

叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化及影响因素分析

白宜斐^{1,2}, 王弋¹, 陈亚宁¹, 梁建辉³, 向燕芸^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 喀什水文勘测局, 新疆喀什 844000)

摘要: 选取叶尔羌河灌区中3个子灌区(莎车、巴楚和麦盖提灌区)的35眼地下水观测井的月观测数据以及径流量、降水量、实际蒸散发、地表水灌溉用水量和地下水开采量等数据,基于敏感性分析和相对贡献率研究灌区2006-2017年地下水埋深变化及导致其变化的主导因子。结果表明:在3个子灌区中,地下水埋深变化最大的为巴楚灌区,莎车子和麦盖提灌区的地下水埋深波动较小;相比莎车子灌区,巴楚和麦盖提灌区地下水埋深受农业生产季节的影响更为显著;叶尔羌河灌区地下水埋深加深的主导因子是地下水的超采,且与灌区的地理位置有关。

关键词: 地下水埋深; 影响因素; 敏感系数; 相对贡献率; 叶尔羌河流域灌区

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0242-08

Variation of groundwater depth and its influencing factors in the irrigated area of the Yarkant River Basin

BAI Yifei^{1,2}, WANG Yi¹, CHEN Yaning¹, LIANG Jianhui³, XIANG Yanyun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Kashgar Hydrologic Survey Bureau, Kashgar 844000, China)

Abstract: This study selected the monthly data of thirty-five groundwater observation wells located in three representative sub-irrigation areas (Shache, Bachu and Maigaiti irrigation areas), and used five influencing factors, including runoff, precipitation, actual evapotranspiration, irrigation water amount, groundwater exploitation. The variations of groundwater depth (GWD) in the irrigated area from 2006 to 2017 and its leading factors were studied based on sensitivity analysis and relative contribution rate. The results showed that the variation of GWD of Bachu sub-irrigated area was the biggest compared to the two other sub-irrigated areas. The GWD of Bachu and Maigaiti sub-irrigated areas were susceptible to the season changes than Shache sub-irrigated area. The main influencing factor of groundwater depth change in the Yarkant River irrigation area is over-exploitation of groundwater, and is also related to the geographical location of the sub-irrigation area.

Key words: groundwater depth; influencing factor; sensitivity coefficient; relative contribution rate; irrigation area of Yarkant River Basin

1 研究背景

地下水是水资源的重要组成部分,是世界上最大的淡水储存库,约占全球淡水资源的三分之一^[1-2]。地下水具有分布广泛、易于开采的特性,对于改善水资源供需不平衡起到积极的作用。我国的

水资源相对匮乏,且时空分布不均,严重影响了我国农业生产的稳定。随着经济的快速发展以及人口、耕地面积的增加,人们对水资源的需求日益增加^[3],水资源供需矛盾更加突出,目前,地下水是农业活动和居民生活用水的重要来源,能解决近70%的城市和农田的水需求问题,尤其是在干旱、半干旱

收稿日期:2019-04-16; 修回日期:2019-07-31

基金项目:国家自然科学基金项目(Y771071001)

作者简介:白宜斐(1992-),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事生态水文过程研究。

通讯作者:王弋(1977-),女,湖北武汉人,博士,研究员,博士生导师,主要从事水文模型研究。

地区,地下水资源的优劣与当地百姓生产生活以及城市的发展休戚相关^[4-5]。

我国西北干旱区降水稀少,蒸发量大,水资源主要来源于山区,在绿洲盆地和平原内得以开发利用^[6]。在绿洲水资源中,地表水受自然因素影响,供给极不稳定^[7],地表径流的缺乏使当地居民将目标转向地下水,过度开采地下水将导致地下水埋深增加,形成降落漏斗^[8],地下水埋深的增加也会导致植被覆盖度减少,并对胡杨、柽柳等沙漠植物产生一定的影响^[9-10],破坏绿洲与沙漠间的生态平衡^[11],导致沙漠扩张。同时过度灌溉会导致局部的地下水位升高,在强烈的蒸发作用下,加速局部的土壤盐渍化进程,恶化生产条件^[12]。因此研究干旱区绿洲灌区地下水埋深变化对人类生产生活至关重要。绿洲地下水资源受到自然条件和人类活动的共同影响^[13-14],不同地区主要影响因素也不相同。新疆和田绿洲由于降水远小于蒸发量,所以地下水埋深主要是受蒸发的影响,其次是温度和风速^[15];甘肃民勤绿洲的地下水埋深与气温的相关性大,其次是降水和蒸发量^[16],此外,地下水开采量、灌溉用水量和上游来水量以及人口数量等人为因素也与地下水位的变化有较强的相关性^[8,17-18],是驱动地下水埋深变化的主要因素。

