北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

1951—2020年黄河上中游径流变化特征及归因分析

孙莉茹 毕华兴 马志瑾 赵丹阳 王宁 刘泽晖 王鑫

Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020

Sun Liru, Bi Huaxing, Ma Zhijin, Zhao Danyang, Wang Ning, Liu Zehui, Wang Xin

引用本文:
孙莉茹, 毕华兴, 马志瑾, 赵丹阳, 王宁, 刘泽晖, 王鑫. 1951—2020年黄河上中游径流变化特征及归因分析[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1):82-92. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230077
Sun Liru, Bi Huaxing, Ma Zhijin, Zhao Danyang, Wang Ning, Liu Zehui, Wang Xin. Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1):82-92. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230077

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230077

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Budyko理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响

Quantitative assessment on the effects of vegetation changes on runoff based on Budyko theory in the Kuyehe River Basin of northern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 61-71. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190330

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94-104. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180244

基于SPOT-VGT数据的湖南省植被变化及其对气候变化的响应

Vegetation change and its response to climate change based on SPOT-VGT in Hunan Province of southern China

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 80-87. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180278

近55年气候变化对上海园林树种适应性的影响

Adaptability of landscape tree species response to climate change in Shanghai within the past 55 years

北京林业大学学报, 2018, 40(9): 107-117. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180113

庐山日本柳杉早材与晚材年轮宽度对气候变化的响应

Response of earlywood and latewood ring width of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, eastern China

北京林业大学学报, 2020, 42(9): 61-69. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190439

林龄和气候变化对三峡库区马尾松林蓄积量的影响

Effects of stand age and climate change on the volume of *Pinus massoniana* forests in the Three Gorges Reservoir Area of central China

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 11-21. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20190184

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230077

1951—2020 年黄河上中游径流变化特征及归因分析

孙莉茹[1]　毕华兴[1,2,3,4]　马志瑾[5]　赵丹阳[1]　王　宁[1]　刘泽晖[1]　王　鑫[1]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；4. 水土保持国家林业局重点实验室、北京市水土保持工程技术研究中心、林业生态工程教育部工程研究中心（北京林业大学），北京 100083；5. 黄河水利委员会水文局，河南 郑州 450004）

摘要：【目的】河川径流是地表重要的水资源，对其变化特征和原因进行解析，是流域水资源科学管理规划的前提。**【方法】**本文采用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变检验、Budyko 弹性系数法等方法分析了黄河上游和中游近 70 年（1951—2020 年）径流变化的趋势和成因。**【结果】**（1）1951—2020 年黄河上游年降水量呈不显著增加趋势（4.04 mm/（10 a），$P > 0.05$），中游呈不显著减少趋势（4.90 mm/（10 a），$P > 0.05$）；上游、中游年潜在蒸散发均呈不显著增加趋势（1.77、2.23 mm/（10 a），$P > 0.05$）；（2）黄河上游和中游 1980—2020 年土地利用/覆盖变化明显，主要表现在林草面积的增加，上游、中游年 NDVI 分别以 0.025/（10 a）、0.042/（10 a）的速率显著增加（$P < 0.01$）；（3）1951—2020 年，上游和中游年径流量分别以 3.46、7.46 mm/（10 a）的速率显著减少（$P < 0.01$），并分别在 1986 年、1990 年发生突变；（4）上游和中游径流对降水变化最为敏感，其次是土地利用/覆盖变化、潜在蒸散发变化，且径流对各影响因子的敏感性逐年增强，即气候和土地利用/覆盖的变化将更容易引起径流的变化；（5）土地利用/覆盖变化是导致黄河上游和中游径流减少的主要原因，其次是降水和潜在蒸散，但各影响因子对径流变化的影响性质和程度在上游和中游不同区间存在一定的差异。其中，上游地区降水、潜在蒸散发、土地利用/覆盖变化对径流的影响性质和程度分别为−14.04%、1.30%、112.73%；中游地区分别为 21.54%、3.63%、74.83%。**【结论】**1951—2020 年黄河上游和中游径流变化是气候变化和土地利用/覆盖变化共同作用的结果，但主要影响因素为人类活动主导的土地利用/覆盖变化，且各因子对径流的影响在不同区间存在一定的差异。本研究结果可为黄河上游和中游不同区间的水资源管理和综合治理提供理论支持。

关键词：径流变化；气候变化；土地利用/覆盖变化；Budyko；归因分析；黄河上游和中游

中图分类号：S715；P333　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)01−0082−11

引文格式：孙莉茹，毕华兴，马志瑾，等. 1951—2020 年黄河上中游径流变化特征及归因分析［J］. 北京林业大学学报，2024，46(1)：82−92. Sun Liru, Bi Huaxing, Ma Zhijin, et al. Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 82−92.

Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020

Sun Liru[1]　Bi Huaxing[1,2,3,4]　Ma Zhijin[5]　Zhao Danyang[1]　Wang Ning[1]　Liu Zehui[1]　Wang Xin[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China;
3. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083, China;
4. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation,
Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Engineering Research Center of
Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
5. Hydrological Bureau, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, Henan, China)

Abstract: ［**Objective**］ River runoff is an important water resource on the surface of the earth, and the

收稿日期：2023−04−03　**修回日期：**2023−06−18

基金项目：国家重点研发课题（2022YFF1300401），国家自然科学基金项目（31971725、U2243202）。

第一作者：孙莉茹。主要研究方向：林业生态工程。Email：sunliru2023@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号。

责任作者：毕华兴，教授。主要研究方向：水土保持、林业生态工程。Email：bhx@bjfu.edu.cn　地址：同上。

本刊网址：http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

analysis of the characteristics and causes of its change is a prerequisite for the scientific management and planning of water resources in the basin. [**Method**] This study used Mann-Kendall trend test, Pettitt mutation test, Budyko elasticity coefficient method and other methods to analyze trends and causes of runoff variation in the upper and middle reaches of the Yellow River in recent 70 years (1951−2020). [**Result**] (1) From 1951 to 2020, the annual precipitation in the upper reaches of the Yellow River increased 4.04 mm/(10 year) ($P > 0.05$) and decrease 4.90 mm/(10 year) ($P > 0.05$) in the middle reaches of the Yellow River. The potential evapotranspiration in the upper and middle reaches showed no significant increase trend (1.77 mm/(10 year), 2.23 mm/(10 year), $P > 0.05$). (2) From 1980 to 2020, the changes of landuse/cover in the upper and middle reaches of the Yellow River are obvious, mainly in the increase of forest and grass area, and the NDVI in the upper and middle reaches of the Yellow River increased significantly at the rates of 0.025/(10 year) ($P < 0.01$) and 0.042/(10 year) ($P < 0.01$), respectively. (3) From 1951 to 2020, the runoff of upper and middle reaches decreased at the rate of 3.46 mm/(10 year) ($P < 0.01$) and 7.46 mm/(10 year) ($P < 0.01$), respectively, and changed abruptly in 1986 and 1990, respectively. (4) Runoff in the upper and middle reaches is most sensitive to precipitation change, followed by land use/cover change and potential evapotranspiration change, and the sensitivity of runoff to each influencing factor increased year by year, which showed that the change of climate and land use will easily cause runoff change. (5) Land use/cover change was the main cause of runoff decrease in the upper and middle reaches of the Yellow River, followed by precipitation and potential evapotranspiration, but there were some differences in the nature and degree of influencing factors on runoff change in different regions of the upper and middle reaches. Among them, the nature and degree of influence of precipitation, potential evapotranspiration, and land use/cover change on runoff in the upstream area were −14.04%, 1.30%, and 112.73%, respectively; the midstream area was 21.54%, 3.63%, and 74.83%, respectively. [**Conclusion**] The runoff change in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020 is the result of climate change and land use/cover change, but the main influencing factor is land use/cover change dominated by human activities, and the influence of each factor on runoff is different in varied intervals. The results of this study can provide theoretical support for water resource management and comprehensive control in different sections of the upper and middle reaches of the Yellow River.

