

# 洮儿河流域中上游水循环 要素变化及其原因

姜德娟<sup>1,2</sup>, 李丽娟<sup>1\*</sup>, 侯西勇<sup>2</sup>, 梁丽乔<sup>1,3</sup>, 张 丽<sup>1,3</sup>,  
李九一<sup>1,3</sup>, 胥铭兴<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 吉林省白城水文水资源勘测局, 白城 137000)

**摘要:** 选取洮儿河流域中上游地区为研究区, 分析 1961~2000 年期间径流、降水、气温等水文气象要素的演化趋势。采用特征参数时间序列法, 初步探讨了气候变化与土地利用/覆被变化的径流效应, 并通过洮南站 40 年天然径流与实测径流的比较, 定量分析水资源开发利用对径流的影响。结果表明: 降水、气温均呈一定的上升趋势, 径流表现出先减少、后增加、再减少的趋势; 年降水、年气温分别与天然年径流呈正相关和负相关的关系, 然而这种影响随着时间序列的延长均有所减弱; 近 30 年间, 植被覆盖度降低可能是天然年径流增加的主要原因; 水资源的开发利用导致 1986~2000 年期间的年径流减少 5.8 亿 m<sup>3</sup>, 占天然年径流量多年均值的 37.1%。

**关键词:** 水循环; 气候变化; 土地利用/覆被变化; 水资源开发利用; 洮儿河流域

**文章编号:** 1000-0585(2009)01-0055-11

在全球变化与经济社会快速发展的驱动影响下, 水资源供需矛盾日益突出, 水资源短缺、水污染、河道断流、湖泊湿地萎缩、次生盐碱化、地下水超采、海水入侵等水问题日趋严重, 已经成为世界许多国家和地区经济社会发展的重要制约因素, 引起人们的高度重视。在 20 世纪, 特别是 90 年代以后, 国际有关组织实施了一系列国际水科学计划, 如 IHP、WCRP、IGBP、GWSP 等, 其目的是从全球、区域和流域等不同尺度和交叉学科的途径, 探讨环境变化下的水循环及其相联系的资源与环境问题<sup>[1]</sup>。研究结果表明: 较长时间尺度上, 气候变化对水文水资源的影响明显, 但短期内, 土地利用/覆被变化 (Land Use/Land Cover Change, LUCC) 是水文变化的主要驱动要素之一<sup>[2]</sup>。变化环境下的水文循环研究成为 21 世纪水科学研究的热点<sup>[1]</sup>。

全球气候变化对区域水文水资源具有重要影响。在相当大程度上水循环特征是由气候条件所决定的, 其对全球气候变化的响应与降水的变化密切相关<sup>[3~5]</sup>。LUCC 则通过改变区域/流域的下垫面特征, 对流域的水文情势和产汇流机制产生深刻影响。近年来, 国内外针对 LUCC 水文效应的研究日趋活跃, 但因研究尺度、区域位置、气象条件、研究对

收稿日期: 2008-01-31; 修订日期: 2008-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571029)。

作者简介: 姜德娟 (1979-), 女, 山东日照人, 博士。主要从事变化环境下的水文效应和海岸带生态水文研究。  
E-mail: djjiang@yic.ac.cn

\*通讯作者: 李丽娟 (1961-), 女, 吉林省吉林市人, 研究员, 博士。主要从事土地利用变化的水文响应和流域生态需水研究。E-mail: lilj@igsnr.ac.cn

象等方面的差异性，使LUCC水文效应研究得出了不同的结论和认识<sup>[6~13]</sup>。气候变化与LUCC对流域/区域水文水循环的影响是同时进行、相互作用、相互影响的，因此，如何采取有效方法揭示气候变化与LUCC对流域水文过程的影响，是目前亟待解决的问题。

# 1 研究区概况与研究方法

## 1.1 研究区概况

本文研究范围(图1)为洮儿河流域中上游，面积 27633 km<sup>2</sup>，流域出口水文站为洮南站。研究区位于东北的西部地区，地跨内蒙古自治区兴安盟的科尔沁右翼前旗、突泉县，吉林省白城市的洮北区、洮南市，属于温带大陆性季风气候区，降水和气温的年内和年际变化较大，日照充足，蒸发强烈，河川径流具有明显的丰枯变化周期。研究区自东南向西北随海拔的逐渐增高，具有明显的“立体气候”特征。地质构造是以华夏及新华夏构造体系为主<sup>[14]</sup>，植被以森林和草原为主。社会经济结构主要是农牧业为主，经济相对比较落后。近年来随着研究区经济社会的发展和人口的迅速增长，耕地面积不断扩展，林地、草地和湿地面积大幅减少，工农业用水急剧增长，导致下游来水量减少，造成河道断流、湿地萎缩、次生盐碱化等生态问题，严重制约区域的经济社会发展。因此，本文对研究区水循环要素的变化趋势及其原因的研究，将为未来水土资源的合理配置和可持续利用以及下游湿地的恢复与保护提供科学依据和基础支持。

