

气候变化与人类活动对石羊河流域 地下水动态变化的影响*

张文化, 魏晓妹, 李彦刚

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:从石羊河流域地下水循环的角度,分析了多年气候和人类活动的变化趋势及对地下水动态的影响;运用主成分回归法对影响民勤盆地地下水位动态变化的气候和人类活动因素进行了耦合分析,定量研究了其影响力。研究表明:近45 a来,流域平均气温呈现升高趋势,降水量略有增加,蒸发量为波动增加趋势;人类活动通过扩大灌溉面积,提高渠系衬砌率,大量开采地下水改变着地下水的补排条件,人为因素在民勤盆地地下水位动态变化过程中起主导作用,占总影响力的79.12%。受气候变化和人类活动共同作用的影响,流域平原区地下水位大幅度下降,生态环境趋于恶化。

关键词:气候变化; 人类活动; 地下水; 主成分回归

中图分类号: P332; P461

文献标识码: A

文章编号: 1002-3409(2009)01-0183-05

Groundwater Dynamic Evolution Under Climatic Change and Human Activities in Shiyang River Basin

ZHANG Wen2hua, WEI Xiao2mei, LI Yan2gang

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This article analyzes the trends of human activities and climate change for many years from the view of Shiyang River Basin groundwater circulation. Using the principal component regression analysis to analyze the effect and get the contribution rate of climatic change and human activities on groundwater in Minqin Basin. The results show the average annual temperature and the average rainfall for many years have a slight increase. The average evaporation increased in volatility. Human activities are changing the groundwater flow conditions through expanding irrigated area, improving the canal system lining and exploiting groundwater. The anthropogenic factor plays a leading role in groundwater resources variation in recent 50 years, and its effect accounts for 79.12% of the total effect. Under climatic change and human activities, the groundwater table is increasing, and the ecological environment is worsening.

Key words: climatic change; human activities; groundwater; principal component regression

石羊河流域是我国典型的干旱内陆区,具有降水量小、蒸发量大、地表水与地下水转化频繁等特点。在干旱条件下,暖干气候与人类活动导致流域平原区地下水循环条件发生了明显变化,地下水位的波动将直接影响着该区脆弱的生态环境,其负面效应严重威胁着流域水资源的可持续利用和生态环境安全。

从石羊河流域地下水循环的角度,探讨气候变化和人类活动对地下水动态的影响。通过主成分回

归法,获取地下水动态变化的主要影响因子,定量分析各因子对地下水动态变化的影响。以便于深入认识自然-人工条件下地下水动态的演变规律,进而为协调区域人水关系,促进地下水资源合理开发利用和生态环境的良性循环提供科学的依据^[1]。

1 流域地下水循环

石羊河流域位于甘肃河西走廊东部,行政区划包括武威、金昌、张掖、白银4市的9个县(区),流域

* 收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(90202001)

作者简介: 张文化(1982-),女,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向水资源利用与管理。E-mail: shdguoguo@126.com

通信作者: 魏晓妹(1957-),女,甘肃甘谷人,教授,博士生导师,主要从事水资源利用与管理方向的教学及科研工作。

总面积 4.16 万 km², 人口 223 万。

整个流域地势南高北低, 自西南向东北倾斜。全流域大致可分为南部祁连山地、中部走廊平原区、北部低山丘陵区及荒漠区 4 大地貌单元。上游祁连山区海拔 1 900~ 5 294 m, 降水 300~ 600 mm, 为本流域的河流发源地和水源形成区。北山隆起, 将山前平原分为南、北盆地, 南盆地为武威盆地, 北盆地为民勤盆地。南、北盆地在第四纪以来堆积了巨厚的冲积洪积层, 形成了良好的地下汇集和储存条件, 地下水比较丰富。山前河流出山后, 通过河道、渠系和田间渗漏转化为地下水, 地下水又在冲积扇扇缘以泉水形式出露, 聚集成河, 在武威盆地北缘的寨子沟附近, 先后汇合成石羊河, 为石羊河中游。石羊河中游乃回归地下水补给之泉水河^[4]。石羊河北流穿过红崖山山口, 进入红崖山水库。水库水经渠道引入民勤盆地, 纵贯民勤绿洲腹地, 成为下游的灌溉水源。部分灌溉用水通过渠系、田间再渗入地下, 然后在河流尾间溢出和蒸发。

