

石羊河流域中下游近 40a 地下水位动态特征分析

胡海华¹, 丁宏伟², 贺兵英³

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430205; 2. 甘肃省地质矿产勘查开发局, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:石羊河流域位于河西走廊东部, 是中国西北最发达的经济区域, 也是甘肃省内水资源最紧张、用水矛盾最尖锐、生态环境不断恶化的地区之一。依据河西走廊石羊河流域中下游 64 个观测点 1977~2015 年地下水位观测点时间序列观测资料, 在深入阐述研究区地下水位季节性、多年动态特征、类型和平面分布规律的基础上, 利用 Kendall 秩次相关系数和 Hurst 指数分别分析了研究区地下水位的发展趋势性和持续性特征。根据计算数据, 分析了研究区域地下水位下降的原因。结果表明: 石羊河流域平原地带绿洲区和绿洲区外围地下水位的发展趋势性和持续性各不相同, 地下水位的年均值与月均值都通过了显著性检验, 呈不断的下降趋势, 绿洲区地下水位下降幅度、下降趋势大于绿洲区外围, 并具有较强的持续性, 且绿洲区地下水位下降的持续性比绿洲区外围更强。

关键词:趋势性; 持续性; 地下水位; 石羊河流域

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2016)03-0164-11

Dynamic Variation of Groundwater Level in the Middle-Lower Reaches of Shiyanghe River Basin for Nearly 40 Years

HU Haihua¹, DING Hongwei², HE Bingying³

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Gansu Province Bureau of Geology and Mineral Exploitation and Development, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. No. 3 Geology and Mineral Exploitation Team, Gansu Province Bureau of Geology and Mineral Exploitation and Development, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Located in the eastern part of the Hexi Corridor, the Shiyang river basin is the most economically developed region in the whole northwest region. However, the water shortage, contradiction and continuous deterioration of environment are also concentrated in this area. According to the time series observation data from 64 observation points during 1977-2015 in the middle and lower reaches of Shiyang River Basin in Hexi Corridor, the seasonal variation, dynamic changes, types and plane distributions over years of the groundwater level in study area have been elaborated. And then, the characteristics of tendency and sustainability of the groundwater level have been analyzed through using Kendall rank correlation coefficient and Hurst exponent. Finally, the reason of the decline of groundwater level has been explained by computed data. The results indicate that both the tendency and sustainability of groundwater level in the plains are

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-04-20

基金项目: 中国地质调查局“河西走廊地下水勘查”(20001040020073)

作者简介: 胡海华(1973-), 女, 副教授, 研究方向为水文地质。E-mail: 240488380@qq.com

different the ones in oasis areas and corresponding peripheral areas, with effectively verified annual and month averages. The groundwater level in oasis areas owes greater decrease amplitude and rate and duration than that in peripheral areas.

Keywords: tendency; persistence; groundwater level; Shiyanghe River Basin

石羊河流域位于缺水的河西走廊东部,是整个西北最发达的经济区域。这里更是甘肃省内水资源最紧张、中下游用水矛盾最尖锐、下游生态环境不断恶化的地区之一。依据水文地质学和工程地质学的观点可知,上游祁连山区降雪丰富,孕育了常年的冰川,是整个流域水源涵养区和径流的形成区;中游为武威盆地,是全流域用水量最大的地区;下游为民勤-潮水盆地,是水资源的最终耗散地带。从1977年开始,该地区就有地下水位动态的观测记录(范锡朋,1981,1990),目前的观测点有64个,131个观测点因自然干枯和人为破坏,已经消失。采用自计水位仪与人工观测相结合,监测频率为1~2次/月,监测含水层位主要为中、浅层,即现状地下水主要供水目的层,到目前为止已有近40a的观测数据。地下水动态监测范围包括凉州区、民勤县和金川区大部,为 $102^{\circ}08' \sim 103^{\circ}50' E$, $37^{\circ}05' \sim 39^{\circ}02' N$,控制面积达 $6\,380\text{ km}^2$,涵盖了石羊河流域主要工农业分布地带。建国60多年来,随着中游地区水土资源的大规模开发利用和地下水开采量的不断增加,导致了区域性地下水位大面积持续下降(袁生禄,1991),溢出带泉水资源近于枯竭,进入下游的水资源持续减少,使得民勤绿洲灌溉水源严重短缺(樊自立等,2000),不得不超采已盐化的地下水维持生计,形成水资源利用上的恶性循环(易秀,2001),引起了一系列生态环境问题。早在20世纪70年代末,石羊河流域的水资源与生态环境问题就引起了有关学者的高度关注(徐昔保等,2005),相关科研部门一直在对流域水资源变化趋势、地表水与地下水转化、节水灌溉与生态高效用水、地下水合理开采利用及生态环境保护等问题进行了卓有成效的调查研究,积累了研究程度远高于西北其他内陆河流域的研究成果。但是,利用最新系列数据系统研究石羊河流域中下游地下水位动态特征的研究尚不多见。因此,深入分析石羊河流域中下游地下水位的季节性及年际的动态变化特征和规律,预测其未来的变化趋势,对于合理开发利用这一地区有限的水资源,实现流域经济社会的可持续发展和保护生态环境等,均具有重要的现实意义。

1 概况

河西走廊已经进入了一个整体强烈差异性断块运动为主的构造运动发展时期(衷平等,2005)。该区域地下水位的季节性变化和年际的变化十分明显,表现出显著的分带规律(赵华等,2004)。由含水层的埋藏条件和地下水补给、径流、排泄条件所决定,武威盆地的洪积扇群雨洪、渠系的入渗过程是引起地下水变化的主要因素,武威盆地北部细土平原及民勤盆地农业区,雨洪入渗的影响不大(马金珠等,2003),地下水位变化的主要原因是人为灌溉和开采(丁宏伟,2002,2003,2007)。细土平原荒漠区水位埋深小于5m的地带,受人为灌溉、开采的影响很小,其主要是由蒸发、蒸腾排泄造成的(王贵忠,2010)。依据地下水位观测曲线,把石羊河流域地下水位季节性动态划分为径流型、开采型、灌溉-开采型、蒸发型4种类型(图1)。

