

# 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究

刘剑宇<sup>1,2</sup>, 张强<sup>3,4</sup>, 陈喜<sup>5</sup>, 顾西辉<sup>1,2</sup>

(1. 中山大学水资源与环境系, 广州 510275; 2. 中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州 510275; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 5. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:** 利用中国 372 个水文站月径流数据(1960-2000 年)及 41 个水文站年径流数据(2001-2014 年), 采用基于 Budyko 假设的水热耦合平衡方程, 构建气候变化和人类活动对径流变化影响定量评估模型, 在 Penman-Monteith 潜在蒸发分析基础上, 进一步分析气象因子对径流变化的弹性系数, 量化气候变化和人类活动对径流变化的影响。结果表明: ① 中国北方地区流域径流变化对各气象因子弹性系数明显大于中国南方地区。就全国而言, 径流变化对各因子的弹性系数为: 降水>土地利用/土地覆盖变化(LUCC)>相对湿度>太阳辐射>最高气温>风速>最低气温; ② 1980-2000 年, 气候变化总体上有利于增加中国年径流量, 而降水对年径流量增加的贡献最为显著; ③ 1980-2000 年, 中国南方流域中, 气候变化对年径流变化的影响以增加作用为主, 而北方流域, 以减少年径流作用为主。对中国大多数流域径流变化而言, 人类活动的影响主要以减少年径流量为主。2001-2014 年, 气候变化以减少径流量为主, 人类活动对径流变化的影响程度明显增强, 气候变化与人类活动对径流变化的贡献率分别为 53.5%、46.5%。该研究对气候变化与人类活动影响下, 中国水资源规划管理、防灾减灾及保障水资源安全具有重要理论与现实意义。

**关键词:** 径流变化; Budyko 假设; 弹性系数; 气候变化; 人类活动; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201611001

## 1 引言

近年来, 变化环境下流域水循环及水资源演变研究已成为国内外水科学领域的研究热点, 气候变化和人类活动作为变化环境的重要组成部分, 其带来的水文效应受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。目前, 在评估气候变化和人类活动对径流变化影响方面, 主要有两类方法: 基于水文模拟的方法和基于 Budyko 假设的水量平衡方法<sup>[4]</sup>。前者的优点是水文模型有一定机理性解释, 且从日到年等不同时间尺度上, 模型模拟有显著优势。但模型结构和参数的不确定性及流域内地形、土壤、植被和气候之间关系的复杂性等, 影响了模型响应范围以及模型变异性<sup>[5]</sup>。此外, 模型模拟对数据质与量的要求较高, 分布式模型尤其如

收稿日期: 2016-07-09; 修订日期: 2016-10-22

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金项目(51425903); 国家自然科学基金重大项目(51190091); 安徽省自然科学基金项目(1508085MD65) [Foundation: National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China, No.51425903; Major Program of National Natural Science Foundation of China, No.51190091; Anhui Provincial Natural Science Foundation, No.1508085MD65]

**作者简介:** 刘剑宇(1991-), 男, 江西丰城人, 博士生, 主要从事气象水文学研究。E-mail: liujianyu68@163.com

**通讯作者:** 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事气象水文学研究。

E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

此<sup>[6]</sup>, 而并非所有流域均有如此完备的数据。基于Budyko水热耦合平衡理论的水量平衡法较传统的数理统计经验法具有明显物理意义, 且计算过程相对简单, 参数较易获取, 在年及多年时间尺度上, 是一种理想的分析方法<sup>[7]</sup>, 已被广泛应用于流域径流变化归因研究<sup>[8-9]</sup>。

在流域径流变化特征归因分析方面, 在具体流域尺度上已有较多研究。许多学者对中国各大江河流域径流变化进行了归因分析, 如长江流域<sup>[10]</sup>, 长江流域的支流岷江流域<sup>[11]</sup>以及鄱阳湖流域<sup>[12]</sup>。所用的研究方法较多, 有统计方法, 如线性回归法<sup>[10]</sup>、双累积曲线法<sup>[11]</sup>等。也有部分研究综合运用统计方法、水文模型模拟以及基于Budyko假设的灵敏度分析法等<sup>[12]</sup>。相关研究在黄河流域<sup>[13-14]</sup>、海河流域<sup>[9]</sup>、西北地区<sup>[15]</sup>等也有较多开展。上述研究对于理解具体流域径流变化成因具有重要意义。然而, 上述研究运用的方法不同, 对比时段不同, 难以进行大空间尺度对比研究。事实上, 已有少量在全国尺度探讨气候变化对径流变化影响的研究, Yang等<sup>[16]</sup>基于Budyko假设的水热耦合平衡方程, 针对中国210个子流域, 评估气候变化(降水、蒸发)对径流变化率的影响。而已有研究主要针对的是气候变化的影响, 对于人类活动对径流变化的影响, 并未开展定量研究, 缺乏径流对人类活动响应的系统研究。同时, 在运用基于Budyko假设的水热耦合平衡方程开展相关研究时, 考虑不同气象因子对径流变化影响的尚少<sup>[17]</sup>, 如太阳辐射、气温、相对湿度等的影响。已有诸多研究表明<sup>[18-19]</sup>, FAO修正的Penman-Monteith模型适用于不同气候类型区潜在蒸散发量计算及气候变化对水循环影响研究。因此, 可以尝试以修正的Penman-Monteith蒸发来推导各气象因子对径流的弹性系数, 进一步量化蒸发因子(最高气温、最低气温、太阳辐射、风速和相对湿度)对径流变化的影响。

