

# 天山北麓面向生态的地下水资源优化配置研究

尚海敏<sup>1</sup>, 王文科<sup>1</sup>, 段磊<sup>1</sup>, 李倩睿<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:** 为了实现地下水资源开发与表生生态协调发展, 针对天山北麓水资源开采现状存在的问题, 应用数值模拟技术对地下水资源进行了优化配置。结果表明: 地下水可开采量与水位埋深呈反相关关系, 水位埋藏越浅, 可开采量越大, 沿着山前戈壁—冲洪积扇—冲积平原—沙漠边缘的格局, 地下水分配比例依次为 5%、19%、73%、3%, 开采阈值为  $24.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 较现状年增加的开采量主要来自夺取潜水的无效蒸发量。

**关键词:** 地下水资源; 优化配置; 数值模拟; 天山北麓

**中图分类号:** P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)03-0221-06

## The optimized allocation of groundwater resources for supergene ecology in the northern foot of Tianshan Mountain

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

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Chang'an University, Ministry of Education, Xi'an 710054, China;

2. Institute of Geological Environment Monitoring, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** To coordinate development between groundwater-resource exploitation and supergene ecology, optimized allocation of groundwater resources was analyzed by numerical simulation for ecological problems induced by current water-resource exploitation. The results indicated that, groundwater sustainable yield was inversely correlated with groundwater depth. The shallower the groundwater depth, the larger the groundwater sustainable yield. The proportion of groundwater exploitation was 5%, 19%, 73% and 3% respectively from piedmont zone to alluvial-proluvial fan, to alluvial plain, to desert edge, the threshold value of groundwater exploitation was  $24.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ . The increased amount of groundwater exploitation was mainly from the reduced evaporation.

**Key words:** groundwater resources; optimized allocation; numerical simulation; northern foot of Tianshan Mountain

西北干旱地区降水稀少、蒸发强烈, 水资源时空分布不均, 地下水对植被的生态用水起着中长期的调节作用, 脆弱的生态环境与地下水状态密切相关 (Evans and Thams, 1981; 张长春等, 2003; 程东会等, 2012)。近年来随着地下水开发伴随的各种环境问题的出现, 关于地下水开发

与生态环境关系的研究逐渐受到人们的重视。从地下水不合理开发引起的生态问题 (Stromberg et al, 1996; Zhu et al, 2007; Vasilache et al, 2012), 到地下水引起生态效应的机理 (金晓媚等, 2007; Freund and Sommer, 2010; Kopic et al, 2013), 再到地下水资源评价 (贾绍凤等,

收稿日期: 2014-05-15

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项 (200911004)

通讯作者: 王文科, E-mail: wenkew@chd.edu.cn

2004; Mohammadi et al, 2014) 等研究日益深入, 王文科等 (2011, 2013) 针对旱区地下水资源评价可靠性与生态环境脆弱的问题, 首次提出了“地下水生态价值”的概念, 建立了中国西北干旱半干旱地区地下水状态与表生生态之间的阈值体系。这些研究由现象而及理论分析, 凸显了地下水位与表生生态密切的关系, 但基于这一规律的地下水资源优化配置, 尤其对区域尺度而言, 并不多见。本文以准格尔盆地经济最发达地区即天山北麓为例, 在野外调查的基础上, 通过对研究区地质、水文地质条件的分析建立了地下水数值模型, 针对天山北麓水资源开采现状存在的问题, 应用经识别与验证的数值模型对地下水资源进行了优化配置, 研究结果为区域地下水资源合理开发和管理规划提供了科学依据。

## 1 研究区概况

天山北麓位于准噶尔盆地南缘, 地理坐标东经  $83^{\circ}50' \sim 88^{\circ}30'$ , 北纬  $43^{\circ}25' \sim 45^{\circ}20'$ , 面积共约  $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。气候属于典型的干旱-半干旱型气候, 蒸发量远大于降雨量, 平原区蒸发量约为降雨的 12~13 倍。河流皆为发源于天山的内陆河流, 主要有乌鲁木齐河、呼图壁河、玛纳斯河、奎屯河、古尔图河等大小河流 14 条, 最后归宿于沙漠中的湖泊或消失于沙漠中。地形总体由南东向北西缓倾, 跨越了山区—山前倾斜平原—冲、湖积平原—沙漠或湖泊等地貌单元, 各个“河流-含水层”系统由于相似的沉积环境而具有类似的水文地质结构, 含水层由南到北颗粒由粗变细, 层数由一层变为多层, 厚度由厚变薄, 受“准噶尔南缘拗陷” (Li et al, 1995) 构造的控制, 地下水位埋深由大变再变大。

