

基于 Budyko 假设的三江源径流变化特性及量化分离

商放泽^{1,2}, 王可昞¹, 黄跃飞¹, 魏加华^{1,3}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中电建生态环境集团有限公司, 广东 深圳 518102;

3. 青海大学水利电力学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 根据 1956—2012 年气象和水文站点的降雨、气温、蒸发等实测和相关数据, 采用线性趋势法、非参数 Mann-Kendall 法和 Spearman 法, 分析了三江源地区降雨、气温、NDVI(归一化植被指数, normal difference vegetation index)和径流变化特征, 并采用基于 Budyko 假设的互补关系权重因子法量化分离气候和下垫面对径流影响。结果表明, 长江源和澜沧江源降雨量呈显著增加趋势, 三江源气温呈显著增加趋势, 黄河源 NDVI 呈显著增加趋势。长江源、黄河源和澜沧江源径流量 10 年变化幅度分别为 6.54 亿 m³、-2.05 亿 m³ 和 1.54 亿 m³。所使用的互补关系权重因子法不仅可以准确地计算出径流年均值的变化, 并且量化分离时无需假定气候和下垫面变化对径流变化具有相同的贡献特征。总体来说, 长江源、黄河源气候和下垫面变化对径流的影响为正贡献; 但是澜沧江源 α (权重因子) 等于 1.0 时下垫面变化对径流的影响为正贡献, 而 α 为 0.5 和 0 时下垫面对径流的影响为负贡献。长江源、黄河源和澜沧江源气候变化对径流的贡献分别为 55.21%~92.85%、52.47%~68.50%、89.91%~124.58%。三江源径流变化主要受到气候变化影响, 降雨量是气候变化影响径流的主要控制因子, 植被覆盖是下垫面变化影响径流的主要控制因子。

关键词: 三江源; 径流; 气候; 下垫面; 归一化差分植被指数

中图分类号: P333

文献标志码: A

Variation Characteristics of Runoff and the Quantitative Separation Based on Budyko Hypothesis in the Three-River Headwaters Region

SHANG Fangze^{1,2}, WANG Keyi¹, HUANG Yuefei¹, WEI Jiahua^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Power China Eco-environmental Group Co., Ltd, Shenzhen 518102, China; 3. School of Water Conservancy and Electric Power, Qinghai

University, Xining 810016, China)

Abstract: Based on the measured and related data from meteorological and hydrological stations in the Three-River Headwaters Region during 1956—2012, the variation characteristics of precipitation, temperature, NDVI (normal difference vegetation index) and runoff were analyzed by using the linear regression method, Mann-Kendall test method and Spearman test method. Moreover, the influences of climate and the underlying surface to runoff were analyzed by using the weighting factor method based on Budyko hypothesis. The results indicated that the annual precipitation showed a significant increase trend in the source region of the Yangtze River and Lancang River, and the annual mean temperature showed a significant warming trend in the Three-River Headwaters Region. The annual NDVI showed a significant increase trend in the source region of the Yellow River. In addition, the changing slopes of annual runoff in the source region of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River were $6.54 \times 10^8 \text{ m}^3$, $-2.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $1.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ per 10 years, respectively, but these trends were not significant. The weighting factor method used in this study can not only accurately estimate the annual mean runoff, but also need not to assume that the climate and underlying surface changes have the same contributions to runoff changes. Overall, both climate and underlying surface showed a positive contribution to runoff changes in the source region of Yangtze River and Yellow River. However, in the source region of Lancang River, the underlying surface is positive contributing factor to runoff variations when the weighting factor (i.e., α) was 1.0, whereas it was a negative contributing factor when α was 0.5 and 0. The contributions of climate change on runoff in the source region of the Yangtze River,

收稿日期: 2019-03-11

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M610906); 国家自然科学基金(91647212)

第一作者: 商放泽(1988—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为生态水文学. E-mail: shangfangze@126.com

通信作者: 王可昞(1989—), 女, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为水文水资源.

E-mail: wangkeyi2019@163.com



论文
拓展
介绍

Yellow River and Lancang River were 55.21%~92.85%, 52.47%~68.50%, and 89.91%~124.58%, respectively. Meanwhile, our results emphasized that the changes of runoff in the Three-River Headwaters Region were mainly affected by climate change. Precipitation is the main controlling factor of climate that influences runoff, and vegetation cover is the main controlling factor of underlying surface that influences runoff.

Key words: the Three-River headwaters region; runoff; climate; underlying surface; normalized difference vegetation index

近130年(1880—2012年)以来,地球表面温度上升了 0.85°C ,预计到21世纪末全球地表平均温度将增加 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$ ^[1-2]。近50年来中国地表气温升高了 1.1°C ,增温速率为每10年上升 0.22°C ,明显高于全球或北半球同期的增温速率^[3]。研究发现全球气候变化极大影响了水循环和水文过程^[4-5],气候变化还会引起降水的巨大变化,并导致区域干湿极端现象频发^[6]。三江源区由于青藏高原独有的热力和动力作用,形成了东亚特殊的季风气候系统,对气候变化更为敏感。

从20世纪90年代开始,在全球气候变化、人类活动以及青藏高原地壳不断隆升等自然和人类活动的共同影响下,三江源区出现了源区气温升高、永久冻土层厚度减少、降雨和蒸发强度改变、地表植被退化、冰川退缩、高原湖泊和湿地水源补给减少而造成湖泊湿地萎缩、土地荒漠化、生物多样性降低等一系列生态环境问题,对长江、黄河和澜沧江中下游地区的生态环境也带来了诸多不利影响^[7-9]。有研究指出,气候变化将影响依赖青藏高原供水的长江、黄河和澜沧江的径流^[10]。1958—2007年期间三江源区温度和降水量明显增加,长江源区和澜沧江源区的年径流量呈上升趋势^[11],也有研究表明最近14年长江源区的直门达水文站年径流共减少了96亿 m^3 ^[12];黄河源区径流从20世纪90年代至2007年出现下降趋势,枯季、雨季降水量与流量分别呈负、正反馈机制^[13-14]。

气候变化和下垫面变化是径流变化的2个主要驱动因素。人类活动和植被覆盖变化造成下垫面的变化,在地形、地质、土壤和植被等因素中,植被覆盖是影响径流最为重要的下垫面因素^[15-16],而人类活动中的开垦和放牧对植被的影响最为直接。归一化植被指数(normal difference vegetation index,

NDVI)是表征植被覆盖的主要参数之一。NDVI是遥感影像的近红外波段反射率与红光波段反射率比值的归一化参数,对环境变化反应十分敏感,且能够较好反映植物生长变化和植被覆盖状况,是植被生长状态和植被覆盖度的最佳指示因子^[17-18]。有研究利用GIMMS和MODIS 2个卫星源的遥感监测值,以NDVI为基础,发现三江源地区植被生产力趋于好转,气候变化是影响植被生产力的决定性因素,而人类活动在一定程度上加快了其变化速率^[19]。

在流域径流影响因素的贡献离析中,如何准确评估不同因素对径流变化的贡献是研究的难点。定量分析气候变化对径流变化的贡献($\Delta R_{\text{climate}}$)以及流域下垫面变化对径流变化的贡献($\Delta R_{\text{catchment}}$)的方法主要有水文模型法和基于Budyko假设水热耦合平衡理论的水量平衡法2种^[20-22]。有学者使用水文模型定量分离气候变化和人类活动对汾河径流的影响,发现人类活动对径流减少的贡献占了64.1%^[23]。虽然水文模型的方法可以分离出 $\Delta R_{\text{climate}}$ 和 $\Delta R_{\text{catchment}}$,但是存在水文循环的部分物理过程缺失、部分模型结构缺陷、系统误差等问题,因此这类模型的准确性有待提高^[24]。利用Budyko假设方法方面,有研究基于Budyko假设,选择受人类直接取用水影响较少的山区小流域分析了松花江、辽河、海河、黄河和汉江等中国主要流域径流量减小的原因^[25]。但是Budyko假设忽略了下垫面的影响。由于三江源区受到地形及其高原加热场的作用,气候和下垫面条件独特且复杂,径流及相关因子的趋势分析、影响因素贡献评估及模型构建方法和手段都需要有针对性地进行修正和改进,构建的模型要能有效反映三江源区气候因子和下垫面之间的相关关系和定量关系,目前尚缺乏有效的方法以定量离析各驱动因子对径流变化的贡献。