叶尔羌河流域灌区是新疆最大的绿洲和农业灌区,地处中亚干旱地区,属于典型的温带大陆干旱气候。是新疆乃至全国最重要的优质粮食、棉花、水果生产基地^[19]。与此同时,叶尔羌河流域是沙漠绿洲,位于塔克拉玛干沙漠与布谷拉、托克拉克沙漠之间,生态系统脆弱,降雨量少蒸发强,并且干旱期显著^[20]。流域灌区农业人口在整个流域中所占比例很大,农业用水量大,生态环境脆弱^[21]。同时,叶尔羌河流域人口和耕地面积近年来显著增加,导致水资源和环境压力加大,水资源短缺严重制约了该地区的发展^[22]。在这样的环境中,地下水已成为该地区重要的水源和供水选择^[22-23]。相关研究表明,叶尔羌河流域的地下水动态变化,受气温变化的影响程度高于降水量,这是由于春季温度回升后,冰川积雪融水补给量大,再加上大面积的灌溉,导致地下水埋深在春季有明显的上升^[24-25]。王建疆^[26]认为地下水埋深的变化与灌溉面积和河道输水有关。但是由于缺少长期完整的相关数据和系统分析,目前针对叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化的相关研究报道不多,且仅限于简单的描述地下水埋深的变化趋势以及与气候因子间的关系,缺乏对影响地下水埋深变化的人为因素

的全面分析以及对其变化的主导因子的讨论。

本文选取了叶尔羌河流域灌区内3个典型子灌区,对分布在3个子灌区内共35口监测井自2006-2017年逐月地下水埋深的观测数据利用敏感性分析法以及相对贡献率法,分析叶尔羌河流域灌区地下水埋深的时空变化特征、地下水埋深对各影响因子的敏感性以及各因子对地下水埋深变化的相对贡献率。该研究试图揭示叶尔羌河灌区地下水埋深对自然要素与人为要素的敏感性并确定主要影响因子,研究结果对该地区的地下水资源利用具有重要的参考价值和指导意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文选取叶尔羌河流域灌区作为研究区域。叶尔羌河流域灌区地下水资源量约 $32.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,占整个流域地下水资源量的72.3%,其中地下水的供应量约 $11.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,占灌区地下水资源总量的35%。研究区内农业生产依赖于灌溉,以井渠结合灌溉方式为主。叶尔羌河流域灌区可划分为7个子灌区:叶城子灌区、泽普子灌区、莎车子灌区、麦盖提子灌区、巴楚子灌区、岳普湖子灌区、和前海灌区^[26]。其中莎车灌区是位于径流出山口后的第1个子灌区且境内有产流,地表水资源相对丰富;巴楚灌区距离出山口位置较远且境内不产流,地表水资源主要是依靠引水;麦盖提灌区自身境内虽不产流,但地理位置较巴楚更有优势。因此,本文在综合比较各个灌区的特性和地理位置后,选取了莎车子灌区、麦盖提子灌区与巴楚子灌区(以下分别简称莎车、麦盖提和巴楚)3个子灌区作为本文的代表性研究区(具体位置参见图1)。

2.2 数据来源

本文根据数据资料的代表性,选取了叶尔羌河流域灌区共35口观测井自2006-2017年间的月尺度地下水埋深观测数据,其中16口位于巴楚,7口位于麦盖提,12口位于莎车,具体观测井分布详见图1。灌区影响地下水埋深的因素分为自然因素和人为因素两部分,通过相关文献并结合研究区实际情况,本文分别选取灌区水文观测站点卡群站的年径流量、各县气象站降水量以及实际蒸散发、地表水灌溉用水量 and 地下水开采量作为影响因子展开具体分析。其中实际蒸散发则是运用A-A模型^[27-28]计算所得(A-A模型是基于互补相关理论的计算实际蒸散发量的方法,并在塔里木河流域进行模型