基于目前径流变化归因研究现状, 结合中国气候变化与人类活动影响下水资源时空特征、机理及归因研究的实际需求, 针对中国水资源10大流域片区372个水文站点的月径流数据, 基于Budyko假设的水热耦合平衡方程, 系统地量化气候变化与人类活动对中国各流域径流变化影响, 并结合FAO修正的Penman-Monteith模型, 进一步推求太阳辐射、最高气温、最低气温、风速、相对湿度5个蒸发因子对径流变化的弹性系数, 量化各蒸发因子对径流变化的影响。该研究对全面而深入探讨变化环境下水循环过程及水资源演变机理, 理解气候变化和人类活动对中国各大流域径流演变相对贡献具有重要理论意义, 对于中国水资源规划管理, 防灾减灾及保障水资源安全具有重要现实意义。

## 2 研究区域和数据

本文搜集了中国372个水文站点1960-2000年月径流数据(图1), 并收集其中41个主要河流代表水文站2001-2014年径流数据, 径流数据来源于水利部数据中心。径流数据缺测率小于1%, 缺测值采用前后7年滑动平均进行插值。同时收集了中国气象局1960-2014年的815个气象站的常规观测数据(图1), 每个站点包括日降水量、日平均气温等12个气象指标。全国共分为10大流域片区(图1): 珠江流域(PR)、长江流域(YZR)、淮河流域(HuR)、海河流域(HR)、黄河流域(YR)、辽河流域(LR)、松花江流域(SHR)、东南诸河(SER)、西南诸河(SWR)、西北诸河(NWR)。

基于美国地质调查局1 km空间分辨率高程数据, 提取中国10大流域片区372水文站点对应集水范围(子流域)(图1)。采用反距离权重法对降水( $P$ )、太阳辐射( $R_n$ )、最高气温( $T_{\max}$ )、最低气温( $T_{\min}$ )、风速( $U_2$ )、相对湿度( $RH$ )进行空间插值。各气象要素插值到100 m×100 m的网格上, 再利用ArcGIS中Zonal Histogram工具提取每个子流域相应气象要素面平均值。

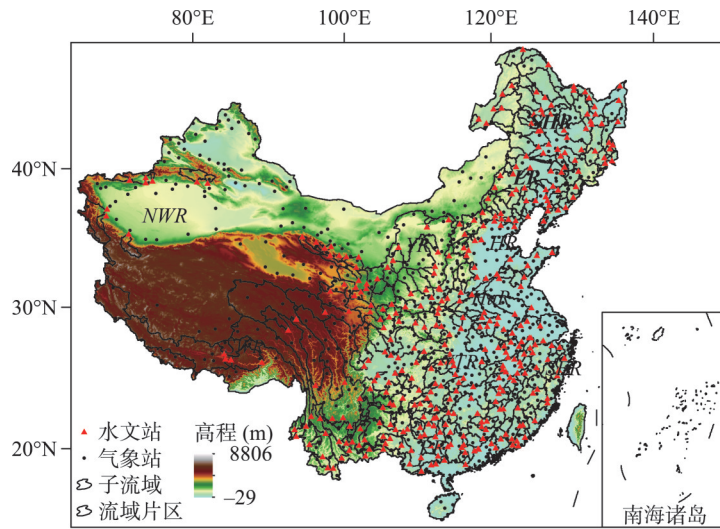


图1 中国气象、水文站点和主要流域片区分布

Fig. 1 Locations of meteorological and hydrological stations in China

### 3 研究方法

#### 3.1 各因子弹性系数分解

Budyko<sup>[20]</sup>认为在较长时间尺度上，流域蒸发量是流域降水和径流的函数。Yang等<sup>[21]</sup>基于Budyko假设，推导出流域水热耦合平衡方程，表达式如下：

$$E = \frac{PE_0}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中： $E$ 为多年平均实际蒸发； $P$ 为多年平均降水； $E_0$ 为多年平均潜在蒸发； $n$ 为下垫面特征参数（LUCC）。根据流域多年平均的水量平衡方程， $R=P-E$ ，可得 $R=f(P, E_0, n)$ 。采用实验误差法， $n$ 以0.001为增量从0到10试算，取使方程误差最小的值作为相应流域的下垫面参数 $n$ 的值。

Roderick等<sup>[22]</sup>根据蒸发皿蒸发公式导出气象因子对蒸发皿蒸发贡献率的微分方程。由于FAO修正的Penman-Monteith模型<sup>[23]</sup>适用于不同气候类型区潜在蒸散发量计算及气候变化对水循环的影响研究<sup>[18-19]</sup>，因此本文基于修正的Penman-Monteith公式，分解各蒸发因子变化对潜在蒸发变化的全微分方程：

$$dE_0 \approx \frac{\partial E_0}{\partial R_n} dR_n + \frac{\partial E_0}{\partial T} dT_{\max} + \frac{\partial E_0}{\partial T} dT_{\min} + \frac{\partial E_0}{\partial U_2} dU_2 + \frac{\partial E_0}{\partial RH} dRH \quad (2)$$

结合Budyko水热耦合平衡方程，导出降水（ $P$ ）、LUCC（ $n$ ）、太阳辐射（ $R_n$ ）、最高气温（ $T_{\max}$ ）、最低气温（ $T_{\min}$ ）、风速（ $U_2$ ）和相对湿度（ $RH$ ）对径流变化的全微分方程：

