

河套灌区典型区土壤水-地下水动态与转化关系研究

张文聪^{1,2} 史海滨^{1,2} 李仙岳^{1,2} 李 祯^{1,2} 周 慧^{1,2} 王维刚^{1,2}

(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. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古工程研究中心, 呼和浩特 010018)

摘要: 为确定限制引水背景下河套灌区土壤水-地下水动态及其转化关系, 为优化农田水管理策略提供理论依据, 选取河套灌区典型斗渠区域, 基于2年土壤水、地下水的监测数据, 分析在不同作物种植区、不同灌溉期的农田土壤水、地下水的动态变化规律。运用水量平衡法对地下水浅埋区农田土壤水与地下水的转化关系进行定量研究, 结果表明: 生育期内农田土壤水分变化属于“灌溉降水入渗补充-腾发消耗型”; 受灌溉影响, 不同时期地下水埋深动态具有显著的灌溉型特征, 土壤水渗漏补给地下水明显抬升地下水位, 地下水排水和潜水蒸发又降低地下水位; 在作物生育期内, 土壤水与地下水进行双向补给, 且不同时期具有不同的转化特征; 研究区2年生育期内灌溉降水补给土壤水分别为544.56 mm和541.85 mm, 平均腾发量为465.5 mm和434.8 mm, 土壤储水量减少61.96 mm和63.1 mm, 土壤水补给地下水为207.73 mm和236.94 mm。研究可为当地及相近地区农业节水灌溉提供科学依据。

关键词: 河套灌区; 土壤水; 地下水; 水均衡; 典型区

中图分类号: S271

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)10-0352-11

OSID:



Dynamic and Transformation Relationship between Soil Water and Groundwater in Typical Areas of Hetao Irrigation District

ZHANG Wencong^{1,2} SHI Haibin^{1,2} LI Xianyue^{1,2} LI Zhen^{1,2} ZHOU Hui^{1,2} WANG Weigang^{1,2}

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil Water Environment Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010018, China)

Abstract: Aiming to determine the soil water - groundwater dynamics and their transformation relationship in the Hetao Irrigation District under the background of restricted water diversion, so as to provide a theoretical basis for optimizing farmland water management strategies, a typical bucket canal area in Hetao Irrigation District was selected, and the dynamic changes of farmland soil water in different crop planting areas and groundwater in different irrigation periods were analyzed based on the monitoring data of soil water and groundwater in two years. Using soil water balance to quantitatively study the transformation relationship between farmland soil water and groundwater in shallow groundwater areas, the results showed that the change of farmland soil moisture during the growth period belonged to the “irrigation precipitation infiltration supplement - evapotranspiration type”; it was different due to irrigation. The dynamics of groundwater depth during the period had significant characteristics, and the groundwater depth fluctuated drastically with the leakage of soil moisture in the farmland; during the growth period of crops, soil water and groundwater were recharged in both directions, and different periods had different transformation characteristics; the internal irrigation and precipitation replenish soil water were 544.56 mm and 541.85 mm in 2 a growth periods, respectively. The average evapotranspiration in the study area was 465.5 mm and 434.8 mm, respectively, the soil water storage was reduced by 61.96 mm and 63.1 mm, respectively, and the soil water replenishing groundwater was 207.73 mm and 236.94 mm, respectively. The research results can provide a scientific basis for agricultural water-saving irrigation in the local and similar areas.

Key words: Hetao Irrigation District; soil water; groundwater; water balance; typical area

收稿日期: 2021-11-16 修回日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769024, 51879132)和人才引进优秀博士科研项目(NDYB2017-34)

作者简介: 张文聪(1992—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: 18631709995@163.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: shi_haibin@sohu.com

0 引言

河套灌区作为典型的引黄灌溉特大型灌区^[1],生态环境较为脆弱^[2],土壤盐渍化一直是困扰灌区农业生产发展的主要问题^[3-4]。其核心是河套灌区乃至整个黄河流域水资源开发利用中复杂种植条件下的引、耗、排水过程问题^[5]。土壤水分运移是决定土壤盐分变化的主要因子^[6],地下水作为盐分运移的载体和动力,与土壤水盐运动关系密切^[7]。河套灌区地下水埋深较浅,和土壤水界限不明确^[8],二者相互转化十分频繁,具有典型的灌溉型特征。土壤水-地下水界面水分转化是农田水均衡的重要组成部分^[9],灌溉活动对研究区水循环影响较为显著,灌溉事件发生后的土壤水和地下水会呈现明显的变化规律^[10]。杨建锋等^[11]认为在地下水浅埋区难以将地下水和土壤水分开,人为割裂开来不符合自然实际,将二者作为一体称为地下水土壤水资源更为合适。结合灌水事件将地下水和土壤水统一进行研究更符合河套灌区实际现状。

近年来,河套灌区又面临新的形势,由于指令性节水,引水总量减少 20% 以上^[12],农业水资源供需矛盾加剧,合理利用水资源对灌区农业发展具有重要意义^[13],灌溉引水量的减少势必会打破区域水分平衡体系以及影响灌区农田的水文循环过程^[14]。在新的约束限制条件下,厘清干旱浅埋深河套灌区农田水循环特征和水量均衡规律是制定用水管理决策的前提,同时也是实行有效的灌排管理和完善灌排系统的必要条件。

针对地下水位^[15-16]和土壤水分^[17-19]的变异性 and 空间分布及其影响因素已有了相关研究,研究成果可为农田灌溉管理及调控地下水位提供有效的科学指导。浅埋深灌区灌溉水、地下水与土壤水的联合调配是实现河套灌区水资源合理开发利用、防治土壤盐渍化等多目标综合治理的有效途径。全面了解土壤水分及地下水动态是掌握土壤水均衡要素、循环规律与水分转化关系的前提和基础,对加强水资源的集约管理具有重要的现实意义^[20]。河套灌区实际灌溉用水资源调配基本是在区域尺度上进行的^[21]。针对区域水循环要素的分析,郝芳华等^[22]认为灌区内的水循环过程为灌溉降水-下渗-潜水蒸发类型,降水对其影响较小,以灌溉水的垂直入渗和潜水的蒸发蒸腾消耗为主,这与杜丽娟等^[23]在河套灌区解放闸灌域运用干旱区平原绿洲耗散型水文模型定量分析水循环特征得出的结论基本符合。因此在河套灌区水量分配发生改变,作为灌区主要水量消耗的农业

耗水以及区域水土环境必然会受到影响的背景下,本研究以河套灌区典型地区作为研究对象,分析不同年份研究区内主要作物田块的土壤水和地下水动态变化,同时定量分析研究区的水循环特征,旨在为现有灌溉制度运行下的灌区农业生产及科学的灌溉用水管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古河套灌区上游解放闸灌域中东部,属于沙壕渠灌域斗渠尺度的灌排系统,其土壤条件、种植结构等在灌区均具有典型特征。地处东经 107°9'18"~107°10'23"、北纬 40°55'15"~40°56'53",控制总面积约为 331.89 hm²。该地区属于温带大陆性气候,干旱少雨,年平均降水量为 139~222 mm^[24],近 90% 的降水发生在 5—9 月;蒸发强烈,年均蒸发量为 1 900~2 500 mm (20 cm 蒸发皿)^[25]。研究区地形较为平缓,整体地势呈东南高,西北低,土壤以粉砂壤土为主,透水性较好,适宜耕种,主要作物有玉米、小麦、向日葵等。研究区及周边一定范围内,地形平整,地面坡度较为平缓。研究区示意图见图 1。

