

Dynamic of Groundwater System under Human Abstraction in the Loessial Hilly Area —A Case Study in the Neiguan-Xiangquan Basin*

Linshan Yang^{1,2}, Changbin Li², Wenyan Li^{1,2}, Wenjin Yang², Shuaibing Wang¹

¹College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou

²Center for Dryland Water Resources Research and Watershed Science at the Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou
Email: yanglsh12@lzu.edu.cn

Received: Feb. 11th, 2013; revised: Mar. 1st, 2013; accepted: Mar. 16th, 2013

Copyright © 2013 Linshan Yang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In this study, we investigated the groundwater system dynamic influenced by the human abstraction in a typical loessial hilly area named the Neiguan-Xiangquan Basin (NXB). Groundwater level measurements of the 44 wells in the region from 2001 to 2010 were used to quantify the change during the time period. A holistic method of groundwater assessment was adopted to quantitatively illustrate the groundwater dynamic. Quantifications suggested a strong impact of human abstraction on both recharge and discharge of the groundwater system. Patterns of groundwater were deeply influenced and varied broadly when compared between groundwater levels of the year 2001 and 2010, revealed that the groundwater system in the NXB had represented an obvious human abstraction-forced dynamic, with a very active and sensible drawdown across the whole area.

Keywords: Abstraction; Dynamic; Groundwater System; Loess Hilly Area

开采条件下黄土丘陵区地下水系统动态研究 ——以内官 - 香泉盆地为例*

杨林山^{1,2}, 李常斌², 李文艳^{1,2}, 杨文瑾², 王帅兵¹

¹兰州大学资源环境学院, 兰州

²兰州大学西部环境教育部重点实验室旱区水资源与流域科学研究中心, 兰州
Email: yanglsh12@lzu.edu.cn

收稿日期: 2013年2月11日; 修回日期: 2013年3月1日; 录用日期: 2013年3月16日

摘要: 以甘肃省定西市内官 - 香泉盆地为研究区, 根据 2001~2010 年该区地下水实际开发利用, 地下水动态及资源评价基本理论方法, 计算并分析了区内 44 口长观井所代表的地下水系统变化规律。结果表明, 强烈的地下水开采改变了内官 - 香泉盆地地下水系统的天然源汇项构成, 进而影响到地下水系统格局及动态。2001 年以来, 内官 - 香泉盆地地下水位呈现明显的开采型动态, 并处于活跃下降阶段。

关键词: 开采; 动态; 地下水均衡; 黄土丘陵区

*基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41001014), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110211110011)。
作者简介: 杨林山(1989-), 男, 甘肃榆中人, 硕士研究生, 主要从事旱区水资源研究。

1. 引言

地下水是水资源的重要组成部分, 在保障我国城乡居民生活用水, 支持社会经济发展和维持生态平衡等方面发挥着重要作用, 尤其是在地表水资源相对贫乏的西北地区, 地下水资源具有不可替代的作用^[1]。人类活动对地下水的影响主要是通过通过对水土资源的开发利用而产生的。随着社会经济的快速发展, 人类对地下水的干预愈来愈明显, 并产生了一系列环境负效应^[2]。开展地下水动态研究, 是地下水资源可持续开发利用与管理的依据, 也是进行与地下水资源有关的工程规划、设计及运行管理的前提。地下水动态研究为合理开发利用地下水资源提供科学的决策依据, 对实现地下水资源的合理开发、高效利用、科学管理和有效保护, 促进经济社会和生态环境的协调发展具有重要的理论意义和实用价值^[3]。甘肃省定西市内官 - 香泉盆地地处我国黄土高原低山丘陵区, 盆地内发育有河谷型平原潜水, 是定西市生活和工业的集中供水源地, 同时还承担着盆地内农业灌溉供水的任务^[4]。该区地处半干旱黄土高原腹地, 降水量少, 可利用水资源十分紧缺。近年来, 随着经济社会的发展, 各行业用水量不断增加, 地下水超采状况更加严重, 地下水位下降呈加快趋势, 水质也趋于恶化, 业已产生一系列生态环境问题^[5]。从目前关于该区的发表来看, 高恩基分析了定西市水资源利用现状^[6]; 黄伟东等分析了内官 - 香泉盆地历年地下水位变化规律, 在水均衡基础上对引洮施灌后的地下水动态做了趋势预测^[5]; 温续余等结合内官 - 香泉盆地地质状况和需水情况, 对引洮施灌后的地表水 - 地下水联合调度做了初步分析^[7]; 郭富赟分析了定西市地下水开发利用引起的环境地质问题和对策^[8]; 黄伟东分析了引洮供水对关川河径流的影响, 计算了回归水量^[9]。这些成果以讨论水利工程对区域地下水系统的影响较多, 但对人类活动改变地下水水流场格局和地下水动态的重要性涉及较少, 即在该区的地下水研究中对人类活动如何改变地下水源汇项, 致使地下水系统发生改变较少深入分析。