三江源区由于特殊的水文、地理和气候条件,是我国淡水资源的重要来源区和西部地区的生态屏障。但是三江源区的自然生态系统非常敏感和脆弱,三江源区生态环境的变化状况直接关系到我国西部地区的可持续发展,乃至中、东部江河下游地区的水和生态安全。因此,本文围绕三江源区径流对气候变化和下垫面变化的响应特征及定量表达这一科学问题开展研究,根据三江源地区水文气象站点实测资料,分析三江源、黄河源、澜沧江源气候、下垫面和径流的变化特性,并利用基于Budyko互补关系的新的径流量化离析方法分析气候变化和人类活动对三江源区径流的影响及贡献。以期对三江源区水

源涵养和生态环境保护措施的制定提供依据。

1 研究区概况

三江源区位于青海省南部、青藏高原腹地,是长江、黄河和澜沧江的发源地。汇水区流域面积共 $31.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中长江流域面积 $13.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ (直门达水文站以上),占源区总面积的44.0%;黄河流域面积 $12.20 \times 10^4 \text{ km}^2$ (唐乃亥水文站以上),占源区总面积的39.0%;澜沧江流域面积 $5.29 \times 10^4 \text{ km}^2$ (昌都水文站以上),占源区总面积的16.9%。为了保护三江源区生态环境,经国务院批准,2011年实施《青海省三江源国家生态保护综合试验区总体方案》,试验区范围为 $89^\circ 41' \sim 102^\circ 40' \text{ E}$ 、 $31^\circ 53' \sim 37^\circ 10' \text{ N}$ 。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与预处理

降雨、气温、蒸发和径流数据来源于青海省水文水资源勘测局和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。部分站点在1956—2012年间的降雨、气温、蒸发和径流数据缺失,缺失的数据根据青海省水文水资源勘测局提供的相邻站点的数据进行插补。三江源降雨、气温、蒸发监测的气象和水文站点见图1,共33个气象站点和12个水文站点。降雨量利用泰森多边形进行计算,因此包括了三江源区外的气象站点。径流量为根据实测径流量进行还原的天然径流量。三江源监测径流的水文站点分布见图2,从图中可知,长江源区由直门达水文站和班玛水文站以上流域2个部分组成,黄河源区包括唐乃亥水文站和同仁水文站以上流域,澜沧江源区包括香达水文站和下拉秀水文站以上流域。因此,长江源径流量为直门达水文站和班玛水文站的叠加,黄河源径流量为唐乃亥水文站和同仁水文站的叠加,澜沧江源径流量为香达水文站和下拉秀水文站的叠加。

归一化植被指数利用卫星数据计算。卫星数据来自于相关组织的数据服务平台所公布的公开数据。1982—2012年月尺度GIMMS(global inventory modelling and mapping studies)AVHRR(advanced very high resolution radiometer)NDVI数据集来源于NASA Earth Exchange (<http://nex.nasa.gov/nex/>),其空间分辨率8km。为了避免大气溶胶以及太阳高度产生的信号噪声,引入最大值合成法

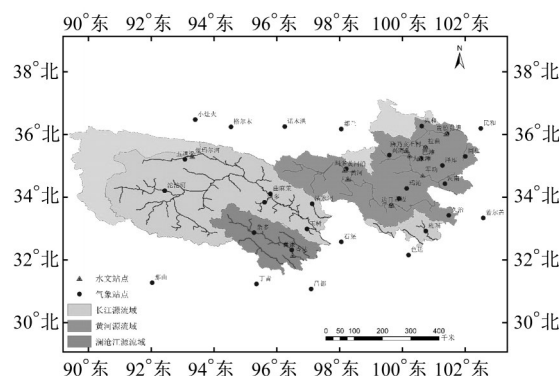


图1 三江源气象和水文站点

Fig.1 Meteorological and hydrological stations in the Three-River Headwaters Region

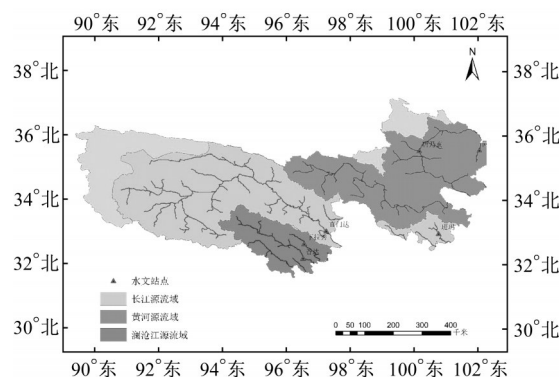


图2 三江源径流计算使用的水文站点

Fig.2 Hydrological stations used for runoff calculation in the Three-River Headwaters Region

(maximum value composite)对NDVI数据进行预处理。最大值合成法假设云层是不断变化的,因此栅格点的最大NDVI值被选为该栅格点的NDVI值^[26]。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势法

气候要素的趋势变化一般采用一元线性回归模型描述,即

$$y = mx + c \quad (1)$$

式中: y 为气候、下垫面和径流要素序列; x 为时间序列; m 为线性趋势项; c 表示截距。

2.2.2 非参数 Mann-Kendall 法

利用非参数 Mann-Kendall 进行趋势分析,分析基于秩的非参数检验方法,辨别三江源区气候、下垫面和径流变化是自然特性的波动还是存在确定性的变化趋势。检验统计量 S 计算公式为^[27]

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 分别为数据序列中的第 i 和第 j 个数据点; n 为数据序列长度, 也即样本数。符号函数表达式为

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} -1 & (x_j - x_i) < 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ 1 & (x_j - x_i) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Mann-Kendall 标准检验统计量 Z 的计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^N t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (5)$$

其中 t_i 是第 i 组的数据点数目。

标准检验统计量 Z 服从标准正态分布。为了检验数据序列是否存在趋势, 如果标准检验量 Z 的绝对值大于标准正态累计分布表中的 $Z_{1-\sigma/2}$, 那么数据序列在显著水平 σ 上存在趋势性变化。90%、95% 和 99% 置信度水平对应的 Z 的绝对值判别值分别为 1.64、1.96 和 2.58。

衡量趋势大小的指标为

$$\beta = M_z \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right) \quad (6)$$

式中: M_z 为中位数; $1 < j < i < n$ 。 β 为正值表示上升趋势, β 为负值表示下降趋势。

2.2.3 Spearman 法

Spearman 秩相关系数为非参数性质的统计参数, 与样本分布无关。Spearman 秩相关系数^[28]为

$$r_{\text{SRC}} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (7)$$

Spearman 秩相关系数的符号表示 X 和 Y 之间的关系。如果 Y 随着 X 增大而增大, 那么秩相关系数则为正; 如果 Y 随着 X 的增加而减少, 那么秩相关系数则为负。 X 和 Y 越接近严格单调的关系, Spearman 秩相关系数的数值则越大。

Spearman 秩相关的变化趋势检验统计变量, 即检验统计量为

$$t_{\text{SRC}} = r_{\text{SRC}} \sqrt{\frac{N-2}{1-r_{\text{SRC}}^2}} \quad (8)$$

