌域地下水环境的影响。

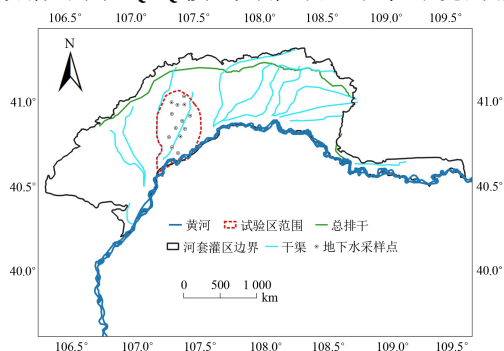


图 1 永济灌域试验区采样点位置

Fig.1 Location of sampling points in the test area

1.3 观测项目与方法

地下水埋深采用绳测法人工测定水面至井口距离, 地下水全盐量采用重量法测定, 地下水总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, 地下水总磷采用钼酸铵分光光度测定法, 地下水水质委托巴彦淖尔市水利

科学研究所检测中心检测。地下水水质观测指标有全盐量、地下水总氮和总磷。利用 Microsoft Excel 2007 对试验数据进行处理, 采用 ArcGIS 10.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深变化

地下水埋深年内呈单峰状变化, 在夏灌开始后呈现上升趋势, 夏灌 2 水后 (6 月) 逐渐下降, 2 年呈现的变化趋势相似 (图 2)。2018、2019 年在作物生育期内降水量分别为 166.7、126.7 mm, 均属于平水年, 在常年土壤强烈蒸发条件下, 降水对地下水埋深的影响较小。对比 2 年变化, 夏灌前 (4 月) 使用 QJQ 灌溉模式的地下水埋深比未使用深, 经 2 轮灌溉后上升明显, 地下水埋深相近, 使用 QJQ 的灌溉模式 2 水后至秋浇前地下水埋深下降幅度放缓。研究发现夏灌前 (4 月) 地下水埋深较深, 受影响较大, 2019 年较 2018 年地下水最大埋深上游段增加 0.57 m, 中游段增加 0.26 m, 下游段增加 0.29 m, 增加幅度在 6.1%、2.92%、3.58%, 灌域整体增加了 0.37 m; 上、中、下游段变幅分别增加 0.35、0.02、0.4 m, 上、中、下游变异系数分别增加 2.83%、0.54%、1.07%。地下水波动变化增大 (表 1), 对比夏灌 2 水后 (6 月)、夏灌后 (8 月) 及秋浇前 (10 月) 地下水埋深, 使用 QJQ 灌溉模式后上、中、下地下水水平平均埋深分别减小 0.27、0.04、0.09 m, 由于使用 QJQ 灌溉模式前灌域上游段为井灌集中区, 而中、下游段地下水主要来源于北部山区降水入渗, 除此之外, 由于灌域北端总排干沟的截渗, 导致中、下游段地下水埋深较浅^[24]。因而, 使用 QJQ 灌溉模式后上游段在夏灌 2 水后 (6 月) 和夏灌后 (8 月) 导致上游段地下水埋深减小, 地下水位升高。

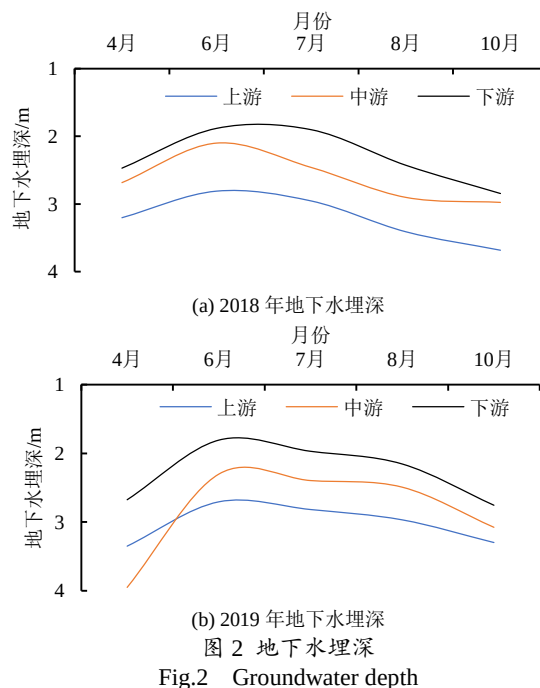


图 2 地下水埋深
Fig.2 Groundwater depth

表 1 不同年度地下水埋深

Table 1 Groundwater depth in different years

灌域	地下水平均埋深/m		最大埋深/m		最小埋深/m		变幅/m		变异系数%	
	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年
上游	3.21	3.03	4.32	4.89	1.99	2.21	2.33	2.68	10.36	13.19
中游	2.62	2.53	4.31	4.57	1.19	1.43	3.12	3.14	13.34	13.88
下游	2.45	2.27	3.91	4.20	1.32	1.21	2.59	2.99	0.19	1.26