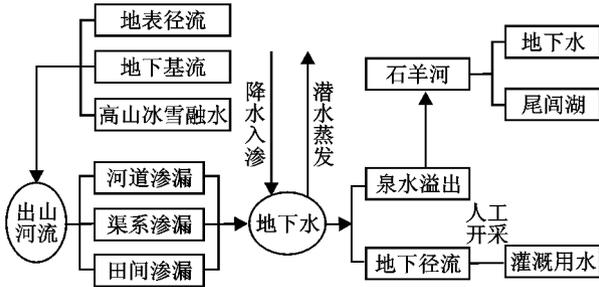


图 1 石羊河流域地下水循环示意图

石羊河流域地下水系统是一个开放性自然-人工复合系统, 系统与外界环境进行着频繁的物质和能量交换^[8]。从图 1 可以看出, 石羊河流域平原区地下水的补给主要有降水入渗补给、河道及渠系渗漏补给以及田间灌溉入渗补给等; 排泄主要有潜水蒸发、泉水溢出及人工开采。这些地下水循环要素受气候因素(气温、降水和蒸发)与人类活动(渠灌引水、地下水开采等)影响, 但其间的关系服从水量均衡原理, 其均衡状态最终体现为地下水动态的变化。因此, 可以说气候因素和人类活动通过地下水循环进而影响地下水动态。

2 地下水动态的影响因素及其响应

2.1 影响地下水动态的气候因素

利用石羊河流域平原区武威站、民勤站 1956-2000 年的气温、降水及蒸发资料, 分析这些要素的变化趋势, 并探讨地下水动态对气候变化的响应。

2.1.1 气温的变化 气温在引起蒸发的同时还能引起地下水水温的波动, 并导致化学成分、矿化度的

变化和水的物理性质变化。受全球气候变暖的影响, 石羊河流域平原区多年来气温呈升高趋势(图 2), 其中武威盆地的年平均气温为 7.84 e, 民勤盆地的年平均气温为 8.2 e, 年际变化表现为持续上升趋势。从 20 世纪 80 年代后期气温升高显著, 90 年代比 60 年代平均气温升高 0.6 e, 气候有增暖趋势。气温升高使蒸发量增大, 相应也会增加地下水的排泄量。

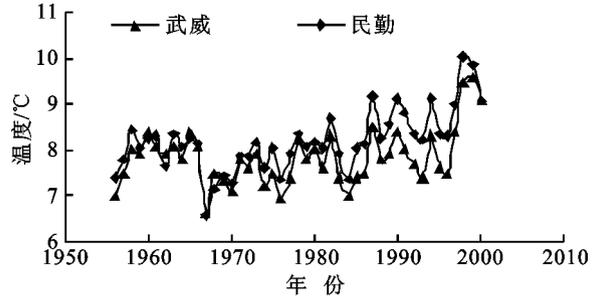


图 2 石羊河流域多年平均气温变化

2.1.2 降水量的变化 降水是流域水循环的基本要素, 也是水资源(地表径流和地下径流)的主要补给来源。石羊河流域地处西北内陆干旱区, 降水量少。流域多年平均降水量为 247.32 mm, 仅为全国平均水平的 38%。其中, 降水量上游最多为 408.9 mm; 中游次之, 为 254.5 ~ 353.7 mm; 下游民勤只有 111.6 mm, 是流域降水量最少的地区。流域降雨量小, 对地下水的入渗补给小(石羊河流域地下水的补给仅有 0~ 15% 来自于降水凝结水等天然补给)。从降水的多年演变情况来看(图 3), 总的趋势是自 20 世纪 60 年代以来降水量没有明显减少趋势, 反而略有增加, 但丰枯交替出现, 根据 10 a 平均值, 60 年代最少, 70 年代降水开始增多, 到 90 年代持续增多, 已比 50 年代平均多出 7.46 mm。

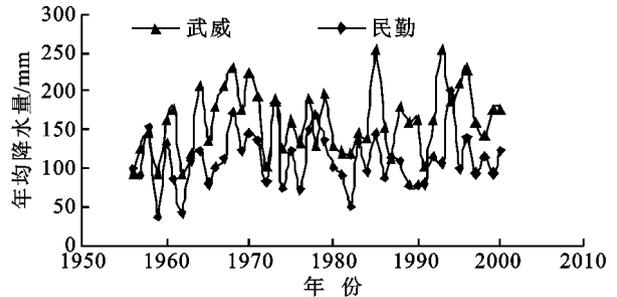


图 3 石羊河流域多年平均降水量变化

2.1.3 蒸发量的变化 石羊河流域各地蒸发量相差很大(图 4), 北部沿沙漠区民勤县蒸发最为强烈, 年均蒸发量为 2 642.45 mm, 中部凉州区次之为 1 919.0 mm, 南部天祝、古浪最小为 1 547.0 mm 和 1 791.8 mm。蒸发量大, 降雨在还未来得及入渗补给地下水时便转化为无效蒸发, 这对地下水的补给无疑是雪上加霜。60 年代中期到 80 年代年均蒸发