本文拟从内官 - 香泉盆地地下水开发利用实际出发, 厘清地下水系统源汇项构成, 计算区域地下水位变化的时空特征, 分析人工开采条件下地下水系统动态及格局变化的原因, 为黄土丘陵区地下水资源合

理利用及有序管理提供参考。

2. 理论和方法

2.1. 地下水均衡理论

地下水均衡研究的目的在于阐明某个地区在某一段时间内地下水系统收入与支出之间的数量关系^[10]。黄土丘陵区地下水收入通常包括大气降雨入渗补给量、洪水入渗补给量、渠系田间回归水量和侧向潜流等, 地下水支出则主要有下游排泄量和人工开采量。地下水均衡方程如下^[10,11]:

$$(Q_{pr} + Q_{rr} + Q_{ir} + Q_{in}) - (Q_{out} + Q_a) = \mu \Delta h A \quad (1)$$

式中: Q_{pr} 为降雨入渗补给量, 万 m^3/a ; Q_{rr} 为洪水入渗补给地下水, 万 m^3/a ; Q_{ir} 为灌溉回归补给地下水, 万 m^3/a ; Q_{in} 为沟谷潜流补给水量, 万 m^3/a ; Q_{out} 为流出出口断面的水量, 万 m^3/a ; Q_a 为人工开采量, 万 m^3/a ; μ 为给水度, 无量纲, 本文取 0.1^[11]; Δh 为水位变幅, m; A 为研究区面积, ha。

2.1.1. 降雨入渗

利用降雨入渗系数法计算降雨入渗补给量:

$$Q_{pr} = 0.1 * P * a * A \quad (2)$$

式中: Q_{pr} 为降雨入渗补给量, 万 m^3/a ; P 为有效降雨量, mm; a 为有效降雨入渗补给系数, 无量纲, 本文取 0.05^[5]; A 为入渗补给发生面积, km^2 。

2.1.2. 洪水入渗

根据洪水入渗系数法计算洪水入渗补给量:

$$Q_{rr} = Q_r * \eta \quad (3)$$

式中: Q_{rr} 为洪水入渗补给地下水, 万 m^3/a ; Q_r 为盆地内洪水量, 万 m^3/a ; η 为河道洪水入渗补给系数, 无量纲, 本文中香泉盆地取值 0.51, 卧龙川盆地取值 0.28, 内官盆地取值 0.36^[11]。

2.1.3. 渠系田间入渗

根据农田灌溉及渠系水回归补给系数法计算渠系田间入渗补给量:

$$Q_{ir} = Q_i * \beta \quad (4)$$

式中: Q_{ir} 为灌溉用水入渗补给地下水, 万 m^3/a ; Q_i 为毛灌溉用水量, 万 m^3/a ; β 为灌溉水回归系数, 无

量纲, 本文取 $0.15^{[6]}$ 。

2.2. 可开采量计算

地下水可开采量是指在可预见的时期内, 通过经济合理、技术可行的措施, 在不引起生态环境恶化条件下的允许从含水层中获取的最大水量^[12]。若不使地下水水位下降, 实现采补平衡, 根据水量平衡原理, 地下水开采量为补给量中除去自然排泄量, 即