2.2 地下水盐分时空动态

未使用 QJQ 灌溉模式前, 灌域下游西北部 and 上游东南部地区地下水全盐量较高, 夏灌 2 水后(6 月)和秋浇前(10 月)灌域呈下降趋势, 使用 QJQ 灌溉模式后灌域上游东南部和下游西北部地下水全盐量明显下降, 其余地区地下水全盐量较低, 同时有小幅下降。

不同时期地下水全盐量在 500~5 000 mg/L 所占

面积比较大, 占永济灌域井渠双灌区总面积的 90%以上。对比 2 年结果可知, 使用 QJQ 灌溉模式后, 大部分地区地下水全盐量在 500~3 500 mg/L 之间, 夏灌 2 水后(6 月)、夏灌后(8 月)和秋浇前(10 月)地下水全盐量在 500~3 500 mg/L 所占面积均有所增加, 分别较未使用前增加了 5.03%、30.39%和 2.29%, 夏灌前(4 月)下降 0.11%, 使用 QJQ 灌水模式灌域高全盐量地下水呈下降趋势(见图 3)。

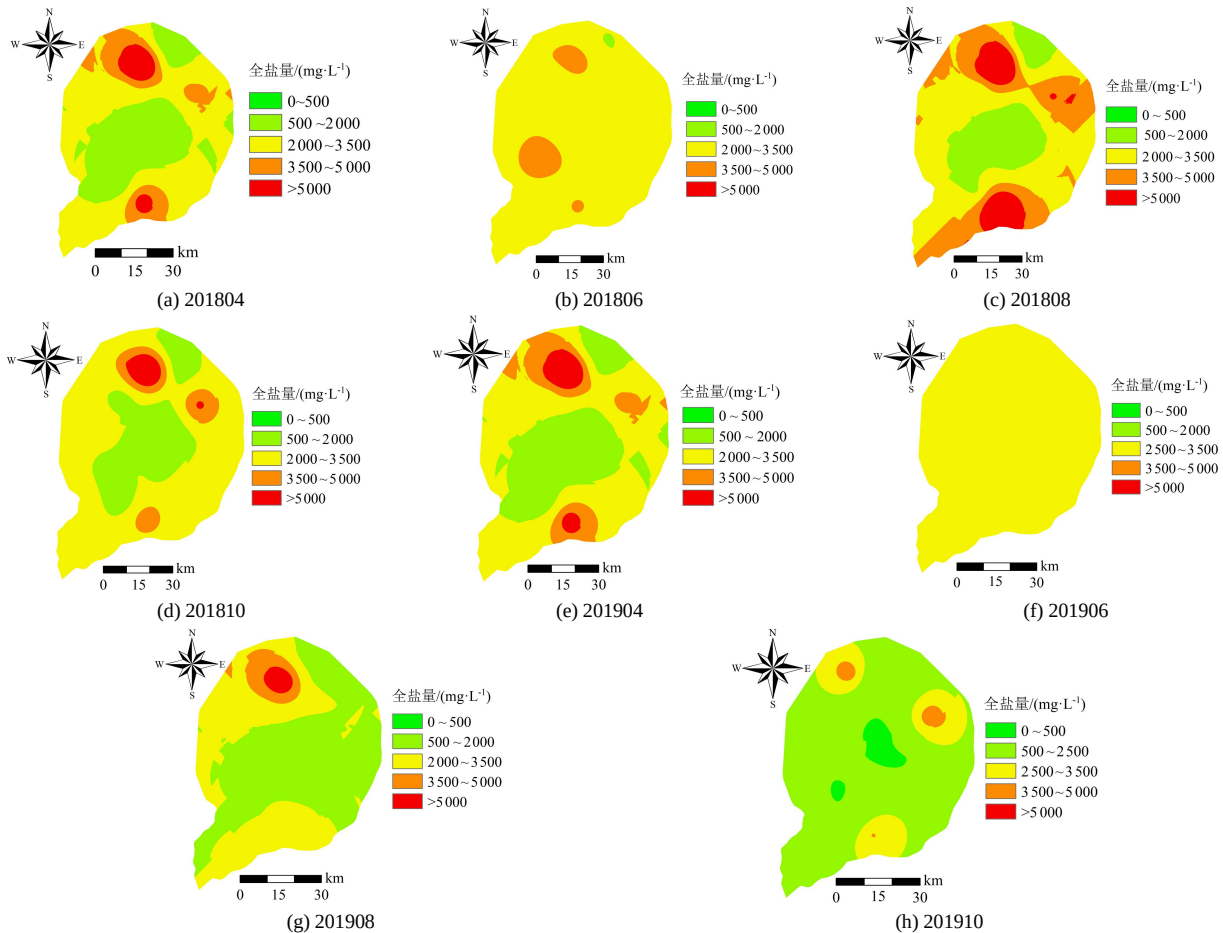


图 3 试验区地下水全盐量时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variation of total salt content in groundwater

2.3 地下水总氮时空动态

永济灌域井渠双灌区地下水总氮时空变化趋势复杂, 但秋浇前变化一致。未进行 QJQ 灌溉模式时, 夏灌前(4 月)中游及上游东南部地区地下水总氮量较高, 夏灌后(8 月)中游及下游东北部地区较高。进行 QJQ 灌溉后, 地下水总氮量整体呈下降趋势, 但夏灌 2 水后(6 月)中游地区呈上升趋势, 其原因为夏灌 2 水后正值施肥期, 土壤中的氮肥随着灌水和降水流失到地下。

未进行 QJQ 灌溉模式灌域地下水夏灌前(4 月)总氮量大于 1.5 mg/L 的面积占灌域总面积的 80%以上, 虽在夏灌 2 水后(6 月)下降明显, 但夏灌后(8 月)大幅上升, 大于 1.5 mg/L 的面积占灌域总面积又达到 60%以上。进行 QJQ 灌溉模式后, 灌域地下水中总氮量大部分维持在 1~2 mg/L 之间, 地下水中总氮量趋近于稳定(见图 4)。主要原因为施氮量相同的情况下, 引黄水量的减少, 可降低地下水氮磷污染物^[25]。