Key words: runoff change; climate change; land use/cover change; Budyko; attribution analysis; upper and middle reaches of the Yellow River

河川径流是陆地水循环过程的关键环节，是地表水资源重要来源之一。近几十年来，气候变化（气温、降水变化等）和人类活动（土地利用、取用水等）等诸多因素扰动了径流的原有规律，使其发生了显著变化，进而影响了区域水资源量，威胁着区域的水安全[1−2]。因此，分析变化环境下区域径流的变化特征，定量评估气候变化和人类活动的影响，理解水资源的形成过程和演变规律，对维护流域水安全以及增强新形势下的水资源管理具有重要意义。

黄河是中国第二大河流，是我国北方基础性供水水源之一，其径流量空间分布不均，主要来自上游和中游。百年来，在气候变化和人类活动的共同作用下，黄河径流量显著减少[3−4]，区域水资源短缺日益严重[5]。对此，众多学者采用经验统计法、水文模型法等不同方法定量分析了黄河某一区间或子流域径流变化的成因。如 Gu 等[6]采用双累积曲线法量化了降水和人类活动对黄河上游和中游径流减少的影响；杨旭等[7]采用累积量斜率变化率法研究发现黄河中游径流量的变化主要受人类活动影响；Li 等[8]采用 SWAT 模型分离出气候变化和人类活动对渭河各区间径流的影响；Wang 等[9]采用 VIC 模型研究发现黄河子流域白马寺的天然径流主要受控于气候变化。然而，Zeng 等[10]通过对比不同方法得出，经验统计法计算简单但缺乏物理机制，而水文模型法操作又过于复杂且需要的数据量很大。相比之下，基于 Budyko 假设的弹性系数法因其计算相对简单便捷，参数容易获取且有一定的物理基础，能够反映流域内水与能量的关系，已成为目前定量评估径流变化的理想方法，在径流归因分析方面应用前景广阔。国内学者杨大文等[11]，孙福宝等[12]已证实该方法可用于黄河流域，且已有学者利用其进行了相关分析。如 Ni 等[13]采用 Budyko 方法研究发现下垫面变化是黄河径流减少的主导因素；He 等[14]采用 Budyko 方法研究发现导致黄河中游窟野河径流量

减少的主要因素是下垫面变化。

综上所述，目前关于黄河径流研究的理论成果较为丰富，但现有研究大多以黄河整体或某一区间（上、中、下游）或子流域为研究对象，忽略了不同区间的对比分析，且多采用经验统计法，不能全面准确地揭示各影响因素对黄河上游和中游水文过程的影响。因此，本文基于流域 1951—2020 年的水文气象资料，选取黄河上游和中游两个区间为研究对象，采用基于 Budyko 理论的弹性系数法，对上游、中游的径流变化及其归因进行分析，定量评估和区分气候变化与土地利用变化对径流变化的影响，以期为黄河上游和中游不同区间的水资源管理提供科学参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

黄河上游和中游位于 96° ~ 114°E、32° ~ 42°N 之间，流域总面积 77.2 × 10^4 km^2（含内流区）。该区域大部分位于西北半干旱区，地形起伏较大，东西海拔悬殊，气候复杂多样。多年平均气温约−4 ~ 14 ℃，自西向东逐渐升高；多年平均降水量约 200 ~ 650 mm，东南多，西北少，且集中分布在夏季。其中河口镇以上河段为上游，河道长 3 472 km，流域面积 42.8 × 10^4 km^2，占整个流域的 53.8%，是径流的主要来源区；河口镇至桃花峪河段为中游，河道长 1 206 km，流域面积 34.4 × 10^4 km^2，占整个流域的 43.3%，是泥沙的主要来源区。研究区地理位置及水文、气象站点分布见图 1。

1.2 数据来源与处理

（1）径流数据：头道拐、花园口水文站点年尺度径流观测数据来源于黄河水利委员会（http://www.yrcc.gov.cn/）和黄河水资源公报，时间范围为 1951—2020 年。本文采用头道拐水文站数据代表上游径流情况，头道拐水文站至花园口水文站数据差值代表中游径流情况。

（2）气象数据：黄河上游和中游及周边 91 个气象站点逐日气象数据来源于中国气象局（http://www.cma.gov.cn），包括气温、降水、风速、日照时数等，时间范围为 1951—2020 年。本文采用联合国粮农组织修订的 Penman-Monteith 公式[15]计算各站点潜在蒸散量，黄河上游和中游年均降水量及潜在蒸散量在 ArcGIS 软件中采用 Kriging 插值方法求得。

（3）土地利用/覆盖、NDVI 数据：根据现有文献及数据的可得性，本文收集到了黄河流域共 5 期土地利用类型数据（分别为 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年），数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所数据共享中心（http://www.resdc.cn），空间分辨率为 1 km；归一化植被指数（normalized vegetation index，NDVI）数据来源于 1982—2020 年中国 5 km 分辨率逐月 NDVI 数据集[16]，根据研究区域空间范围经进一步处理后得到年尺度的 NDVI 数据。

2 研究方法

2.1 趋势分析与突变分析

本文采用 Mann-Kendall 趋势检验法对黄河上游和中游年降水量、年潜在蒸散量、年径流量进行趋势分析，该方法得出的结果直观准确，不受少数异常值的干扰[17]；采用 Pettitt 突变检验法对黄河上游和中游径流量进行突变分析，该方法通过检验时间序列要素均值变化的确切时间来确定突变发生的时间，对突变点的识别效果较好[18]。以上两种方法在水文研究领域内广泛使用，有关方法原理在此不详述，具体见文献 [19−21]。