其服从自由度为 $v=N-2$ 的 student 分布。当 $t_{n-2, \sigma/2} < t_{\text{SRC}} < t_{n-2, 1-\sigma/2}$ 时, 认为无明显变化趋势。

2.2.4 基于Budyko假设的互补关系权重因子法

采用基于 Budyko 假设的互补关系权重因子法^[29]分析气候变化对径流变化的贡献 ($\Delta R_{\text{climate}}$) 以及流域下垫面变化 (或人类活动) 对径流变化的贡献 ($\Delta R_{\text{catchment}}$)。

常用的 Budyko 方程有傅抱璞公式^[30]以及 MCY 方程^[31], 如下:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[\left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega + 1 \right]^{1/\omega} \quad (\omega \in (1, \infty)) \quad (9)$$

$$\frac{E}{P} = \frac{\frac{E_0}{P}}{\left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^n \right]^{1/n}} \quad (10)$$

式中: E 代表蒸散发量; P 代表降水量; E_0 为潜在蒸发量, 表示可利用的能量; E/P 表示蒸散发系数; E_0/P 表示干旱指数 Φ ; 参数 ω 和 n 代表下垫面特征, 例如人类活动、相对入渗能力、植被盖度、土壤性质和平均坡度等。

假设 P 和 E_0 是相互独立的, R 对 P 和 E_0 的偏弹性系数存在以下关系^[29]:

$$\frac{\partial R/R}{\partial P/P} + \frac{\partial R/R}{\partial E_0/E_0} = 1 \quad (11)$$

根据式(11)可得出 R 的表达式为

$$R = \frac{\partial R}{\partial P} P + \frac{\partial R}{\partial E_0} E_0 \quad (12)$$

基于 R 与 P 和 E_0 的互补关系, 即式(12), 可得出计算径流变化的互补关系, 如式(13):

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial E_0} dE_0 + d \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right) P + d \left(\frac{\partial R}{\partial E_0} \right) E_0 \quad (13)$$

假设土壤含水量的变化量可以忽略不计, 通过计算降水和径流的差值来估算蒸散发量^[32]为

$$E = P - R \quad (14)$$

那么, 径流敏感系数 ($\frac{\partial R}{\partial P}$ 和 $\frac{\partial R}{\partial E_0}$) 就可以根据式(15)和式(16)计算:

$$\frac{\partial R}{\partial P} = 1 - \frac{E_0}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} + \frac{P^n E_0}{(P^n + E_0^n)^{1+1/n}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial R}{\partial E_0} = \frac{P E_0^n}{(P^n + E_0^n)^{1+1/n}} - \frac{P}{(P^n + E_0^n)^{1/n}} \quad (16)$$

从图3可以看出, 以状态空间 (P, E_0, E) 表示年均水量-能量平衡方程的解空间, 那么某一时间段的

初始状态即可表示为点 $A(P_1, E_{0,1}, E_1)$,而时段末状态即可表示为点 $B(P_2, E_{0,2}, E_2)$ 。与此同时,从初始状态到时段末状态,敏感系数由 $\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1$ 和 $\left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_1$ 转变为 $\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2$ 和 $\left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_2$,下垫面参数从 n_1 转变为 n_2 ,径流从 R_1 转变为 R_2 。那么初始状态径流量为

$$R_1 = \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 P_1 + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_1 E_{0,1} \quad (17)$$

时段末径流量为

$$R_2 = \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 P_2 + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_2 E_{0,2} \quad (18)$$

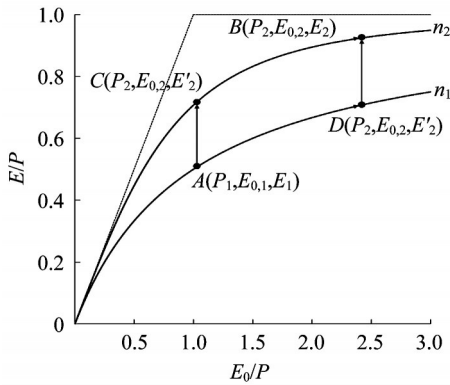


图3 状态空间 (P, E_0, E) 示意

Fig.3 State space (P, E_0, E) schematic diagram

总径流变化 (ΔR) 计算公式为

$$\Delta R = R_2 - R_1 \quad (19)$$

代入径流变化的互补关系式(13),即可得到

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_1 \Delta E_0 + P_2 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,2} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) \quad (20)$$

或者

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_2 \Delta E_0 + P_1 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,1} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) \quad (21)$$

式(20)和式(21)完全等价,分别表示从初始状态到时段末状态的2条可能路径,其中 $\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_1 \Delta E_0$ 或 $\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_2 \Delta E_0$ 表示由气候

变化引起的径流变化, $P_2 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,2} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)$ 或 $P_1 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,1} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)$ 表示由下垫面变化引起的径流变化^[29]。其区别在于式(20)采用初始状态敏感系数来计算 $\Delta R_{\text{climate}}$ (等号右侧前2项),采用时段末状态 P 和 E_0 来计算 $\Delta R_{\text{catchment}}$ (等号右侧后2项),对应变化路径 $A-D-B$;式(21)采用时段末状态的敏感系数来计算 $\Delta R_{\text{climate}}$ (等号右侧前2项),采用初始状态 P 和 E_0 来计算 $\Delta R_{\text{catchment}}$ (等号右侧后2项),对应变化路径 $A-C-B$ 。这只是从初始状态到时段末状态的2条可能路径,事实上由于气象和下垫面条件的不确定性,从初始状态到时段末状态有无数条变化路径存在。基于Budyko假设的互补关系权重因子法引入权重因子 α 来表征不同的变化路径,如下式:

$$\Delta R = \alpha \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_1 \Delta E_0 + P_2 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,2} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) \right] + (1-\alpha) \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_2 \Delta E_0 + P_1 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,1} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) \right] \quad (22)$$

其中 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。得到 $\Delta R_{\text{climate}}$ 和 $\Delta R_{\text{catchment}}$ 的计算公式为

$$\Delta R_{\text{climate}} = \alpha \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_1 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_1 \Delta E_0 \right] + (1-\alpha) \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)_2 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right)_2 \Delta E_0 \right] \quad (23)$$

$$\Delta R_{\text{catchment}} = \alpha \left[P_2 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,2} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) \right] + (1-\alpha) \left[P_1 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P}\right) + E_{0,1} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial E_0}\right) \right] \quad (24)$$

随着权重因子 α 的变化, $\Delta R_{\text{climate}}$ 和 $\Delta R_{\text{catchment}}$ 也随之线性变化。

在过去的30多年中^[29-32],由于气候条件和下垫面的不断变化, α 并非一个定值,因此分析了 α 为0、0.5、1.0这3种变化路径中气候变化和下垫面变化对径流变化的影响,并分别阐释不同变化路径下气候变化和下垫面变化对径流变化的影响,其中 $\alpha=0$ 或 $\alpha=1.0$ 代表径流变化完全由下垫面变化引起或

完全由气候变化引起。

潜在蒸散发量根据在中国干旱半干旱地区有着良好的应用的哈格里夫斯公式^[33]计算,其计算公式为

$$E_0 = 0.0023R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}}(T + 17.8) \quad (25)$$

式中: R_a 表示大气层顶辐射, $mm \cdot d^{-1}$; T_{max} 和 T_{min} 表示最高温度和最低温度; T 代表平均温度。

3 结果与分析

3.1 三江源气候和下垫面变化特性分析

三江源降雨量变化趋势见图4,降雨量年际间波动变化。长江源、黄河源和澜沧江源降雨量呈增加趋势,年均降雨量分别为365.26、429.28和537.50 mm。线性趋势分析表明,10年的降雨量倾向率分别为10.83、5.51和11.14 mm。