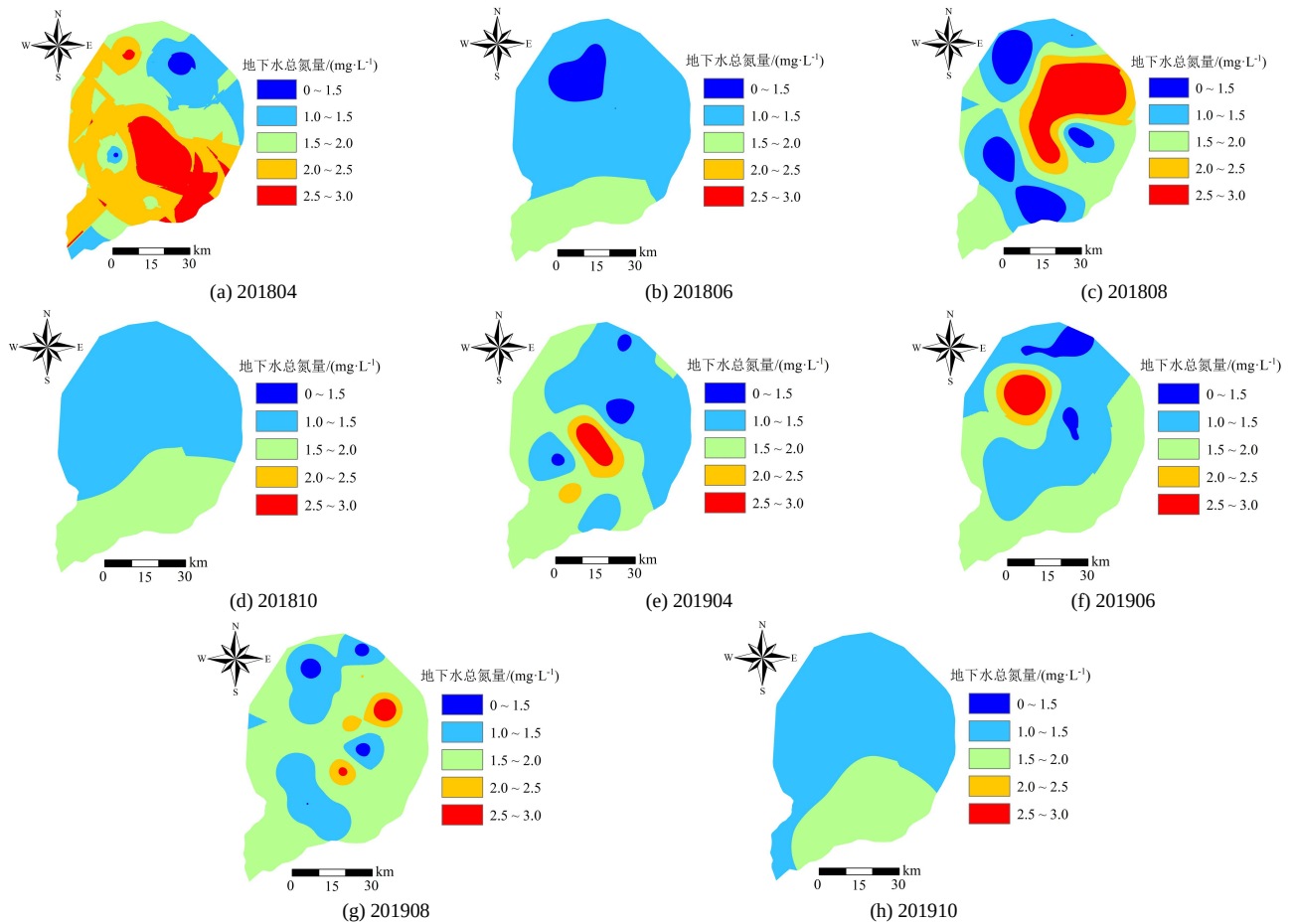


图4 试验区地下水总氮的时空变化

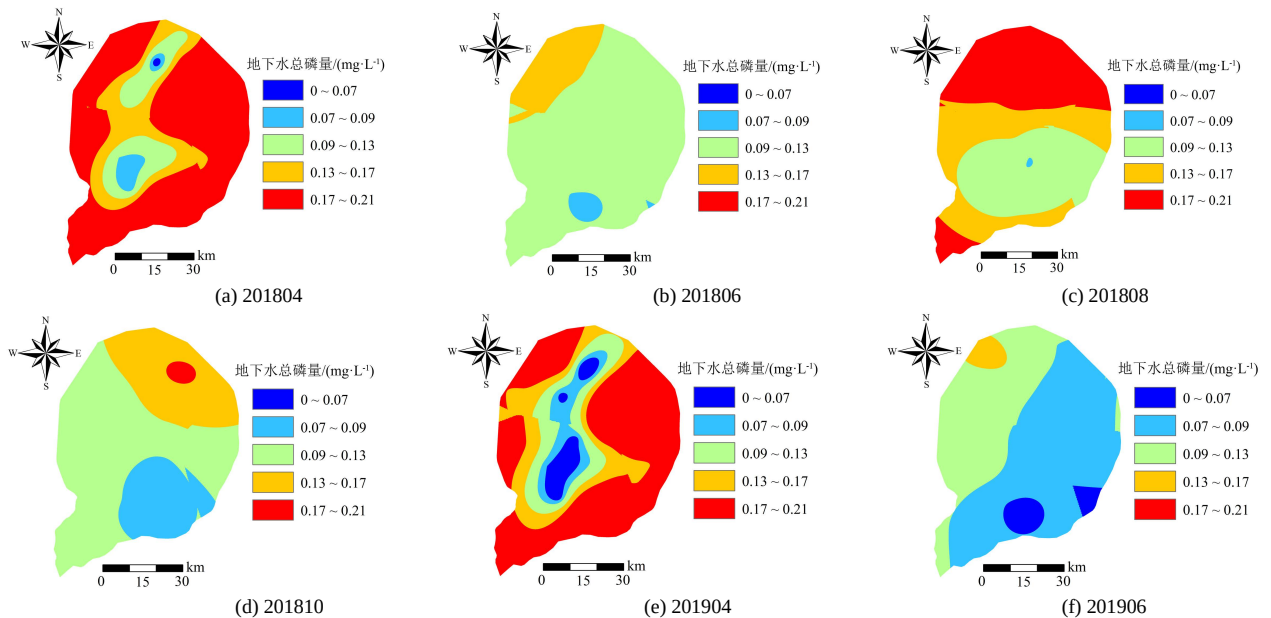
Fig.4 Temporal and spatial variation of total nitrogen in groundwater in experimental areas

