

# 石羊河流域近 50 a 来水资源变化的定量分析

李相虎<sup>1,2</sup>, 赵 鑫<sup>1</sup>, 任立良<sup>2</sup>

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要** 利用主成分回归分析法, 选取石羊河流域的 5 个影响因素进行定量分析, 得到 3 个主成分, 其累计方差贡献率达 92.786%。根据 3 个主成分各自对应的特征向量特点, 分别解释为人为因子、温度因子和降水因子并进行回归分析。根据回归方程, 近 50 a 来人为因子在水资源变化过程中起主导负作用, 其影响力占总影响力的 -58.48%, 大大超过了降水因子 22.35% 的正作用; 而温度因子虽其影响力不是很大, 只占总影响力的 -19.17%, 却加剧了水资源进一步减少的趋势。

**关键词** 主成分回归; 气候变化; 石羊河流域

**中图分类号** TV211.1

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-1980(2007)02-0164-04

中国西北干旱区内陆河流域, 从更新世开始, 由于青藏高原的持续隆升形成并逐渐演化为大陆性内陆气候, 具有降水量少、降水变率大、降水量年内分配不均、蒸发量大和干旱时段明显等特点。近几十年以来, 在强烈的人类活动与长期自然演变的基础上, 区域自然水循环系统的平衡状态遭到严重破坏。随着人口数量的持续增加和工农业生产规模的不断扩大, 以水资源开发利用为中心的人类经济-工程活动所导致的水资源重新分配过程较一般地区(半干旱、半湿润区)更为强烈<sup>[1]</sup>, 不仅改变了河流水系的水量时空分布, 而且强烈地影响了水质状况。如何正确认识西北干旱区水资源演变规律, 在经济社会得到发展的同时保护和改善环境, 已成当今社会关注的焦点。

目前, 干旱区水资源的研究越来越受到水资源工作者的关注。常兆丰等<sup>[2]</sup>研究了石羊河下游沙漠化的自然因素和人为因素, 认为特殊的地形构造和水资源的减少是石羊河流域生态环境退化和沙漠化的主导因子。王乃昂等<sup>[3]</sup>研究了近 2000 a 河西走廊及毗邻地区沙漠化过程的气候与人文背景, 认为在清代以前河西走廊沙漠化过程的发展深受气候之干湿状况影响, 人类活动对沙漠化的影响基本处于从属地位; 自清代中期以后至今, 人口激增超过“临界指标”, 导致沙漠化发展演变为以人工干预为主的阶段。虽然诸多学者已对干旱区水资源状况进行了大量的研究工作, 但大多只限于定性方面, 对水资源演变过程中气候变化与人类活动作用的大小及其相互关系仍然缺乏定量分析。因此, 本文采用主成分回归分析法, 在前人研究的基础上, 进一步定量研究干旱区气候变化背景下的水资源演变规律, 并揭示气候变化和人类活动对水文水资源的影响。

## 1 研究区概况

石羊河流域是甘肃省三大内陆河流域之一, 位于河西走廊东部, 乌稍岭以西, 祁连山北麓, 地理位置介于 101°41' ~ 104°16'E 与 36°29' ~ 39°27'N 之间, 总面积 4.16 万 km<sup>2</sup>。流域行政区划共涉及 3 市 8 县, 总人口 220 万人, 人口密度 54 人/km<sup>2</sup>。石羊河流域年降水量少, 多年平均地表水资源量为 15.61 亿 m<sup>3</sup>, 与地表水不重复的净地下水资源量 1.0 亿 m<sup>3</sup>, 加上景电二期延伸向民勤调水 0.61 亿 m<sup>3</sup> 和“引疏济金”调水 0.4 亿 m<sup>3</sup>, 流域内现状可利用水资源量为 17.61 亿 m<sup>3</sup>, 人均 788 m<sup>3</sup>, 约为甘肃省水平的 1/2 和全国水平的 1/3。耕地占有水资源量 3900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 约为甘肃省水平的 40% 和全国水平的 13%。

石羊河流域出山径流年际变化较大(见图 1), 20 世纪 50 年代, 平均出山径流总量为 17.5 亿 m<sup>3</sup>, 90 年代

收稿日期 2006-06-06

基金项目 国家自然科学基金资助项目(40302031); 香港乐施会基金资助项目(CHG-0702-04E); 国家重点基础研究“973”资助项目(2006CB400502)

作者简介 李相虎(1980—), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 主要从事水文模型及干旱区水资源研究。