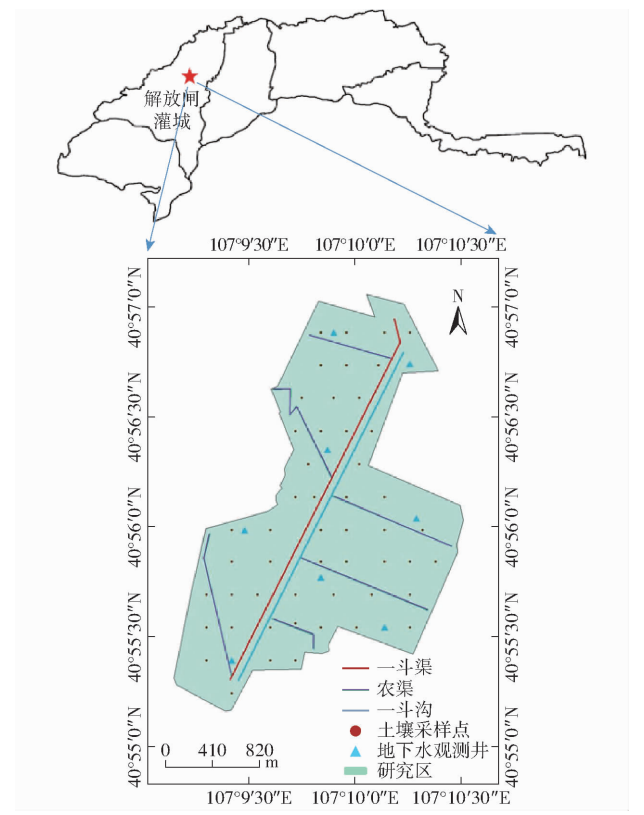


图 1 研究区及采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of study area and sampling points

研究区种植作物和荒地在整个研究区内呈插花分布(图 2)。通过野外实际考察并结合 Google earth 卫星图像的目视解译,确定 2019 年和 2020 年

各土地类型面积统计如表 1 所示,其中将路沟渠面积及比例合算在村庄面积及比例中。

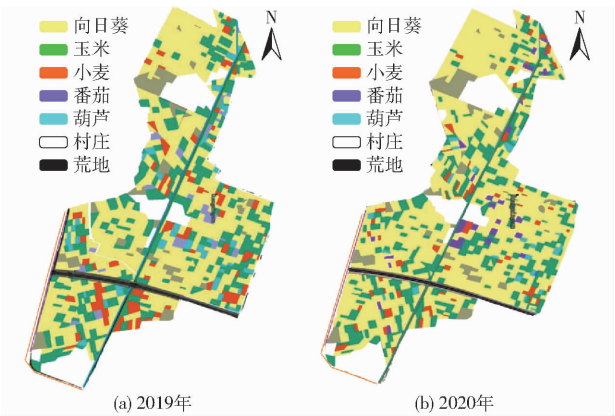


图 2 研究区 2019 年和 2020 年种植结构分布图

Fig. 2 Distribution maps of planting structure in study area in 2019 and 2020

表 1 研究区不同土地利用类型面积及比例

Tab.1 Area and proportion of different land use types in study area

地类	2019 年		2020 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
向日葵	182. 74	55. 06	200. 36	60. 37
玉米	66. 28	19. 97	57. 72	17. 39
小麦	23. 50	7. 08	16. 79	5. 06
其他作物	16. 83	5. 07	12. 55	3. 78
荒地	18. 02	5. 43	19. 95	6. 01
村庄	24. 53	7. 39	24. 53	7. 39
合计	331. 90	100	331. 90	100

1.2 试验方法

野外监测试验分为研究区土壤水分监测、地下水环境监测和灌排水量监测。

土壤水分监测:在研究区以 200 m×200 m 网格均匀布置 58 个土壤水分定位监测点。采用 GPS 定位,进行土壤基础数据采集。土壤水分监测点覆盖了主要作物农田和天然荒地。每 15 d 进行 1 次土壤水分监测,同时在灌水前 1 d 与灌水后 3 d 进行加测,根据实际灌水、降水情况,调整取样时间。取样层次分别为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 共 5 层。对采集的样品采用称重法测定土壤含水率^[26]。研究区土壤容重、土壤粒径级配见表 2。

地下水环境监测:在研究区共布设 8 眼地下水观测井,每 5 d 用卷尺直接测量地下水观测井内水位埋深,并在灌溉前 1 d 与灌水后 3 d 加测^[27]。

灌排水量监测:灌排水量监测是在研究区斗渠和各农渠渠首均设置流量观测点,生育期每次灌水时,用便携式流速仪(FP111 型,美国 Global Water 公司)每 30 min 测定斗渠渠首流量以及各农渠渠首

流量,同时在一斗沟排水沟出口监测退排水量,选取种植向日葵、玉米、小麦的典型田块,每种作物选 3 块,用梯形量水堰监测进入典型作物田块的水量,记录梯形堰断面水位,每 5~10 min 记录 1 次,直到农户停止灌溉。气象资料由沙壕渠试验站小型气象站提供,部分气象资料从国家气象信息中心网站下载。通过野外实地监测调查和沙壕渠试验站提供的历史资料对研究区的用水管理详情进行调查。

表 2 研究区典型观测点土壤理化性质
Tab.2 Soil physical properties of typical observation points in study area

不同含盐土壤	取样点	土层深度/cm	容重/(g·cm ⁻³)	土壤颗粒质量分数/%		
				0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	0~0.002 mm
轻度	A	0~40	1.59	33.51	61.15	5.34
		40~100	1.52	37.76	53.96	8.28
	B	0~40	1.51	19.14	75.15	5.71
		40~100	1.44	19.74	76.81	3.45
中度	A	0~40	1.63	32.56	63.24	4.20
		40~100	1.54	35.62	60.9	3.48
	B	0~40	1.42	30.34	65.42	4.24
		40~100	1.39	22.41	73.52	4.07
重度	A	0~40	1.56	33.89	61.74	4.37
		40~100	1.54	39.44	56.17	4.39
	B	0~40	1.44	42.89	51.73	5.38
		40~100	1.39	29.29	66.09	4.62

1.3 土壤储水量计算

根据土壤分层,土壤储水量计算式为

W_i = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \theta_i \tag{1}

式中 W_i——第 i 层土壤储水量,mm
γ_i——第 i 层土壤的干容重,g/cm³
h_i——第 i 层土壤的厚度,cm
θ_i——第 i 层土壤质量含水率,%

