

韩天凯, 丁雪华, 潘春洋, 等. 节水改造对沈乌灌域不同地貌浅层地下水埋深的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 620-629.

HAN Tian-kai, DING Xue-hua, PAN Chun-yang, et al. Influence of water saving reform on the depth of shallow groundwater of different landforms in Shenwu irrigation areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 620-629.

节水改造对沈乌灌域不同地貌浅层地下水埋深的影响

韩天凯, 丁雪华*, 潘春洋, 刘 月

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要:为了揭示节水改造对区域地下水埋深的影响,以沈乌灌域44眼地下水观测井资料为基础,研究节水改造下地下水动态演变趋势。结果表明:整个灌域地下水埋深受灌溉影响明显,夏灌和秋浇后整个灌域地下水埋深都有上升趋势,秋浇后灌域大部分地区地下水埋深处于最浅值,有一定的周期性变化规律,但灌域中心地区存在深埋区,对于地下水资源要加强管控;节水改造后,各渠系下游耕地地区平均埋深降幅(12.46%)大于上游耕地地区平均埋深降幅(7.13%),最大埋深平均降幅(16.54%)大于最小埋深平均降幅(15.78%);荒地区、湖泊旁地区和林地区的地下水平均埋深分别下降0.33、0.24 m和0.36 m。研究表明,节水改造对耕地地区、荒地区、湖泊旁和林地区影响较明显,对盐碱区和渠道旁地区影响较微弱。

关键词:节水改造;浅层地下水埋深;沈乌灌域;地貌;渠系

中图分类号:S273.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)05-0620-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0352

Influence of water saving reform on the depth of shallow groundwater of different landforms in Shenwu irrigation areas

HAN Tian-kai, DING Xue-hua*, PAN Chun-yang, LIU Yue

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

Abstract: The water-saving reform project is currently being carried out in the Shenwu irrigation area of the Hetao irrigation district. The implementation of this project will definitely affect the groundwater environment. The purpose of the present study was to reveal the effects of water saving reform on the buried depth of regional groundwater. Based on data from 44 groundwater observation wells in the Shenwu irrigation area, the present study began by assessing the dynamic evolution of groundwater under water saving reform. The results showed that the buried depth of groundwater of the entire irrigation area was clearly affected by irrigation. After summer and autumn irrigation, the buried depth of groundwater in the entire irrigation area tended to increase. The buried depth of groundwater was the shallowest after the autumn irrigation in most regions of the irrigation area. A certain periodic variation in depth was noted, but deep buried areas were present in the central regions of the irrigation area, and groundwater resources should be managed more frequently. After water saving reforms were implemented, the range of decrease in the average buried depth of the downstream arable areas of each canal system (12.46%) was larger than that for the upstream arable area (7.13%); the averaged range of decrease of the maximum buried depth (16.54%) was larger than the averaged range of decrease of the minimum buried depth (15.78%). The average buried depth of groundwater in the abandoned, lakeside, and forest areas decreased by 0.33, 0.24 m, and 0.36 m, respectively. Studies have shown that the influence of water-saving reform on arable, abandoned, lakeside, and forest areas is more obvious, and that these reforms have little impact on saline-alkali areas and channel areas.

Keywords: water saving reform; shallow groundwater depth; Shenwu irrigation area; landforms; canal system

收稿日期:2018-12-06 录用日期:2019-03-19

作者简介:韩天凯(1992—),男,硕士研究生,主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail:nmndhantiankai@163.com

*通信作者:丁雪华 E-mail:nmnddxh@126.com

基金项目:内蒙古黄河干流水权盟市间转让河套灌区沈乌灌域试点区域生态环境、田间节水效果跟踪评估项目;国家自然科学基金项目(51469021)

Project supported: Tracking and Assessment of Ecological Environment and Field Water Saving Effect in the Experimental Area of Shenwu Irrigation Area in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia Yellow River; The National Natural Science Foundation of China(51469021)

地下水对区域环境、农业生产等具有重要的作用,是自然植被、农作物的重要水源之一^[1-2]。在干旱半干旱地区,农业生产采用大面积渠系灌溉的方式,地表水成为地下水最主要的补给源^[3]。地下水埋深较浅,容易诱发土壤盐渍化^[4-5],而地下水埋深较深,会破坏生态环境,导致荒漠化^[6]。目前有关地下水埋深动态变化的研究,大部分为农业灌溉等人为活动与降水、蒸发、气温等自然因素的结合^[7]。当埋深较浅时,优势植被生长良好,当地下水埋深持续下降时,植被由水生生物逐渐向旱生生物演替^[8],并且天然植被的种群多样性、覆盖度等也受地下水位影响明显^[9-12]。当前,全国各类灌区普遍通过扩大灌溉面积、渠道衬砌等行为改变地下水的补给条件^[13-15],加之对地下水不合理的开采和利用,导致地下水埋深逐年下降,甚至出现大面积漏斗区,对当地生态环境造成了严重破坏^[16-19]。因此,地下水资源的开发与利用成为国内外研究的热点问题之一。

人类活动是导致浅层地下水变化的决定性因素^[20],随着农业现代化水平的不断提高,农耕方式和方法不断改变,区域地下水环境也随之改变。因此,本文以河套灌区沈乌灌域为例,分析节水改造后灌域浅层地下水埋深的动态变化过程,结合灌溉期探究地下水的变化趋势,以揭示节水改造对区域浅层地下水埋深的影响规律,为区域地下水资源的合理开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

河套灌区为长期下沉的断陷盆地,是黄河多次改道而形成的冲积平原,地下水为潜水。沈乌灌域是河套灌区的重要组成部分,且为河套平原与乌兰布和沙漠的交接地区,其地质条件以沙地为主,地势平缓,由东南向西北倾斜,地处内蒙古自治区西部巴彦淖尔市和阿拉善盟境内。地理坐标为 40°08′~40°28′N, 106°52′~107°04′E,土地总面积约 19.14 万 hm²,其中灌溉面积约 5.81 万 hm²。冬季严寒少雪,夏季高温干燥,蒸发大,降雨少,无霜期短,土壤封冻期长,月气温及日气温差均大,多年平均降水量仅 144 mm 左右,为典型的温带大陆性气候区。农业灌溉为引黄灌溉,整个沈乌灌域有 2 条引水干渠和 2 条排水沟,具有独立的引排水结构,农业灌溉渗漏为地下水主要的补给源。