量低于或接近多年平均蒸发量, 从 80 年代中期至今随着气温的上升蒸发量也有上升的趋势。

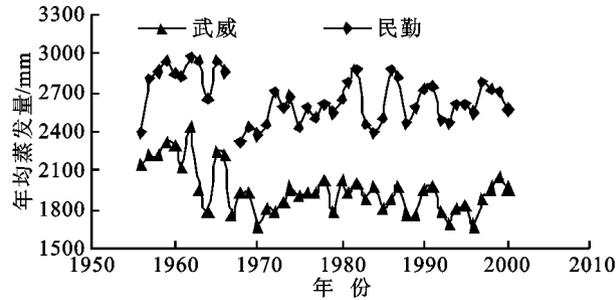


图 4 石羊河流域多年蒸发量变化

2.2 影响地下水动态的人为因素

流域内近 50 年来人口年增长率为 17.5‰, 人口分布主要集中在中下游绿洲平原区。绿洲承载人口已达 300 人/ km² 以上, 随着人口的增加, 民勤绿洲的保证灌溉面积已由 1960 年的 1.47 万 hm² 增加到了 2000 年的 4.17 万 hm², 目前维持在 4 万 hm² 左右, 与此不同的是, 由于红崖山水库入库流量的逐年减少, 出库水量从 1980 年的 2.02 亿 m³ 减少到 2000 年的 0.86 亿 m³。由此直接导致了地下水开采的增加; 地下水机井已从 1980 年的 3 000 眼增加到了 2000 年的 9 160 眼, 相应的地下水开采量从 3.73 亿 m³ 增加到了 4.57 亿 m³。据估计, 2000 年超采地下水约 3.57 亿 m³, 直接导致了地下水位的下降。石羊河流域渠道的衬砌率也由 50 年代的 30% 提高到目前的 70%~80% 以上, 河渠的入渗补给量明显减少。人类通过改变流域的下垫面条件, 一方面改变了降水及地表水对地下水的入渗补给路径, 从而使得地下水入渗补给不断减少。另一方面, 灌溉面积的扩大, 地下水开采量的增加使地下水排泄量增加, 导致地下水补排失调。

2.3 地下水水位动态的响应

从以上分析表明, 近几十年来石羊河流域平原区地下水循环条件发生了巨大变化, 气候变化和人为因素对地下水动态产生着强烈的影响。根据调查资料, 近 20 a 来平原区地下水位呈大幅度下降趋势(图 5), 其中武威盆地地下水位平均下降 6~7 m, 下降速度 0.31 m/a; 民勤盆地地下水位平均下降 10~12 m, 下降速度 0.57 m/a, 最大下降幅度 15~16 m。地下水位的下降, 引发了土壤盐渍化, 土地沙化等生态环境问题。

3 气候与人为因素影响力定量分析

石羊河流域地下水位的变化受多种因素的影响, 采用一般的单因素分析很难对其动态变化进行全面系统的分析。因此, 本文采用多变量分析的方法。

在多变量分析中, 回归分析是最为普遍的一种, 但常用的最小二乘法估计参数有时会因为自变量间存在相关关系, 使分析结果很不理想^[7]。为了消除这种影响, 这里采用主成分回归分析法进行拟合。

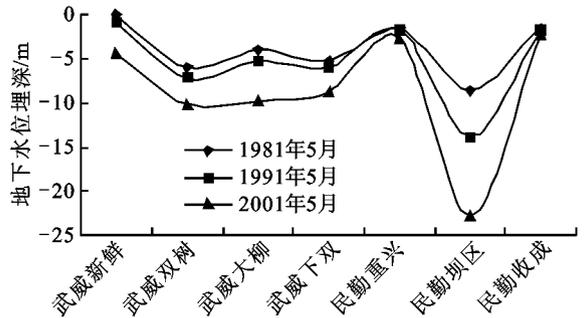


图 5 武威-民勤地下水位动态变化

3.1 主成分回归分析法的原理

(1) 计算相关系数矩阵。将原始数据标准化后, 计算 k 个自变量的协方差矩阵即相关系数矩阵 V 。

(2) 计算特征值及特征向量。根据特征方程 $|V - K| = 0$ 求出 V 的全部特征值, 并使其从大到小排列 $K_1 \geq K_2 \geq \dots \geq K_k$, 同时得对应的特征向量 a_1, a_2, \dots, a_k , 他们彼此相互无关, 是标准正交的。