1.4 蒸散量计算

研究区不同田块腾发量采用作物系数法计算,计算式为

ET_a = K_c ET_0 \tag{2}

式中 K_c——无水盐胁迫、耕作和水管理条件下作物系数,根据前人在河套灌区主要作物系数的研究成果^[28],确定不同生长阶段作物系数 K_c。

ET₀——参考作物腾发量,mm,可由气象数据通过修正后的 Penman-Monteith 公式计算得出

1.5 地下水与土壤水交换量计算

在研究区及周边一定范围内,地形平整,地面坡

度较为平缓,加之周边农田种植与研究区相近,灌溉过程基本相同。研究区地下水水力梯度小,侧向径流较为稳定,认为地下水流入量与地下水流出量近似相等。加之研究区四周沟渠及地界边界较为清晰,可认为研究区与外界无水量交换。在垂直方向,土壤水均衡的补给项主要是灌溉水量、有效降水量、地下水补给量;消耗项主要是土壤蒸发量和作物蒸腾量。在一定时段内,研究区土壤水量均衡关系式为

$$\Delta W = P + I + \Delta Q - ET \tag{3}$$

式中 ΔW ——土壤蓄水变化量,mm

P ——降水量,mm

I ——灌溉水量,mm

ΔQ ——地下水补给量,mm

ET ——区域腾发量,mm

2 结果与分析

2.1 研究区土壤水动态

土壤水是地表以下至潜水面以上的非饱和带中的水分^[29],综合反映了灌溉事件、气候、土壤、作物之间相互作用对水分平衡的影响,是优化作物种植结构和揭示土壤盐渍化演化机制的关键性因子^[30]。本研究选取 2019 年和 2020 年生育期内的 5 次灌水事件为研究时段,分析研究区主要作物(向日葵、玉米、小麦)田块的不同土层土壤含水率动态变化,见图 3。

由于河套灌区特殊的灌溉制度,生育期内研究区剧烈的农田土壤含水率动态变化主要集中在灌水前后,各类作物田块不同深度土层的土壤含水率均发生了较为明显的波动,灌水定额不同,波动幅度并

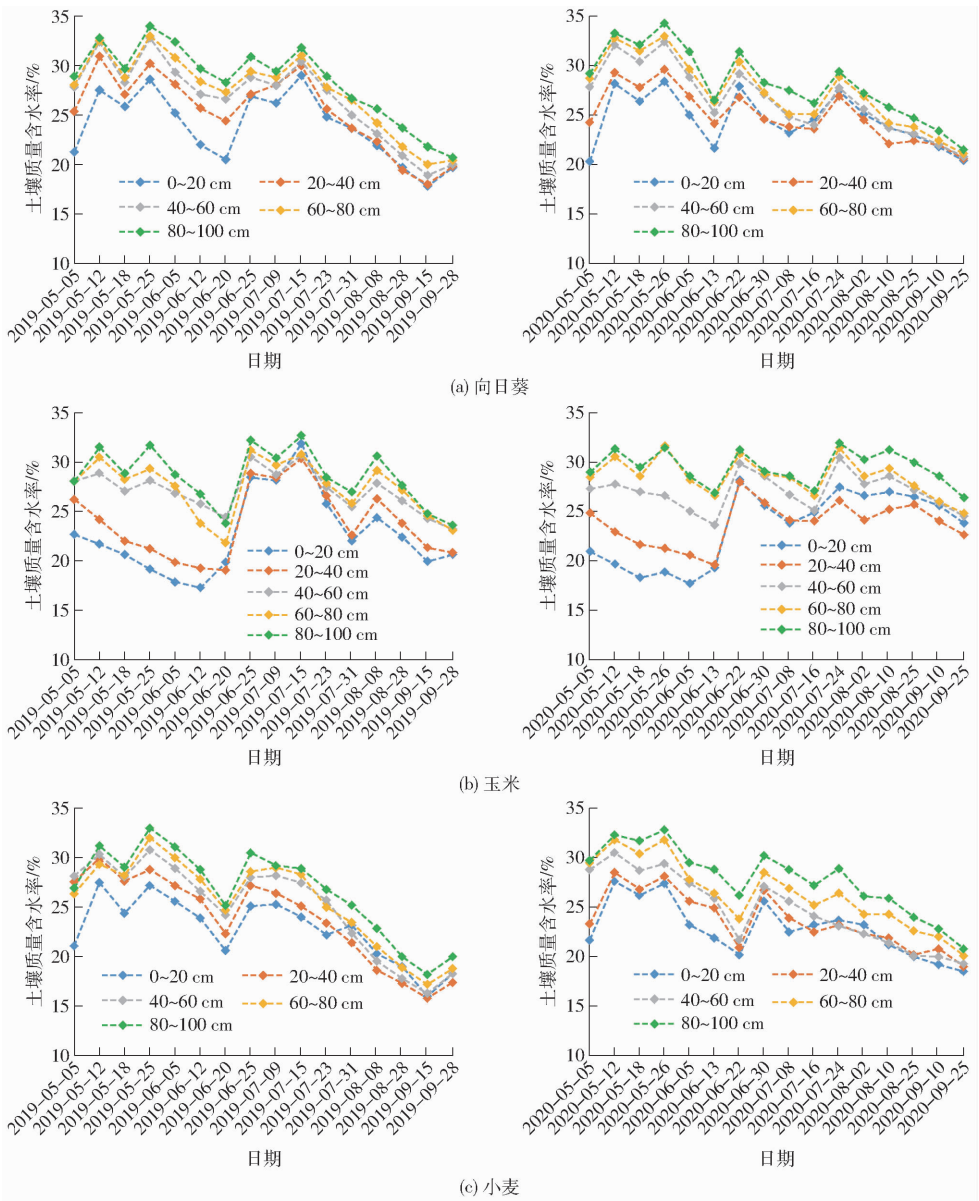


图 3 2019 年和 2020 年生育期不同作物田块土壤含水率变化曲线

Fig.3 Change curves of soil moisture content during different crop growth periods in 2019 and 2020

不相同。直观地看,0~20 cm 土层土壤含水率波动最为剧烈且幅度最大。灌水前,腾发作用使得下层土壤水分在毛管作用和扩散作用下对上层土壤水分进行补给,但土壤含水率仍呈随深度增加而增加的剖面形态。灌水后,0~40 cm 土层土壤含水率迅速增加,随后灌溉水入渗补给会使 40~100 cm 土层土壤含水率增加,土壤水在灌溉降水和腾发的共同作用下进行了显著而复杂的重分布过程。总体来讲,0~40 cm 土层土壤含水率受灌溉降水和腾发作用影响较大;40~100 cm 土层土壤受灌溉入渗、潜水蒸发及作物根系耗水影响较大。40~100 cm 土层土壤含水率变动相对较小,造成这一现象的另一原因是生育期内除了第 3 水对所有作物灌溉,每次灌水只针对相应作物灌溉,形成了对研究区的局部灌溉。灌溉田块的地下水位会明显高于未灌溉田块地下水位,产生的水力梯度驱使地下水从灌溉田块向未灌溉田块迁移,这部分迁移的地下水的潜水蒸发作用会补给未灌溉田块深层土壤水。