2016—2017 年,灌域实施了渠道衬砌、畦田改造、增加地下水滴灌等节水和优化输配水供应措施。渠道衬砌加快了输水能力,减少了输水过程中的渗漏

损失;畦田改造改善了灌水效率,降低了单位面积平均灌水量;地下水滴灌加大了地下水开采量。根据当地灌域管理局提供的引排水资料,对比灌域 2009—2017 年引排水量(图 1)发现,引水量总体呈下降趋势,排水量呈增长趋势(2016 年出现强降水),区域水资源总量已有明显改变。

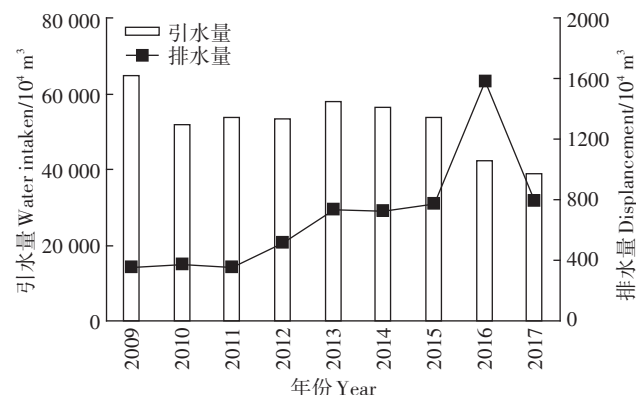


图 1 灌区引排水量

Figure 1 Drainage volume of the irrigation area

1.2 研究方法

为监测节水改造对灌域地下水的影响,节水改造开始时在灌域布置了 44 眼深 10 m 的浅层观测井,通过人工测量的方法观测地下水埋深,对整个灌域进行监测。每 5 d 观测一次,每月求其平均值。按照灌溉制度,全年分为作物生育的夏灌期(5—8 月)、洗盐保墒的秋浇期(10 月中旬—11 月中旬)和非灌溉期,根据不同的地貌特征,将灌域分为耕地、林地、湖泊旁、渠道旁、盐碱地和荒地区,探索不同灌溉期及不同地貌区灌溉制度对地下水埋深的影响(图 2)。

1.3 数据分析

数据处理采用 Microsoft Excel 2016、ArcGIS 10.3 软件进行分析。通过 ArcGIS 中插值分析,对已知点样本赋予权重求得未知样点值,对区域整体进行分析,插值分析公式为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

式中: $Z(x_i)$ 为第 i 个位置处的测量值; λ_i 为第 i 个位置处的测量值的未知权重; X_0 为预测的位置; N 为已知样本点的数目。

2 结果与分析

2.1 灌域地下水埋深变化

利用 ArcGIS 克里金插值,分别对年初、夏灌前

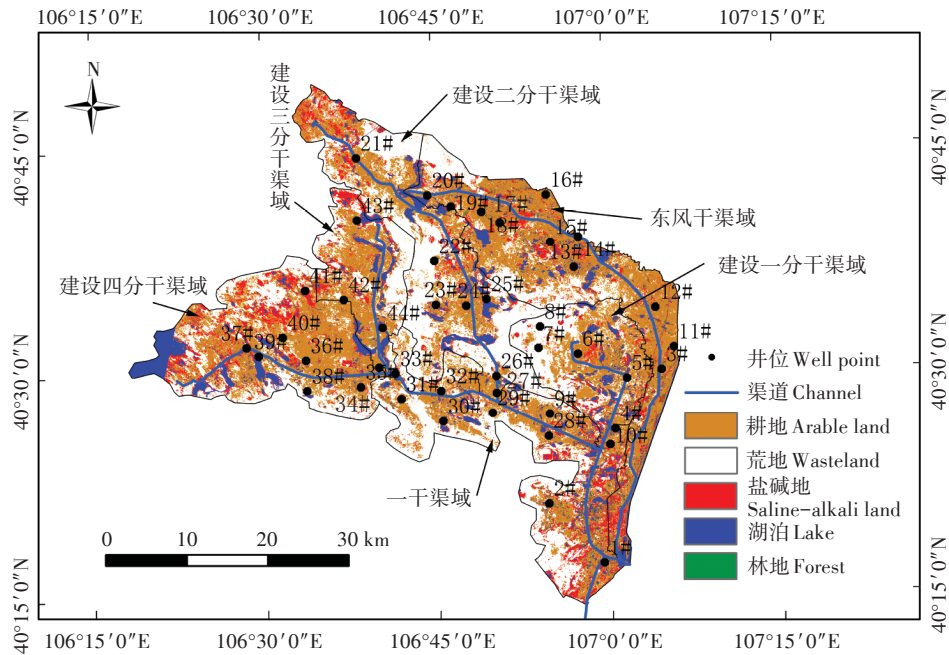


图2 地貌及地下水观测井分布
Figure 2 Landform and groundwater observation well distribution

后、秋浇前后、年底整个灌域地下水埋深进行插值,分析其变化规律(图3)。在夏灌前,整个灌域地下水埋深变化较小,灌域大部分地区地下水埋深处于1.5~3 m,中部地区平均埋深为3~5 m,中部中心区埋深较深,达到5 m以上。对比夏灌前与年初地下水埋深,多处小区域上升至1.5 m,中部偏北埋深小于5 m区域变小,西北部与东南部地下水埋深变浅,上升至1.5~3 m;夏灌期后,灌域中部偏东地区地下水埋深上升至1.5~3 m,中部偏西3~5 m埋深区域变大,小于1.5 m埋深区域变小。秋浇前,灌域大部地区地下水埋深为3~5 m,埋深小于1.5 m仅为中部偏北一小区域;秋浇后,地下水埋深大幅上升,中部埋深为3~5 m的区域变小,大部分地区上升至3 m,出现大面积埋深小于1.5 m地区。西北部、北部多处埋深甚至上升至1 m,但南部边缘出现埋深大于5 m区域。至年底,大部分地下水埋深低于3 m,中部3~5 m埋深区域增大,南部边缘地区埋深超过5 m区域进一步增加,低于1.5 m埋深区域变小。

通过分析不同时期灌域地下水埋深的分布发现,除中心地区外,灌域其他地区地下水埋深受灌溉影响明显,而中心地区较其他地区存在一个明显的深埋区域,其地下水埋深较深,且灌溉对其影响较小,灌域南部边缘也出现埋深较深区域,需要加强管控,谨防深埋区的进一步扩大。