三江源气温变化趋势见图5,气温年际间波动变化。长江源、黄河源和澜沧江源气温呈增加趋势,多年平均气温分别为-1.59、1.36和2.45℃。线性趋势分析表明,10年的气温倾向率分别为0.31、0.29和0.33℃。

利用归一化植被指数NDVI表征植被覆盖度,下垫面的变化情况用生态植被覆盖度表示。三江源NDVI变化见图6,生态植被覆盖情况年际间波动变化。长江源、黄河源和澜沧江源NDVI呈增加趋势,长江源、黄河源和澜沧江源年均NDVI值分别为0.2305、0.3141和0.3204。线性趋势分析表明,NDVI值10年增加幅度分别为0.002、0.004和0.002。年均降雨量、气温和NDVI值从大到小排序为:澜沧江源、黄河源、长江源。

三江源降雨、气温和NDVI的显著性检验及变

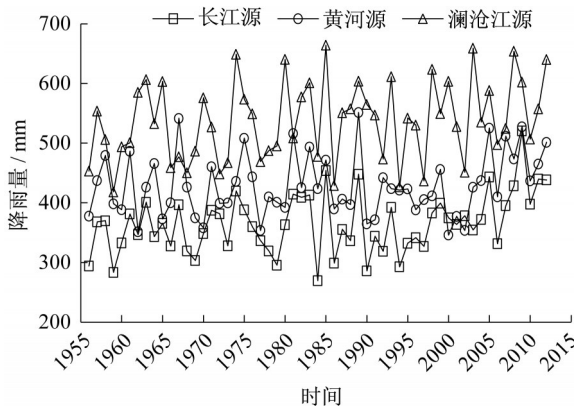


图4 三江源年降雨量变化

Fig.4 The change of annual precipitation in the Three-River Headwaters Region

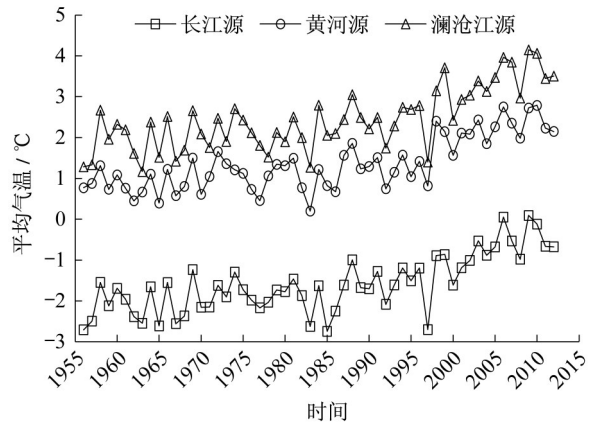


图5 三江源年平均气温变化

Fig.5 The change of annual average air temperature in the Three-River Headwaters Regions

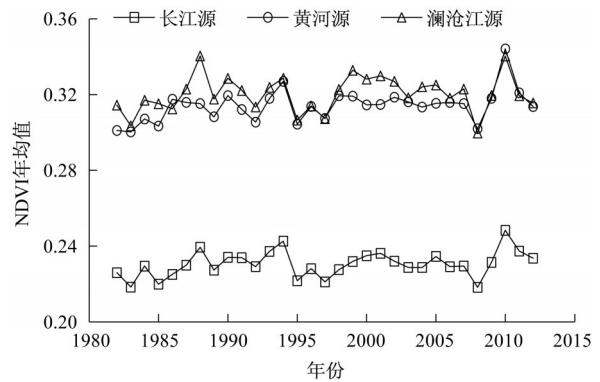


图6 三江源年NDVI变化

Fig.6 The change of annual NDVI in the Three-River Headwaters Regions

化趋势见表1。Mann-Kendall、Spearman检验结果表明长江源和澜沧江源降雨量呈显著增加趋势,而黄河源降雨量增加趋势不显著;三江源气温呈显著增加趋势;黄河源NDVI呈显著增加趋势,长江源和澜沧江源NDVI增加趋势不显著。

3.2 三江源径流变化特性分析

三江源年径流量变化见图7,径流深变化见图8。长江源、澜沧江源年径流量呈增加趋势,年均径流量分别为140.45亿 m^3 和58.22亿 m^3 ,线性趋势分析表明,10年径流增加幅度分别为6.54亿 m^3 和1.54亿 m^3 。黄河源年径流量呈减少趋势,年均径流量为206.26亿 m^3 ,线性趋势分析表明,10年终径流减少幅度为2.05亿 m^3 。长江源、黄河源和澜沧江源区年均径流深分别为98.89、165.27、264.23 mm,年径流深从大到小排序为:澜沧江源、黄河源、长江源,这与长江源、黄河源和澜沧江源年降雨量、气温、NDVI的大小顺序相同。

表 1 三江源降雨、气温和 NDVI 的 Mann-Kendall 和 Spearman 秩相关检验

Tab.1 Mann-Kendall and Spearman rank correlation tests of precipitation, air temperature and NDVI in the Three-River Headwaters Regions

流域	降雨		气温		NDVI	
	Mann-Kendall 检验的 Z	Spearman 检验的 r	Mann-Kendall 检验的 Z	Spearman 检验的 r	Mann-Kendall 检验的 Z	Spearman 检验的 r
长江源	2.375*	0.316*	5.934*	0.713*	1.870	0.313
黄河源	1.315	0.175	5.707*	0.717*	2.142*	0.384*
澜沧江源	1.961*	0.272*	5.879*	0.706*	1.054	0.227

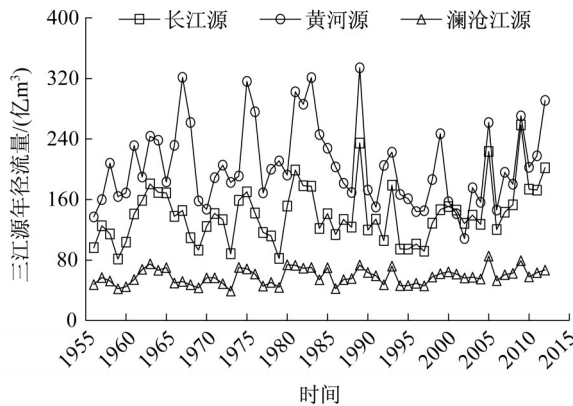


图 7 三江源年径流量变化

Fig.7 The change of annual runoff amount in the Three-River Headwaters Regions

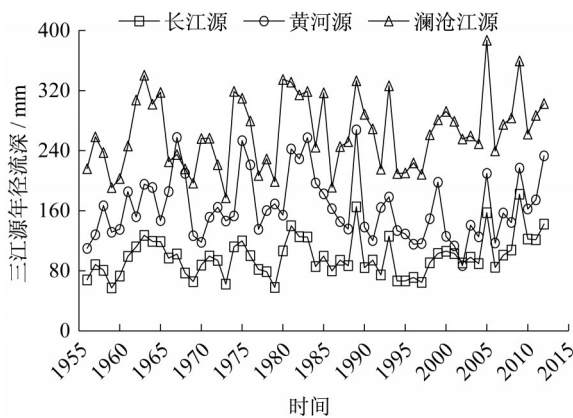


图 8 三江源年径流深变化

Fig.8 The change of annual runoff depth in the Three-River Headwaters Regions

三江源径流量的显著性检验见表 2。Mann-Kendall、Spearman 检验结果表明三江源区径流变化趋势都不显著。

3.3 三江源气候和下垫面对径流变化贡献的量化分离

为了显示径流的动态变化过程,同时为了满足“土壤含水量的变化量可以忽略不计”的前提假设^[32],选择 5 年作为时间步长。以 5 年的均值作为每个子时间段的取值,并认为相邻 2 个子时间段内土壤含水量的变化量忽略不计,当相邻 2 个子时间段

