

# 张掖盆地地下水资源时空分异特征及影响因素

米丽娜<sup>1,2</sup>, 肖洪浪<sup>3</sup>, 田军仓<sup>1,2</sup>, 李计生<sup>4</sup>, 田全彦<sup>3</sup>

(1.宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021;2.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,宁夏 银川 750021;3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000;  
4.甘肃省水文水资源勘测局,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**探索地下水系统演化的过程与机制对流域水资源的可持续管理至关重要。基于地下水多年动态观测资料和地统计学方法,按不同灌溉方式分区估算了张掖盆地 1985~2013 年地下水资源变化情况。结果表明:整个张掖盆地地下水水位降深和储量在时空上表现出很大差异性,基本经历了三个阶段:1985~1997 年匀速下降阶段,1998~2004 年加速下降阶段和 2005~2013 年减速下降阶段。整个盆地累积储量减少了  $47.52 \times 10^8 \text{m}^3$ ,年均亏缺  $1.64 \times 10^8 \text{m}^3$ ,其中河水井水灌区累积地下水水位降深达 5.72m,储量减少了  $37.48 \times 10^8 \text{m}^3$ ,占地下水消耗量的 78.87%。各分区累积水位降深变化从高到低依次为:河水 > 河水井水 > 泉水 > 河水泉水  $\geq$  井水灌区,相应的累积储量变化依次为:河水井水 > 河水 > 井水 > 河水泉水 > 泉水灌区。从长时间尺度看,各分区及张掖盆地多年累积储量仍为负变化,即地下水资源仍处于较严重亏缺状态,对含水层造成很大威胁。这是气候变化与人类活动共同作用的结果,而人类活动如分水政策、引水灌溉、地下水开采等影响越来越强烈。结果可以为黑河流域水量均衡合理估算、地下水数值模拟和水资源统一规划调度提供科学依据。

**关键词:**地下水资源;时空分异;张掖盆地;Kriging;地下水储量

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)06-0081-08

干旱地区的水资源特性决定了地下水成为干旱地区最重要的水源之一<sup>[1]</sup>。过去 50a 中,由于过度开采造成地下水资源枯竭问题已经在世界范围内受到广泛关注,主要影响地区涉及非洲北部、中亚和南亚、中国北方、美国和澳大利亚等<sup>[2-5]</sup>,其中西亚和南亚的地下水问题在全球来说是最严峻的。在也门台地平原区,地下水抽取量超过补给量约 400%<sup>[6]</sup>,墨西哥瓜纳华托州 10 个含水层中观测的地下水水位以 1.79~3.33m/a 的速度下降<sup>[7]</sup>,华北平原和石羊河流域的地下水问题一直以来也是国内外关注的焦点<sup>[8-10]</sup>。

在黑河流域,近年来随着中上游人口增长和社会经济不断发展,工农业用水量不断增加,中下游水资源分配矛盾逐渐复杂化。分水前,中游优先满足水资源需求,下游则因所得水资源量逐渐减少导致河道断流、湖

泊干涸、土地荒漠化、植被大片死亡等一系列生态环境地质问题<sup>[11]</sup>;分水后,下游水资源及其引发的环境问题得到缓解恢复,而中游地区,尤其是盆地南部地下水补给区,因地表引水量减少及农业用水量增加,出现了地下水补给量逐渐减少、主要补给带北移、区域水循环系统减弱、溢出带泉水资源大幅度削减、地下水开采规模和开采量不断扩大、区域性地下水水位持续下降、水质恶化等一系列环境恶化的现象<sup>[12]</sup>。观测资料显示,由于气候变化和人类活动导致近 30a 中游盆地地下水水位普遍降低了 4.92~11.49m,最大达到 17.44m<sup>[13]</sup>。根据地下水开采风险评估,张掖盆地属中度风险区,其中罗城、平川、友联、六坝灌区过量开采,开采潜力严重不足<sup>[14]</sup>。长期过度开采地下水不仅会造成地下水含水层水量耗尽,而且会影响整个盆地乃至整个流域

收稿日期:2015-12-02

基金项目:国家国际科技合作专项:变化环境下黄河与墨累达令流域水资源利用合作研究(2013DFG70990);国家自然科学基金黑河流域中下游生态水文过程的系统行为与调控研究(91225301);中国科学院科技服务网络计划(STS 计划):黑河流域生态综合治理工程项目(KFJ-EW-ST5-005-02)

作者简介:米丽娜(1985-),女,回族,宁夏固原人,在读博士研究生,主要从事流域水文水资源与恢复生态研究。E-mail: xiaomizi-123@163.com

通讯作者:肖洪浪(1955-),男,四川重庆人,研究员,博导,主要从事流域水文学、水土资源研究。E-mail: xhl@lzb.ac.cn

生态系统的稳定与健康发展。

在黑河流域与水资源相关的研究中,大量研究的结果集中在水资源开发、管理及其与经济的关系<sup>[15-18]</sup>、水环境变化<sup>[19-23]</sup>、土地利用变化及其环境效应<sup>[24-26]</sup>等。在地下水动态方面,有学者在中短期尺度上对张掖盆地地下水位和储量变化进行过研究,如杨玲媛等<sup>[27]</sup>利用常规统计方法基于单井地下水位变化分区估算了1981~2001年张掖盆地地下水位及储量的时空变化规律,认为冲洪积扇中上部、下部及细土平原储量减少,而临高河谷平原有不同程度增加;魏智等<sup>[28]</sup>估算了分水前后地下水位与地下水储量变化,得出分水后的2004~2005年间甘州区、临泽县和高台县地下水位和地下水可开采储量较分水前的20世纪90年代都有所下降,估算减少总量约 $8.23 \times 10^8 \text{m}^3$ ;曹艳萍等<sup>[29-30]</sup>利用GRACE重力卫星对黑河流域的地下水位和储量分别进行了估算。利用地统计方法进行长时间尺度地下水资源变化趋势研究,在黑河流域目前尚没有相关报道。通常,水量平衡法、地统计方法和地下水模型是研究地下水储量变化的常用方法,而且地统计方法作为地下水位管理决策制定的便利工具而得到广泛应用。