2.2 不同渠系耕地区地下水埋深变化

2.2.1 耕地区地下水埋深变化规律

根据灌域灌溉特点,按不同的灌溉时间及灌溉用途分为夏灌与秋浇两个时期。灌域由东风干渠、一干渠2条干渠和建设一分干、建设二分干、建设三分干、建设四分干4条分干渠组成,故将整个灌域分为6个渠系灌域。对不同渠系灌域耕地区地下水埋深变化,将其分为上游耕地区与下游耕地区进行对比分析,东风干渠因渠系较长,分为上游耕地区、中游耕地区与下游耕地区进行分析,结果见图4。

整个农田区地下水埋深的年内变化规律在秋浇前较为一致,均为2—4月先下降,5—6月有明显升高,之后又下降,9月后变化较为复杂。2016年不同渠系灌域中,除一干渠下游、建设二分干下游与建设四分干外,其他渠系灌域地下水埋深都呈出“W”型的变化趋势,5—6月和10—11月都有明显升高;建设二分干下游与建设四分干渠系灌域埋深仅在5—6月有一次明显升高,全年变化较为平缓。2017年不同渠系灌域中,建设二分干上游、建设三分干、东风干渠上游渠系灌域地下水埋深依然呈现“W”型的变化趋势;一干渠、建设一分干与东风干渠下游渠系灌域地下水埋深呈现倒“V”型的变化趋势,仅5—6月有明显升高;建设四分干与2016年变化相似,建设二分干下游区有明显下降。

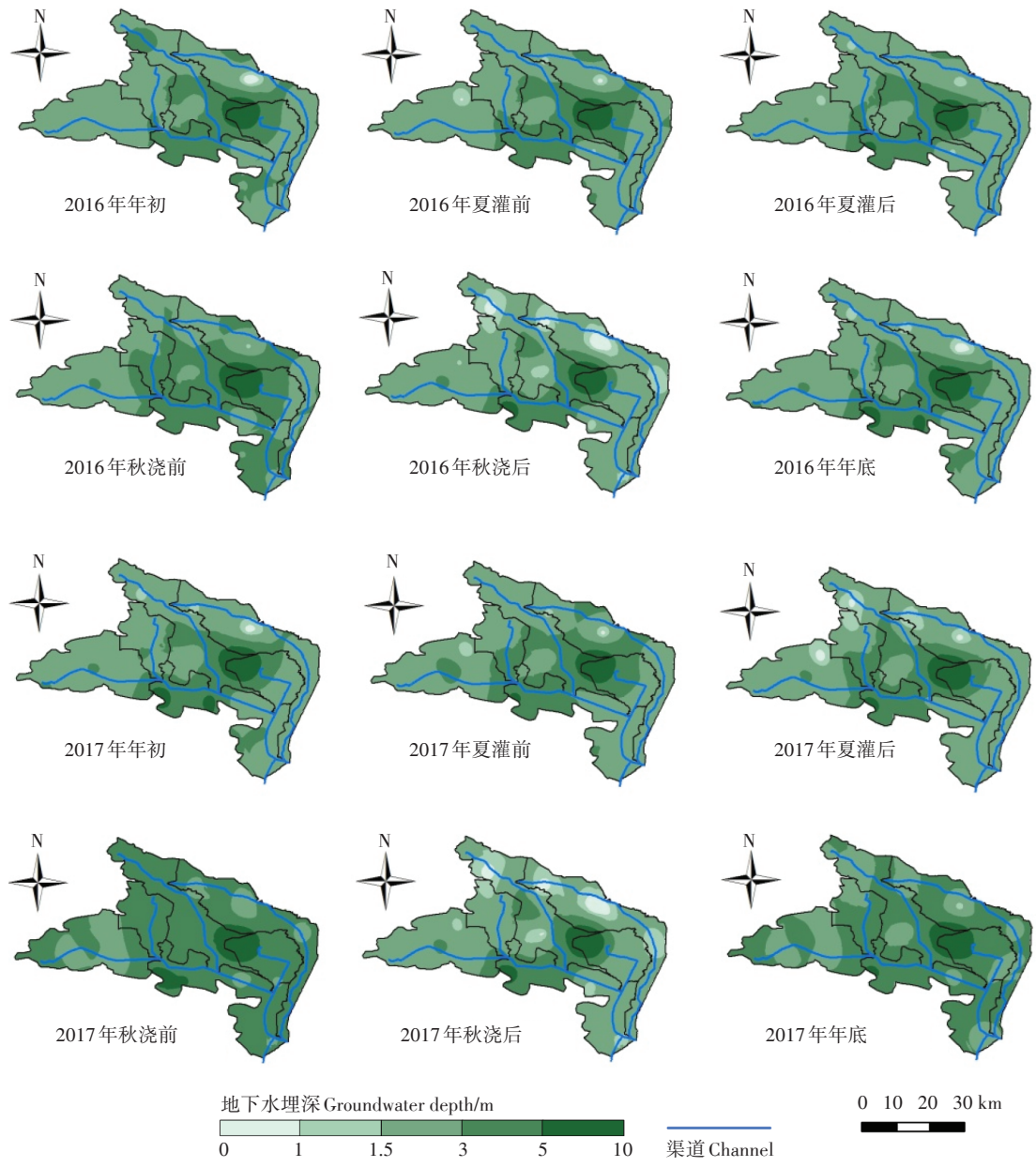


图3 全灌域地下水埋深变化
Figure 3 Variation of groundwater depth in the whole irrigation area

对比2016年不同渠系灌域上下游地下水埋深变化,发现每个渠系灌域上游区域地下水埋深变化维持在较浅埋深的时期较下游区域时间更长。灌域夏灌期为四水轮灌,分别于4—7月每月月底,但2016年一干渠6月底灌溉延迟至7月初,一分干7月底灌溉延迟至8月初,故导致地下水埋深出现二次上升,5—8月地下水埋深较浅时期其他渠系灌域下游较上游下降速度更快;10—11月,上游渠系灌域一干渠、建设一分干、建设二分干、建设三分干与东风干渠地下水埋深均能上升至当年最浅埋深或者超过当年最浅埋深,下游渠系灌域仅有东风干渠下游地区超过当年最