2.4 地下水总磷时空动态

永济灌域井渠双灌区地下水总磷量在夏灌前（4月）灌域中游中部地区地下水总磷量较低，夏灌2水后（6月）整个灌域下降明显，因为作物处于营养生长期和生殖生长旺盛期，根系吸收磷素能力提高，夏灌后（8月）较高，秋浇前（10月）灌域下游地区再次呈现下降趋势。

对比未进行 QJQ 轮灌模式和进行 QJQ 轮灌模式

的2年，灌域地下水中总磷量除夏灌2水后（6月）中部及中北部个别地区有小幅增加外其余地区呈下降趋势。使用 QJQ 灌溉模式后，4个时期地下水中总磷量小于 0.09 mg/L 的面积占比分别增加 6.98%、55.13%、14.5%、39.54%，大于 0.21 mg/L 的面积占比分别下降了 8.52%、0%、12.13%、1.12%，使用 QJQ 灌溉模式对降低地下水中总磷量效果明显。



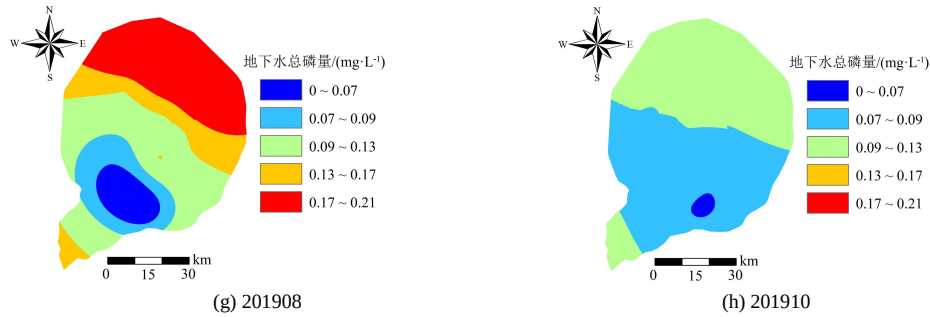


图5 试验区地下水总磷的时空变化

Fig.5 Temporal and spatial variation of total phosphorus in groundwater in experimental area

3 讨论

近年来,水资源供需矛盾是制约内蒙古河套灌区农业发展的重要因素,开采地下水资源作为补充灌溉水源是缓解这一矛盾的重要举措^[26-28],但由于河套灌区地下咸水广泛分布,地下水可利用率较低,采用井渠结合的方式进行灌溉势必会对研究区农田土壤和地下水水盐环境产生影响。本研究表明,井渠轮灌实施过程中地下水位下降 0.15 m,其主要由于使用 QJQ 灌溉模式后引黄水量减少,地下水补给量减少。地下水全盐量由 500~5 000 mg/L 降低至 500~3 500 mg/L,上游东南部 and 下游西北部地下水全盐量明显下降,其可能由于引黄水量的减少,中南部地区地下水埋深增加且幅度较大(上游段),蒸发量也呈减小趋势,使得蒸发浓缩作用对其影响减弱,部分地区地下水全盐量减小。而北部为主排干沟分布地,排水量的逐年减少导致盐分积聚在排水沟附近^[24],因此北部及东西边缘部地下水全盐量高,这与部分研究^[29-30]结果一致。合理的开采地下水资源可以减少无效蒸发,缓解农业灌溉的水资源短缺,通过井灌结合渠灌模式可以起到以井代排的作用,有利于盐碱化的防治^[30]。本研究进一步分析了区域地下水环境的变化,高效的农业灌溉措施会影响灌区水盐分布^[31-33],其中地下水埋深变化为主要影响因子。同时本研究发现井灌的应用增加了地下水埋深,减少了潜水蒸发,降低了土壤盐分与地下水的交换,非灌溉期补水不足会导致次年播前地下水埋深较低,推广使用 QJQ 的轮灌制度在生育期内地下水埋深下降幅度小于未使用前,因此,目前仍需确定合理的秋浇补水模式来保持地下水的可持续利用^[31]。