$$Q_a = Q_R - Q_d \quad (5)$$

式中: Q_a 为可开采量, 万 m^3/a ; Q_R 为地下水补给量, 万 m^3/a ; Q_d 为自然排泄项, 万 m^3/a 。

2.3. 地下水动态理论

地下水动态是指在各种因素的综合影响下, 地下水的水位、水量、水温及水化学成分等要素随时间的变化, 本文主要侧重地下水水位动态。

年均地下水埋深下降速率按式(6)计算:

$$v = \frac{Z_1 - Z_2}{t} \quad (6)$$

式中: v 为年均地下水埋深下降速率(m/a); Z_1 为初始地下水埋深(m); Z_2 为现状地下水埋深(m); t 为时间间隔(a)。

地下水埋深累计变幅按式(7)计算:

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 \quad (7)$$

式中: ΔZ 为地下水埋深累计变幅(m); Z_1 为初始地下水埋深(m); Z_2 为现状地下水埋深(m)。

3. 研究区

内官-香泉盆地地处陇西黄土高原祖厉河左支关川河上游西河河谷地带, 位于定西市安定区西南部, 介于东经 $104^{\circ}20' \sim 104^{\circ}50'$, 北纬 $35^{\circ}17' \sim 36^{\circ}02'$ 之间。盆地东北接会宁, 南连通渭、陇西、渭源, 西靠临洮, 西北和榆中县毗邻(图 1)。全境属黄土高原丘陵沟壑低山区, 内官盆地面积为 42.73 km^2 , 香泉盆地面积为 29.85 km^2 , 卧龙川盆地面积为 13.20 km^2 , 海拔 $1750 \sim 2580 \text{ m}$ 。境内沟壑纵横, 丘陵起伏, 山多川少。

