

文章编号:1671-6833(2005)03-0109-04

# 石羊河流域水资源转化模型及其应用研究

窦明<sup>1</sup>, 孙雪涛<sup>2</sup>, 左其亭<sup>1</sup>

(1. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 2. 水利部水资源司, 北京 100053)

**摘要:**对石羊河流域水资源转化机理进行了定性分析, 结合各计算单元建立了石羊河流域水资源转化模型. 利用所建模型预测了2000年至2020年各灌区地下水水位的变化过程, 结果发现, 如果继续保持现在的水资源开发利用方式, 石羊河流域将难以维持下去, 水资源严重短缺成为导致当前石羊河流域生态环境危机的关键因素.

**关键词:**石羊河流域; 水资源; 三水转化模型

**中图分类号:** TV 21 **文献标识码:** A

## 0 引言

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东端, 流域总面积4.16万km<sup>2</sup>, 河流发源于祁连山北麓, 注入著名的腾格里沙漠腹地. 作为西北内陆河典型流域, 石羊河流域的水循环过程与其它地方有明显差异, 大气水、地表水和地下水之间频繁转换形成了当地复杂的水资源重复利用模式. 研究石羊河流域的水资源转化机理, 对于该地区水资源合理配置和生态环境可持续发展, 具有重要的理论意义和应用价值.

## 1 水资源转化机理简介

石羊河流域按水文特征分为径流形成区和径流消失区. 南部祁连山区为径流形成区, 降雨充沛, 且多年降雨量相对稳定, 自东向西依次由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河八条河流组成. 北部山前平原为径流消失区, 降雨稀少, 蒸发强烈, 基本不产生径流, 区域中部由于韩母山、红崖山和阿拉古山的断续分布, 被分隔为南、北两大盆地, 南盆地包括大靖盆地、武威盆地、永昌盆地, 北盆地包括民勤盆地、昌宁盆地, 各盆地中一般有厚约50~200 m渗透性很强的含水层. 流域内祁连山河川径流出山后, 首先进入南盆地洪积扇带, 这里是巨厚的强透水性的砾石层, 山水流经河道、渠系大量渗漏补给地下水再流到南盆地北缘, 由于构造山梁的阻隔、地势低

落、含水层颗粒变细、透水性减弱等原因, 致使地下水沿洪积扇边缘和细土平原的河床、沟槽溢出地表形成泉水或蒸发逸散. 南盆地的余水主要以河流形式沿着切穿山梁的谷地进入北盆地<sup>[1]</sup>.

石羊河流域是我国水资源开发程度最高的内陆河流域之一. 流域内水资源得到多次重复利用, 当地在南盆地南部山水河流出山前修建山水水库, 大力发展库渠灌溉, 灌溉的渠系渗水与回归水补给地下含水层; 在南盆地北部则用河井混灌、井灌或井泉混灌等方式灌溉细土平原, 其渗水又呈泉水溢出, 并汇同上游余水补给北盆地; 在北盆地再次修建丘陵平原水库, 发展河灌, 结合提取地下水实施地表水—地下水混灌, 水资源利用率相当高.

## 2 水资源转化模型建立

为了能真实的反映出石羊河流域各用水区域的特点及水资源转化关系, 先按照灌区、用水特点和水文地质特征将石羊河流域划分为20个子块.

### 2.1 南盆地水资源转化过程

南盆地主要包括石羊河的8条支流及水库和15个灌区(子块), 相应的水量平衡式为:

(1) 支流上水库的水量平衡式

$$Q_{j,k} + W_{j,k-1} = W_{j,k} + QQ_{j,k} + GW_{j,k} + EW_{j,k} + YW_{j,k}, V_{j,k} \quad (1)$$

对于有外流调入的西大河和古浪河, 式(1)为

$$QD_{j,k} + Q_{j,k} + W_{j,k-1} = W_{j,k} + QQ_{j,k} + GW_{j,k} +$$

收稿日期:2005-03-10; 修订日期:2005-05-23

基金项目:河南省杰出青年科学基金资助项目(2004)

作者简介:窦明(1975-), 男, 山东省淄博市人. 郑州大学讲师, 博士, 主要从事水文水资源及环境研究.

$$EW_{j,k} + YW_{j,k}, \forall k, j = 1, 7 \quad (2)$$

式中:  $Q_{j,k}, QO_{j,k}$  为  $k$  时段进入  $j$  支流上水库的入库径流量与水库泄流量,  $\text{万m}^3$ ;  $W_{j,k-1}, W_{j,k}$  为 ( $k-1$ ) 与  $k$  时段的  $j$  支流水库的有效蓄存水量,  $\text{万m}^3$ ;  $GW_{j,k}, EW_{j,k}$  为  $k$  时段  $j$  支流水库的渗漏量和蒸损量,  $\text{万m}^3$ ;  $YW_{j,k}$  为  $k$  时段从  $j$  支流水库向灌区的引水量,  $\text{万m}^3$ ;  $QD_{j,k}$  为  $k$  时段通过引水工程调入  $j$  支流水库的调水量,  $\text{万m}^3$ .