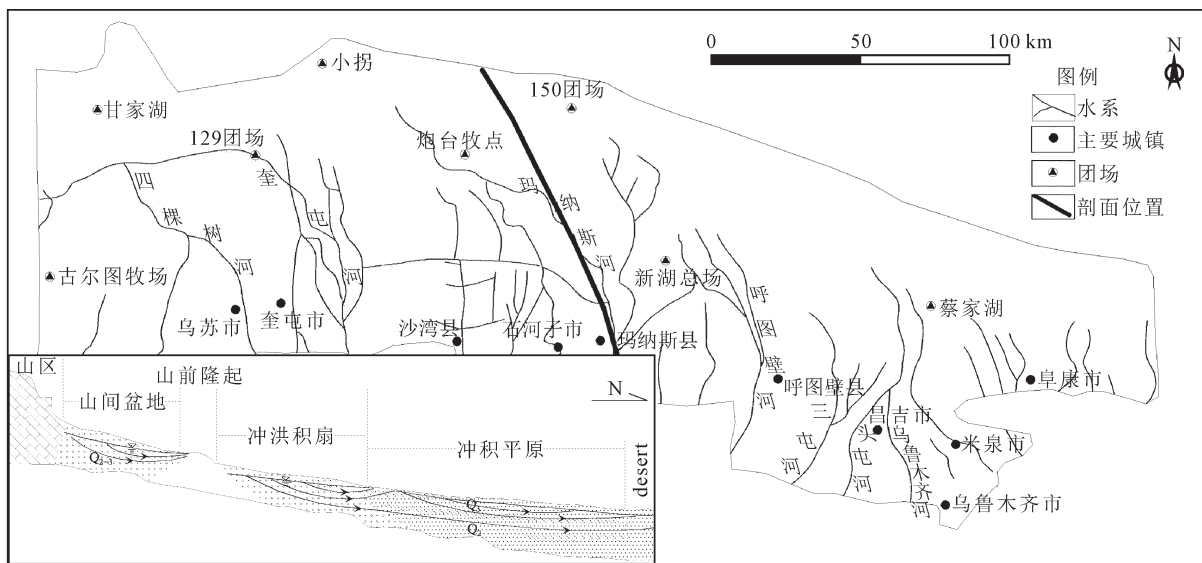


图 1 研究区位置图及水文地质剖面图

Fig.1 Location map of the study area with a hydrogeologic profile

## 2 研究方法

### 2.1 野外调查

为了调查研究区地下水位埋深与表生生态的关系, 笔者所在课题组于 2003 年以来开展了 2 次野外调查。通过对研究区沿着地下水流方向植被演替规律及植被样方的调查, 结合现场原位试验, 分析了地下水位埋深对植被生长状态、土壤盐分以及荒漠化程度的影响, 最终得出地下水位适宜埋深。

### 2.2 地下水流模型

研究区地下水属于第四系松散岩类孔隙水,

地下水含水系统由山前戈壁带的单一含水岩组向细土平原区多层含水岩组过渡。单一含水岩组主要由卵砾石和砂砾石组成, 而多层含水岩组是由粗砂、中细砂和粘性土重复叠置组成的。地下水流系统总体呈线性流动状态, 在接受山区降水和融雪的补给后, 以地表或地下径流的形式汇入山前倾斜平原, 期间经过地表水与地下水的多次转化, 最后消亡于沙漠或注入尾间湖。区内地下水的三维特征显著, 根据质量守恒定律和能量守恒定律 (Bear, 1972), 其数学模型为:

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

式中,  $D$  为渗流域,  $H$  为地下水头 (m),  $K$  为渗透系数 ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $S_s$  为贮水率 ( $\text{d}^{-1}$ ),  $\mu$  为给水度,  $W$  为垂向补排量强度之和 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $H_0$  为初始水头 (m),  $\Gamma_1, \Gamma_j$  为第一及第二类边界,  $q_j$  为单宽流量 ( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $n$  为第二类边界法线方向,  $Q_i$  为第  $i$  口井开采量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $\delta_i$  为第  $i$  口井的狄拉克函数。

采用有限差分方法对上述数学模型进行数值离散, 由于研究区内 2003 年 10 月至 2008 年 11 月的水位观测、开采量等数据较为系统, 因此选取这

一时段, 以区内数十个地下水观测孔的实测水位与末时刻统测流场作为拟合对象对模型进行识别与验证。由初始粗略地按地貌、岩性、抽水试验等划分各参数分区、各参数初值出发, 经过多次调试、优选, 最终获得各观测孔的模拟水头值与实测水头值达到最佳拟合, 典型观测孔及流场的水头拟合曲线如图 2, 可以看出模拟水头与实测水头的动态趋势基本一致, 模拟得到的流场合理地反映了研究区地下水流动的特征与规律, 因此模型具有很高的仿真性, 可以用来研究地下水资源优化配置。

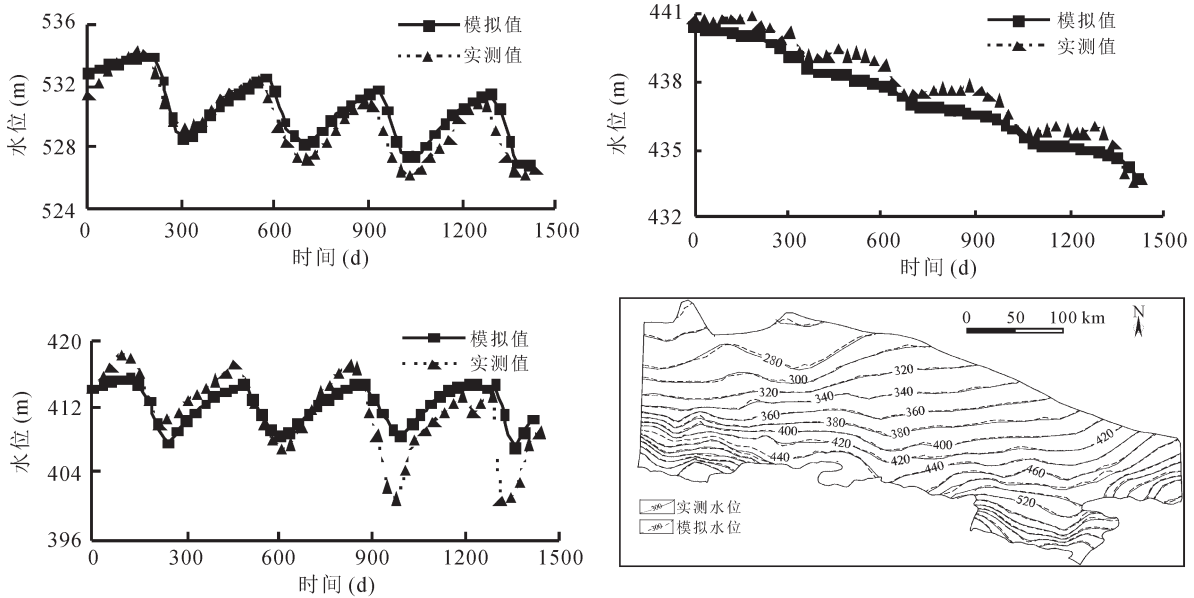


图 2 典型观测孔地下水水位及流场拟合图  
Fig.2 Fitting figures of groundwater levels in typical observation wells and flow field

### 3 结果与讨论

#### 3.1 地下水水位适宜埋深

河流是水资源的传输通道, 将山区形成的水资源带到平原经过与地下水多次转化后, 最后以少量的地表径流汇集于尾间湖或消失于沙漠, 在

这样的水资源空间格局下, 研究区从南到北组成一个典型的内陆干旱山地-绿洲-荒漠生态系统。荒漠植被靠稀少的降水得以维持, 而绿洲是旱区的精华, 须靠山区形成的径流及其转化的地下水的补给才能生存, 良好的绿洲生态系统是实现社