内官-香泉盆地位于陇西黄土高原腹地, 属中温带干旱半干旱区, 具典型大陆性气候。冬春季多西北

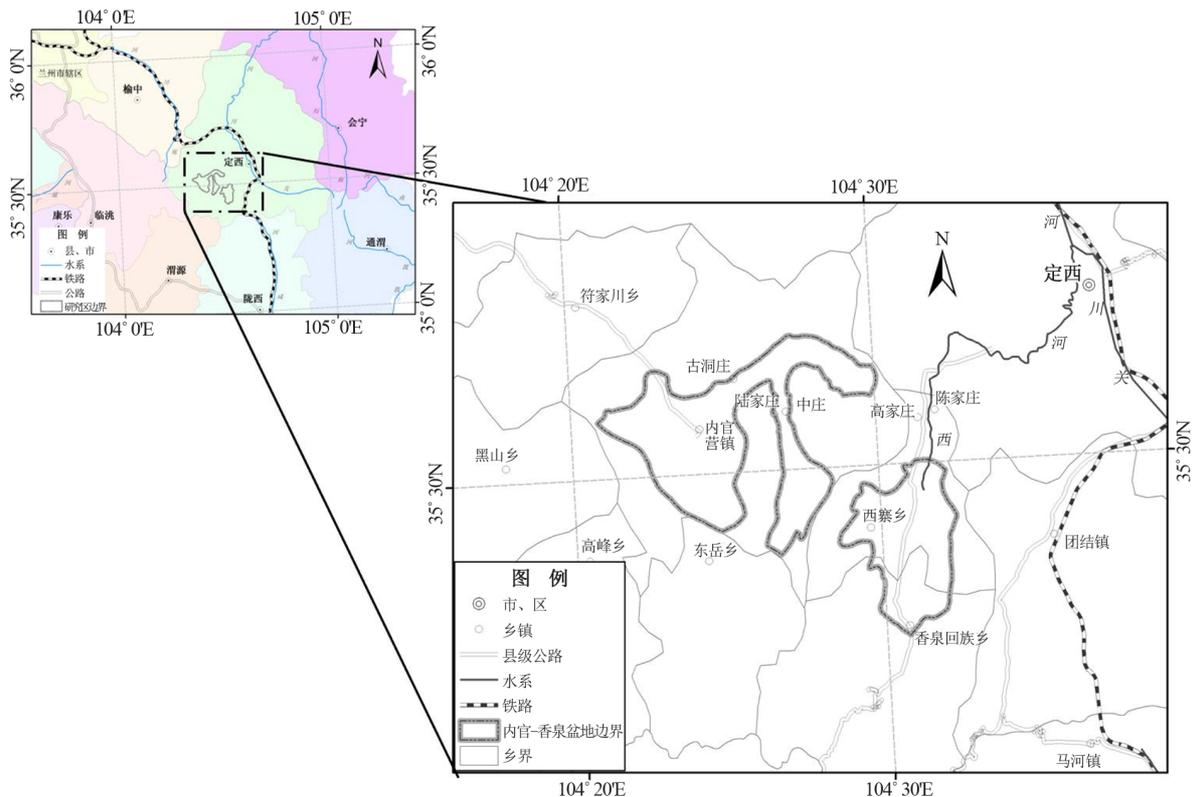


Figure 1. The location of Neiguan-Xiangquan basin
图 1. 内官-香泉盆地地理位置图

风, 夏秋季多东南风, 风力一般为二至五级, 最大为八级。区内极端最高气温 34.3℃, 极端最低气温 -32.5℃, 年均气温 5.7℃~7.7℃, ≥10℃有效积温 2239.1℃, 年日照时数 2500 h, 无霜期 141 天, 最大冻土深度为 0.90 m。区内降水受时空影响分布不均, 南部山区年降水 475 mm, 盆地内 456 mm; 年蒸发能力达 1529 mm, 空气相对湿度 64.6%, 干燥度 1.5~4.0。降水年内分配受季节变化影响, 多集中于 6~9 月, 约占年降水量的 60%。

地质构造方面, 内官-香泉盆地为 NNW 向小型断陷沟谷盆地, 其南为内官南山山前断裂带, 北为锦鸡塬断裂。内官盆地位于西河上游断陷盆地的西侧, 香泉盆地位于断陷盆地的东侧, 卧龙川盆地被夹持在中间。盆地内不同来源的地下水汇集, 由于盆地底层为下更新统和中更新统以粉质粘土为主的相对隔水地层, 上覆河流侵蚀堆积物构成具有富水性较好的潜水含水层, 三个盆地之间隔以中更新统粉质粘土, 使得地下水在完成潜水和承压水之间的转化后, 沿着三个盆地各自的排泄通道(河谷)流向盆地出口断面, 形成相对不透水的独立水文地质单元^[5](图 2)。

4. 结果

4.1. 地下水均衡演算

内官-香泉盆地地下水系统接收各类补给主要有降水入渗、洪水入渗、渠系田间入渗和河谷丘陵潜流; 地下水排泄项为机井开采和盆地向下游断面出流。均衡结果分析如下:

地下水总补给量为 $1184 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。其中: 研究区河道内洪水入渗补给量 $249 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 占总补给量的 21%。

盆地内渠田灌溉用水入渗补给量 $261 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 占总补给量的 22.06%。

降雨入渗补给量 $123 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 占总补给量的 10.37%。

潜流补给量为 $552 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 分别占总补给量的 46.57%。

地下水总排泄量为 $2496 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。其中:

盆地出口断面排泄量为 $378 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 占总排泄量 15.15%。

地下水开采量为 $2118 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 占总排泄量 84.85%。

由表 1 可以看出内官-香泉盆地地下水系统为负均衡, 均衡差约 -1312 万 m^3 , 其中内官盆地超采量为 503 万 m^3 , 香泉盆地超采 628 万 m^3 , 卧龙川盆地超采量为 181 万 m^3 。根据公式(4)算得盆地内的可开采量为 806 万 m^3 。由此可以得出盆地内的地下水负荷很大, 超采严重。机井开采占总排泄量的 84.85%, 是造成地下水严重超采的重要影响因素。

4.2. 地下水位动态和降深漏斗变化

根据 2001~2010 年盆地内 44 口地下水长期观测井资料, 计算开采条件下地下水位变化数量特征, 分析地下水过度开采造成的地下水系统格局演变规律。计算结果显示, 盆地内地下水流场受地形和水源地开