率定,结果良好,其具体的原理与计算方法详见参考文献[27]和[28]),地表水灌溉用水量和地下水开

采量等人为因素数据均来自于《喀什地区统计年鉴》和《喀什地区水资源公报》。

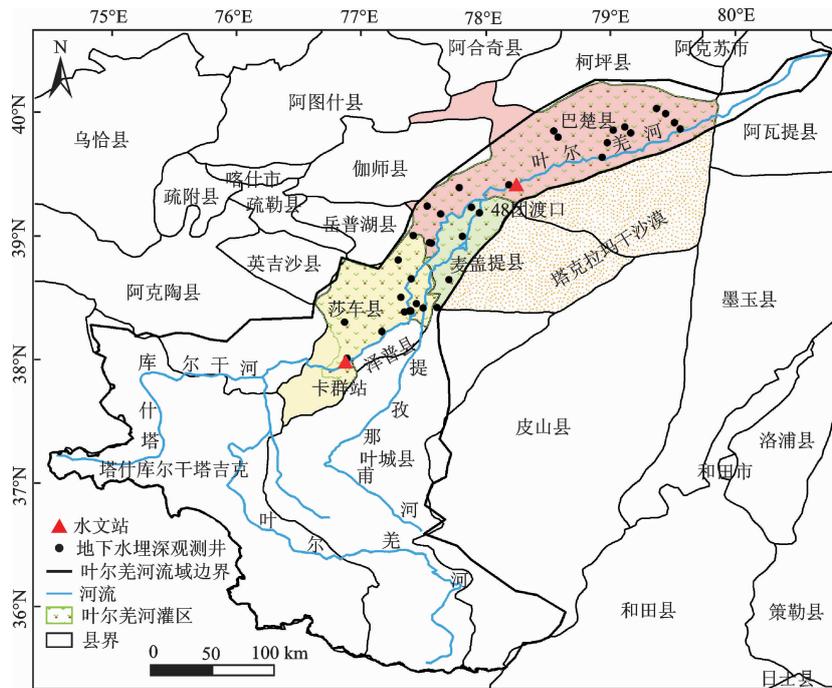


图1 叶尔羌河流域、研究灌区及其地下水埋深观测井分布图

2.3 研究方法

2.3.1 敏感性分析 本文采用Wang等^[29]提出的敏感性分析方法分析2006-2017年叶尔羌河流域灌区地下水埋深和其影响因子之间敏感系数,该方法可以定性确定对子灌区地下水埋深变化敏感性较强的影响因子^[30-31]。其计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{\bar{F}}{GWD} \cdot \frac{\sum (F_i - \bar{F})(GWD_i - \bar{GWD})}{\sum (F_i - \bar{F})^2} \quad (1)$$

式中: F_i 为某一影响因子序列的第 i 个值; GWD_i 为地下水埋深序列的第 i 个值; \bar{F} 和 \bar{GWD} 分别为影响因子和地下水埋深的多年平均值; ε 值为该影响因子的敏感系数, ε 为正表明 GWD 随着该影响因子的增加而增大,为负则表明 GWD 随着该影响因子的增加而减小,敏感系数的绝对值越大,敏感性越强。

2.3.2 相对贡献率 相对贡献率可以定量地分析各影响因子对地下水埋深的贡献率并确定主导因子。由于各影响因子与地下水埋深的量纲、范围表现不一,需先对其进行标准化,然后运用多元线性回归法分析各影响因子对相对地下水埋深变化的相对贡献率^[32-33]。方法如下:

$$\overline{GWD} = b_0 + b_1Q + b_2P + b_3G + b_4ET_a + b_5K \quad (2)$$

$$\eta_i = \frac{|b_i|}{|b_1| + |b_2| + |b_3| + |b_4| + |b_5|} \quad (3)$$

($i = 1, 2, \dots, 5$)

式中: (\overline{GWD}) 为地下水埋深标准化值; Q 、 P 、 G 、 ET_a 、 K 分别为出山口年径流量、降水量、地表水灌溉用水量、实际蒸散发以及地下水开采量的标准化值; b_i 为影响因子对应的回归系数; η_i 为各影响因子变化对 GWD 的变化的相对贡献率。

3 结果分析

3.1 地下水埋深的时空变化特征

本文利用 Thiessen 多边形建立多边形网格来表示叶尔羌河流域灌区地下水埋深的空间变化,结果详见图2。由图2可看出,叶尔羌河流域灌区东北部的地下水埋深大于西南部。在3个子灌区中,下游巴楚的地下水埋深在研究时段内变化最为显著,而上游莎车和麦盖提的地下水埋深变化相对较小。

从年际变化看,灌区的地下水埋深呈现波动加深的趋势(见图2)。整体而言,2006-2010年间灌区地下水埋深以0.165 m/a速度逐渐加深,2011和2012年的地下水埋深略有回升,2013-2017年地下水埋深以0.3 m/a的速度加深。其发生变化可能由于从2004年开始山区来水量减少,使得地表水灌溉用水量减少,随着