浅埋深,说明2016年各渠系灌域上游区域地下水埋深受补给更加明显。

对比2017年不同渠系灌域上下游地下水埋深变化,建设一分干、建设三分干、建设四分干、东风干渠上下游和一干渠上游地下水埋深变化与2016年较为相似,而一干渠下游和建设二分干下游区域有明显下降。10—11月仅有一干渠上游、建设二分干上游和东风干渠上游地下水埋深上升至当年最浅埋深或超过当年最浅埋深,建设一分干下游和东风干渠下游地下水埋深持续下降。

2.2.2 耕地区节水改造前后地下水埋深变化

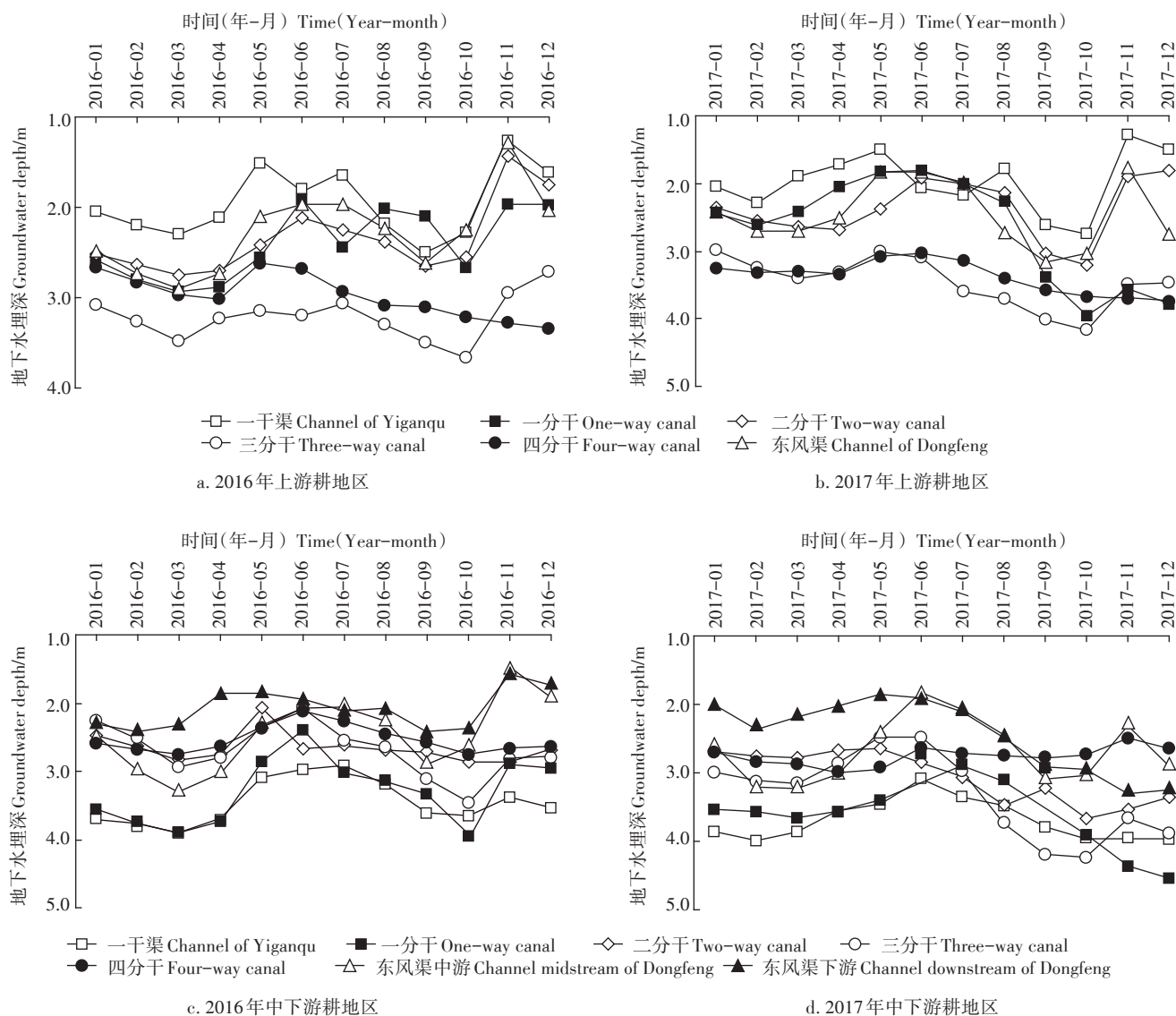


图4 耕地区地下水埋深变化

Figure 4 Groundwater depth variation in arable areas

对比2016年与2017年耕地区地下水埋深变化(表1),整个灌域地下水平均埋深有所下降,降幅为0.82%~23.01%。但对比最大埋深和最小埋深,最大埋深下降更为明显,其中建设一分干、建设二分干下游、建设三分干和东风干渠下游最大埋深下降超过0.5 m,而最小埋深下降超过0.5 m的仅有建设二分干下游。对比上下游地下水埋深均值变化,上游地区平均下降0.19 m,而下游地区平均下降超过0.34 m,下游地区下降更为明显。下游地区除一干渠和建设四分干渠灌域外地下水最大埋深下降均超过0.5 m,而最小埋深除一干渠域外下降均超过0.3 m。对比整个耕地区地下水埋深变异系数的变化,2016年变异系数为7.84%~22.06%,2017年为4.87%~29.09%;按照

不同灌域渠系对比,大部分上游地区变异性大于下游地区,仅有建设三分干下游地区变异性大于上游地区。但分析2017年变异系数变化,大部分地区2017年变异系数较2016年变幅都在 $\pm 5\%$ 以内,仅有建设一分干下游和东风干渠变幅超过5%,分别增加了13.02%和7.39%,原因是其最大埋深都有了大幅度下降。