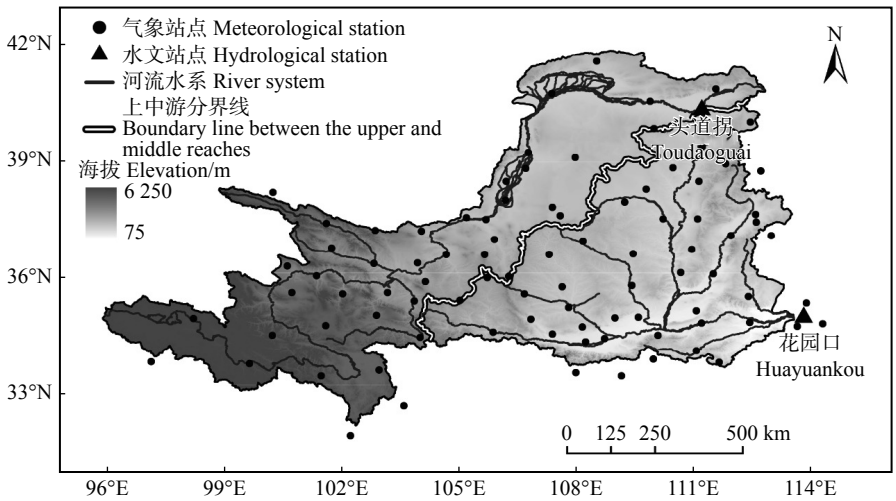


图 1 黄河上游和中游分区及水文气象站点分布

Fig. 1 Zoning and distribution of hydrological and meteorological stations in the upper and middle reaches of the Yellow River

2.2　土地利用变化分析

采用土地利用转移矩阵，反映 2 个时期各土地利用类型之间的转化情况，包括转化来源、去向及数量大小等信息，具体方法见文献 [22]。

2.3　径流变化归因分析

采用基于 Budyko 假设的弹性系数法，评价径流对各环境因子的敏感性，定量识别气候变化（降水、潜在蒸散发）和人类活动（如土地利用/覆盖变化）对径流变化的影响。

（1）Budyko 假设。根据水量平衡原理，在闭合情况下的流域水量平衡方程可表达为

$$R = P - E \tag{1}$$

式中：R 为年径流量（mm）；E 为年实际蒸散发量（mm）；P 为年降水量（mm）。

Budyko 认为流域在长时间尺度下的实际蒸散量同时受水量和热量条件影响，进而提出了水热耦合平衡理论，该理论经过多年的验证与发展，衍生了众多改进方程。本文利用 Yang 等[23−24]提出的 Choudhury-Yang 方程进行研究，其表达式为

$$E = \frac{P \times E_0}{(P + E_0^n)^{1/n}} \tag{2}$$

式中：E_0 为年潜在蒸散发量（mm）；n 为经验参数，主要与流域土地利用类型、植被有关[25−26]。

结合式（1）和（2）可得

$$R = P - \frac{P \times E_0}{(P + E_0^n)^{1/n}} \tag{3}$$

（2）敏感性分析。根据式（3）可知，径流量可用流域内降水、潜在蒸散发及经验参数 n 来描述，即 $R = f(P, E_0, n)$，两个时期的径流变化量采用全微分形式展开，可表示为

$$\mathrm{d}R = \frac{\partial f}{\partial P}\mathrm{d}P + \frac{\partial f}{\partial E_0}\mathrm{d}E_0 + \frac{\partial f}{\partial n}\mathrm{d}n \tag{4}$$

根据弹性系数的定义[27]，某影响因子对径流的弹性系数可表示为

$$\varepsilon_{x_i} = \frac{\partial f}{\partial P} \times \frac{x_i}{R} \tag{5}$$

式中：ε_{x_i} 为径流 R 对某一特定因素 x_i 的弹性系数。

进一步推导各影响因子的弹性系数，如式（6）~（8）所示。

$$\varepsilon_P = \frac{(1+\varphi^n)^{1/n+1} - \varphi^{n+1}}{(1+\varphi^n)\left[(1+\varphi^n)^{1/n} - \varphi\right]} \tag{6}$$

$$\varepsilon_{E_0} = \frac{1}{(1+\varphi^n)\left[1-(1+\varphi^{-n})^{1/n}\right]} \tag{7}$$

$$\varepsilon_n = \frac{\ln(1+\varphi^n) + \varphi^n \ln(1+\varphi^{-n})}{n(1+\varphi^n)\left[1-(1+\varphi^{-n})^{1/n}\right]} \tag{8}$$

式中：$\varphi = \dfrac{E_0}{P}$，ε_P、ε_{E_0}、ε_n 分别表示径流 R 对降水量 P、潜在蒸散发量 E_0 和经验参数 n 的弹性系数。

弹性系数的正负表示径流与该影响因子的正负关系，弹性系数绝对值的大小表示该影响因子对径流变化的影响程度（如 ε_n 的值为 z，则表示 n 增加 1% 导致径流深变化 z%），ε_{E_0}、ε_P 表达同 ε_n。

（3）归因分析。按照突变分析结果将研究期分为基准期和变化期，基准期（R_1）和变化期（R_2）径流量的变化为 ΔR。

$$\Delta R = R_1 - R_2 \tag{9}$$

在长时间尺度内[28−29]，流域径流的变化可以归因于气候变化和土地利用/覆盖变化（land use and land coverage change，LUCC），即

$$\Delta R = \Delta R_c + \Delta R_{\mathrm{LUCC}} = \Delta R_P + \Delta R_{E_0} + \Delta R_{\mathrm{LUCC}} \tag{10}$$

式中：ΔR_c 为气候变化（c）引起的径流变化量；ΔR_{LUCC} 为 LUCC 引起的径流变化量；ΔR_P 为降水变化引起的径流变化量；ΔR_{E_0} 为潜在蒸散变化引起的径流变化量。

结合式（4）和（5），可分别求得相应影响因素引起的径流变化量，即

$$\Delta R_P = \varepsilon_P \frac{R}{P}\mathrm{d}P;\quad \Delta R_{E_0} = \varepsilon_{E_0} \frac{R}{E_0}\mathrm{d}E_0;\quad \Delta R_{\mathrm{LUCC}} = \varepsilon_n \frac{R}{n}\mathrm{d}n \tag{11}$$

式中：$\mathrm{d}P$、$\mathrm{d}E_0$、$\mathrm{d}n$ 为基准期和变化期间年平均降水、年平均潜在蒸散和土地利用/覆盖状况的变化；基准期和变化期土地利用/覆盖状况的量化可以根据式（3）计算得出。

