

DOI: 10.5846/stxb201307311997

周俊菊, 雷莉, 石培基, 王兰英, 魏伟, 刘海猛. 石羊河流域河川径流对气候与土地利用变化的响应. 生态学报, 2015, 35(11): 3788-3796.

Zhou J J, Lei L, Shi P J, Wang L Y, Wei W, Liu H M. Response of runoff to the climate and land use pattern changes in Shiyang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3788-3796.

## 石羊河流域河川径流对气候与土地利用变化的响应

周俊菊<sup>1</sup>, 雷莉<sup>2</sup>, 石培基<sup>1,\*</sup>, 王兰英<sup>3</sup>, 魏伟<sup>1</sup>, 刘海猛<sup>1</sup>

1 西北师范大学, 地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省水利厅石羊河流域管理局, 武威 733000

3 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038

**摘要:**应用流域气象和水文过程长期观测数据及四期 TM 影像数据, 在建立基于气候及土地利用两种因素变化的径流过程模拟模型的基础上, 分析河川径流对气候与土地利用变化的响应特征, 并对其未来可能的变化趋势做出预测。结果表明, (1) 1956—2009 年, 到达石羊河流域下游标志站蔡旗断面的河川径流量, 由 20 世纪 50 年代的年平均  $5.392 \times 10^8 \text{ m}^3$  减少到目前的年平均  $1.096 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 1968 年之前蔡旗断面径流量的波动主要是气候变化的结果, 而 1968 年之后, 蔡旗断面径流量的变化是气候与土地利用变化共同作用的结果; (2) 近 30 年来, 气候变化对下游河川径流变化的贡献率平均为 4.1%, 而土地利用变化, 尤其是耕地面积变化的贡献率平均为 88.8%; 中游灌溉定额平均分别减少 5%、10%、15% 和 20% 的情景下, 下游河川径流量模拟值分别为  $1.591 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.427 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $3.262 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $4.098 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右。

**关键词:**气候变化; 土地利用; 水文过程; 石羊河流域

## Response of runoff to the climate and land use pattern changes in Shiyang River Basin

ZHOU Junju<sup>1</sup>, LEI Li<sup>2</sup>, SHI Peiji<sup>1,\*</sup>, WANG Lanying<sup>3</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, LIU Haimeng<sup>1</sup>

1 Geography & Environment Science College, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Management Bureau of Shiyang River Basin, Gansu Provincial Water Resources Bureau, Wuwei 733000, China

3 The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China

**Abstract:** Shiyang River Basin is one of the inland rivers, which have the highest population density, the highest utilization level of water resources, the most prominent contradiction with water, and the most serious ecological environment problems. Under the background of climate change, the landscape patterns based on desert of Shiyang River Basin have taken place great changes, and thus affected the hydrological processes profoundly, including a decrease in runoff and an increase in conflicts between water demands and water supplies. In this case, the government had made policies on social and economic development, and also enforced a series of the ecological restoration project to slow ecological deterioration down, but the trend was not reversed. In order to achieve sustainable use of soil and water resources, it is very urgent for use to study on the relationship between the evolvement of water resources and the pattern of land use, and to evaluate the role of climate change and the contribution of land use change in the changes of water resources in distribution patterns respectively. In this paper, based on the long-term observed data of meteorological and hydrological process and four periods of TM image data of Shiyang River Basin, the runoff process simulation model was established, which only focused on the factors of climate and

**基金项目:**甘肃省自然科学基金(1107RJZA104); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-12-18); 国家自然科学基金项目(41261104); 国家社科基金青年项目(12CTJ001); 甘肃省青年科技基金计划项目(1107RJYA077)

收稿日期: 2013-07-31; 网络出版日期: 2014-06-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shipj@nwnu.edu.cn

land use change. And the the response characteristic of runoff to the climate and land use change were explored, and also the trend of runoff was predicted. The meteorological data from 1956 to 2009 of Wushaoling and Wuwei weather stations were all from China Meteorological Data Sharing Service System and the remote sensing information was from the Landsat/TM4 image data received by China's remote sensing satellite ground station, including the year of 1986, 2000, 2006 and 2010. The monthly and annual runoff data of upstream six rivers and Caiqi section in Shiyang River basin were partly from electronic material provided by Shiyang river basin administration, and partly from water resources bulletin of it. The results show: Firstly, the annual amount of river runoff arriving at Caiqi section were decreased to  $1.096 \times 10^8 \text{ m}^3$  at present from  $5.392 \times 10^8 \text{ m}^3$  of the 1950's during the period of 1956 to 2009, and before 1968, the runoff fluctuation of Caiqi section was mainly caused by climate change. However, after 1968 it was affected by the interaction of climate and land use change. Secondly, the average contribution rate of climate to the change of downstream river runoff was 4.1 percent, while the contribution rate of land use change, especially the cultivated land change, was up to 88.8 percent in recent 30 years. If the midstream irrigation water reduced by 5 percent, 10 percent, 15 percent and 20 percent respectively, the simulation value of downstream river runoff would be up to  $1.591 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $2.427 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,  $3.262 \times 10^8 \text{ m}^3$ , and  $4.098 \times 10^8 \text{ m}^3$ , respectively. This suggested that if water-saving facilities and water-saving technology, especially high and new irrigation technology were adopted, the governance goal of increasing the amount of water from  $2.600 \times 10^8 \text{ m}^3$  to  $2.900 \times 10^8 \text{ m}^3$  in Caiqi section in 2010 would be achieved early without the irrigated areas decrease. In a word, the fundamental way of ecological restoration lies in water saving in Shiyang River basin.