径流型。位于武威盆地的洪积扇群带水位埋深大于80~100m的地带和民勤盆地南部靠近走廊山脉的扇形地。该地带因为水位埋藏深,地下水开采量不大,水位的变化特征基本上反映了雨洪入渗径流的时空分布规律。高水位期出现在8~11月,低水位期出现在次年的12到翌年3月,高水位滞后于河流丰水期1~4个月或更长,呈现单峰单谷型,年变幅0.13~3.67m。不同地带的观测资料显示,雨洪入渗所形成的地下水位峰值迁移过程,主要是水位压力传导的结果而不是地下水的运动速度所致。即使在洪积扇中上部含水层具有很强导水性的地段,地下水的导水系数也不超过 $2\,000 \sim 10\,000\text{ m}^2/\text{d}$ 。

开采型。主要位于绿洲内纯井灌溉区和农业区。由于人为开采使得水位的波动遮盖了地下水位的自然变动过程,使得该区域水位的基本特征表现为:开采期的低水位和非开采期的高水位。低水位期分布在每年的4~11月,高水位期分布在12月到次年的3月,在曲线上表现为单谷单峰型或者是多峰多谷型,年变幅1.161~5.952m,最大达23.15m。

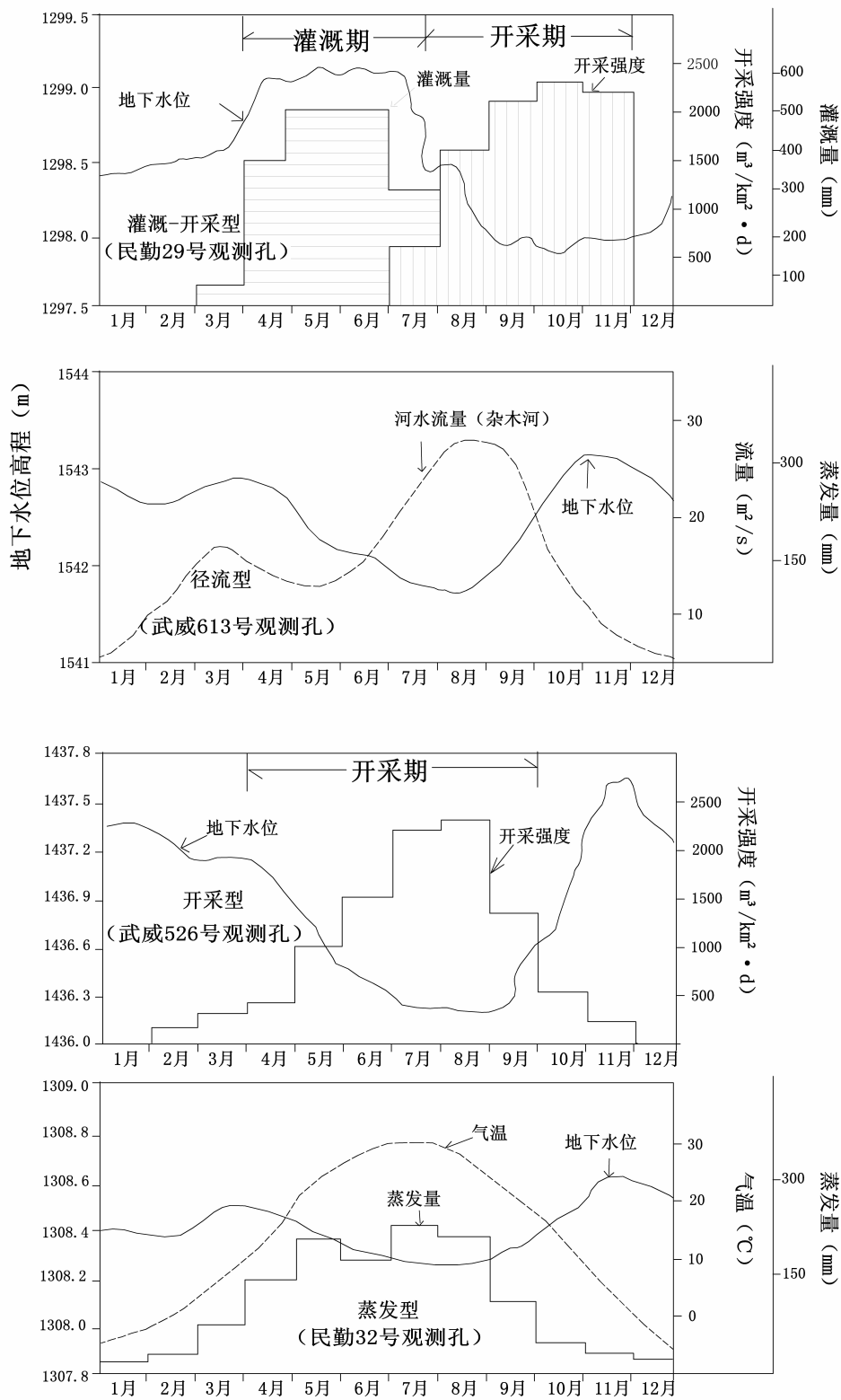


图 1 石羊河流域平原区地下水位季节性动态类型图

Fig. 1 Groundwater level annual regime type of region in the Shiyanghe River Basin

灌溉开采型。主要位于绿洲区内。曲线上表现为单谷单峰型或者是多峰多谷型。每年的 4 月、5 月是水位最高的季节,也是灌水量最大、灌溉强度最高的月份,年变幅 1.581~2.611 m。

蒸发型。位于中下游盆地北部腾格里沙漠边缘地下水位埋深小于 5m 的荒区。该地带地下径流滞缓,故垂向强烈的蒸发蒸腾是影响地下水位动态过程的主要因素。在 5~9 月份,由于气温的升高,蒸发量的增大水位开始下降,10 月至翌年 3 月由于气温的下降和蒸发量的减小,水位开始上升。借助地渗仪对地下水垂向交替变化的观测发现,每年的 3~4 月的高水位期,是由季节性冻土消融水入渗引起。该区域水位年变幅在 0.31~