表 2 三江源径流量的 Mann-Kendall 和 Spearman 秩相关检验

Tab.2 Mann-Kendall and Spearman rank correlation tests of runoff amount in the Three-River Headwaters Regions

流域	Mann-Kendall 检验的 Z	Spearman 检验的 r
长江源	1.810	0.251
黄河源	-0.558	-0.081
澜沧江源	1.755	0.238

土壤含水量基本保持不变时,降水和径流的差值可以作为蒸发量。因此,将总时间序列(1956—2012 年)分为 12 个子时间段,前 11 个子时间段以 5 年为时间步长,最后 1 个子时段以 2 年为时间步长。

长江源、黄河源和澜沧江源每一个子时间段的气候条件和下垫面特征变化分别见表 3、表 4 和表 5。其中 E 为年均蒸散发量, E_0 为潜在蒸散发量, R 为径流量, n 为式 (10) 的参数, R_1, R_2, \dots, R_{10} 为各子时间段的年径流均值。定义 ΔR 为相邻 2 个子时间段之间径流均值的差值,例如 $\Delta R = R_2 - R_1$ 。通过互补关系法进行计算,得到相邻 2 个子时间段的径流差值以及气候变化和下垫面变化对径流变化的贡献值,长江源、黄河源和澜沧江源气候和下垫面变化对径流变化的贡献分别见表 6、表 7 和表 8。结果表明,三江源 ΔR 的计算值与观测值几乎相同,表明互补关系法可以准确地计算出径流年均值的变化。虽然 $\Delta R_{climate}$ 和 $\Delta R_{catchment}$ 的总和等于 ΔR ,但是从表 6 至表 8 可以看出,长江源、黄河源和澜沧江源 $\Delta R_{climate}$ 和 $\Delta R_{catchment}$ 的值随着权重因子 α 的改变而改变。

现大部分研究假定气候和下垫面变化对径流变化具有相同的贡献特征,即气候和下垫面同时促进径流量或者同时减少径流量。本文未假定气候和下垫面变化对径流变化具有相同的贡献特征,实际上,在某些时段或年份,气候和下垫面变化对径流变化具有相反的贡献特征。如长江源 ΔR_3 中, $\Delta R_{climate, i} = 18.61$ 和 $\Delta R_{catchment, i} = -7.01$,气候变化对径流量贡献为正,而下垫面变化对径流量贡献为负。黄河源 ΔR_3 中, $\Delta R_{climate, i} = 12.94$ 及 $\Delta R_{catchment, i} = -18.72$,气

候变化对径流量的贡献为正,而下垫面变化对径流量的贡献为负。澜沧江源 ΔR_9 中, $\Delta R_{\text{climate},i}=-9.57$ 和 $\Delta R_{\text{catchment},i}=42.31$,气候变化对径流量的贡献为负,而下垫面变化对径流量的贡献为正。

表3 长江源气候和下垫面参数

Tab.3 The climate and underlying surface parameters in the source region of the Yangtze River

子时段	时间跨度	对应径流	E/mm	E_0/mm	P/mm	R/mm	n
T_1	1956—1960	R_1	256.28	761.06	329.70	73.42	1.221
T_2	1961—1965	R_2	252.30	742.54	367.61	115.31	1.042
T_3	1966—1970	R_3	253.23	741.33	339.16	85.92	1.160
T_4	1971—1975	R_4	283.56	751.71	381.09	97.52	1.223
T_5	1976—1980	R_5	249.89	737.75	334.96	85.07	1.154
T_6	1981—1985	R_6	276.95	705.94	392.12	115.17	1.171
T_7	1986—1990	R_7	242.89	707.71	345.02	102.13	1.079
T_8	1991—1995	R_8	250.47	757.96	336.09	85.61	1.137
T_9	1996—2000	R_9	278.04	739.10	365.21	87.17	1.262
T_{10}	2001—2005	R_{10}	274.78	761.52	382.48	107.70	1.138
T_{11}	2006—2010	R_{11}	295.28	789.18	414.84	119.55	1.149
T_{12}	2011—2012	R_{12}	307.37	730.22	439.19	131.82	1.211

表4 黄河源气候和下垫面参数

Tab.4 The climate and underlying surface parameters in the source region of the Yellow River

子时段	时间跨度	对应径流	E/mm	E_0/mm	P/mm	R/mm	n
T_1	1956—1960	R_1	282.03	865.33	416.28	134.25	1.005
T_2	1961—1965	R_2	246.61	821.13	420.74	174.13	0.843
T_3	1966—1970	R_3	240.66	802.83	420.25	179.59	0.827
T_4	1971—1975	R_4	267.04	804.81	440.84	173.80	0.910
T_5	1976—1980	R_5	232.18	800.40	400.19	168.01	0.823
T_6	1981—1985	R_6	244.45	730.43	466.19	221.73	0.816
T_7	1986—1990	R_7	251.88	734.92	421.90	170.02	0.914
T_8	1991—1995	R_8	271.35	736.52	416.51	145.16	1.031
T_9	1996—2000	R_9	260.50	764.06	401.53	141.04	0.984
T_{10}	2001—2005	R_{10}	288.82	773.49	424.02	135.19	1.090
T_{11}	2006—2010	R_{11}	312.43	777.91	472.00	159.56	1.103
T_{12}	2011—2012	R_{12}	279.36	704.23	483.24	203.88	0.964

当 α 分别等于1.0、0.5和0时,长江源 $\Delta R_{\text{climate}}$ 的变化范围分别为(-25.19, 29.84)、(-24.89, 32.15)和(-24.59, 34.46)mm, $\Delta R_{\text{catchment}}$ 的变化范围分别为(-14.25, 23.99)、(-15.22, 21.75)和(-16.18, 19.51)mm;黄河源 $\Delta R_{\text{climate}}$ 的变化范围分别为(-31.18, 48.86)、(-29.77, 52.00)和(-28.36, 55.15)mm, $\Delta R_{\text{catchment}}$ 的变化范围分别为(-21.27, 32.80)、(-21.94, 32.53)和(-23.35, 32.27)mm;澜沧江源的 $\Delta R_{\text{climate}}$ 的变化范围分别为(-57.74, 62.96)、(-55.30, 67.03)和(-52.86, 71.11)mm, $\Delta R_{\text{catchment}}$ 的变化范围分别为(-28.76, 42.31)、(-30.23, 41.15)和(-31.70, 39.98)mm。

表5 澜沧江源气候和下垫面参数

Tab.5 The climate and underlying surface parameters in the source region of the Lancang River

子时段	时间跨度	对应径流	E/mm	E_0/mm	P/mm	R/mm	n
T_1	1956—1960	R_1	263.89	869.48	485.10	221.20	0.800
T_2	1961—1965	R_2	262.90	790.26	565.75	302.85	0.751
T_3	1966—1970	R_3	264.05	801.86	489.86	225.81	0.826
T_4	1971—1975	R_4	276.28	791.53	533.17	256.89	0.826
T_5	1976—1980	R_5	278.37	730.36	528.31	249.94	0.876
T_6	1981—1985	R_6	260.56	736.48	565.91	305.35	0.770
T_7	1986—1990	R_7	279.14	755.45	541.30	262.15	0.848
T_8	1991—1995	R_8	273.91	748.61	520.13	246.22	0.857
T_9	1996—2000	R_9	295.36	785.75	548.85	253.49	0.883
T_{10}	2001—2005	R_{10}	266.18	861.65	552.41	286.23	0.742
T_{11}	2006—2010	R_{11}	273.09	895.75	557.15	284.06	0.746
T_{12}	2011—2012	R_{12}	303.89	816.36	598.89	295.00	0.842