地下水的开采力度加大,导致 2013 年后地下水埋深的增加速度要大于 2010 年以前。

分灌区而言,巴楚的地下水埋深变化最快,以 0.13 m/a 的速度加深,以巴楚东北部即下游部分加深速度最快,其次是麦盖提(0.11 m/a),莎车的地下水埋深变化最慢(0.097 m/a)。在空间上,巴楚子灌区下游末端的地下水埋深变化最大,主要是因为该灌区位于叶尔羌河下游,以荒漠河岸林和草地等天然植被为主,没有灌溉下渗补给而且河水补给量少,因此地下水埋深要大于农田灌溉地区。而莎车和麦盖提主要是农田灌溉区,且位于流域灌区上游,水量来源条件以及地理位置均优于巴楚,因此地下水埋深变化相对较慢。

3.2 地下水埋深的年内变化特征

对叶尔羌河流域巴楚、麦盖提和莎车 3 个子灌区的年内地下水埋深距平进行分析,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,巴楚的地下水埋深在 3 月最小,6 月最大,3-6 月间地下水埋深逐渐变大,7 月至次年 2 月地下水埋深逐渐变小;麦盖提的地下

水埋深 3 月最小,6 月最大,3-6 月间地下水埋深逐渐变深,7 月至次年 2 月地下水埋深逐渐变小;相对于巴楚和麦盖提两个子灌区的年内地下水埋深变化幅度,莎车的地下水埋深年内变幅最小,变化趋势稍复杂,地下水埋深 1 月最小,6 月最大,整体也是从 3 月份开始地下水埋深逐渐增大,7-9 月地下水开始回升,10 和 11 月再次增大后再慢慢减小,年内呈双峰的趋势。可见 3 个子灌区的多年月均地下水埋深均为 6、7 月份最大,在 12 月到次年 5 月小于其年内平均值,5-11 月地下水埋深大于其年内平均值。原因可能由于 5-10 月是灌区农作物的主要生长季节,因此灌区的地下水埋深受生长季农作物自身用水需求的影响。

为了进一步分析灌区地下水埋深与农作物生长季节规律之间的联系,本文以 5-10 月为灌区生长季,11 月-次年 4 月为非生长季,详细比较了灌区地下水埋深变化和农作物生长周期的关系,3 个子灌区生长季和非生长季的地下水埋深变化见图 4。