目前农田土壤氮磷流失主要通过地表径流、侵蚀、淋溶(渗漏或亚表层径流)和农田排水进入地表河流或地下水中^[34],本研究结果表明井渠轮灌实施使地下水氮磷等养分在灌溉期有小幅降低,可能受地下水埋深下降使得淋溶至地下水中的养分减弱、灌溉水稀释和井灌随水返回地表等多重影响,这与裴承忠等^[35]

研究结果一致。说明在作物生育期施肥量相同的情况下通过优化灌溉方式来控制灌溉水量可以减小地下水中氮、磷等的累积从而降低地下水环境的污染。通过推广 QJQ 的轮灌制度,既增强了灌区地下水的利用效率,也增强了地下水的循环,改善了地下水水质,对减缓水资源短缺有积极作用。但目前仍需确立地下水补给制度和确定地下水埋深阈值,以保证地下水的可持续利用,继续完善 QJQ 灌溉模式是未来需要研究的方向。

4 结论

1) QJQ 灌溉模式下,灌域地下水平均埋深减小 0.15 m,平均变幅增加 0.26 m,变异系数增加 1.13%,地下水埋深波动幅度变大,对上游段地下水埋深影响最为明显。

2) QJQ 灌溉模式下,地下水全盐量较高区域面积明显减少,灌域地下水全盐量由 500~5 000 mg/L 波动降低至 500~3 500 mg/L 波动。

3) QJQ 灌溉模式下,灌域地下水氮磷养分小幅下降,地下水总氮量在 1~2 mg/L 之间变化;总磷含量小于 0.09 mg/L 的面积占比平均增加了 29.04%,大于 0.13 mg/L 的面积占比平均减少 15.58%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 许耀文,王一涵,梁冬玲,等.基于农业可持续发展的锦西灌区灌溉水资源配置研究[J].农业机械学报,2020,51(10):299-309.
XU Yaowen, WANG Yihan, LIANG Dongling, et al. Irrigation water resources allocation in Jinxi irrigation district based on agricultural sustainability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 299-309.
- [2] 严登华,王坤,李相南,等.全球陆地地表水资源演变特征[J].水科学进展,2020,31(5):703-712.
YAN Denghua, WANG Kun, LI Xiangnan, et al. Evolution characteristics of global land surface water resources[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 703-712.
- [3] VÖRÖSMARTY C, LETTENMAIER D, LEVEQUE C, et al. Humans transforming the global water system[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2004, 85(48): 509-514.
- [4] 雷莹,江东,杨小唤,等.水资源空间分布模型及 GIS 分析应用[J].

