

# 降水与农业种植变化对黄河流域径流影响研究

李华贞<sup>1</sup>, 张 强<sup>2\*</sup>, 顾西辉<sup>3</sup>, 史培军<sup>2</sup>

(1. 中山大学水资源与环境系, 广州 510275; 2. 北京师范大学 a. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室,  
b. 地表过程与资源生态国家重点实验室, c. 减灾与应急管理研究院, 北京 100875;  
3. 中国地质大学大气科学系, 武汉 430074)

**摘要:** 黄河是我国西北、华北地区重要水源, 了解其径流变化特征及成因有着重要意义。论文基于趋势性分析、广义可加模型(GAMLSS)等方法, 采用黄河流域近60 a来流量、降水、主要农业种植面积及大型水库资料等数据, 通过细化农业小麦生长期与玉米和大豆生长期以及假定不同降水情景, 在季节尺度上深入分析了1960—2005年黄河流域气候、农业种植面积等变化对径流的影响。研究结果表明: 1) 黄河流域5个水文站点小麦生长期与玉米和大豆生长期径流变异点均发生于20世纪80年代中后期和90年代初期, 且除花园口站小麦生长期间径流有少部分呈上升趋势外, 黄河流域整体呈下降趋势, 其中, 唐乃亥、兰州的小麦生长期、玉米和大豆生长期及龙门、花园口的玉米和大豆生长期趋势均达到了0.05的显著性水平, 呈显著下降趋势; 2) 对比两种降水假设状态, 暴雨年的径流始终高于小雨年的径流, 因此, 降水仍是影响径流的主要因子之一, 而农业种植面积变化对径流的影响程度, 不仅与降水量的多少有关, 还与流量分位数的大小有关, 对于唐乃亥站小麦生长期的暴雨年时期, 增加农作物种植面积, 在低流量分位数时可以增加径流, 而在高于0.75分位数时会减小径流, 小雨年时期规律相反。该研究结果对变化环境下黄河流域水资源管理与优化配置具有一定理论与现实意义。

**关 键 词:** 黄河流域; 径流变化; 趋势性; 季节性; GAMLSS模型

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2018)08-1402-14

黄河流域位于我国中北部, 流域内的气候类型大致可以归纳为干旱、半干旱和半湿润气候, 降雨量偏少, 降水年际变化大、季节分配不均。近几十年来, 在气候变化和人类活动的双重影响下, 黄河流域地表水文过程发生了显著变化, 水资源状况不断恶化, 且多次发生断流现象, 正面临着严峻的水问题<sup>[1]</sup>, 而黄河是我国西北、华北地区的重要水源, 因此, 黄河流域水问题一直是人们关注的热点问题<sup>[2]</sup>。

国内外学者对径流变化特征及成因开展了大量研究。Khoi等<sup>[3]</sup>采用SWAT模型对比研究了不同气候变化情景下气温和降水变化对越南流域径流的影响。Javan等<sup>[4]</sup>应用PRECIS模型和HSPF模型研究了伊朗Gharehsoo流域未来气候变化及其对径流的影响, 结果表明, 该流域未来降水和气温均会增加, 而径流则会减少。Lu等<sup>[5]</sup>利用SWAT模型和GCM

收稿日期: 2017-08-15; 修訂日期: 2018-03-07。

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51425903); 地表过程模型与模拟国家基金委创新群体(41621061); 国家自然科学基金项目(41401052)。[Foundation items: National Outstanding Youth Science Fund Project, No. 51425903; Land Surface Process Model and Simulation National Innovation Group, No. 41621061; National Natural Science Foundation of China, No. 41401052.]

第一作者简介: 李华贞(1993-), 女, 河南扶沟人, 硕士研究生, 现从事气象水文学研究。E-mail: lihzh28@mail2.sysu.edu.cn

\*通信作者简介: 张强(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事气象水文极值模拟及理论研究、灾害过程及机理与综合风险模拟与评估等领域研究。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

模式气候输出研究了 Mississippi 上游气候与水文过程之间的关系，并指出气温和降水对径流的影响程度还与月份有关。另外，也有研究探讨土地利用变化对径流的影响<sup>[6-7]</sup>，分析了不同土地利用方式的变化对径流的影响。Tran 等<sup>[8]</sup>以 Mississippi 上游为研究对象运用 OLS 回归非线性模型进行了土地利用对径流的影响研究。Thanapakpawin 等<sup>[9]</sup>通过构建退耕还林和林地变为耕地等方案，运用 DHSVM 模型研究了泰国 Mae Chaem 流域土地利用变化对水循环的影响，发现灌溉面积的比例、农作物类型和农作物需水量均对径流量级有很明显的影响。庞靖鹏等<sup>[10]</sup>、林桂英等<sup>[11]</sup>均采用 SWAT 模型对流域径流量进行模拟，发现土地利用对径流量的变化起显著作用。农业活动对径流变化的影响也引起了人们的关注，如 Lorup 等<sup>[12]</sup>研究表明，由于人口增长和农业活动增强，使得 Zimbabwe 流域年径流量有所减少。

对于黄河的研究，张国胜等<sup>[13]</sup>、马雪宁等<sup>[14]</sup>通过 EOF、Morlet 小波分析等方法指出降水量是影响黄河流域径流量的直接气候因子。黄荣辉等<sup>[15]</sup>也通过 SWAT 模型研究指出，黄河上游和源区从 20 世纪 90 年代初到 21 世纪初降水的减少可能是导致径流锐减的主要原因，而同时期黄河源区气温的明显上升并没有导致此区域蒸发量的太大变化，它对径流变化影响不大。而李道峰等<sup>[16]</sup>、车骞等<sup>[17]</sup>以黄河河源区为研究对象，通过 SWAT 模型模拟不同气温和降水情景下的年径流量，发现降水增加或者气温降低均能使流域径流量增加。Li 等<sup>[18]</sup>利用弹性系数法分析了黄河河口龙门区间 1957—2010 年降水和径流变化，发现降水对径流量减少的贡献率为 26.4%。而李剑锋等<sup>[19]</sup>使用滑动秩和检验分析水文变异，并对水文变异成因做了系统分析，研究认为降水量下降和水利工程的联合调控是黄河流域年径流量减少的主要原因。Miao 等<sup>[20]</sup>采用水文法研究发现气候变化主要对黄河上游水沙变化产生较大影响，而人类活动对中下游水沙变化产生较大影响。已有研究多从年尺度考虑降水与水库调节对黄河流域径流过程的影响，而以种植面积、作物种类及季节性作为研究对象还是比较少。本文除考虑降水变化以外，还考虑水库调节以及农业种植面积等多种因素，从季节变化角度探讨这些因子对黄河流域水文过程的影响。本文在季节尺度上将降水、径流和农作物数据划分为小麦生长期（10 月—翌年 4 月）与玉米和大豆生长期（5—9 月）两类指标，同时将年径流细分为 21 个不同流量分位数，量化气候、农业种植面积变化和水库等人类活动对黄河流域径流变化的影响，为黄河流域水资源管理、水土资源可持续利用提供理论依据。