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_n \frac{dn}{n} + \varepsilon_{R_n} \frac{dR_n}{R_n} + \varepsilon_{T_{\max}} \frac{dT_{\max}}{T_{\max}} + \varepsilon_{T_{\min}} \frac{dT_{\min}}{T_{\min}} + \varepsilon_{U_2} \frac{dU_2}{U_2} + \varepsilon_{RH} \frac{dRH}{RH} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_P = \frac{\partial f}{\partial P} \frac{P}{R}$ ， $\varepsilon_{E_0} = \frac{\partial f}{\partial E_0} \frac{E_0}{R}$ ， $\varepsilon_n = \frac{\partial f}{\partial n} \frac{n}{R}$ ， $\varepsilon_{R_n} = \varepsilon_{E_0} \frac{R_n}{E_0} \frac{\partial E_0}{\partial R_n}$ ， $\varepsilon_{T_{\max}} = \varepsilon_{E_0} \frac{T_{\max}}{E_0} \frac{\partial E_0}{\partial T_{\max}}$ ， $\varepsilon_{T_{\min}} = \varepsilon_{E_0} \frac{T_{\min}}{E_0} \frac{\partial E_0}{\partial T_{\min}}$ ， $\varepsilon_{U_2} = \varepsilon_{E_0} \frac{U_2}{E_0} \frac{\partial E_0}{\partial U_2}$ ， $\varepsilon_{RH} = \varepsilon_{E_0} \frac{RH}{E_0} \frac{\partial E_0}{\partial RH}$ 。  $\varepsilon_P$ 、 $\varepsilon_{E_0}$ 、 $\varepsilon_n$ 、 $\varepsilon_{R_n}$ 、 $\varepsilon_{T_{\max}}$ 、 $\varepsilon_{T_{\min}}$ 、 $\varepsilon_{U_2}$ 、 $\varepsilon_{RH}$  分别是降水、潜在蒸发、LUCC、太阳辐射、最高气温、最低气温、风

速、相对湿度对径流变化的弹性系数。无量纲，便于径流变化对不同因子敏感度的对比。

### 3.2 各因子对径流变化的相对贡献率

根据公式(3)，可得各因子对径流变化的影响量公式：

$$\Delta R_x = \varepsilon_x \frac{R}{x} \Delta x \quad (4)$$

式中： $R$ 为多年平均年径流量； $x$ 为径流变化的某一影响因子，包括降水、LUCC、太阳辐射、最高气温、最低气温、风速和相对湿度； $\varepsilon_x$ 为各因子对径流变化的弹性系数； $\Delta R_x$ 为相应因子对径流变化的影响量。

Tan等<sup>[24]</sup>采用基于Budyko假设的水热耦合平衡方程对加拿大径流变化进行归因分析，认为下垫面参数 $n$ 的变化对径流的影响可以表征为人类活动的影响，其影响量主要受下垫面变化、水库建设、土地利用及社会经济发展状况（人口、GDP）等人类活动的影响。气候变化通过改变降水、气温、相对湿度等气象因子对径流变化产生影响，降水、太阳辐射、最高气温、最低气温、风速和相对湿度对径流变化影响量之和，即为气候变化对径流变化的影响量。气候变化和人类活动对径流变化影响的相对贡献率可用下式表示：

$$\delta R_{\text{clim}} = \frac{\Delta R_{\text{clim}}}{\Delta} \times 100\%, \quad \delta R_{\text{hum}} = \frac{\Delta R_{\text{hum}}}{\Delta} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $\Delta R_{\text{clim}}$ 、 $\Delta R_{\text{hum}}$ 分别为气候变化影响量与人类活动影响量； $\Delta$ 为气候变化和人类活动影响量的绝对值之和； $\delta R_{\text{clim}}$ 、 $\delta R_{\text{hum}}$ 分别为气候变化和人类活动对径流变化的相对贡献率（%）。

### 3.3 径流序列趋势突变检验

选用国际气象组织推荐的Mann-Kendall检测年径流序列趋势特征<sup>[25]</sup>，为去除时间序列自相关性，采用修正的Mann-Kendall检测法<sup>[26]</sup>。不同突变点检测结果可能存在差异，本文选用多个突变点检测方法进行综合判定。Killick等<sup>[27]</sup>于2014年开发“changepoint”包，提出基于似然函数框架的AMOC检验法具有较大灵活性，可以克服序列正态分布假设。Villarini<sup>[28]</sup>认为Pettitt检验对异常值不敏感的特点适合运用于突变点检验。刘剑宇等<sup>[29]</sup>对比8种常用突变检验方法，认为有序聚类检验能有效检测出径流变化突变点。因此，本文采用AMOC检验、有序聚类检验、Pettitt检验3种方法对年径流序列进行突变检验，取多数方法检验一致且非处在序列两端的变异点作为最终突变点。

## 4 结果分析

为便于对比气候变化和人类活动对中国不同流域片区径流变化贡献率，本文拟采用统一的时间点分割径流序列。一般以流域水库平均建成时间<sup>[30]</sup>或各站点径流序列平均突变时间作为整个研究区水文站点径流序列的分割点<sup>[24]</sup>。图2a为中国10大流域475座大水库建成时间，可以看出大多数流域片区（除SWR以外），水库建成时间50%或75%分位数分布在1980年或1980年之前，全国大型水库平均建成时间为1972年。图2b为中国372个水文站点径流序列突变点检测结果，各流域片区径流序列突变时间的50%分位数多数分布在1980年之前，所有水文站径流序列平均突变时间为1980年。从经济发展方面来看，1980年中国刚进行改革开放，工农业生产以及满足工农业发展的水利工程建设开始迅速发展，许多流域年径流量变化表现出明显减少趋势<sup>[31]</sup>。综上考虑，本文采用1980年为径流序列分割点，将径流时间序列分割为时段1（1960-1979年）和时段2（1980-2000年）。

