

黑河中游典型灌区地下水位动态变化

陈军锋¹, 郜银梁², 闫云霞¹, 张成才²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 基于黑河沿岸地下水位观测井近 20 年实测观测资料, 运用 Mann-Kendall 方法进行年地下水位埋深序列的趋势分析, 并选取代表观测井分析不同区域在不同时期内的年际与年内变化。结果表明: 研究区地下水位埋深整体为增大趋势, 区域地下水位下降趋势明显。年内的季节分配表明, 从 20 世纪 80 年代至今, 地下水位变化由水文-灌溉型逐步向开采型转变, 其中平川区开采用最为明显, 集中表现在 2000 年之后, 分水是导致这一时期地下水位下降的主要因素。

关键词: 地下水位; Mann-Kendall 趋势分析; 季节变化; 黑河中游

中图分类号: P641.74

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0059-05

Dynamic change of groundwater level in typical irrigated area of Heihe River middle reach

CHEN Junfeng¹, GAO Yinliang², YAN Yunxia¹, ZHANG Chengcai²

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing, 100101, China;

2. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the observed data of groundwater monitoring wells during the past 20 years, using the method of Mann-Kendall to carry out trend analysis for the groundwater depth series, and selected the typical observed wells to analyze the change in year and years for different area and different periods. The results showed that: the regional groundwater level was evidently declining. From the 1980s to now, the type of dynamic change of groundwater level was gradually transformed from the hydrology-irrigation type to the exploitation type. The exploitation was enhanced. The most obvious area was Pingchuan Zone, especially after 2000. Water delivery to downstream was the main factor leading to the groundwater table decline.

Key words: groundwater level; Mann-Kendall trend analysis; seasonal change; Heihe River middle reach

近 20 年来黑河流域水资源开发利用过程中相继出现了区域性地下水位持续下降, 并导致了溢出带泉水量大幅度削减、植被退化、水质恶化、土壤盐渍化、沙漠化等一系列环境问题^[1-2]。近 50 a 黑河流域年平均气温呈明显的上升趋势, 年降水量和出山径流也有微弱的增加趋势^[3]。然而由于近几十年来中游不断开拓绿洲, 用水量不断增加, 下游生态用水减少, 东西居延海长期干涸, 下游生态环境岌岌可危, 地区和民族用水矛盾日益突出^[4]。为遏制黑河下游生态环境的恶化和解决突出的水事矛盾, 国家决定对黑河流域水资源实施统一管理和调度并成

功实施了水量调度^[5]。自实施甘蒙黑河集中调水方案以来, 下游额济纳旗核心绿洲生态环境恶化的状况初步得到缓解, 为应对更加严峻的水资源危机, 黑河中游采取遍地开花式的打井灌溉, 地下水开采增加, 引地表水量减少, 使黑河流域水资源和生态环境安全问题更加复杂化^[6]。地下水可开采储量也随之减少, 估算减少总量约为 8.23 亿 m³^[7]。

进行地下水动态研究是了解人类活动对地下水系统影响程度、变化趋势和变化幅度的一个重要途径^[8-9]。运用 Mann-Kendall 检验法进行地下水位序列的趋势分析, 并分区、分时段的分析地下水位的

收稿日期: 2011-02-24; 修回日期: 2011-05-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421305)资助

作者简介: 陈军锋(1973-), 女, 山东冠县人, 副研究员, 主要从事土地利用/土地覆被变化与流域水文等方面的研究。

通讯作者: 郜银梁(1982-), 男, 河南漯河市人, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。

年际与年内变化及引起变化的原因,从而为水资源的优化管理提供依据具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于张掖市临泽县境内(图 1),临泽县位于祁连山北部,南接肃南县,西靠高台县,北连内蒙阿拉善右旗,东临甘州区,总土地面积 277 400 hm^2 。其中绿洲面积 42 533.3 hm^2 (其中农耕地 15 333.3 hm^2),沙漠 25 000 hm^2 ,戈壁 83 600 hm^2 。地势北高南低东高西低,平均海拔 1 300 ~ 1 800 m。其气候属于大陆性温带干旱气候,多年平均降水 119.5 mm,约 60% 的降雨集中在 7 ~ 9 月份,年潜在蒸发量 2 365.6 mm,约为降雨量的 20 余倍。