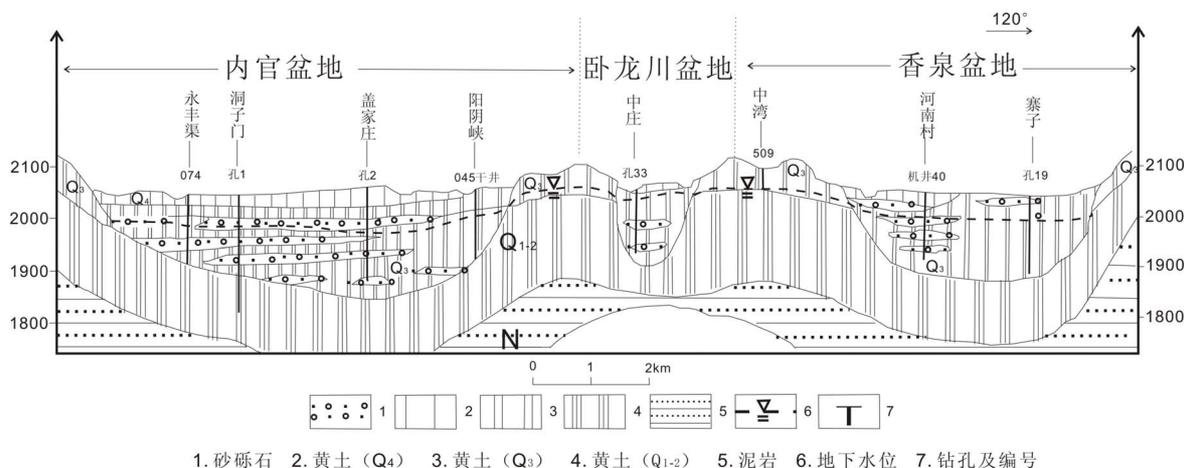


Figure 2. The hydrogeological profile of study area^[8]
图 2. 研究区水文地质剖面图(文献[8]; 略作修改)

Table 1. The computation sheet of groundwater balance in 2010 (ten thousand m³)
表 1. 2010 年地下水均衡计算表(万 m³)

均衡要素	计算区			全区		
	内官盆地	香泉盆地	卧龙川盆地	合计	百分(%)	
补给量	降水入渗	55	50	17	122	10.37
	洪水入渗	158	82	9	249	21.00
	渠田入渗	159	67	35	261	22.06
	潜流	334	156	62	552	46.57
	合计	706	355	123	1184	100
排泄量	断面流出	196	136	46	378	15.15
	机井开采	1013	847	258	2118	84.85
	合计	1209	983	304	2496	100
均衡结果	-503	-628	-181	-1312	-	

采双重控制, 从流向格局来看, 水源地开采对区域地下水水流场的影响越来越凸显。计算期内, 盆地内地下水水流场发生明显变化, 原来盆地地下水水流场主要由盆地内河谷地形控制, 地下水水流场与地表水流方向基本一致, 即自南西北东流向盆地出口断面^[7]。随着城区经济发展, 需水量猛增, 地下水开采力度加大, 水位开始剧烈下降, 地下水漏斗连片发展, 水源地附近已经出现大片的采空区。由于水源地开采的袭夺, 周边地下水向水源地汇聚, 从水位等值线和水平水力坡度来看, 水源地袭夺和周边水流聚汇的趋势正在加重。盆地内地下水水流场受地形和水源地开采双重控制, 从流向格局来看, 水源地开采对区域地下水水流场的影响越来越凸显(图 3)。

由内官 - 香泉盆地地下水位年均下降速率等值线图可知, 区内地下水位处于整体下降趋势, 降幅差异比较显著, 年均降幅大致在-0.08~2.75 m。过去 10 年, 累计下降最大的地方为内官镇林川村, 地下水埋深从原来的 51.13 m(2001 年)增大到 76.88 m(2010 年)。从地区水资源可持续利用的角度, 作为安定区城镇和工业用水水源地, 内官 - 香泉盆地一方面要保证城区居民生活和工业用水, 另一方面还要维系盆地内农业灌溉用水和生活用水。过去几十年, 城镇化水平的提升和农田灌溉面积的扩大, 使盆地内地下水补给量远小于地下水实际开采量, 地下水位降幅也逐年加大。年均降幅大于 1 m 的区域已经占据了内官盆地大部、卧龙川盆地的东南部和香泉盆地的北部, 其中内