理解地下水体的行为及其长期变化趋势对流域管理决策制定非常关键<sup>[31]</sup>。运用同位素方法对黑河中游地下水更新能力研究表明,在低于100m的深层地下水中,地下水的年更新速率小于含水层容量的0.8%<sup>[32]</sup>,一旦含水层被破坏很难恢复。因此,本文选取受人类活动影响明显的张掖盆地人工绿洲核心灌区,基于地统计学方法估算了灌区尺度的地下水储量变化,探讨了不同灌溉方式下地下水资源量长期变化,主要目的在于深入理解黑河中游张掖盆地地下水体的行为及其长期时空演变趋势,洞察地下水系统变化。这对大尺度流域水资源可持续管理来说非常关键。本研究也可为当前及今后黑河流域水资源统一调度管理、地下水资源利用的合理规划提供科学依据。

## 1 研究区及水文地质概况

张掖盆地位于黑河干流中游地区,属于河西走廊中部平原区,盆地东起永固丘陵,西至榆木山前,南与祁连山多为断层相接,北部为隆升的合黎、龙首山地,基底为新第三纪或白垩纪的碎屑岩(见图1)。平均海拔1300~1700m,多年平均气温2.8~7.7℃,年均降水量90~160mm,降水少而蒸发强烈,蒸发量2000~2500mm,属温带大陆性干旱气候。地势自东南向西北倾斜,地形

坡度25‰~4‰,地貌上分为南部山前冲洪积-洪积戈壁平原和盆地中部冲洪积细土平原两类。黑河发源于祁连山北麓,由莺落峡进入中游张掖盆地,经正义峡流向下游额济纳旗,干流全长821km,多年平均径流量 $15.9 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。

受地貌、沉积物和构造条件制约,地下水主要为第四系孔隙水,含水层自南部山前至北部盆地中心,由单一潜水含水层过渡到多层承压含水层,水位埋深变浅并逐渐过渡到泉水出露区<sup>[33]</sup>。含水层厚度在盆地中部最厚处可达300~500m,向南北两侧方向逐渐变薄递变为100~200m,在盆地北部由于基底抬升,厚度小于50m。张掖盆地是一个具有补给、径流、排泄过程的独立水文地质单元,地下水补给主要依靠南部祁连山区出山地表径流及出山后河流沿途渗漏补给,以及沟渠、水库和灌溉水入渗补给;排泄方式以泉水溢出、蒸散发和人工开采为主。含水层的水交替大体在冲洪积扇带以“入渗-径流”为主要形式,在细土平原以“入渗-蒸发”为主导作用<sup>[34]</sup>,地表水、地下水交互转化频繁。

张掖盆地农业水资源开发利用历史悠久<sup>[35]</sup>,水资源利用程度高,灌溉农业发达。人工绿洲区灌溉农业占82.6%左右,是主要的耗水区。据《张掖市水务管理年报》统计,张掖盆地多年平均总水资源利用量达到 $23.3 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,其中85.0%以上用于农业灌溉。

## 2 材料与方法

### 2.1 资料来源

黑河流域1:50万水文地质图、DEM、灌区分布数据等来自中科院寒区旱区科学数据中心:<http://westdc.westgis.ac.cn/>,地表径流、地下水观测数据来自甘肃省水文局,分灌区引水、灌溉、地下水开采等统计数据来自《张掖市水务管理年报》。本文选取1985~2013年具有正常、连续年均、月均观测数据的54眼地下水观测井进行计算(见图1)。

### 2.2 分区

张掖盆地有27个小灌区,各灌区灌溉用水来源主要为河水、泉水和地下水,但灌溉水类型及所占比例在各灌区又有所不同。因此,本文根据1:50万水文地质图结合灌区边界确定研究区空间分区边界(水文地质边界),并按照各灌区主要灌溉水类型合并为河水井水混灌区、河水灌区、井水灌区、泉水灌区、河水泉水混灌区5个分区(见图1),总面积为7936.04km<sup>2</sup>。