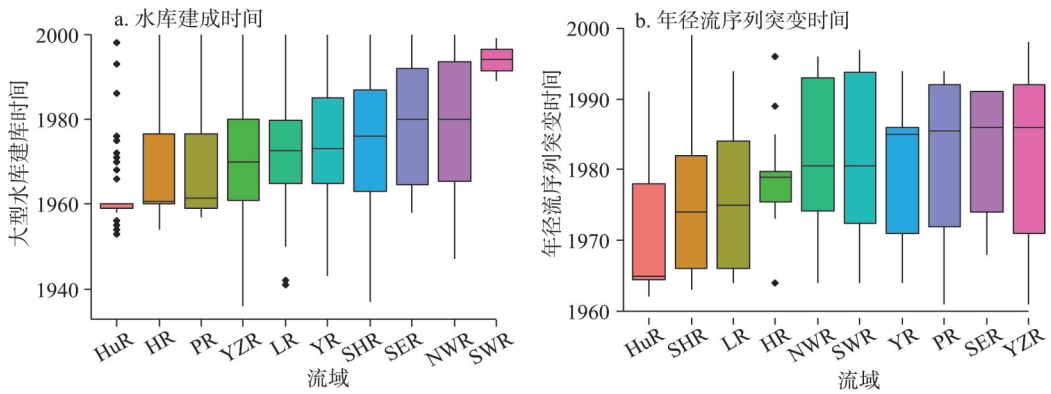


图2 中国10大流域片区水库建成时间及年径流序列突变时间

Fig. 2 Construction time of large reservoirs and change-points of annual runoff series in 10 river basins in China

### 4.1 径流对各气象因子和LUCC的弹性系数

弹性系数绝对值大小反应流域径流变化对该影响因子变化的敏感程度<sup>[9]</sup>。从图3可知，不同流域径流变化对各因子的敏感程度存在明显差异。松花江、辽河、海河、黄

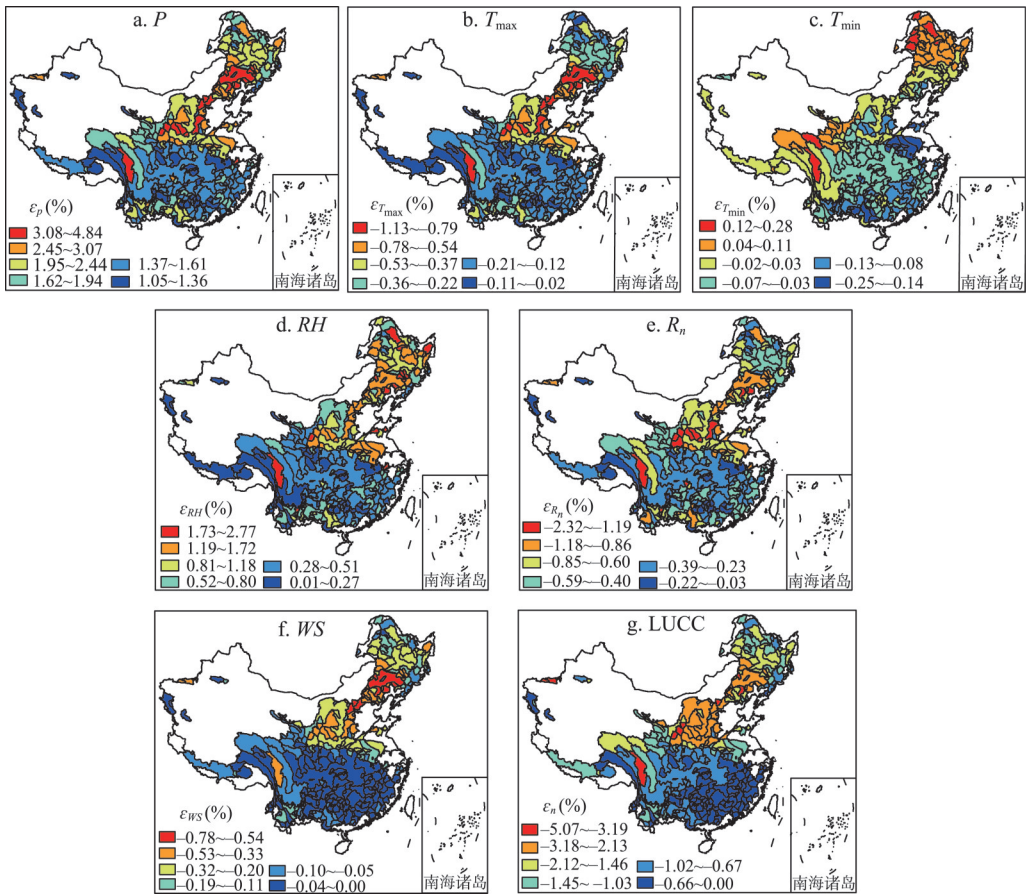


图3 中国各流域径流变化对各影响因子的弹性系数空间分布

Fig. 3 Elasticity of annual runoff to annual precipitation, maximum air temperature, minimum air temperature, relative humidity, net radiation, wind speed, and landscape parameter *n* over the 372 catchments across China