3　结果与分析

3.1　黄河上游和中游降水、蒸散变化

黄河上游多年平均降水量、潜在蒸散发分别为 405.09、966.66 mm，中游分别为 540.07、1 021.87 mm，其年际变化趋势见图 2。从图中可知，1951—2020 年，黄河上游年降水量、年潜在蒸散发分别以 4.04、1.77 mm/（10 a）的速率增加；中游年降水量以 4.90 mm/（10 a）的速率减少，年潜在蒸散发以 2.23 mm/（10 a）的速率增加。对各要素进行趋势检验（表 1），结果显示黄河上游年降水量、年潜在蒸散发呈不显著增加趋势（$P > 0.05$）；中游年降水量呈不显著减少趋势（$P > 0.05$），年潜在蒸散发呈不显著增加趋势（$P > 0.05$）。黄河上游和中游的年降水、潜在蒸散发均发生了变化且变化程度不同，存在一定的空间差异。

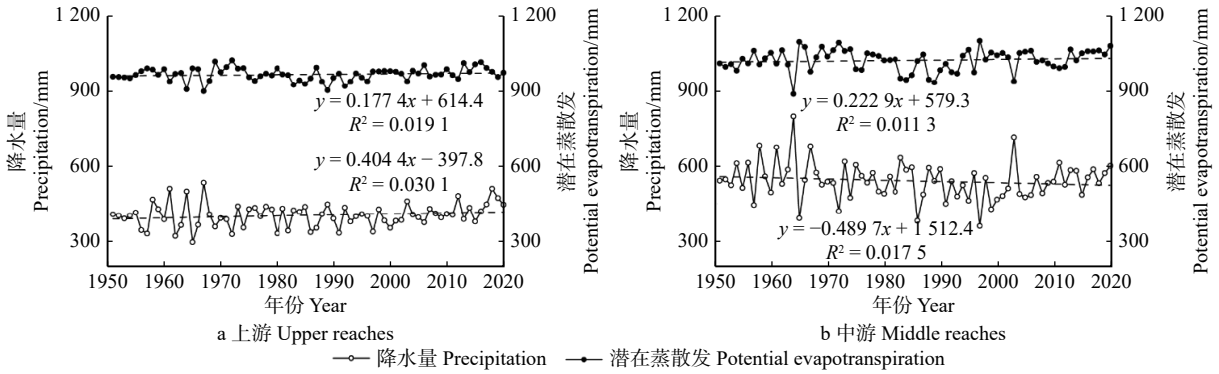


图 2 1951—2020 年黄河上游和中游年降水、潜在蒸散发变化趋势

Fig. 2 Changing trend of annual precipitation and potential evaporation in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020

表 1 黄河上游和中游降水、潜在蒸散发 Mann-Kendall 趋势检验结果

Tab. 1 Results of Mann-Kendall trend test for precipitation and potential evapotranspiration in the upper and middle reaches of the Yellow River

区域 Region	降水量 Precipitation			潜在蒸散发 Potential evapotranspiration		
	*Z*值 *Z* value	显著性 Significance	趋势 Trend	*Z*值 *Z* value	显著性 Significance	趋势 Trend
上游 Upper reaches	1.57	NS	上升 Raise	1.13	NS	上升 Raise
中游 Middle reaches	−0.85	NS	下降 Descend	0.91	NS	上升 Raise

注：NS代表不显著。Note: NS represents not significant.

3.2 黄河上游和中游土地利用/覆盖变化

1980—2020 年黄河上游和中游 6 种土地利用类型面积占比情况见表 2。上游土地利用类型主要为草地（平均占约 62.40%），40 年来面积略有增加，其次是耕地（13.14%），呈现先增加后减少的趋势；林地平均占比约 7.84%，呈增加趋势。由于中游是重要的粮食产区，耕地是其主要的土地利用类型（39.69%），40 年来面积显著减少；其次是草地（34.58%）、林地（19.79%），均呈增加趋势。在其余土地利用类型中，上游和中游均表现为水域面积基本不变，未利用土地有所减少，建设用地显著增加。

1980—2020 年黄河上游和中游土地利用类型转移矩阵见表 3。从表中可以看出上游和中游草地、林地均表现为转入面积大于转出面积，上游耕地转入转出基本持平，中游耕地转入明显小于转出，且转出均以林草为主，这与流域多年实施的“三北”防护林建设和退耕还林还草工程密切相关。其余土地利用类型在上游和中游占比不大，故可近似认为黄河上游和中游土地利用变化主要为植被变化。

进一步采用归一化植被指数（NDVI）研究植被变化。黄河上游和中游 1982—2020 年 NDVI 多年平均值分别为 0.48、0.54，其年际变化趋势见图 3。从图中可知，1982—2020 年，上游、中游年 NDVI 分别以 0.025/（10 a）（$P < 0.01$）、0.042/（10 a）（$P < 0.01$）的速率显著增加，植被恢复现象明显，且中游整体上植被覆盖度比上游高，NDVI 增加速率较上游快，植被恢复效果较上游好。

3.3 黄河上游和中游径流变化及归因分析

3.3.1 径流变化趋势及突变检验

黄河上游和中游多年平均径流量分别为 58.78、

表 2 1980—2020 年黄河上游和中游土地利用类型面积占比

Tab. 2 Area proportion of land use types in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1980 to 2020 %

土地利用类型 Land use type	上游 Upper reaches					中游 Middle reaches				
	1980	1990	2000	2010	2020	1980	1990	2000	2010	2020
耕地 Cultivated land	12.95	13.06	13.47	13.23	12.99	40.40	40.60	40.53	39.59	37.34
林地 Forest land	7.73	7.75	7.74	7.88	8.11	19.61	19.52	19.57	20.11	20.14
草地 Grassland	62.66	62.79	62.06	61.78	62.72	34.35	34.32	34.48	34.49	35.24
水域 Water area	2.01	1.85	1.88	1.87	2.00	1.11	1.05	0.99	1.05	1.04
建设用地 Construction land	1.19	1.20	1.29	1.43	2.22	1.76	1.79	2.04	2.29	3.87
未利用土地 Unused land	13.46	13.35	13.56	13.81	11.96	2.77	2.72	2.39	2.47	2.37

表 3　1980—2020 年黄河上游和中游土地利用类型的转移矩阵

Tab. 3　Transfer matrix of land use types in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1980 to 2020　　km^2