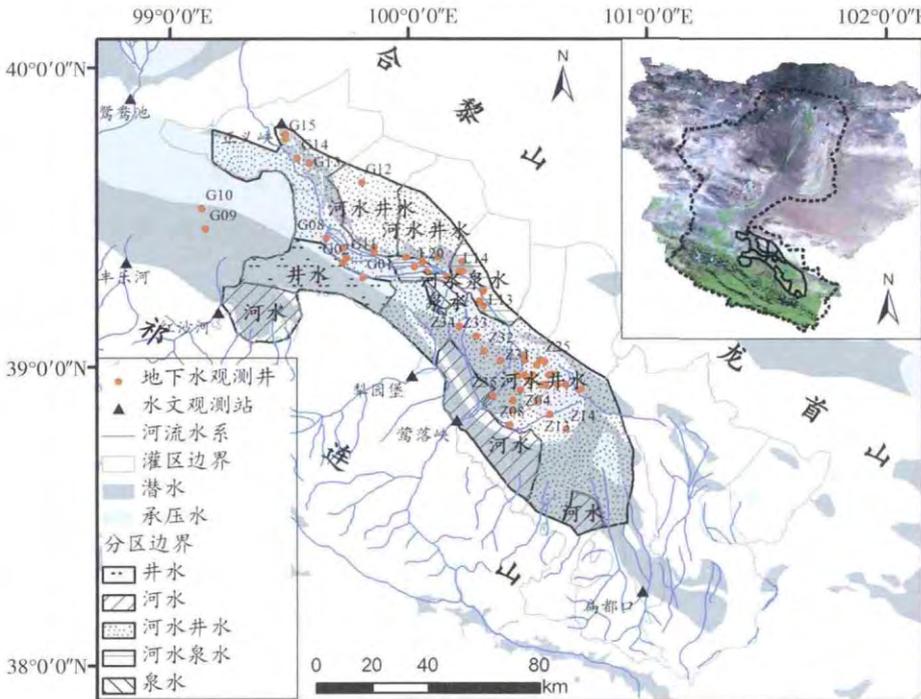


图1 研究区概况、分区及地下水观测井分布

Fig.1 Distribution of the study area, zoning and observation points

在时间上,对照黑河出山口莺落峡站多年与年平均径流变化情况,分1985~1989年(丰水年)、1990~1997年(枯水年)、1998~2001年(平水年)、2002~2004年(平水年)、2005~2013年(丰水年)进行讨论。

### 2.3 计算方法及精度评价

首先通过普通克里格插值及交叉验证得到1985~2013年各年地下水位降深空间分布图,转化为730m×730m网格,经2.2得到的空间分区边界借助ArcGIS空间分析模块提取各分区各年年均水位降深与面积,最后利用公式(1)计算得到年均与多年累积地下水储量动态。

#### 2.3.1 各年地下水位降深空间分布插值及精度评价

年水位降深指本年末水位与上年末水位之差,如1986年水位降深即为1986与1985年末水位差,以此

类推。由于区域内观测井数据均为混合观测井水位,因此将整个张掖盆地地下水含水层系统作为一个整体进行估算。经直方图和QQplot检测所有数据都符合正态分布,满足普通克里格插值条件。选择球状或指数模型拟合半变异函数,经普通克里格插值得到整个中游盆地1985~2013年年均水位降深空间分布序列。

根据ArcGIS地统计插值模块自带的交叉验证结果来看(见表1),水位降深空间插值比较理想。由于时间序列较长,本文仅列出部分代表年份的验证成果。经ArcGIS空间分析模块提取的各分区1985~2013年年均水位降深值如图2所示。

#### 2.3.2 地下水储量估算

依据达西定理推导的地下水储

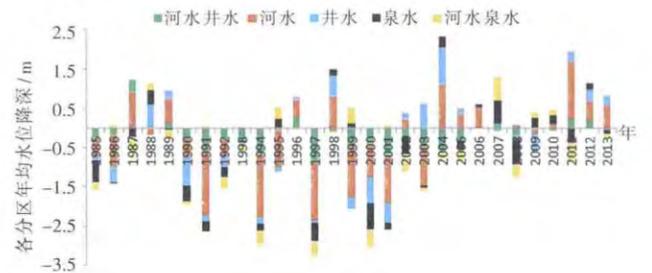


图2 各分区1985~2013年年均水位降深变化

Fig.2 The change of the annual mean groundwater levels in the partitions during 1985-2013

存量计算方程<sup>[36]</sup>,可以得出本研究区的计算公式为:

$$\Delta W_{ki} = \mu_k \cdot \sum_{j=1}^n \Delta H_{kij} \cdot F_k \quad (1)$$

表1 水位降深插值交叉验证结果

Table1 The cross-validation results of the GLD interpolation

年份	平均误差(MEAN)	标准化平均误差(MS)	均方根误差(RMS)	平均标准误差(ASE)	标准均方根误差(RMSS)
1985	-0.014	-0.038	0.295	0.26	1.147
1989	0.031	0.037	0.626	0.436	1.297
1990	-0.04	-0.032	0.946	0.649	1.315
1997	-0.032	-0.042	0.466	0.377	1.127
1998	-0.005	-0.006	0.384	0.349	1.114
2001	0.012	0.015	0.547	0.527	1.036
2004	0.001	0.002	0.581	0.551	1.028
2005	0	0.001	0.531	0.516	1.037
2013	0.018	0.035	0.578	0.495	1.165

式中: $\Delta W_{ki}$ 为第 $k$ 区第 $i$ 年的地下水储量变化, $k=1,2,3,4,5$ ,分别为5个分区, $i$ 为1985~2013年; $\mu_k$ 为第 $k$ 区含水层的给水度,无量纲,根据水文地质部门的经验及水文地质图, $\mu_k$ 一般取0.10~0.15,本文中河水灌区、井水灌区位于冲积扇中上部, $\mu_k$ 取值0.15,泉水灌区、河水泉水混灌区位于河谷平原, $\mu_k$ 取值0.11,河水井水混灌区部分位于冲积扇,部分位于河谷平原与细土平原,故 $\mu_k$ 取值0.12; $\Delta H_{kij}$ 为第 $k$ 区第 $i$ 年第 $j$ 单元格的地下水水位降深值; $\sum_{i=1}^n \Delta H_{kij}$ 为用GIS空间分析模块提取的 $k$ 分区地下水水位降深均值; $F_k$ 为第 $k$ 区的面积,是 $j$ 个单元格面积的总和。

### 3 研究结果

地下水储量变化是地下水位变化的结果,也是地下水补排关系的直观反映。整个张掖盆地地下水水位降深及储量在不同分区、不同时间段表现出显著的分异规律。

#### 3.1 不同时段张掖盆地年均及累积地下水储量变化规律

1985~2013年整个张掖盆地总地下水储量减少了 $47.52 \times 10^8 \text{m}^3$ ,年均亏缺 $1.64 \times 10^8 \text{m}^3$ 。其中,河水井水灌