## 1 研究区和数据

黄河干流长 5 464 km，流域总面积达 79.5 万 km<sup>2</sup>（其中含内流区面积 4.2 万 km<sup>2</sup>），流域范围为 95°53' ~ 119°05' E、32°10' ~ 41°50' N 之间（图 1）。黄河流域东部濒临海洋，西部则为内陆，因此降水、蒸发、光热资源等气候条件差异很明显，总体来说，西部地区比较干旱，而东部地区则显得湿润。流域内的气候类型大致可以归纳为干旱、半干旱和半湿润气候，流域大部分地区年降水量在 200~650 mm 之间，多年平均蒸发量在 700~1 800 mm 之间。黄河流域降水集中但分布不均，6—10 月的降水量占全年的 65%~85%，最大暴雨主要发生在 7—8 月。黄河流域大部分地区光热资源充足，农业生产发展潜力大，流域内共有耕地 1 553.2 万 hm<sup>2</sup>。此外，黄河下游流域外引黄灌区土地面积为 656 万 hm<sup>2</sup>，有效灌溉面积约 247.1 万 hm<sup>2</sup>。近 30 a 流域粮食产量连续增长，2015 年粮食总产量达到 4 370 万 t。黄河流域作为我国重要农业区之一，粮食产量约占全国的 14%，对保障区域乃

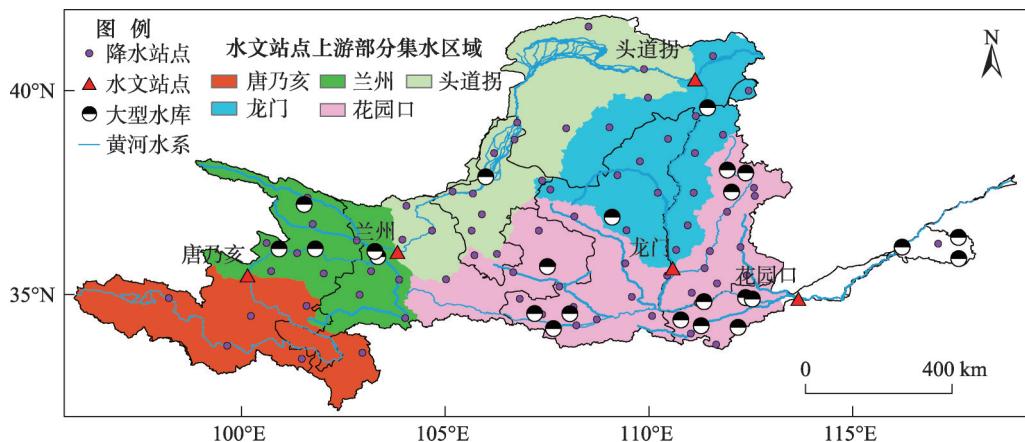


图1 黄河流域水文站点集水区域示意图

Fig. 1 The catchment areas of the hydrological stations in the Yellow River Basin

至国家粮食安全具有重要作用。

本文采用黄河流域77个气象站1960—2014年逐日降水资料、1949—2014年大型水库数据（包括库容、建库时间等）、农作物种植面积以及唐乃亥、兰州、头道拐、龙门、花园口5个水文站1960—2005年逐日流量资料，数据分别来自中国气象局气候中心、黄河委水文局和国家数据共享网。本文根据农作物生长特征，划分为两个季节：即10月—翌年4月为小麦生长期，这个季节中，主要种植的农作物为小麦<sup>[21-22]</sup>；而5—9月为玉米和大豆生长期，这个季节中，主要种植的农作物为玉米和大豆<sup>[23]</sup>。按季节性将降水、径流和农作物数据划分为两类，即小麦生长期（10月—翌年4月）指标和玉米和大豆生长期（5—9月）指标。为方便数据分析，基于z-score标准化方法分别对小麦生长期降水、玉米和大豆生长期降水、小麦生长期农作物、玉米和大豆生长期农作物及水库5个指标数据作标准化处理。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势和变异点分析

本文采用国际气象组织（WMO）建议使用的非参数Mann-Kendall（MK）趋势检验法<sup>[24]</sup>和参数的AMOC检验法<sup>[25]</sup>，分别对黄河流域水文站点的小麦生长期与玉米和大豆生长期径流作趋势分析和变异点检测。单变异点检测方法（AMOC）可以克服序列正态分布假设的限制，不需预先设置变异点位置，可同时用来检测均值和方差变异，并能够延展至多突变点检测<sup>[26]</sup>，应用更为广泛。

非参数MK趋势检验法的原理是假设有一时间序列如下： $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，构造一秩序列 $m_i$ ， $m_i$ 表示 $X_i > X_j (1 \leq j \leq i)$ 的样本累积数。构造统计量<sup>[24]</sup>：

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

在原序列随机独立的情况下，将 $d_k$ 标准化，构造统计量<sup>[24]</sup>：

$$UF_k = \left[ d_k - \frac{k(k-1)}{4} \right] / \sqrt{\frac{k(k-1)(2k+5)}{72}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$UF_i=0$ ,  $UF_i$ 服从标准正态分布。取显著水平 $\alpha$ , 若 $|UF_i|>U_\alpha$ , 说明序列趋势性显著。再计算反序列, 重复式(1)、式(2), 得到 $UB_k$ ( $k=n, n-1, \dots, 1$ )。同样,  $UB_1=0$ 。给定显著性水平0.05, 则临界值 $U_{0.05}=\pm 1.96$ 。当 $UF_k$ 或 $UB_k$ 大于0时, 时间序列呈上升趋势; 当 $UF_k$ 或 $UB_k$ 小于0时, 则呈下降趋势。如果 $UF_k$ 或 $UB_k$ 超过临界值, 则趋势性显著。

参数的AMOC检验法的原理是假设时间序列 $y_{1:n}=(y_1, \dots, y_n)$ 存在变异点, 且变异点位于 $\tau_1$ ( $\tau_1 \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ ) 相应于 $\tau_1$ 的最大对数似然估计为<sup>[26]</sup>:

$$ML(\tau_1)=\log p\left(y_{1:\tau_1} \mid \hat{\theta}_1\right)+\log p\left(y_{(\tau_1+1): n} \mid \hat{\theta}_2\right) \quad (3)$$

式中:  $p(\cdot)$ 为时间序列的概率密度函数;  $\hat{\theta}$ 为最大对数似然估计的参数。基于式(3)可以计算每个可能变异位置上的最大对数似然估计, 然后, 根据检验统计值 $\lambda$ 确定最终变异点的位置<sup>[26]</sup>:

$$\lambda=2\left[\max _{\tau_1} M L\left(\tau_1\right)-\log p\left(y_{1:n} \mid \hat{\theta}\right)\right] \quad (4)$$

根据式(4), 当检验统计值达到显著性水平0.1时, 认为时间序列发生了变异。

## 2.2 GAMLSS模型

本文采用有伽玛分布的广义可加模型, 假设 $Q_i$ 为预测值, 在本文中, 它代表不同流量分布分位数的时间序列, 从年最小( $Q_0$ )到年最大( $Q_{1.00}$ )的日平均流量, 步长为0.05, 共划分21个分位数段(分别为 $Q_0, Q_{0.05}, \dots, Q_{0.50}, \dots, Q_{1.00}$ )。因变量 $q_i$ 相互独立且服从分布函数 $f_Q(q_i|\theta_i)$ , 分布参数向量 $\theta_i(i=1, 2, \dots, p)$ (位置、尺度参数), 将年降雨量( $x_r$ )、主要农业耕作面积( $x_a$ )和大型水库( $x_s$ )作为协变量<sup>[27]</sup>:

$$f_Q(q_i \mid \mu_i, \sigma_i)=\frac{1}{\left(\sigma_i^2 \mu_i\right)^{1 / \sigma_i^2}} \frac{q_i^{(1 / \sigma_i^2)-1} \exp \left[-q_i /\left(\sigma_i^2 \mu_i\right)\right]}{\Gamma(1 / \sigma_i^2)} \quad (5)$$