从时间变化趋势来看,冻融期结束后,土壤冻层融化对生育初期土壤水分进行了补充,生育期前两次灌水间隔较短,第 1 水为针对向日葵地的春灌和小麦苗期灌溉,第 2 水的灌溉作物相同但灌水总量减少。生育初期腾发作用相对较弱且降水量较少,灌水是该阶段土壤含水率变化的主要影响因素。2 年的向日葵和小麦田块 0~100 cm 土层土壤含水率显著增加,地下水通过毛细作用进入玉米田块,也使其深层土壤含水率有所增加。第 3 水为全面灌溉,玉米田块在生育期内得到第 1 次灌溉,灌后 0~40 cm 土层土壤含水率显著增加。进入生育中期会迎来降水集中期和高峰期,降水对土壤水的补给使得表层土壤出现明显波动,第 4、5 次灌水使灌溉田块的整体土壤含水率产生剧烈波动。但直到生育期结束,腾发作用会一直持续并加剧消耗土壤水,表现为各作物田块整体土壤含水率在波动中持续降低。

不同作物的生育期、灌水日期、灌水量、根系长度及发达程度不尽相同,对土壤水分的消耗不同。相较于向日葵和小麦,玉米的生育期最长,向日葵和小麦有大量的土壤水分消耗于播种前和收获后的裸土蒸发。例如小麦到 7 月中下旬收获后地表裸露导致蒸发作用强烈,在秋浇前无灌溉补充,深层土壤会向上补充水分,因此深层土壤含水率相较于向日葵和玉米会相对较低。不同作物田块土壤水分的剧烈变化主要集中在其对应的灌水事件前后,生育期内各作物的灌水时间不同,其中向日葵由研究区第 1、3、4 水灌溉,玉米由第 3、4、5 水灌溉,小麦则由前 3 水进行灌溉。玉米和向日葵的灌水量较为充足,小

麦的灌水量相对较少,从图 3 中也可看出各类作物的灌水次数、灌水量以及灌水时间。玉米和向日葵主要根系均在 0~100 cm 内,主要消耗 0~100 cm 土层土壤水分,而小麦根系相对较短,对土壤水分的消耗主要集中在 40 cm 以上。每年作物种植结构的调整、降水等也会对灌溉事件产生一定影响,厘清不同年份不同作物田块土壤含水率在生育期内的动态变化对于指导灌溉具有现实意义。在研究区及河套灌区这样的地下水浅埋深区,生育期内主要作物的土壤含水率在灌水、降水补充及腾发消耗作用下呈现出明显的动态变化,其变化属于“灌溉降水入渗补充-腾发消耗型”。

2.2 研究区地下水动态

引黄灌溉对河套灌区农业生产有着重要作用,传统畦灌的地面灌溉技术,加之畦块较大造成田间渗漏损失较多。田间未衬砌的末级土渠使得渠道渗漏也较大,因此地下水位较高。河套灌区地下水位受多重因素影响^[31-33],如灌排工程与管理、种植结构、土地利用、气象因素等。研究区地下水位较高,季节性变化和受灌水影响而表现出的周期变化是其显著的特点。准确把握地下水埋深动态是合理开发利用农田地下水的基础。本文以 2019 年 5 月 1 日至 2020 年 5 月 1 日为一个水文年,分析研究区地下水埋深动态,见图 4。

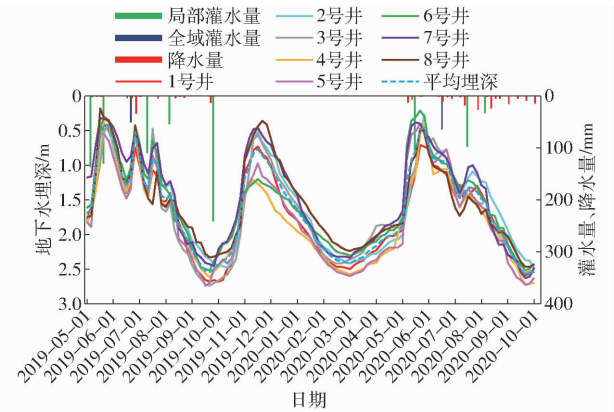


图 4 研究区地下水埋深动态示意图
Fig. 4 Dynamic schematic of groundwater depth of study area

研究区年地下水埋深年内动态变化可分为 5 个阶段。全年灌水事件共有 6 次,分别是夏灌 3 次、秋灌 2 次、秋浇 1 次。生育期内第 3 次灌水对主要作物全部灌溉,因此可将其余灌水事件视为局部灌溉。

生育期内进行了 5 次局部灌溉,各观测井地下水位的变化过程基本相同。距离灌溉田块较近的观测井的地下水位在灌水前后会出现急剧的升降过程,但并未和其他观测井表现出明显的水位升降速率差别。原因是局部灌溉对大部分农田都进行灌

溉,灌溉农田与未灌溉农田交错分布,土壤渗漏率较高,土壤水未达到田间持水量时就开始补给地下水,由于灌溉时间不同,不同的种植作物农田以及耕、荒地间地下水会存在水分交换,浅埋深地下水系统使得水分交换较为充分,各观测井地下水位大致经历了相同幅度的波动。

(1)夏灌阶段(5月上旬—7月上旬):生育期内第1次灌溉在5月4日,灌溉水与冻融水共同补给导致地下水位迅速上升,出现了第1次水位高峰,平均埋深为0.41 m,为本年度最小值。地下水位受灌水量和灌水频率的影响显著,随着生育期延续,作物腾发作用增强,开始消耗地下水,地下水位呈现峰谷交替变化,在7月夏灌期的地下水埋深会出现低谷,夏灌期平均地下水埋深约为1 m。在灌水初期7号井地下水埋深相对较浅,原因可能是其距离沙园分干沟较近,受浸透侧渗作用较其他区域强烈,造成灌水初期7号井所处研究区西北部地下水埋深较浅。

(2)秋灌阶段(7月上旬—9月中旬):相较夏灌期,秋灌期灌溉定额较小,降水量约占生育期内降水总量的67.2%。秋灌初期水位升降相对剧烈,受有效降水量影响显著,分析原因是各观测井所处地块的作物不同,例如3、7号井处于裸地,6号井处于收获完的小麦地,相较于其他地处有作物覆盖田块的观测井,在降水集中期地下水位较高;到后期各观测井地下水埋深差异变小,这时期地下水受观测井周围作物覆盖、灌水时间、微地形等的影响。秋灌期是作物生长旺季,强烈的腾发作用抵消了部分因灌溉降水导致的地下水位的增量。在秋浇前地下水埋深达到最大,约为2.55 m。

(3)冬储阶段(9月中旬—11月中旬):生育期内最后1次灌水距秋浇约2个月,9月中旬局部地下水埋深达到最大,约为2.74 m。期间几乎无其他形式的水分对研究区进行补给,地表高程差异是造成各观测井地下水埋深差异的主要原因。秋浇灌水量大,灌期长,为全年之最,局部秋浇初期不同观测井地下水埋深有着明显差异,不同区域间地下水有较大水力梯度,随后水力梯度驱使整个研究区地下水位保持着较为同步的上升速率,区域不同,灌水时间有所差异,研究区北部达到水位峰值的时间略晚。整个研究区平均上升速率约为3.6 cm/d。冬储阶段地下水埋深一般在1 m以下,变幅约为1.38 m,部分地区最浅时可达到约0.36 m。

(4)封冻阶段(11月中旬—3月中旬):11月中旬后各处地下水位开始同步降低并保持较为规律的高低次序,南部区域的1、2、3号井到北部的4、5、6号井整体表现出降低的趋势,处在研究区北部的7、