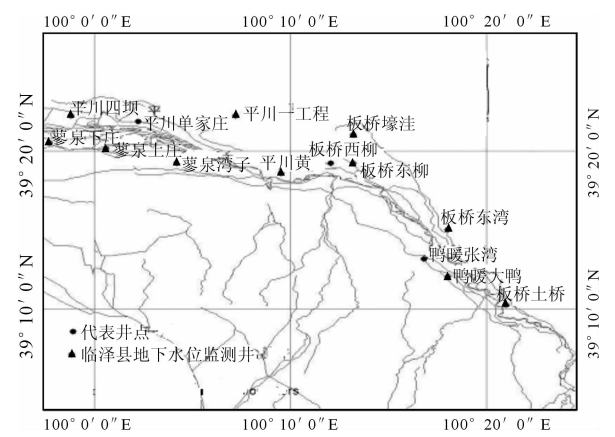


图 1 临泽县黑河沿岸地下水位监测井分布图

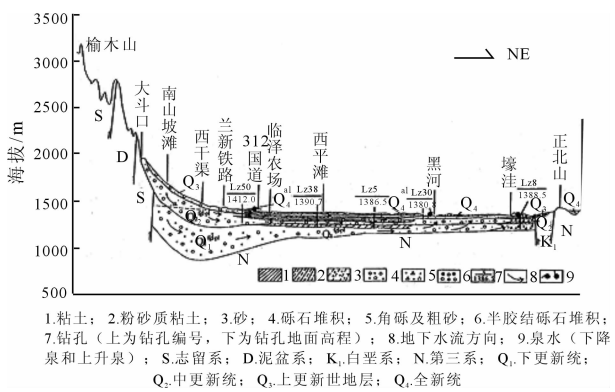


图 2 临泽地区水文地质剖面图

临泽县地下水主要赋存于中、上更新统($Q_2 \sim Q_3$)砂及砂砾卵石层中(图 2),依据埋藏条件分为潜水和承压水。潜水主要分布于兰新铁路以南、黑河沿岸南北两侧地带及中部承压水区表层。最佳富水区为梨园河洪积扇中下部,单井涌水量大于 5 000 m^3/d ,水位埋深 30 ~ 200 m,由南向北变浅。黑河沿岸南北两侧潜水富水性 3 000 ~ 5 000 m^3/d ,至北部山前不足 1 000 m^3/d 。水位埋深 0.5 ~ 10 m,由黑河谷地向北变深。中部承压水顶部亦有表层潜水分

布,含水层岩性为中细砂、粉细砂,厚度一般为 0.5 ~ 2.0 m。单井涌水量 100 ~ 500 m^3/d ,局部 10 ~ 100 m^3/d ,水位埋深 0.5 ~ 3.0 m,低洼处形成泉群,多被纳入渠系、水库并引入田间。赋存于中部的承压水含水层岩性为砂及砂砾卵石,属多层结构,单层厚度 2 ~ 20 m,单井涌水量 1 000 ~ 3 000 m^3/d ,水位埋深 0.5 ~ 5.0 m^[10]。

2 Mann - Kendall 趋势分析基本原理

Mann - Kendall(M - K)检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,可用于分析降水、径流、地下水位、气温和水质等要素时间序列的趋势变化。Mann - Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布的数据^[11 - 12]。

在 M - K 检验中,原假设 H_0 为时间序列数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,是 N 个独立的、随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验,对于所有的 $k, j \leq n$,且 $k \neq j, x_k$ 和 x_j 的分布是不相同的,检验的统计变量 S 计算如下式:

S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \tag{1}

其中: \text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases}

S 为正态分布,其均值为 0,方差 $V \propto r(S) = n(n - 1)(2n + 5)/18$ 。当 $n > 10$ 时,标准正态统计量由下式计算:

Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{V \propto r(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{V \propto r(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{2}

这样,在双边的趋势检验中,在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计变量 Z ,大于 0 时,是上升趋势;小于 0 时,则是下降趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28、1.64 和 2.32 时,分别表示通过了信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