0.95m,最大为 1.2m,水位的变化幅度一般小于灌溉—开采型和开采型,水位的年变化幅度和埋深呈反比关系,表明它的动态过程与来自上游的地下径流关系不大。

2 地下水位多年动态特征及类型

近 40a 的观测资料证实,石羊河流域中下流地区地下水位基本上处于区域性持续下降过程。以年均下降值为判断标准,把该区地下水位多年动态变化的过程划分为快速下降(下降幅度 ≥ 0.5 m/a)、缓慢下降(下降幅度 0.1~0.5 m/a)和基本稳定(变化幅度 $\leq \pm 0.1$ m/a)3 种类型(图 2)。

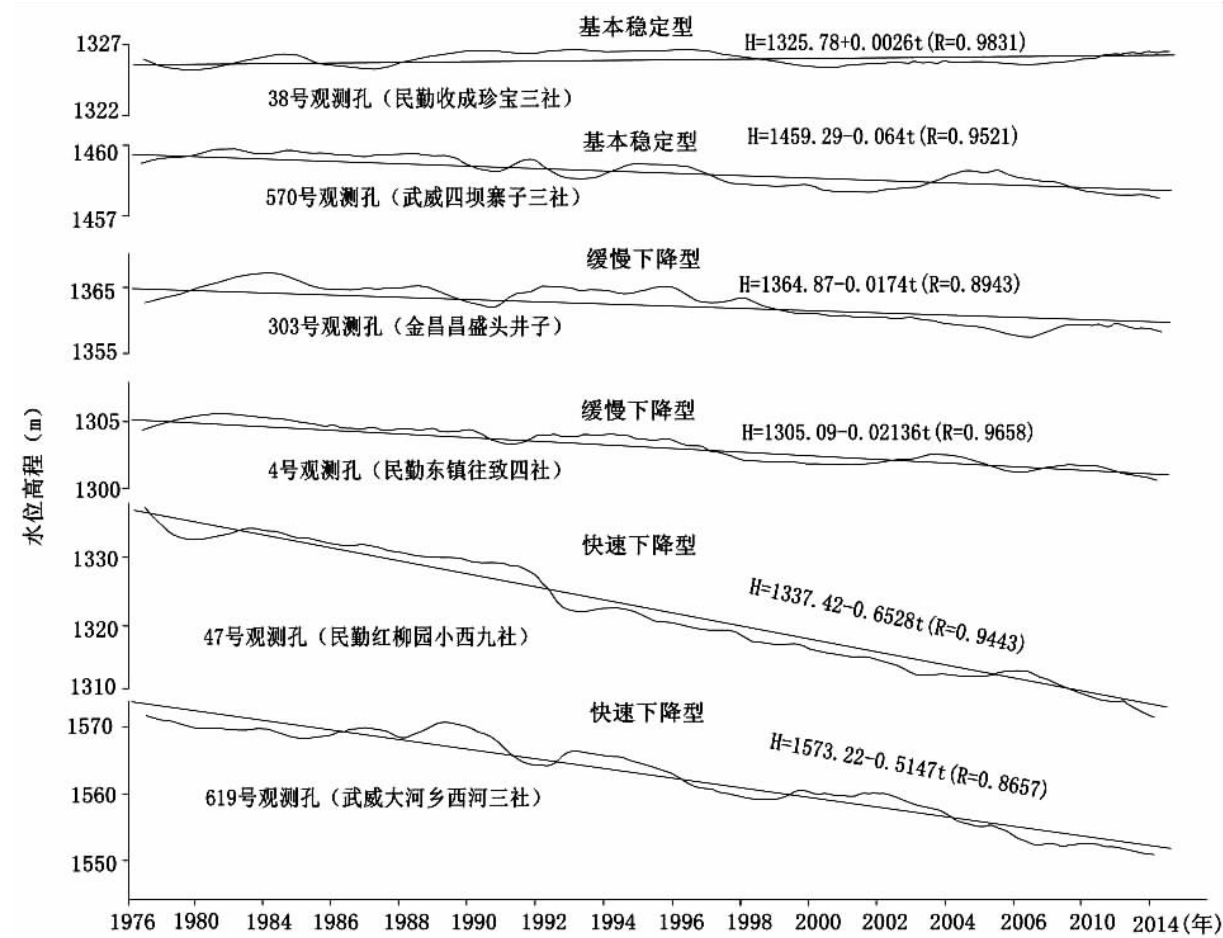


图 2 石羊河流域平原区地下水位多年动态类型图

Fig. 2 Groundwater level perennial regime of region in the Shiyanghe River Basin

快速下降型。位于南盆地洪积扇群带前缘及北盆地地下水集中开采的农灌区,多年来,地下水位的动态变化呈快速下降趋势,年均下降幅度 ≥ 0.50 m。武威盆地水源乡一带,近 40a 来(1977~2015 年)地

下水位共下降 26.52 m,年均下降 0.68 m;民勤盆地北部的红柳园—东镇一带,近 40a 来地下水位共下降 22.62~26.91 m,年均下降 0.58~0.69 m。年均水位高程(H)与时间(t)成显著的线性相关,相关系数(R)高达 0.903 5~0.973 5,斜率(b)为 0.52~0.61。

缓慢下降型。位于石羊河流域南北盆地间,多年来,地下水位的动态变化过程表现出缓慢的下降趋势,年均下降幅度 0.10~0.50 m。在民勤县城一带、昌宁乡天生坑和武威盆地高坝镇,地下水位累计下降值分别为 17.36 m、10.24 m 和 8.41 m,年均下降值为 0.45 m、0.26 m 和 0.22 m。年均水位高程(H)与时间(t)二者之间线性相关亦较为显著,相关系数(R)为 0.868 7~0.965 8,斜率(b)为 0.14~0.45。

基本稳定型。只位于南北盆地东部腾格里沙漠边缘的个别地带及民勤盆地金川区下四分一周家井以西的区域,地下水位多年动态变化过程基本稳定,水位年均变化幅度 $\leq \pm 0.10$ m。民勤盆地收成乡以东和金川区下四分地带,近 40a 来地下水位累计下降值分别为 1.82 m 和 1.25 m,年均下降值为 0.05 m 和 0.03 m。年均水位高程(H)与时间(t)二者成显著线性相,相关系数(R)一般大于 0.95,斜率(b)小于 0.10。