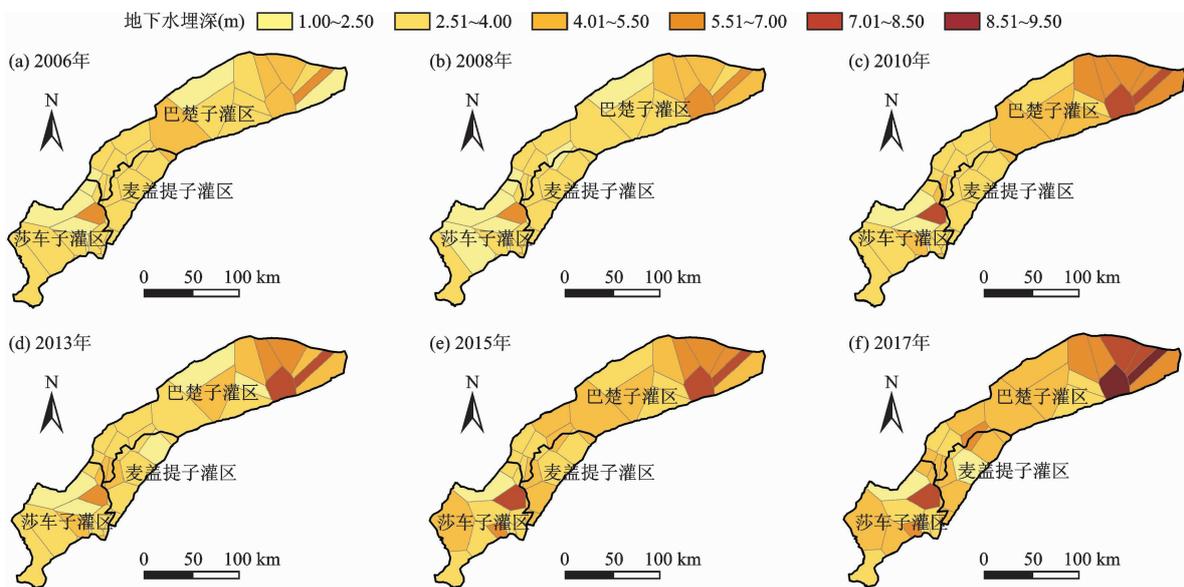


图 2 2006-2017 年叶尔羌河流域地下水埋深的时空变化

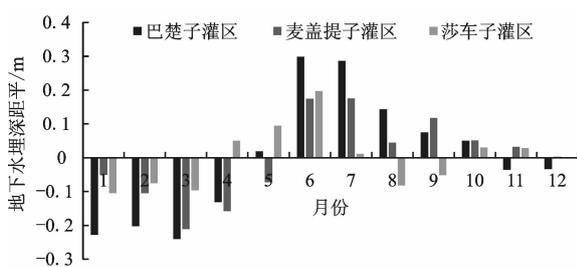


图 3 叶尔羌河流域灌区巴楚子灌区、麦盖提子灌区和莎车子灌区地下水埋深距平年内变化

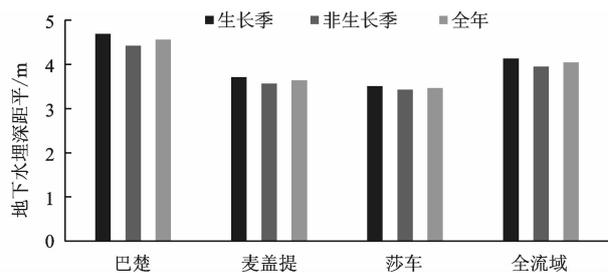


图 4 巴楚子灌区、麦盖提子灌区和莎车子灌区及全流域生长季和非生长季的地下水埋深变化

由图4可看出,巴楚和麦盖提生长季的地下水埋深大于非生长季的地下水埋深,而莎车在生长季和非生长季的地下水埋深没有明显变化,说明莎车在农业生长季节对地下水的依赖并不明显,可能与莎车境内产流,且位于叶尔羌河出口,有充足的地表水供应有关。而巴楚位于叶尔羌河流域灌区的末端,地表水供应不稳定,因此巴楚农业活动对地下水的依赖程度远高于麦盖提和莎车。

4 地下水埋深的影响因素分析

4.1 敏感性分析

通过上文介绍的敏感性分析方法,本文分别计算了各个子灌区地下水埋深与年径流量、降水量、实际蒸散发、地表水灌溉用水量和地下水开采量5个影响因子的敏感性关系,并得出不同子灌区各影响因子的敏感系数,详见表1。

表1 莎车子灌区、巴楚子灌区和麦盖提子灌区地下水埋深对不同影响因子的敏感系数

影响因子	莎车	麦盖提	巴楚
	子灌区	子灌区	子灌区
降水量	0.06	0.08	0.10
实际蒸散发	0.48	0.73	0.65
年径流量	-0.15	-0.23	-0.09
地下水开采量	0.14	0.20	0.37
地表水灌溉用水量	-0.36	-0.38	-0.69

由表1可知,各子灌区地下水埋深对各影响因子的敏感程度也各不相同。莎车地下水埋深变化对各影响因子的敏感程度依次为:实际蒸发量>地表水灌溉用水量>年径流量>地下水开采量>降水量,说明莎车的地下水埋深对实际蒸发量变化的敏感性最高而对降水的敏感性最弱。麦盖提对各影响因子的敏感程度依次为:实际蒸发量>地表水灌溉用水量>年径流量>地下水开采量>降水量;由此可见,麦盖提的地下水埋深同样是对实际蒸发量的敏感性最强,对降水的敏感性最弱。巴楚对各影响因子的敏感程度依次为:地表水灌溉用水量>实际蒸发量>地下水开采量>降水量>年径流量,说明巴楚地下水埋深对地表引水量的敏感性最强,对年径流量和降水量的敏感性弱。

通过敏感性分析发现,3个子灌区中地下水埋深均对实际蒸发量的敏感性相对较强,而对地下水补给项中的降水量与径流的敏感性弱,这与研究区

的位置和气候条件密切相关,叶尔羌河流域位于西北内陆腹地,年降水量不足60mm,而潜在蒸发量达2200mm左右,降水未来得及下渗已被蒸发,因此,降水对地下水埋深影响较小,蒸发量对其影响则较大。同时也有学者利用同位素分析该地区的地下水的水分来源发现研究区地下水不是来自降水的直接入渗,而是地表水(包括河水、渠道水、田间渠系灌溉水)的渗漏补给,可见,上游来水量、灌溉入渗补给以及地下水开采量是影响叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化的重要影响因素。