区域 Region	土地利用类型 Land use type	上游（2020）Upstream (2020)/中游（2020）Midstream (2020)						
		耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用土地 Unused land	总计 Sum
上游（1980） Upper reaches (1980)	耕地 Cultivated land		1 642.45	14 777.75	985.19	3 919.23	1 221.76	55 327.81
	林地 Forest land	1 176.14		12 803.56	216.00	265.17	532.04	33 013.47
	草地 Grassland	16 597.25	13 662.81		2 160.24	2 839.91	15 187.86	267 661.61
	水域 Water area	1 060.61	210.11	2 165.33		199.46	790.17	8 601.84
	建设用地 Construction land	2 046.17	162.55	1 041.10	111.01		143.34	5 092.62
	未利用土地 Unused land	1 865.18	932.99	19 916.89	884.19	664.84		57 426.06
	总计 Sum	55 526.79	34 631.48	267 918.19	8 532.78	9 477.06	51 037.14	
中游（1980） Middle reaches (1980)	耕地 Cultivated land		8 925.19	36 861.29	1 241.20	8 183.97	452.14	138 708.52
	林地 Forest land	7 532.74		10 804.97	185.61	525.19	158.39	67 251.35
	草地 Grassland	32 310.17	11 454.86		639.71	2 094.88	2 347.58	117 911.51
	水域 Water area	1 356.22	187.80	612.35		212.61	64.55	3 805.52
	建设用地 Construction land	3 220.90	167.08	614.66	63.21		27.89	6 041.37
	未利用土地 Unused land	718.53	278.79	3 018.06	85.13	321.30		9 502.68
	总计 Sum	128 183.28	69 058.18	120 975.64	3 586.85	13 285.60	8 131.42	

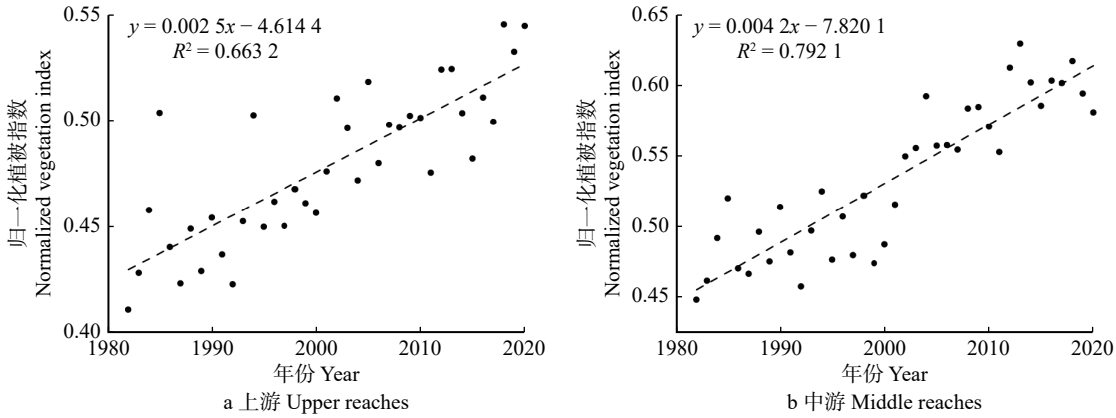


图 3　1982—2020 年黄河上游和中游年植被指数变化趋势

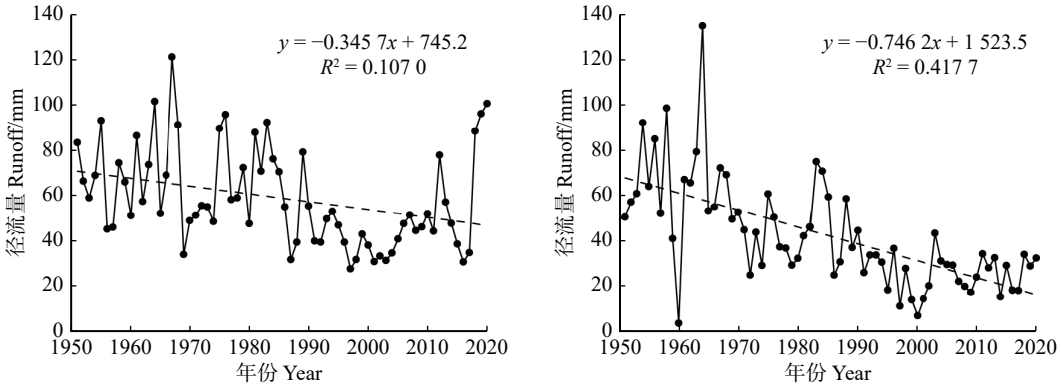
Fig. 3　Variation trend of annual NDVI in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1982 to 2020

42.02 mm，其年际变化趋势见图 4。从图中可知，1951—2020 年，黄河上游和中游年径流量分别以 3.46、7.46 mm/（10 a）的速率减少。对径流进行趋势和突变检验（表 4），结果显示黄河上游和中游年径流量均表现为显著减少趋势（$P < 0.01$），且中游年径流量减少的变化趋势明显大于上游；上游和中游年径流序列均存在突变（满足 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平），突变年份分别为 1986 年、1990 年。

3.3.2　径流变化归因分析

（1）敏感性分析。根据径流突变年份，分别将黄河上游和中游 1951—2020 年径流量划分为基准期和变化期 2 个时期。根据上游和中游基准期与变化期的多年平均降水量、径流量、潜在蒸散发量，分别计算各时期的参数 n 及弹性系数 ε_p，ε_{E_0}，ε_n，结果见表 5。

从表 5 中计算得出的弹性系数来看，潜在蒸散发和土地利用/覆盖（用参数 n 表示其变化情况）与径流量呈负相关，而降水量与径流量呈正相关，且径流变化对降水最敏感，其次是土地利用/覆盖。对比上游基准期与变化期，上游降水、潜在蒸散发分别增加 8.93、3.56 mm，参数 n 增大 0.30。弹性系数 $|\varepsilon_P|$ 由 2.11 增加到 2.42，表明当降水增加 10% 时，变化期径流增加量比基准期多 3.17%；$|\varepsilon_{E_0}|$、$|\varepsilon_n|$ 分别由 1.11、1.88 增加到 1.42、2.16，表明当潜在蒸散发、参数 n 增加 10% 时，变化期径流减少量分别比基准期多 3.17%、2.82%。对比中游基准期与变化期，中游降水减少 28.46 mm，潜在蒸散发增加 13.40 mm，参数 n 增加 0.59。弹性系数 $|\varepsilon_P|$ 由 2.88 增加到 3.56，表明当降水减少 10% 时，变化期径流减少量比基准期多 6.80%；$|\varepsilon_{E_0}|$、$|\varepsilon_n|$ 分别由 1.88、2.09 增加到 2.56、2.70，表明当潜在蒸散发、参数 n 增加 10% 时，变化期径流减少量分别比基准期多 6.80%、6.10%。



a 上游 Upper reaches　　b 中游 Middle reaches

图 4　1951—2020 年黄河上游和中游年径流变化趋势

Fig. 4　Variation trend of annual runoff in the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020

表 4　黄河上游和中游径流趋势及突变检验结果

Tab. 4　Results of runoff trends and abrupt change tests in the upper and middle reaches of the Yellow River

范围 Region	Mann-Kendall趋势检验 Mann-Kendall trend test			Pettitt突变检验 Pettitt mutation test	
	*Z*值 *Z* value	显著性 Significance	趋势 Trend	突变年份 Mutation year	显著性 Significance
上游 Upper reaches	−3.22	**	下降 Descend	1986	**
中游 Middle reaches	−6.07	**	下降 Descend	1990	**

注：**表示$P < 0.01$。Note: ** represents $P < 0.01$.