2.3 荒区、盐碱区等地貌区地下水埋深分析

将灌域耕地区以外的地区分为荒区、盐碱区、渠道旁地区、湖泊旁区和林区,这些区域地下水资源主要来自灌溉后的侧渗补给,对其地下水埋深变化分别进行分析。

2.3.1 荒区、盐碱区等地貌区地下水埋深变化规律

荒区地下水埋深变化较小(图5),其中两处地下

表1 耕地地区地下水埋深统计
Table 1 Statistics of groundwater depth in farmland area

渠系 Canal system		均值		最大埋深		最小埋深		变幅		变异系数	
		Average value/m		Maximum depth/m		Minimum depth/m		Variable amplitude/m		CV/%	
		2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
一干渠 Channel of Yiganqu	上游 Upstream	1.96	1.97	2.50	2.75	1.26	1.29	1.24	1.46	19.37	22.76
	下游 Downstream	3.46	3.70	3.91	4.00	2.92	3.09	0.99	0.92	9.77	8.02
建设一分干 One-way canal of Jianshe	上游 Upstream	2.40	2.68	2.93	3.94	1.92	1.80	1.01	2.14	16.07	29.09
	下游 Downstream	3.29	3.52	3.95	4.54	2.39	2.74	1.56	1.80	14.87	15.85
建设二分干 Two-way canal of Jianshe	上游 Upstream	2.34	2.39	2.74	3.22	1.44	1.81	1.30	1.41	17.14	19.09
	下游 Downstream	2.66	3.06	2.87	3.66	2.08	2.66	0.80	1.00	8.08	12.31
建设三分干 Three-way canal of Jianshe	上游 Upstream	3.22	3.46	3.66	4.17	2.72	2.98	0.94	1.19	7.94	10.86
	下游 Downstream	2.70	3.32	3.47	4.25	2.06	2.48	1.41	1.77	14.25	18.44
建设四分干 Four-way canal of Jianshe	上游 Upstream	2.98	3.38	3.33	3.72	2.62	3.04	0.71	0.68	8.11	7.17
	下游 Downstream	2.54	2.76	2.74	2.99	2.13	2.50	0.61	0.49	7.84	4.87
东风干渠 Main channel of Dongfeng	上游 Upstream	2.27	2.45	2.90	3.17	1.28	1.77	1.63	1.40	19.99	19.87
	中游 Midstream	2.43	2.66	3.26	3.20	1.48	1.83	1.78	1.37	22.06	17.43
	下游 Downstream	2.07	2.42	2.43	3.26	1.56	1.87	0.86	1.39	13.94	21.33

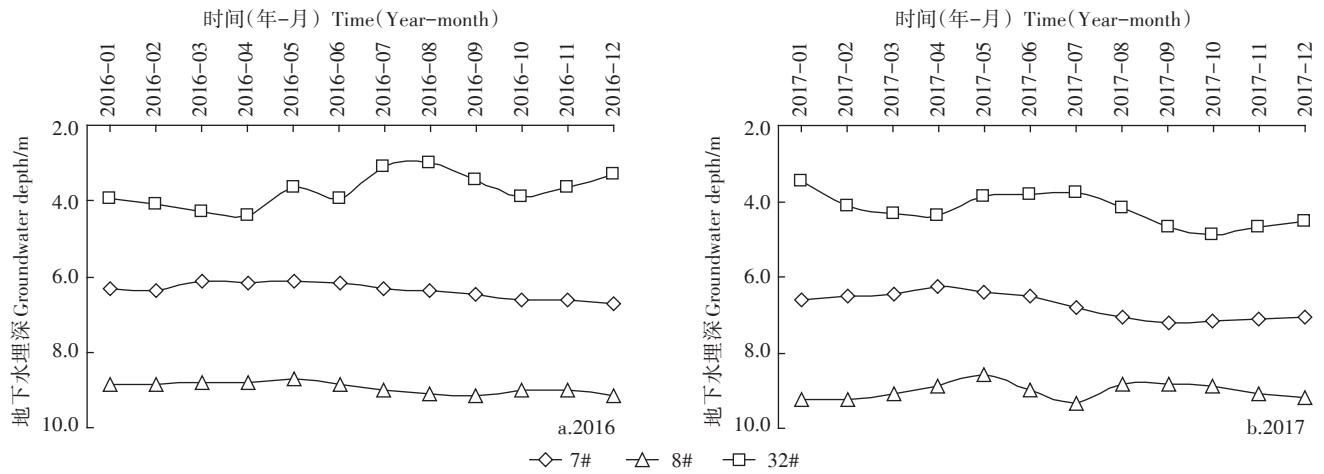


图5 荒区地下水埋深变化
Figure 5 Groundwater depth variation in abandoned areas

水埋深超过6 m的荒地区全年变化较为微弱,而32#处理深相对较浅,变幅相对较明显。对比2016年与2017年三处荒区地下水埋深变化,32#处地下埋深虽然在4—8月有所上升,但地下水埋深总体呈现下降趋势。

盐碱区地下水埋深变化非常明显(图6),在4—8月和11月左右有明显的上升。对比2016年与2017年盐碱区地下水埋深变化,4—8月地下水埋深都有明显上升,但2017年11月地下埋深上升幅度较2016年同期有所下降。盐碱区变化最明显为21#处地下水埋深,2016年年初时埋深较深,但之后上升非常明显,2017年9—10月大幅下降,11月大幅上升。

渠道旁地区地下水埋深变化非常明显(图7),5月和11月左右都有明显上升,其波动幅度很大,随着灌溉期的变化而变化。四处湖泊区地下水埋深随着灌溉期变化而变化(图8),两处地下水埋深小于3 m的湖泊旁地区变幅较大,而另外两处理深大于3 m的地区变化较为平缓。林区地下埋深变化幅度较小(图9),但31#处2016年10月后有明显下降,2017年3月后又恢复正常。