4.2 贡献率分析

各子灌区地下水埋深的影响要素对地下水埋深的相对贡献率使用上文介绍的多元线性回归法计算后结果如表2所示。从表2中可以发现,莎车灌区对地下水埋深贡献最大的是地表水灌溉用水量(33.7%)。麦盖提的地下水开采量是影响该地区地下水埋深变化最大的影响因子,贡献率为36.9%,其次是地表水灌溉用水量,贡献率为30.3%。巴楚的地下水开采量对地下水埋深变化的贡献最为显著,贡献率达到42.2%。降水量对3个子灌区的影响可以忽略不计。

表2 莎车子灌区、巴楚子灌区和麦盖提子灌区不同影响因子对地下水埋深变化的贡献率 %

影响因子	莎车	麦盖提	巴楚
	子灌区	子灌区	子灌区
降水量	5.8	6.3	4.9
年径流量	24.6	18.1	12.1
实际蒸散发	11.2	8.5	11.6
地下水开采量	24.7	36.9	42.2
地表水灌溉用水量	33.7	30.3	29.2

通过相对贡献率分析发现,麦盖提和巴楚地下水开采量对地下水埋深的影响要大于莎车,这可能与其在叶尔羌河流域的地理条件相关,叶尔羌河出口位于莎车县内,莎车有充足的地表水资源,地表水灌溉用水量为地下水的补给项,而地下水开采是地下水的排泄项,地表水对地下水的补给缓解了地下水开采造成的埋深增加,因此莎车地区的地下水埋深增加速度要小于巴楚和麦盖提地区。而麦盖提和巴楚位于绿洲的中下游部分,经过上游子灌区引水和河道损失后到麦盖提和巴楚的水相对较少,有限的地表水灌溉用水量使得人们加大了地下水的开采力度,这也是巴楚和麦盖提地下水埋深大于莎车

的主要原因。

5 讨论

敏感性分析的实质即地下水埋深与其影响因子之间的相关性分析。各个子灌区的地下水埋深对该地区降水量的敏感性均小于等于0.1且为正,这可能是因为本研究区降水稀少,蒸发量大,因而对地下水埋深的影响极弱;而与地下水埋深呈正相关的影响因子对地下水埋深的影响较大。另外,虽然3个灌区的地下水埋深变化对实际蒸散发的敏感性最高或者次高,但是实际蒸散发对地下水埋深变化的相对贡献率却不是最大,这是因为灌区蒸散发率很高并通过潜水层蒸发与地下水埋深形成高相关性。但是潜水蒸发的量还是小于灌溉水量和地下水开采量,所以实际蒸散发对地下水埋深的敏感性(相关性)最大,但是贡献率却不是最大。

有数据表明,2006-2017年间叶尔羌河灌区耕地面积增加 $7.015 \times 10^4 \text{ hm}^2$,人口增加 7.784×10^4 人,地下水使用量占总用水量的比例从7.3%增加到18.4%,人口和耕地面积的增加间接导致地下水需求的增加,从而引起近10年莎车、麦盖提和巴楚的地下水埋深的增加。

从2007年开始,叶尔羌河流域各子灌区的高效节水设备开始陆续投入使用,主要以滴灌和地下管道为主,因为地表水含有大量的泥沙,不适用于滴灌和地下管道,因此滴灌和地下管道的水全部来源于地下水,因此进一步加大了对地下水的开采。表3为巴楚、麦盖提、麦盖提和莎车3个子灌区的渠井用水系数(渠水引水量/井水用水量),发现麦盖提和莎车的渠井用水系数在2007年急剧变小,表明这两个子灌区对地下水的利用量从2007年大幅增加,说明节水技术在节约水资源的同时也加大了对地下水的开发利用。虽然地膜覆盖^[34]、滴灌技术^[35-36]、对渠道添加衬砌材料降低渠道中水下渗^[37]等技术的实施能够有效提高水资源的利用效率,在一定程度上也能够缓解用水增长的速率,但与此同时灌溉用水对地下水的补给量也将减少。虽然高效节水设施对于优化水资源利用效率存在一定可取性,但对地下水位变化的影响是存在风险还是起到积极的作用还有待研究。在未来的研究中,将对高效节水对地下水的影响开展相关研究,为更好地保护地下水、合理利用地下水资源提供可靠依据,制定合理的地下水资源利用规划,找到合理的地下水开采阈值对控制该地区的地下水埋深加深具有重大意义。