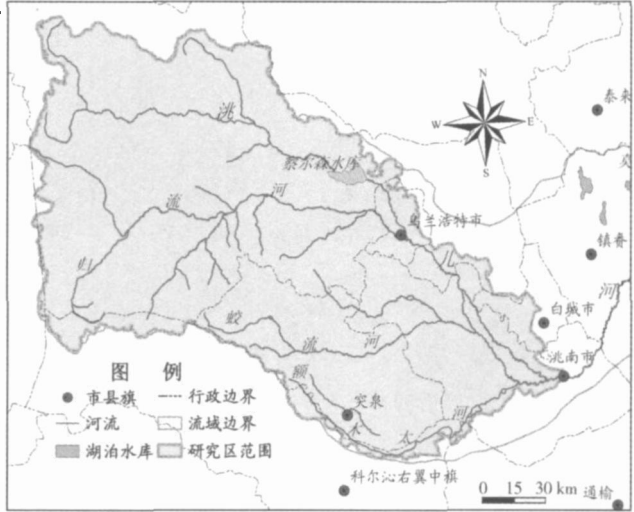


图 1 研究区范围及位置示意图

Fig. 1 Range and location of the study region

## 1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 研究方法 本文采用特征参数时间序列法，对气候变化和LUCC的径流效应进行研究，通过洮南站实测径流与天然径流的比较，分析水资源开发利用对水循环变化的影响。在对研究区径流演化规律分析中，运用了 Kendall 秩次相关法探讨月径流的演化规律。Kendall 秩次相关法如下：

Kendall 统计量  $S$ 、方差  $\sigma^2$  和标准化变量  $z$  的计算式分别为：

$$S = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \tag{1}$$

$$\sigma^2 = \frac{2(2N+9)}{9N(N-1)} \tag{2}$$

$$z = \frac{S}{\sigma} \tag{3}$$

式中： $P$ 为研究序列所有的对偶观测值  $(x_i, x_j, i < j)$  中  $x_i < x_j$  出现的次数； $N$ 为研究系列的长度。在 Kendall 秩次相关分析中，取显著水平  $\alpha = 0.05$ ，则 Kendall 标准化变量  $z$  相应的检验临界值  $z_c = 1.96$ 。如果  $|z| > z_c$ ，且  $z > 0$ ，则表示研究序列有明显的增加趋势；相反，若  $z < 0$ ，则序列有明显的减小趋势。

径流的年内变化特征采用径流年内分配不均匀系数和径流年内分配调节系数两个指标进行分析, 计算公式如下:

径流年内分配不均匀系数 ( $C_{vy}$ ):

$$C_{vy} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2}}{\bar{R}} \quad (4)$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2}}{\bar{R}} \quad (5)$$

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^{12} R_i / 12 \quad (6)$$

式中:  $R_i$  为年内各月平均流量,  $\bar{R}$  为年均流量。  $C_{vy}$  值越大, 表明年内各月流量相差越悬殊, 径流年内分配越不均匀。

径流年内分配调节系数 ( $C_r$ ):

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R}) / \sum_{i=1}^{12} R_i}{\bar{R}}, \quad i = \begin{cases} 0, & R_i < \bar{R} \\ 1, & R_i \geq \bar{R} \end{cases} \quad (7)$$

公式 (7) 显示的年内分配完全调节系数与年内分配不均匀系数一样, 其值越大表示年内分配越集中。

**1.2.2 数据来源与处理** 文中采用的土地利用数据共两期: 20 世纪 70 年代初期和 2000 年。70 年代初期的数据是通过中国人民解放军总参谋部测绘局制作的 1:10 万地形图, 应用 ArcGIS 软件数字化获取。2000 年的土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心, 分辨率为 1:10 万, 包括 6 个一级类型和 25 个二级类型<sup>[15]</sup>。本文基于研究区的景观特征、土地利用特征和生态环境状况, 将土地利用类型归并为 7 个类型: 水田、旱地、林地、草地、水域、建设用地和盐碱地。水文资料来源于水利部松辽水利委员会、白城市水文局, 包括降水、径流要素的逐月和逐年资料, 时间为 1961~2000 年。气象数据包括 1961~2000 年降水、气温要素的逐年资料, 数据来源于国家气象局。其中, 流域的年降水量是根据洮儿河流域内的 10 个雨量站数据, 采用泰森多边形法求得。流域的年均气温是根据流域内及周边地区的 17 个气象站点的气温数据, 应用克里格空间插值方法进行插值, 并采用 DEM 数据进行校正而获得。

## 2 研究区 LUCC 时空特征

### 2.1 空间特征

以 2000 年为例分析研究区的土地利用/覆被的现状特征。由图版 3 图 2、表 1 可见, 研究区土地利用以耕地、林地和草地 3 大类为主, 其面积分别占研究区总面积的 27.8%、25.7% 和 38.5%, 其他土地利用类型面积较小。从空间分布特征来看, 林地和草地主要分布在洮儿河上游区域, 特别是海拔较高的山地、丘陵区域, 多呈集中连片的分布; 旱地和水田主要分布在中游区域, 空间上比较连续; 建设用地在中游区域广泛散布, 且在上游的河流附近也有大量分布; 湖泊、沼泽、滩地等水域以及盐碱地主要分布在中游地区。

### 2.2 时空变化特征

从 70 年代初期~2000 年, 土地利用的结构特征变化较小, 两个时期均是以草地、林地和旱地为主 (表 1); 尽管如此, 不同土地利用类型之间彼此的消长关系和动态度特征却十分突出。近 30 年间, 旱地增加最为突出, 其次是林地和草地的减少, 再次是水域的