**Key Words:** climate change; land use pattern; hydrological processes; Shiyang River Basin

人类活动和气候变化影响下的水循环变化过程和水资源演变规律,一直是众多学者致力于解决流域经济、社会和环境可持续发展的基础科学问题之一<sup>[1]</sup>。在流域尺度上,气候及土地利用变化对水文过程影响的结果,就是直接导致水资源供需关系发生变化,从而对流域生态、环境以及经济发展等多方面具有显著影响<sup>[2]</sup>。目前,围绕内陆河流域出山径流对气候变化的响应、土地利用变化对河川径流及地下水的影响等展开了系列研究,研究表明,出山径流对气候变化响应敏感<sup>[3-7]</sup>,土地利用变化对不同区域绿洲系统的稳定性和水资源空间分配产生不同的影响<sup>[2,8-17]</sup>,不同时期人类活动对水资源的干扰方式是不同的,需要开展大量的典型区域的实例研究。而人类作为自然界的一部分,从环境变化中定量区分人类活动与自然过程作用力是十分困难的<sup>[18]</sup>。截至目前,综合考虑气候和土地利用变化耦合作用下的水资源演变规律的研究较少<sup>[2,19-20]</sup>。为制定流域可持续的水土资源合理利用规划与政策,迫切需要研究气候变化背景下流域水资源演化与土地利用格局的关系,定量评价气候波动和土地利用变化在水资源格局演化过程中的作用强度及贡献率。

石羊河是我国内陆河流域中人口最密集、水土资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重的流域之一,在气候变化背景下,以荒漠为基质的土地利用格局变化剧烈,对流域水文过程产生深刻影响,出现了下游河川径流不断减少的变化趋势,并引发了一系列严重的生态环境问题。本文旨在分析石羊河流域河川径流量对气候与土地利用变化的响应特征,并对下游河川径流未来可能的变化趋势进行预测。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,地理位置  $101^{\circ}41' - 104^{\circ}16'E$ ,  $36^{\circ}29' - 39^{\circ}27'N$ ,流域总面积  $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。石羊河水系发源于祁连山区冷龙岭冰川,自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河和西大河 8 条河流组成。按照水文地质单元又可分为 3 个独立的子水系,即大靖河水系、六河水系及西大河水系。大靖河水系主要由大靖河组成,隶属大靖盆地,其河水量在本盆地内转化利用;六河水系上游主要由古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河组成,该六河隶属于武威南盆地,其

水量在该盆地内经利用转化,最终在南盆地边缘汇成石羊河,进入民勤盆地,石羊河水量在该盆地全部被消耗利用(图 1);西大河水系上游主要由西大河组成,隶属永昌盆地,其水量在该盆地内利用转化后,汇入金川峡水库,进入金川—昌宁盆地,在该盆地内全部被消耗利用。蔡旗水文站作为中下游的标志站,其断面径流量的大小变化直接反映中游地区人类活动的干扰强度。