以临泽灌区 14 眼观测井 1984 - 2004 年的实测地下水位埋深为依据,在 R 语言中进行各个井点的 M - K 趋势检验,所得 Z 值如图 3 所示。各井点 Z 值除板桥东柳(-0.27)外,均大约 0,序列都为上升趋

势,地下水位埋深不断增大,地下水位持续下降。其中上升趋势最明显的是板桥西柳, Z 值为 5.13, Z 值最小的井点为蓼泉上庄($Z = 3.59$),均大于 2.32,序列通过了 99% 的显著性检验,具有明显的上升趋势,地下水位埋深呈区域性增大趋势。水利工程的兴建对径流的拦蓄与下游的输水致使补给量减少是埋深增大的主要原因^[13]。

3 地下水位埋深的分区分析

尽管 M - K 趋势检验的结果表明,区域地下水位埋深呈增大趋势,但由于序列井点分属在不同的灌区,再加上人为作用的影响,使得各观测井之间表现出的分阶段上升趋势不同。分区域查明地下水动态变化的类型,有利于区分人类活动尤其是地下水开采作用在不同地区的影响,从而指导地下水开发利用的方式和轻度。根据地下水埋深的年际变化特征以及沿着黑河的分布情况,将井点分成以下三个区域进行分析:①鸭暖区,井点地下水位埋深序列特点是整个时间序列趋势相似,位置接近,包括监测井点有板桥东湾、鸭暖张湾和鸭暖大鸭;②板桥区,序列特点是 1999 年之前虽有变化,但趋势不同,1999 年后趋势又极为相似,且位置上接近,包括监测井点有板桥东柳、板桥西柳;③平川区,序列特点是 1993 年之前序列稳定,无明显趋势,1993 年之后趋势相似,且位置接近,包括井点有平川黄二,平川一工程,平川单家庄,蓼泉上庄与蓼泉湾子。在此基础上分别选取鸭暖张湾、板桥西柳和平川单家庄作为分区的代表井点进行不同时期年内的季节变化分析。

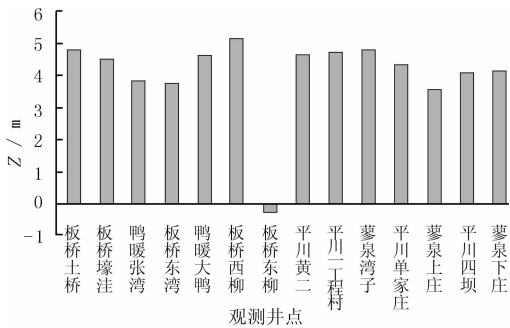


图 3 地下水位观测井点埋深序列的 M - K 趋势检验

3.1 不同时段年际变化特征

取 20 世纪 80 年代(1984 - 1989), 90 年代(1990 - 1999), 2000 年以后(2000 - 2004)三个阶段分析不同时期各区域的埋深变幅如表 1 所示,埋深增大为正值,减小为负值。为了表明变化的幅度,取小于 0.5 m 为缓慢下降,0.5 ~ 1 m 为明显下降,大

于 1 m 为显著下降。

表 1 不同时期地下水位埋深变幅的分区特点						m
80 年代	水位升降	90 年代	水位升降	2000 后	水位升降	
鸭暖区	0.13 缓慢下降	0.20 缓慢下降	1.57 显著下降			
板桥区	0.29 缓慢下降	-0.14 缓慢上升	0.71 明显下降			
平川区	0.13 缓慢下降	0.28 缓慢下降	0.66 明显下降			

可以看出,整个区域上从 20 世纪 80 年代至今,地下水位埋深都在增大,而三个时期比较而言,2000 年后地下水位埋深增大最为迅速,水位明显下降。各个区来看,鸭暖区与平川区 80 - 90 年代的平均变幅接近,均为缓慢下降。而 2000 年以后,鸭暖地区的埋深增大更为明显,达到了 1.57 m,呈显著的下降趋势。板桥区在 80 年代的变幅为 0.29 m,下降的幅度比其他地区稍大,90 年代埋深略有减小,变化为负值(-0.14),2000 年后埋深增大了 0.71 m,地下水位明显下降。随着水利工程的兴建,地下水补给量的减少是造成区域地下水位下降的决定因素^[11],而 2000 年后的剧烈下降,其中分水造成中游地表水对地下水渗漏补给减少是主导因素。处在河道两侧的板桥区的井点受河道影响更明显,下降最剧烈。分析板桥区的特异性,90 年代的减小主要是东柳引起的,如果考虑特殊点板桥壕洼,这一时期仍然是埋深增大的,这种原因主要是井点较少引起的,而三口井的不同表明了地区的复杂性。

