

# 天山北麓地下水基于生态水位的调控模拟分析

尚海敏<sup>1</sup>, 王文科<sup>1</sup>, 段磊<sup>1</sup>, 霍传英<sup>2</sup>

(1. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054;

2. 新疆维吾尔自治区地质环境监测院, 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:**针对地下水资源可持续利用与表生生态协调发展的问题,在对天山北麓野外调查及已有研究结果分析的基础上得出细土平原区生态水位埋深为 3~6 m。应用数值模拟技术对现状及调整开采布局后地下水位引起的表生生态效应进行对比,结果表明:现状地下水资源开发布局不仅易诱发表生生态负效应,而且造成了水资源浪费;通过调控地下水状态可以实现地下水资源可持续利用与表生生态协调发展的目的,并确定了不同地貌单元地下水开采阈值即山前戈壁带、细土平原区和沙漠边缘分别为 7.3 亿 m<sup>3</sup>/a、16.4 亿 m<sup>3</sup>/a 和 2.4 亿 m<sup>3</sup>/a。

**关键词:**地下水;生态水位;数值模拟;天山北麓

**中图分类号:**X143

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)06-0144-04

## Simulation on Groundwater Regulation Based on Ecological Water Table in the Northern Foot of Tianshan Mountain

SHANG Hai-min<sup>1</sup>, WANG Wen-ke<sup>1</sup>, DUAN Lei<sup>1</sup>, HUO Chuan-ying<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Geological Environment Monitoring, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** To coordinate development between sustainable utilization of groundwater resources and supergene ecology, ecological water depth was drawn from 3 m to 6 m based on field survey and previous achievements. In the current and regulated exploitation of groundwater resources, potential ecological effects induced by water-level fluctuations were compared and analyzed by numerical simulation. Results of this study indicated that negative effects of supergene ecology had been not only induced in the current exploitation of groundwater resources, but also lots of water resources had been wasted. Furthermore, the coordinated development could be achieved by regulating groundwater status. The calculated threshold values of groundwater exploitation were 0.73 billion m<sup>3</sup>/a, 1.64 billion m<sup>3</sup>/a and 0.24 billion m<sup>3</sup>/a in the piedmont Gobi, alluvial plain and desert edge, respectively.

**Key words:** groundwater; ecological water table; numerical simulation; northern foot of Tianshan Mountain

中国西北内陆干旱盆地脆弱的生态环境与地下水状态关系密切,由于以往对水资源的不合理开发利用,忽略了地下水的生态属性,导致“水质矿化、植被退化、土壤荒化、生态恶化”的“四化”形势日趋严峻<sup>[1-2]</sup>。近些年来,地下水状态与生态环境的关系逐渐引起了人们的重视,主要体现在地下水引起生态效应的机理<sup>[3-4]</sup>、评价指标<sup>[5-6]</sup>与模型<sup>[7-8]</sup>等方面的研究。研究认为旱区植被生态状况与“地下水生态平衡埋深”密切相关<sup>[9]</sup>,与埋深、矿化度存在某些定量关

系<sup>[10-11]</sup>,并可对地下水的生态埋深进行分级划分<sup>[11-12]</sup>;王文科<sup>[13]</sup>在总结大量研究成果的基础上提出了面向生态的地下水资源评价的理论与方法。这些研究虽然丰富了地下水资源的内涵,彰显了地下水的生态价值,但是仍是集中在小范围或者理念上的研究,而对在区域尺度上如何调控地下水位以实现水资源开发、经济发展及生态环境协调发展的研究还比较少。

本文以地下水开发—生态环境响应—地下水位

调控为主线,以天山北麓为例,采用野外调查、水位动态观测、数值仿真模拟的方法,分别对研究区现状地下水开发方式和调控地下水位至适宜埋深进行了模拟、分析和对比,以期实现水资源可持续利用及表生生态协调发展之目的。