河、淮河流域的大多数子流域径流对降水的弹性系数在1.62~4.84之间(平均为2.24),表明这些流域降水量增加10%将导致径流量平均增加22.4%。而长江流域、珠江流域、西南诸河、西北诸河、东南诸河的大部分地区降水弹性系数在1.05~1.61之间(平均为1.57)。北方大部分子流域径流对LUCC弹性系数在-1.46~-5.07之间(平均为-1.58),表明LUCC参数 $n$ 增加10%径流量将减少14.6%~50.7%。径流变化对降水、相对湿度的弹性系数均为正(图3a、3d),表明降水、相对湿度对径流变化有正向驱动作用。径流变化对最高温度、最低气温、太阳辐射、风速和LUCC的弹性系数为负(图3b、3c、3e、3f、3g),表明这些因子对径流变化有负驱动作用。径流变化对最低气温的弹性系数在西北、东北部分地区表现异常,这是由这些区域多年平均最低气温低于零度所致。相对湿度的增加,流域蒸散发减少,进而使得产汇流损失减少,径流增加;相反,太阳辐射的增强,气温的升高以及风速的增加,使得流域蒸散发增加,进而导致径流量减少。下垫面参数 $n$ 为表征植被、土壤等流域下垫面特征的参数<sup>[21]</sup>,参数 $n$ 增大,流域植被覆盖面积增加,植被保持水土功能增强,从而导致径流减少。

径流变化对降水和LUCC较其他因子更为敏感,其中辽河流域径流变化对降水最为敏感,西北诸河对LUCC最为敏感。总体而言,北方地区径流变化对各因子的弹性系数明显大于南方地区,表明气候相对干燥地区径流变化对气候变化和LUCC更为敏感。径流对各因子的敏感度为:降水>LUCC>相对湿度>太阳辐射>最高气温>风速>最低气温。Yang等<sup>[17]</sup>结合基于Budyko假设的水热耦合平衡方程和1948 Penman蒸发,评估不同气象因子对黄河、海河流域径流变化的影响,研究结果表明径流变化对降水、气温、太阳辐射、风速和相对湿度的平均弹性系数分别为1.6~3.9、-0.02~-0.11、-0.3~-1.9、-0.1~-0.8和0.2~1.9,与本文研究结果基本一致(图3)。然而还存在一定差异,这是由于对比时段存在差别,此外蒸发因子对径流的弹性系数分解也是基于不同的潜在蒸发模型。另外,该文中气温的弹性系数为气温变化1℃径流变化的百分数,与本文定义有所差别,故气温的弹性系数差别较大。

#### 4.2 各因子对径流变化的影响

将全国各站点模拟径流变化量( $\Delta R_p + \Delta R_{R_n} + \Delta R_{T_{\max}} + \Delta R_{T_{\min}} + \Delta R_{U_2} + \Delta R_{RH}$ )与实测径流变化量作比较(图4),模拟径流变化量与实测径流变化量拟合程度较高,两者的相关系数为0.998,模拟径流变化量与实测径流变化量平均相差0.56 mm,平均误差率为6.24%。因此,基于Budyko假设的水热耦合平衡方程适合运用于本文研究。

各因子变化对径流变化影响存在较大的空间差异性(图5)。降水变化增加松花江流域、长江流域中下游、珠江流域东部、东南诸河、西南诸河、西北诸河大多数子流域年径流量,尤其在长江流域下游地区降水大幅度增加径流量,部分站点年径流深增加超过81 mm(图5a)。在辽河流域南部、海河流域、黄河流域、淮河流域、珠江流域中西部,降水量变化减少大多数水文站点年径流

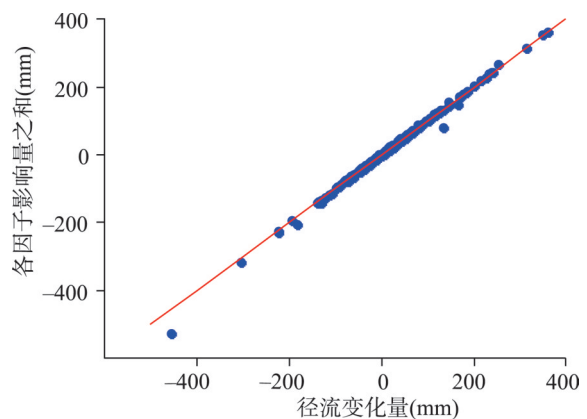


图4 模拟径流与实测径流对比(红色实线为1:1直线)  
Fig. 4 Comparison between the modeled streamflow and observed streamflow change (the red line is a 1:1 straight line)