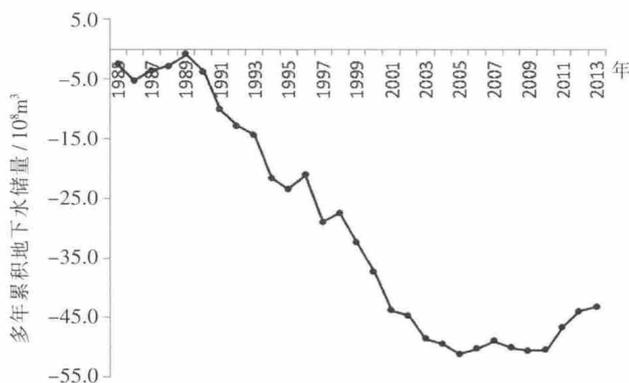


图3 1985~2013年张掖盆地多年累积地下水储量变化

Fig.3 The variation of the accumulative groundwater storage in the Zhangye Basin during 1985-2013

区约减少了 $37.48 \times 10^8 \text{m}^3$ ,占整个盆地总减少量的78.87%,地下水资源严重亏缺;河水灌区约减少了 $8.32 \times 10^8 \text{m}^3$ ,占总减少量的17.51%,地下水资源亏缺较严重;由于河水泉水灌区和泉水灌区面积较小,地下水储量减少相对较小(见表2,图3)。

由表2可知,在不同时段内,整个张掖盆地地下水储量变化以减少为主,经历了先加速减少后小幅回升的过程。1985~1989年由于处在丰水年,张掖盆地地下水储量变化不大,年均减少 $0.22 \times 10^8 \text{m}^3$ ,累积减少 $1.1 \times 10^8 \text{m}^3$ ;1990~1997年随着连续枯水年的出现,盆地年均减少 $3.74 \times 10^8 \text{m}^3$ ,累积减少 $29.88 \times 10^8 \text{m}^3$ ,地下水储量减少显著;1998~2001年随着扩耕、灌溉开采等人类活动的增强,即使是平水年,各分区盆地地下水储量仍加速减少,年均减少 $4.02 \times 10^8 \text{m}^3$ ,累积减少 $16.08 \times 10^8 \text{m}^3$ ;2002~2004年是中下游实行分水初期,盆地地下水储量减少趋于稳定,年均总储量减少 $2.20 \times 10^8 \text{m}^3$ ,累积减少 $6.61 \times 10^8 \text{m}^3$ ;2005~2013年在人类活动和连续丰水年的共同影响下,盆地储量以 $0.68 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的速率回升,累积增加 $6.16 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

#### 3.2 不同分区水位降深与储量年际变化规律

由于气候变化与人类活动的双重扰动,水位降深与储量变化在各个分区也表现出很大的时空差异性(见图2、图4a~b)。

##### 3.2.1 河水井水灌区水位降深与储量先加速下降后略有回升

结合表2、图2、图4a~b可以看出,1985~2013年,河水井水灌区多年平均地下水位降深达 $-0.20 \text{m}/\text{a}$ ,累积地下水位降深达 $-5.72 \text{m}$ ,储量年均减少 $1.29 \times 10^8 \text{m}^3$ ,累积减少了 $37.48 \times 10^8 \text{m}^3$ 。由于河水井水灌区面积约占整个盆地面积的59%,年均、累积地下水储量减少幅度在所有分区中最大,地下水亏缺严重。其中,1985~2004年河水井水灌区地下水位降深与储量基本处于负变化。年平均水位降深 $-0.29 \text{m}/\text{a}$ ,在1997年达到最大 $-0.85 \text{m}/\text{a}$ ,

表2 1985~2013年地下水储量时空变化

Table 3 The spatial and temporal variation of the groundwater storage during 1985-2013

分区	面积 / km <sup>2</sup>	不同时段地下水储量年均变化 / $10^8 \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$					多年平均 / $10^8 \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	总储量变化 / $10^8 \text{m}^3$
		1985~1989年	1990~1997年	1998~2001年	2002~2004年	2005~2013年		
河水井水	4688.32	-0.28	-2.15	-2.68	-2.75	0.01	-1.29	-37.48
河水	1398.46	0.03	-1.33	-1.12	0.21	0.67	-0.29	-8.32
井水	1297.03	0.09	-0.18	-0.21	0.47	0.01	-0.01	-0.24
泉水	121.52	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	0.00	-0.01	-0.40
河水泉水	430.71	-0.05	-0.05	0.01	-0.12	-0.01	-0.04	-1.08
张掖盆地	7936.04	-0.22	-3.74	-4.02	-2.20	0.68	-1.64	-47.52

注:+代表增加,-代表减少。

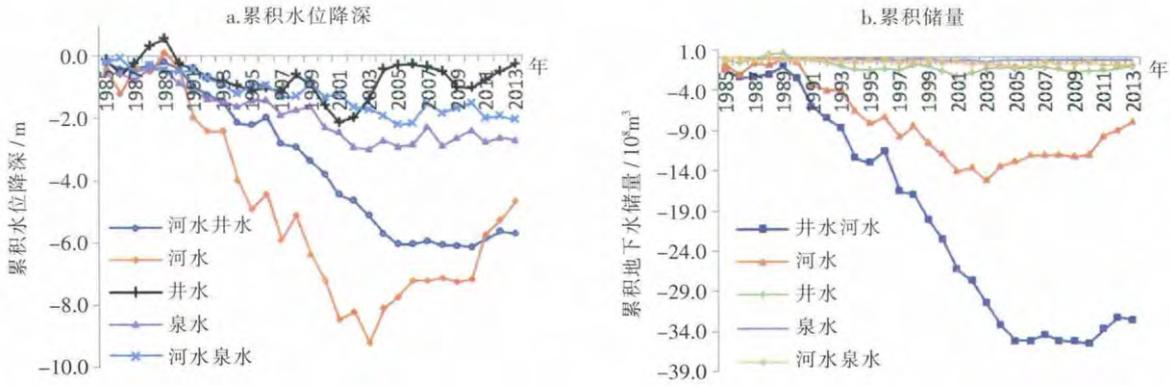


图4 各分区1985~2013年累积地下水水位降深、累积储量变化

Fig.4 The change of the accumulative groundwater levels and storages in the various partitions during 1985-2013