8号井距离排沟较近,排水排盐条件相对较好,地下水位降低相对较快。封冻阶段地下水整体保持了从南向北的流动方向。随着地下水位的持续降低,各观测井间地下水位差距也逐渐缩小,意味着水力梯度也在不断减小。

土壤冻结前,地下水降至临界埋深下会成为冻融期间盐分上行的推动力^[34]。此期间埋深增大主要是包气带本身垂直水分交替的结果。冻结层上下较大的温差作用促使地下水向冻层聚集,冻层不断增厚,到3月地下水降低到全年较大水位低谷,变幅约为1.54 m。

(5)春融阶段(3月中旬—5月上旬):3月土壤冻层达到最深,期间基本无水分补给,地下水位较低。冻融期结束后,土壤开始解冻,冻层上部的消冰水蒸发,下部融冻水补给地下水,地下水位开始升高,但由于前期浅埋深影响,土壤湿度大,形成的冰冻层在随地温回升的过程中逐渐消融,直至融通后,地下水位显著上升,变幅约为0.47 m。

上述分析了2019—2020年一个水文年内的地下水埋深动态变化,下一个水文年会重演类似的周期性。地下水位年变化一般有两个高峰和两个低谷,一个高峰在5月,由融冻水和夏灌水形成;另一个高峰出现在10—11月,主要由秋浇灌溉形成。两个低谷分别是秋浇前和冻融期结束前。生育期内地下水位总体呈降低的趋势,并在秋浇前达到最低。由于秋浇定额较大,秋浇阶段地下水位变化与秋浇过程基本同步发生。由于灌区水源条件约束和种植结构的变化,近年来研究区为局部秋浇,其余农田在翌年春季进行春灌。秋浇结束后,土壤于11月中下旬开始冻结,在土壤冻结影响下,研究区地下水位逐渐降低。直到翌年3月,冻融水回补会抬升地下水位,至5月初灌溉开始后地下水位又开始受灌溉的显著影响。研究区主要是由引水灌溉补给浅层地下水,浅层地下水埋深的变化与灌溉制度有着密切的联系。

2.3 研究区土壤水均衡特征

2.3.1 土壤储水量

根据式(1)计算3种主要作物的平均土壤储水量,再根据求得的不同作物平均土壤储水量,按照面积权重加权求和获得整个研究区的平均土壤储水量。研究区3种主要作物及研究区整体0~100 cm平均土壤储水量变化如图5所示,2019年和2020年生育期内的土壤储水量变动范围为358.44~420.4 mm和358.9~422 mm,2年小麦田块的土壤储水量变化最大,原因是小麦生育期较短,在7月中旬收获后不再进行灌溉,地表覆盖较少,蒸发损失较

大,其土壤含水率较低。2019 年种植向日葵和玉米田块的土壤含水率波动基本一致,2020 年向日葵灌水量减少,玉米灌水期间的降水较多,3 种主要作物土壤储水量的波动基本都是随着灌溉事件的发生而随之波动。在生育期结束后到秋浇前的这段时间,无外来水分补充加之腾发作用使得土壤储水量也呈现下降趋势。

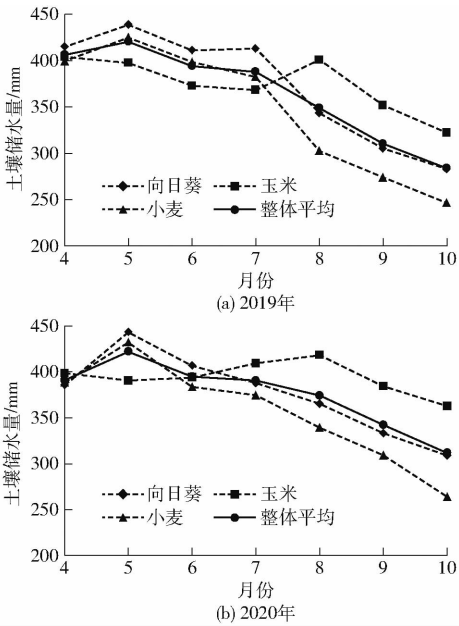


图5 研究区 2019 年和 2020 年不同作物土壤储水量
Fig.5 Water storage of different crop soil layers in study area in 2019 and 2020

2.3.2 有效降水量与灌溉水量

降水是土壤水分的重要来源,降水量、降水强度、降水历时直接影响地下水的补给特征^[35]。对土壤水分而言,最小有效降水量是指一次降水过程中能使土壤相对湿度稳定增加的最小降水量。一般认为 5 mm 以上的降水是有效降水。2019 年作物全生育期降水总量为 66.39 mm,其中有效降水量为 51.82 mm。2020 年作物全生育期降水总量为 151.4 mm,有效降水量为 129.8 mm。

研究区向日葵、玉米、小麦的种植与生长周期不同,灌溉次数与灌水量也不相同。采用梯形量水堰对典型地块测定主要作物的灌水定额,见表 3、4。研究区每年灌水 6 次,分别为作物生育期内的 5 次灌水和 1 次秋浇灌水。第 1 水发生在 5 月初,作为向日葵的播前水和小麦苗期灌溉;第 2 水发生在 5 月下旬,部分未来得及灌溉的向日葵田块也由第 2 水灌溉,同时对小麦进行灌溉;6 月中下旬进行的第 3 水对向日葵、玉米和小麦全部灌溉;第 4、5 水分别在 7 月中旬和 8 月上旬对向日葵和玉米进行灌溉。农民用水协会根据实际情况调整放水、行水时间和放水量,例如研究区内向日葵种植面积占比较大,

2019 年第 1 水行水时间略短,部分向日葵田块由第 2 水补充灌溉,2020 年调整为第 2 水也对向日葵进行灌溉;2019 年第 3 水期间发生降水,提前结束了行水时间,由第 4 水对第 3 水未灌溉的作物进行补充灌溉;2020 年准备进行第 4 水灌溉期间降水较多,因此推迟了放水时间。虽然每年种植结构都有调整,但是生育期现有的灌溉制度较为稳定。

表 3 2019 年试验区种植及灌溉情况
Tab.3 Tillage and irrigation schedule in field

experiment in 2019					mm
灌溉阶段	作物	灌溉事件	灌溉日期	灌水定额	灌溉总额
生育期	向日葵	第 1 水	5 月 8 日	209	452
		第 3 水	6 月 22 日	97	
		第 4 水	7 月 11 日	146	
	玉米	第 3 水	6 月 22 日	106	396
		第 4 水	7 月 11 日	158	
秋浇	小麦	第 5 水	8 月 4 日	132	273
		第 1 水	5 月 8 日	115	
		第 2 水	5 月 22 日	81	
		第 3 水	6 月 22 日	77	241
		第 6 水	9 月 28 日	241	

表 4 2020 年试验区种植及灌溉情况
Tab.4 Tillage and irrigation schedule in field

experiment in 2020					mm
灌溉阶段	作物	灌溉事件	灌溉日期	灌水定额	灌溉总额
生育期	向日葵	第 1 水	5 月 8 日	156	388
		第 2 水	5 月 20 日	102	
		第 3 水	6 月 18 日	38	
		第 4 水	7 月 19 日	92	
	玉米	第 3 水	6 月 18 日	93	340
		第 4 水	7 月 19 日	129	
		第 5 水	8 月 5 日	118	
	小麦	第 1 水	5 月 8 日	91	228
		第 2 水	5 月 20 日	97	
第 3 水		6 月 18 日	40		
秋浇		第 6 水	10 月 6 日	222	222