表3 莎车子灌区、巴楚子灌区和麦盖提子灌区
2006-2013年渠井用水比例 %

年份	莎车子灌区	麦盖提子灌区	巴楚子灌区
2006	23.41	5.88	20.62
2007	6.00	4.31	9.37
2008	5.86	3.28	6.80
2009	3.30	1.55	3.09
2010	6.68	1.76	2.64
2011	9.52	1.52	6.59
2012	8.14	2.51	3.88
2013	10.67	1.96	4.79

6 结论

本文选取了新疆叶尔羌河灌区的莎车子灌区、麦盖提子灌区和巴楚子灌区共35口观测井2006-2017年的地下水埋深数据,结合水文站点和气象站点的观测数据与《喀什地区统计年鉴》等相关数据资料,对灌区地下水埋深的时空变化特征进行分析,并分别探讨了3个灌区的地下水位变化的主要影响因素。主要结论如下:

(1)叶尔羌河流域灌区的地下水埋深在沿河道方向上呈现出上游小(莎车子灌区)、下游大(巴楚子灌区)的趋势;地下水变化最大为巴楚子灌区,莎车子灌区和麦盖提子灌区的地下水位波动较小。

(2)巴楚和麦盖提地下水埋深受农业生产季节的影响显著,莎车受农业生产季节的影响相对较弱。

(3)地下水开采量是造成巴楚和麦盖提地下水埋深加深的主要影响因素。莎车的地下水埋深变化受地下水开采量和地表水灌溉用水量共同的影响。

参考文献:

- [1] FAMIGLIETTI J S. The global groundwater crisis[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(11):945-948.
- [2] MI Lina, XIAO Honglang, ZHANG Jianming, et al. Evolution of the groundwater system under the impacts of human activities in middle reaches of Heihe River Basin (Northwest China) from 1985 to 2013[J]. Hydroecology Journal, 2016,24(4):971-986.
- [3] WADA Y, BEEK L P H V, KEMPEN C M V, et al. Global depletion of groundwater resources[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(20): L20402.
- [4] 龙文华. 通辽地区浅层地下水化学特征演化研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2010.
- [5] LIU Minghua, YAO Jiang, XU Xu, et al. Long-term ground-

- water dynamics affected by intense agricultural activities in oasis areas of arid inland river basins, Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018,203:37-52.
- [6] 曾瑜. 基于空间插值模型的绿洲地下水时空变化研究——以奇台绿洲为例[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2004.
- [7] SCANLON B R, KEESE K E, FLINT A L, et al. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions[J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2006, 20(15):3335-3370.
- [8] 王雅云. 民勤绿洲地下水埋深动态变化及其影响因子研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2018.
- [9] 吴桂林, 蒋少伟, 王丹丹, 等. 地下水埋深对胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)气孔响应水汽压亏敏感度的影响[J]. *中国沙漠*, 2016,36(5):1296-1301.
- [10] 王日照, 陈亚鹏, 陈亚宁, 等. 地下水埋深对胡杨(*Populus euphratica*)叶片形态结构和水力导度的影响[J]. *中国沙漠*, 2016,36(5):1302-1309.
- [11] CHEN Yaning, LI Weihong, XU Changchun, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2):547-558.
- [12] WANG Yugang, XIAO Duning, LI Yan, et al. Soil salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins: case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2008, 140(1-3):291-302.
- [13] 郑玉峰, 王占义, 方彪, 等. 鄂尔多斯市 2005-2014 年地下水位变化[J]. *中国沙漠*, 2015,35(4):1036-1040.
- [14] ZHU Jie, SUN Ge, LI Weihong, et al. Modeling the potential impacts of climate change on the water table level of selected forested wetlands in the southeastern United States[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12):6289-6305.
- [15] 刘敏. 和田绿洲地下水时空分布规律及其生态环境效应研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
- [16] CHEN Yaning, LI Weihong, XU Changchun, et al. Effects of climate change on water resources in Tarim river basin, northwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*[J]. 2007,19(4):488-493.
- [17] DANESHKHAH A., REMESAN R, CHATRABGOUN O, et al. Probabilistic modeling of flood characterizations with parametric and minimum information pair-copula model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,540:469-487.
- [18] DENG H, CHEN Yaning, WANG Huaijun, et al. Climate change with elevation and its potential impact on water resources in the tianshan mountains, central asia[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 135:S0921818115300527.
- [19] ZHANG Shiqiang, GAO Xin, ZHANG Xiaowei, et al. Projection of glacier runoff in Yarkant River basin and Beida River basin, Western China [J]. *Hydrological Processes*, 2012,26(18):2773-2781.
- [20] XIAO J, JIN Z, WANG J, et al. Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau[J]. *Quaternary international*, 2015,380:237-246.
- [21] 杨怀德, 冯起, 郭小燕. 1999-2013 年民勤绿洲地下水埋深年际变化动态及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2017,37(3):562-570.
- [22] LI Yasong, ZHANG Fawang, Han Zhantao, et al. Evolution characteristics and influence factors of deep groundwater depression cone in North China Plain, China - A case study in Cangzhou region[J]. *Journal of Earth Science*, 2014,25(6):1051-1058.
- [23] 梁建辉. 基于 SWAT 模型的新疆叶尔羌河流域气候变化对区域地下水动态影响研究[J]. *地下水*, 2017,39(4):232-233.
- [24] 满苏尔·沙比提, 阿布力米提·阿巴白克热, 热汗古丽·吾买尔. 喀什地区近 10a 绿洲耕地变化及其地下水水位效应分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11):145-151.
- [25] 陈钟望, 杨汉波, 陈东. 叶尔羌河绿洲近 20 年来地下水埋深变化及其原因分析[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(6):58-66.
- [26] 王建疆. 叶尔羌河流域规划中灌区规模的确定[J]. *中国商界*, 2010(8):272+271.
- [27] 蹇东南, 李修仓, 陶辉, 等. 基于互补相关理论的塔里木河流域实际蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2016,38(3):750-760.
- [28] ZHENG Hongxing, ZHANG Lu, ZHU Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin[J]. *Water Resources Research*, 2009,45(7):641-648.
- [29] WANG Yanjun, LIU Bo, SU Buda, et al. Trends of calculated and simulated actual evaporation in the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Climate*, 2011,24(16):4494-4507.
- [30] 刘晓笛, 李宝富, 廉丽姝. 1960-2012 年山东省近地面和高空相对湿度时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2017,37(5):218-223+230+2.
- [31] 陈迪桃, 黄法融, 李倩, 等. 1966-2015 年天山南北