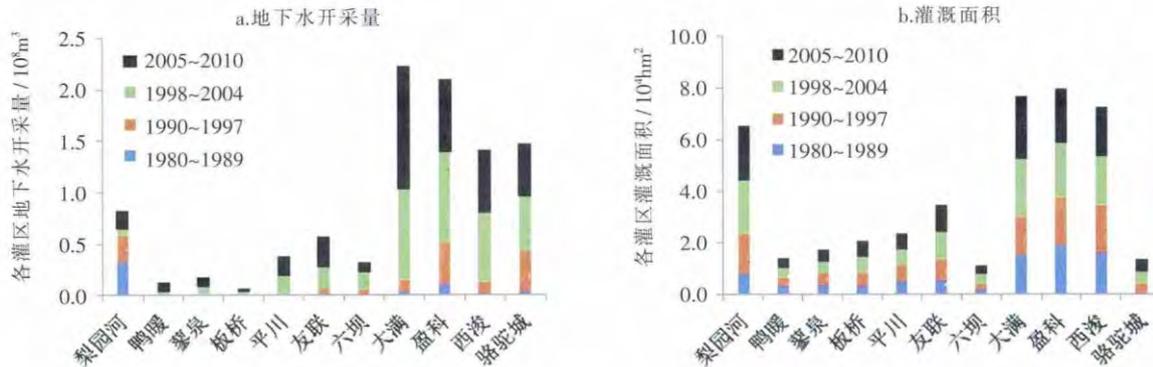


图5 1985~2010年各灌区地下水开采量、灌溉面积变化

Fig.5 The variation of the groundwater exploitation and irrigation area in the various irrigation districts during 1985-2010

累积降深达-5.73m,相应的储量以 $1.88 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的速率加速减少,最大减少 $5.60 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,累积减少 $37.55 \times 10^8 \text{m}^3$ ;而在2005~2013年间水位下降减缓,降深逐渐变为正变化,最大达 $0.26 \text{m/a}$ ,储量以 $0.01 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的速率回升,累积回升 $0.07 \times 10^8 \text{m}^3$ 。分析其原因,河水井水灌区主要位于南部冲洪积扇群带和中部细土平原带,包括甘州区的大满、盈科、西浚灌区,临泽的平川、新华等灌区及高台的友联、六坝等灌区,井水灌溉占到20%~30%以上,地下水开采量不断增加是地下水位下降、储量减少的主要因素,而2005年后水位回升可能与分水后实行《黑河流域综合治理规划》及节水灌溉、限耕、限采地下水有关(图5a~b),也与连续处于丰水年河水渗漏补给增加有一定关系<sup>[37]</sup>。

### 3.2.2 河水灌区水位降深与储量先加速下降后以较高速率回升

由图2、图4a~b可知,1985~2013年河水灌区年平均水位降深达 $-0.16 \text{m/a}$ ,累积地下水水位降深达 $-4.70 \text{m}$ ,储量年均减少 $0.29 \times 10^8 \text{m}^3$ ,累积减少 $8.32 \times 10^8 \text{m}^3$ ,地下水资源亏缺较严重。以2004年为分界点,在此之前河水灌区年均水位降深为 $-0.48 \text{m/a}$ ,累积降深达

到 $-9.21 \text{m}$ ,储量以 $0.8 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 的速率快速减少,累积减少 $15.28 \times 10^8 \text{m}^3$ ;2004年起水位出现回升,年均水位降深由负变化转变为正变化,平均降深达 $0.38 \text{m/a}$ ,累积降深达 $4.51 \text{m}$ ,储量相应以较高速率 $0.72 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 回升,累积回升约 $7.24 \times 10^8 \text{m}^3$ 。这是由于河水灌区位于冲洪积扇群带中上部,地下水埋深较深。河水灌区主要包括甘州区的上三、安阳等灌区,临泽的梨园河灌区,高台的新坝、红崖子灌区及民乐部分灌区,以引河水灌溉为主。这里是地下水的径流带,地下水流速快,下游平原区地下水开采可以加速/减缓地下水流速,且地下水补给以河水渗漏和渠系水渗漏为主,因此水位降深、储量变化与不同水平年黑河来水丰枯有一定关系,在丰水年来水偏丰,地下水补给较多,枯水年则相反。而且,分水前灌溉期引水减少了黑河渗漏补给地下水量,而分水后灌溉期实行“全线闭口,集中下泄”,黑河渗漏补给增加<sup>[37]</sup>。