(2) 支流河道的水量平衡式

$$QO_{j,k} = R_{j,k} + GR_{j,k} + ER_{j,k}, \forall j, k \quad (3)$$

对于未建水库的杂木河, 则式(3)为

$$Q_{j,k} = R_{j,k} + GR_{j,k} + ER_{j,k} + YW_{j,k}, \forall k, j = 5 \quad (4)$$

式中:  $R_{j,k}$  为  $k$  时段  $j$  支流河道的径流量,  $\text{万m}^3$ ;  $GR_{j,k}$  为  $k$  时段  $j$  支流水库泄洪量渗入灌区地下含水层的渗漏量,  $\text{万m}^3$ ;  $ER_{j,k}$  为  $k$  时段  $j$  支流河道的蒸损量,  $\text{万m}^3$ .

(3) 灌区的水量平衡式为

$$YI_{i,k} = AI_{i,k} + EI_{i,k} + EH_{i,k} + GH_{i,k}, \forall i, k \quad (5)$$

式中:  $YI_{i,k}$  为  $k$  时段对  $i$  灌区的总引水量(包括库渠引水和井泉引水),  $\text{万m}^3$ ;  $AI_{i,k}, EI_{i,k}$  为  $k$  时段从  $i$  灌区的渗漏量和蒸损量,  $\text{万m}^3$ ;  $EH_{i,k}, GH_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区的耗用水量(包括农业耗水量和工业耗水量)和回归水量,  $\text{万m}^3$ .

对于南盆地来说, 灌区的总引水量为

$$\sum_{i=1}^m YI_{i,k} = \sum_{j=1}^m YW_{j,k} + \sum_{i=1}^m YG_{i,k}, \forall i, j, k \quad (6)$$

式中:  $n$  为支流个数;  $m$  为南盆地的灌区个数;  $YG_{i,k}$  为  $k$  时段从  $i$  灌区的引泉量和地下水开采量,  $\text{万m}^3$ .

(4) 灌区地下含水层的水量平衡式为

$$GS_{i,k} + AI_{i,k} + GH_{i,k} - YG_{i,k} - EG_{i,k} - QG_{i,k} - OG_{i,k} = \mu'_{i,k} \Delta H_{i,k}, \forall i, k \quad (7)$$

式中:  $GS_{i,k}$  为  $k$  时段地表水对  $i$  灌区的总渗透量,  $\text{万m}^3$ ;  $EG_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区地下含水层的潜水蒸发量,  $\text{万m}^3$ ;  $QG_{i,k}$  为  $k$  时段由  $i$  灌区地下含水层向其它灌区地下含水层的输出水量,  $\text{万m}^3$ , 当  $QG_{i,k} \geq 0$  时为输出, 当  $QG_{i,k} < 0$  时为输入;  $OG_{i,k}$  为  $k$  时段由  $i$  灌区地下含水层溢出的泉水量,  $\text{万m}^3$ ;  $\mu'_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区地下含水层的给水度;  $\Delta H_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区地下水位的变化值.

灌区的总渗透量为通过地表水(各水库、河道)对灌区地下水的渗透量之和, 即:

$$\sum GS_{i,k} = \sum GW_{j,k} + \sum GR_{j,k}, \forall i, j, k \quad (8)$$

## 2.2 北盆地水资源转化过程

北盆地包括石羊河干流及干流上的红崖山水库, 流域内另一条由地下水补给形成的金川河及金川峡水库和 5 个灌区, 相应的水量平衡式为

(1) 对于石羊河干流上的红崖山水库, 其来流主要由以下 3 部分构成: 各支流的径流量, 南盆地灌区的泉水溢出量, 以及外流域调水工程调入的部分  $QD_k$ . 红崖山水库的水量平衡式为

$$\sum_{j=1}^n R_{j,k} + \sum_{i=1}^m OG_{i,k} + QD'_k + W'_{k-1} = W'_k + R'_k + GW'_k + EW'_k + YW'_k, \forall i, j, k \quad (9)$$