蔡旗水文站设在民勤—凉州界的民勤一侧,为省级水文站,是石羊河进入民勤盆地的控制性地表水文站。因此,蔡旗水文站可作为监控进入民勤县境地表水的控制断面。

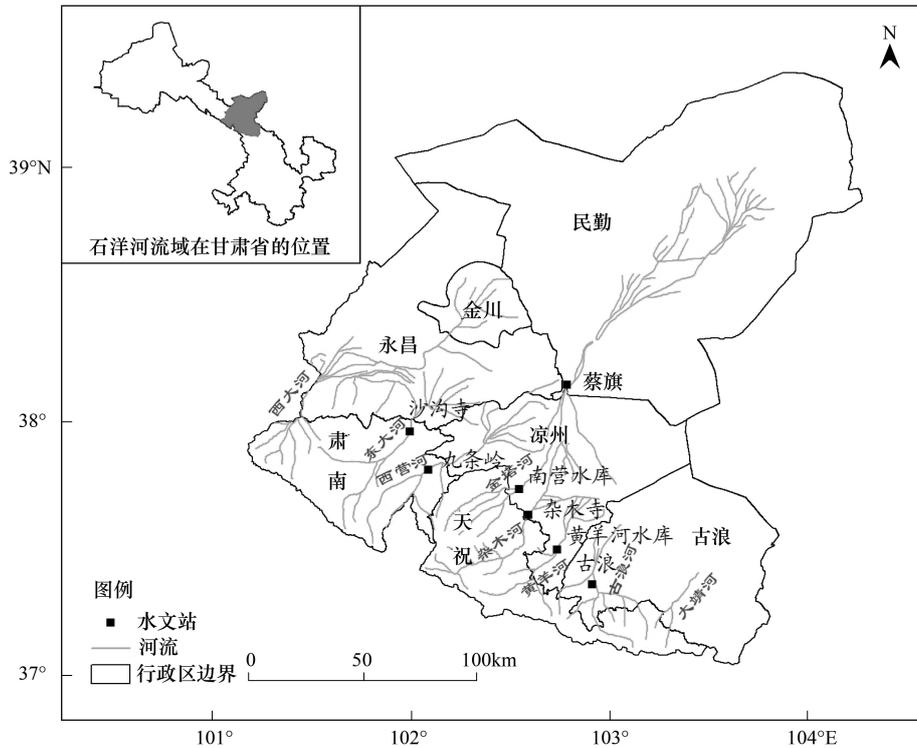


图 1 研究区  
Fig.1 Study area

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据

1956—2009 年乌鞘岭、武威气象站(表 1)的年均温和年降水量均来自于中国气象局国家气象信息中心;1956—2009 年潜在蒸发量利用 FAO Penman-Monteith 模型计算而来<sup>[21]</sup>,在计算日潜在蒸发量的基础上,加和求其年潜在蒸发量,所需日最高气温、日最低气温、日平均湿度、日降水量和日照时数均来自于中国气象局国家气象信息中心。

表 1 地面台站信息表

Table 1 The basic information of stations

台站号 Station number	站名 Station name	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔高度 Elevation/m
52679	武威	102°55'E	38°05'N	1525.0
52787	乌鞘岭	102°52'E	37°12'N	3045.1

1.2.2 遥感影像数据

本文采用的遥感信息来源于中国遥感卫星地面站接收的美国 Landsat/TM4 期影像数据(1986 年、2000 年、2006 年、2010 年)(部分数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心石羊河流域遥感数据集),分辨率为 30 m,轨道号为 131-33、131-34、132-33、132-34,数据采集时间为 6 月至 9 月,选择无云或少云影像,质量较

好,基本满足应用需求。根据研究区的地理特征和影像质量,结合本文的研究目的,采取以下一级分类系统:耕地、林地、草地、水域、建筑用地和未利用土地。用于图像处理软件为 EDARS IMAGINE9.1,地理信息系统软件为 ARCGIS9.2。本研究采用了人机交互解译分类的方法,并进行了分类后处理。解译过程及解译完成后通过野外实地调查对解译成果进行了验证和修改。

### 1.2.3 水资源数据

1956—2009 年石羊河流域六河水系上游六条河流古浪河(古浪)、黄羊河(黄羊河水库)、杂木河(杂木寺)、金塔河(南营水库)、西营河(九条岭)、东大河(沙沟寺)、蔡旗断面月、年径流量均来自石羊河流域管理局提供的电子资料和石羊河流域水资源公报(2004—2009 年)。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 河川径流对气候变化的响应模型

#### (1) 气候对河川径流量变化影响的区别

蔡旗水文站作为下游标志站,其断面径流量的大小变化直接反映中游地区人类活动的干扰强度。排除景电二期工程对石羊河的调水,对蔡旗断面径流量进行了还原计算。应用石羊河中上游乌鞘岭和武威气象站的降水资料及蔡旗断面年径流量数据绘制其变化趋势(图 2)。

从图中可以看出,1956—2009 年石羊河流域中上游年降水量在波动中变化不明显,其中,1968 年之前,年径流量与年降水量在波动中具有较好的同步变化关系,且该时期蔡旗断面的年径流量亦与上游出山径流量有很好的同步波动关系(图 3),而 1968 年之后,径流量与降水量快速分离,呈急剧下降趋势。结合已有研究<sup>[21]</sup> 1956—2009 年石羊河上游出山径流量对气候变化响应敏感,其变化主要是气候波动的结果,可以判断,1956—1968 年期间蔡旗断面径流量的波动主要是气候变化的结果,而 1968 年之后,蔡旗断面径流量的快速减少是气候变化与人类活动共同作用的结果。

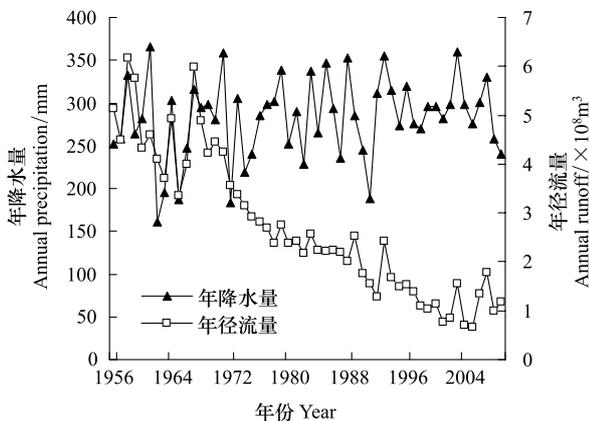


图 2 蔡旗断面年径流量及中上游年降水量变化关系曲线

Fig.2 The changes of annual precipitation of middle and upper reaches and runoff of Caiqi section