从平面上观察,地下水位的下降趋势亦较为显著(图 3)。统计分析发现,武威盆地的武威城以北地带和民勤盆地民勤县城周围至西渠—东镇、昌宁堡—锁锁井一带,在 1990~2010 年间,地下水位下降幅度最大,呈环形分布。周家井以西(包括金昌市城区)的民勤盆地西部及腾格里沙漠腹地,地下水位 20a 来累计下降幅度小于 0.5~1 m,平均每年下降幅度仅 0.02~0.05 m,局部地段地下水位已基本逐渐趋于稳定或呈微弱的上升趋势(红崖山水库—阿拉古山南缘及腾格里沙漠洪水河沿岸 2007~2014 年地下水位累计上升 0.15~0.25 m)。

经过分析,认为石羊河流域平原区局部地段地下水位出现上升,究其原因,估计与 2003 年以来国家逐步实施治理的相关项目有关,武威盆地地下水开采量大幅度减少(地下水排泄量减少)以及上游 8 条出山河流径流量的微弱增加,“引黄(黄河)济民(民勤)”工程(通过洪水河进入红崖山水库)河(洪)水入渗量增多所引起的对盆地地下水补给量增加有关。

3 地下水位变化趋势分析

3.1 方法简介

3.1.1 趋势性与 Kendall 秩次相关分析

常用检验方法有累积距平分析的趋势检验、灰色系统法、相关统计法、Kendall 秩次相关法检验等。笔者采用 Kendall 秩次相关分析方法如下。

时间序列为 $X_1, X_2, \dots, X_n$ (n 为样本数),对偶观测值($X_i, X_j, j > i$)中 $X_i < X_j$ 出现的个数为 P_i ,顺序(i, j)的子集是($i=1, j=2, 3, \dots, n$)、($i=2, =3, 4, \dots, n$)、 $\dots$ 、($i=n-1, j=n$)。

$$\begin{cases} U = \frac{\tau}{[\text{var}(\tau)]^{1/2}} \\ \tau = \frac{4 \sum p_i}{n(n-1)} - 1 \quad \dots\dots\dots (1) \\ \text{var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \end{cases}$$

统计量 U 称为 Kendall 秩次相关系数, n 增加时, U 很快收敛于标准化正态分布,给定显著性水平 α ,其双尾检验临界值为 $U_{\alpha}/2$ 。当 $|U| < U_{\alpha}/2$,则表示序列趋势不显著;当 $|U| > U_{\alpha}/2$,则表示序列趋势明显,而且 $U > 0$,序列呈上升趋势; $U < 0$,序列呈下降趋势。查表得 $U_{0.05}/2 = 1.96$ 。

3.1.2 持续性与 Hurst 指数分析

Hurst 指数又叫重新标度值域分析,即 R/S 分析(Rescaled Range R/S Analysis),是由 HURST 在 1965 年提出的一种处理时间序列的分析方法,他曾利用此法分析河流流量、树木年轮、气温、降水量等许多自然现象,后由 Mandelbort 在理论上进行补充完善,该方法广泛应用于自然科学中的时间序列分析,其具体描述如下。

$X(t) (t \geq 1)$ 是时间序列 $X(i)$ 中的任一点,取时间间隔 k ,时间段 $(t+1, t+k)$ 内所有数据的平均值为 $\bar{x}(t, k)$,点 $x(t+u)$ 的离差累积为 $A(t, k, u)$,极差为 $R(t, k)$,标准偏差为 $S(t, k), 1 \leq u \leq k$,各变量的具体算法如下。

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{u=1}^k x(t+u) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A(t, k, u) = \sum_{i=1}^u [x(t+i) - \bar{x}(t, k)] \quad \dots (3)$$

$$R(t, k) = \max_{1 \leq u \leq k} [A(t, k, u)] - \min_{1 \leq u \leq k} [A(t, k, u)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