### 3.2.3 泉水灌区、河水泉水灌区水位降深与储量先稳定下降后缓慢下降

由图2、图4a~b可知,泉水灌区和河水泉水灌区水位降深、储量变化趋势基本一致。截至2013年,泉

水灌区和河水泉水灌区年均地下水位降深分别为 $-0.09\text{m/a}$ 、 $-0.07\text{m/a}$ ,累积地下水位降深分别达 $-2.74\text{m}$ 、 $-2.09\text{m}$ ,累积储量分别减少 $0.40\times 10^8\text{m}^3$ 、 $1.08\times 10^8\text{m}^3$ ,地下水资源亏缺一般。其中,1985~2004年泉水灌区、河水泉水灌区年均水位降深分别为 $-0.14\text{m/a}$ 、 $-0.10\text{m/a}$ ,累积降深达 $-2.73\text{m}$ 、 $-1.94\text{m}$ ,储量分别以 $0.02\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ 、 $0.05\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ 的速率稳定减少,累积储量分别减少 $0.4\times 10^8\text{m}^3$ 、 $1.0\times 10^8\text{m}^3$ ;2005~2013年泉水灌区、河水泉水灌区年均水位降深分别为 $-0.0\text{m/a}$ 、 $-0.02\text{m/a}$ ,累积降深达 $-0.01\text{m}$ 、 $-0.15\text{m}$ ,储量分别以 $0.00\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ 、 $0.01\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$ 的速率减少,累积储量分别减少 $0.04\times 10^8\text{m}^3$ 、 $0.44\times 10^8\text{m}^3$ ,减少速率减缓。与河水泉水灌区相比,泉水灌区水位降深与储量变化较大。泉水灌区主要有临泽的小屯灌区,河水泉水灌区有板桥、鸭暖、蓼泉灌区,由于泉水灌区、河水泉水灌区主要分布在黑河干流沿岸河谷平原带,在20世纪80年代之前以泉水灌溉为主,随着地下水的开采,逐渐演变为泉水井水混灌或河水泉水井水混灌区,地下水在泉水灌区约占总用水量的30.3%,在河水泉水灌区所占比例相对较小。大量开采地下水使得泉水溢出量不断减少,促使地下水开采量不断增加,形成恶性循环。该区域地下水位及储量变化与地下水开采活动密切相关(见图5a~b)。

#### 3.2.4 井水灌区水位降深与储量先稳定下降后稳定回升

图2、图4a~b表明,1985~2013年井水灌区的水位降深达 $-0.29\text{m}$ ,储量减少 $1.17\times 10^8\text{m}^3$ 。1985~2001年井水灌区年均水位降深和储量呈不断下降趋势,平均降深达到 $-0.13\text{m/a}$ ,累积降深为 $-2.14\text{m}$ ,储量累积减少 $1.78\times 10^8\text{m}^3$ ;而在2002~2013年间水位曲折回升,水位降深逐渐成为正变化,水位降深累积回升 $1.85\text{m}$ ,储量累积回升 $1.54\times 10^8\text{m}^3$ 。井水灌区位于冲洪积扇群带中上部,有骆驼城灌区及民乐部分灌区,井水灌溉最大占90%以上。由于受地形特征及地下水开采的影响,水位和储量波动频繁而复杂。分水后实行《黑河流域综合治理规划》及节水灌溉后,限耕、限采地下水是水位、储量回升的主要原因(见图5a~b)。

## 4 结论与讨论

各分区及整个张掖盆地地下水储量随着地下水位变化而变化,总体经历了3个阶段:1985~1997年匀速下降阶段,1998~2004年加速下降阶段和2005~2013年减速下降阶段。尤其在分水政策执行前后地下水位降深和储量变化趋势发生了转折性改变,在2001年

以前基本以水位加速下降和储量减少为主,2001年后陆续出现水位下降减缓或回升及储量减少速率减缓或略有回升的趋势。总体而言,各分区及张掖盆地多年累积储量仍为负变化,即地下水资源仍处于较严重亏缺状态,含水层受到很大威胁。1985~2013年累积亏缺量达 $47.52\times 10^8\text{m}^3$ ,年均亏缺 $1.64\times 10^8\text{m}^3$ 。其中,河水井水灌区水资源量减少了 $37.48\times 10^8\text{m}^3$ 。各分区累积水位降深变化从大到小依次为:河水>河水井水>泉水>河水泉水 $\geq$ 井水灌区,相应的累积储量变化依次为:河水井水>河水>井水>河水泉水>泉水灌区。

值得注意的是,各分区水位降深与储量变化在时空上呈现差异性的同时,在时间上也表现出一定的规律性,即在2001年前后陆续经历了从下降到减缓或回升的过程。井水灌区在2001年首先出现水位、储量由下降到回升的转变,接着是河水、泉水灌区在2003年发生转变,河水井水、河水泉水灌区在2005年发生转变,而这种转变正是在黑河中下游实行分水政策前后出现的。从扩耕、增采地下水到限耕、限采地下水及节水行动,加上气候丰枯变化,在很大程度上改变了地下水的补排特性及地下水与地表水的交互关系,说明人类对张掖盆地地下水资源的影响逐渐处于主导地位。此外,地下水位降深变化幅度最大的区域在河水灌区,究其原因,可能与河水灌区的水文地质条件及不同水平年黑河来水丰枯及分水前后引水方式变化引起的河水入渗补给量发生变化有关。分水前灌溉期引水减少了黑河渗漏补给地下水量,而分水后灌溉期实行“全线闭口,集中下泄”,黑河渗漏补给增加<sup>[37]</sup>。

地下水开采是张掖盆地地下水系统变化的主要扰动因素之一,而中、下游水资源分配不均衡则是引起地下水开采的根本原因。调水工程的实施在一定程度上缓解了中下游的用水矛盾,同时也出现了新的问题。现状分水政策在短期内可以解决中下游间水资源配置问题,但从长期来说,如何配置更能体现流域水资源的可持续开发利用这个问题并没有解决。当务之急是要调整分水政策,按照干湿年份优化中下游间分水比例(优化分水曲线),在调水的水量和调水次数上,也应进行进一步优化,联合地表水地下水实现优化调度。

#### 参考文献:

- [1] 王根绪,杨玲媛,陈玲,等.黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响[J].地理学报,2005,60(5):456-466. (WANG Genxu, YANG Lingyuan, CHEN Ling, et al. Impacts of land use changes on groundwater resources in the Heihe River basin [J]. Acta Geographica Sinica,