位置参数 $\mu_i$ 和尺度参数 $\sigma_i$ 是随时间变化的预测变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的线性函数。

$$\begin{aligned} \mu_{it} &= \log\left(\alpha_{0i}+\alpha_{1i} x_{rt}+\alpha_{2i} x_{rt} x_{at}+\alpha_{3i} x_{st}\right) \\ \sigma_{it} &= \log\left(\beta_{0i}+\beta_{1i} x_{rt}+\beta_{2i} x_{rt} x_{at}+\beta_{3i} x_{st}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ 和 $\beta$ 为各项系数;  $Q_i$ 的期望值为 $\mu_i$ , 方差为 $\mu_i^2 \sigma_i^2$ 。

本文主要选用残差worm图及Filliben系数检查模型的拟合质量。残差worm图图示法相较于其他方法计算量小, 也最为直观, 同时为了避免结果的判定受到主观性因素的影响, 参照Michael拟合优度检验方法<sup>[28]</sup>给出了这些图形的接受区间。

为更好地评价农业活动在不同流量分位数与降水量之间的作用关系, 本文首先通过分析2005年和不同参考年之间农业种植面积变化下径流差异百分比来反映降水变化对径流影响的边际效应, 选择的参考年均为该流域不同的农业发展时期, 因5个水文站点各自集水区域内农业种植面积的变化规律各不相同, 而参考年主要是选取农业种植面积从上升到下降趋势或从下降到上升趋势的转折点作为该农业发展时期的代表年<sup>[27]</sup>, 所以各站点选用不同的参考年。构建如下代数式<sup>[27]</sup>:

$$\left\{\left[\alpha_{1i}+\alpha_{2i} x_a(2005)\right]-\left[\alpha_{1i}+\alpha_{2i} x_a(t)\right]\right\} /\left[\alpha_{1i}+\alpha_{2i} x_a(t)\right] \quad (7)$$

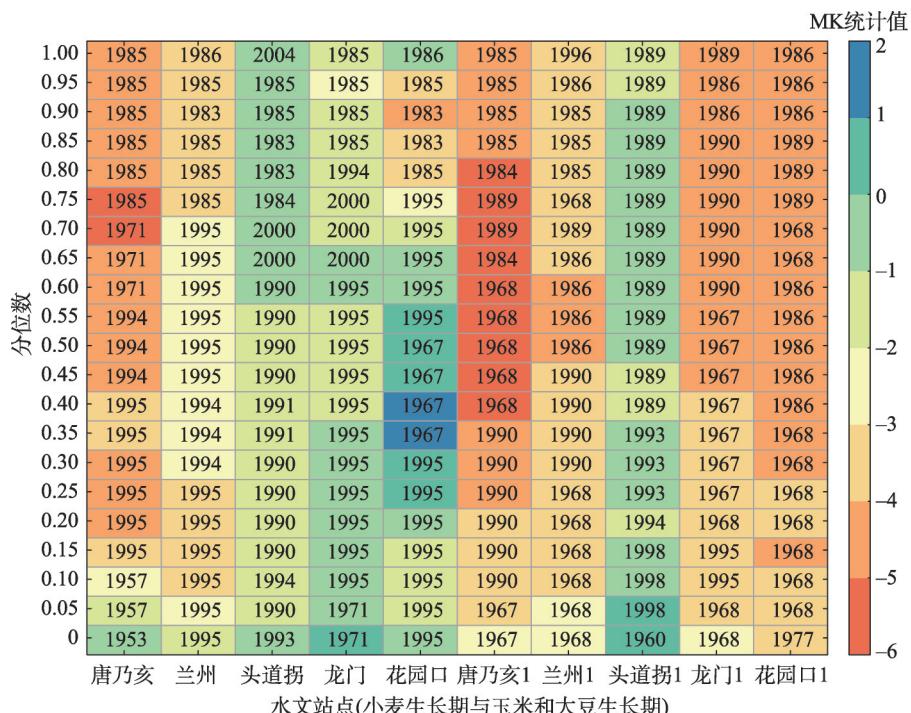
式中: 对唐乃亥站, 小麦生长期的 $t$ 取1961、1968、1980和1992年, 玉米和大豆生长期

的  $t$  取 1959、1961、1968 和 1989 年；对兰州站，小麦生长期的  $t$  取 1967、1970、1983 和 1992 年，玉米和大豆生长期的  $t$  取 1967、1970、1985 和 1999 年；对头道拐站，小麦生长期的  $t$  取 1958、1965、1968 和 1973 年，玉米和大豆生长期的  $t$  取 1958、1976、1979 和 1985 年；对龙门站，小麦生长期的  $t$  取 1965、1968、1976 和 1995 年，玉米和大豆生长期的  $t$  取 1965、1976、1985 和 1999 年；对花园口站，小麦生长期的  $t$  取 1949、1954、1968 和 1990 年，玉米和大豆生长期的  $t$  取 1949、1956、1967 和 1985 年。

为进一步分析在不同的降水情景下，农业种植面积的季节性变化对径流的影响，分别选取研究时段小麦生长期与玉米和大豆生长期降水较多的暴雨年份和降水较少的小雨年份作为参考年，基于暴雨年份（小雨年份）的降水，即将降水指标统一在某一水平，来分析农业种植面积的季节性变化对径流的影响<sup>[27]</sup>。计算公式如下：

$$\mu_u = \log(\alpha_{0i} + \alpha_{1i}x_{rn} + \alpha_{2i}x_{rn}x_{at} + \alpha_{3i}x_{sn}) \quad (8)$$

式中： $t$  等于 1949、1978 和 2014 年； $n$  为各个站点研究时段内对应的暴雨年份和小雨年份。唐乃亥站，小麦生长期的  $n$  取 1961 和 2002 年，玉米和大豆生长期的  $n$  取 1967 和 1988 年；兰州站，小麦生长期的  $n$  取 1961 和 1987 年，玉米和大豆生长期的  $n$  取 1967 和 1965 年；头道拐站，小麦生长期的  $n$  取 1964 和 2004 年，玉米和大豆生长期的  $n$  取 1961 和 1965 年；龙门站，小麦生长期的  $n$  取 1964 和 1995 年，玉米和大豆生长期的  $n$  取 1964 和 1965 年；花园口站，小麦生长期的  $n$  取 1961 和 2012 年，玉米和大豆生长期的  $n$  取 1964 和 1997 年。



注：“唐乃亥”代表小麦生长期，“唐乃亥1”代表玉米和大豆生长期，其余 4 站类似；左侧 5 列为各站点小麦生长期的径流变异点和趋势，方格中的年份即为对应不同流量分位数下的径流最佳变异时间点；图中颜色（即 MK 检测统计值）代表径流变化趋势的显著程度。

图 2 黄河流域 5 个水文站点小麦生长期与玉米和大豆生长期的径流变化趋势和变异时间点图

Fig. 2 Trends and change points of streamflow series during the growth period of wheat and growth period of maize and soybean at the five hydrological stations in the Yellow River Basin