为 13.7 亿  $\text{m}^3$  ,比 50 年代减少约 3.8 亿  $\text{m}^3$  ,虽然其间某些年份有所增加 ,但总体呈减少趋势 .与此同时 ,随着出山径流的减少以及中、上游地区工农业生产的快速发展 ,使石羊河进入下游民勤盆地的水量不断减少 .如图 2 所示 ,流入民勤的地表水从 20 世纪 50 年代的 5.0 亿  $\text{m}^3$  减少到目前的 0.5 亿  $\text{m}^3$  ,通往昌宁灌区的金川河已基本断流 ,昌宁灌区已无地表水可利用 .

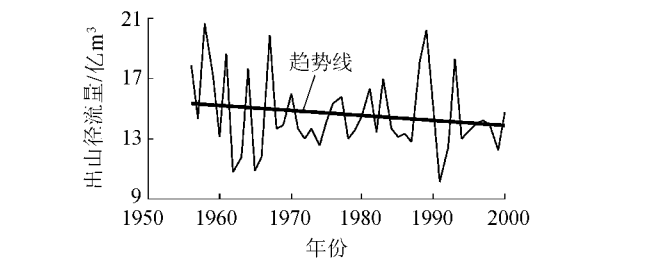


图 1 石羊河逐年出山径流总量

Fig.1 Total annual runoff of Shiyang River from mountain

石羊河流域灌溉农业发达 ,多年来为支持全省经济发展发挥了重要的作用 .但是其灌溉和种植的优势是建立在对自然资源、特别是对地下水的过度开采的基础上的 ,导致了地下水位持续下降 .据统计 ,民勤盆地地下水位平均下降 0.5 m/a ,盆地中部地区下降 0.5 ~ 1.0 m/a ,地下水位已由 20 世纪 70 年代的 1 ~ 9 m ,下降到现在的 12 ~ 28 m<sup>[4-6]</sup> (如图 3) .现已在民勤县城附近和红柳园一带已形成 2 个巨大降落漏斗 .

2 气候与人为因素影响定量分析

在多元分析中 ,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<sup>[7]</sup> .为了消除这种影响 ,本文采用主成分回归分析法进行拟合 ,其基本思路是将原来的指标体系重新组合成一组新的、相互无关的综合指标 ,从中选取较少的几个称之为主成分的综合指标 ,并尽可能多地反映原来指标体系的信息 ,以主成分代替原变量进行回归分析<sup>[8]</sup> .该方法目前已广泛应用于多种领域 .

2.1 自变量选择

引起水资源变化的因素众多 ,其中一些因素如人口、牲畜、工农业生产总值等在近 50 a 内呈大幅增长趋势 ;另一些如耕地面积、灌溉面积等则基本保持平稳状态 ,还有一些如降水、温度、蒸发等则呈锯齿状波动 .本文结合他人研究成果及收集的资料 ,选择红崖山水库年入库水量作为因变量 ,流域总人口、牲畜、社会生产总值、武威气象站年降水量和平均温度作为自变量 .

2.2 相关系数矩阵

将每 2 个自变量近 50 a 来的变化系列进行相关分析 ,求得相关系数矩阵  $V$  (见表 1) .从表 1 可以看出 ,一些自变量间的相关系数值很高 ,尤其是人口、牲畜数和生产总值之间的相关系数都在 0.75 以上 ,说明他们之间存在较强的相关关系 .

2.3 特征值及方差提取率

计算相关系数矩阵  $V$  的特征值及贡献率见表 2 .从表 2 可以看出 ,矩阵特征值分别为 2.771 , 1.041 0.827 0.289 和 0.072 ,其中最大值为 2.771 ,其贡献率为 55.417% ,而到第 3 个特征值时的累计贡献率已达到 92.786% ,即前 3 个特征值可累计提取原指标 92.786% 的信息 .因此 ,本文选用前 3 个主成分来代替