2.3.2 荒区、盐碱区等地貌区节水改造前后地下水埋深变化

对比2016年与2017年荒区、盐碱区、渠道旁地区、湖泊旁区和林区等地貌地下水埋深变化(表2),

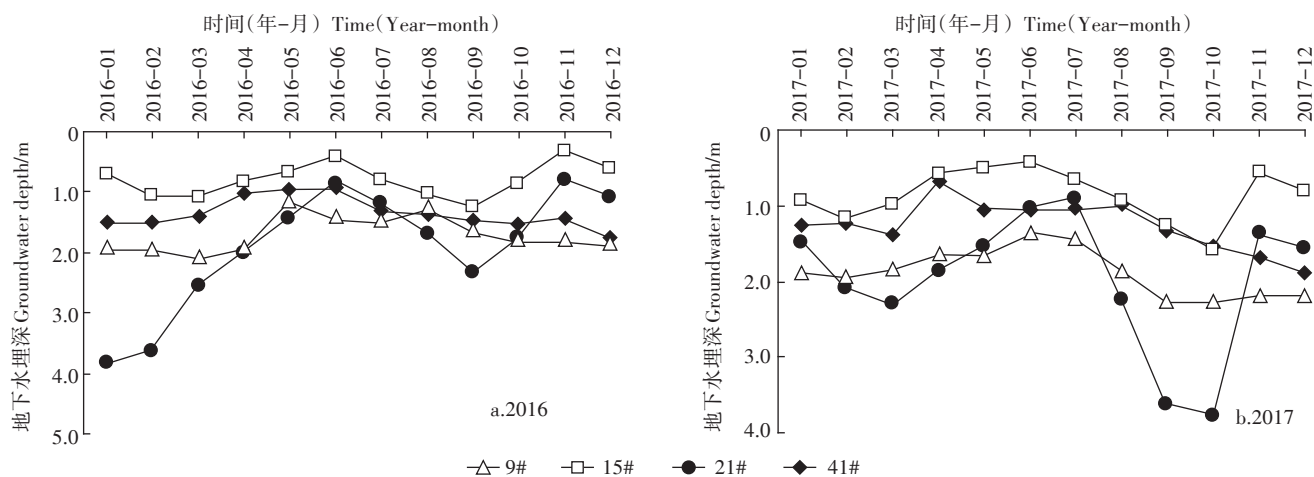


图6 盐碱区地下水埋深变化

Figure 6 Groundwater depth variation in saline-alkali areas

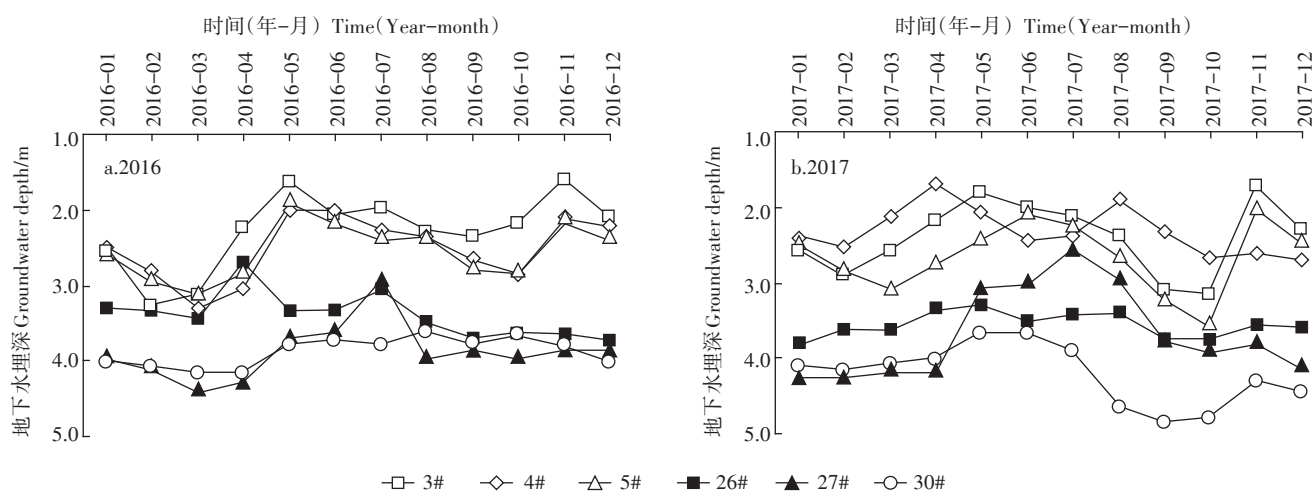


图7 渠道旁区地下水埋深变化

Figure 7 Groundwater depth variation in areas next to the channel

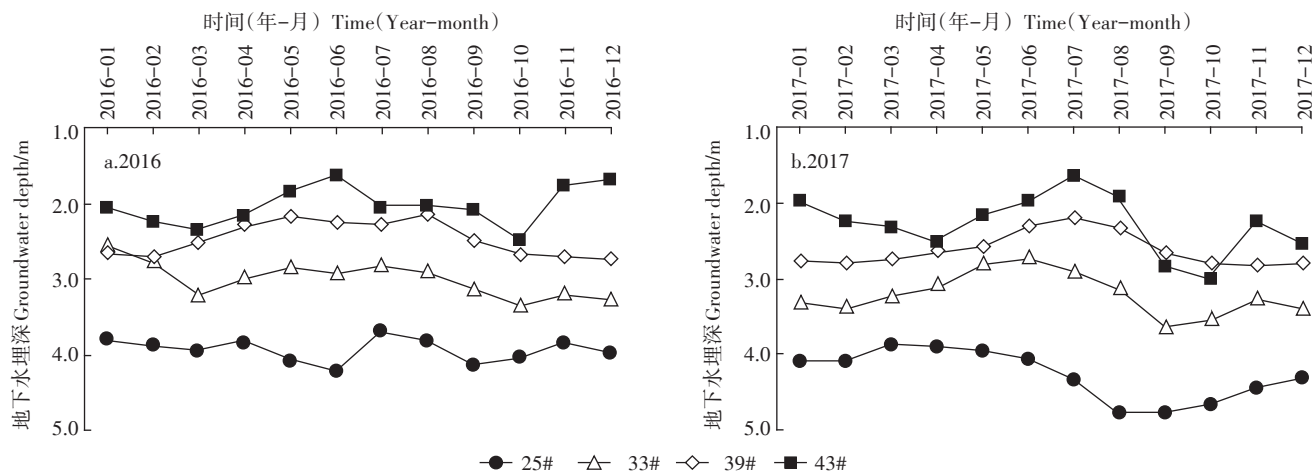


图8 湖泊旁区地下水埋深变化

Figure 8 Groundwater depth variation in lakeside areas

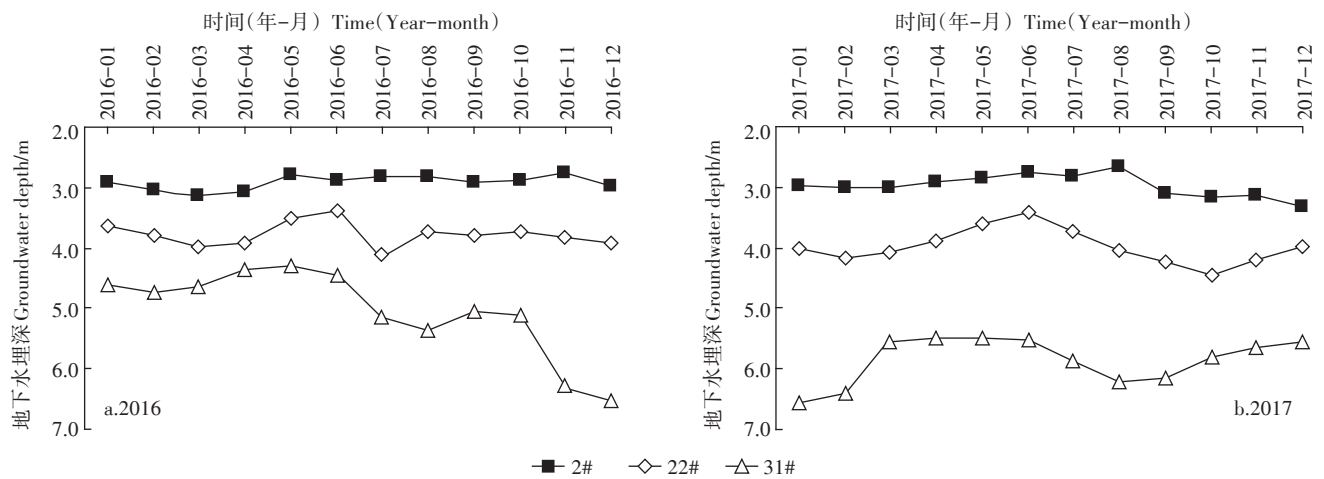


图9 林区地下水埋深变化
Figure 9 Groundwater depth variation in forest areas

表2 荒地、盐碱地区等地貌区地下水埋深统计
Table 2 Statistis of groundwater depth in abandoned and saline-alkali areas, etc.

地貌区 Landforms	均值 Average value/m		最大埋深 Maximum depth/m		最小埋深 Minimum depth/m		变幅 Variable amplitude/m		变异系数 CV/%	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
荒地 Abandoned land	6.34	6.67	9.18	9.35	2.97	3.49	6.21	5.86	5.71	5.87
盐碱地 Saline-alkali land	1.44	1.51	3.82	3.76	0.33	0.43	3.49	3.33	38.10	31.82
渠道旁 Next to the channel	3.07	3.13	4.38	4.85	1.60	1.69	2.78	3.16	12.94	13.56
湖泊旁 Lakeside	2.86	3.10	4.23	4.78	1.63	1.66	2.60	3.12	8.53	10.54
林地 Forest land	3.91	4.27	6.52	6.55	2.76	2.68	3.76	3.87	7.85	6.67