会、经济、环境协调发展的基本前提,其发育状况与潜水位埋深密切相关。根据野外调查,并结合前人研究成果(王文科等,2011;Wang et al,2013),在山前戈壁带应减少地表水引用量,增加河流渗漏量,这样在涵养地下水的同时也减少河、渠的无效蒸发;在细土平原区地下水位埋深小于3 m时地表表层积盐出现盐渍化,6~8 m时大多数草本植物死亡,乔灌木出现枯萎现象,地表出现轻度沙化,大于8 m时乔灌木衰败,地表干裂产生严重沙化,从地下水位引起的表生生态效应来看,适宜生态的地下水位埋深阈值为3~6 m。

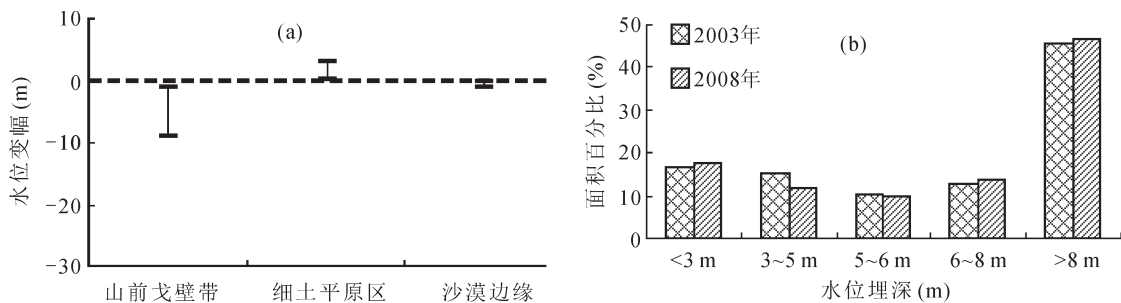


图3 现状开采下2003至2008年的水位变幅及埋深面积统计

Fig.3 Statistic about water-level amplitude and water-depth area from 2003 to 2008 under current exploitation

上述变化在地下水位埋深面积统计图上反映更为直观:2008年,适宜草本植物及乔灌正常生长的水位埋深面积占总面积的11.9%,比2003年减少3.1%,主要分布在溢出带、129团场和蔡家湖等地;易诱发土壤盐渍化的水位埋深面积占总面积的17.9%,比2003年增加1.1%,主要分布在灌区及水库附近;易引起轻度沙化的水位埋深面积占总面积的13.6%,比2003年增加1.1%;易发生土地严重沙化的水位埋深面积占总面积的46.7%,比2003年增加1.4%,主要分布在戈壁带及沙漠边缘。

通过2003年与2008年地下水均衡对比(表1)可以看出:2008年地下水开采量为 $21.8 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ,

### 3.2 地下水开采现状评价

在现状水资源开发方式下,不同地貌单元地下水位从2003年到2008年变化趋势统计于图3a。可以看出,与2003年相比,山前戈壁带由于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,水位呈下降的状态,水位降幅1~9 m;细土平原区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,上升幅度0.3~3.1 m;沙漠边缘由于上游大量引用地表水造成下游供水不足,过度开采地下水引起地下水位呈下降状态,降幅0.1~1.1 m。

比2004年增加了9.6%,增加量来自于沙漠边缘的地下水开采;蒸发量为 $9.7 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ,比2004增加了22.1%,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引起的。上述分析表明,现状水资源开发方式是不合理性的,不仅易诱发表生生态负效应,还导致了水资源浪费和地下水水质恶化。

综上所述,确定合理的地下水位对于研究区生态环境保护至关重要,而地下水位的高低直接受控于地下水资源的开采布局,为了实现水资源开发与生态系统协调发展,必须对地下水资源开发进行优化配置。

表1 现状开采下2003年与2008地下水均衡对比(单位: $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ )

Table 1 Groundwater-balance comparison between 2003 and 2008 under current exploitation

补给要素	侧向补给	河道渗漏	降水入渗	田间、水库入渗	地下水回归量	合计
2003年	75676.53	80407.57	13475.49	153742.86	18507.63	341810.08
2008年	76056.05	79497.95	16493.63	151634.21	18636.82	342318.66
排泄要素	开采量	泉水溢出量	蒸发量	侧向流出	河、渠排水量	合计
2003年	199473.39	52831	71452.62	12753.95	7469.27	343980.23
2008年	218717.65	32352.2	87276.51	12372.13	8314.66	359033.15