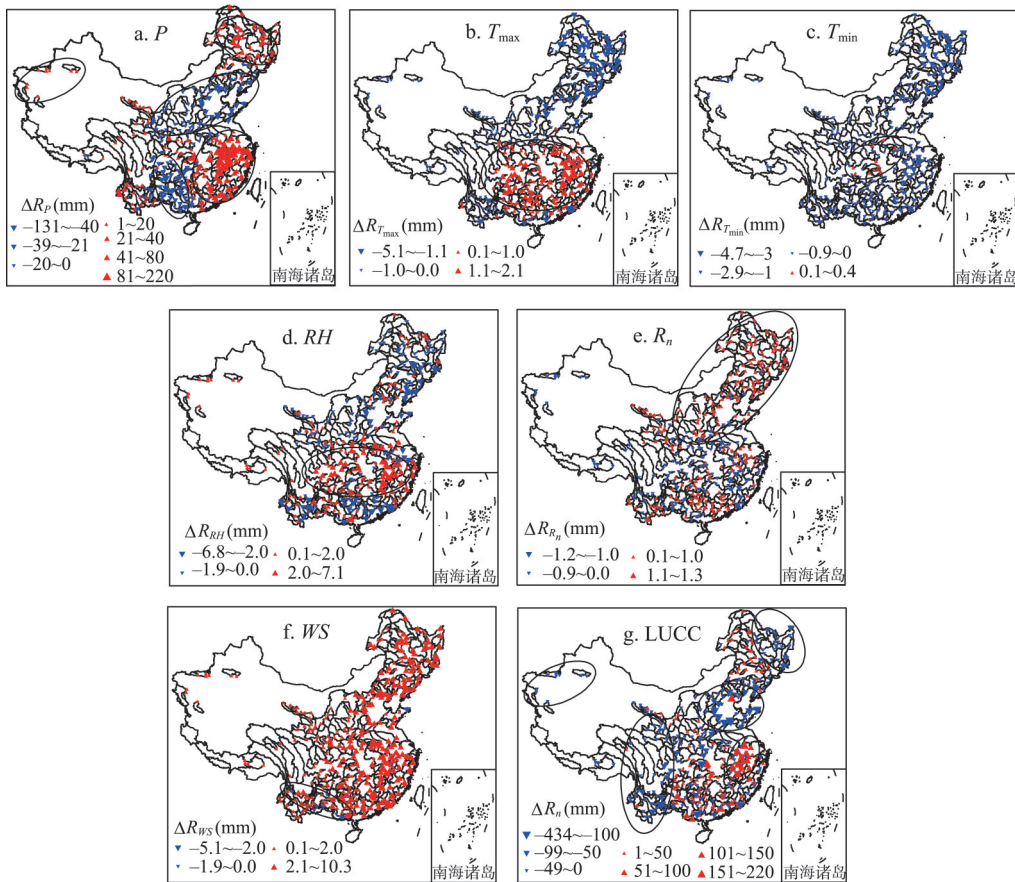


图5 各因子变化对中国372水文站径流变化影响量空间分布

Fig. 5 Contributions of each factor to changes in streamflow for 372 catchments across China

量, 其中黄河流域、海河流域、长江流域中部及珠江流域中部地区降水减少径流深达40 mm以上。最高气温(图5b)增加南方大多数地区站点年径流量, 对北方地区径流变化基本上表现为减少作用。最低气温(图5c)除对中部地区少量子流域径流有增加作用外, 在其他区域的径流均表现为减少作用。相对湿度(图5d)对径流深影响量空间变异性较大, 相对湿度主要增加长江流域中下游径流量, 部分站点增加径流深2.0~7.1 mm。太阳辐射(图5e)对径流变化影响较小, 少量增加北方地区年径流。风速变化(图5f)增加全国绝大多数子流域年径流量。图5g为LUCC对径流深影响量空间分布图, 从图5g中可以看出LUCC对径流影响较大, 且空间变异性明显, 在松花江流域东部、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域西北部、西北诸河、西南诸河的大多数子流域LUCC均表现为减少径流作用, 尤其是海河流域及黄河流域中下游地区的部分子流域, LUCC减少年径流深超过50 mm。就全国而言, 各因子对径流变化影响量的绝对值大小依次为: 降水>LUCC>风速>最低气温>最高气温>相对湿度>太阳辐射。

#### 4.3 气候变化和人类活动对径流变化影响定量分解研究

为进一步分析径流变化的主导因素, 图6给出气候变化影响量( $\Delta R_p + \Delta R_{R_n} + \Delta R_{T_{max}} + \Delta R_{T_{min}} + \Delta R_{U_2} + \Delta R_{RH}$ )和人类活动影响量(LUCC影响量 $\Delta R_n$ )的相对大小对比。从图6a可以看出, 南方地区和西北地区大多数站点径流变化以气候变化为主导因素; 对于北方

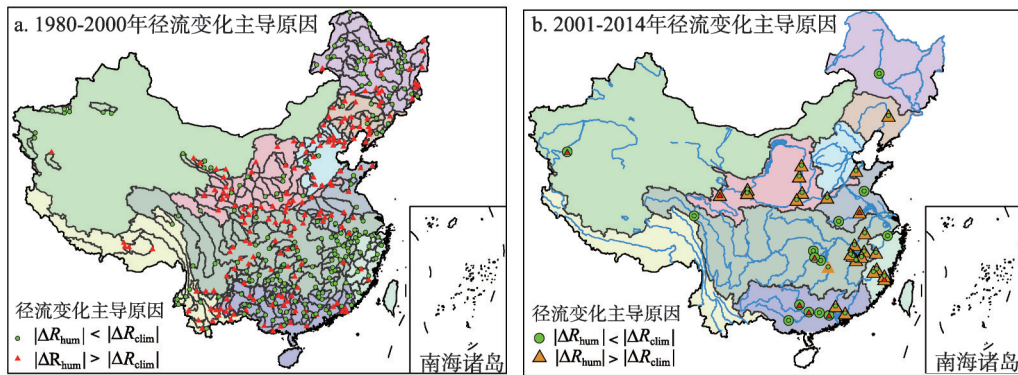


图6 气候变化和人类活动对中国各大流域径流变化贡献率相对大小对比空间分布

Fig. 6 The spatial distributions of relative role between direct human and climate factors to changes in streamflow