2017年地下水平均埋深较2016年下降0.06~0.36 m,降幅为2%~9%。其中荒区地下水平均埋深和最小埋深都有明显下降,且下降超过0.3 m,最大埋深下降超过0.15 m。盐碱地区平均埋深和最小埋深略有下降,最大埋深略有上升,两年的变异系数分别达到38.10%和31.82%,说明地下水埋深年内变化剧烈。渠道旁平均埋深和最小埋深略有下降,但最大埋深明显下降0.47 m。湖泊旁地下水平均埋深和最大埋深下降0.24 m和0.55 m,最小埋深变化较小,变异系数小幅增长。林地地下水平均埋深明显下降了0.36 m,但最大埋深和最小埋深变化微弱,变异系数也略有降低。

3 讨论

地下水埋深是生态环境优劣的决定性因素^[21]。2016—2017年河套灌区沈乌灌域不同地貌区平均埋深为:耕地 1.96~3.70 m,荒地 6.34~6.67 m,盐碱地 1.44~1.51 m,林地 3.91~4.27 m,与已有研究定义的盐渍化埋深、农田适宜埋深、生态适宜埋深、荒漠化埋深

相符^[22-25]。但对于以灌溉为主要补给源的区域,灌溉对盐碱地区的地下水埋深影响较大,地下水埋深越浅,土壤盐分越高^[26],灌溉期盐碱地地下水位升高加重了盐碱地的盐渍化程度,需在灌溉期调节用水量,加强排水;荒地区在节水改造后地下水埋深有明显下降,说明节水改造对其影响明显,对于荒地区需要加强地下水资源的管控,防止其埋深持续下降,环境出现恶化;耕地区在节水改造后地下水埋深也有所下降,但灌溉期地下水埋深有明显升高,处于农田适宜埋深范围,且对于盐碱化防控也较为有利^[27];林地区在节水改造后平均地下水埋深也有明显下降,其地下水平均埋深超过3 m,对于幼树生长不利^[28];渠道旁地区地下水埋深随灌溉来水的变化而变化;湖泊旁地区地下水平均埋深也有明显下降。

地下水的运动是一个缓慢的过程,地下水可以通过跨年度的补给使之维持在多年平均水平,由于节水改造工程刚刚完成,且缺乏长期的地下水埋深资料,所以本文仅能表观上对节水改造前后两年地下水埋深的变化进行分析,对于节水改造后沈乌灌域地下水

埋深的变化趋势,需要进一步观测。

4 结论

(1)从灌域整体看,整个灌域地下水埋深在灌溉期上升、非灌溉期下降,有一定的周期性变化。灌域中心地区存在一个明显的深埋区,全年埋深较深,且灌溉对其影响较小,需要加强该地区的水资源管控,防止埋深持续下降,以及深埋区面积增大。

(2)对于不同渠系耕地区,平均埋深都有所下降,但下游地区平均埋深降幅(12.46%)大于上游地区平均埋深降幅(7.13%),最大埋深平均降幅(16.54%)大于最小埋深平均降幅(15.78%)。

(3)对于不同地貌地区,节水改造对荒地区的地下水埋深影响较大,平均埋深下降0.33 m;湖泊旁地区和林地区平均埋深也有明显下降,分别下降0.24 m和0.36 m;盐碱地和渠道旁区地下水埋深变化微弱。

参考文献:

- [1] Ahmad M U D, Bastiaanssen W G M, Feddes R A. Sustainable use of groundwater for irrigation: A numerical analysis of the subsoil water fluxes[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 51(3): 227-241.
- [2] 赵文智, 周宏, 刘鹄. 干旱区包气带土壤水分运移及其对地下水补给研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(9): 908-918.
ZHAO Wen-zhi, ZHOU Hong, LIU Hu. Advances in moisture migration in vadose zone of dryland and recharge effects on groundwater dynamics[J]. *Earth Science Progress*, 2017, 32(9): 908-918.
- [3] 杨鹏年, 吴彬, 王水献. 内陆干旱灌区地下水位调控研究[J]. *节水灌溉*, 2010(7): 57-58, 62.
YANG Peng-nian, WU Bin, WANG Shui-xian. Study on groundwater table control in inland arid area[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010(7): 57-58, 62.
- [4] Zhang Z, Hu H, Tian F, et al. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(10): 3951-3967.
- [5] 杨瑞珍, 毕于运. 我国盐碱化耕地的防治[J]. *干旱区资源与环境*, 1996, 10(3): 22-30.
YANG Rui-zhen, BI Yu-yun. Transformation of salinized farmlands in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1996, 10(3): 22-30.
- [6] 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, 22(4): 134-138.
GAO Hong-yong, WU Jing-wei, DUAN Xiao-liang, et al. The impact of water-table on the ecological environment of Hetao irrigation area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(4): 134-138.
- [7] 陆垂裕, 孙青言, 李慧, 等. 基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给评价[J]. *水利学报*, 2014, 45(6): 701-711.
LU Chui-yu, SUN Qing-yan, LI Hui, et al. Evaluation of groundwater recharge in arid and semi-arid areas based on water cycle simulation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(6): 701-711.
- [8] 王存良, 李瑛, 曾磊, 等. 地下水开采条件下苏贝淖流域植被演替模型与演替过程分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(11): 6773-6775.
WANG Cun-liang, LI Ying, ZENG Lei, et al. Analysis on vegetation succession model and process under groundwater exploitation in Subei Lake watershed[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(11): 6773-6775.
- [9] Zhu Y H, Chen Y N, Ren L L, et al. Ecosystem restoration and conservation in the arid inland river basins of northwest China: Problems and strategies[J]. *Ecological Engineering*, 2016(94): 629-637.
- [10] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 地下水与植被关系的研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(5): 36-40, 44.
MA Yu-lei, WANG De, LIU Jun-min, et al. Research progress on relation between groundwater and vegetation[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(5): 36-40, 44.
- [11] 朱军涛, 于静洁, 王平, 等. 额济纳荒漠绿洲植物群落的数量分类及其与地下水环境的关系分析[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 480-489.
ZHU Jun-tao, YU Jing-jie, WANG Ping, et al. Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater environment in the Ejina desert oasis of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(5): 480-489.
- [12] 徐伟东. 地下水与植被关系研究[J]. *能源与节能*, 2016(4): 97-98, 112.
XU Wei-dong. Study on the relationship between groundwater and vegetation[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2016(4): 97-98, 112.
- [13] Yamamoto T, Jalalidin A, Maimaidi A, et al. Land reclamation and water management in an arid region: A case study of Xayar County in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2010, 134: 3-14.
- [14] Scanlon B R, Jolly I, Sophocleous M, et al. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(3): 1-18.
- [15] 张文化, 魏晓妹, 李彦刚. 气候变化与人类活动对石羊河流域地下水动态变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 183-187.
ZHANG Wen-hua, WEI Xiao-mei, LI Yan-gang. Groundwater dynamic evolution under climatic change and human activities in Shiyang River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(1): 183-187.
- [16] Wade Y, van Beek L P H, van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): 1-5.
- [17] 张向飞, 周维博, 云涛, 等. 渭北旱塬区地下水动态研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(1): 89-93.
ZHANG Xiang-fei, ZHOU Wei-bo, YUN Tao, et al. Dynamic research on groundwater in Weibei upland[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(1): 89-93.

- es and Water Engineering, 2012, 23(1):89-93.
- [18] 杜伟, 魏晓妹, 李萍, 等. 变化环境下灌区地下水动态演变趋势及驱动因素[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(11):993-999.
- DU Wei, WEI Xiao-mei, LI Ping, et al. Dynamic evolutionary tendency of groundwater in irrigation district in changing environment and its driving factors[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(11):993-999.
- [19] 刘瑞全, 郭凤丽. 科左中旗地下水动态分析与预测[J]. 内蒙古水利, 2016(3):21-22.
- LIU Rui-quan, GUO Feng-li. Groundwater dynamic analysis and prediction in Kezuo Zhong Banner[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2016(3):21-22.
- [20] 聂思雨, 孙晓庆, 卞建民. 土地利用变化对地下水位空间分布的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(7):1060-1064.
- NIE Si-yu, SUN Xiao-qing, BIAN Jian-min. Impact of land use changes on spatial distribution of groundwater level[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2017, 38(7):1060-1064.
- [21] 杨泽元, 王文科, 王雁林, 等. 干旱半干旱区地下水引起的表生生态效应及其评价指标体系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3):105-111.
- YANG Ze-yuan, WANG Wen-ke, WANG Yan-lin, et al. Research on supergene eco-effect induced by groundwater in arid and semi-arid regions and its assessment index system[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3):105-111.
- [22] Cui Y L, Shao J L. The role of ground water in arid/semiarid ecosystems, northwest China[J]. *Groundwater*, 2005, 43(4):471-477.
- [23] 樊自立, 陈亚宁, 李和平, 等. 中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2):1-5.
- FAN Zi-li, CHEN Ya-ning, LI He-ping, et al. Determination of suitable ecological groundwater depth in areas in northwest China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(2):1-5.
- [24] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(5):44-48.
- KONG Fan-rui, QU Zhong-yi, LIU Ya-jun, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water, salinity and crop growth[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5):44-48.
- [25] 赵秀芳. 地下水埋深对额济纳绿洲植被生态需水量的影响研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2008.
- ZHAO Xiu-fang. Study on the impact of groundwater depth to vegetation ecological water requirement in Ejina Oasis[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [26] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4):198-206.
- GUAN Xiao-yan, WANG Shao-li, GAO Zhan-yi, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4):198-206.
- [27] 崔亚莉, 邵景力, 韩双平. 西北地区地下水的地质生态环境调节作用研究[J]. 地学前缘, 2001(1):191-196.
- CUI Ya-li, SHAO Jing-li, HAN Shuang-ping. Ecological environment adjustment by groundwater in northwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001(1):191-196.
- [28] 纪连军, 高洪彬, 王朝军, 等. 半干旱地区地下水位状况对杨树生长发育影响的研究[J]. 防护林科技, 2006(S1):49, 67.
- Ji Lian-jun, GAO Hong-bin, WANG Chao-jun, et al. Effect of groundwater level on the growth of poplar in semi-arid area[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2006(S1):49, 67.