

淮河上游径流演变规律及其对气候驱动因子的响应

刘永婷^{1,2}, 徐光来^{1,2}, 高超³, 任秀真^{1,2}, 刘继锋⁴, 李鹏⁵

(1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002; 2. 安徽自然灾害过程与
防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241002; 3. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211;
4. 信阳市水文水资源勘测局, 河南 信阳 464000; 5. 河南省驻马店市水文水资源勘测局, 河南 驻马店 450003)

摘要: [目的] 研究淮河上游径流的变化趋势及其对气候驱动因子的响应, 为防洪防汛, 水资源的合理规划管理及区域社会经济可持续发展提供决策依据。[方法] 基于 1975—2014 年淮河上游的年平均流量、降水、蒸发数据, 使用时序分析、交叉小波分析法和弹性系数法, 分析河川流量和气候要素的变化趋势及周期性特征, 探讨淮河上游径流对气候驱动因子的响应状况。[结果] ①淮河流域上游河段流量、降水量呈不同程度的减少趋势, 递减率分别为 $3.8 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ 和 $26.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 而潜在蒸散发量的变化趋势不明显。②淮河流域上游流量的周期变化主要是 6~12 a 的年际变化, 年降水量在 2 a 左右的年际变化周期与年潜在蒸散发量的基本一致。年流量和年降水量、潜在蒸散发量的显著相关区域均主要分布于 20 世纪 90 年代以后。③通过定量估算气候因子对流量影响, 发现年降水和年潜在蒸散发对流量的弹性系数 ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 分别为 2.30 和 -0.47。年流量与降水量关系密切, 而与潜在蒸散发的关系不大, 未来降水的变化是影响水资源变化的主要因素。[结论] 在气候变化、流域下垫面和人类活动的综合影响下, 河川径流的年内分配均匀度发生着相应变化。

关键词: 流量; 弹性系数法; 气候变化; 淮河上游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0008-06

中图分类号: P333

文献参数: 刘永婷, 徐光来, 高超, 等. 淮河上游径流演变规律及其对气候驱动因子的响应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 8-13. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.002. Liu Yongting, Xu Guanglai, Gao Chao, et al. Law of runoff evolution and its response to climate-driven factors in upper reaches of Huaihe River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 8-13.

Law of Runoff Evolution and Its Response to Climate-Driven Factors in Upper Reaches of Huaihe River Basin

LIU Yongting^{1,2}, XU Guanglai^{1,2}, GAO Chao³, REN Xiuzhen^{1,2}, LIU Jifeng⁴, LI Peng⁵

(1. College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui

241002, China; 2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention,

Wuhu, Anhui 241002, China; 3. Department of Geography and Space Information Technology,

Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China; 4. Xinyang Municipal Bureau of Hydrology, Xinyang,

He'nan 464000, China; 5. Zhumadian Municipal Bureau of Hydrology, Zhumadian, He'nan 4500003, China)

Abstract: [Objective] Taking the upper reaches of Huaihe River basin as a case study, this paper investigates the law of runoff and its response to climate-driven factors in order to provide the scientific basis for flood control, reasonable planning of water resources and economic sustainable development. [Methods] By using hydrological statistics, cross wavelet transform analysis and elastic coefficient method, we analyzed the variation trend and the periodicity of the runoff in Huaihe River. The relation between the meteorological factors and

收稿日期: 2017-12-06

修回日期: 2018-01-03

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“平原河网水系测度与演化机制研究: 以杭嘉湖区为例”(41301029), “精确测年下黄山北麓河流阶地发育机制与水系演化研究”(41301011); 国家自然科学基金项目“不同空间尺度农业旱涝灾害气象因子致灾阈值的确定: 以淮河流域地区为例”(41571018)

第一作者: 刘永婷(1985—), 女(汉族), 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学与水资源的研究生。E-mail: 2662291994@qq.com。

通讯作者: 徐光来(1978—), 男(汉族), 安徽省无为县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水文学与水资源的研究生。E-mail: guanglaixu@163.com。

the runoff in multi-time scales was analyzed as well in the study area. [Results] ① The runoff and precipitation exhibited a decreasing trend at a rate of $-3.8 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ and $-26.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$, respectively. The variation of potential evapotranspiration was not obvious. Precipitation was the most dominant factor controlling changes of annual runoff, and the correlation coefficient was 0.9 between precipitation and runoff. However, both precipitation and potential evapotranspiration influenced runoff processes within a year. ② Wavelet analysis showed that periodic variation of annual runoff in the upper reaches of Huaihe River was 6~12 a. The variation of precipitation and potential evapotranspiration presented a same periodicity of 2 a. There were significant correlations among annual-runoff, annual-precipitation and annual-potential evapotranspiration in 1990s. ③ The responses of runoff to climate-driven factors were not stable, changing with time. Elastic coefficient of annual precipitation and evapotranspiration were 2.30 and -0.47 , respectively. Annual runoff had a significant correlation with precipitation while little correlation with the potential evaporation, indicated that precipitation change was the main factor that influence variation of water resources in future. [Conclusion] With the comprehensive impacts of climate change, underlying surface of watershed and human activities, the annual distribution of runoff uniformity will be changed greatly.