### 3.3 水资源的优化配置

地下水优化配置原则是, 应使山前戈壁带地下水位有所恢复; 将细土平原区地下水尽量控制在适宜埋深范围内, 以最大程度上夺取无效蒸发量, 防止土地盐渍化; 与此同时, 使沙漠边缘的地下水位在现状基础上有所恢复, 以在一定程度上抑制荒漠化进程。

在上述经过识别与验证的模型的基础上, 通过调整地下水资源开采布局, 得到的水资源优化分配结果见图 4。从图 4 可以看出: 为满足地下水位最优状态, 各地下水位埋深区地下水开采量与地下水位埋深呈反相关关系, 地下水位埋藏越浅, 地下水开采量越大。在冲积平原上游, 水位埋深小于 1 m 区, 地下水可开采模数为  $0.16\sim 0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 埋深 1~3 m 区, 地下水可开采模数为  $0.12\sim 0.16\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在冲积

平原下游, 埋深 3~5 m 区, 地下水可开采模数为  $0.04\sim 0.08\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; 水位埋深 5~8 m 区, 地下水可开采模数为  $0.02\sim 0.04\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在冲洪积扇中前缘, 地下水可开采模数为  $0.08\sim 0.12\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。而在山前戈壁和沙漠边缘, 地下水可开采模数  $< 0.02\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。通过模拟优化, 研究区地下水开采阈值为  $24.1\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ , 较现状年增加了  $2.3\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ , 沿着山前戈壁—冲洪积扇—冲积平原上游、冲积平原下游—沙漠边缘的格局, 地下水分配比例依次为 5%、19%、73%、3%。

表 2 为水资源优化配置后研究区地下水在 2020 年的均衡模拟情况, 可以看出地下水开采量比 2008 年增加了  $2.3\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ , 潜水蒸发量较 2008 年减少了  $1.9\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ , 增加的开采量主要来自夺取潜水的无效蒸发量。

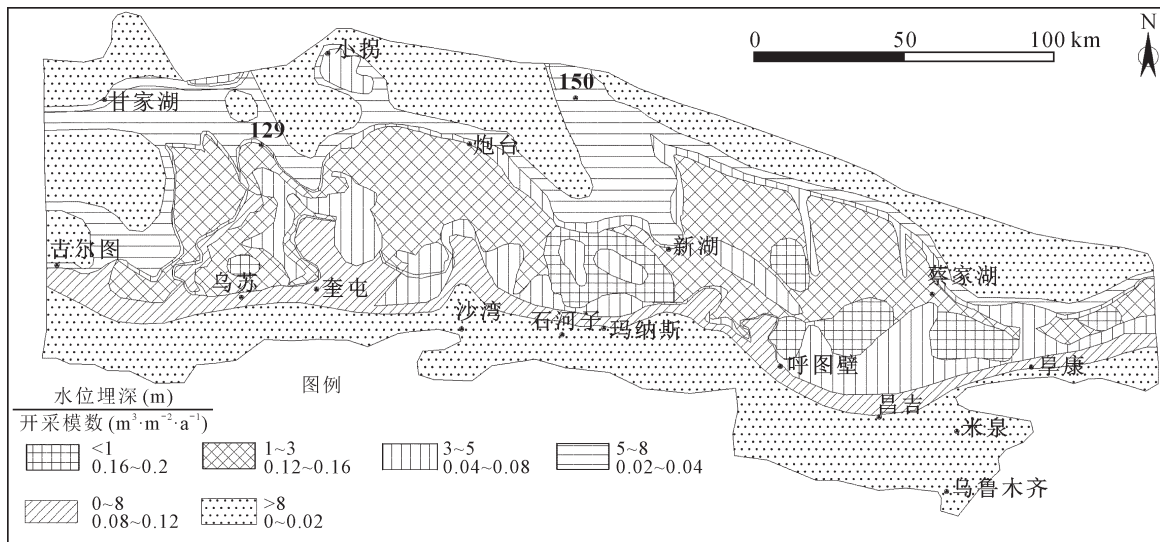


图 4 面向生态的地下水开采模数分布图  
Fig.4 Groundwater-exploitation modulus for supergene ecology in study area