### 1 研究区概况

研究区地处天山北麓,东起阜康甘河子,西至古尔图河,南到天山山前,北抵沙漠边缘(东经 83°50′—88°30′,北纬 43°25′—45°20′),为一东西长 380 km、南北长 80~150 km 的狭长区域,面积共约 3.47 万 km<sup>2</sup>。气候属北半球中温带大陆性干旱、半干旱气候区,蒸发量远大于降水量,河流皆为发源于山区的内陆河流。地形由南东向北西倾斜,地貌由山区—丘陵—山麓倾斜平原—冲、湖积平原—沙漠渐次过渡,形成有次序的带形交替。水文地质结构表现出明显分带性,即:山区垂向交换带→丘陵区径流带→冲洪积扇垂向交替带→细土平原水平径流带→沙漠区消耗带,地下水具有完整的补给—径流—排泄系统。

### 2 表生生态与地下水位的关系

干旱地区的地下水位埋深直接影响着地表植被演替、土地盐渍化与荒漠化进程,从而影响着表生生态环境。在地形地貌、地质构造等条件影响下,地下

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) - \sum_{i=1}^m Q_i \delta_i = S_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x,y,z) \in D, t > 0 \\ H(x,y,z,0) = H_0(x,y,z) & (x,y,z) \in D \\ K \frac{\partial H}{\partial h} |_{\Gamma_j} = q_j(x,y,z,t) & (x,y,z) \in \Gamma_j, t > 0, j = 2, 3, 4 \\ H(x,y,z) |_{\Gamma_1} = H(x,y,z) & (x,y,z) \in \Gamma_1 \\ \begin{cases} H = z \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = -(K+W) \frac{\partial H}{\partial z} + W \end{cases} & \text{water table } t > 0 \end{cases}$$

式中: $D$ ——渗流区域; $H$ ——地下水位(m); $K$ ——渗透系数(m/d); $S_s$ ——储水率(1/d); $\mu$ ——潜水面上的重力给水度; $W$ ——垂向上补排量强度的综合[m<sup>2</sup>/(d·m<sup>2</sup>)]; $H_0$ ——初始地下水位(m); $\Gamma_1, \Gamma_j$ ——一及二类边界; $q_j$ ——二类边界的单宽流量[m<sup>2</sup>/(d·m)]; $n$ ——二类边界的法线方向; $Q_i$ ——第  $i$  口井的抽水量(m<sup>3</sup>/d); $\delta_i$ ——第  $i$  口井的狄拉克函数。

考虑到研究区内 2003 年 10 月至 2008 年 11 月的观测孔、开采量等资料较为系统,即选取这一时段,以区内数十个观测孔地下实测水位与末时刻统测流场作为拟合对象进行模型识别与验证。拟合误差统计见表 1,可以看出模型计算水位与实测水位差值小于 0.5 m 的节点为 74%,计算流场与统测流场整体

水生态水位是一个随时空变化的函数,其上、下限在不同区域有不同内涵。合理的地下水生态水位能够满足生态环境要求,不会造成生态环境的恶化;当地下水埋深较浅,则蒸发强烈、土壤盐分积累,发生土壤盐渍化;当地下水埋深较深,则土壤水分不足,植被退化、土地荒漠化等问题也随之出现。从天山北麓山区到沙漠边缘表生生态随地下水位埋深的演化模式来看,地下水位埋深的小幅度波动将会造成表生生态的深刻变化。通过野外调查并结合前人研究成果<sup>[11-13]</sup>,得出细土平原区地下水位最佳埋深为 3~6 m,小于 3 m 时地表将出现盐渍化,6~7 m 出现轻度沙化,大于 8 m 将产生严重沙化。

### 3 地下水位调控模拟及分析

#### 3.1 地下水流数值模拟

研究区山前戈壁带是由巨厚松散的卵砾石和砂砾石组成的单一含水层,细土平原区主要由粗砂、中细砂和粘性土重复叠置组成,地下水属于松散岩类孔隙水,总体上呈线性流动状态。区内地下水接受降雨、河流、水库等渗漏的补给后,向中、深部径流,最后排泄于湖泊或以侧向径流、蒸发蒸腾、泉的形式排泄。本区地下水流的三维特征显著,因此需建立非均质三维非稳定流模型来刻画。基于非均质流体的线性动量守恒方程<sup>[14]</sup>,研究区地下水流方程表示如下:

拟合程度较好,说明所建立的地下水流模型较好地模拟了天山北麓地下水运移特征,合理地反映了地下水运移规律,具有很高的仿真性。

表 1 模型识别验证期观测孔残差分析表

| 残差范围/m | $E \leq 0.5$ | $0.5 < E \leq 1$ | $1 < E \leq 2$ | $E > 2$ | 合计    |
|--------|--------------|------------------|----------------|---------|-------|
| 观测孔数/眼 | 71           | 17               | 5              | 3       | 96    |
| 比例/%   | 74.0         | 17.7             | 5.2            | 3.1     | 100.0 |

#### 3.2 地下水位调控模拟

3.2.1 现状条件下水位预测 根据识别验证后的模型,可对研究区地下水位在现状开发方式下的动态变化做出预测,预测时限为 2008 年 11 月至 2020 年 12 月。相对于现状年,2020 年不同地貌单元地下水位变幅及地下水位埋深面积统计如图 1 所示。可以看

出:山前戈壁带地下水位呈下降态势,降幅 5~23 m;细土平原区地下水位总体呈上升态势,升幅 1.2~6.5 m;沙漠边缘地下水位呈下降状态,降幅 0.3~2.5 m。

产生上述现象的原因主要是山前戈壁带人工渠道大量引水和提高渠系利用率,造成天然河道输水不足,河流渗漏量减少,地下水补给不足,从而引起地下水位持续下降;细土平原由于大量引用地表水灌溉农田,地下水开采不足,水位总体呈上升态势,诱发土壤盐渍化;沙漠边缘由于上游大量引用地表水造成下游供水不足,过度开发地下水引起水位下降。

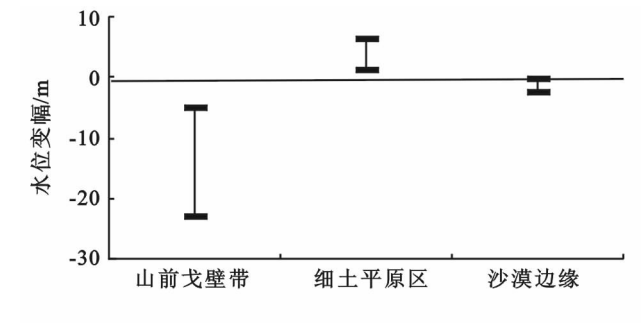


图 1 现状条件下水位变幅及埋深面积统计

现状条件下 2020 年地下水开采量为 21.8 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,蒸发量为 10.1 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 。蒸发量比现状年增加了 15.7%,这是由细土平原区地下水位上升,水位埋深低于极限蒸发深度导致的。这说明现状水资源开发布局存在明显的不合理性,不仅易诱发表生生态负效应,而且导致了地下水水质矿化和水资源浪费。

3.2.2 基于生态水位的调控模拟 为了维持合理生态水位,避免表生生态负效应,最适合的水位调控方法就是调整地下水开采量。以现状资料作为模型输入,在地下水位适宜埋深的约束条件下,通过调整水资源开采布局即减少山前地表水引用量,增加细土平原区地下水开采量,模拟了 2008 年 11 月至 2020 年 12 月地下水动力场的演化过程。相对于现状年,2020 年不同地貌单元地下水位变化情况及水位埋深