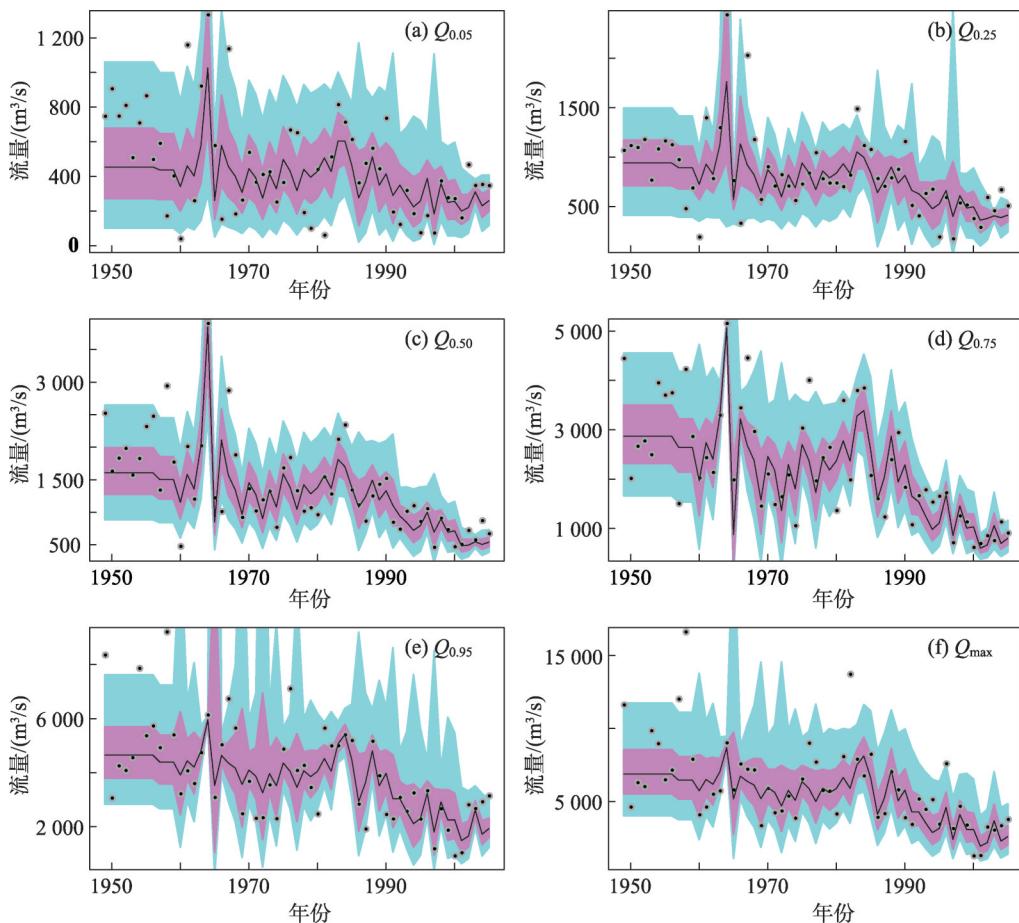
### 3 结果

#### 3.1 径流变化变异点和趋势特征

图2为黄河流域5个水文站点分别在小麦生长期和玉米和大豆生长期的径流变化趋势和变异时间点。可见，5个水文站点小麦生长期和玉米和大豆生长期的径流变异点均发生在20世纪80年代中后期和90年代初期。同时，除花园口站小麦生长期径流有少部分呈上升趋势外，黄河流域径流整体呈下降趋势，其中，唐乃亥、兰州的小麦生长期、玉米和大豆生长期及龙门、花园口的玉米和大豆生长期趋势均达到了0.05的显著性水平，呈显著下降趋势。

#### 3.2 基于GAMLS的径流模拟和拟合优度检验

因篇幅有限，本文仅选用花园口站研究玉米和大豆生长期在考虑玉米和大豆生长期降水、农作物和水库3个指标因素条件下，在不同流量分位数下建模（从低到高等间距选取6个不同流量分位数<sup>[27]</sup>）。分析结果（图3）表明，无论对低流量分位数还是高流量分



注：黑线代表50%分位数，红色区域为25%和75%分位数范围，蓝色区域为5%和95%分位数范围，黑点表示实测值。

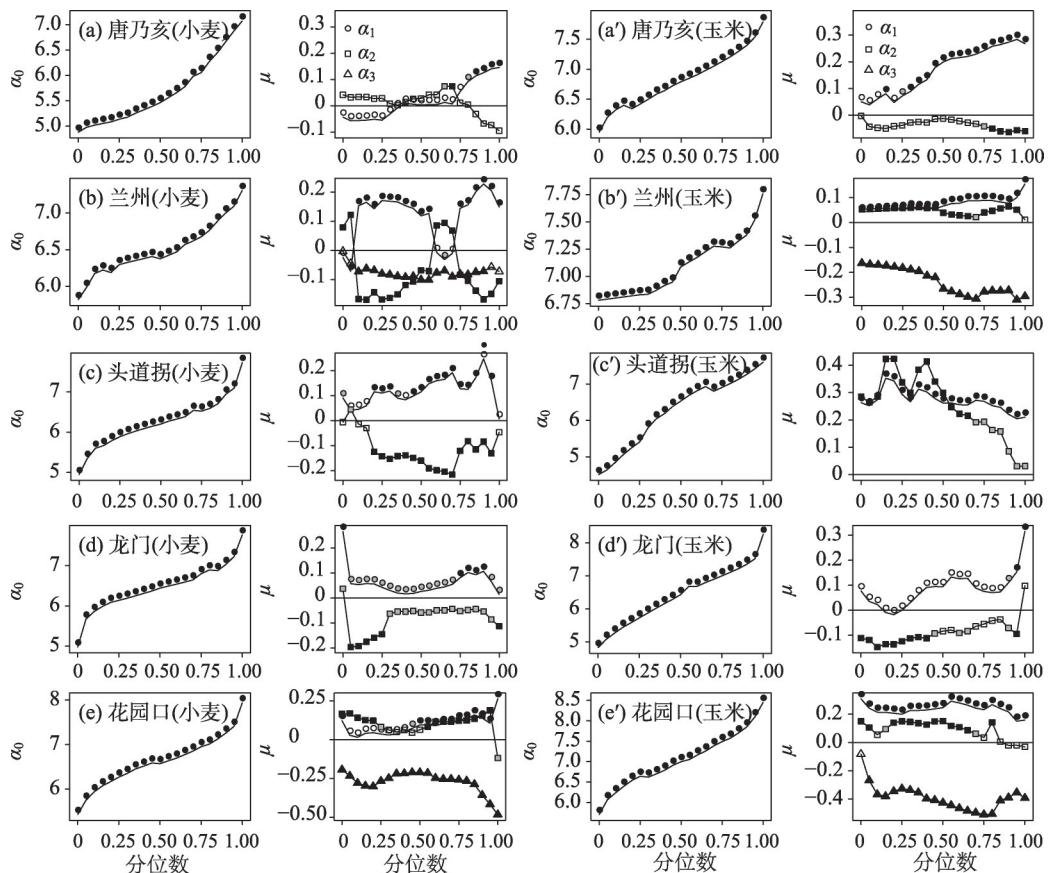
图3 花园口站玉米和大豆生长期不同流量分位数建模结果

Fig. 3 Modeling of different flow quantiles during the growth period of maize and soybean at Huayankou Station

位数, 这些模型都可很好地模拟出流量随时间变化的规律, 且不同流量分位数随时间变化趋势基本一致, 实测点与中位线越接近, 5%和95%分位数范围越小, 表明拟合效果越明显。通过花园口站玉米和大豆生长期模型残差 worm图及 Filliben 系数检查模型拟合质量分析表明, 各模型标准残差点均位于95%置信区间内, 花园口站玉米和大豆生长期模型拟合效果很好。总体来说, 黄河流域5个站点小麦生长期和玉米和大豆生长期的模型拟合效果均较好, 基于GAMLSS的径流模拟适用于本文研究。