式中:  $QD'_k$  为  $k$  时段由调水工程调入红崖山水库的水量,  $\text{万m}^3$ ;  $W'_{j,k-1}, W'_{j,k}$  为 ( $k-1$ ) 与  $k$  时段红崖山水库的有效蓄存水量,  $\text{万m}^3$ ;  $R'_k$  为  $k$  时段红崖山水库的泄流量,  $\text{万m}^3$ ;  $GW'_k, EW'_k$  为  $k$  时段红崖山水库的渗漏量和蒸损量,  $\text{万m}^3$ ;  $YW'_k$  为  $k$  时段红崖山水库向民勤盆地灌区的引水量,  $\text{万m}^3$ ,  $n'$  为与石羊河干流形成径流补给的支流个数;  $m'$  为南盆地对石羊河干流形成泉水补给的灌区个数.

(2) 石羊河干流河道的水量平衡式

石羊河干流最终注入腾格里沙漠, 干流上的红崖山水库下泄流量基本消耗于河道沿程的蒸发和渗漏过程, 因此干流河道水量平衡式为

$$R'_k = GR'_k + ER'_k, \forall j, k \quad (10)$$

式中:  $GR'_k$  为  $k$  时段石羊河干流泄洪量渗入灌区地下含水层的渗漏量,  $\text{万m}^3$ ;  $ER'_k$  为  $k$  时段石羊河干流的蒸损量,  $\text{万m}^3$ .

(3) 干流上的民勤盆地各灌区, 水量平衡式为

$$YI'_{i,k} = AI'_{i,k} + EI'_{i,k} + EH'_{i,k} + GH'_{i,k}, \forall i, k \quad (11)$$

式中:  $YI'_{i,k}$  为  $k$  时段对  $i$  灌区的总引水量,  $\text{万m}^3$ ;  $AI'_{i,k}, EI'_{i,k}$  为  $k$  时段从  $i$  灌区的渗漏量和蒸损量,  $\text{万m}^3$ ;  $EH'_{i,k}, GH'_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区的耗用水量和回归水量,  $\text{万m}^3$ .

民勤盆地灌区的总引水量为从红崖山水库、各灌区灌井的引水量之和, 即

$$\sum_{i=1}^m YI'_{i,k} = YW'_k + \sum_{i=1}^m YG'_{i,k}, \forall i, k \quad (12)$$

式中:  $YG'_{i,k}$  为  $k$  时段从  $i$  灌区的地下水开采量,  $\text{万m}^3$ ,  $m''$  为民勤盆地的灌区个数.

(4) 民勤盆地各灌区地下含水层的水量平衡式为

$$GS'_{i,k} + AI'_{i,k} + GH'_{i,k} - YG'_{i,k} - EG'_{i,k} - QG'_{i,k} = \mu'_{i,k} \Delta H'_{i,k}, \forall i, k \quad (13)$$

式中:  $GS'_{i,k}$  为  $k$  时段红崖山水库对  $i$  灌区的渗透量;  $EG'_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区地下含水层的潜水蒸发

量,  $\text{万m}^3$ ;  $QG'_{i,k}$  为  $k$  时段由  $i$  灌区地下含水层向其它灌区地下含水层的输出水量,  $\text{万m}^3$ ;  $\mu'_i$  为  $k$  时段  $i$  灌区地下含水层的给水度;  $\Delta H'_{i,k}$  为  $k$  时段  $i$  灌区地下水位的变化值.

民勤盆地各灌区的总渗透量为通过红崖山水库与石羊河干流对灌区地下水的渗透量之和, 即

$$\sum_{i=1}^n GS'_{i,k} = GR'_k + GW'_k, \forall i, k \quad (14)$$

对于北盆地内同样由地下水补给形成的金川

河, 其水库、河道、灌区、地下含水层水量平衡式与红崖山水库基本相同, 在此不一一列出<sup>[2,3]</sup>.

### 3 应用研究

为了验证模型是否合理, 结合石羊河流域实际水文观测资料, 对 2000 年全流域的供水、耗水状况及水资源转化利用过程进行模拟, 仅选部分结果, 见表 1.