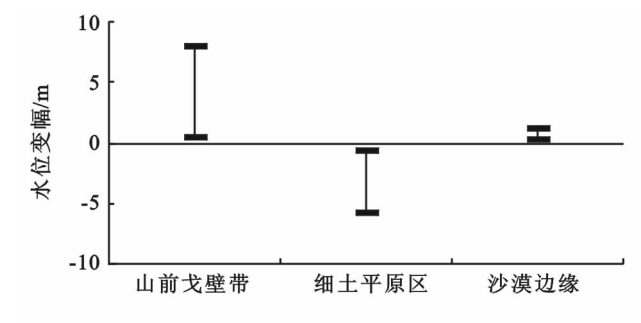
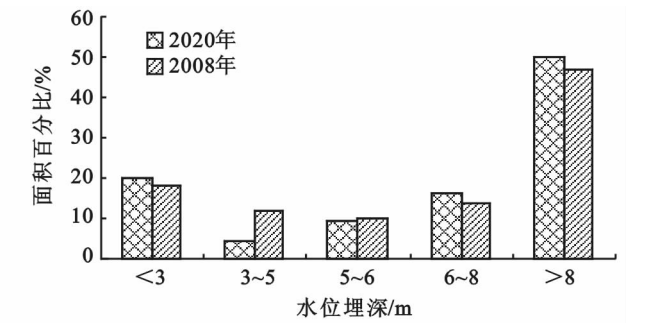


图 2 基于生态水位的水位变幅及埋深面积统计

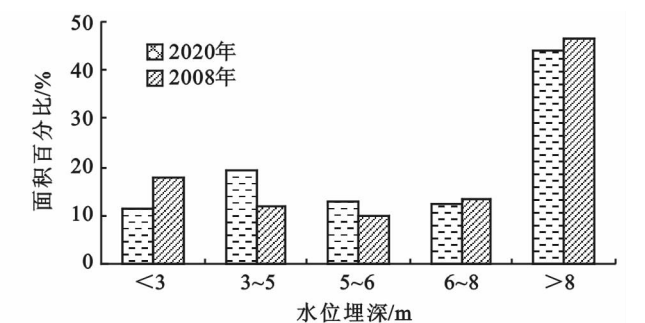
通过调控地下水位,山前戈壁带、细土平原区和沙漠边缘地下水开采阈值分别为 7.3 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,16.4

这一变化在地下水位埋深面积统计图上有更为直观的反映:至 2020 年,具有适宜生态水位及乔灌木正常生长水位的区域面积占全区面积的 13.8%,比现状减少 8.1%,主要分布在山前溢出带、蔡家湖及 129 团场等地区,呈条状分布;易诱发土壤次生盐渍化的水位埋深面积占全区面积的 20.3%,比现状增加 2.4%,主要分布在细土平原灌区和水库附近;易出现轻度沙化的水位埋深面积为占全区面积的 16.1%,比现状增加 2.5%;易引起土地严重沙化的水位埋深面积占全区面积的 49.8%,比现状增加 3.2%,主要分布于戈壁带及沙漠边缘地带。



面积统计如图 2 所示。可以看出:山前戈壁带地下水位有所上升,升幅 0.4~8 m;细土平原区除水库附近外,地下水位埋深基本控制在 3~6 m 之间;沙漠边缘地下水位有所回升,升幅 0.2~1.2 m。

由图 2 可知至 2020 年,具有适宜生态水位及乔灌木正常生长水位的区域面积占总面积的 32.1%,比现状增加 10.2%,多分布于山前溢出带及细土平原区,呈片状分布;易诱发土壤次生盐渍化的水位埋深面积占总面积的 11.4%,比现状减少 6.4%,多分布于细土平原区水库附近;易出现轻度沙化的水位埋深面积为占全区面积的 12.5%,比现状减少 1.1%;易引起土地严重沙化的水位埋深面积占总面积的 43.9%,比现状减少 2.7%,主要分布于戈壁带及沙漠边缘地带。



亿  $\text{m}^3/\text{a}$  和 2.4 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,开采总量比现状年开采量增加了 4.3 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,增加的开采量主要来自于夺取潜

水的无效蒸发量。可见调整地下水开采布局使地下水位埋深至适宜范围内,不仅可以促进表生生态向良性方向发展,还提高了水资源利用效率,能够实现水资源的可持续利用与表生生态的协调发展。

## 4 结论

(1) 天山北麓地下水位埋深与地表生态关系密切,地下水位埋深直接影响着植被演替、土壤盐渍化及荒漠化程度。

(2) 天山北麓现状水资源开发方式存在不合理性,易诱发表生生态负效应和水资源浪费。通过调控地下水位至适宜埋深能够实现水资源可持续利用与表生生态的协调发展,此时山前戈壁带、细土平原区和沙漠边缘地下水开采阈值分别为 7.3 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 、16.4 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  和 2.4 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,开采总量比现状年开采量增加了 4.3 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,提高了水资源利用率。

### 参考文献:

[1] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: a case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 117-124.