官盆地地下水位下降幅度最大, 达到 2.75 m/a(图 4)。

4.3. 人类活动对地下水水位的影响

人类活动对区域地下水系统的影响主要有人工开采和灌溉等回渗补给两种方式。忽略地下水埋深加大对回渗补给量的影响以及其他入渗补给受人类活动的影响, 就灌溉系统渠田回渗补给和人工开采所造成的水位升降进行分析(图 5)。由图可知, 渠田回渗补给造成的地下水位回升在三个盆地间的差异较小, 平均为 0.29 m。由人工开采导致的地下水位下降是很明显的, 香泉盆地水位下降最大为 2.84 m, 水位下降最小的卧龙川盆地也有 1.95 m。渠田回渗补给导致的水位回升值与人工开采导致的水位下降值相差 8 倍, 可见人类活动对地下水系统的影响中, 以人工开采所致的地下水位下降占主要因素。人工开采中, 农灌部分和相应的渠田回渗量, 呈面状分布在灌区; 而城区供水水源地, 系集中开采后直接外调, 基本无回归补给, 使得水源地附近的年均地下水位降幅较盆地内其他地区大。总体上, 内官 - 香泉盆地的地下水动态类型为人工开采型。

5. 结论

通过分析内官 - 香泉盆地地下水均衡, 得出盆地均衡状况为负, 超采严重, 超采量为 1312 万 m³。受开采影响, 地下水系统的源汇项构成有较大改变, 地下水系统流场格局也发生变化。过去 10 年, 盆地内

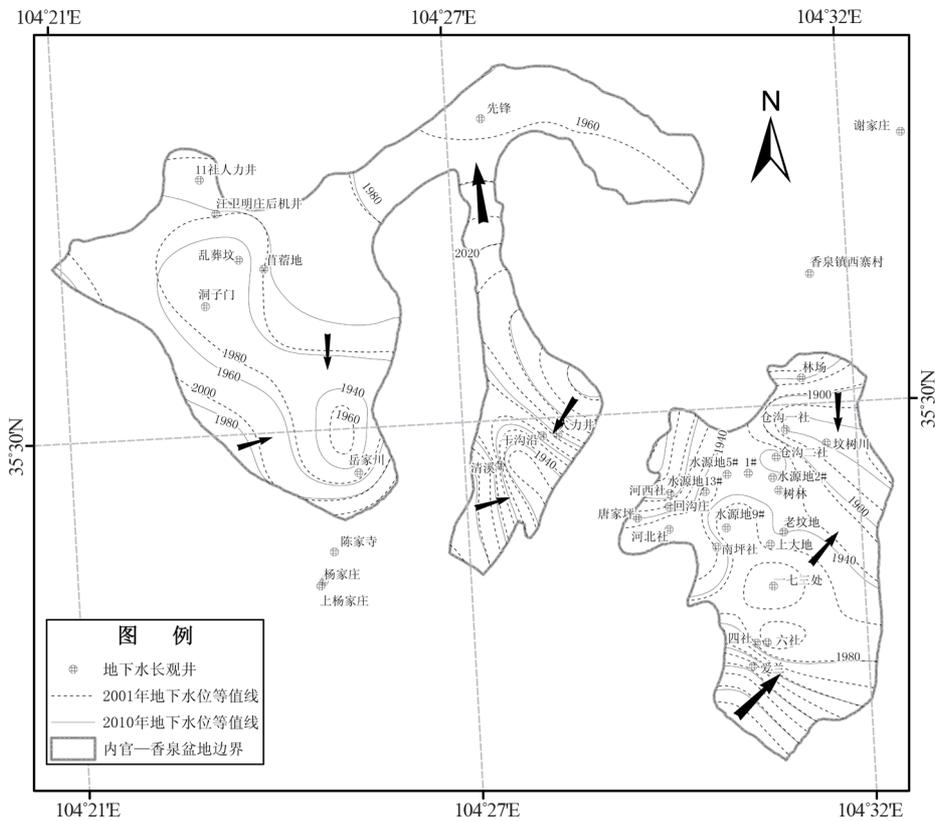


Figure 3. The schematic map of groundwater flow change during 2001-2010
图 3. 2001~2010 年间地下水流场变化示意图