澜沧江源径流年际变化较大,气候变化和下垫面变化对径流变化影响的绝对值最大;长江源径流年际变化较小,气候变化和下垫面变化对径流变化影响的绝对值最小。

3.4 三江源气候和下垫面对径流的影响

由于计算得到的 ΔR 为相邻2个子时间段之间的差值,整体上没有可比性,因此将计算得到的 ΔR 依次进行累加。即以子时间段 T_1 为时间基准,分析 $\Delta R_{\text{climate}}$ 和 $\Delta R_{\text{catchment}}$ 的变化规律。 $\Delta R'_{\text{climate},i}$ 和 $\Delta R'_{\text{catchment},i}$ 表示子时间段 T_{i+1} 与子时间段 T_1 的差值。长江源、黄河源和澜沧江源区 $\Delta R'_{\text{climate},i}$ 和 $\Delta R'_{\text{catchment},i}$ 随时间的变化趋势分别见图9、图10和图11。

长江源 $\Delta R'_{\text{climate}}$ 和降水具有显著的正相关关系, α 为1.0、0.5、0时,Pearson相关系数在0.971~0.982,显著水平小于0.01。黄河 $\Delta R'_{\text{climate}}$ 和降水具有显著的正相关关系, α 为1.0、0.5、0时,Pearson相关系数在0.954~0.980,显著水平小于0.01。澜沧江源 $\Delta R'_{\text{climate}}$ 和降水具有显著的正相关关系, α 为1.0、0.5、0时,Pearson相关系数在0.906~0.937,显著水平小于0.01。由此可知,降雨是导致径流变化的主要来源与控制因子,降雨变化越大,则径流变化越大。

长江源 $\Delta R'_{\text{catchment},i}$ 和参数 n 具有显著的负相关关系, α 分别为1.0、0.5和0时,Pearson相关系数在-0.994至-0.937之间,显著水平小于0.01。黄河源 $\Delta R'_{\text{catchment},i}$ 和参数 n 具有显著的负相关关系, α 同样时,Pearson相关系数在-0.997至-0.994之间,显著水平小于0.01。澜沧江源 $\Delta R'_{\text{catchment},i}$ 和参数 n 具有显著的负相关关系, α 同样时,Pearson相关系数在-0.988至-0.997之间,显著水平小于0.01。三

表 6 长江源 $\Delta R_{climate}$ 和 $\Delta R_{catchment}$ 量化分离结果

Tab.6 The quantitative separation results of $\Delta R_{climate}$ and $\Delta R_{catchment}$ in the source region of the Yangtze River

序号	$\alpha=1.0$		$\alpha=0.5$		$\alpha=0$		观测 ΔR	计算 ΔR
	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$		
ΔR_1	17.90	23.99	20.14	21.75	22.38	19.51	41.89	41.89
ΔR_2	-15.13	-14.25	-14.17	-15.22	-13.20	-16.18	-29.38	-29.38
ΔR_3	18.61	-7.01	18.81	-7.21	19.01	-7.41	11.60	11.60
ΔR_4	-20.62	8.17	-20.42	7.97	-20.23	7.78	-12.45	-12.45
ΔR_5	29.84	0.26	32.15	-2.05	34.46	-4.37	30.10	30.10
ΔR_6	-25.19	12.16	-24.89	11.86	-24.59	11.56	-13.03	-13.03
ΔR_7	-10.07	-6.45	-9.47	-7.04	-8.88	-7.64	-16.52	-16.52
ΔR_8	15.35	-13.80	15.41	-13.86	15.47	-13.92	1.55	1.55
ΔR_9	5.49	15.04	5.86	14.68	6.22	14.32	20.53	20.53
ΔR_{10}	13.27	-1.42	13.35	-1.49	13.43	-1.57	11.86	11.86
ΔR_{11}	19.75	-7.49	20.87	-8.61	21.99	-9.73	12.26	12.26

表 7 黄河源 $\Delta R_{climate}$ 和 $\Delta R_{catchment}$ 量化分离结果

Tab.7 The quantitative separation results of $\Delta R_{climate}$ and $\Delta R_{catchment}$ in the source region of the Yellow River

序号	$\alpha=1.0$		$\alpha=0.5$		$\alpha=0$		观测 ΔR	计算 ΔR
	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$		
ΔR_1	7.09	32.80	7.35	32.53	7.61	32.27	39.88	39.88
ΔR_2	1.68	3.77	1.70	3.76	1.71	3.74	5.46	5.46
ΔR_3	12.94	-18.72	12.69	-18.48	12.45	-18.23	-5.79	-5.79
ΔR_4	-24.51	18.72	-24.82	19.02	-25.12	19.33	-5.80	-5.80
ΔR_5	48.86	4.86	52.00	1.72	55.15	-1.42	53.73	53.73
ΔR_6	-31.18	-20.53	-29.77	-21.94	-28.36	-23.35	-51.71	-51.71
ΔR_7	-3.59	-21.27	-3.47	-21.39	-3.35	-21.51	-24.86	-24.86
ΔR_8	-12.33	8.20	-12.11	7.98	-11.89	7.76	-4.13	-4.13
ΔR_9	11.84	-17.68	11.52	-17.36	11.20	-17.04	-5.84	-5.84
ΔR_{10}	25.91	-1.54	26.54	-2.18	27.18	-2.81	24.37	24.37
ΔR_{11}	17.34	26.97	18.37	25.94	19.40	24.91	44.32	44.32

表 8 澜沧江源 $\Delta R_{climate}$ 和 $\Delta R_{catchment}$ 量化分离结果

Tab.8 The quantitative separation results of $\Delta R_{climate}$ and $\Delta R_{catchment}$ in the source region of the Lancang River

序号	$\alpha=1.0$		$\alpha=0.5$		$\alpha=0$		观测 ΔR	计算 ΔR
	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$	$\Delta R_{climate}$	$\Delta R_{catchment}$		
ΔR_1	62.96	18.69	67.03	14.61	71.11	10.54	81.64	81.64
ΔR_2	-57.74	-19.29	-55.30	-21.74	-52.86	-24.18	-77.04	-77.04
ΔR_3	30.65	0.43	31.22	-0.14	31.78	-0.70	31.08	31.08
ΔR_4	5.55	-12.50	6.08	-13.04	6.61	-13.57	-6.95	-6.95
ΔR_5	25.30	30.11	26.20	29.21	27.10	28.31	55.41	55.41
ΔR_6	-21.39	-21.80	-20.89	-22.30	-20.39	-22.81	-43.19	-43.19
ΔR_7	-13.85	-2.08	-13.76	-2.17	-13.67	-2.26	-15.93	-15.93
ΔR_8	14.24	-6.97	14.06	-6.80	13.89	-6.62	7.27	7.27
ΔR_9	-9.57	42.31	-8.41	41.15	-7.24	39.98	32.74	32.74
ΔR_{10}	-0.99	-1.18	-0.95	-1.22	-0.91	-1.26	-2.17	-2.17
ΔR_{11}	39.70	-28.76	41.17	-30.23	42.63	-31.70	10.94	10.94

江源自然保护区的建立,人类活动受到限制,若忽略人类活动的影响,则参数 n 的变化可以归因于植被覆盖度的变化。一般来说,植被覆盖越大,降雨入渗量就越多,产生的径流量就越少,因此 $\Delta R'_{catchment,i}$ 与参数 n 的变化呈相反的趋势。植被覆盖是下垫面影响径流变化的主要控制因子。1956—2012年总体来看,气候变化和下垫面变化增加了长江源径流量,当 α 分别等于1.0、0.5和0时,长江源气候变化对径流