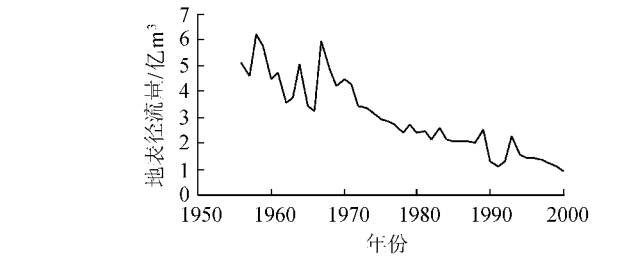


图 2 进入民勤盆地地表径流量

Fig.2 Surface runoff to Minqin Basin

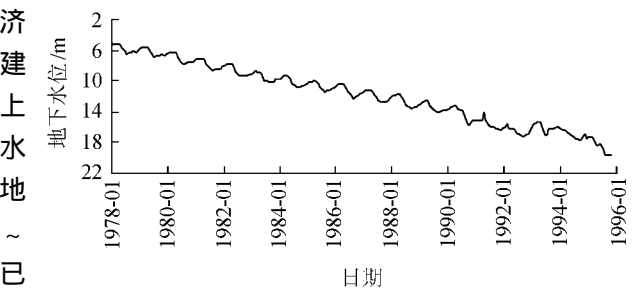


图 3 民勤盆地 94 号井地下水位变化监测过程

Fig.3 Groundwater table at well No.94 in Minqin Basin

表 1 各自变量的相关系数矩阵					
Table 1 Correlation coefficient matrix for each independent variable					
相关系数	人口	牲畜数	生产总值	降水	温度
人口	1.000	0.918	0.758	0.237	-0.107
牲畜数	0.918	1.000	0.752	0.322	-0.022
生产总值	0.758	0.752	1.000	0.313	0.004
降水	0.237	0.322	0.313	1.000	-0.115
温度	-0.107	-0.022	0.004	-0.115	1.000

原指标.

前3个主成分对每个自变量信息的提取率分析结果如表3所示.除了对生产总值的提取率不高以外,其余指标的提取率都很高,尤其是降水和温度两指标高达0.998.由此可见,确定3个主成分不仅整体信息提取率很高,而且对每个自变量的信息损失也是可接受的.

表2 相关系数矩阵特征值及贡献率

Table 2 Eigenvalue and contribution rate of correlation coefficient matrix

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	方差提取率/%	累计方差提取率/%
1	2.771	55.417	55.417	55.417	55.417
2	1.041	20.823	76.240	20.823	76.240
3	0.827	16.546	92.786	16.546	92.786
4	0.289	5.773	98.559		
5	0.072	1.441	100.000		

2.4 解释主成分

解释主成分主要是根据主成分负载值(表3),具有较高负载值的自变量对主成分的意义影响也较大.从表3可以看出,人口、牲畜数和生产总值对第1主成分的负载值分别为0.936,0.945和0.884,较降水和温度大,因此其三者的影响也大;而温度对第2主成分的负载值为0.921,较其他为最大,因此其影响也最大;降水对第3主成分的负载值为0.79,较其他为最大,因此其影响也较其他为最大(图4).因此,可将3个主成分依次解释为人为因子、温度因子和降水因子.这样,新构造的人为因子、温度因子和降水因子彼此之间不存在共线性,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.

2.5 确定主成分回归系数及方程检验

根据多元线性回归基本原理,以人为因子 $Z_1$ 、温度因子 $Z_2$ 和降水因子 $Z_3$ 为新的自变量,以进入红崖山水库水量 $y$ 为因变量,进行多元线形回归分析,结果见表4、表5.其中标准回归系数是为了消除不同指标不同计量单位带来的影响而进行的标准化处理.对回归方程进行检验,其相关系数 $R$ 为0.865, $F$ 检验值为35.622,显著性水平 $\alpha$ 值小于0.05,说明回归效果较好,回归方程有显著意义.对各系数进行 $t$ 检验,各系数显著性水平 $\alpha$ 值都小于0.05,说明各因子对因变量 $y$ 的影响作用都很显著(表4).因此,建立的方程可以反映近50a来石羊河水资源量与其影响因素的拟合关系.

2.6 结果分析

根据多元线性回归理论可知:当保持温度因子、降水因子不变,人为因子每增大1个单位将使 $y$ 减少0.772个单位;而保持人为因子、降水因子不变,温度因子每增大1个单位将使 $y$ 减少0.253个单位;当保持人为因子、温度因子不变时,降水因子每增大1个单位将使 $y$ 增大0.295个单位.若从各因子对红崖山水库水量变化的相对影响力百分比来看,人为因子将占总影响力的-58.48%,温度因子将占总影响力的-19.17%,降水因子将占总影响力的22.35%,正、负号表示对水资源变化的正、负作用.由此可见,近50a来人为因子在水资源变化过程中起主导负作用,主要表现为人口、牲畜、工农业生产的急剧增加对水资源产生的破坏作用,大大超过了降水因子的正作用,而温度因子虽其影响力不是很大,却使水资源减少的趋势进一步加剧.