3.2 代表井点年内季节变化分析

临泽灌区地下水的主要补给来源是黑河水,水利化程度是决定地下水位的决定因素^[12]。主要的来水集中在 7 - 9 月份,3 - 5 月份来水最少,恰是春灌的季节,即所谓“卡脖子旱”时期,夏秋季节是作物生长的主要季节,因而灌溉期为 5 - 11 月,非灌溉期为 12 - 3 月。三个井点 80 年代至今的年内春季(3 - 5 月份)、夏季(6 - 8 月份)、秋季(9 - 11 月份)、冬季(12 - 2 月份)埋深动态变化与如图 4 所示。

三个区域中板桥区观测井距黑河主河道较远,埋深最大,鸭暖区与平川区观测井分布在近河道两侧,埋深较浅。尽管各区域埋深不同,但从季节多年平均埋深变化看都表现为夏秋季节埋深较浅,冬春季较深的共同特点,这表明河川水文作用与农业区灌溉作用的共同影响使得生长季节埋深较小,非生长季节埋深较大。但在各个区又有不同的特点(图 5)。

鸭暖区年内埋深序列明显可以分为三个时段,1984 - 1993,1993 - 1999,1999 - 2002,各时段的季节平均埋深如图 6 所示。去掉 1984 年的突兀点,可

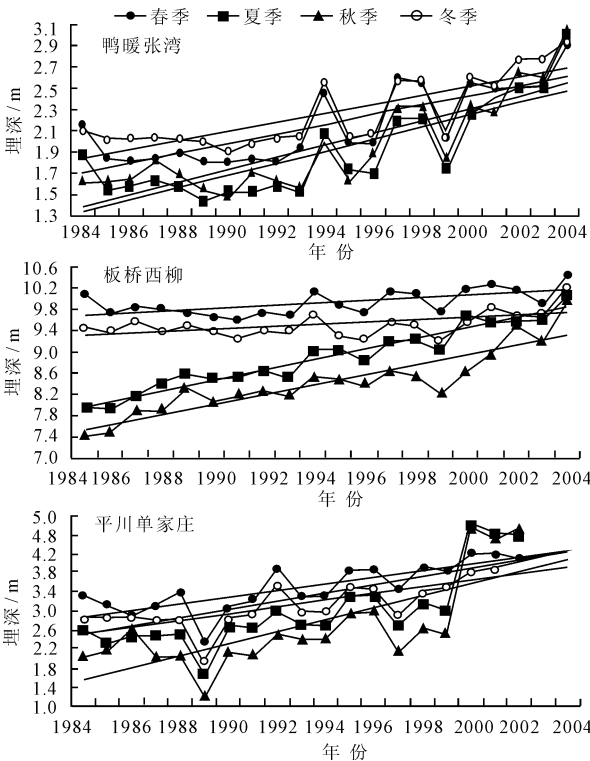


图4 代表监测井年内季节埋深动态变化图

以看出从 1984 - 1993 年间序列基本无趋势性变化, 1994 - 1999 年间序列波动性大, 总体趋势上升, 2000 年后序列明显上升。这表明, 1993 年之前地下水动态变化受到人为的影响微弱, 1994 年后, 区域地下水补给的减少引起地下水位的下降, 分水 2000 年后水位大幅度下降的主要原因。分段埋深持续增加, 尤其是分水之后夏秋季节的埋深增大了 0.6 m。从年代的变幅来看(表 2), 90 年代与 80 年代相比, 变幅最大的是春夏两季, 春季稍小, 而冬季最小, 2000 年后与 90 年代相比变化最大的是夏秋两季。从年内季节分配上看, 一年当中夏季埋藏最浅, 冬季埋藏最大, 与河川径流的来水情况一致, 且鸭暖区处在天然地下水汇集出露区域^[4], 上游地下水回灌汇集引起夏秋季节地下水位升高, 而且冬春季埋深接近, 表明该地受春灌的影响较小。所以, 鸭暖区的地下水动态类型主要为水文型, 而且受到