地区,部分子流域以人类活动为主导因素,包括松花江流域东部、海河流域、辽河流域中部、黄河流域的大多数子流域,另一部分则以气候变化为主导,如松花江流域绝大多数站点径流变化以气候变化为主导。该时期气候在南方地区(珠江、长江、松花江、东南诸河、西南诸河流域)主要表现为增加径流作用,在北方地区(海河、淮河、黄河、辽河流域)主要表现为减少径流作用。人类活动以减少径流作用为主,除珠江流域、东南诸河、长江流域外,其他流域片区人类活动均减少径流,尤其是黄河流域,人类活动平均减少径流深19.4 mm,这主要受该时期黄河流域大规模的生态修复工程的影响<sup>[13]</sup>。相对而言,长江流域、松花江流域、西北诸河、东南诸河以气候变化为主导,气候变化贡献率分别为78.7%、76.9%、65.7%、84.2%;珠江流域、淮河流域、海河流域、黄河流域、辽河流域、西南诸河以人类活动影响占主导,人类活动贡献率分别为59.4%、77.3%、66.2%、69.7%、75.3%、70.4%。就全国径流变化而言,气候变化和人类活动主导水文站点数量相当,分别为192、180站,气候变化影响量占主导地位,气候变化和人类活动对径流变化贡献率分别为71.0%、29.0%。

为探讨气候变化和人类活动对近期主要河流径流变化的影响,图6b给出了2001-2014年径流变化(相对于1960-1979年)的主导因素。尽管所搜集到的包含该时段的径流数据仅有41站点,但这些站点均为主要河流代表性水文站,各站点平均控制流域面积为19.31 km<sup>2</sup>,一定程度上能代表流域的整体情况。1980-2000年主要河流代表性水文站径流变化主要受气候变化影响,41站有33站以气候变化为主导(图6b)。2001-2014年,41站中有26站径流变化主要是由人类活动引起,其中的22站是由1980-2000年以气候变化为主导的站点转变而来,如黄河干流站点(唐乃亥站除外)、辽河干流控制性站点铁岭站、珠江流域的西江和北江控制性站点石角和博罗站、长江干流控制性站点大通站等。该时期气候变化以减少径流作用为主,尤其是珠江流域、长江流域,气候变化平均分别减少径流深62.3 mm、11.6 mm。相对而言,珠江流域、淮河流域、松花江流域、西北诸河流域以气候变化影响为主,气候变化影响量分别为92.0%、67.8%、68.4%、72.2%;长江流域、黄河流域、辽河流域、东南诸河以人类活动影响为主,人类活动影响量分别为60.9%、83.1%、58.9%、84.8%。就全国径流变化而言,气候变化和人类活动的贡献率分别为53.5%、46.5%。对比两个时期径流变化的归因结果可见,2001-2014年人类活动对径流影响程度大幅增加,说明日益加剧的人类活动对流域水循环和水资源演变产生了更大的影响,人类活动对径流变化的影响不容忽视。



## 5 结论

本文系统评估了气候变化和人类活动对中国10大流域片区372个水文站点径流变化的影响,基于FAO-PM公式推导出最高气温、最低气温、相对湿度、风速、相对湿度5个蒸发因子对径流变化的弹性系数计算公式,量化气候变化(降水、太阳辐射、最高气温、最低气温、风速、相对湿度)和人类活动(LUCC)对径流变化的贡献率,主要得出以下结论:

(1)气候相对干燥的北方地区流域径流变化对各气象因子和下垫面因子弹性系数明显大于相对湿润的南方地区,北方地区径流变化对气候变化和人类活动较南方地区更为敏感。降水、相对湿度对径流变化有正向驱动作用,最高温度、最低温度、太阳辐射、风速和LUCC变化对径流变化有负向驱动作用。就全国而言,径流对各因子的敏感度为:降水>LUCC>相对湿度>太阳辐射>最高气温>风速>最低气温。

(2)气候变化通过改变降水、气温、相对湿度等气象因子对径流变化产生影响。1980-2000年,降水变化总体上增加中国河流径流量,平均增加径流深12.1 mm。风速变化总体增加各大流域片区径流量,最低气温变化总体减少各大流域片区径流量。最高气温和相对湿度变化对北方流域片区以增加径流作用为主,对南方流域片区以减少径流为主。太阳辐射变化对径流变化影响相对较小。就全国而言,各气象因子对径流变化影响量绝对值大小依次为:降水>风速>最低气温>最高气温>相对湿度>太阳辐射。

(3)1980-2000年,气候变化在南方流域片区主要表现为增加径流作用,在北方流域片区主要表现为减少径流作用,人类活动以减少径流为主,对径流变化的贡献率为29.0%。2001-2014年,气候变化以减少径流作用为主,人类活动影响程度大幅增加,气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为53.5%、46.5%。

## 参考文献(References)

- [1] Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *science*, 2008, 319(5866): 1080-1083.
- [2] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [3] Hu Shanshan, Zheng Hongxing, Liu Changming, et al. The impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 62-70. [胡珊珊, 郑红星, 刘昌明, 等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响. *地理学报*, 2012, 67(1): 62-70.]
- [4] Wang X. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview. *Advances in Water Resources*, 2014, 71: 209-218.
- [5] Sivapalan M. Prediction in ungauged basins: A grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, 2003, 17(15): 3163-3170.
- [6] Yang Dawen, Li Chong, Ni Guangheng, et al. Application of distributed hydrological model to the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 143-154. [杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用. *地理学报*, 2004, 59(1): 143-154.]
- [7] Dooge J C I. Sensitivity of runoff to climate change: A Hortonian approach. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(12): 2013-2024.
- [8] Zheng H, Zhang L, Zhu R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 641-648.
- [9] Xu X, Yang D, Yang H, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540.
- [10] Zhao Y, Zou X, Gao J, et al. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and

- sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 803-812.
- [11] Zhang M, Wei X, Sun P, et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: The case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River basin. *Journal of Hydrology*, 2012, 464: 1-11.
- [12] Zhang Q, Liu J, Singh V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China. *Hydrological Processes*, 2016.
- [13] Liang W, Bai D, Wang F, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [14] Sun Weiguo, Cheng Bingyan, Li Rong. Multitime scale correlations between runoff and regional climate variations in the source region of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(1): 117-127. [孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关. *地理学报*, 2009, 64(1): 117-127.]
- [15] Li Baofu, Chen Yaning, Chen Zhongsheng, et al. The effect of climate change during snowmelt period on streamflow in the mountainous areas of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1461-1470. [李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响. *地理学报*, 2012, 67(11): 1461-1470.]
- [16] Yang H, Qi J, Xu X, et al. The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 607-616.
- [17] Yang H, Yang D. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): 197-203.
- [18] Liu Changming, Zhang Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579-588. [刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588.]
- [19] Zhu Guofeng, He Yuanqing, Pu Tao, et al. Spatial distribution and temporal trends in potential evaporation over Hengduan Mountains Region from 1960 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 905-916. [朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 等. 1960-2009年横断山区潜在蒸发量时空变化. *地理学报*, 2011, 66(7): 905-916.]
- [20] Budyko M I. *Climate and Life*. San Diego, CA: Academic, 1974.
- [21] Yang H, Yang D, Lei Z, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation. *Water Resources Research*, 2008, 44(3).
- [22] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): 251-270.
- [23] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*-[2] FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [24] Tan X, Gan T Y. Contribution of human and climate change impacts to changes in streamflow of Canada. *Scientific Reports*, 2015, 5.
- [25] Chebana F, Ouarda T B M J, Duong T C. Testing for multivariate trends in hydrologic frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 519-530.
- [26] Zhang Q, Qi T, Li J, et al. Spatiotemporal variations of pan evaporation in China during 1960-2005: Changing patterns and causes. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(6): 903-912.
- [27] Killick P. Changepoint: An R package for changepoint analysis. *Journal of Statistical Software*, 2014, 58(3): 1-19.
- [28] Villarini G, Serinaldi F, Smith J A, et al. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): W08417.
- [29] Liu Jianyu, Zhang Qiang, Gu Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5477-5485. [刘剑宇, 张强, 顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量. *生态学报*, 2015, 35(16): 5477-5485.]
- [30] Poff N L R, Olden J D, Merritt D M, et al. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(14): 5732-5737.
- [31] Zhang Jianyun, Zhang Silong, Wang Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years. *Advances in Water Science*, 2007(2): 230-234. [张建业, 章四龙, 王金星, 等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究. *水科学进展*, 2007(2): 230-234.]

## Quantitative evaluations of human- and climate-induced impacts on hydrological processes of China

LIU Jianyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>3,4</sup>, CHEN Xi<sup>5</sup>, GU Xihui<sup>1,2</sup>

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

5. School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on monthly streamflow data from 372 stations covering the period 1960-2000 and the monthly streamflow data from 41 stations covering the period 2001-2014 across China, human- and climate-induced impacts on hydrological processes were quantified for 10 river basins in China based on development of Budyko-based coupled water-energy balance model. Penman-Monteith potential evapotranspiration model was used to analyze evapotranspiration processes. Besides, elasticity coefficient was also quantified for the impacts of meteorological variables on streamflow changes. The results indicated that: (1) Compared to southern China, streamflow changes are more sensitive to climate changes and human activities in northern China. Generally, relative humidity changes have positive impacts on streamflow changes. However, the maximum temperature, minimum temperature, solar radiation, wind speed and LUCC changes tend to go against streamflow changes. The elasticity coefficients of streamflow changes for meteorological variables are: precipitation > LUCC > relative humidity > solar radiation > maximum temperature > wind speed > minimum temperature; (2) Climate changes during 1980-2000 generally help to increase annual streamflow, and the increase of streamflow by precipitation changes is most evident, and the increase of streamflow depth reaches 12.1 mm. However, impacts of meteorological variables on streamflow changes are shifting from one river basin to another, e.g. the maximum temperature and relative humidity help to increase streamflow in northern China but decrease streamflow magnitude in southern China; (3) In general, human activities tend to decrease streamflow. Changes of streamflow in the Yangtze, Songhua, Northwest, and Southeast river basins are 78.7%, 76.9%, 65.7%, and 84.2%, respectively, which can be attributed to climate changes. However, human activities play a dominant role in modifications of streamflow changes, such as Pearl River basin, Huaihe River basin, Haihe River basin, Yellow River basin, Liaohe River basin and southwest river basins, with fractional contribution being 59.4%, 77.3%, 66.2%, 69.7%, 75.3%, and 70.4%, respectively. Generally, the fraction of human activities and climate changes to streamflow changes in the river basins across China can reach 71.0% and 29.0% respectively in river basins, where climate changes play a dominant role in streamflow changes. The results of this study can be helpful to human mitigation to climate changes in terms of water resources management.

**Keywords:** streamflow changes; elasticity coefficient; Budyko hypothesis; climate changes; human activities; China