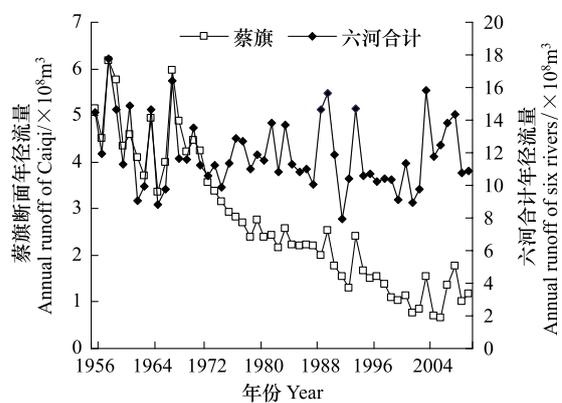


图 3 六河-蔡旗断面年径流量变化曲线图

Fig.3 The annual runoff changing trends of six rivers and Caiqi section

#### (2) 河川径流对气候变化的响应模型

水文水资源系统对气候变化的响应过程是十分复杂的,主要表现在径流与降水、气温及蒸发之间的各种非线性关系之中,通过建立模型近似模拟其变化过程是一种合理可行的途径<sup>[22-23]</sup>。考虑到水资源系统与气候变化的非线性关系,采用幂函数连乘的形式来描述流域河川径流量与降水量、气温及蒸发量之间的关系。

径流变化是降水、气温及蒸发各要素综合作用的结果,但各气象要素对径流的影响程度不同,应用 1956—1968 年降水量、气温及潜在蒸发量分别与蔡旗断面年径流量进行相关分析,年降水量、年均温与年径流量的相关系数分别为 0.659 和 -0.579,均通过 0.05 显著性水平的检验,而年蒸发量与年径流量的相关系数

为 0.031, 未能通过任何显著性水平的检验, 说明蔡旗断面来水量与中上游地区降水量、气温存在显著相关关系, 而与潜在蒸发量的相关关系不显著, 因此, 选取降水量和气温两个非常重要的气候要素, 建立年径流量对气候变化的响应模型:

$$\hat{Q}_1 = e^\alpha \cdot P^\beta \cdot T^\gamma \quad (1)$$

式中,  $\hat{Q}_1$  为年径流量模拟值,  $e$  为自然对数的底,  $P$  为年降水量,  $T$  为年均温,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  为待定幂指数。

利用该模型获得 1968 年以后假定无大规模土地利用变化的径流量  $\hat{Q}_1$ , 计算模拟径流量  $\hat{Q}_1$  与实际径流量  $Q$  之间气候校准残差。

$$R_1 = \hat{Q}_1 - Q \quad (2)$$

### 1.3.2 土地利用变化影响下的河川径流变化过程模型

#### (1) 六河水系中游行政区范围的确定

根据上中下游的划分, 结合石羊河上游各河出山径流控制站所在位置, 确定影响六河水系出山径流至下游标志站蔡旗水文站水量变化的主要乡镇包括: 凉州区所有乡镇、古浪县的古浪镇、泗水镇、图门镇、定宁镇和永丰乡及永昌县的朱王堡镇、东寨镇、水源镇、六坝镇、南坝镇。

#### (2) 土地利用面积时间序列的插补

通过上述遥感数据获得石羊河六河水系中游 1986 年、2000 年、2006 年和 2010 年四个时期的土地利用类型图。在六合水系中游地区, 耕地面积几乎占总面积的 50%, 由 1986 年的 2456.029 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 2724.291 km<sup>2</sup>, 是影响河川径流的主要因素。为了能够将土地利用变化数据与流域年径流量数据进行同步统计分析, 选择对径流过程影响较大的耕地, 分别利用分段线性查补技术, 得到 1986—2010 年连续 25a 的耕地变化数据系列。土地利用面积, 尤其是耕地面积的变化与人口数量的变化关系密切, 因此, 把人口数据作为耕地面积插补的参证变量。依据王根绪等<sup>[2]</sup>的插补方法, 结合石羊河流域的具体情况, 对查补模型进行了优化。利用总人口增长人数占阶段始末总人口增长的比值作为耕地面积年增长的权重, 其中, 1986—2010 年被分为 3 个阶段进行插值, 3 个阶段分别为 1986—2000 年, 2000—2006 年及 2006—2010 年。

$$LU_{it} = LU_{i,t-1} + \frac{P_{it} - P_{i,t-1}}{P_i'' - P_i'} (LU_{it} - LU_{i,t-1}) \quad (3)$$