### 3.3 GAMLSS模拟分析和两种情景假设实验

图4为不同流量分位数下小麦生长期和玉米和大豆生长期GAMLSS模型中分别对应于不同指标因素的系数 $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 随不同流量分位数的变化情况, 反映了控制径流量级和可变性的主要决定因素。对于5个水文站点的小麦生长期和玉米和大豆生长期, 位置参数 $\mu$ 的截距 $\alpha_0$ 均随流量分位数的增加而单调增加; 降水是对径流有显著增强作用的影响因子, 与降水相关的系数 $\alpha_1$ 均大于0且大多达到5% (10%) 的显著性水平, 这与李道峰等<sup>[16]</sup>得出的结论“降水对径流以正贡献为主”相一致; 水库是对径流有显著减弱作用的影响因子<sup>[29]</sup>, 与水库相关的系数 $\alpha_3$ 均小于0且均达到5%的显著性水平; 而农作物



注: 黑色(灰色)填充的点代表参数达到5% (10%) 的显著性水平, 白色点代表参数未达到10%的显著性水平; 水文站点括号中“小麦”表示小麦生长期, “玉米”表示玉米和大豆生长期。

图4 不同流量分位数下小麦生长期与玉米和大豆生长期 Gamma 分布的参数依赖程度

Fig. 4 Dependence of the parameters of the gamma distribution at the different flow quantiles during the growth period of wheat and growth period of maize and soybean

指标对径流的影响效果较为复杂，且对不同流量分位数的影响作用又存在较大差异。总的来说，5个站点小麦生长期以及唐乃亥和龙门的玉米和大豆生长期农作物指标对径流有显著减弱作用。

图5和图6为基于代数式(7)的黄河流域2005年和几个不同参考年之间农业季节性变化下径流差异百分比的结果。从图5和图6整体来看，除唐乃亥和兰州站外，其余3站的径流差异百分比均小于0，降水对径流的边缘影响有减弱趋势，因此，降水除对唐乃亥和兰州站小麦生长期径流的间接影响较强外，对其余3站小麦生长期与玉米和大豆生长期径流的间接影响均较弱；图中与2005年越为接近的年份，百分比变化趋势越为平缓且趋近于0，降水的季节性变化对径流的边缘影响作用越弱。小麦生长期龙门和花园口站在不同流量分位数时的径流差异百分比均小于0，降水对径流的间接影响均有高达70%的减弱趋势[图5(d)和(e)]。小麦生长期唐乃亥站在低流量分位数时的径流差异百分比小于0，降水对径流有减弱趋势，而在高流量分位数时百分比大于0，降水对径流有高达

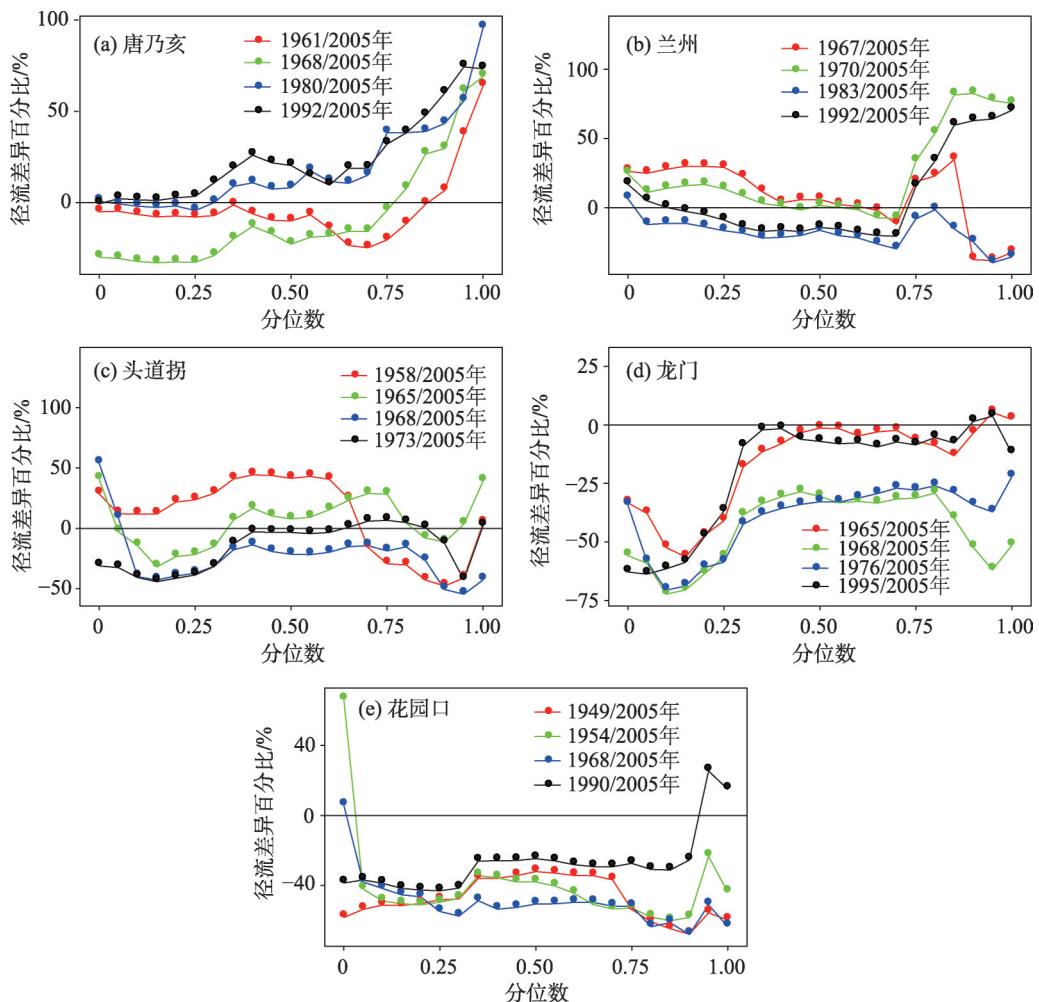


图5 不同参考年到2005年不同分位数下小麦生长期农业面积变化对降水径流关系的影响

Fig. 5 The impact of cropland changes on the relation between rainfall and average streamflow at different quantile levels during the growth period of wheat of the year 2005 and different reference years