[2] 柴政, 玉米提, 哈力克, 等. 新疆柴窝堡水源地地下水超采引发的环境问题[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 132-135.

[3] Jeevarathinam C, Rajasekar S, Sanjuan M A F. Vibrational resonance in groundwater-dependent plant ecosystems[J]. Ecological Complexity, 2013, 15: 33-42.

[4] Chui T F M, Low S Y, Liong S Y. An ecohydrological model for studying groundwater-vegetation interactions

in wetlands[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1): 291-304.

[5] Song G, Chen Y, Tian M, et al. The ecological vulnerability evaluation in southwestern mountain region of China based on GIS and AHP method[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2): 465-475.

[6] 杨泽元, 王文科. 干旱半干旱区地下水引起的生态效应的研究现状与发展趋势[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 739-745.

[7] Zhao C, Wang Y, Chen X I, et al. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(2): 341-351.

[8] 孙才志, 刘玉兰, 杨俊. 下辽河平原地下水生态水位与可持续开发调控研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(2): 249-254.

[9] 张惠昌. 干旱区地下水生态平衡埋深[J]. 勘察科学技术, 1992(6): 9-13.

[10] 周绪, 刘志辉, 戴维, 等. 干旱区地下水位降幅对天然植被衰退过程的影响分析: 以新疆鄯善南部绿洲群为例[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 143-145.

[11] Wang W, Yang Z, Kong J, et al. Ecological impacts induced by groundwater and their thresholds in the arid areas in Northwest China[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, 12(7): 1497-1507.

[12] 程东会, 王文科, 侯光才, 等. 毛乌素沙地植被与地下水关系[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(1): 184-189.

[13] 王文科, 杨泽元, 程东会, 等. 面向生态的干旱半干旱地区区域地下水资源评价的方法体系[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(1): 159-167.

[14] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. New York: Courier Dover Publications, 2013.

(上接第 143 页)

(1) 仕望河流域地处黄土丘陵沟壑区与高原沟壑区的过渡地带。为黄河中游吴堡—龙门段西岸相邻的两条一级支流, 流域内的经济发展水平不是很高, 人民群众的生活水平相比比较低, 这需要国家大力的财政投入支持, 如此才能有效把经济发展与黄河的治理开发结合好, 才能有效保护黄河资源。

(2) 经济开发将带来一些列环境问题和社会问题, 将极大影响黄河水沙的变化, 应完善水土保持监测网络的建设, 加强水文站的水文监测、统计和分析, 加强环境监管, 为该地区的开发与治理提供客观详实的科学依据。

### 参考文献:

[1] 冉大川. 黄河中游河龙区间水沙变化研究综述[J]. 泥沙研究, 2000(3): 72-81.

[2] 左大康, 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律

[J]. 中国科学基金, 1991(4): 6.

[3] 熊贵枢. 黄河流域水利水保措施减水减沙分析方法简述[J]. 人民黄河, 1994(11): 33-36.

[4] 张宏鸣. 基于 GIS 的区域水土流失模型的优化与改进[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.

[5] 常丹东. 黄河流域水土保持用水研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.

[6] 姚允龙, 王蕾, 吕宪国, 等. 挠力河流域河流径流量对气候变化的敏感性分析[J]. 地理研究, 2012, 31(3): 409-416.

[7] 徐学选, 琚彤军, 郑世清. 延安燕沟流域次降雨泥沙来源分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 38-42.

[8] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1613-1617.

[9] 张孝中, 张经济, 冀文慧. 无定河延河流域水沙变化现状, 成因及发展趋势的研究[R]. 陕西省水土保持勘测规划研究所, 1998.