式中,  $LU_{it}$  为第  $i$  阶段第  $t$  年耕地面积,  $LU_{i,t-1}$  为  $i$  阶段第  $t-1$  年耕地面积,  $LU_{i,t-1}$  和  $LU_{it}$  分别为第  $i$  阶段始末的耕地面积,  $P_{it}$  为第  $i$  阶段第  $t$  年总人口数,  $P_{i,t-1}$  为第  $i$  阶段第  $t-1$  年总人口,  $P_i'$  与  $P_i''$  分别为第  $i$  阶段始末年份的总人口。

#### (3) 土地利用变化影响下的河川径流变化过程模型

利用上述式(3)获得的耕地面积变化数据系列, 应用相关分析和回归分析等方法, 分析耕地变化与年径流量的统计关系, 建立假定无气候变化背景下随土地利用变化的河川径流变化过程模型, 并对 1986 年后的河川径流量进行模拟, 得到径流量模拟值  $\hat{Q}_2$ , 计算模拟径流量  $\hat{Q}_2$  与实际径流量  $Q$  之间耕地变化校准残差。

$$R_2 = \hat{Q}_2 - Q \quad (4)$$

### 1.3.3 河川径流对气候及土地利用变化的响应模型

下游河川径流的变化是中上游地区气候和土地利用变化共同作用的结果, 不同时期气候和土地利用变化对河川径流影响的贡献率存在差异。因此, 确定河川径流变化过程中气候及土地利用变化的贡献率成为建立考虑气候及土地利用变化驱动下的径流变化过程模型的核心。在进行  $\hat{Q}_1$  和  $\hat{Q}_2$  模拟值计算的基础上, 建立蔡旗断面河川径流量  $Q$  与  $\hat{Q}_1$ 、 $\hat{Q}_2$  的多元线性回归模型。

$$\hat{Q} = \alpha \hat{Q}_1 + \beta \hat{Q}_2 \quad (5)$$

式中,  $\hat{Q}$  为年径流量模拟值(10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>),  $\hat{Q}_1$  为气候影响下的年径流量模拟值(10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>),  $\hat{Q}_2$  为土地利用变化影响

下的年径流量模拟值( $10^8\text{m}^3$ )。 $\alpha$ 与 $\beta$ 分别代表气候变化和土地利用变化对河川径流变化的影响权重函数,它的大小直接反应 $\hat{Q}_1$ 与 $\hat{Q}_2$ 对 $Q$ 的影响程度,即气候与土地利用变化对径流变化影响的贡献率,其值是依据 $R_1$ 与 $R_2$ 值及最小二乘法来确定的。

2 结果分析

2.1 石羊河下游河川径流对气候变化的响应

曲线回归模型的求解可以转化为直线回归模型的求解,具体计算过程为:首先,对模型(1)两边取对数,得到如下模型(6),然后,对年径流量、年降水量、与年均温进行对数求解,分别得到其新序列 $Q'$ 、 $P'$ 、 $T'$ 。

$$\ln \hat{Q}_1 = \alpha + \beta \ln P + \gamma \ln T \tag{6}$$

令:  $\ln \hat{Q}_1 = \hat{Q}'_1$ ,  $\ln P = P'$ ,  $\ln T = T'$ , 则上式变为:

$$\hat{Q}'_1 = \alpha + \beta P' + \gamma T' \tag{7}$$

应用最小二乘法的原理确定待定系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 与 $\gamma$ 值,得到下游蔡旗断面 1956—1968 年年径流量对气候变化的响应模型。

$$\hat{Q}_1 = e^{-0.070} P^{0.436} T^{-0.615} \tag{8}$$

式中, $\hat{Q}_1$ 为年径流量模拟值( $10^8\text{m}^3$ ), $e$ 为自然对数的底, $P$ 为年降水量(mm), $T$ 为年均温( $^{\circ}\text{C}$ )。

该模型 $R=0.793$ ,显著性水平远小于0.01, $F=8.451$ ,远远大于 $\text{Sig}F$ 的值(0.007),说明 1956—1968 年蔡旗断面年径流量与中上游年均温及年降水量有着密切的非线性关系。

从表 2 可以看出,除了对极大值年份(1958 年和 1959 年)拟合值的误差稍大之外,其它年份拟合值的误差均在 $\pm 15\%$ 以内,精度较高,拟合效果较好。

表 2 拟合值与实测值误差检验表

Table 2 The error between actual values and simulation values

年份 Years	拟合值 $\hat{Q}_1$ Simulation values/ ( $10^8\text{m}^3$ )	实测值 $Q$ Actual values/ ( $10^8\text{m}^3$ )	误差 $\frac{Q - \hat{Q}_1}{Q} \times 100$ (%) Error	年份 Years	拟合值 $\hat{Q}_1$ Simulation values/ ( $10^8\text{m}^3$ )	实测值 $Q$ Actual values/ ( $10^8\text{m}^3$ )	误差 $\frac{Q - \hat{Q}_1}{Q} \times 100$ (%) Error
1956	4.99	5.14	-2.78	1963	3.82	3.71	3.10
1957	4.82	4.50	7.14	1964	4.92	4.94	-0.29
1958	4.95	6.17	-19.84	1965	3.71	3.35	10.66
1959	4.68	5.76	-18.81	1966	4.40	4.00	10.01
1960	4.58	4.33	5.59	1967	6.18	5.98	3.32
1961	5.31	4.60	15.47	1968	5.09	4.89	4.11
1962	3.77	4.11	-8.11				