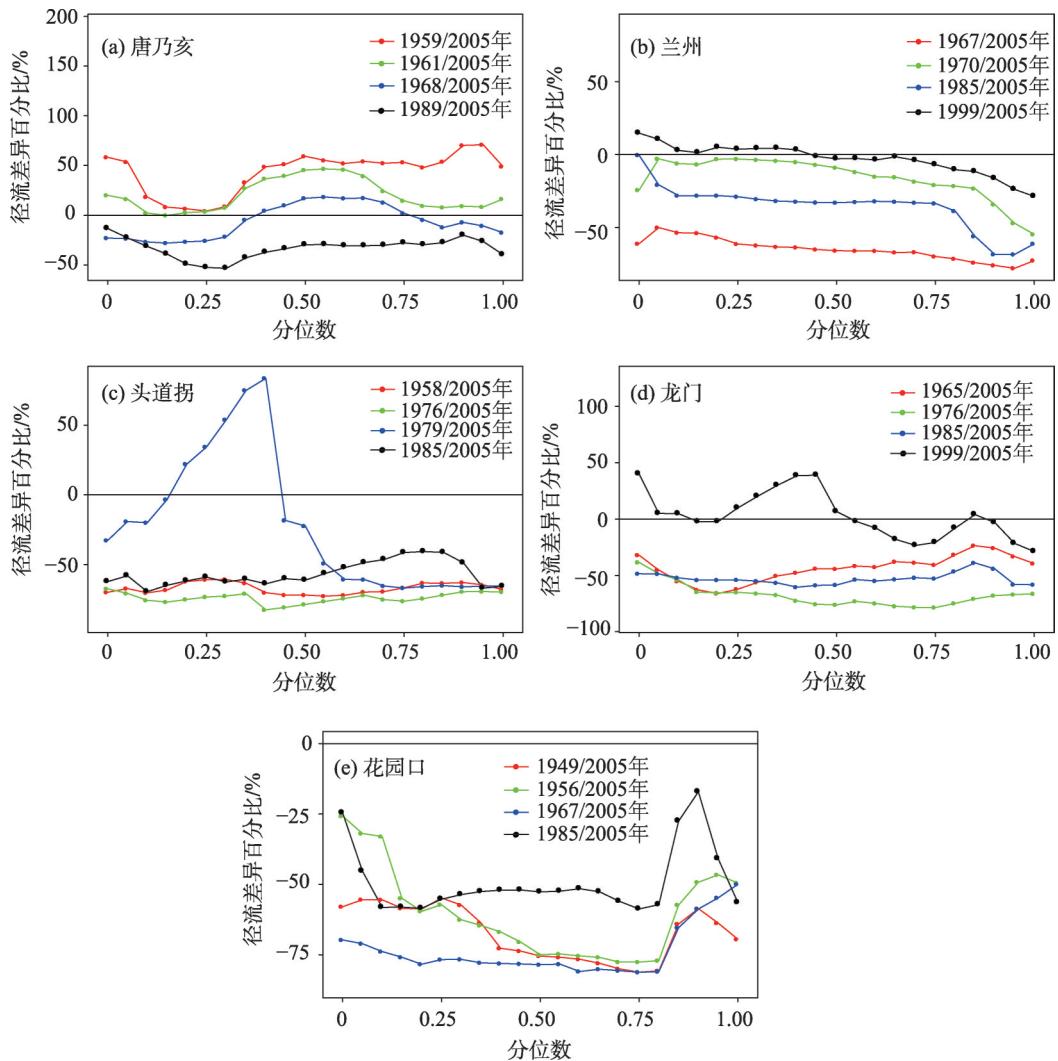
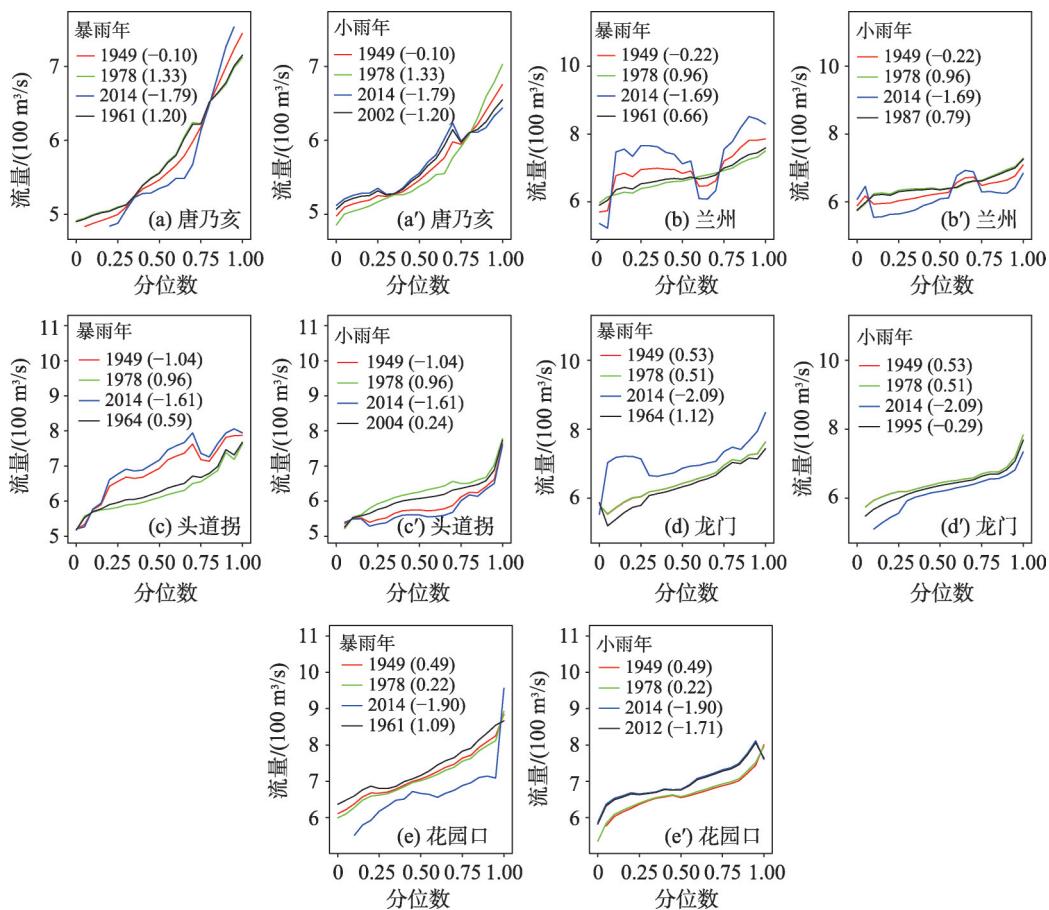


图6 不同参考年到2005年不同分位数下玉米和大豆生长期农业面积变化对降水径流关系的影响

Fig. 6 The impact of cropland changes on the relation between rainfall and average streamflow at different quantile levels during the growth period of maize and soybean of the year 2005 and different reference years

70%的增强趋势，这与图4(a)唐乃亥站小麦生长期降水对应系数 $\alpha_1$ 的变化规律相一致 [图5(a)]。玉米和大豆生长期龙门站在不同流量分位数时的径流差异百分比均小于0，这与图4(d')龙门玉米和大豆生长期系数 $\alpha_2$ 的变化规律相一致，玉米和大豆生长期降水对径流的边缘影响有显著减弱趋势 [图6(d)]。

图7和图8即为基于两种降水状态下不同分位数农业面积季节性变化对径流的影响效果图。整体看来，对比两种降水假设状态，暴雨年的径流始终高于小雨年的径流，降水是影响径流的主要因子之一，这与李道峰等<sup>[16]</sup>得出的结论“降水对径流以正贡献为主”相一致。对于小麦生长期，从图7(a)和(a')可以看出，在暴雨年时期，唐乃亥站增加农作物种植面积，在低流量分位数时可以增加径流，而在高于0.75分位数时会减小径流；在小雨年时期，唐乃亥站增加农作物种植面积，在低流量分位数时会减小径流，而在高于0.75分位数时会增加径流。从图7(b)、(d)、(b')和(d')可以看出，在暴雨年时期，兰



注: 图例中年份后面括号中的数值为对应年份的标准化后的农业面积值, 图8类似。

图7 基于两种降水状态下不同分位数小麦生长期农业面积变化对径流的影响

Fig. 7 The impact of cropland changes on the average runoff at different quantile levels in two different precipitation states during the growth period of wheat

州和龙门站增加农作物种植面积会减小径流, 在小雨年时期, 增加农作物种植面积会增加径流, 而头道拐和花园口站的规律正好相反 [图7(c)、(e)、(c')和(e')]。对于玉米和大豆生长期, 从图8(a)、(b)、(a')和(b')可以看出, 在暴雨年时期, 唐乃亥和兰州站增加农作物种植面积会减小径流, 在小雨年时期, 增加农作物种植面积会增加径流。玉米和大豆生长期, 龙门和花园口站农作物种植面积变化对径流的影响很不明显。综上所述, 降水是径流的主要影响因子之一, 农业种植面积变化对径流的影响程度, 不仅与降水量的多少有关, 还与流量分位数的大小有关。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