减少和水田的增加。其中,水田的增加速度最快。根据土地利用转移矩阵的分析结果表明,林地转草地、草地转旱地、草地转林地、林地转旱地和水域转旱地是最主要的5个土地利用变化类型,它们占研究区土地利用变化总面积的81.55%,大多是由生态用地(林地、草地、水域)转变为农业用地(旱地、水田)或由较高质量的生态用地转化为质量较差的生态用地,说明研究区内人类活动程度的增强有加剧生态退化的趋势。

表1 70年代初期和2000年土地利用面积(单位:  $10^4 \text{hm}^2$ )

Tab 1 Land use areas in the early 1970s and 2000 (unit:  $10^4 \text{hm}^2$ )

时间	水田	旱地	林地	草地	水域	建设用地	盐碱地	合计
70年代初期	1.87	35.19	100.37	119.03	14.64	4.01	1.22	276.33
2000年	7.49	76.71	71.01	106.40	5.99	5.46	3.28	276.33

### 3 水循环要素变化趋势

#### 3.1 径流变化

**3.1.1 径流突变分析** 通过 Mann-Kendall 法对研究区实测径流序列突变诊断分析发现,在1986年发生了径流突变,且通过了置信度95%的检验。由此,将研究区的径流演化过程划分为两个阶段:1961~1985年和1986~2000年,以下简称第一阶段和第二阶段。两个阶段的多年平均实测径流分别为8.6亿  $\text{m}^3$ 和17.8亿  $\text{m}^3$ ,第二个阶段的年均径流量比第一个阶段多9.2亿  $\text{m}^3$ 。

**3.1.2 径流的年际年内变化趋势** 由图3可见,年径流呈先减少、后增加、再减少的趋势,多年平均流量为38.2  $\text{m}^3/\text{s}$ 。年际径流量不均匀系数和变差系数分别为0.20和0.92,表明径流的年际变化比较强烈。Kendall 秩次相关法对月径流变化趋势的分析结果(表2)表明,各月流量均不存在明显的变化趋势。径流年内分配不均匀系数和年内分配调节系数分别为1.19和0.46,说明径流的年内分配非常不均匀,其中,两个阶段的流量最大月均发生在8月份,最枯月均发生在2月份。

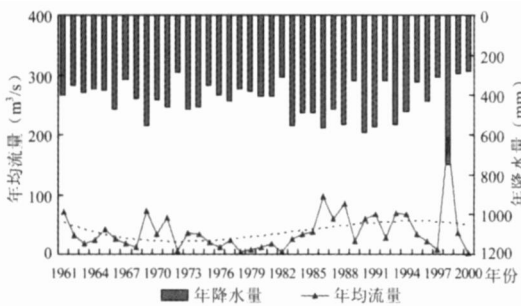


图3 年实测流量(洮南站)与降水量变化曲线

Fig. 3 Trend of annual observed runoff and rainfall

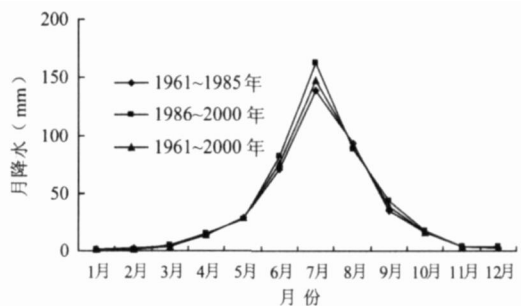


图4 不同阶段月降水曲线

Fig. 4 Mean monthly rainfall in different phases

表2 1961~2000年月实测流量与月降水 Kendall 法分析结果

Tab 2 The analysis result with Kendall method for monthly observed runoff and rainfall during 1961-2000

时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
月径流	-0.39	-0.34	0.52	0.55	0.00	1.07	1.09	0.05	-0.46	-0.91	-0.27	0.27	0.64
月降水	-0.36	0.07	1.73	0.66	0.52	1.28	-0.32	-0.41	1.00	0.73	0.68	2.10	0.84

### 3.2 降水变化

从 40 年降水变化曲线 (图 3) 可以看出, 年降水量呈一定上升趋势, 多年平均值为 427 mm。Kendall 秩次相关法对月降水变化趋势的分析结果 (表 2) 表明, 12 月份的降水表现出明显的增加趋势, 其他月份的降水趋势不明显。分析不同阶段月降水量曲线 (图 4) 发现, 各个阶段降水的年内分配规律基本一致, 降水最大月发生在 7 月份, 最小月发生在 1 月份, 均比实测流量的最大月与最小月提前一个月, 说明径流对降水具有明显的滞后性。

### 3.3 气温变化

根据气温空间插值及校正的结果, 研究区年均气温呈明显的波动上升趋势 (图 5), 多年平均值为 5.48。由图 5 可见, 年均气温在 1986 年后迅速上升, 第二阶段的年均气温比第一阶段增加了将近 1。此外, 通过 Kendall 秩次相关法对年均气温变化趋势的分析结果也说明, 年均气温具有显著的增加趋势 ( $M = 3.42 > M_a$ )。