表 2 水资源优化配置后 2020 年地下水均衡表 (单位:  $10^4\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ )  
Table 2 Groundwater balance in 2020 under optimized exploitation

补给要素	侧向补给	河道渗漏	降水入渗	田间、水库入渗	地下水回归量	合计
2020 年	76053.02	96944.85	16610.54	151643.79	18636.82	359889.02
排泄要素	开采量	泉水溢出量	蒸发量	侧向流出	河、渠排水量	合计
2020 年	241670.74	30987.45	68206.56	10836.24	7814.66	359515.65

### 4 结论

(1) 天山北麓现状水资源开发方式存在明显的不合理性, 容易诱发表生生态负效应、水资源浪费和水质恶化等问题。

(2) 通过模拟优化, 研究区面向生态的地下水

开采阈值为  $24.1\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ , 地下水位埋藏越浅, 地下水的开采量越大, 沿着山前戈壁—冲洪积扇—冲积平原上游、冲击平原下游—沙漠边缘的格局, 地下水分配比例依次为 5%、19%、73%、3%, 较现状年增加的开采量主要来自夺取潜水的无效蒸发量。

## 参考文献

- 程东会, 王文科, 侯光才, 等. 2012. 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)*, 42(1): 184–189. [Cheng D H, Wang W K, Hou G C, et al. 2012. Relationship between vegetation and groundwater in Mu Us Desert [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(1): 184–189.]
- 贾绍凤, 周长青, 燕华云, 等. 2004. 西北地区水资源可利用量与承载能力估算 [J]. *水科学进展*, 15(6): 801–807. [Jia S F, Zhou C Q, Yan H Y, et al. 2004. Estimation of usable water resources and carrying capacity in Northwest China [J]. *Advances in water science*, 15(6): 801–807.]
- 李文鹏, 周宏春, 周仰效, 等. 1995. 中国西北典型干旱区地下水流系统 [M]. 北京: 地震出版社, 21–42. [Li W P, Zhou H C, Zhou Y X, et al. The groundwater flow system of typical arid regions in Northwest China [M]. Beijing: Seismological Press, 21–42.]
- 金晓媚, 万力, 张幼宽, 等. 2007. 银川平原植被生长与地下水关系研究 [J]. *地学前缘*, 14(5): 197–203. [Jin X M, Wan L, Zhang Y K, et al. 2007. A study of the relationship between vegetation growth and groundwater in the Yin-chuan Plain [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 197–203.]
- 王文科, 杨泽元, 程东会, 等. 2011. 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)*, 41(1): 159–167. [Wang W K, Yang Z Y, Cheng D H, et al. 2011. Methods of ecology-oriented groundwater resource assessment in arid and semi-arid area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(1): 159–167.]
- 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 2003. 地下水位生态环境效应及生态环境指标 [J]. *水文地质工程地质*, (3): 6–10. [Zhang C C, Shao J L, Li C j, et al. 2003. Eco-environmental effects on groundwater and its eco-environmental index [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (3): 6–10.]
- Bear J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media [M]. New York: Dover Publications Inc.
- Evans D D, Thams J. 1981. Water in Desert Ecosystems [M]. America: Academic Press.
- Mohammadi Z, Salimi M, Faghih A. 2014. Assessment of groundwater recharge in a semi-arid groundwater system using water balance equation, southern Iran [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 95: 1–8.
- Stromberg J, Tiller R, Richter B. 1996. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro, Arizona [J]. *Ecological Applications*, 6(1): 113–131.
- Vasilache V, Filote C, Cretu M A, et al. 2012. Monitoring of groundwater quality in some vulnerable areas in Botosani County for nitrates and nitrites based pollutants [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(2): 471–479.
- Wang W K, Yang Z Y, Kong J L, et al. 2013. Ecological impacts induced by groundwater and their thresholds in the arid areas in Northwest China [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(7): 1497–1507.
- Zhu G F, Li Z Z, Su Y H, et al. 2007. Hydrogeochemical and isotope evidence of groundwater evolution and recharge in Minqin Basin, Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 333(2–4): 239–251.