Keywords: runoff; elastic coefficient method; climate change; the upper reaches of Huaihe River

流域水文循环是一个相当复杂的过程,并受多种因素的影响,其中降水、蒸发和径流是水文循环的基本途径^[1-2]。随着气候变化和人类活动综合作用的加剧,降水、蒸发和河川径流等水文要素发生显著的时空变化,引发部分流域极端气候及水文事件的频率和强度增加,加剧了旱涝灾害频发的风险^[3-4]。近年来,变化环境下的径流演变规律及其对气候变化和人类活动等驱动因子的响应逐渐成为目前研究的热点问题之一^[5-6]。

关于降水、径流关系、径流演变规律及径流变化驱动因子等开展了大量研究,广泛使用线性趋势法、降水径流双累积曲线及小波周期分析等数理统计方法,主要涉及潮河流域、黄河流域、长江流域、元江—红河等众多流域。另外研究人员们也分别对渭河、白龙江和汉江等流域上游水源区的径流量变化趋势及其影响因素进行了研究^[7-10],结果表明各流域径流量总体上均呈减少趋势,不同区域影响径流量减少的主导因素差异显著。

淮河流域地处南北气候的过渡区域,气候条件复杂,旱涝灾害频发,严重威胁了流域的社会经济发展,因而充分认识淮河上游径流量的演变规律及其与气候因子的相关性,可为流域农业生产、水利工程建设 and 可持续发展提供参考。现在已有关于淮河流域径流变化趋势及其与气候要素、土地利用等因素的相互关系的研究^[11-13]。

但在径流、降水和潜在蒸散发三者的变化趋势、周期性和相互关系等方面的研究相对较少,径流变化对气候驱动因子的响应程度仍需进一步探讨。

本文拟以淮河上游为研究区,运用时序分析和交叉小波分析法探讨流量和气候要素(降水、潜在蒸散发)的变化趋势及周期性特征,采用气候弹性系数探讨流量变化对气候要素(降水、潜在蒸散发)的响应,并定量估算两气候要素对流量变化的贡献率。旨在揭示淮河流域上游地区水文气候要素的变化特征,从而为改善区域生态环境,实现水资源的可持续性开发利用提供一定的科学依据。

1 研究区概况

本文研究区选择的是长台关以上的流域,位于 $113^{\circ}27' - 114^{\circ}6.6'E$, $32^{\circ}6.6' - 32^{\circ}43.2'N$,海拔介于 $69 \sim 1110 \text{ m}$ 。流域内地貌以低山丘陵为主,地势西北高东南低。流域属于湿润气候向半湿润气候过渡带,年平均气温为 $11 \sim 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$,研究区年降水量为 $500 \sim 1500 \text{ mm}$,受东亚季风影响大,流域降水年内分布不均,多集中在6—9月,易发生旱涝灾害。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据均来源于河南省信阳市水文局。流量数据为1975—2014年淮河上游长台关站的实测流量数据。长台关站($114^{\circ}4'E$, $32^{\circ}19'N$)位于河南省信阳市的长台关镇,控制流域总面积约 3090 km^2 ,是淮河上游的重要水文站^[14]。淮河流域的面降水量依据流域各个站点降水量(表1),采用泰森多边形法计算获得。潜在蒸散发根据区内和周围各站点的常规观测资料,采用彭曼公式计算得到日参考蒸散发,然后采用IDW插值得到长台关站控制范围内的参考蒸散

发。插值得到的结果与流域内南湾蒸发皿观测资料具有很好的一致性。插值结果可以用来表示流域的面潜在蒸散发量^[1]。

表 1 淮河上游雨量站点信息

雨量站名称	经度	纬度	时间序列
吴城	113°30.6′	32°25.8′	1975—2014
黄岗	113°36.6′	32°34.8′	1975—2014
胡家湾	113°38.4′	32°17.4′	1975—2014
回龙寺	113°43.8′	32°37.2′	1975—2014
大坡岭	113°45.0′	32°19.2′	1975—2014
平昌关	113°53.4′	32°21.6′	1975—2014
顺河店	113°47.4′	32°18.6′	1975—2014

2.2 研究方法

本文采用 Morlet 小波功率谱对其进行周期演变分析,运用连续小波变换(CWT)、交叉小波变换(XWT)和小波相干(WTC)分析年平均流量和气候要素(降水、潜在蒸散发)在时频中的相关性及其所包含的周期性特征,并运用置信水平 $\alpha=0.05$ 下的红噪声标准谱进行显著性检验^[15-16]。