- 坡空气湿度差异及其影响因素[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 562-572.
- [32] 张嘉琪, 任志远. 1977-2010年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2103-2112.
- [33] LI Zhi, CHEN Yaning, YANG Jing, et al. Potential evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the arid region of Northwest China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 1025-1031.
- [34] 郑昊安. 节水灌溉对地下水补给的影响特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [35] 付玉娟, 张玉清, 何俊仕, 等. 西辽河农灌区降雨及农业灌溉对地下水埋深的响演变分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 327-333.
- [36] 杨光. 黑河中游地下水埋深对节水灌溉的响应[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [37] 魏雪. 节水灌溉对关中地区土壤环境及地下水位的的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

(上接第241页)

- [10] 王亚华, 田富强. 对黄河水权转换试点实践的评价和展望[J]. 中国水利, 2010(1): 21-25.
- [11] 袁凤歧, 周玉玺. 水资源“农转非”背景下的农业节水技术选择问题研究[J]. 水利发展研究, 2011, 11(3): 31-35+64.
- [12] 赵连阁, 胡从枢. 东阳-义乌水权交易的经济影响分析[J]. 农业经济问题, 2007, 28(4): 47-54.
- [13] 来晨霏, 田贵良. 中国二元经济中水资源流转模式研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(8): 90-95.
- [14] 刘杰, 姜文来, 任天志. 农业用水使用权转让补偿机制研究[J]. 中国农业资源与区划, 2001, 22(6): 42-44.
- [15] 胡继连, 葛颜祥. 黄河水资源的分配模式与协调机制——兼论黄河水权市场的建设与管理[J]. 管理世界, 2004(8): 43-52.
- [16] 谢保鹏, 陈英, 张文斌, 等. 甘肃省县区单元城镇工矿用地经济密度区域差异及动态演变特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 12-19.
- [17] THEIL H. Economics and information theory[M]. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1967.
- [18] SHORROCKS AF. The class of additively decomposable inequality[J]. Econometrica, 1980, 48(3): 613-625.
- [19] 马林静, 王雅鹏, 吴娟. 中国粮食生产技术效率的空间非均衡与收敛性分析[J]. 农业技术经济, 2015(4): 4-12.
- [20] 潘文卿. 中国区域经济差异与收敛[J]. 中国社会科学, 2010(1): 72-84+222.
- [21] 张志颇. 牢牢把握三大任务, 保障天津高质量发展[J]. 中国水利, 2018(24): 60.
- [22] 柴玲欢, 朱会议. 中国粮食生产区域集中化的演化趋势[J]. 自然资源学报, 2016, 31(6): 908-919.
- [23] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 85-90.