2.3.3 作物蒸腾

2 年不同作物地块及荒地腾发量见表 5,研究区内主要作物的生育期长短差别较大,因此不同作物地块生育期腾发量差异相对较大。向日葵田块灌水量较为充足,且作为耐盐作物,在生育期几乎不受水盐胁迫,因此 2 年的腾发量差异相对不大。玉米生育期最长,且灌水量较充足,2 年腾发量最大,分别为 484.3 mm 和 534.5 mm。小麦生育期最短,但整个研究时段与向日葵和玉米地块的腾发量相差并不大。例如在 2019 年,灌水充足且频繁的向日葵和玉

米腾发量分别为 463.8 mm 和 484.3 mm,而小麦田块也达到了 427.9 mm。对比 2 年生育期腾发量和整个研究时段腾发量,小麦和向日葵只占其全研究时段的 73.5% 和 88.8%,究其原因是有部分水被播前及收获后的裸土蒸发所消耗。播前较大的灌水量使得地下水位迅速升高,温度较低土壤下层未完全融通,灌溉水入渗速率较慢,蒸发作用造成大量的无效耗水。例如 2019 年作物生育期腾发量占整个研究时段的 68%,荒地腾发量占 22.7%,其余被裸土蒸发损失。2 年研究区空间平均腾发量分别为 465.5 mm 和 434.8 mm,2019 年腾发量偏大,分析原因是,虽然 2020 年作物生育期降水频繁且降水量多,但引水总量相较 2019 年减少了 $2.876 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。在作物生长旺盛期的 6 月或者 7 月蒸散量最大,2019 年 6、7 月的平均温度高于 2020 年同时期的温度。

表 5 2019 年和 2020 年作物生育期不同田块和荒地腾发量
Tab.5 Evapotranspiration of different fields and wasteland during crop growth period in 2019 and 2020 mm

作物类型及其生长季	2019 年		2020 年	
	各田块研 究时段总 腾发量	生育 期腾 发量	各田块研 究时段总 腾发量	生育 期腾 发量
	腾发量	发量	腾发量	发量
向日葵(5 月 30 日—9 月 30 日)	463.8	411.4	433.6	385.1
玉米(5 月 1 日—9 月 30 日)	484.3	484.3	534.5	534.5
小麦(3 月 31 日—7 月 21 日)	427.9	312.3	480.9	355.9
瓜菜(5 月 1 日—8 月 15 日)	395.7	350.7	416.7	366.3
荒地(5 月 1 日—9 月 30 日)	527.7	527.7	541.8	541.8

2.4 土壤水与地下水交换量

计算土壤水与地下水交换量的时间间隔设定为每次灌水前后取样观测的时间,根据式(3)计算的 2 年生育期及历次灌水活动前后土壤水和地下水在取样间隔时间内的交换量见图 6。

由图 6 可知,研究区生育期内土壤水与地下水交换频繁,其中 ΔQ 正值表示地下水对土壤产生补给作用的水量,负值表示农田土壤水分渗漏到地下含水层的量。在设定的计算时段内,2 年生育期内前两次灌水活动都产生了相对较多的土壤渗漏,分别为 124.37、109.6 mm 和 113.52、111.41 mm,分析原因主要是灌水量相对较多,且由于行水条件的限制,第 1 次和第 2 次灌水活动间隔时间较短,较大的灌水量使得土壤水迅速超过田间持水量,随后入渗补给到地下水;随着气温的上升,腾发作用的增强,加之第 3 次灌水的灌水量较小,这期间降水开始增多,在第 3 次灌水前后,地下水和土壤水间的双向补给较为稳定,2 年土壤水补给地下水的水量分别为

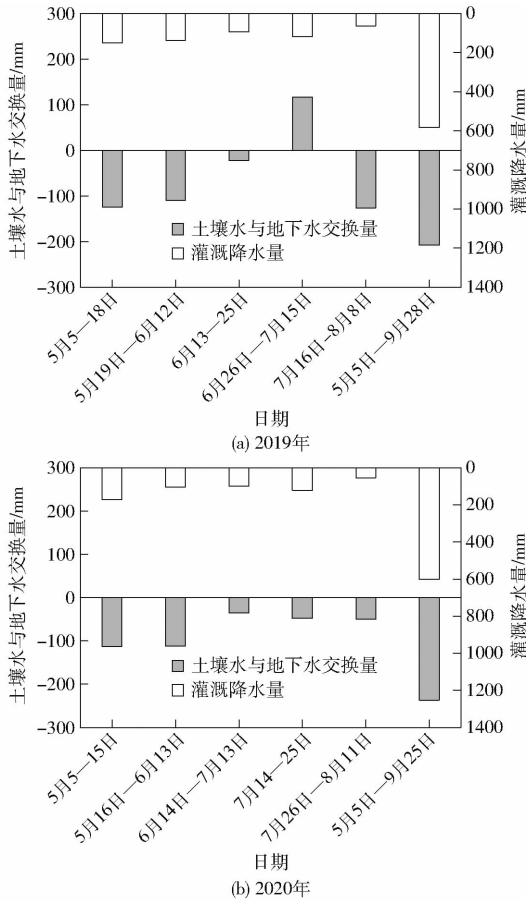


图 6 研究区 2019 年和 2020 年生育期土壤水与地下水交换量

Fig. 6 Soil water and groundwater exchange during growth period of study area in 2019 and 2020

21.64 mm 和 34.67 mm;2019 年第 4 次灌水虽然灌水量较多,但间隔时间为 20 d,期间强烈的腾发作用大量消耗土壤水,因此地下水对土壤水进行了补给,补给量为 116.81 mm,而 2020 年第 4 水选取的计算时段间隔较短,相较 2019 年灌水量减少,但是降水量较大,土壤水对地下水补给了 49.45 mm;2019 年生育期内最后 1 次灌溉活动距离第 4 次灌水活动间隔时间相对较长,强烈的腾发作用使得地下水通过毛细作用补给土壤水,补给量为 125.93 mm,2020 年第 4 水结束后发生了 26 mm 的降水,这期间的腾发作用降低,加之第 5 水灌溉使得地下水得到了 49.45 mm 的渗漏补给量。研究区 2 年生育期内灌溉降水补给土壤水分别为 544.56、541.85 mm。

通过对生育期内 5 次灌水前后土壤水与地下水交换量分析可知,灌溉降水是土壤水补给地下水的主要来源,生育期内每进行 1 次农田灌溉,农田土壤水分均会产生不同程度的渗漏。研究区目前仍以传统畦灌的地面灌溉技术为主,加之地块较大、土地平整度差和农民节水意识不强,灌水定额较大,与理论值有一定差异。再加上河套灌区特殊的一首制特大