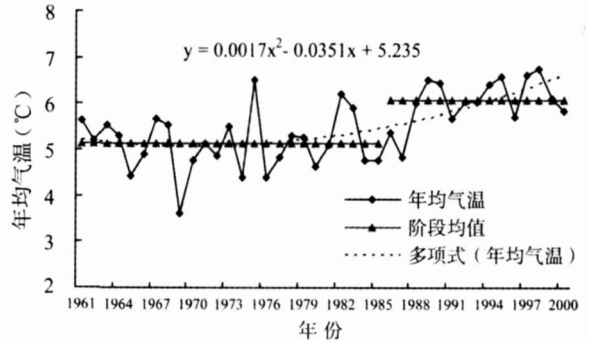


图 5 1961 ~ 2000 年年均气温的变化趋势

Fig 5 Trend of annual mean temperature during 1961 ~ 2000

## 4 气候变化和 LUCC 径流效应分析

径流的形成与变化规律受诸多因素的影响, 一般可以归结为自然因素和人为因素两类。自然因素主要是指气候条件, 其在很大程度上决定了区域的水循环过程<sup>[4]</sup>。人类对水循环过程的影响, 直接方式包括对水循环的质量、数量、水循环环节和周期等方面的影响, 如引蓄水、拦河修坝、修建水库、废污水排放等水资源的开发与利用方式<sup>[16]</sup>。人类对水分循环影响的间接方式表现在通过森林砍伐、水土保持、农业开发活动、城市化发展等土地利用的开发活动改变土地利用/覆被的特征, 从而影响着水文循环的各个环节。

本文采用特征参数时间序列法对气候变化与 LUCC 的径流效应进行分析, 其中径流资料均为天然径流资料, 可以避免水利工程、农田灌溉、工业和生活用水等水资源开发利用对径流影响的干扰, 从而更好地判断气候变化和土地利用变化对径流的影响。

### 4.1 年降水—天然年径流的距平百分率

从年降水和天然年径流距平百分率的变化趋势 (图 6) 可以看出, 天然径流与降水的年际变化趋势比较一致, 说明降水对径流的影响起着重要的决定作用。但从图 6 也可以看出, 天然径流在年代间的波动幅度大于降水的波动幅度, 说明相对于年降水的变化趋势, 天然年径流的年际间波动较大。这在一定程度上可以说明, 非降水因素扰动了降水—天然径流的关系。在 1986 年之前, 天然径流的距平百分率基本低于年降水的距平百分率, 而在 1986 年之后, 结果却相反, 这表明可能因为土地利用/覆被的变化使得径流量有所增加。

### 4.2 天然年径流系数

1961 ~ 2000 年期间, 天然年径流系数的多年均值为 0.12, 表明受气候、下垫面等因素的影响, 大部分降水消耗于蒸散发, 而转化为径流的比例较小。由图 7 可见, 天然年径流系数表现出显著的增加趋势, 第一、第二阶段的径流系数分别为 0.09、0.17, 说明相对于第一阶段, 第二阶段有更大比例的降水转化为径流, 而蒸发损失的水量相对减少, 这

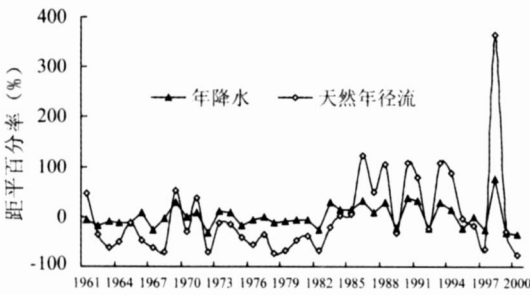


图 6 年降水和天然年径流的距平百分率变化  
Fig. 6 Anomaly percentage changes of annual rainfall and annual natural runoff

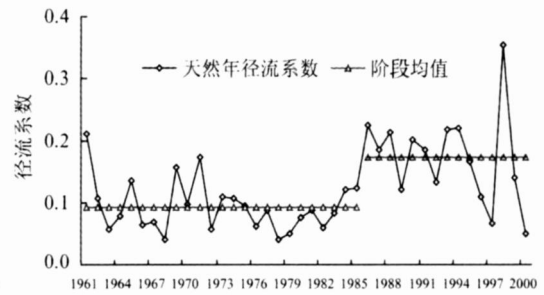


图 7 天然年径流系数变化趋势  
Fig. 7 Annual natural runoff coefficient trend

正好与研究区地表植被覆盖度的减少相一致。70 年代初期~2000 年期间，林地、草地面积大幅减少，主要转化为水田和旱地，植被覆盖状况总体变差，说明土地利用/覆被变化可能对水循环过程产生了很大影响，其作用增大了区域的产流水平。

4.3 年降水—天然年径流双累积曲线

从年降水—天然年径流双累积曲线(图 8)可以看出，二者呈正相关关系，长时间内，变化趋势基本保持一致，表明降水对径流的显著影响。但在 1986 年之后，双累积曲线发生了明显的转折，即向远离降水的方向偏离，说明可能因为土地利用变化的影响，天然径流的增加趋势比较显著。