的贡献分别为55.21%、74.03%和92.85%。气候变化和下垫面变化增加了黄河源径流量,当 α 等于1.0、0.5和0时,黄河源区气候变化对径流的贡献分别为52.47%、60.49%和68.50%。当 α 等于1.0时,气候变化和下垫面变化增加了澜沧江源径流量,澜沧江源区气候变化对径流的贡献为89.91%;当 α 分别等于0.5和0时,气候变化增加了澜沧江源径流量,但下垫面变化减少了澜沧江源径流量,因此澜

澜沧江源区气候变化对径流的影响分别为107.25%和124.58%。长江源、黄河源气候和下垫面变化对径流的影响为正贡献,澜沧江源 $\alpha=1.0$ 时气候和下垫面变化对径流的影响为正贡献,但是澜沧江源 α 等于0.5和0时气候对径流的影响为正贡献,而下垫面对径流的影响为负贡献。

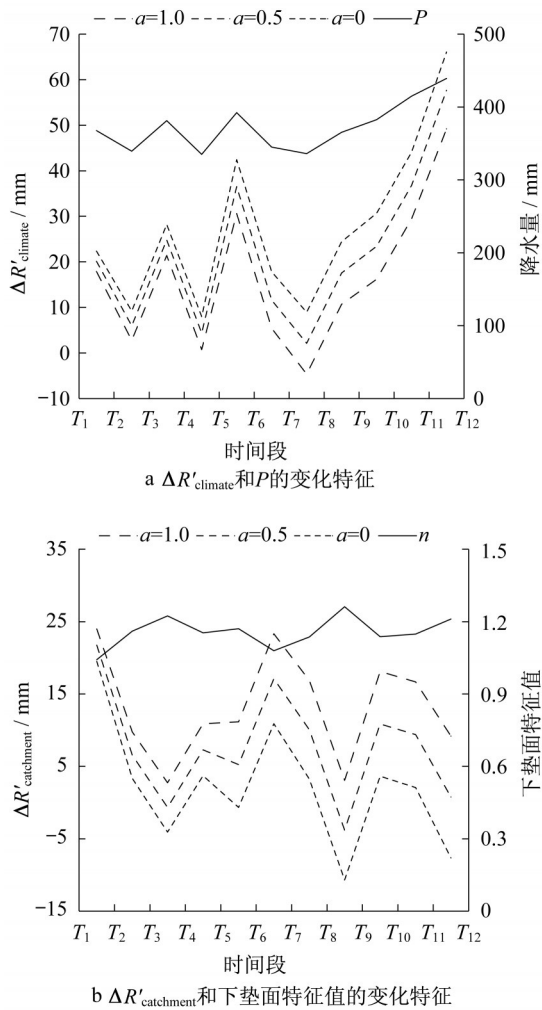


图9 长江源 $\Delta R'_{climate}$ 和 P 的变化特性及 $\Delta R'_{catchment}$ 和 n 的变化特性

Fig.9 The variation characteristics of $\Delta R'_{climate}$ and P , and $\Delta R'_{catchment}$ and n in the source region of the Yangtze River

4 结论

(1)长江源和澜沧江源降雨量呈显著增加趋势,黄河源降雨量增加趋势不显著,长江源、黄河源和澜沧江源10年降雨量倾向率分别为10.83、5.51和11.14 mm。三江源气温呈显著增加趋势,长江源、黄河源和澜沧江源10年气温倾向率分别为0.31、0.29和0.33℃。黄河源NDVI呈显著增加趋势,长

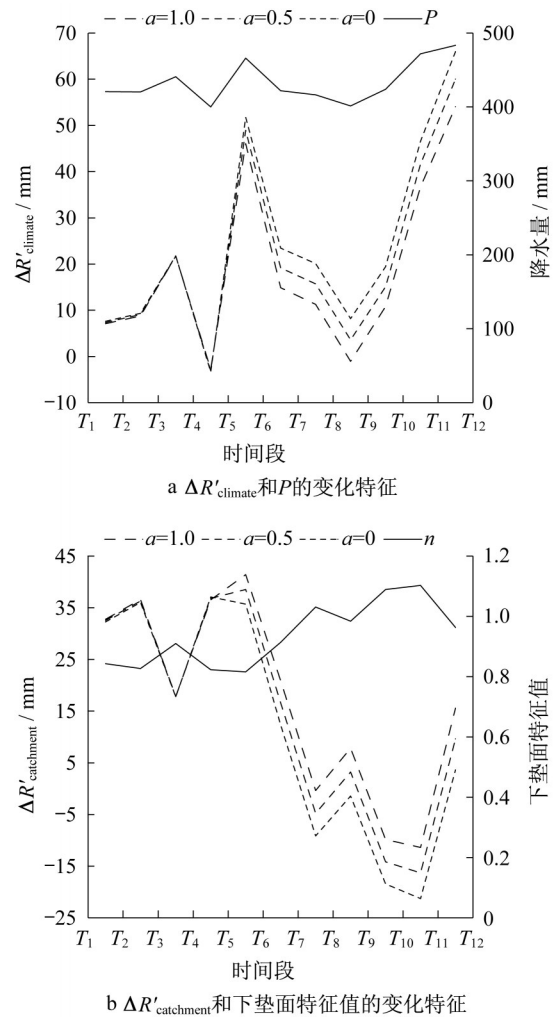


图10 黄河源 $\Delta R'_{climate}$ 和 P 的变化特性及 $\Delta R'_{catchment}$ 和 n 的变化特性

Fig.10 The variation characteristics of $\Delta R'_{climate}$ and P , and $\Delta R'_{catchment}$ and n in the source region of the Yellow River

江源和澜沧江源NDVI增加趋势不显著,长江源、黄河源和澜沧江源10年NDVI值增加幅度分别为0.002、0.004和0.002。

(2)长江源、澜沧江源径流量增加趋势不显著,黄河源径流量减少趋势不显著,长江源、黄河源和澜沧江源10年径流量变化为6.54亿 m^3 、-2.05亿 m^3 和1.54亿 m^3 。降雨量、气温、NDVI和径流深由大到小排序为:澜沧江源、黄河源、长江源。

(3)基于Budyko假设的互补关系权重因子法不仅可以准确地计算出径流年均值的变化,并且量化分离时无需假定气候和下垫面变化对径流变化具有相同的贡献特征。总体来说,长江源、黄河源气候和下垫面变化对径流的影响为正贡献,澜沧江源 α (权重因子)等于1.0时下垫面变化对径流的影响为正