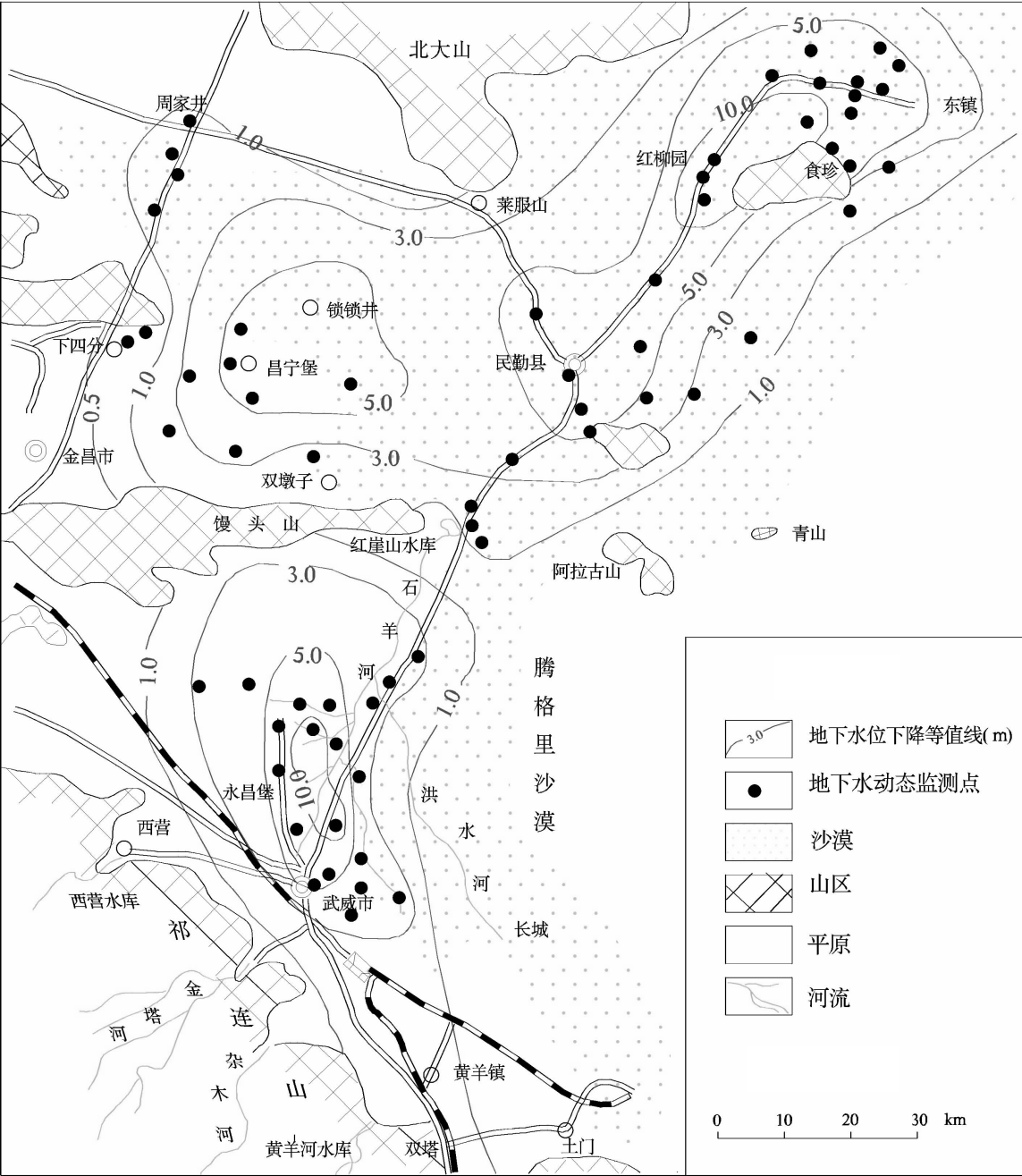


图 3 石羊河流域平原区地下水位 1990~2010 年下降幅度等值线图

Fig. 3 Groundwater level perennial regime of region in the Shiyanghe River Basin

$$S^2(t,k)=\frac{1}{k}\sum_{u=1}^k[x(t+u)-\bar{x}(t,k)]^2\cdots\cdots(5)$$

此值 $R(t,k)/S(t,k)$ 反映了时间序列 $X(i)$ 在起点 t 和时间间隔为 k 时的相对离均累积变幅。计算中选取所有时间起点 t 的 R/S 平均值,或者取部分

t 的 R/S 代替 R/S 。分析表明,存在一个常数 H ,对不同的时间间隔满足以下关系式:

$$\frac{R(k)}{S(k)}\propto\left|\frac{k}{2}\right|^H\cdots\cdots(6)$$

说明时间序列 $X(i)$ 存在 Hurst 现象, H 为

Hurst 指数,其值为 0~1。

$C(t)=2^{2H-1}-1$ (7)

借助概率统计理论,假如是一个随机游动的时间序列,那么它的 H 应该等于 0.5,即累积离差的极差应该随观测次数的平方根增加。当 $H \neq 0.5$ 时,时间序列观测值就不是独立的,每次观测结果都带有它之前发生的所有事件的“记忆痕迹”,即观测值并不是独立的随机事件。近期的影响比远期的大,但残留影响总是存在的。

因此,当 $H=0.5$ 时, $C(t)=0$,表明时间序列 $X(i)$ 完全是随机序列,否则时间序列 $X(i)$ 中存在趋势性成分,即 $Hurst$ 指数与时间序列的关联函数之间存在下列关系

式中: C 为相关性度量; H 为 Hurst 指数。

因此, H 对指示时间序列的发展趋势具有明确的意义,在科学预报中得到广泛应用。实际工作中,往往对时间序列总体直接进行 Hurst 分析,即 $k=m, H=[\ln(R/S)]/[\ln(m/2)], m$ 为时间序列长度。

3.2 地下水位变化趋势分析

3.2.1 地下水位的趋势性评价结果

先用累积距平曲线来判断地下水位的大体变化趋势,再利用 Kendall 秩次相关分析判断具体的趋势走向。依据实际数据得到的累积距平变化过程如图 4,得到的每月 Kendall 秩次相关系数见表 1。

表 1 石羊河流域中下游地下水位 Kendall 秩次相关系数计算结果统计表
Tab. 1 The result of groundwater level Kendall correlation coefficient in the middle-lower reaches of Shiyanghe River Basin

地带	点号	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
绿洲区外围地带	342	-3.28	-3.60	-5.33	-5.46	-5.46	-5.52	-5.64	-5.54	-5.53	-5.51	-5.39	-4.18	-5.02
	360	-5.33	-5.36	-5.29	-5.36	-5.11	-5.39	-4.66	-5.04	-4.83	-4.99	-5.01	-4.72	-5.09
	361	-5.05	-5.05	-5.05	-5.05	-5.05	-5.05	-5.05	-5.29	-5.05	-5.02	-5.13	-5.12	-5.08
	545	-4.65	-4.74	-5.04	-4.72	-5.17	-5.10	-5.04	-5.08	-5.08	-5.19	-4.83	-4.62	-4.94
	526	-4.49	-4.64	-4.57	-4.77	-4.77	-4.98	-4.91	-4.63	-4.98	-4.91	-3.91	-4.91	-4.71
	658	-3.69	-3.69	-4.71	-4.71	-4.71	-4.02	-4.14	-4.13	-4.31	-4.22	-4.40	-3.73	-4.21
	338	-3.22	-2.59	-2.59	-2.70	-2.69	-2.78	-2.52	-2.45	-2.45	-2.45	-2.29	-2.30	-2.59
	363	-5.01	-5.01	-5.01	-5.01	-5.12	-5.12	-5.10	-5.01	-5.03	-5.11	-5.11	-5.11	-5.06
	平均	-4.34	-4.33	-4.70	-4.72	-4.76	-4.74	-4.63	-4.64	-4.66	-4.67	-4.51	-4.33	-4.59
绿 洲 区	99	-6.50	-6.50	-6.50	-6.68	-6.67	-6.67	-6.67	-6.67	-6.67	-6.67	-6.67	-6.67	-6.63
	24-1	-6.35	-6.57	-6.57	-6.57	-6.57	-6.53	-6.53	-6.57	-6.51	-6.51	-6.66	-6.66	-6.54
	30-3	-5.46	-5.44	-5.05	-5.03	-5.47	-5.05	-5.05	-5.05	-5.46	-5.54	-6.14	-5.46	-5.35
	38	-5.86	-5.86	-5.97	-5.33	-5.33	-5.33	-5.32	-5.22	-5.23	-5.65	-5.75	-5.65	-5.54
	350	-6.05	-5.85	-5.73	-6.02	-6.02	-6.199	-6.45	-6.45	-6.53	-6.48	-6.22	-6.11	-6.16
	566	-5.88	-5.81	-5.96	-5.94	-5.88	-5.94	-6.20	-6.25	-6.14	-6.11	-6.06	-6.11	-6.04
	31-2	-5.12	-5.03	-5.11	-5.11	-5.03	-5.12	-5.00	-5.21	-5.21	-5.21	-5.14	-5.14	-5.13
	514	-6.52	-6.27	-6.47	-6.47	-6.47	-6.47	-6.47	-6.29	-6.45	-6.45	-6.67	-6.52	-6.47
	平均	-5.97	-5.92	-5.92	-5.89	-5.93	-5.91	-5.95	-5.97	-6.02	-6.08	-6.16	-6.03	-5.98