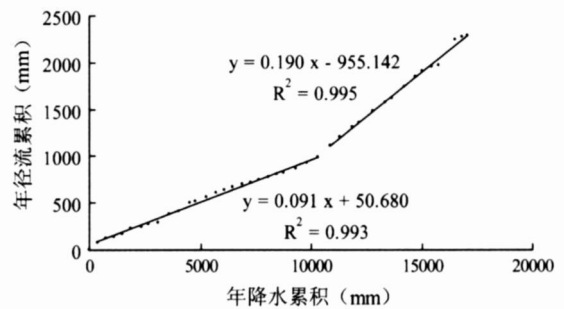


图 8 年降水 - 天然年径流双累积曲线  
Fig. 8 Double accumulative curve for annual rainfall and annual natural runoff

4.4 年均气温与天然年径流之间的关系

根据年均气温与天然年径流的关系(图 9)可以看出，年均气温与天然年径流之间存在负相关关系，即随气温的升高，径流呈减少的趋势。二者在第一和第二个阶段的决定系数分别为 0.127 和 0.065，说明随着时间序列的延长，年气温与天然年径流之间的相关性变差，气温对径流的影响减弱。虽然第二阶段比第一阶段的年均气温高约 1℃，但可能因为植被覆盖度的下降，导致天然年径流系数具有显著的增加趋势(图 7)。当然，也无法排除降水的强度、历时、空间分布及土壤前期湿润程度等方面对产流增强影响。

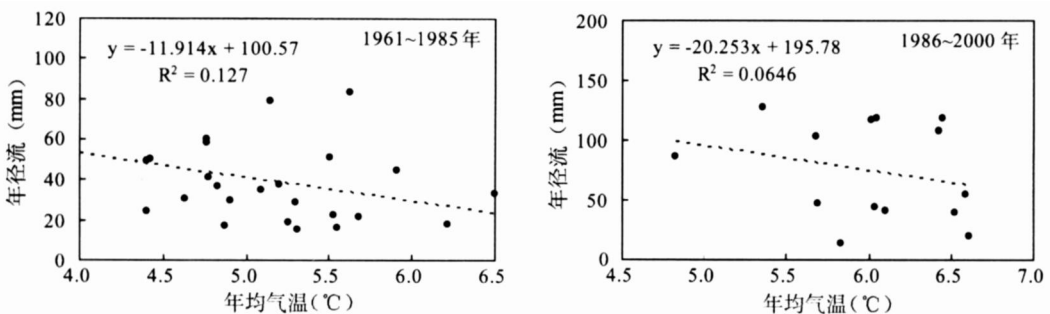


图 9 不同阶段年均气温 - 天然径流关系  
Fig. 9 Correlations of annual temperature and natural annual runoff in different phases

#### 4.5 相同降水频率下的天然年径流变化

根据 1961~2000 年间的年降水系列资料, 计算了研究区 40 年间的降水频率, 然后对不同阶段相同降水频率下的天然年径流及其径流系数进行比较分析。由图 10 可见, 在相同降水频率下, 第二阶段的年径流量基本上均比第一阶段的年径流量大, 这说明在相同降水频率下, 第二阶段的产流能力有所增强, 分析其原因可能是因为植被覆盖度的降低增大了地表的产流能力。其中, 两个阶段的天然年径流量在丰水年 ( $P < 37.5\%$ ) 的差别比在枯水年 ( $P > 62.5\%$ ) 显著。在丰水年, 第一阶段、第二阶段的天然年径流系数分别为 0.12 和 0.23, 增加了 0.11 (图 10); 在枯水年, 第一阶段、第二阶段的天然年径流系数分别为 0.08 和 0.11, 增加了 0.03, 说明土地利用/覆被变化在丰水年对径流的影响可能比在枯水年的影响大。

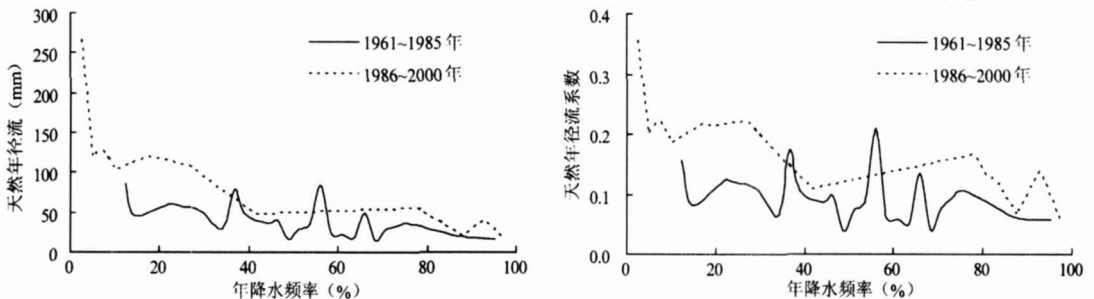


图 10 不同阶段相同降水频率下的天然年径流及径流系数的变化

Fig. 10 Annual natural runoff and runoff coefficient under the same precipitation frequency in different phases

### 5 水资源开发利用对水文水资源的影响

自 20 世纪 70 年代以来, 在洮儿河干支流相继修建了许多水库。研究区内的大型水库有察尔森水库, 中型水库有双城水库、明星水库、大青山水库、永丰水库、群昌水库、创业水库、团结水库等。大部分水库以防洪、灌溉和供水为主, 其修建和运行对下游的水文情势、水资源利用和生态环境状况带来诸多影响。