表3 主成分负载值及方差提取率

Table 3 Load value and variance extraction rate of principal components

自变量	主成分负载值			方差提取率/%
	1	2	3	
人口	0.936	0.062	-0.227	93.2
牲畜	0.945	0.107	-0.095	91.4
生产总值	0.884	0.129	-0.028	79.8
降水	0.460	-0.402	0.790	99.8
温度	-0.096	0.921	0.375	99.8

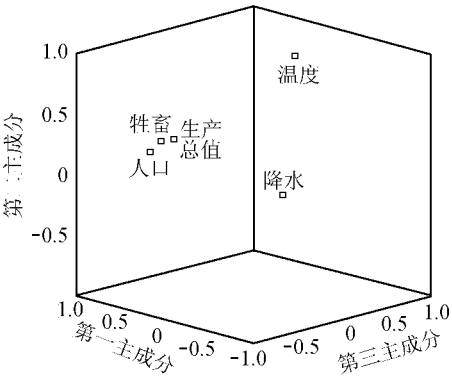


图4 主成分负载值

Fig.4 Loading plot of principal components

表4 系数分析

Table 4 Coefficient analysis

变量	回归系数	标准回归系数	$t$ 值	$\alpha$ 值
常数	3.217	0	28.550	0.000
人为因子 $Z_1$	-1.054	-0.772	-9.232	0.000
温度因子 $Z_2$	-0.346	-0.253	-3.029	0.005
降水因子 $Z_3$	0.403	0.295	3.529	0.001

表5 方差分析

Table 5 Variance analysis

来源	平方和	自由度	方差	$F$ 值	$\alpha$ 值
回归	$U = 54.286$	3	18.095	35.622	0.000
残差	$Q = 18.287$	36	0.508		
总和	$S_{yy} = 72.573$	39			

3 结 语

本文利用主成分回归法对石羊河流域近 50 a 来人类社会活动及气候变化对水资源产生的影响力大小进行了定量分析,结果表明:近 50 a 来人为因子在水资源变化过程中起主导负作用,其影响力占总影响力的 - 58.48%,大大超过了降水因子 22.35% 的正作用;而温度因子虽其影响力不是很大,只占总影响力的 - 19.17%,但却使水资源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):16-23.

[2] 常兆丰,韩福贵,仲生年,等.石羊河下游沙漠化的自然因素和人为因素及其位权[J].干旱区地理,2005,28(2):150-155.

[3] 王乃昂,赵强,胡刚.近 2000 a 河西走廊及毗邻地区沙漠化过程的气候与人文背景[J].中国沙漠,2003,23(1):95-100.

[4] 马金珠,朱中华,于保静.石羊河流域水环境演化与水资源可持续利用[M].兰州:兰州大学出版社,2005.

[5] 马金珠,王刚,李丁,等.民勤盆地沙漠化贫困化与水资源开发利用[J].自然资源学报,2006,21(4):1-8.

[6] MA J Z, WANG X S, EDMUNDS W M. The characteristics of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the arid northwest China-a case study of the Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Environment, 2005, 61: 277-295.

[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,1990:195-288.

[8] 王松桂.主成分的最优性及广义主成分估计[J].应用概率统计,1985,1(1):23-30.

Quantitative analysis of water resources variation  
for Shiyang River Basin for recent 50 years

LI Xiang-hu<sup>1, 2</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, REN Li-liang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of West China Environment System Under the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;  
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** Shiyang River Basin is a typical fragile zone of water resources in arid regions. Long-term natural evolution and human activities have seriously destroyed the balance of the water cyclic system of this region. By use of the principal component regression analysis, 5 influencing factors were quantitatively analyzed, and 3 principal components with the accumulative variance contribution rate 92.786% were obtained. According to the corresponding eigenvectors, the 3 principal components were explained as the anthropogenic factor, the temperature factor, and the precipitation factor. The regression analysis shows that the anthropogenic factor plays a leading negative role in water resources variation in recent 50 years, and its effect accounts for - 58.48% of the total effect, which is much greater than the positive effect of the precipitation factor with the effect accounting for 22.35%. It is also demonstrated that, although the effect of the temperature factor only accounts for - 19.17%, it accelerates the decrease of water resources.

**Key words** principal component regression; climate variation; Shiyang River Basin