表 1 2000 年石羊河流域各灌区计算值

Tab. 1 Calculation result of each irrigation area in Shiyang river basin in 2000

子块名称	农业耗水/ $\text{万m}^3$	工业耗水/ $\text{万m}^3$	渠系蒸发/ $\text{万m}^3$	潜水蒸发/ $\text{万m}^3$	库渠供给/ $\text{万m}^3$	井渠供给/ $\text{万m}^3$	地下水平衡/ $\text{万m}^3$	地下水位变 幅/ $\text{m}$
古浪灌区	4 291.4	297.1	755.1	0.0	2 334.8	2 876.9	-2 809.16	-0.28
黄羊灌区	4 830.4	580.1	1 122.7	0.0	0.0	6 233.0	-2 844.38	-0.37
杂木灌区	10 455.7	591.6	1 992.2	0.0	3 593.4	8 907.1	-5 390.63	-0.45
金塔灌区	5 307.5	647.2	962.2	0.0	1 739.8	5 123.3	-1 159.10	-0.17
西营灌区	14 801.1	449.5	2 919.2	0.0	2 674.4	14 442.0	-2 362.50	-0.12
清源灌区	7 150.2	155.4	817.7	0.0	8 176.5	0.0	-1 678.77	-0.50
金羊灌区	4 459.0	129.3	514.6	340.0	5 147.5	0.0	-144.61	-0.08
永昌灌区	5 928.7	147.2	680.7	157.2	6 807.0	0.0	-203.38	-0.10
环河灌区	2 277.9	38.3	258.8	7 340.8	2 588.2	0.0	0.00	0.00
东河灌区	10 545.7	134.4	2 565.6	0.0	200.5	11 717.4	0.00	0.00
四坝灌区	2 748.7	137.5	324.2	0.0	3 259.3	0.0	0.00	0.00
西河灌区	6 976.7	133.7	1 695.8	0.0	264.9	7 686.4	0.00	0.00
清河灌区	6 509.0	132.9	742.7	0.0	7 430.7	0.0	-1 378.69	-0.08
金川灌区	2 159.6	9 091.6	2 145.8	0.0	9 069.6	6 899.5	-3 360.83	-0.41
昌宁灌区	1 056.3	13.2	119.0	0.0	1 193.4	0.0	-718.05	-0.16
坝区灌区	7 500.0	177.9	1 470.4	1 288.2	7 243.6	1 355.4	-4 223.94	-0.28
夹河灌区	1 138.9	15.1	153.9	566.7	1 056.7	231.1	-2 097.07	-0.44
泉山灌区	9 416.8	107.1	1 448.6	0.0	8 256.4	2 366.6	-4 061.91	-0.36
湖南灌区	3 275.4	42.1	693.7	1 387.2	2 990.1	712.2	-783.43	-0.09
湖北灌区	6 887.4	71.3	1 130.0	2 136.4	3 104.8	4 654.0	30.83	0.01
合计	117 716.4	13 092.5	22 512.9	13 216.5	77 131.6	73 204.9	-33 185.6	

说明:“一”表示为该年地下水局部超采.

表 1 中前四项为耗水项, 这四项再加上 2000 年河道弃水蒸发量  $2 111.0 \text{ 万m}^3$ , 9 座水库的水面蒸发量  $3 515.4 \text{ 万m}^3$  和水库水量变化  $3 510.7 \text{ 万m}^3$ , 合计总耗水量为  $175 675.1 \text{ 万m}^3$ . 当年流域的总来流量为库渠供给、井渠供给加上外调水量, 合计  $175 673.6 \text{ 万m}^3$ , 两项基本吻合, 这说明模型模拟的结果符合水量平衡原则.

从表 1 中可得出以下结论:①石羊河流域农业耗水占总耗水量的 68.4%, 工业耗水占总耗水量的 7.6%, 生态耗水占 24%, 农业耗水比例偏高;②2000 年, 全流域地下水超采量为  $-33 185.6 \text{ 万m}^3$ , 占流域总水资源量的 18.9%, 地下水超采状况严重;③除环河灌区、东河灌区、四坝灌区、西河灌区、湖北灌区能

满足地下水供需平衡, 地下水位基本保持不变外, 其它灌区地下水位都有不同程度的下降, 个别灌区年降幅达到  $0.5 \text{ m}$ .

按当前石羊河流域的水资源开发利用程度, 全流域来水量以多年平均来水量计, 代入水资源转化模型, 由式(7)和式(13)计算出 2000~2020 年间各灌区的地下水位变化过程, 其中超采比较严重的几个灌区如图 1 所示.