#### 5.1 察尔森水库及下游灌区造成的生态水文效应

察尔森水库是洮儿河干流上唯一的控制性工程, 位于洮儿河中上游分界处, 其上游控制面积 7 780 km<sup>2</sup>。水库总库容为 12.53 亿 m<sup>3</sup>, 其中, 兴利库容 10.33 亿 m<sup>3</sup>, 防洪库容为 3.11 亿 m<sup>3</sup>。水库下游受益区为察尔森水库下游灌区 (包括兴安盟灌区和白城灌区), 共划分了 12 个分灌区, 9 座引水枢纽, 规划灌溉总面积 99.69 万亩, 其中水田面积 50.87 万亩。1989 年 9 月, 察尔森水库正式蓄水, 1990 年开始向下游灌区供水。自水库运行以来, 拦蓄了多次洪水, 减轻了洪水对下游人民生命财产的危害, 而且提高了下游灌溉用水保证率, 有效促进了农业生产。但自 1973 年水库修建起, 当地原生地貌和森林植被受到很大破坏, 生态环境日益恶化, 而且也分割了上游与中下游的水力联系及水系统连续的动态过程, 减少了山前冲积扇对地下水的补给<sup>[17-19]</sup>。根据水库运行后的观测资料分析表明, 水库年蒸发渗漏损失水量较大, 为 0.58 亿 m<sup>3</sup>, 占水库入流量多年平均值 (8.5 亿 m<sup>3</sup>) 的 6.8%。此外, 水库下游灌区用水十分浪费。兴安盟灌区的 10 万亩水田, 每亩用水量超过 3 000 m<sup>3</sup>/年 (表 3)。随着水库下游灌区的开发建设, 灌溉需水量将逐渐增加, 这将导致灌区下游来水量减少, 特别是在春灌期间 (5~6 月), 将会加剧下游地区水资源的供需矛

盾, 使生态与环境状况恶化。

表 3 察尔森水库下游灌区水田供水情况表

年 份	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
水田灌溉面积 (万亩)	6.2	6.98	7.68	9.53	10.00	10.00	10.00	9.60
年供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	2.6	2.2	4.6	3.2	4.2	3.7	3.22	2.95

## 5.2 水资源开发利用径流效应的定量分析

通过对洮南站 1961~2000 年实测径流与天然径流的比较, 分析水利建设和工农业用水等水资源开发利用对径流的影响。由图 11 (a) 可以看出, 1973 年前, 实测径流与天然径流相差不大, 1973 年之后, 实测径流相对于天然径流出现了明显的减少趋势。40 年间, 天然径流与实测径流的多年平均值分别为 15.6 亿 m<sup>3</sup> 和 12.1 亿 m<sup>3</sup>, 二者相差 3.5 亿 m<sup>3</sup>, 说明由于水库的修建运行和工农业用水量的增加, 使实测径流明显减少。其中, 在 1986~2000 年期间, 相对天然径流, 实测径流减少 5.8 亿 m<sup>3</sup> (21.2 mm), 占天然径流量多年平均值的 37.1%。

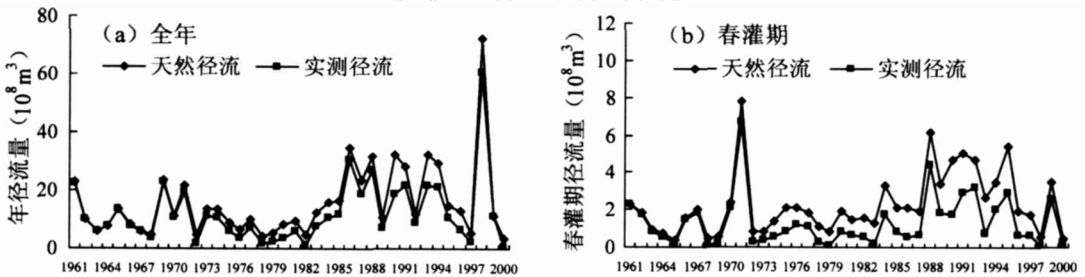


图 11 1961~2000 年实测与天然径流量比较

Fig. 11 Comparison between observed and natural runoff during 1961~2000

对 40 年间春灌期 (5~6 月) 的实测径流与天然径流的比较 (图 11 (b)) 分析表明, 实测径流有明显的减少趋势。40 年间, 实测径流与天然径流的多年平均值分别为 1.3 亿 m<sup>3</sup> 和 2.3 亿 m<sup>3</sup>, 二者相差 1.0 亿 m<sup>3</sup>, 说明春灌期, 主要由农田灌溉引起的河川径流减少量达 1.0 亿 m<sup>3</sup>, 占春灌期多年平均天然径流量的 42.4%, 可见, 农田灌溉用水对河川径流的显著影响。近年来, 因为春灌期间农田大量引水, 使洮儿河发生断流, 对下游生态环境和地下水补给等状况造成不良影响, 特别是在枯水年份, 形势非常严峻。

## 6 结论

通过对洮儿河流域中上游水循环要素演化及其原因的分析, 得出以下主要结论:

(1) 40 年间, 实测径流呈先减少、后增加、再减少的趋势, 多年平均流量为 38.2 m<sup>3</sup>/s, 各月流量基本不存在明显的变化趋势; 年降水量呈一定的增加趋势, 多年平均值为 427 mm, 只有 12 月份的降水呈明显的增加趋势; 年均气温呈显著的波动上升趋势, 多年平均气温为 5.48, 第二阶段 (1986~2000 年) 的年均气温明显高于第一阶段 (1961~1985 年)。