表 5　黄河上游和中游不同时期各气象水文要素特征值及弹性系数

Tab. 5　Characteristic values and elasticity coefficients of each meteorological and hydrological element in different periods in the upper and middle reaches of the Yellow River

范围 Region	时期 Period	*R*/mm	*P*/mm	E_0/mm	*R*/*P*	E_0/P	*n*	弹性系数 Elasticity coefficient		
								ε_p	ε_{E_0}	ε_n
上游 Upper reaches	全时段 Full period（1951—2020）	58.78	405.10	966.66	0.15	2.39	1.51	2.25	−1.25	−2.01
	基准期 Base period（1951—1986）	68.66	400.76	964.93	0.17	2.41	1.38	2.11	−1.11	−1.88
	变化期 Change period（1987—2020）	48.32	409.69	968.50	0.12	2.36	1.68	2.42	−1.42	−2.16
中游 Middle reaches	全时段 Full period（1951—2020）	42.02	540.07	1 021.87	0.08	1.89	2.41	3.10	−2.10	−2.30
	基准期 Base period（1951—1990）	54.51	552.26	1 016.13	0.10	1.84	2.22	2.88	−1.88	−2.09
	变化期 Change period（1991—2020）	25.37	523.80	1 029.53	0.05	1.97	2.81	3.56	−2.56	−2.70

注：*R*. 径流量；*P*. 降水量；E_0.潜在蒸散发量；*n*.经验参数，主要与流域土地利用类型、植被有关；ε_p、ε_{E_0}、ε_n分别为径流对*P*、E_0和参数*n*的弹性系数。Notes: *R* represents runoff; *P* represents precipitation; E_0 represents potential evapotranspiration; *n* represents empirical parameter which are mainly related to land use types and vegetation in watersheds; ε_p, ε_{E_0}, ε_n, respectively represent the elastic coefficients of runoff for *P*, E_0 and *n*.

1951—2020 年黄河上游和中游降水、潜在蒸散发和土地利用/覆盖弹性系数的年际变化及其趋势检验见图 5 和表 6。由图表可知，各因子弹性系数的绝对值均呈显著增加趋势，说明在此期间上游和中游的径流变化对气候变化和土地利用/覆盖变化的敏感性均逐渐增强。且中游各因子弹性系数的绝对值及其变化程度均大于上游，说明中游径流对气候变化和土地利用/覆盖变化更加敏感，反映了径流对气候变化和土地利用/覆盖变化敏感性的空间差异性。

（2）影响性质与程度。黄河上游和中游各影响因子对径流变化的影响性质与程度见表 7。由表 7 可知，降水、潜在蒸散发、土地利用/覆盖变化引起上游径流的变化量分别为 2.91、−0.27、−23.36 mm，分别占上游径流减少总量的−14.04%、1.30%、112.73%；引起黄河中游径流的变化量分别为−6.87、−1.16、−23.85 mm，分别占中游径流减少总量的 21.54%、3.63%、74.83%。由此可知，1951—2020 年降水，潜在蒸散发和土地利用/覆盖对上游和中游径流均有明显的影响，其中土地利用/覆盖对径流的影响程度最大，对径流减少起到了主导作用，是引起黄河上游和中游径流变化的主要因素；就气候变化而言，降水变化对径流的影响比潜在蒸散发更显著。

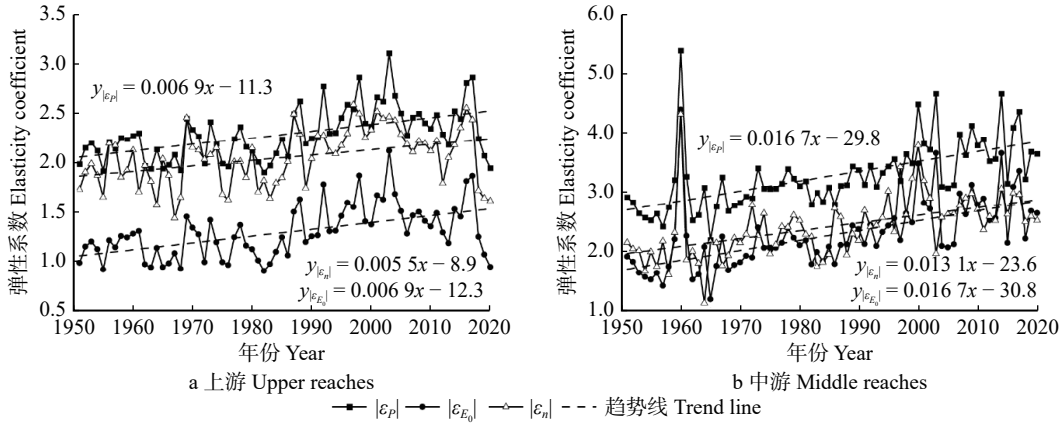


图 5　降水、潜在蒸散发和土地利用/覆盖的弹性系数年际变化

Fig. 5　Interannual variation of elasticity coefficients of precipitation, potential evapotranspiration and LUCC

表 6　黄河上游和中游不同弹性系数绝对值 Mann-Kendall 趋势分析结果

Tab. 6　Results of Mann-Kendall trend analysis of different absolute values of elasticity coefficients in the upper and middle reaches of the Yellow River

范围 Region	$\lvert\varepsilon_P\rvert$			$\lvert\varepsilon_{E_0}\rvert$			$\lvert\varepsilon_n\rvert$		
	Z值 Z value	显著性 Significance	趋势 Trend	Z值 Z value	显著性 Significance	趋势 Trend	Z值 Z value	显著性 Significance	趋势 Trend
上游 Upper reaches	4.58	**	上升 Raise	4.58	**	上升 Raise	3.32	**	上升 Raise
中游 Middle reaches	6.83	**	上升 Raise	6.83	**	上升 Raise	5.55	**	上升 Raise

表 7　黄河上游和中游径流变化归因分析结果

Tab. 7　Results of attribution analysis of runoff changes in the upper and middle reaches of the Yellow River

范围 Region	基准期 Base period	变化期 Change period	ΔR_P/mm	ΔR_{E_0}/mm	ΔR_{LUCC}/mm	$\Delta R'$/mm	C_P/%	C_{E_0}/%	C_{LUCC}/%
上游 Upper reaches	1951—1986	1987—2020	2.91	−0.27	−23.36	−20.72	−14.04	1.30	112.73
中游 Middle reaches	1951—1990	1991—2020	−6.87	−1.16	−23.85	−31.88	21.54	3.63	74.83

注：ΔR_P、ΔR_{E_0}、ΔR_{LUCC}分别为降水量P、潜在蒸散发量E_0和LUCC引起的径流变化量；$\Delta R'$为计算求得的径流变化量；C_P、C_{E_0}、C_{LUCC}分别为降水、潜在蒸散发和LUCC对径流变化的影响性质和程度。Notes: ΔR_P, ΔR_{E_0}, ΔR_{LUCC}, respectively represent runoff changes caused by precipitation, potential evapotranspiration and LUCC. $\Delta R'$ represents runoff change calculated. C_P, C_{E_0}, C_{LUCC}, respectively represent the nature and degree of influence of precipitation, potential evapotranspiration and LUCC on runoff changes.