(3) 计算主成分及贡献率。以特征值对应的特征向量构造主成分。主成分 Z_i 是该特征值对应的特征向量与原指标的线性组合即 $Z_i = a_{1i}x_1 + a_{2i}x_2 + \dots + a_{ki}x_k$, 以特征值最大者为第一主成分, 以此类推, 分别构造其他主成分因子。数据信息主要反映在数据变量的方差上, 方差越大, 数据中所含的信息就越多, 所以用贡献率 $e_i = K_i / 2K$ 来反映 Z_i 所含原指标信息的多少。累计贡献率 $E_m = 2e_i$ 反映的是前 m 个主成分总的贡献率, E_m 越大, 表明综合信息的能力越强, 如果前 p 个主成分的累计贡献率达到一定的比例(通常为 $> 80\%$), 表明取前 p 个主成分就基本包含了全部原指标所具有的信息, 便于对实际问题的分析和研究。

(4) 解释主成分。确定出前 p 个主成分后, 要根据特征向量及专业知识对其进行合理的解释。

(5) 进行回归分析。以各主成分作为新的自变量对因变量 y 作回归分析, 并假设检验。

3.2 应用实例及结果分析

本文以石羊河流域民勤盆地为例, 选取 1991-2000 年的年平均气温(x_1)、降水量(x_2)和蒸发量(x_3), 以及红崖山水库的入库径流量(x_4)、有效灌溉面积(x_5)、地下水开采量(x_6)和渠系衬砌率(x_7)作为影响因子, 将地下水位埋深(y)作为地下水位对气候变化和人类活动响应的定量指标, 研究地下水位动态变化的主要影响因素。将原始数据作标准化

处理,进行相关分析,得其相关系数矩阵(表 1)。各指标间存在较高的相关性,尤其是气温、地下水开采

量和红崖山入库径流量之间的相关系数都很高,这也从侧面说明他们之间存在多重共线性。

表 1 各指标的相关系数矩阵

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
X ₁	1	0.018	0.653	-0.635	-0.232	0.727	0.318
X ₂	0.018	1	-0.351	0.174	0.152	-0.142	-0.105
X ₃	0.635	-0.351	1	-0.464	0.065	0.415	-0.022
X ₄	-0.635	0.174	-0.464	1	0.414	-0.677	-0.498
X ₅	-0.232	0.152	0.065	0.414	1	-0.493	-0.875
X ₆	0.727	-0.142	0.415	-0.677	-0.493	1	0.678
X ₇	0.318	-0.105	-0.022	-0.498	-0.875	0.678	1

表 2 相关系数矩阵特征值及贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	主要特征值	方差提取率/%	累计方差提取率/%
1	3.464	49.486	49.486	3.464	49.486	49.486
2	1.601	22.877	72.363	1.601	22.877	72.363
3	1.052	15.028	87.391	1.052	15.028	87.391
4	0.368	5.255	92.646			
5	0.285	4.065	96.711			
6	0.159	2.276	98.987			
7	0.071	1.013	100.00			

从表 2 可以看出,矩阵特征值中最大值为 3.46,其贡献率为 49.49%,最小值为 0.07,其贡献率为 1.01%。前 3 个主成分的累计贡献率已达到 87.39%,即可提取原指标 87.39%的信息,所以只

用这 3 个主成分已足以代替原指标。由于用前 3 个主成分已足以代替原指标,所以这里只给出前 3 个特征值所对应的特征向量,也即主成分线性表示中的系数(表 3),线性方程如下:

Z₁= 0.778x₁- 0.253x₂+ 0.526x₃- 0.830x₄- 0.664x₅+ 0.902x₆+ 0.758x₇ (1)

Z₂= 0.407x₁- 0.205x₂+ 0.765x₃- 0.138x₄+ 0.652x₅+ 0.007x₆- 0.604x₇ (2)

Z₃= 0.352x₁+ 0.932x₂- 0.119x₃- 0.061x₄+ 0.154x₅+ 0.126x₆- 0.049x₇ (3)

表 3 特征值对应的特征向量

主成分	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
1	0.778	-0.253	0.526	-0.830	-0.664	0.902	0.758
2	0.407	-0.205	0.765	-0.138	0.652	0.007	-0.604
3	0.352	0.932	-0.119	-0.061	0.154	0.126	-0.049