(2) 根据特征参数时间序列法的分析结果表明, 年降水、年均气温分别与天然年径流呈正相关和负相关的关系, 但随着时间序列的延长, 降水和气温对天然径流的影响均有所减弱, 导致第二阶段的天然年径流增加, 径流系数增大, 说明可能因为研究区林地、草



地面积大幅减少, 水田和旱地面积迅速增加等土地利用/覆被的变化, 降低了植被覆盖度, 从而增强了地表的产流能力, 使相同降水频率下的天然年径流系数有一定程度的增加。其中, 土地利用/覆被变化在丰水年对径流的影响比在枯水年的影响大。

(3) 水利工程建设和工农业用水等水资源的开发利用, 对径流产生了显著的影响。察尔森水库年均蒸发渗漏损失水量较大, 占水库入流量的 6.8% (0.58 亿  $\text{m}^3$ ); 其平均每年为下游灌区供水 3 亿多  $\text{m}^3$ 。水资源的开发利用导致 1986~2000 年期间年径流减少 5.8 亿  $\text{m}^3$ , 占天然年径流量多年均值的 37.1%; 春灌期, 因为农田灌溉的大量用水, 导致同期河川径流量减少 42.4%, 使洮儿河发生断流, 对下游生态环境和地下水补给等状况造成不良影响, 特别是在枯水年份, 其影响更加显著。

(4) 本文采用的特征参数时间序列法中的特征参数计算比较容易、物理意义明确, 是一种简单而有效的气候变化与 LUCC 水文效应的分析方法。然而, 该方法将研究区域作为一个整体考虑, 缺乏物理基础, 难以定量区分气候变化与 LUCC 对水文过程的影响, 且降水历时、降水强度、降水的空间差异以及前期土壤湿润程度等都会对产流有一定影响。因此, 该方法需要结合水文模型, 对气候变化与 LUCC 的水文效应进行定量估算。

#### 参考文献:

- [1] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. 资源科学, 2002, 24(3): 1~7.
- [2] 李昌峰, 高俊峰, 曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势. 土壤, 2002, (4): 191~205.
- [3] 沈大军, 刘昌明. 水文水资源系统对气候变化的响应. 地理研究, 1998, 17(4): 435~442.
- [4] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究. 水科学进展, 2004, 15(5): 608~614.
- [5] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析. 地理研究, 2006, 25(2): 268~275.
- [6] Crooks S, Davies H. Assessment of land use change in the Thames Catchment and its effect on the flood regime of the river. Phys. Chem. Earth, 2001, 26, (7-8): 583~591.
- [7] Lahmer W, Pfützner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on Meoscale. Phys. Chem. Earth (B), 2001, 26 (7-8): 565~575.
- [8] Niehoff Daniel, Uta Fritsch, Axel Bronstert, et al. Land-use impacts on storm runoff generation: Scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. Journal of Hydrology, 2002, 267: 80~93.
- [9] Batelaan O, Smedt De F, Triest L. Regional groundwater discharge: Phreatophyte mapping, groundwater modeling and impact analysis of land-use change. Journal of Hydrology, 2003, 275: 86~108.
- [10] 陈军锋, 陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用. 北京大学学报, 2004, 40(2): 265~270.
- [11] Crokea B F W, Merritt W S, Jakemana A J. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. Journal of Hydrology, 2004, 291: 115~131.
- [12] Bari M A, Smettem K R J, Sivapalan M. Understanding changes in annual runoff following land use changes: A systematic data-based approach. Hydrological Processes, 2005, 19: 2463~2479.
- [13] Romanowicz A A, Vanclouster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium. Ecological Modelling, 2005, 187: 27~39.
- [14] 郭跃东, 何岩, 张明祥, 等. 洮儿河中下游流域湿地景观演变及驱动力分析. 水土保持学报, 2004, 18(2): 118~121.
- [15] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1031~1040.
- [16] 郑红星. GIS 支持下黄河流域水循环时空演化规律研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文. 2001.
- [17] 陶华, 胡珊. 察尔森水库建成后社会评价. 东北水利水电, 2000, 18(6): 4~5.
- [18] 郭跃东, 何岩, 邓伟. 洮儿河中下游流域景观格局的形成及水环境效应分析. 水土保持学报, 2003, 17(6): 32~35.
- [19] 闫守信, 李孝民, 周卫军. 察尔森水库施工对环境的破坏及后期治理. 东北水利水电, 2003, 21(3): 49~51.