灌区特点,研究区内作物不可能适时灌溉,灌溉间歇期相对较长。总体来讲,作物在生育期内仍会受到多次水分胁迫,这时主要还得通过地下毛管水补给,满足作物需水过程,同时也存在表层土壤盐分的积累。农业用水紧张与浪费的现象并存,在河套灌区限制引水的大背景下,当前的灌溉制度并不合理,但在当前的灌溉管理运行机制和受水源工程的约束又很难进行调整。2 年生育期整体土壤对地下水的补给水量分别为 207. 73 mm 和 236. 94 mm,生育期内地下水位总体呈下降的趋势并在全年生育期末达到最低,分析原因是虽然灌溉渗漏水会对地下水进行补给,但灌水结束后,由于作物强烈的蒸腾和土壤蒸发,灌溉渗漏水又重新回到作物根层被作物吸收利用,同时部分地下水迁移到未灌溉的盐荒地。

3 讨论

土壤水动态及其转化是四水转化过程的重要环节^[36],且与地下水之间存在着密切联系,二者在一定条件下可以相互转化。由于不同的研究目的、方法等,使得土壤水和地下水变化规律的研究分别在各自独立的领域中发展。随着研究的深入,应将土壤水与地下水作为整体进行研究,可以更全面地认识土壤水、地下水运动规律^[37],定量研究土壤水和地下水的转化关系对于河套灌区水土资源的可持续利用和农业生产的持续发展具有指导意义。

本文以河套灌区典型区生育期土壤储水量为核心,定量揭示了土壤水与地下水的转化关系。灌水补充及腾发消耗使得土壤水分呈现明显的交替变化,宫兆宁等^[38]也指出在地下水浅埋区土壤剖面在气候条件作用下呈蒸发-入渗交替变化,王水献等^[39]在干旱绿洲农田土壤水分平衡的分析也表明了,在浅埋深灌区灌溉水量和降水量是土壤水补给的主要来源,消耗项则以底边界补给潜水和排水为主,这与本文所得结论基本一致。以上均可说明在干旱浅埋深灌区土壤水动态变化都呈现出近似的特点,而本文又针对河套灌区作物插花种植特点,分析不同年份主要作物田块的土壤含水率变化趋势,生育期内土壤水整体的消耗量大于补给量。地下水与土壤间发生双向水量交换,二者间既接受补给又发生消耗。陈亚新等^[40]认为,在浅地下水埋深灌区,降水或地面灌水形成的土壤水分入渗在短时间往往会

超过非饱和带产生深层渗漏,造成对地下水补给。本研究也证明灌水事件发生后出现农田土壤水分渗漏,使得地下水发生明显波动,受到灌溉制度的影响,一个水文年内的地下水埋深变动大致可分为 5 个阶段。

本文对土壤水和地下水之间的转化做了定量研究,由于生育期内灌溉降水和腾发作用较强,土壤水与地下水有明显的相互转化关系,但属于同一系统内部的地下水和土壤水之间的运动转化规律受多种因素的影响和制约,且本文受限于监测频次和取样深度,后续还需要长期监测及深入研究,以进一步揭示土壤水、地下水运动规律及转化关系,运用适当的模型,结合研究区特点将土壤水和地下水相关数值进行模拟,不仅能够更为准确描述土壤水与地下水的动态及转化规律,也可为农田节水灌溉提供一定的科学依据。

4 结论

(1)在作物生育期内,灌溉降水和地下水补给使得土壤含水率增加,随着生育期的进行,作物需水能力和腾发作用增强,加大了对土壤水的消耗,研究区主要作物田块土壤含水率在波动中整体呈降低的趋势。

(2)研究区主要作物的生育期、生物特性不尽相同,对土壤水分的消耗不同。灌水日期、灌水量的不同也会明显影响土壤含水率变化。不同年型作物种植结构的调整、降水量和灌溉事件间会产生一定的交互影响。

(3)地下水明显的特点是季节性变化和在灌水后的剧烈波动,灌水后,土壤水渗漏补给地下水会明显抬升地下水位,地下水排水和潜水蒸发又会降低地下水位。地下水位变化在一个水文年周期内一般有两个高峰和两个低谷,在下一个水文年会重演类似的周期性。

(4)在研究区以及河套灌区这样的地下水浅埋区,土壤水和地下水在灌溉降水补充和腾发作用下动态变化较为明显,且二者间存在动态响应关系。生育期内,土壤水和地下水双向交换频繁,2 年生育期土壤水分别补给地下水 207. 73 mm 和 236. 94 mm。灌水期间,土壤水对地下水进行单向补给。当灌溉期结束后,强烈的腾发作用开始消耗土壤水时,地下水可以通过毛管上升作用对土壤进行补给。

参 考 文 献

[1] 南纪琴,陶国通,王景雷,等. 区域农业水土资源利用潜力估算方法——以河套灌区为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1378 - 1390.
NAN Jiqin, TAO Guotong, WANG Jinglei, et al. Estimates of agricultural water and soil resources' utilization potential—a case study on Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1378 - 1390. (in Chinese)

- [2] 高鸿永, 伍靖伟, 段小亮, 等. 地下水位对河套灌区生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008(4): 134–138.
GAO Hongyong, WU Jingwei, DUAN Xiaoliang, et al. The impact of water-table on the ecological environment of the Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008(4): 134–138. (in Chinese)
- [3] 王学全, 高前兆, 卢琦. 内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J]. 干旱区资源与环境, 2005(6): 120–125.
WANG Xuequan, GAO Qianzhao, LU Qi. Effective use of water resources and salinity and waterlogging control in the Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005(6): 120–125. (in Chinese)
- [4] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区土壤水溶性盐基离子高光谱综合反演模型[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 344–355.
SUN Ya'nan, LI Xianyu, SHI Haibin, et al. Hyperspectral integrated inverse model for water-soluble salt ions content in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 344–355. (in Chinese)
- [5] LI X, ZHANG C, HUO Z. Optimizing irrigation and drainage by considering agricultural hydrological process in arid farmland with shallow groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124785.
- [6] 王琳琳, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1388–1398.
WANG Linlin, LI Suyan, SUN Xiangyang, et al. Application of salt-isolation materials to a coastal region: effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1388–1398. (in Chinese)
- [7] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 70–78.
YANG Jinsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 70–78. (in Chinese)
- [8] 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其影响因素[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(10): 1000–1005.
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): 1000–1005. (in Chinese)
- [9] 史海滨, 郭珈玮, 周慧, 等. 灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 268–278.
SHI Haibin, GUO Jiawei, ZHOU Hui, et al. Effects of irrigation amounts and groundwater regulation on soil water and salt distribution in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 268–278. (in Chinese)
- [10] 程国栋, 王根绪. 中国西北地区的干旱与旱灾——变化趋势与对策[J]. 地学前缘, 2006(1): 3–14.
CHENG Guodong, WANG Genxu. Changing trend of drought and drought disaster in northwest China and countermeasures[J]. Earth Science Frontiers, 2006(1): 3–14. (in Chinese)
- [11] 杨建锋, 李宝庆, 刘士平, 等. 地下水对农田腾发过程作用研究进展[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 45–49.
YANG Jianfeng, LI Baoqing, LIU Shiping, et al. Review on progress of effects of groundwater on evapotranspiration in farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 45–49. (in Chinese)
- [12] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 1–17.
SHI Haibin, YANG Shuqing, LI Ruiping, et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao Irrigation District: current state and future prospect[J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2020, 39(8): 1–17. (in Chinese)
- [13] 史海滨, 吴迪, 闫建文, 等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 318–331.
SHI Haibin, WU Di, YAN Jianwen, et al. Spatial temporal variation of soil salinity after water saving transformation in salinized irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 318–331. (in Chinese)
- [14] 陈小兵, 杨劲松, 杨朝晖, 等. 渭干灌区灌排管理与水盐平衡研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 59–65.
CHEN Xiaobing, YANG Jinsong, YANG Zhaohui, et al. Irrigation-drainage management and hydro-salinity balance in Weigan River Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 59–65. (in Chinese)
- [15] 姚玲, 杨洋, 孙贯芳, 等. 基于地统计分析的河套灌区地下水埋深与矿化度时空变异规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 111–121.
YAO Ling, YANG Yang, SUN Guanfang, et al. Spatiotemporal variation in depth of groundwater table and water salinity in Hetao Irrigation District estimated using geostatistics[J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2020, 39(8): 111–121. (in Chinese)
- [16] ZHANG Jianfeng, ZHU Yan, ZHANG Xiaoping, et al. Developing a long short-term memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 918–929.
- [17] 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 黑土区玉米地土壤水分的时空变异性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1087–1099.
LIU Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture of corn field in black soil region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1087–1099. (in Chinese)
- [18] 徐英, 王俊生, 蔡守华, 等. 缓坡水平梯田土壤水分空间变异性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 16–19.
XU Ying, WANG Junsheng, CAI Shouhua, et al. Spatial variability of soil moisture in horizontal terrace on slightly sloping land[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 16–19. (in Chinese)
- [19] BROCCA L, MORBIDELLI R, MELONE F, et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2): 356–373.
- [20] 付强, 侯仁杰, 李天霄, 等. 冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 99–110.
FU Qiang, HOU Renjie, LI Tianxiao, et al. Soil moisture-heat transfer and its action mechanism of freezing and thawing soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 99–110. (in Chinese)
- [21] 赵敏, 郭萍, 张妍. 考虑土壤水平平衡的灌区水资源优化配置研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(7): 91–102.
ZHAO Min, GUO Ping, ZHANG Yan. Study on the water optimal allocation in irrigation district based on considering soil