由图 1 可以看出, 如果继续保持现在的水资源开发利用方式, 各灌区的地下水位将一直呈下降的趋势, 其中以民勤盆地所在的泉山灌区地下水位下降幅度最为剧烈, 20 年下降  $6.43 \text{ m}$ , 其次是金川灌区, 下降  $4.61 \text{ m}$ . 从空间上比较, 北盆地

灌区(泉山、金川灌区)的地下水位降幅要明显大于南盆地(杂木、坝区灌区)。

总之,水资源严重短缺是导致当前石羊河流域生态环境危机的关键因素,地下水超采虽然短期内满足了部分地区的用水需求,但从长远来看,无疑于饮鸩止渴<sup>[4]</sup>。

域生态环境危机的关键因素,地下水超采虽然短期内满足了部分地区的用水需求,但从长远来看,无疑于饮鸩止渴<sup>[4]</sup>。

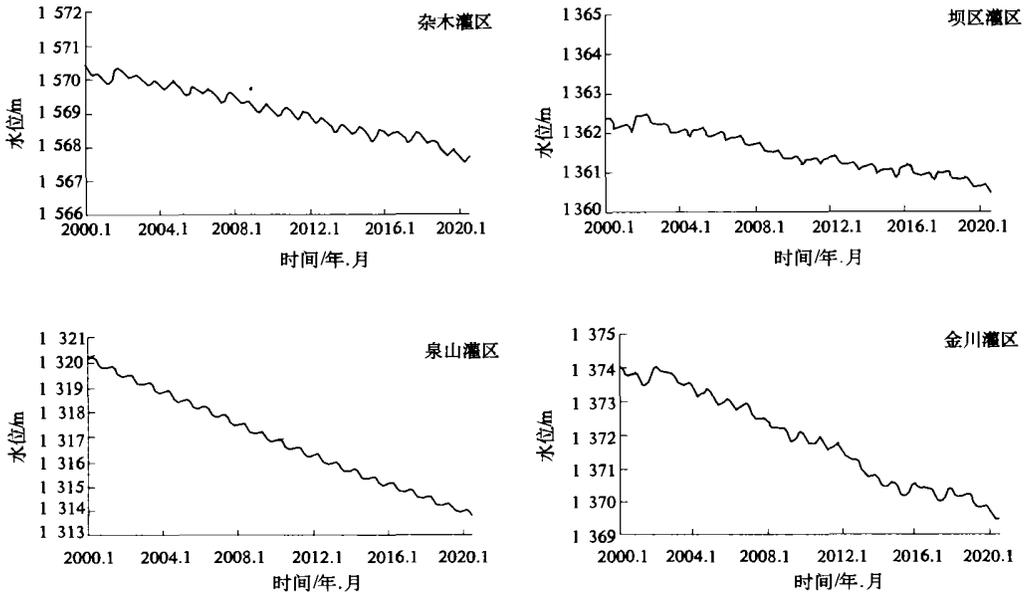


图1 石羊河流域灌区地下水位变化过程图

Fig.1 Water level change process of irrigation areas in Shiyang river basin

#### 4 结束语

当前,石羊河流域出现的水资源危机和生态环境恶化等问题,已经引起了学术界和各级行政部门的重视,石羊河流域综合治理继西北内陆河流塔里木河和黑河之后,成为当前政府和学术界以及社会有关方面关注的热点问题.笔者建立的石羊河流域水资源转化模型,从机理上描述流域内水循环过程和水资源转化规律,物理概念清晰,具体应用表明,该模型计算结果符合当地实际.

#### 参考文献:

- [1] 高飞,张元禧.河西走廊内陆石羊河流域水资源转化模型及其及时转化关系[J].水利学报,1995,26(11):77~83.
- [2] 吕胜利,宋秉芳.石羊河流域水资源与经济动力学的模拟[J].甘肃地质学报,1995,4(2):70~74.
- [3] 曲耀光,马世敏.西北干旱区水资源转化与开发利用模型[J].中国沙漠,1998,18(4):299~307.
- [4] 左其亭,王中根,陈喜,等.西部干旱区生态环境质量定量评价理论方法[J].郑州工业大学学报,2001,22(2):34~38.

### Research on Water Resources Transformation Model in Shiyang River Basin and Its Application

DOU Ming<sup>1</sup>, SUN Xue-tao<sup>2</sup>, ZUO Q-ting<sup>1</sup>

(1.School of Environmental & Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Water Resources, Ministry of Water Conservancy, Beijing 100053, China)

**Abstract:** Based on the qualitative analyses on water resources transformation mechanism, combining with each calculation unit, the water resources transformation model in Shiyang river basin is developed. The change process of groundwater level in each irrigation area from the year of 2000 to 2020 is predicted by the developed model, and the result shows that the Shiyang river basin can not be sustained if the current exploitation and utilization mode of water resources is kept and the serious shortage of water resources is the key factor of the current crisis of ecological environment.

**Key words:** Shiyang river basin; water resources; three-types water transformation model