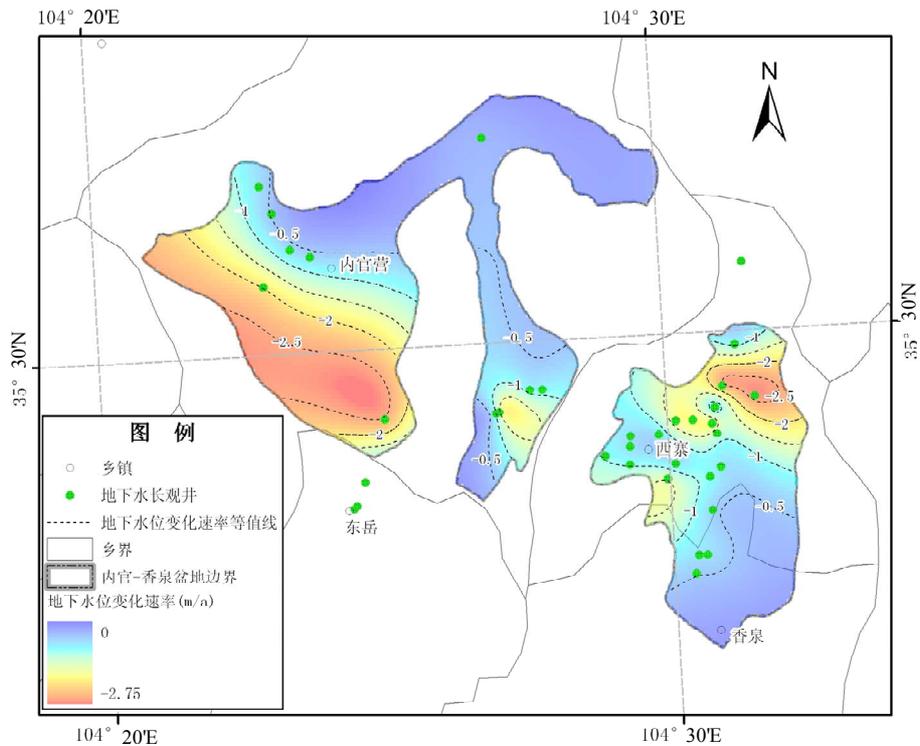


Figure 4. The isogram of average rate of groundwater level decline during 2001-2010
图 4. 2001~2010 年地下水水位年均下降速率等值线图

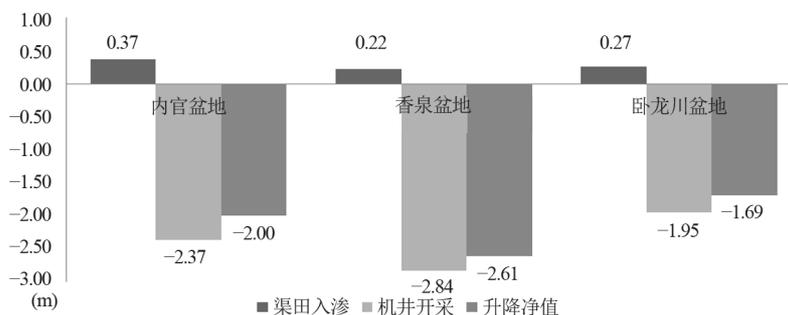


Figure 5. The groundwater level regime by influence of human activities
图 5. 人类活动影响下的地下水位升降