- water balance[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(7): 91–102. (in Chinese)
- [22] 郝芳华, 欧阳威, 岳勇, 等. 内蒙古农业灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 825–831.
HAO Fanghua, OUYANG Wei, YUE Yong, et al. Analysis of water cycle characteristics and soil water movement in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia[J]. Acta Science Circumstantiae, 2008, 28(5): 825–831. (in Chinese)
- [23] 杜丽娟, 刘钰, 雷波. 内蒙古河套灌区解放闸灌域水循环要素特征分析——基于干旱区平原绿洲耗散型水文模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(3): 168–175.
DU Lijuan, LIU Yu, LEI Bo. Analysis on water cycle factors of Jiefangzha Irrigation Area in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia based on runoff-evaporation hydrological model for arid plain oasis[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(3): 168–175. (in Chinese)
- [24] YUE W, LIU X, WANG T, et al. Impacts of water saving on groundwater balance in a large-scale arid irrigation district, Northwest China[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 297–312.
- [25] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31–35.
LI Liang, SHI Haibin, JIA Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 31–35. (in Chinese)
- [26] 李仙岳, 史海滨, 龚雪文, 等. 立体种植农田不同生育期及土壤水分的根系分布特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 140–147.
LI Xianyue, SHI Haibin, GONG Xuewen, et al. Root distribution in strip intercropping field under different growth period and different soil water[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 45(3): 140–147. (in Chinese)
- [27] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲典型地区地下水位与土壤盐分空间分布的指示克立格评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2118–2124.
YAO Rongjiang, YANG Jinsong. The evaluation of the groundwater level and soil salinity spatial distribution in typical areas of the Yellow River Delta[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2007, 26(6): 2118–2124. (in Chinese)
- [28] 戴佳信, 史海滨, 田德龙, 等. 内蒙古河套灌区主要粮油作物系数的确定[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 23–27.
DAI Jiaxin, SHI Haibin, TIAN Delong, et al. Determination of crop coefficients of main grain and oil crops in Inner Mongolia Hetao Irrigated Area[J]. Journal of Irrigation & Drainage, 2011, 30(3): 23–27. (in Chinese)
- [29] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999(3): 311–318.
LEI Zhidong, HU Heping, YANG Shixiu. A review of soil water research[J]. Advances in Water Science, 1999(3): 311–318. (in Chinese)
- [30] 杨玉玲, 文启凯, 田长彦, 等. 土壤空间变异研究现状及展望[J]. 干旱区研究, 2001(2): 50–55.
YANG Yuling, WEN Qikai, TIAN Changyan, et al. The status quo and prospect of spatial variability of soil[J]. Arid Zone Research, 2001(2): 50–55. (in Chinese)
- [31] 岳卫峰, 孟恺恺, 侯凯旋, 等. 河套灌区地下水埋深时空变异特征及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 81–89.
YUE Weifeng, MENG Kaikai, HOU Kaixuan, et al. Study on spatial and temporal variation of groundwater depth and its influencing factors in Hetao Irrigation District[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 81–89. (in Chinese)
- [32] XU Xu, HUANG Guanhua, QU Zhongyi, et al. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River Basin[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98: 301–313.
- [33] REN Dongyang, XU Xu, BERNARD E, et al. Growth responses of crops and natural vegetation to irrigation and water table changes in an agro-ecosystem of Hetao, upper Yellow River Basin: scenario analysis on maize, sunflower, watermelon and tamarisk[J]. Agricultural Water Management, 2018, 199: 93–104.
- [34] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 22–31.
LI Ruiping, SHI Haibin, TAKEO Akai, et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat and water model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 22–31. (in Chinese)
- [35] 周和平, 王忠. 干旱灌区有效降雨量利用率研究[J]. 节水灌溉, 2010(12): 44–46.
ZHOU Heping, WANG Zhong. Study on effective rainfall use efficiency in arid irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2010(12): 44–46. (in Chinese)
- [36] JIE Z, VAN H, BENDEL D, et al. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations[J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(8): 1487–1502.
- [37] 杨玉峥, 林青, 王松禄, 等. 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 547–557.
YANG Yuzheng, LIN Qing, WANG Songlu, et al. Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 547–557. (in Chinese)
- [38] 宫兆宁, 宫辉力, 邓伟, 等. 浅埋条件下地下水-土壤-植物-大气连续体中水分运移研究综述[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1): 365–373.
GONG Zhaoning, GONG Huili, DENG Wei, et al. An overview of water movement in groundwater-soil-plant-atmosphere continuum with shallow watertable[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(Suppl. 1): 365–373. (in Chinese)
- [39] 王水献, 董新光, 吴彬, 等. 干旱盐渍土区土壤水盐运动数值模拟及调控模式[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 142–148.
WANG Shuixian, DONG Xinguang, WU Bin, et al. Numerical simulation and control mode of soil water and salt movement in arid salinization region[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 142–148. (in Chinese)
- [40] 陈亚新, 史海滨, 田存旺. 地下水与土壤盐渍化关系的动态模拟[J]. 水利学报, 1997, 28(5): 78–84, 36.