从表 1 可知,该地区的地下水位每月变化以及多年来的变化都表现出明显的下降趋势,全部通过了 0.05 显著性检验,Kendall 秩次相关系数为 $-2.29 \sim -6.68$,平均为 -5.28 。其中,绿洲区 Kendall 秩次相关系数为 $-5.02 \sim -6.68$,平均为 -5.98 。8 月份最大平均为 -6.08 ,4 月份最小平均为 -5.89 ;绿洲区外围地带 Kendall 秩次相关系数为 $-2.29 \sim -5.53$,平均为 -4.59 。4~6 月份最大平均为 -4.74 ,12 月至翌年 2 月份最小平均为 $-$

4.33。可以这样说,绿洲区地下水位下降幅度和趋势大于绿洲区外围地带。

3.2.2 地下水位持续性评价结果

对某个时间序列,时间长度不同,它的 Hurst 系数也不相同。通常情况下,Hurst 系数在早期的时间序列波动比较大,随后趋于平稳,最后趋于稳定。为研究石羊河流域平原区地下水位持续性特征,笔者对 1977~2015 年实际观测的地下水位时间序列作 Hurst 分析(表 2),比较各观测点的时空变化。

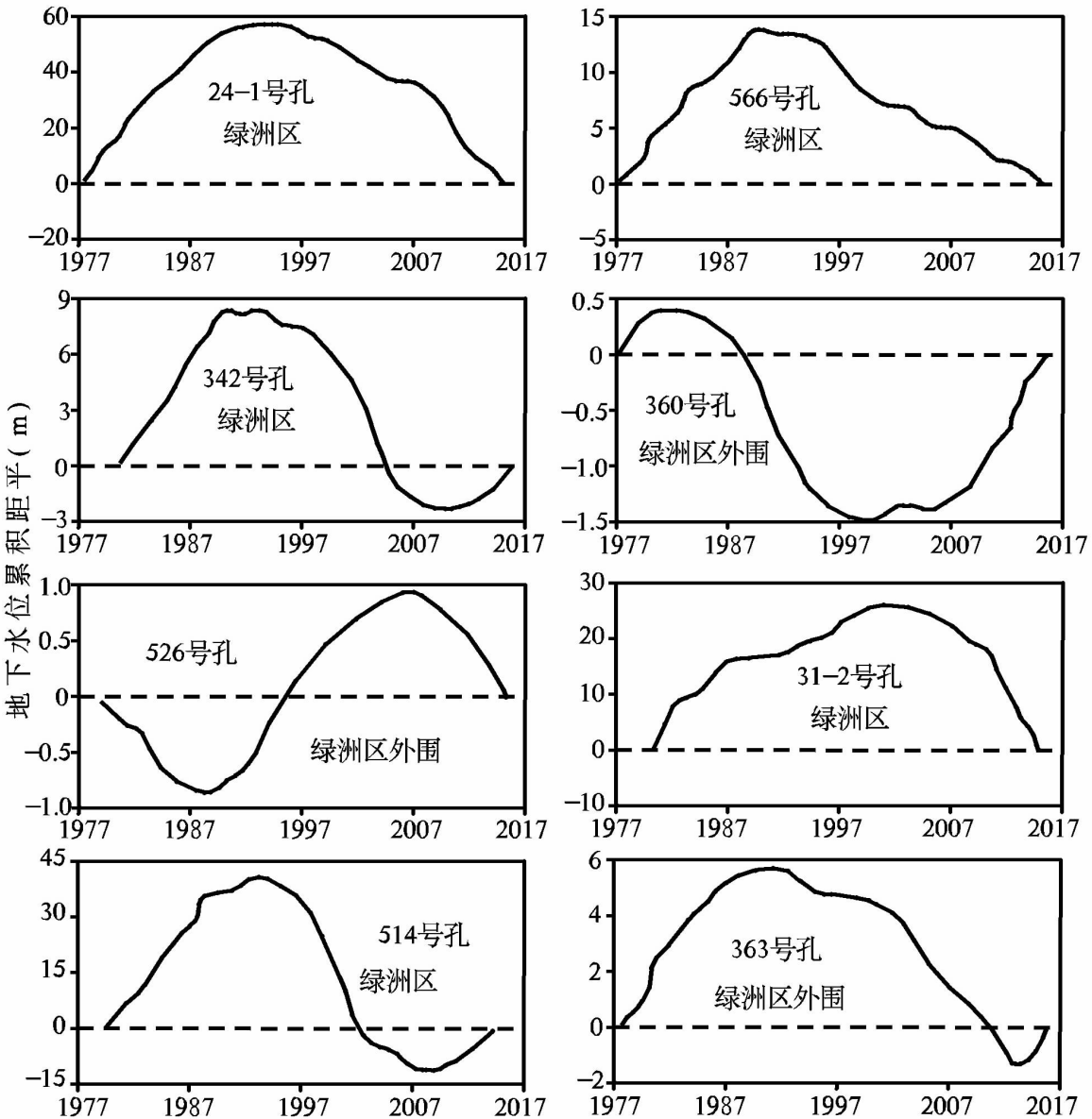


图 4 石羊河流域平原区地下水位累积距平变化过程

Fig. 4 Change curve of groundwater level cumulative anomaly in the middle-lower reaches of Shiyanghe River Basin