地下水流场受人工开采的影响越来越显著, 降落漏斗中心位置的年均水位降幅较其他地方大, 降落漏斗的深度和面积都有增大的趋势, 处于发展状态。对影响地下水位降深的两种人类活动方式进行对比分析, 发现人工开采造成的地下水位下降值是渠田回渗补给造成地下水回升值的 8 倍, 人工开采对地下水动态的影响更大。内官-香泉盆地地下水系统呈现明显的人工开采型动态, 处于活跃下降阶段。

6. 致谢

研究受 NSFC 项目(41001014)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110211110011)资助; 感谢编辑和评审提出的意见和建议。

参考文献 (References)

[1] LI, C. B., QI, J. G., FENG, Z. D., et al. Quantifying the effect of ecological restoration on soil erosion in China's loess plateau region: An application of the MMF approach. *Environmental Management*, 2010, 45(3): 476-487.

[2] 马金珠, 李吉均, 高前兆. 气候变化与人类活动干扰下塔里木盆地南缘地下水的变化及其生态环境效应[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(1): 16-23.
MA Jinzhu, LI Jijun and GAO Qianzhao. Groundwater evolution and its influence on eco-environment under climatic change and human activity in the south of Tarim Basin. *Arid Land Geography*, 2002, 25(1): 16-23. (in Chinese)

[3] XIA, J., YE, A. Z., WANG, L., et al. Water cycle mechanisms on the Loess Plateau, China: The Chabagou catchment case study. *Methodology in Hydrology*, 2007, 311: 10-17.

[4] LI, C. B., QI, J. G., et al. Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model

in a small watershed in Chinese Loess Plateau. *Frontiers of Earth Science in China*, 2010, 4(3): 296-310.

[5] 黄维东, 徐桂霞, 沙昨菊. 甘肃省定西市水源地下水资源分析评价[J]. *地下水*, 2010, 32(5): 25-27.
HUANG Weidong, XU Guixia and SHA Zuoju. Analysis and evaluation of groundwater resources of the water source in Dingxi City of Gansu. *Groundwater*, 2010, 32(5): 25-27. (in Chinese)

[6] 高恩基. 安定区水资源利用现状分析[J]. *甘肃农业*, 2005, 5: 51.
GAO Enji. Analysis of the present situation of water resources in Anding district. *Gansu Agriculture*, 2005, 5: 51. (in Chinese)

[7] 温续余, 张潜. 引洮工程中的地表水地下水资源的联合调度与利用[J]. *水利水电科技*, 2005, 36(5): 7-10.
WEN Xuyu, ZHANG Qian. Combined regulation and utilization of local ground water and surface water from Taohe River Water Diverting Project. *Science and Technology of Water Resources*, 2005, 36(5): 7-10. (in Chinese)

[8] 郭富赞, 尹念文. 定西市地下水开采引起的环境地质问题及对策[J]. *甘肃科技*, 2006, 22(5): 15-17.
GUO Fuzan, YIN Nianwen. The groundwater environmental problems and countermeasures caused by extraction in Dingxi. *Gansu Science and Technology*, 2006, 22(5): 15-17. (in Chinese)

[9] 黄维东. 引洮供水工程对关川河径流的影响研究[J]. *甘肃水利水电*, 2009, 45(6): 6-8.
HUANG Weidong. Study on the impact of Yin Tao hydraulic engineering on runoff of Guanchan River. *Gansu Hydraulic Engineering and Hydropower*, 2009, 45(6): 6-8. (in Chinese)

[10] 刘正峰. 水文地质手册[M]. 长春: 银声音像出版社, 2010.
LIU Zhengfeng. *Hydrogeology manual*. Changchun: Yinsheng Media Press, 2010. (in Chinese)

[11] 范锡朋, 吴心铭, 谭增任, 等. 甘肃省中部祖厉河流域水文地质普查报告[R]. 兰州: 甘肃省水文地质二队, 1975.
FAN Xipeng, WU Xinming, TAN Zengren, et al. The hydrological geological survey report of ZuLi river basin in central Gansu province. Lanzhou: The Second Hydrogeology Team of Gansu Province, 1975. (in Chinese)

[12] DENG, M. J. Ground reservoir: A new pattern of groundwater utilization in arid north-west China—A case study in Tailan river basin. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 2210-2221.