## Variations in the hydrological cycle components and their influencing factors in the middle and upper reaches of Tao'erhe River Basin

JIANG De-juan<sup>1,2</sup>, LI Li-juan<sup>1</sup>, HOU Xi-yong<sup>2</sup>, LIANG Li-qiao<sup>1,3</sup>,  
ZHANG Li<sup>1,3</sup>, LI Jiu-yi<sup>1,3</sup>, XU Ming-xing<sup>4</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, CAS, Yantai 264003, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

4. Baicheng Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Jilin 137000, China)

**Abstract :** Taking the middle and upper Tao'erhe River Basin as a study area, this paper analyzes variations of runoff, precipitation and temperature, etc. for the period 1961-2000. Time series analysis of characteristic parameters is used to examine the influences of climate change and land use and land cover change (LUCC) on runoff. And the response of runoff to water resources development (extraction for use) is estimated quantitatively based on the comparison between the observed and natural runoff data of Taonan hydrological station during 1961-2000. Some conclusions are drawn as follows: (1) The observed mean annual runoff is 38.2 m<sup>3</sup>/s for the past four decades, showing a trend of decrease - increase - decrease. The interannual and seasonal variations of runoff are greatly notable and the mean monthly runoff shows an unobvious trend according to the analysis result with the Kendall method. Over the period, annual precipitation has increased slightly to 427 mm. December's mean precipitation has increased significantly by the analysis result with the Kendall method. The mean annual temperature is 5.48 with a much greater value in the second half of the period (1986-2000); (2) The annual natural runoff is positively correlated with annual precipitation, and negatively correlated with annual temperature, and these relationships become weaker over time. Therefore, the increase of annual natural runoff coefficient under the same precipitation frequency may have mainly resulted from the decreasing vegetation cover. A wet year would have more impact on runoff than a dry year; (3) Water resources development decrease the annual runoff depth by 21.2 mm during the period 1986-2000, accounting for 37.1% of the mean annual natural runoff over the 40 years.

**Key words :** hydrological cycle; climate change; land use and land cover change; water resources development; Tao'erhe River Basin

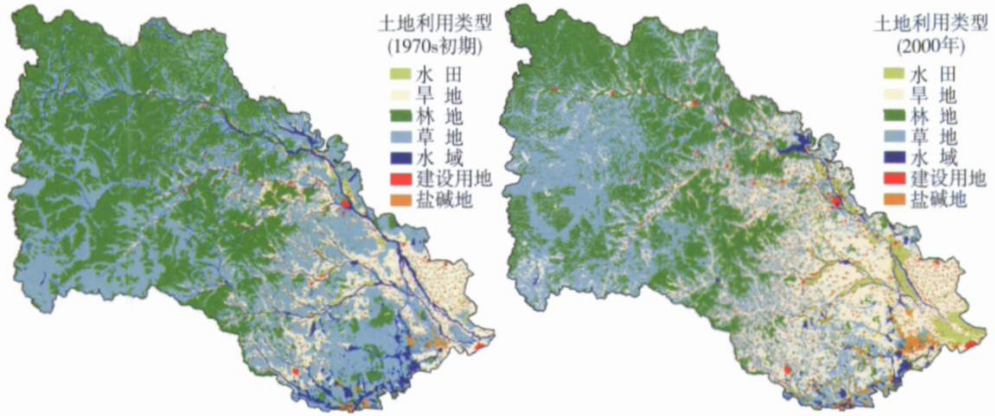


图2 70年代初期和2000年土地利用空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of land use in the early 1970s and 2000

程 磊 等：SWAT在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例

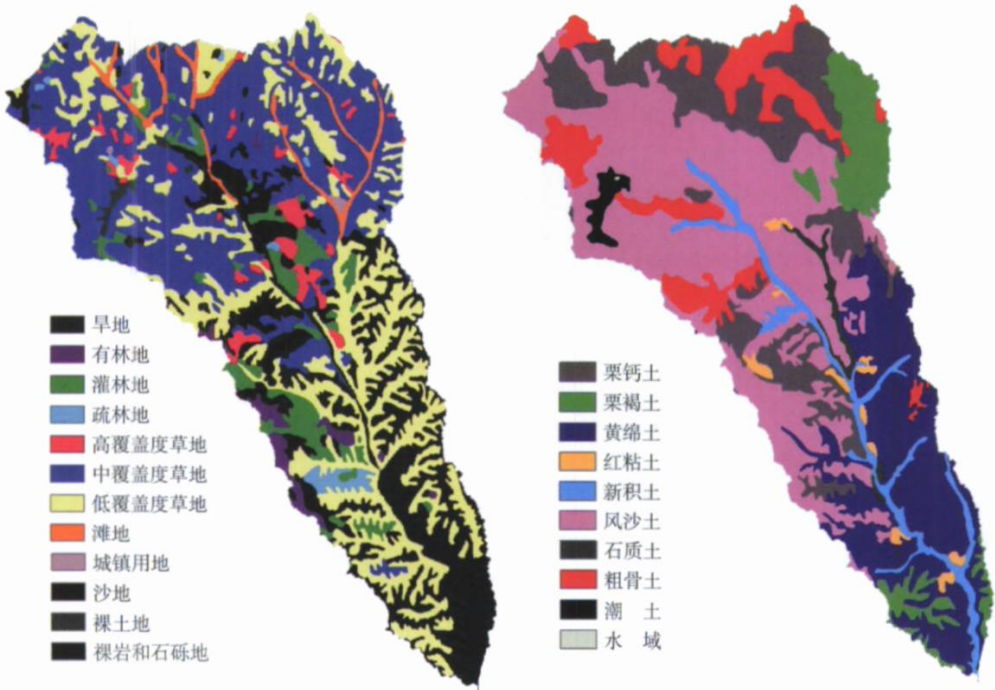


图3 土地利用/覆被分类图

Fig.3 Land-use/cover classification map

图4 土壤类型图

Fig.4 Soil type map