- 2005,60(5):456-466. (in Chinese))
- [2] Shah T, Molden D, Sakthivadivel R, et al. The global groundwater situation: overview of opportunities and challenges [R]. International Water Management Institute, 2000:25-26.
- [3] Sri Lanka, Shah T, Roy A D, et al. Sustaining Asia's groundwater boom: An overview of issues and evidence [J]. Natural Resources Forum, 2003,27(2):130-141.
- [4] Konikow L F, Kendy E. Groundwater depletion: A global problem [J]. Hydrogeology Journal, 2005,13(1):317-320.
- [5] Wada Y, van Beek L P H, van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources [J]. Geophysical Research Letters, 2010,37(L20402).
- [6] Briscoe, John. Water resources management in Yemen—results of a consultation [R]. Office Memorandum. Washington D.C.: World Bank, 1999.
- [7] Wester Philippus, Boris Maraón Pimentel, Christopher A. Scott. Institutional responses to groundwater depletion: the aquifer management councils in the State of Guanajuato, Mexico [R]. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. www.facing the future.org. 1999.
- [8] 刘中培, 王富强, 于福荣. 石家庄平原区浅层地下水位变化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012,10(5):128-131. (LIU Zhongpei, WANG Fuqiang, YU Furong. Variation of shallow groundwater level in Shijiazhuang plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012,10(5):128-131. (in Chinese))
- [9] Ma JZ, Wang XS, Edmunds WM. The characteristics of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the arid northwest China—a case study of the Shiyang River basin [J]. Journal of Arid Environments, 2005,61:277-295.
- [10] Wang G, Ding Y, Shen Y, et al. Environmental degradation in the Hexi Corridor region of China over the last 50 years and comprehensive mitigation and rehabilitation strategies [J]. Environmental Geology, 2003,44:68-77.
- [11] 白福,李文鹏,刘振英. 黑河流域干流地区水资源宏观调控与优化利用[J]. 水文地质工程地质, 2008(2):87-91. (BAI Fu, LI Wenpeng, LIU Zhenying. The macroscopic control and optimized utilization of water resources in the region of main stream of the Heihe River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(2):87-91. (in Chinese))
- [12] 牛最荣,赵文智,黄维东,等. 黑河下游生态调水对水资源时空变化的影响分析[J]. 水文, 2011(5):54-58. (NIU Zuorong, ZHAO Wenzhi, HUANG Weidong, et al. Impact of ecological water diversion on temporal and spatial change of water resources in Heihe downstream [J]. Journal of China Hydrology, 2011(5):54-58. (in Chinese))
- [13] 米丽娜,肖洪浪,朱文婧,等. 1985-2015年黑河中游流域地下水位动态变化特征[J]. 冰川冻土, 2015,37(2):461-469. (MI Lina, XIAO Honglang, ZHU Wenjing, et al. Dynamic evolution of groundwater level in the middle reaches of Heihe River in 1985-2013 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015,37(2):461-469. (in Chinese))
- [14] 项国圣. 黑河中游张掖盆地地下水开发风险评价及调控[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. (XIANG Guosheng. Risk Assessment and Regulation of Groundwater Development in Zhangye Basin of the Middle Reaches of Heihe River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese))
- [15] 张济世,康尔泗,赵爱芬,等. 黑河中游水土资源开发利用现状及水资源生态环境安全分析 [J]. 地球科学进展, 2003,18 (2):207-213. (ZHANG Jishi, KANG Ersi, ZHAO Aifen, et al. The studies of water resources utilization or water resources and ecology - environments safety in middle reach of Heihe River basin [J]. Advances in Earth Sciences, 2003,18(2):207-213. (in Chinese))
- [16] Fang CL, Bao C, Huang JC. Management implications to water resources constraint force on socio-economic system in rapid urbanization: a case study of the Hexi Corridor, NW China [J]. Water Resource Management, 2007,21(9):1613-1633.
- [17] 张一驰,于静洁,乔茂云,等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究 [J]. 水利学报, 2011,42 (7):757-765. (ZHANG Yichi, YU Jingjie, QIAO Maoyun, et al. Effects of eco-water transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(7):757-765. (in Chinese))
- [18] Cai XM, Landon M, Ge YC. Decision support for integrated river basin management— Scientific research challenges [J]. Sci. China: Earth Sciences, 2014, doi: 10.1007/s11430-014-5005-2.
- [19] Qi SZ, Luo F. Water environmental degradation of the Heihe River Basin in arid northwestern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005,108:205-215.
- [20] Ji XB, Kang ES, Chen RS, Zhao WZ, Zhang ZH, Jin BW. The impact of the development of water resources on environment in arid inland river basins of Hexi region, northwestern China [J]. Environmental Geology, 2006,50:793-801.
- [21] Qi SZ, Luo F. Environmental degradation problems in the Heihe River basin, northwest China [J]. Water Environment Journal, 2007,21:142-148.
- [22] Zhu GF, Su YH, Feng Q. The hydrochemical characteristics and evolution of groundwater and surface water in the Heihe River basin, northwest China, Hydrogeology Journal, 2008,16(1):167-182
- [23] Zhou W, Sun ZG, Li JL, Gang CC, Zhang CB. Desertification dynamic and the relative roles of climate change and human activities in desertification in the Heihe River basin based on NPP [J]. Journal of Arid Land, 2013,5(4):465-479.
- [24] Lu L, Li X, Cheng GD. Landscape evolution in the middle Heihe River basin of northwest China during the last decade [J]. Journal of Arid Environment, 2003,53:395-408.
- [25] Wang GX, Liu JQ, Jumpei K, Chen L. Effects of land-use changes on hydrological processes in the middle basin of the Heihe River, northwest China [J]. Hydrological Process, 2007,21: 1370-1382.
- [26] Feng Q, Liu W, Xi HY. Comprehensive evaluation and indicator system of land desertification in the Heihe River basin [J]. Natural Hazards, 2013,65:1573-1588.
- [27] 杨玲媛,王根绪. 近 20a 来黑河中游张掖盆地地下水动态变化[J]. 冰川冻土, 2005,(2):290-296. (YANG Lingyuan, WANG Genxu.