4　讨　　论

4.1　气候变化和土地利用/覆盖变化对径流影响的不确定性

本研究得出黄河上游和中游径流变化对降水最敏感，但 1951—2020 年径流减少的主要原因是土地利用/覆盖变化（用参数 n 表示其变化情况），且上游和中游变化期的参数 n 均大于基准期，n 值有所增加。由于土壤和地形在几十年内不会有太大变化，所以参数 n 的增加应该主要来自当地人类活动和气候变化引起的植被覆盖增加[28]。从 1980—2020 年黄河上游和中游土地利用类型及其变化、NDVI 变化分析可知，上游土地利用类型主要为草地，中游主要为耕地，40 年来 6 种土地利用类型间的相互转化行为较为频繁，其中林草地均呈现增加趋势，植被恢复现象明显，这与“三北”防护林建设和退耕还林还草工程密切相关。有关研究指出，流域大规模的植树造林活动，会对径流产生显著的影响[30]，尤其在干旱和半干旱地区，由于其降水条件的限制，植被恢复会在一定程度上加剧水资源的短缺[31]。因此，人类活动主导的植被变化可能是导致黄河上游和中游径流减少的重要原因。

此外，气候变化和土地利用/覆盖变化对径流的影响具有不确定性。随着气候和土地利用/覆盖的剧烈变化，上游和中游的径流也发生了巨大变化，70 年来显著减少，且径流对气候变化和土地利用/覆盖变化的敏感性均逐渐增强，这说明未来黄河上游和中游的径流对气候变化和土地利用/覆盖变化的响应可能会更加明显，降水小幅度的减少或增加、气温的升高、人类活动的持续增强，都可能继续引起径流较大的变化，这给径流带来更多的不确定性，黄河上游和中游径流减少的大趋势可能还会继续。此前，

Wang 等[32]利用 Budyko 方法也得出随着气候和土地利用等发生的巨大变化，黄河中游径流敏感性增加从而导致径流减少。

4.2 黄河上游和中游不同区间径流变化的空间差异

在气候变化和土地利用/覆盖变化影响不断加强的背景下，黄河上游和中游径流量均呈显著下降趋势，但存在空间差异，中游的下降趋势明显大于上游且突变年份有所不同，中游径流对降水、潜在蒸散发、土地利用的敏感性也较上游高。在气候方面，上游和中游气候条件差异较大，上游降水不显著增加，中游不显著减少，且中游潜在蒸散发增加速率较上游高；在土地覆盖方面，上游土地利用类型以草地为主，中游以耕地为主，并且在“三北”防护林建设和退耕还林还草工程的背景下，上游和中游植被均有所恢复但存在明显的空间差异。由此可知，上游和中游气候变化和土地利用/覆盖变化的不同，导致了上游和中游两个区间径流变化的不同。此前，李芳等[33]利用 SWAT 模型定量研究也得出，区域的径流变化具有明显的空间和时间差异性，且逐渐增强的人类活动是导致区域径流变化呈现时空特征差异性的主要原因。

4.3 不足与展望

本研究虽然深入分析了气候变化和土地利用/覆盖变化对黄河上游和中游不同区间径流变化的影响性质和程度，但由于数据不足和其他技术条件的限制，尚不足以做出全面的分析和评价，未来仍需要进一步探讨。本篇采用 Budyko 弹性系数法分析了气候和土地利用/覆盖变化对径流的影响，该方法的前提是各变量之间相互独立，互不影响，然而实际情况中二者会相互影响，这可能会导致分析结果存在误差。在未来的研究中，应当进一步思考并分析二者的相互作用，以便更好地区分气候变化和土地利用/覆盖变化对径流的影响。其次，流域径流的影响因素繁多，本篇只考虑了降水、潜在蒸散发、土地利用/覆盖对径流的影响，实际上，水利工程建设、取用水等人类活动对黄河径流产生的影响也不可忽略。20 世纪 60 年代以来，黄河流域先后修建了多个大中型水利枢纽工程，据黄河水资源公报统计，2020 年黄河流域共有大、中型水库 224 座，年末蓄水量达 447.68 亿 m^3，水库蓄水截流作用明显；同时，随着上游和中游社会经济的快速发展，人口数量的增长，流域内居民生活用水、工农业用水、生态用水等需求也在不断增加，据统计，2020 年黄河供水区总取水量达到了 536.15 亿 m^3，这也是导致黄河径流减少的重要原因。以上因素在后续相关研究中可加以考虑，以得出更为客观准确的径流定量分析结果。此外，部分气象站点存在数据缺失的情况，尽管本文利用插补法将数据补齐，但不可避免得会对结果造成一定的误差，未来可探索更科学的气象模型对数据进行清洗和完善。

5 结 论

本文利用降水、潜在蒸散发、土地利用、NDVI 和径流数据，基于 Budyko 弹性系数法，定量分析了黄河上游和中游 1951—2020 年气候变化与土地利用/覆盖变化对径流的影响。通过上述分析，可以得到以下结论。

（1）1951—2020 年，黄河上游年降水量以 4.04 mm/（10 a）（$P > 0.05$）的速率不显著增加，中游以 4.90 mm/（10 a）（$P > 0.05$）的速率不显著减少；上游、中游年潜在蒸散发量分别以 1.77、2.23mm/（10 a）（$P > 0.05$）的速率不显著增加。

（2）1980—2020 年，黄河上游和中游土地利用/覆盖变化明显，主要表现在林草面积的增加；上游和中游年 NDVI 在 1982—2020 年间分别以 0.025、0.042/（10 a）（$P < 0.01$）的速率显著增加，对比而言中游整体上植被覆盖度比上游高，且 NDVI 增加趋势更显著。

（3）1951—2020 年，黄河上游和中游年径流量分别以 3.46、7.46 mm/（10 a）（$P < 0.01$）的速率显著减少，对其进行突变分析得出，上游和中游分别在 1986、1990 年发生了突变。

（4）在黄河上游和中游，径流量与潜在蒸散量、土地利用/覆盖呈负相关，与降水量呈正相关。径流对各影响因子的敏感性表现为降水 > 土地利用/覆盖 > 潜在蒸散发。且径流对气候变化和土地利用/覆盖变化的敏感性均逐年增强，增加幅度表现为中游 > 上游，即气候和土地利用/覆盖的变化将更容易引起径流的变化，且这一现象在中游更为明显。

（5）根据径流突变年份划分基准期与变化期，通过 Budyko 弹性系数法对径流进行归因分析得出，各影响因子对黄河上游和中游径流变化的影响性质和程度有所不同。其中，降水、潜在蒸散、土地利用/覆盖变化对上游径流减少的影响性质和程度分别为 −14.04%、1.30%、112.73%，对中游分别为 21.54%、3.63%、74.83%。土地利用/覆盖变化是引起黄河上游和中游径流减少的主要因素，其次是降水和潜在蒸散。

参 考 文 献

[1] Zhai R, Tao F. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 605−606: 219−229.