2.2 石羊河下游河川径流量对土地利用变化的响应

土地利用格局的变化,尤其是灌溉农业的发展改变了水资源系统的转化,这种变化将驱动整个水资源系统的时空分布发生根本改变。石羊河流域六河水系中游地区土地利用变化剧烈,直接导致流域水资源的空间格局发生变化。因为从 2007 年开始,石羊河流域开始实施配水方案,蔡旗断面来水量有所增加,因此,在进行相关分析和模型建立时,时间段定为 1986—2006 年。利用查补的耕地面积时间序列与蔡旗断面来水量进行相关分析,相关系数为-0.855,通过 0.01 显著性水平的检验,二者存在显著相关关系,通过回归分析建立耕地变化影响下径流变化过程模型。

$$\hat{Q}_2 = 19.501 - 70.131LU \tag{9}$$

式中,  $\hat{Q}_2$  为年径流量模拟值 ( $10^8 \text{ m}^3$ ),  $LU$  为耕地面积 ( $10^4 \text{ km}^2$ )。上述模拟模型的  $R$  为  $-0.855$ ,  $R^2$  为  $0.731$ ,  $F$  为  $48.874$ ,  $\text{Sig}F$  为  $0.000$ , 远远小于  $F$  的值, 说明模型的模拟效果较好。

### 2.3 基于气候及土地利用变化的河川径流量变化过程响应模型

蔡旗断面来水量的变化是气候与土地利用变化共同作用的结果, 但不同要素对径流量变化的贡献率存在差别。气候与耕地变化的径流变化过程模型为:

$$\hat{Q} = 0.041\hat{Q}_1 + 0.888\hat{Q}_2 \quad (10)$$

式中,  $\hat{Q}$  为年径流量模拟值 ( $10^8 \text{ m}^3$ ),  $\hat{Q}_1$  为气候影响下的年径流量模拟值,  $\hat{Q}_2$  为耕地影响下的年径流量模拟值。模拟模型中  $R$  为  $0.984$ , 决定系数  $R^2$  为  $0.965$ ,  $F$  为  $278.009$ ,  $\text{Sig}$  的值为  $0.000$ , 远远小于  $F$  的值, 模拟效果较好。为了进一步检验模型的模拟精度, 应用模型 (10) 对 1985—2006 年径流量进行模拟, 计算其模拟值与实测值的相对误差, 检验模型模拟精度。1980s 的模拟值的平均相对误差为  $5.00\%$ , 1990s 的平均相对误差为  $7.43\%$ , 而 2000s 的平均相对误差为  $10.70\%$ , 总体而言, 该模型的模拟精度较高, 但随着时间的推移模拟精度有所下降, 说明随着社会的不断进步和发展, 影响径流变化的因素变得越来越复杂。

从模型 (10) 中气候变化与耕地变化对径流量变化的影响函数值  $\alpha$  与  $\beta$  的大小可以看出, 在径流变化过程中, 气候变化对其影响的贡献率仅为  $4.1\%$ , 而土地利用变化, 尤其是耕地变化的贡献率高达  $88.8\%$ , 因此, 石羊河中游林地和草地的大面积减少和耕地的大幅度持续增加, 是流域下游来水量显著减少的根本原因。

### 2.4 假定情景下的下游河川径流量变化模拟预测

#### 2.4.1 气候变化情景的假设

参照 IPCC 的评估报告与中国发布的全球气候变化及其影响的国家评估报告, 根据目前石羊河上中游年均气温、年降水量及其变化特征, 分别给出气温和降水的可能变化情景, 即气温分别增加  $0.5$ 、 $1.0$   $^\circ\text{C}$  和  $1.5$   $^\circ\text{C}$ , 降水量分别增加  $5\%$ 、 $10\%$  和  $15\%$ 。

#### 2.4.2 土地利用变化情景的假设

《石羊河流域综合治理规划》指出: 六河中游片综合农田灌溉净定额由 2003 年的  $5850 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  减少到 2010 年和 2020 年的  $4575 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  和  $4410 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ; 《中共武威市委、武威市人民政府关于武威市建设节水型社会的实施方案》指出: 武威市节水型社会建设目标分为近期和远期两个阶段的目标 (2006—2015), 其中, 农业节水的近期目标 (2010 年): 农田灌溉定额由现状的  $4950$ — $6900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  (凉州  $6225 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、古浪、天祝  $4875 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、民勤  $6900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) 降低到  $4650$ — $6525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  (凉州  $5775 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、古浪、天祝  $4650 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、民勤  $6525 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )。