- Variations of groundwater in Zhangye basin of the middle reaches of the Heihe River in recent two decades [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005,27(2):290–296. (in Chinese))
- [28] 魏智,金会军,蓝永超,等. 基于 Kriging 插值的黑河分水后中游地下水资源变化[J]. *干旱区地理*, 2009,32(2):196–203. (WEI Zhi, JIN Huijun, LAN Yongchao, et al. Changes analysis of groundwater resources in the middle Heihe River using Kriging methods after water redistribution [J]. *Arid Land Geography*, 2009,32(2):196–203. (in Chinese))
- [29] 曹艳萍,南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化[J]. *遥感技术与应用*, 2011,26(6):18–26. (CAO Yanping, Nan Zhuotong. Monitoring water storage variations in the Heihe River Basin by the GRACE gravity satellite [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011,26(6):18–26. (in Chinese))
- [30] 曹艳萍,南卓铜,胡兴林. 利用 GRACE 重力卫星数据反演黑河流域地下水变化[J]. *冰川冻土*, 2012,34(3):179–188. (CAO Yanping, Nan Zhuotong, Hu Xinglin. Changes of groundwater storage in the Heihe River basin derived from GRACE gravity satellite data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012,34(3):179–188. (in Chinese))
- [31] Bajesh R, TRS Murthy, BR Raghavan. Time series analysis to monitor and assess water resources: a moving average approach [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005,109:65–72.
- [32] 聂振龙. 黑河干流中游盆地地下水循环及更新性研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2004. (NIE Zhenlong. Study on Groundwater Circulation and Renewability in the Middle Reaches of Heihe River Valley, Northwest China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2004. (in Chinese))
- [33] 高前兆,李福兴. 黑河流域水资源合理开发利用[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990:19–20. (GAO Qianzhao, LI Fuxing. Reasonable Development and Utilization of Water Resources in Heihe River Basin [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1990:185–186. (in Chinese))
- [34] 张应华,仵彦卿. 黑河流域中游盆地地下水补给机理分析[J]. *中国沙漠*, 2009,29(2):370–375. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing. Analysis of groundwater replenishment in the middle reaches of Heihe River [J]. *Journal of Desert Research*, 2009,29(2):370–375. (in Chinese))
- [35] 钟方雷,徐中民,程怀文,等. 黑河中游水资源开发利用与管理的历史演变[J]. *冰川冻土*, 2011,33(3):236–245. (ZHONG Fanglei, XU Zhongmin, CHENG Huaiwen, et al. The history of water resources utilization and management in the middle reaches of Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011,33(3):236–245. (in Chinese))
- [36] 张明泉,曾正中. 水资源评价 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994: 156–157. (ZHANG Mingquan, ZENG Zhengzhong. Water Resources Assessment [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. (in Chinese))
- [37] 胡兴林,肖洪浪,蓝永超,等. 黑河中游段河道渗漏量计算方法的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2012,34(2):460–468. (HU Xinglin, XIAO Honglang, LAN Yongchao, et al. Experimental study of calculation method of river seepage in middle and upper reaches of the Heihe River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012,34(2):460–468. (in Chinese))

## Temporal and Spatial Variation Characteristics of Groundwater Resources and Impact Factors in Zhangye Basin

MI Lina<sup>1,2</sup>, XIAO Honglang<sup>3</sup>, TIAN Juncang<sup>1,2</sup>, LI Jisheng<sup>4</sup>, TIAN Quanyan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture Ministry of Educational Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China;

3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

4. Gansu Hydrology and Water Resources Bureau, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Understanding the behavior of the groundwater body and its long term trends is essential for making any management decision in a given watershed. This paper made an estimation of the groundwater resources variation in the Zhangye Basin during 1985–2013 based on the long-term groundwater observation data and geostatistical method by partitions according to the different ways of irrigation. The results show that groundwater level and storage exhibit tremendous dissimilarity on temporal and spatial scale for the whole Zhangye Basin. The accumulative groundwater storage decreased by nearly  $47.52 \times 10^8 \text{m}^3$ , the annual average deficit reached  $1.64 \times 10^8 \text{m}^3$ , among which the accumulative groundwater level drawdown in the river/well water mixed irrigation district reached 5.72m, groundwater storage decreased by  $37.48 \times 10^8 \text{m}^3$ , accounting for about 78.87% of the total water loss of the Zhangye Basin. Accumulative groundwater level drawdown changed from high to low order in respective partitions: river water > river and well water mixed > spring water > river and spring water mixed  $\geq$  well water irrigation district, and the corresponding accumulative storage variation is: river and well water mixed > river water > well water > river and spring water mixed > well water irrigation district. In the long-temporal scale, multi-year accumulative storage in these partitions is still in negative change, namely the groundwater resource is still in a rather severe deficit, which would make a great threat to the aquifer. This is the result from the joint action of climate change and human activities, and human activities such as water diversion policy, groundwater mining and water saving project have become greater and greater. This study may provide a scientific basis for water resources planning and scheduling and provide relatively reliable way of estimating large scale groundwater balance.

**Key words:** groundwater resources; temporal and spatial variation; Zhangye Basin; Kriging; groundwater storage