1) 黄河流域5个水文站点小麦生长期与玉米和大豆生长期的径流变异点均发生在20世纪80年代中后期和90年代初期, 且除花园口站小麦生长期的径流有少部分呈上升趋势外, 黄河流域径流整体呈下降趋势, 其中, 唐乃亥、兰州的小麦生长期、玉米和大豆生长

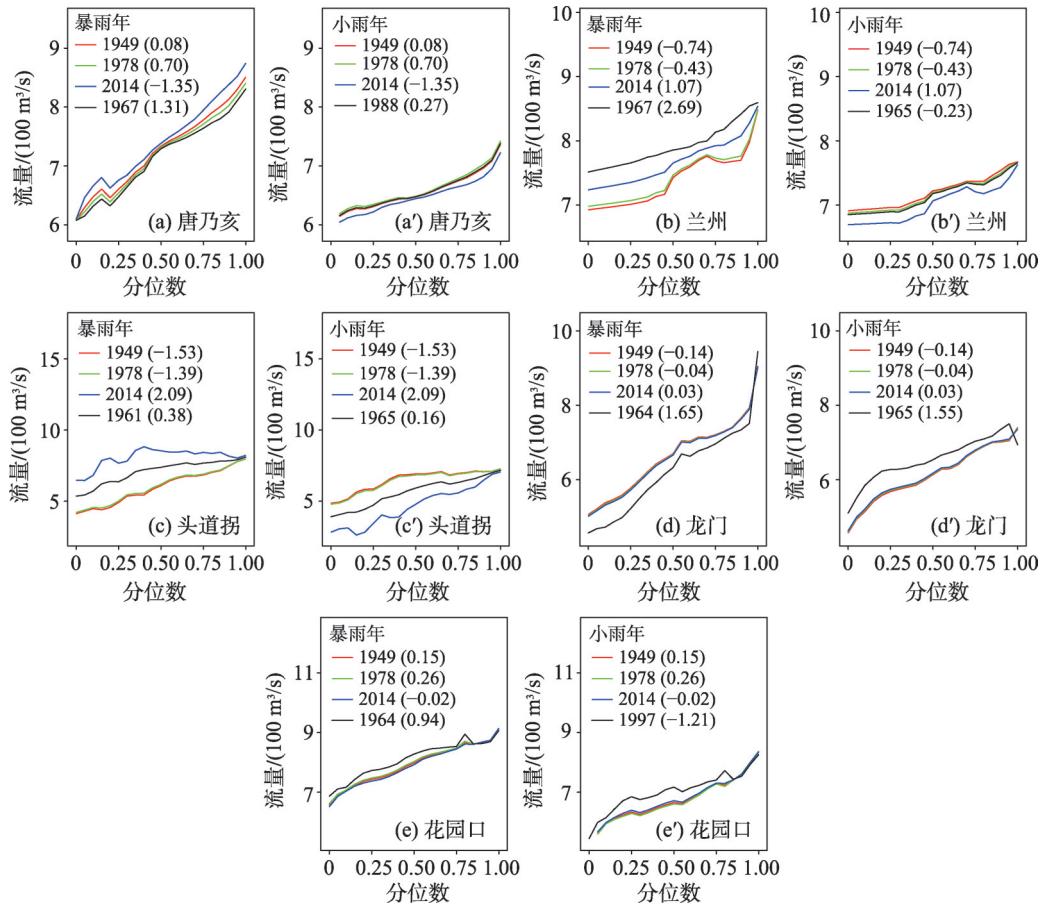


图8 基于两种降水状态下不同分位数玉米和大豆生长期农业面积变化对径流的影响

Fig. 8 The impact of cropland changes on the average runoff at different quantile levels in two different precipitation states during the growth period of maize and soybean

期及龙门、花园口的玉米和大豆生长期趋势均达到了0.05的显著性水平，呈显著下降趋势。

2) 降水是对径流有显著增强作用的影响因子，与降水相关的系数 $\alpha_1$ 均大于0且大多达到5%（10%）的显著性水平，降水对径流以正贡献为主；水库是对径流有显著减弱作用的影响因子，与水库相关的系数 $\alpha_3$ 均小于0且均达到5%的显著性水平；而农作物指标对径流的影响效果较为复杂，且对不同流量分位数的影响作用又存在较大差异，总的来说，5个站点小麦生长期以及唐乃亥和龙门的玉米和大豆生长期农作物指标对径流有显著减弱作用。降水除对唐乃亥和兰州站小麦生长期径流的间接影响较强外，对其余3站小麦生长期与玉米和大豆生长期径流的间接影响均较弱；与2005年越为接近的年份，径流差异百分比变化趋势越为平缓且趋近于0，降水的季节性变化对径流的边缘影响作用越弱。以小麦生长期唐乃亥站为例，在低流量分位数时的径流差异百分比小于0，降水对径流有减弱趋势，而在高流量分位数时百分比大于0，降水对径流有高达70%的增强趋势。

3) 通过对比两种降水假设状态，暴雨年的径流始终高于小雨年的径流，以唐乃亥站为例，在暴雨年时期，唐乃亥站增加农作物种植面积，在低流量分位数时可以增加径流，而在高于0.75分位数时会减小径流；在小雨年时期规律正好相反。所以，可以认为降水

仍是黄河流域影响径流的主要因子之一。而农业种植面积变化对径流的影响程度,不仅与降水量的多少有关,还与流量分位数的大小有关。

## 4.2 讨论

本文主要探讨了气候、农业面积季节性变化及人类活动对黄河流域径流变化的影响。本文的创新点是按照农作物生长特征对指标作季节划分,分季节性进行研究分析,并加入了一个农业种植面积与降雨的交互作用项,以量化农业种植面积的变化对径流量变化的影响,且文中选取了21个不同流量分位数进行了研究,而不是集中在某一个特定的流量分位数,能够更好地评估气候和土地利用变化对不同流量分位数的影响是否相同。庞靖鹏等<sup>[10]</sup>的研究认为,采取退耕还林、还草等措施,能减小水、土及N、P等营养物的流失,但本文考虑了不同流量分位数,该结论与高流量分位数部分结论相一致,而在低流量分位数时存在差异,这可能与蒸发量和灌溉用水的增加有关,还需进一步的研究分析。本文中选用的两种降水情景假设与林桂英等<sup>[11]</sup>采用的极端土地利用法相比,更贴近研究区的实际情况,而其采用的SWAT模型则在不同土地覆被条件下的流域径流模拟及区域水量平衡分析等方面存在优势。但是,本文也存在很多不足之处,由于数据获取困难,数据更新不及时,本文没有考虑气温对径流的影响,且本文主要从宏观角度出发对问题进行研究,存在一定的局限性,还需进一步研究改进。