[2] 黄斌斌, 郝成元, 李若男, 等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展 [J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 899−910.
Huang B B, Hao C Y, Li R N, et al. Research progress on the quantitative methods of calculating contribution rates of climate change and human activities to surface runoff changes[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 899−910.

[3] 胡慧杰, 崔凯, 曹茜, 等. 黄河近百年径流演变特征分析 [J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 14−19.
Hu H J, Cui K, Cao Q, et al. Analysis of the characteristics of the runoff evolution in Yellow River in recent 100 years[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 14−19.

[4] 鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 等. 1956—2016 年黄河流域河川径流演变规律 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 52−57.
Bao Z X, Yan X L, W G Q, et al. The trend in streamflow of the Yellow River Basin during 1956–2016[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 52−57.

[5] 刘昌明, 刘小莽, 田巍, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题 [J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 6−9.
Liu C M, Liu X M, Tian W, et al. Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin urgently need to solve the water shortage problem[J]. Yellow River, 2020, 42(9): 6−9.

[6] Gu C, Mu X, Gao P, et al. Changes in run-off and sediment load in the three parts of the Yellow River Basin, in response to climate change and human activities[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(4): 585−601.

[7] 杨旭, 姬广兴, 杨元达, 等. 1961—2016 年黄河中游区间径流变化及归因分析 [J]. 河南科学, 2021, 39(12): 2007−2013.
Yang X, Ji G X, Yang Y D, et al. Runoff changes and their attributions in the middle reaches of the Yellow River from 1961 to 2016[J]. Henan Science, 2021, 39(12): 2007−2013.

[8] Li S, Yang G, Wang H. The runoff evolution and the differences analysis of the causes of runoff change in different regions: a case of the Weihe River Basin, Northern China [J/OL]. Sustainability, 2019, 11(19): 5295[2022−12−21]. https://doi.org/10.3390/su11195295.

[9] Wang J, Hong Y, Gourley J, et al. Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response: a case study in a sub-basin of the Yellow River, China[J]. International Journal of Climatlology, 2010, 30(14): 2130−2137.

[10] Zeng F, Ma M G, Di D R, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff: a review of method and application[J/OL]. Water, 2020, 12(8): 2201[2022−12−21]. https://doi.org/10.3390/w12082201.

[11] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析 [J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024−1034.
Yang D W, Zhang S L, Xu X Y. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(10): 1024−1034.

[12] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(4): 409−416.
Sun F B, Yang D W, Liu Z Y, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River Basin based on Budyko hypothesis[J]. Journal of Hydraulic Science, 2007, 38(4): 409−416.

[13] Ni Y, Yu Z, Lü X, et al. Spatial difference analysis of the runoff evolution attribution in the Yellow River Basin[J/OL]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128149[2022−12−21]. https://doi.org/10.1016 /j.jhydrol.2022.128149.

[14] He Y, Mu X, Jiang X, et al. Runoff variation and influencing factors in the Kuye River Basin of the middle Yellow River[J/OL]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 877535[2022−12−21]. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.877535.

[15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[16] 徐洋, 杨雅萍. 1982–2020 年中国 5 km 分辨率逐月 NDVI 数据集 [J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2022, 7(1): 99–107.
Xu Y , Yang Y P. A 5 km resolution dataset of monthly NDVI product of China(1982–2020)[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2022, 7(1): 99–107.

[17] 蓝云龙, 黎曙, 李霞, 等. 1956–2018 年黄河源区降水变化规律分析 [J]. 青海科技, 2021, 28(5): 107−112.
Lan Y L, Li S, Li X, et al. Analysis of precipitation variation law in the source region of the Yellow River from 1956 to 2018[J]. Qinghai Science and Technology, 2021, 28(5): 107−112.

[18] 田小靖, 赵广举, 穆兴民, 等. 水文序列突变点识别方法比较研究 [J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 33−40.
Tian X J, Zhao G J, Mu X M, et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 33−40.

[19] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J/OL]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3–4): 350–363.

[20] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J/OL]. Econometrica, 1945, 13(3): 245[2022−12−20]. https:// doi.org/10.2307/1907187.

[21] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J/OL]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126[2022−12−20]. https://doi.org/10.2307/2346729.

[22] 廖慧, 舒章康, 金君良, 等. 1980–2015 年黄河流域土地利用变化特征与驱动力 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2021, 19(1): 129−139.
Liao H, Shu Z K, Jin J L, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River Basin from 1980 to 2015[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2021, 19(1): 129−139.

[23] Choudhury B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1−2):

99−110.

[24] 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): 893−897.

[25] Yang Y, Tian F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(3−4): 373−383.

[26] Yang H, Yang D. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff[J]. Water Resources Research, 2011, 47(7): 197−203.

[27] McCuen R H. A sensitivity and error analysis CF procedures used for estimating evaporation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1974, 10(3): 486−497.

[28] 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[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530−540.

[29] Wang H, Stephenson S. Quantifying the impacts of climate change and land use/cover change on runoff in the lower Connecticut River Basin[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(9): 1301−1312.

[30] 毕早莹, 李艳忠, 林依雪, 等. 基于 Budyko 理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 61−71.
Bi Z Y, Li Y Z, Lin Y X, et al. Quantitative assessment on the effects of vegetation changes on runoff based on Budyko theory in the Kuyehe River Basin of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 61−71.

[31] Jiang C, Zhang H, Wang X, et al. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 135−150.

[32] Wang Y, Wang S, Wang C, et al. Runoff sensitivity increases with land use/cover change contributing to runoff decline across the middle reaches of the Yellow River Basin[J/OL]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126536[2021−07−05]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126536.

[33] 李芳, 曾彪, 李勋贵, 等. 气候变化和人类活动对黄河上游径流变化的差异性影响 [J]. 人民珠江, 2022, 43(2): 101−111.
Li F, Zeng B, Li X G, et al. Differential impact of climate change and human activities on runoff changes in the upper reaches of the Yellow River[J]. Pearl River, 2022, 43(2): 101−111.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 孟 平）