从主成分的线性表示来看,构成 Z₁ 当中红崖山入库径流量、地下水开采量的系数最大,对 Z₁ 的变化起主导作用,因此,可将第一主成分 Z₁ 解释为人为因子;构成 Z₂ 当中蒸发量的系数最大,对 Z₂ 的变化起主导作用,可将第二主成分 Z₂ 解释为蒸发因子;构成 Z₃ 当中降水量的系数最大,对 Z₃ 的变化起主导作用,将第三主成分 Z₃ 解释为降水因子。这样,新构造的人为因子、蒸发因子和降水因子彼此之间相互独立,不存在共线性,而且代表了原指标绝大部分的信息,可进行进一步的多元线性回归分析。根据多元线性回归基本原理,以人为因子 Z₁、蒸发因子 Z₂ 和降水因子 Z₃ 为自变量,以入地下水位埋

深 y 为因变量,进行多元线性回归,利用最小二乘法估算参数,得回归方程为:

y= 0.138+ 1.103Z₁+ 0.174Z₂- 0.117Z₃ (4)

经计算其相关系数 R 为 0.779,决定系数 R² 为 0.61, F 检验值为 29.98,显著性概率 P= 0.03< 0.05,说明回归效果较好,回归方程有显著意义。从各因子对民勤盆地地下水位埋深变化的相对影响力百分比来看,红崖山入库径流量与地下水开采量对地下水位埋深的影响最大,人为因子将占总影响力的 79.12%,蒸发因子占总影响力的 12.48%,降水因子占总影响力的- 8.39%。正、负号表示对地下水位埋深的正、负作用。由此可见,近年来人为因子

在地下水动态变化过程中起主导作用, 主要表现为随着渠系衬砌率的提高, 改变了地表水与地下水的转化途径; 渠灌引水量增加, 使红崖山水库入库径流量减少, 这都导致了地下水补给的锐减; 地下水开采量的急剧增加对地下水资源也产生了严重的破坏作用, 蒸发因子虽其影响力不是很大, 但却使地下水资源减少的趋势进一步加剧。

4 结论

(1) 石羊河流域特殊的地理环境条件, 构成了平原区独具特色的地下水系统和补排条件, 气候因素和人类活动通过地下水循环影响地下水动态, 而地下水动态的变化又影响着该区的生态环境。通过对石羊河流域 1956-2000 年的气温、降雨和蒸发资料进行趋势分析, 得出气温变化趋势同全球气候变暖的趋势一致; 降水量稍有增加, 但绝对幅度变化不大; 蒸发量有上升的趋势, 引起地下水补给条件弱化, 整体干旱程度增加。而近 20 多年来, 人类活动(灌溉面积扩大、引地表水灌溉、开采地下水)加强了对地下水循环的影响, 使地下水补给量减少, 排泄量增加, 气候因素和人为因素共同作用, 使平原区地下水位大幅度下降。

(2) 用主成分回归分析方法对民勤盆地地下水埋深与各影响因素的关系分析, 得到 3 个主成分, 其方差贡献率分别为 49.49%, 22.88%, 15.03%, 累计贡献率已达到 87.39%。这表明近年来人为因子在地下水动态变化过程中起主导作用, 其影响力占总影响力的 79.12%, 大大超过了降水因子 8.39% 的负作用, 而蒸发因子虽其影响力不是很大, 只占总

影响力的 12.48%, 但却使地下水减少的趋势进一步加剧。

参考文献:

- [1] 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): 1623.
- [2] 任建民, 忤彦卿, 贡力. 人类活动对内陆河石羊河流域水资源转化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 7211.
- [3] 刘俊民. 水文与水资源学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [4] 中国科学院兰州沙漠研究所石羊河流域综合考察队. 石羊河流域水、土资源及其合理利用[C]// 中国科学院兰州沙漠研究所集刊, 第 3 号. 北京: 科学出版社, 1986.
- [5] 李相虎, 赵鑫, 任立良. 石羊河流域近 50 a 来水资源变化的定量分析[J]. 河海大学学报, 2007, 35(2): 162167.
- [6] 粟晓玲, 陈勇, 佟玲. 石羊河流域水资源利用格局变化的水文与环境效应及合理配置[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3): 529.
- [7] 王学仁, 王松桂. 实用多元统计分析[M]. 上海: 科学技术出版社, 1990: 1952288.
- [8] 孙艳伟. 石羊河流域地下水系统脆弱性研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2007.
- [9] 魏晓妹, 康绍忠, 马岚, 等. 石羊河流域绿洲农业发展对水资源转化的影响及其生态环境效应[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(4): 28232.
- [10] 李金标, 王刚, 李相虎. 石羊河流域近 50 a 来气候变化与人类活动对水资源的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 7280.