- 地球信息科学学报, 2007, 9(5): 64-69, 127.
- LEI Ying, JIANG Dong, YANG Xiaohuan, et al. The water distribution model application based on spatial information technology[J]. Journal of Geo-information Science, 2007, 9(5): 64-69, 127.
- [5] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36.
- JIA Shaofeng, LIANG Yuan. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.
- [6] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161.
- ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, JIN Junliang, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 153-161.
- [7] 韩聪慧, 席小康, 朱永华. 气候变化和人类活动对西拉木伦河径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 134-140.
- HAN Conghui, XI Xiaokang, ZHU Yonghua. The impacts of climate change and anthropogenic activities on the runoff of Xilamulun river[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 134-140.
- [8] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1 219-1 226.
- WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1 219-1 226.
- [9] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究[J]. 水利学报, 2020, 51(1): 44-55.
- WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1): 44-55.
- [10] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1 168-1 175.
- WANG Hao, YOU Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1 168-1 175.
- [11] 董晓知, 徐立荣, 徐征和. 基于大系统分解协调法的水资源优化配置研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 82-88.
- DONG Xiaozhi, XU Lirong, XU Zhenghe. Research on the optimal allocation of water resources in Xingjiadu irrigation area based on large-scale system decomposition-coordination method[J]. Yellow River, 2021, 43(4): 82-88.
- [12] 高峰, 许建中. 我国农业水资源状况与水价理论分析[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 27-32.
- GAO Feng, XU Jianzhong. Analysis on agricultural water resources and water price theory in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 27-32.
- [13] 王旭东, 徐素宁, 武强, 等. 基于 ArcGIS 的天津市地下水环境质量评价系统[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6): 13-16.
- WANG Xudong, XU Suning, WU Qiang, et al. The development of groundwater environment quality evaluation system in Tianjin city[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 1(6): 13-16.
- [14] 潘春洋. 盐渍化农田不同水源灌溉及秸秆还田联合模式试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- PAN Chunyang. Experimental study on irrigation with different water sources and straw returned joint model in salinized farmland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [15] 赵志强, 刘燕, 陈宇. 泾惠渠灌区水资源优化配置研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 30-38.
- ZHAO Zhiqiang, LIU Yan, CHEN Yu. Optimizing allocation of water resources in Jinghuiqu irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 30-38.
- [16] 张银辉, 罗毅. 基于分布式水文学模型的内蒙古河套灌区水循环特征研究[J]. 资源科学, 2009, 31(5): 763-771.
- ZHANG Yinhui, LUO Yi. Water cycle modeling in Hetao irrigation district of Inner Mongolia based on the distributed DEHYDROS model[J]. Resources Science, 2009, 31(5): 763-771.
- [17] 潘春洋, 杨树青, 娄帅, 等. 多水源交替灌溉模式对玉米生长特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 165-171.
- PAN Chunyang, YANG Shuqing, LOU Shuai, et al. Effects of alternative irrigation with multiple water sources on growth characteristics and yield of maize[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(1): 165-171.
- [18] AWAN U K, ANWAR A, AHMAD W, et al. A methodology to estimate equity of canal water and groundwater use at different spatial and temporal scales: A geo-informatics approach[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5): 409.
- [19] 胡艳玲, 黄仲冬, 齐学斌, 等. 基于线性规划和 MODFLOW 耦合技术的人民胜利渠灌区水资源优化配置研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 85-92.
- HU Yanling, HUANG Zhongdong, QI Xuebin, et al. Study on optimal allocation of water resources in irrigation district based on linear programming and MODFLOW coupling technology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 85-92.
- [20] 宋悦. 渠井灌区地表水地下水联合利用优化配置研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- SONG Yue. Research of optimal allocation of conjunctive use of surface water and groundwater in well-canal combined irrigated district[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [21] 王璐瑶. 河套灌区地下水开发利用的渠井结合比研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- WANG Luyao. Area ratio of canal to well irrigation areas for combined use of groundwater and surface water in Hetao irrigation district[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [22] 陆阳, 王乐, 张红玲. 宁夏平罗县井渠结合灌区地下水盐运移规律研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(3): 165-170.
- LU Yang, WANG Le, ZHANG Hongling. Study on law of groundwater-salt transportation in Pingluo Well-Canal Combined Irrigation District in Ningxia[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(3): 165-170.
- [23] 刘瑞平, 朱桦, 亢明仲, 等. 大荔县地下水环境质量评价及成因浅析[J]. 西北地质, 2009, 42(2): 116-125.
- LIU Ruiping, ZHU Hua, KANG Mingzhong, et al. Assessment of water environment quality and pollution factors for Dali County[J]. Northwestern Geology, 2009, 42(2): 116-125.
- [24] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 节水改造前后永济灌域地下水环境时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 841-852.
- CUI Jiaqi, LI Xianye, SHI Haibin, et al. Temporal and spatial variation change of groundwater environment in the salinized irrigation districts under the background of water-saving reconstruction[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 841-852.
- [25] 孙玲玉, 杨树青, 李凤军, 等. 河套灌区地下水埋深与总氮浓度交互效应分析[J]. 节水灌溉, 2014(7): 42-45.
- SUN Lingyu, YANG Shuqing, LI Fengjun, et al. Analysis of interactions between groundwater depth and total nitrogen concentration in Hetao irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2014(7): 42-45.
- [26] 周维博, 李佩成. 灌溉水资源的分类与功能分析[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 62-66.
- ZHOU Weibo, LI Peicheng. Study on the classification and function of irrigation water resources[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(1): 62-66.
- [27] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.

- WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [28] 杨洋, 朱焱, 伍靖伟, 等. 河套灌区井渠结合地下水数值模拟及均衡分析[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(8): 732-737.
- YANG Yang, ZHU Yan, WU Jingwei, et al. Numerical modeling and water balance analysis of groundwater under conjunctive use of groundwater and surface water in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(8): 732-737.
- [29] 杨威, 毛威, 杨洋, 等. 基于 MODFLOW 的河套灌区井渠结合开采模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 93-101.
- YANG Wei, MAO Wei, YANG Yang, et al. Optimizing conjunctive use of groundwater and canal water in Hetao irrigation district aided by MODFLOW[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 93-101.
- [30] 崔丙健, 高峰, 胡超, 等. 非常规水资源农业利用现状及研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 60-68.
- CUI Bingjian, GAO Feng, HU Chao, et al. The use of brackish and reclaimed waste water in agriculture: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 60-68.
- [31] 常晓敏, 王少丽, 陈皓锐, 等. 河套灌区土壤盐分时空变化特征及影响因素[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(10): 1 000-1 005.
- CHANG Xiaomin, WANG Shaoli, CHEN Haorui, et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of soil salinity in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(10): 1 000-1 005.
- [32] 苏春利, 纪倩楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 916-923.
- SU Chunli, JI Qiannan, TAO Yanzhen, et al. Differentiation characteristics and main influencing factors of soil salinization in the West of Hetao Irrigation Area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 916-923.
- [33] 彭畅, 朱平, 牛红红, 等. 农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 508-512.
- PENG Chang, ZHU Ping, NIU Honghong, et al. Nitrogen and phosphorus loss of farmland agricultural non-point source pollution and its prevention[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 508-512.
- [34] 郭曾辉, 刘朋召, 雒文鹤, 等. 限水减氮对关中原冬小麦氮素利用和氮素表观平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4 359-4 369.
- GUO Zenghui, LIU Pengzhao, LUO Wenhe, et al. Effects of water limiting and nitrogen reduction on nitrogen use and apparent balance of winter wheat in the Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4 359-4 369.
- [35] 裴承忠, 陈爱萍, 张作为, 等. 内蒙古河套灌区三湖河灌域井渠双灌试验与探讨[J]. 节水灌溉, 2016(8): 166-168, 174.
- PEI Chengzhong, CHEN Aiping, ZHANG Zuowei, et al. Experiment and discussion on well-channel irrigation of sanhuhe irrigation field in Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. Water Saving Irrigation, 2016(8): 166-168, 174.

Assessing Groundwater Environment Changes in the Yongji Irrigation District under Rotational Well-canal Irrigation

WANG Lili^{1,2}, DING Xuehua^{1*}, HAN Tiankai³, YUAN Hongying¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources Development Center, Hohhot 010020, China;

3. Bayannaoer Institute of Water Resources Sciences, Bayannaoer 015100, China)

Abstract: 【Objective】 Yongji, located in the Hetao Irrigation district, has implemented a strategy of alternating between groundwater and surface water for irrigation to conserve water resources. This paper presents the outcomes of an experimental investigation into the repercussions of this practice on groundwater table change. 【Method】 The experiment was carried out in the Jingqu area of the Yongji irrigation district from 2018 to 2019. It involved measurement of the changes in groundwater depth, total salt content, total nitrogen, and phosphorus levels at 13 boreholes distributed across the region. We analyzed their spatial distribution and overall impact on groundwater dynamics. 【Result】 The alternating use of surface and groundwater for irrigation led to a reduction in the average groundwater depth by 0.15 meters. Simultaneously, it increased the average variation by 0.26 meters, and the coefficient of variation for groundwater depth by 1.13%, with the upper reaches of the irrigation district most affected. The decrease in irrigation area resulted in a reduction in areas with high salt content in groundwater, notably in the southeast of the upper reaches and northwest of the lower reaches, where the total salt content was reduced from 500 to 5 000 mg/L and 500 to 3 500 mg/L, respectively. Alternate irrigation also reduced the area with total nitrogen concentration exceeding 2 mg/L by an average of 14.38%, in addition to a marginal reduction in nitrogen and phosphorus in groundwater. The total nitrogen content in groundwater varied between 1 and 2 mg/L, while the area with total phosphorus content below 0.09 mg/L and 0.13 mg/L increased by 29.04% and 15.58%, respectively. 【Conclusion】 Alternate groundwater and surface water for irrigation can improve the utilization efficiency of groundwater and groundwater circulation. It also improved groundwater quality and alleviated the shortage of water resources in this region.

Key words: well canal rotation irrigation; groundwater environment; space distribution

责任编辑：赵宇龙