表 2 石羊河流域中下游地下水位 Hurst 系数计算结果表

Tab. 2 The result of groundwater level Hurst index coefficient in the middle-lower reaches of Shiyanghe River Basin														
地带	点号	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
绿洲区外围地带	342	0.85	0.86	0.88	0.91	0.90	0.89	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.92	0.90
	360	0.86	0.84	0.87	0.89	0.78	0.87	0.88	0.88	0.87	0.83	0.86	0.86	0.87
	361	0.87	0.87	0.88	0.87	0.89	0.92	0.91	0.90	0.91	0.91	0.85	0.89	0.88
	545	0.84	0.86	0.88	0.85	0.88	0.85	0.85	0.91	0.91	0.93	0.90	0.901	0.89
	526	0.82	0.83	0.84	0.86	0.81	0.88	0.85	0.89	0.88	0.87	0.87	0.82	0.86
	658	0.63	0.72	0.81	0.86	0.78	0.83	0.87	0.89	0.88	0.86	0.88	0.86	0.83
	338	0.74	0.78	0.88	0.74	0.75	0.73	0.87	0.88	0.88	0.81	0.78	0.78	0.81
	363	0.86	0.87	0.88	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.91	0.91	0.91	0.88	0.89
	平均	0.82	0.84	0.87	0.87	0.85	0.86	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87
绿洲区	99	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96
	24-1	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.97
	30-3	0.96	0.94	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.95	0.93	0.94	0.94	0.95
	38	0.94	0.95	0.93	0.91	0.91	0.92	0.93	0.93	0.95	0.98	0.98	0.98	0.94
	350	0.92	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.92
	566	0.88	0.89	0.89	0.91	0.90	0.93	0.90	0.94	0.89	0.88	0.89	0.89	0.89
	31-2	0.89	0.90	0.94	0.93	0.93	0.91	0.84	0.84	0.89	0.96	0.97	0.98	0.91
	514	0.97	0.95	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.95	0.97	0.97	0.97	0.95	0.97
	平均	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94	0.92	0.92	0.93	0.94	0.94	0.94	0.93

由表 2 可以看出,石羊河流域中下游各观测点地下水位的逐月变化和多年变化的 Hurst 系数都介于 0.50~1.0,大部分观测点的 Hurst 系数小于 1.0,均值在 0.90 左右,表明地下水位依然在持续下降。进一步统计发现,绿洲区外围地带各观测点的逐月平均 Hurst 系数介于 0.71~0.91,平均为 0.86,除位于武威盆地南部 658 号观测点 1 月份较低(0.64)、民勤盆地北部沙漠 342 号观测点 12 月份稍高(0.92)外,其他观测点每月和多年的 Hurst 系数没有太大差别,1~2 月、5~6 月份稍低,其余月份系数差别不明显。绿洲区各观测点的逐月平均 Hurst 系数介于 0.88~0.98,平均为 0.93,一般 7~8 月份系数略低,10~12 月份系数稍高,其余月份和多年的 Hurst 系数差别不大,变化幅度很小;位于武威盆地地下水开采中心的 514 号观测点和位于民

勤盆地北部地下水开采最集中的 24-1 号观测点 Hurst 系数高达 0.96~0.97,为全区最高。说明开采量越大的地带地下水位下降幅度也越大,相应的 Hurst 系数越高。计算结果表明,绿洲区地下水位的逐月变化和多年变化的 Hurst 系数远高于绿洲区外围地带,说明绿洲区地下水位下降的持续性比绿洲区外围地带更强,从而佐证了引起流域中下游地下水位持续下降的主要原因是超采地下水的观点。进一步表明笔者所采用的 Kendall 秩次相关系数和 Hurst 指数法是可行的,对于研究地下水的水位持续变化有着现实的指导意义。

4 地下水位下降成因分析

以石羊河流域上游武威盆地凉州区为例,水资

源从上游山区到平原地下水溢出排泄经历了复杂的转化过程:山区降水→河水→地下水→泉水和人工开采→地下水,“河水—地下水—泉水”三水转化是本区地下水系统的天然循环特征,地下水的利用实质上是地表水的重复利用,造成区域地下水位持续下降的主要原因如下。

(1)石羊河流域50a来出山径流量总体呈下降趋势,河源来水量减少。年际变化可分为4个阶段:1955~1968年的下降段,平均径流量 $48.3\text{ m}^3/\text{s}$;1969~1990年的平稳段,平均径流量 $44.1\text{ m}^3/\text{s}$;1991~2002年的下降段,平均径流量 $40.2\text{ m}^3/\text{s}$;2003~2014年的平稳段,平均径流量 $44.1\text{ m}^3/\text{s}$ 。河流天然来水量的普遍减少,主要原因是青藏高原东北部气温持续升高,流域蒸发量增大,降水量减少,致使流域产流量减少;其次表现在人为因素对流域下垫面条件的改变,破坏了流域原有的蓄水条件,造成水土严重流失(丁宏伟等,2002,2003,2007)。

(2)高衬砌渠网化,造成渗漏补给地下水量减少。出山河流各引水干渠衬砌率达100%,支渠衬砌率大于90%,渠系利用率大于70%。以1995年和1978年河源来水量基本相同对比,由于渠系衬砌率提高,增大了地表水利用率,但河渠水渗漏量减少,渗漏补给地下水量减少约0.47亿 m^3 。

(3)水资源引用格局变化,地下水过量开采。武威平原是一个古老的山水、泉水灌区,自1965年开始在山水与泉水灌区间的“盲肠”地带打井,泉灌面积由1966年的30.6万亩削减至2.7万亩,井灌面积由1.9万亩至现在超过50万亩。改变了原有的山、泉水灌区的自然布局,形成现在的井、泉灌区和山、井水灌区及纯山水灌区的格局,凉州区域内井采面积为 $1\,273.6\text{ km}^2$,井采集中区地下水开采模数为 $33\text{ 万 m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$,边缘地带地下水开采模数小于 $20\text{ 万 m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$,而目前地下水位下降幅度大的范围正是井灌为主的地区,也即地下水位持续下降的主要原因之一是地下水过量开采所致。