综合考虑石羊河流域节水农业规划方案, 结合石羊河流域农业发展现状, 给出未来节水的可能情景, 分别为: 节水  $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$  和  $20\%$ , 现状年为 2006 年。

#### 2.4.3 模拟结果分析

灌溉定额的减少等同于耕地面积的减少, 因此根据上述给出的可能发生的节水情况, 应用模型 (8)、(9) 和 (10) 对蔡旗断面可能的来水量做出模拟。

从不同情景下的模拟结果可以看出, 首先, 各种模拟情景下气候变化对蔡旗断面来水量的影响均不明显, 极大值与极小值之差均为  $0.02 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右; 其次, 各种节水情景下蔡旗断面来水量存在较大差异: ①从模拟情景一的结果 (表 3) 可以发现, 在所有农田的灌溉定额均减少  $5\%$  的前提下, 径流量模拟值平均为  $1.591 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 基本与 20 世纪 90 年代初的来水量大体相当。②在灌溉定额减少  $10\%$  的情景下 (表 4), 来水量模拟值平均为  $2.427 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 相当于 20 世纪 80 年代初的来水量。③模拟情景三说明, 在节水  $15\%$  的情景下 (表 5), 蔡旗断面的来水量模拟值平均为  $3.262 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右, 基本与 20 世纪 70 年代初期的来水量相当, 而且超过了 2010 年为了向中央交一份满意的答卷、在各级政府的监督强制下、经过多方调水 (包括景电二期工程的民勤调水和西营专用输水渠向民勤的输水)、关井压田之后的  $2.6 \times 10^8 \text{ m}^3$  的来水量。④灌溉定额减少  $20\%$  的情景

下(表 6),蔡旗断面来水量模拟值平均为  $4.098 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,基本上与 20 世纪 60 年代末的来水量相当。

表 3 下游来水量模拟情景一

Table 3 The first simulation scenarios of runoff arriving at the lower reaches

节水情况 Water saving	气候可能出现的情景 Probable changes of weather	径流量模拟值 <i>R</i> Simulation values of runoff/( $10^8 \text{ m}^3$ )
节水 5%	$P+5\%; T+0.5$	1.596
Water saving	$P+5\%; T+1.0$	1.588
5 percentage	$P+5\%; T+1.5$	1.581
	$P+10\%; T+0.5$	1.599
	$P+10\%; T+1.0$	1.591
	$P+10\%; T+1.5$	1.584
	$P+15\%; T+0.5$	1.602
	$P+15\%; T+1.0$	1.594
	$P+15\%; T+1.5$	1.587

表 4 下游来水量模拟情景二

Table 4 The second simulation scenarios of runoff arriving at the lower reaches

节水情况 Water saving	气候可能出现的情景 Probable changes of weather	径流量模拟值 <i>R</i> Simulation values of runoff/( $10^8 \text{ m}^3$ )
节水 10%	$P+5\%; T+0.5$	2.431
Water saving	$P+5\%; T+1.0$	2.424
10 percentage	$P+5\%; T+1.5$	2.417
	$P+10\%; T+0.5$	2.435
	$P+10\%; T+1.0$	2.427
	$P+10\%; T+1.5$	2.420
	$P+15\%; T+0.5$	2.438
	$P+15\%; T+1.0$	2.430
	$P+15\%; T+1.5$	2.422

表 5 中下游来水量模拟情景三

Table 5 The third simulation scenarios of runoff arriving at the lower reaches

节水情况 Water saving	气候可能出现的情景 Probable changes of weather	径流量模拟值 <i>R</i> Simulation values of runoff/( $10^8 \text{ m}^3$ )
节水 15%	$P+5\%; T+0.5$	3.267
Water saving	$P+5\%; T+1.0$	3.259
15 percentage	$P+5\%; T+1.5$	3.252
	$P+10\%; T+0.5$	3.270
	$P+10\%; T+1.0$	3.262
	$P+10\%; T+1.5$	3.255
	$P+15\%; T+0.5$	3.273
	$P+15\%; T+1.0$	3.265
	$P+15\%; T+1.5$	3.258

表 6 下游来水量模拟情景四

Table 6 The fourth simulation scenarios of runoff arriving at the lower reaches

节水情况 Water saving	气候可能出现的情景 Probable changes of weather	径流量模拟值 <i>R</i> Simulation values of runoff/( $10^8 \text{ m}^3$ )
节水 20%	$P+5\%; T+0.5$	4.103
Water saving	$P+5\%; T+1.0$	4.095
20 percentage	$P+5\%; T+1.5$	4.088
	$P+10\%; T+0.5$	4.106
	$P+10\%; T+1.0$	4.098
	$P+10\%; T+1.5$	4.091
	$P+15\%; T+0.5$	4.109
	$P+15\%; T+1.0$	4.101
	$P+15\%; T+1.5$	4.094