## 参考文献(References):

- [1] 杨胜天, 刘昌明, 孙睿. 黄河流域干旱状况变化的气候与植被特征 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 136-141. [YANG S T, LIU C M, SUN R. The analysis of drought related climate and vegetative features in the Yellow River basin. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 136-141.]
- [2] ZHANG Q, XU C Y, YANG T. Variability of water resource in the Yellow River basin of past 50 years, China [J]. Water Resources Management, 2009, 23(6): 1157-1170.
- [3] KHOI D N, SUETSUGI T. Uncertainty in climate change impacts on streamflow in Be River Catchment, Vietnam [J]. Water and Environment Journal, 2012, 26(4): 530-539.
- [4] JAVAN K, SALEH F N, SHAHRAIYNI H T. The influences of climate change on the runoff of Gharehsoo River Watershed [J]. American Journal of Climate Change, 2013, 2: 296-305.
- [5] LU E, TAKLE E S, MANOJ J. The relationships between climatic and hydrological changes in the upper Mississippi River Basin: A SWAT and multi-GCM study [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11: 437-451.
- [6] NOBERT J, JEREMIAH J. Hydrological response of watershed systems to land use/cover change: A case of Wami River Basin [J]. The Open Hydrology Journal, 2012, 6(1): 78-87.
- [7] SIRIWARDENA L, FINLAYSON B L, MCMAHON T A. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2006, 326(1): 199-214.
- [8] TRAN L T, O'NEILL R V. Detecting the effects of land use/land cover on mean annual streamflow in the upper Mississippi River Basin, USA [J]. Journal of Hydrology, 2013, 499: 82-90.
- [9] THANAPAKPAWIN P, RICHEY J, THOMAS D, et al. Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem River Basin, NW Thailand [J]. Journal of Hydrology, 2007, 334(1): 215-230.
- [10] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 290-298. [PANG J P, LIU C M, XU Z X. Impact of land use change on runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir Catchment. Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences), 2010, 46(3): 290-298.]
- [11] 林桂英, 曾宏达, 谢锦升. SWAT模型在流域LUCC水文效应研究中的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(6): 145-151. [LIN G Y, ZENG H D, XIE J S. Application of SWAT model in basin LUCC hydrological effects. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(6): 145-151.]
- [12] LORUP J K, REFGAARD J C, MAZVIMAVI D. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by com-

- bined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 147-163.
- [13] 张国胜, 蔡临, 时兴合, 等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响 [J]. *水科学进展*, 2000, 11(3): 277-283.  
[ZHANG G S, LI L, SHI X H, et al. Climatic changes over the upper Yellow River and its effects on water resources. *Advances in Water Science*, 2000, 11(3): 277-283.]
- [14] 马雪宁, 张明军, 马潜, 等. 黄河流域汛期降水非均匀性变化规律研究 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(4): 92-100. [MA X N, ZHANG M J, MA Q, et al. Nonuniform change of precipitation in Yellow River Basin during flood period. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(4): 92-100.]
- [15] 黄荣辉, 周德刚. 气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响 [J]. *自然杂志*, 2012, 34(1): 1-9. [HUANG R H, ZHOU D G. The impact of climate change on the runoff of the Yellow River and ecosystem and frozen soil in its source area. *Chinese Journal of Nature*, 2012, 34(1): 1-9.]
- [16] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟 [J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 565-573. [LI D F, TIAN Y, LIU C M. Distributed hydrological simulation of the source regions of the Yellow River under environmental change. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 565-573.]
- [17] 车赛, 王根绪, 孔福广, 等. 气候波动和土地覆盖变化下的黄河源区水资源预测 [J]. *水文*, 2007, 27(2): 11-15. [CHE Q, WANG G X, KONG F G, et al. Runoff estimation under climate and land cover change in Yellow River Source Region. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(2): 11-15.]
- [18] LI E H, MU X M, ZHAO G J, et al. Variation of runoff and precipitation in the Hekou-Longmen region of the Yellow River based on elasticity analysis [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, Article ID 929858, doi: 10.1155/2014/929858.
- [19] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 考虑水文变异的黄河干流河道内生态需水研究 [J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 99-110. [LI J F, ZHANG Q, CHEN X H, et al. Study of ecological instream flow in Yellow River, considering the hydrological change. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 99-110.]
- [20] MIAO C Y, NI J R, BORTHWICK A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 76(3): 196-205.
- [21] 周振民. 黄河下游引黄灌区冬小麦节水灌溉与增产效益分析 [J]. *农田水利与小水电*, 1995(12): 2-4. [ZHOU Z M. Water-saving irrigation and yield increase benefit analysis of winter wheat in the irrigation areas of lower reach of the Yellow River. *China Rural Water and Hydropower*, 1995(12): 2-4.]
- [22] 庞桂斌, 徐征和, 刘培成, 等. 黄河三角洲地区冬小麦微咸水灌溉制度模拟 [J]. *人民黄河*, 2016, 38(8): 140-144.  
[PANG G B, XU Z H, LIU P C, et al. Simulation of brackish water irrigation management for winter wheat in the Yellow River Delta. *Yellow River*, 2016, 38(8): 140-144.]
- [23] 陈震. 人民胜利渠灌区多水源灌溉应对干旱分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013. [CHEN Z. Analysis of Multi-water Resources Irrigation to Mitigate Drought in People's Victory Canal Irrigation District. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.]
- [24] CHEBANA F, OUARDA T B M J, DUONG T C. Testing for multivariate trends in hydrological frequency analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 519-530.
- [25] KILICK R, ECKLEY I A. Changepoint: An R package for changepoint analysis [J]. *Journal of Statistical Software*, 2014, 58(3): 1-19.
- [26] 李华贞, 张强, 顾西辉, 等. 北江流域洪水量级、频率和峰现时间时空特征及影响因子 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2016, 62(4): 389-400. [LI H Z, ZHANG Q, GU X H, et al. Flooding processes in the North River Basin: Magnitude, frequency, timing and influencing factors. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2016, 62(4): 389-400.]
- [27] VILLARINI G, STRONG A. Roles of climate and agricultural practices in discharge changes in an agricultural watershed in Iowa [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188: 204-211.
- [28] MICHAEL J R. The stabilized probability plot [J]. *Biometrika*, 1983, 70(1): 11-17.
- [29] 王雁林, 王文科, 钱云平, 等. 黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 479-486.  
[WANG Y L, WANG W K, QIAN Y P, et al. Change characteristics and driving forces of base flow of Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 479-486.]

## Quantification of Fractional Contributions of Seasonal Changes in Climate and Cropland to Streamflow Changes Across the Yellow River Basin

LI Hua-zhen<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, GU Xi-hui<sup>3</sup>, SHI Pei-jun<sup>2</sup>

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

2. a. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, b. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, c. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Department of Atmospheric Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The Yellow River is important water source in Northwest and North China. It is of great significance to understand the characteristics and causes of its streamflow changes. In this paper, impacts of climate changes and human activities such as cropland changes and water reservoirs on streamflow variations at seasonal scale were thoroughly quantified using daily streamflow data, daily precipitation data, cropland data, and information of water reservoirs in the Yellow River Basin. Firstly, multi-year trends of streamflow and change points at seasonal scale during 1960–2005 were evaluated, and then the streamflow changes during the growth period of wheat and growth period of maize and soybean were estimated by Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape (GAMLSS) model. Besides, two different precipitation scenarios were proposed to elucidate the impacts of changes in precipitation and cropland at seasonal scale on different streamflow components defined by different percentiles. The results indicated that: 1) The change points of streamflow during the growth period of wheat and growth period of maize and soybean at the five hydrological stations in the Yellow River Basin occurred during the mid- and late-1980s and early 1990s. Except at Huayuankou Station, the streamflow in the Yellow River Basin was generally in decreasing tendency and the decreasing tendency at most hydrological stations was significant at 95% confidence level. 2) Based on two precipitation scenarios set in this study, the streamflow during years with high precipitation was always higher than that during years with low precipitation, implying that precipitation still plays the critical role in streamflow changes. The impacts of cropland changes on streamflow were related with both changes in precipitation and the percentiles of streamflow components. At Tangnaihai Station, the increasing cropland increased the lower quantile of streamflow and decreased the upper quantile of streamflow during the growth period of wheat of high precipitation years while did the opposite during the growth period of wheat of low precipitation years. Results of this study can provide theoretical and practical grounds for water resources management and allocation across the Yellow River Basin.

**Key words:** the Yellow River Basin; streamflow variation; trends; seasonality; GAMLSS model