(4)泉水量衰减导致武威盆地入下游民勤盆地水量减少。受上游河源来水量减少、地下水超采等因素影响,武威城北230多条泉沟完全干枯,占原有泉沟的79%,泉水溢出带平均下移2~5 km,泉水溢出量由50年代的4.38亿 m^3/a ,衰减至现状的1.5亿 m^3/a 左右,造成下游民勤盆地用水告急。

(5)用水格局不均衡,单位耗水成本大。河西走

廊是中国重要的粮食生产基地之一,“没有灌溉就没有农业”是武威地区农业生产的基本特征,地下水总开采量中农业灌溉用水量占总量比例超过85%。

5 结论

(1)该区域地下水位存在着显著的季节性和年际动态性变化特征,根据计算结果来看,未来该区域地下水位基本上处在持续的下降过程中。

(2)通过对64个地下水位动态观测点的趋势性(Kendall秩次相关系数)和持续性(Hurst系数)计算分析,研究区地下水位的每月变化和多年变化均呈现出显著的下降趋势性,全部通过了0.05显著性检验,Kendall秩次相关系数为 $-2.28\sim-6.69$,平均为 -5.27 ,绿洲区地下水位下降幅度和趋势高于绿洲区外围地带;地下水位的逐月变化和多年变化的Hurst系数都为 $0.5\sim1.0$,大多数观测点的Hurst系数接近于1.0,平均为0.90左右,说明研究区地下水位下降的持续性明显,且绿洲区地下水位下降的持续性比绿洲区外围地带更强。从而佐证了引起石羊河流域中下游地下水位持续下降的主要原因是超采地下水的观点。

(3)河源来水量减少、河渠水利用率提高和地下水过量开采是导致石羊河流域地下水位持续下降的主要原因。其根本上应从调整产业结构、发展高效节水型农业、挖潜节能降低工业万元产值耗水量入手,严格实施取水许可制度为核心的水资源管理机制,全面实现水资源的统一规划、统一调度、统一发放取水许可证、统一征收水资源费、统一管理水量水质的“五统一”管理。

(4)加强地下水动态监测,建立有效的水位与水量监测、水污染防治监管机制,以利于政府供水资源管理及调配。

参考文献(References):

- 范锡朋. 河西走廊河川径流与地下水的相互转化及水资源的合理利用[J]. 水文地质工程地质, 1981, 76(4): 1-4.
- FAN Xipeng. Cycle conversion of water runoff and groundwater and water resources sustainable utilization in Hexi Corridor[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1981, 76(4): 1-4.

- 袁生禄. 石羊河流域水资源大规模开发对生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1991, 5(3): 44-51.
- YUAN Shenglu. The ecological and environmental problems caused by the excessive exploitation and utilization of water resources in the Shiyang River Basin, Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1991, 5(3): 44-51.
- 范锡朋. 西北干旱区地下水资源特征及水资源开发引起的环境问题[J]. 水文地质工程地质, 1990, 112(1): 3-7.
- FAN Xipeng. The characteristics of the groundwater resources and the environmental of water resources, the arid area in the Northwest of China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1990, 112(1): 3-7.
- 樊自立, 马映军. 干旱区水资源开发及合理利用的几个问题[J]. 干旱区研究, 2000, 17(3): 6-11.
- FAN Zili, MA Yingjun. Some issues about the exploitation and the rational utilization of water resources in the Arid Areas[J]. Arid and Research, 2000, 17(3): 6-11.
- 易秀. 干旱半干旱地区地下水问题[J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 54-57.
- YI Xiu. Some problems on groundwater in the arid and semi-arid regions[J]. Arid and Research, 2001, 18(3): 54-57.
- 徐昔保, 张建明, 祁永安, 等. 基于 3S 的石羊河流域生态功能区划研究[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 41-44.
- XU Xibao, ZHANG Jianming, QI Yongan, et al. 3S-based study on the ecological-function regionalization in the Shiyang River Basin, Gansu Province[J]. Arid and Research, 2005, 22(1): 41-44.
- 衷平, 沈珍瑶, 杨志峰, 等. 石羊河流域水资源短缺风险敏感因子的确定[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 81-86.
- ZHONG Ping, SHEN Zhenyao, YANG Zhifeng, et al. Determining the sensitive factors for water resource scarcity risk in the Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(2): 81-86.
- 赵华, 马金珠, 朱高峰, 等. 甘肃省民勤盆地地下水环境变化及原因探讨[J]. 干旱区研究, 2004, 21(3): 211-214.
- ZHAO Hua, MA Jinzhu, ZHU Gaofeng, et al. Study on the groundwater environment and its causes in the Minqin Basin, Gansu Province[J]. Arid and Research, 2004, 21(3): 211-214.
- 马金珠, 魏红. 民勤地下水资源开发引起的生态与环境问题[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 262-265.
- MA Jinzhu, WEI hong. The ecological and environmental problems caused by the excessive exploitation and utilization of groundwater resources in the Minqin Basin, Gansu Province[J]. Arid and Research, 2003, 20(4): 262-265.
- 丁宏伟, 张荷生. 近 50 年来河西走廊地下水资源变化及对生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 2002, 17(6): 691-697.
- DING Hongwei, ZHANG Hesheng. Changes of groundwater resources in recent 50 years and their impact on ecological environment in Hexi Corridor[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(6): 691-697.
- 丁宏伟, 王贵玲, 黄晓辉. 红崖山水库径流量减少与民勤绿洲水资源危机分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 84-89.
- DING Hongwei, WANG Guiling, HUANG Xiaohui. Runoff reducing flowed into Hongyashan reservoir and analysis of water resources crisis in Minqin Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(1): 84-89.
- 丁宏伟. 石羊河流域绿洲开发与水资源利用[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 416-421.
- DING Hongwei. Oasis development and water resources utilization in the Shiyang River Basin[J]. Arid and Research, 2007, 24(4): 416-421.
- 王贵忠. 近 50 年来石羊河流域出山径流变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(8): 45-49.
- WANG Guizhong. The past 50 years Mountainous Runoff trend analysis Shiyang River Basin. [J]. Renmin Yellow River, 2010, 32(8): 45-49.