### 3 结论

(1) 1956—2009 年蔡旗断面河川径流量呈快速减少趋势,其中,1968 年之前石羊河流域下游控制站蔡旗断面径流量的波动主要是气候变化的结果,而 1968 年之后,蔡旗断面径流量的减少是气候与土地利用变化共同作用的结果,其中,气候变化的贡献率平均仅为 4.1%,而土地利用变化,尤其是耕地变化的贡献率高达 88.8%。

(2) 给出未来气候及节水可能的变化情景,应用河川径流对气候与土地利用变化的响应模型,对下游来水量进行模拟预测:灌溉定额平均减少 5%的前提下,径流量模拟值与 1997 年左右的来水量大体相当;在灌溉定额减少 10%的情景下,来水量模拟值相当于 20 世纪 80 年代末的来水量;而在节水 15%和 20%的情景下,蔡旗断面的来水量模拟值达  $3.262 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $4.098 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。说明,如果真正从节水入手,加大节水设施和节水技术尤其是高新灌溉技术的投入强度,使民勤蔡旗断面下泄水量由 2010 年的  $2.600 \times 10^8 \text{ m}^3$  增加到  $2.900 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上的治理目标,在不进一步压田的前提下,一定可以提前实现。石羊河流域生态恢复的根本出路在于节水。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 孙鸿烈主编. 中国西部典型内陆河生态-水文研究. 北京: 气象出版社, 2010.
- [ 2 ] 王根绪, 张钰, 刘桂民, 陈玲. 马营河流域 1967—2000 年土地利用变化对河流径流的影响. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, 35(7): 671-681.
- [ 3 ] 陶辉, 毛炜, 白云岗, 姜彤. 45 年来塔里木河流域气候变化对径流量的影响研究. 高原气象, 2009, 28(4): 854-860.
- [ 4 ] Zhang J S, Kang E S, Lan Y C, Chen R S. Impact of climate change and variability on water resources in Heihe River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(3): 286-292.
- [ 5 ] Wang Z G, Ficklin D L, Zhang Y Y, Zhang M H. Impact of climate change on Streamflow in the arid Shiyang River Basin of northwest China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(18): 2733-2744.
- [ 6 ] 周俊菊, 师玮, 石培基, 孔令贵, 贾志萍. 石羊河上游 1956—2009 年出山径流量特征及其对气候变化的响应. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(1): 27-34.
- [ 7 ] 柳景峰, 张勃. 河西内流干旱区气候变化与径流的时空耦合分析——以黑河中上游地区为例. 资源科学, 2008, 30(7): 1105-1114.
- [ 8 ] 满苏尔·沙比提, 胡江玲. 1957—2007 年阿克苏河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应. 冰川冻土, 2011, 33(1): 186-189.
- [ 9 ] 王根绪, 刘进其, 陈玲. 黑河流域典型区土地利用格局变化及影响比较. 地理学报, 2006, 61(4): 339-348.
- [ 10 ] 王根绪, 杨玲媛, 陈玲, 洼田顺平. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响. 地理学报, 2005, 60(3): 456-466.
- [ 11 ] Bewket W, Sterk G. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*, 2004, 19(2): 445-458.
- [ 12 ] Loerup J K, Refsgaard J C, Mazvivi D. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3/4): 147-163.
- [ 13 ] 马金珠, 李吉均. 塔里木盆地南缘人类活动干扰下地下水的变化及其生态环境效应. 自然资源学报, 2001, 16(2): 134-139.
- [ 14 ] 李小玉, 肖笃宁. 石羊河流域中下游绿洲土地利用变化与水资源动态研究. 水科学进展, 2005, 16(5): 643-648.
- [ 15 ] 马兴旺, 李保国, 吴春荣, 彭鸿嘉, 郭有祯. 绿洲区土地利用对地下水影响的数值模拟分析——以民勤绿洲为例. 资源科学, 2002, 24(2): 49-55.
- [ 16 ] 王杰, 叶柏生, 吴锦奎, 何晓波. 基于遥感分析的近 20a 来人类活动对石羊河流域地表径流的影响研究. 冰川冻土, 2008, 30(1): 87-92.
- [ 17 ] Zhang X M, Yu X X, Wu S H, Zhang M L, Li J L. Response of land use/coverage change to hydrological dynamics at watershed scale in the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 414-421.
- [ 18 ] 孙鸿烈, 成升魁, 封志明. 60 年来的资源科学: 从自然资源综合考察到资源科学综合研究. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1414-1423.
- [ 19 ] Legesse D, Vallet-Coulomb C, Gasse F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa; Case study south central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 2003, 275(1/2): 67-85.
- [ 20 ] 梁小军, 江洪, 朱求安, 黄梅玲. 岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究. 水土保持研究, 2008, 15(5): 30-33.
- [ 21 ] 周俊菊, 石培基, 师玮. 1960—2009 年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征. 自然资源学报, 2012, 27(1): 143-153.
- [ 22 ] 蓝永超, 胡兴林, 肖洪浪, 林纾. 全球变暖情景下黑河山区水循环要素变化研究. 地球科学进展, 2008, 23(7): 739-748.
- [ 23 ] 袁作新. 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社, 1990.