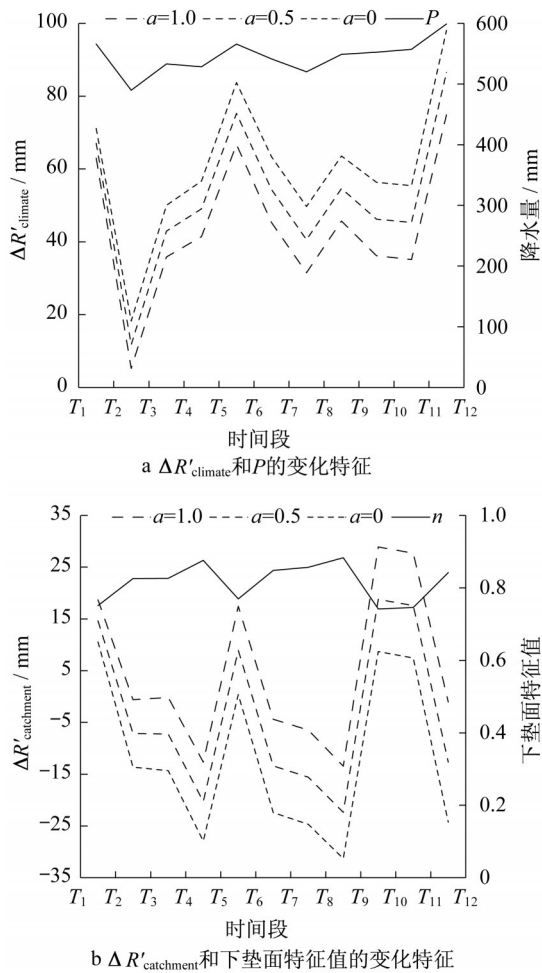


图 11 澜沧江源 $\Delta R'_{climate}$ 和 P 的变化特性及 $\Delta R'_{catchment}$ 和 n 的变化特性

Fig.11 The variation characteristics of $\Delta R'_{climate}$ and P , and $\Delta R'_{catchment}$ and n in the source region of the Lancang River

贡献,但是 α 等于0.5和0时下垫面对径流的影响为负贡献。长江源、黄河源和澜沧江源气候变化对径流的贡献分别为55.21%~92.85%、52.47%~68.50%、89.91%~124.58%。

(4)三江源气候变化对径流的累积贡献值与降雨量具有显著正相关关系,降雨量是气候变化影响径流变化的主要控制因子;三江源下垫面变化对径流的累积贡献值与参数 n 具有显著负相关关系,植被覆盖是下垫面变化影响径流变化的主要控制因子。

致谢:感谢清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室的郑裕彤博士、刘喆硕士在部分数据处理中给予的帮助。

参考文献:

[1] SAIER M H. Climate change, 2007 [J]. Water Air & Soil Pollution, 2007, 181(1/4): 1.

[2] FIELD C B, BARROS V R, MACH K J, *et al.* Climate change 2014 [J]. Europe, 2015, 881(7): 58.

[3] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国科学发展战略(水利科学与工程)[M]. 北京: 科学出版社, 2016. National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China science development strategy (Water conservancy science and engineering) [M]. Beijing: Science Press, 2016.

[4] GAEBRECHT J, van LIEW M, BROWN G O. Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the Great Plains of the United States [J]. Journal of Hydrological Engineering, 2004, 9(5): 360.

[5] NOVOTNY E V, STEFAN H G. Stream flow in Minnesota: indicator of climate change [J]. Journal of Hydrology, 2007, 334(3/4): 319.

[6] ZARCH M A A, SIVAKUMAR B, SHARMA A. Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI) [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 183.

[7] YAN P, DONG G R, SU Z Z. Desertification problems in the Yangtze River source area, China [J]. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 177.

[8] LIU J Y, XU X L, SHAO Q Q. Grassland degradation in the “Three-River Headwaters” region, Qinghai province [J]. Journal of Geographical Science, 2008, 18 (3): 259.

[9] 燕云鹏, 徐辉, 邢宇, 等. 1975—2007年间三江源不同源区湿地变化特点及对气候变化的响应[J]. 测绘通报, 2015, 1 (S1): 5. YAN Yunpeng, XU Hui, XING Yu, *et al.* Response regularity of wetland area changing according to climate changes in the 3-river Source Area from 1975 to 2007 [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015, 1(S1): 5.

[10] IMMERZEEL W W, van BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian water towers [J]. Science, 2010, 328(5984): 1382.

[11] JIANG C, ZHANG L B. Climate change and its impact on the Eco-Environment of the Three-Rivers Headwater Region on the Tibetan Plateau, China [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2015, 12 (10) : 12057.

[12] 时兴合, 秦宁生, 许维俊, 等. 长江源区径流量变化的特征及其预测模型研究[J]. 青海科技, 2007, 14(3): 13. SHI Xinghe, QIN Ningsheng, XU Weijun, *et al.* Study on runoff variation characteristics and its prediction model in the Source Region of the Yangtze River [J]. Qinghai Science and Technology, 2007, 14(3): 13.

[13] 时兴合, 秦宁生, 汪青春, 等. 黄河上游径流变化特征及其影响因素初步分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 690.

- SHI Xinghe, QIN Ningsheng, WANG Qingchun, *et al.* Analysis on runoff variation characteristics and influencing factors in the upper Yellow River [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 690.
- [14] LAN Y, ZHAO G, ZHANG Y, *et al.* Response of runoff in the source region of the Yellow River to climate warming [J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 60.
- [15] PRINCE S D, GOWARD S N. Global primary production: a remote sensing approach [J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 815.
- [16] ZHANG W G, AN S Q, XU Z, *et al.* The impact of vegetation and soil on runoff regulation in headwater streams on the east Qinghai - Tibet Plateau, China [J]. *Catena*, 2011, 87(2): 182.
- [17] 郭笑怡, 刘德赢, 张洪岩. 大兴安岭 NDVI 时间序列的长程相关性特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(1): 152.
GUO Xiaoyi, LIU Deying, ZHANG Hongyan. Detecting long-range correlations in NDVI over greater Khingan Mountains [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(1): 152.
- [18] 周沙, 黄跃飞, 王光谦. 黑河流域中游地区生态环境变化特征及驱动力[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 766.
ZHOU Sha, HUANG Yuefei, WANG Guangqian. Changes in the ecological environment and their determining factors in the middle Heihe River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(3): 766.
- [19] 李作伟, 吴荣军, 马玉平. 气候变化和人类活动对三江源地区植被生产力的影响[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 804.
LI Zuwei, WU Rongjun, MA Yuping. Impact of climate change and human activities on vegetation productivity in the Three-River Headwaters [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 804.
- [20] MEARNS L O, LETTENMAIER D P, MCGINNIS S. Uses of results of regional climate model experiments for impacts and adaptation studies: the example of NARCCAP [J]. *Current Climate Change Reports*, 2015, 1(1): 1.
- [21] BUDYKO M I. *Climate and life* [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [22] SANKARASUBRAMANIAN A, VOGEL R M, LIMBRUNNER J F. Climate elasticity of streamflow in the United States [J]. *Water Resource Research*, 2001, 37(6): 1771.
- [23] WANG G Q, ZHANG J Y, HE R M. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 853.
- [24] TANG J, YIN X A, YANG P, *et al.* Assessment of contributions of climatic variation and human activities to streamflow changes in the Lancang River, China [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(10): 2953.
- [25] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(5): 605.
ZHANG Shulei, YANG Dawen, YANG Hanbo, *et al.* Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960—2010 [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 605.
- [26] HOLBEN B. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417.
- [27] 郭世兴, 刘斌, 王光社, 等. 基于 Mann-Kendall 法的汉江上游水沙趋势分析[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(11): 140.
GUO Shixing, LIU Bin, WANG Guangshe, *et al.* Trend analysis of flow and sediment in upstream of Hanjiang basin based on Mann-Kendall test method [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(11): 140.
- [28] 苏丽敏, 何慧爽. 基于区间数的 Spearman 秩相关系数的多属性决策方法[J]. *统计与决策*, 2019, 35(6): 51.
SU Limin, HE Huishuang. Multi-attribute decision making method based on interval number of Spearman rank correlation coefficient [J]. *Statistics and Decision*, 2019, 35(6): 51.
- [29] ZHOU S, YU B, ZHANG L, *et al.* A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 7163.
- [30] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23.
FU Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1981, 5(1): 23.
- [31] YANG H, YANG D, LEI Z, *et al.* New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): 893.
- [32] YANG D, SUN F, LIU Z, *et al.* Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4): 436.
- [33] HARGREAVES G H. Defining and using reference evapotranspiration [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 1994, 120(6): 1132.