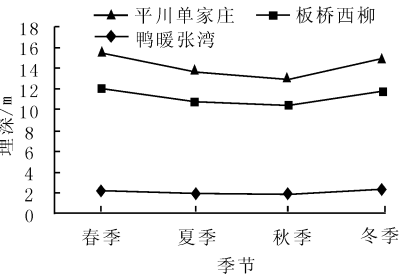


图5 代表井点多年平均埋深图

上游灌溉回归水的影响。

图 4 表明, 板桥区春季埋深最大, 表明春季有开采, 冬季次之, 夏季埋深减小, 秋季为一年中的最小季节, 表明地表水灌溉引起了地下水位的升高, 这与鸭暖区不同。从变化趋势来看, 四季的埋深都在增大, 说明地表径流的补给量逐步减少, 但冬春增大的趋势明显小于夏秋季节, 表明春季地下水开采量变化不大; 可以看出, 1999 年之后夏季的地下水埋深与冬季相当, 而秋季埋深也在逐步增大, 这表明, 夏季灌溉的水源中地下水所占比例在逐步增大。从年代变幅来看, 80 年代地下水位埋深有增大的趋势, 增幅明显的是夏秋季节, 但都小于 1 m; 90 年代埋深略有增大; 2000 年以后全年水位埋深明显增大, 秋季达到了 1.73 m。这表明, 尽管河川径流补给的主要季节夏秋季节的水位埋深在全年较小, 但其埋深在逐步的增大, 且增大的速率也在增大, 这充分表明夏秋季节的人为开采强度在大幅增大。

平川单家庄从 20 世纪 80 年代至今的年内季节过程线与板桥西柳相似(图 4), 80 年代水位埋深整个趋势是增大的, 但增幅不大。一年当中埋深最大的季节为春季, 其次为冬季, 夏季秋季最小, 这表明春季存在开采, 而夏秋季节地表径流补给与灌溉作用明显。从增加的趋势来看, 冬春幅度较小, 夏秋较大。分水前(1984 - 1999 年), 地下水埋深的年内分配一致, 且 80 到 90 年代的季节埋深降幅小于 0.5 m(图 6)。分水后(2000 - 2004 年), 夏秋季节埋深一跃而成为一年当中埋深最大的时期, 夏季平均埋深下降了 1.3 m, 秋季平均埋深下降了 1.5 m。这充分表明分水后地表径流补给减少, 地表水灌溉量减少而引起的地下水开采作用明显, 地下水埋深大幅增大。作为临近天然河道的井点, 夏季埋藏较小, 秋季埋藏最小, 地下水动态明显为水文 - 灌溉型, 夏秋季节增幅加大表明开采加强, 尤其在 2000 年后, 大幅度的地下水开采是造成夏秋地下水位埋深急剧增大的主要原因, 这一地区的地下水动态类型由水文 - 灌溉型向开采型转变。

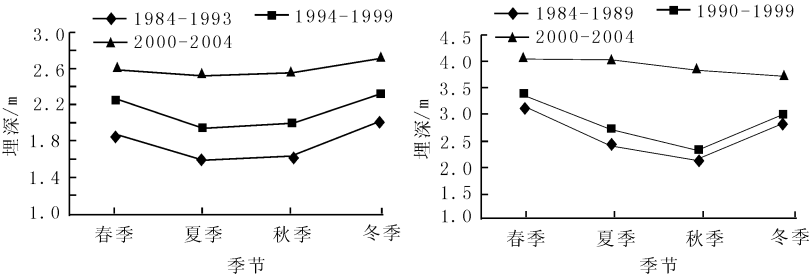


图6 鸭暖张湾与平川单家庄分时段年内季节平均变化图

4 结 语

通过年地下水埋深序列的 M-K 检验的趋势分析表明,14 眼井中,除板桥东柳地下水埋深略有减小外,其余都为增大趋势,其 Z 值都大于 2.32,通过了 99.% 的显著性检验,区域地下水位下降趋势明显。通关代表观测井的年内季节变化的时间序列分析表明:

(1)近 20 年来,临泽灌区地下水位呈现了显著的下降趋势,突出表现在 2000 年以后。地下水位持续下降的决定性因素是水利化程度的提高,大型水库的兴建减少了天然河道对地下水的补给作用,渠道衬砌更减少了沿途的下渗,致使地下水的补给来源大幅度的减弱;

(2)2000 年以后地下水位埋深的迅速增大表明分水对于农业灌溉的影响巨大,河水灌溉的不足导致地下水迅速开采是引起这一时期地下水位下降的主要因素;

(3)天然径流补给仍然是灌区地下水的主要补给来源,夏秋季节的埋深增幅迅速,区域地下水正在由水文-灌溉型,向开采型转变,这种变化在平川区最为剧烈。

参考文献:

[1] 李启森,赵文智. 黑河分水计划对临泽绿洲种植业结构调整及生态稳定性发展的影响——以黑河中游的临泽县平川灌区为例[J]. 冰川冻土,2004,26(3):333-343.

(上接第 58 页)

[6] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响[M]. 北京:科学出版社,2007.

[7] Li L, Hao Z C, Wang J H, et al. Impact of future climate change on runoff in the head region of the Yellow River [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008,15(5):347-354.

[8] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.

[9] 王国庆,张建云,贺瑞敏,等. 黄河流域大尺度水文过程模拟研究[J]. 水利水电技术,2009,40(2):5-8.

[10] 金君良,陆桂华,吴志勇. VIC 模型在西北干旱半干旱地区的应用研究[J]. 水电能源科学,2010,28(1):12-14.

[11] 吴志勇,陆桂华,张建云,等. 基于 VIC 模型的逐日土壤含水量模拟[J]. 地理科学,2007,27(3):359-364.

[12] 陆桂华,金君良,吴志勇,等. 水文模型植被参数获取方法及应用研究[J]. 水利水运工程学报,2009(4):1-6.

[2] 高前兆,李小雁,仵彦卿,等. 河西内陆河流域水资源转化分析[J]. 冰川冻土,2004,26(1):48-54.

[3] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 甘肃河西地区近 24 年来气象和水文序列的变化趋势[J]. 兰州大学学报,2002,38(2):163-170.

[4] 陈仁升,康尔泗. 黑河干流中游地区季平均地下水位变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(5):36-43.

[5] 王浩,常炳炎,秦大庸. 黑河流域水资源调配研究[J]. 中国水利,2004(9):18-21.

[6] 高前兆,仵彦卿,等. 黑河流域水资源的统一管理与管理能力的提高[J]. 中国沙漠,2004,24(2):156-161.

[7] 魏智,金会军,蓝永超,等. 黑河实施分水后中游灌区地下水资源量的变化分析[J]. 冰川冻土,2008,30(2):334-350.

[8] 杨玲媛,王根绪. 近 20 a 来黑河中游张掖盆地地下水动态变化[J]. 冰川冻土,2005,27(2):290-296.

[9] 张立伟,延军平. 咸阳市气候变化与地下水变化趋势分析——以泾河两岸黄土高原区为例[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):102-105.

[10] 张福. 浅析临泽县地下水资源开采潜力及井网布局规划[J]. 甘肃农业,2002(10):60-61.

[11] 刘燕. 泾惠渠灌区地下水位动态变化特征及成因分析[J]. 人民长江,2010,41(8):100-107.

[12] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化与突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.

[13] 吉喜斌,康尔泗,赵文智. 黑河中游典型灌区水资源供需平衡及其安全评估[J]. 中国农业科学,2005,38(5):974-982.

[13] Jin J, Lu G, Wu Z. Estimating precipitation for poorly-gauged areas in western China[C]//. Hyderabad, India: IAHS Publication, 2009:238-244.

[14] Liang X, Xie Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. Advances in Water Resources, 2001,24(9):1173-1193.

[15] Abdulla F A, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. Application of a macroscale hydrologic model to estimate the water balance of the Arkansas-Red river basin[J]. Journal of Geophysical Research, 1996,101(3):7449-7459.

[16] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(4):1031-1036.

[17] 张建云,轩云卿,李健. 模型参数优化方法及其应用[J]. 水文,1999,19(增刊):61-66.