借鉴 Schaake 等^[17]提出的气候变化弹性模型,探讨流量与气候要素(降水、潜在蒸散发)的响应关系。根据径流对降水和潜在蒸散发的弹性系数,气候变化引起的流量变化可表为:

$$\frac{\Delta Q_i}{Q} = \epsilon_p \frac{\Delta P_i}{P} + \epsilon_{E_0} \frac{\Delta E_i}{E} \quad (1)$$

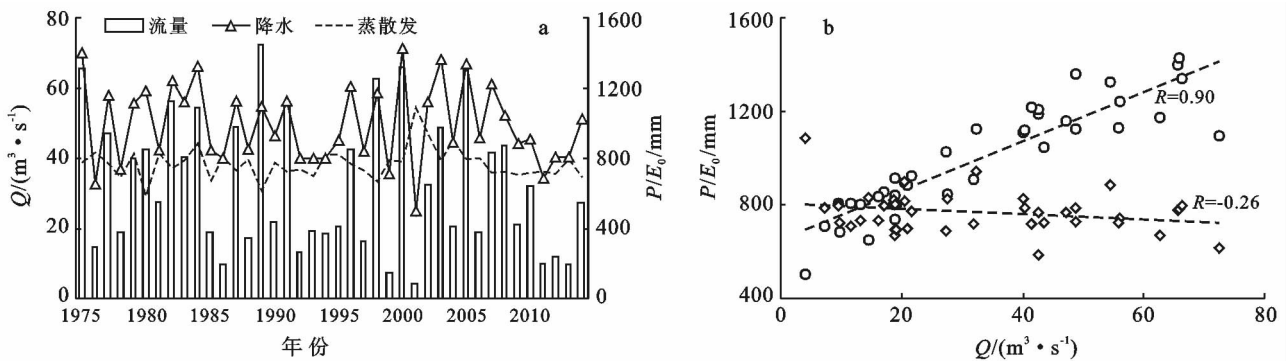


图 1 淮河上游地区年平均流量(Q)、降水量(P)和潜在蒸散发量(E_0)线性趋势(a)与相关性(b)

3.2 径流及气候要素周期性分析

为了识别淮河上游水文气象序列的周期成分及其在时间尺度上的分布,本文选用交叉小波对淮河上游年平均流量和气候要素(降水、潜在蒸散发)的变化特征及三者不同时间尺度相关关系进行分析,得到年平均流量、降水及潜在蒸散发的连续小波功率谱、交叉小波功率谱和小波相干谱(如图 2 所示)。黑色和白色分别表示能量密度的谷值和峰值,黑色细实线为

式中: $\Delta Q_i, \Delta P_i, \Delta E_i$ ——任意年平均流量(m^3/s)、降水量(mm)、潜在蒸散发量(mm)相对于多年平均的变化; Q, P, E ——多年平均流量(m^3/s)、降水量(mm)、潜在蒸散发量(mm)相对应的平均值; $\epsilon_p, \epsilon_{E_0}$ ——平均流量对降水和潜在蒸散发的弹性系数,并分别估算降水、潜在蒸散发对流量的影响^[18]。本文气候变化和人类活动对流量变化的贡献率的计算过程主要参考赖天铨等^[19]和党素珍等^[20]的计算方法。

3 结果与分析

3.1 流域内的水文变化

1975—2014 年淮河上游多年平均流量为 $32.65 \text{ m}^3/\text{s}$,流域最大流量 $72.46 \text{ m}^3/\text{s}$ (1989),最小值出现在 2001 年,仅为 $4.19 \text{ m}^3/\text{s}$,绝对变化幅度为 $68.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 。多年平均降水量为 993.09 mm ,年降水最大值出现在 2000 年(1427.49 mm),最小值出现在 2001 年(500.45 mm),与流量极值出现相同时间。多年平均潜在蒸散发量为 767.2 mm ,流域最大潜在蒸散发量为 1086.5 mm (2001),最小值 584.4 mm (1980),绝对变化幅度为 502.1 mm 。

淮河上游年平均流量、年降水量和年蒸散发量线性趋势均未达到 $p < 0.05$ 的显著性水平(图 1a),其中流量波动较大($C_v = 0.60$),降水量其次($C_v = 0.23$),蒸发量波动较小($C_v = 0.11$)。年平均流量与降水呈正相关,与蒸散发呈负相关(图 1b)。

小波影响锥边界,黑色粗实线为 95% 置信区间边界,通过红噪声检验。淮河上游的年平均流量在 1982—1998 年有 6~12 a 长周期,年降水量在 2000—2003 年主要以 1~3 a 周期为显著周期(超过 95% 的置信度水平),年潜在蒸散发量周期在 1978—1985 年有 2 a 左右显著周期(图 2a—2c)。在多时间尺度上,年平均流量和年降水量存在显著正相关关系,在 1998—2004 年的相关显著周期为 1~3 a,并且在

1979—2000 和 2000—2013 年叠加了 6~9, 9~10.5 a 周期带。年降水量和年潜在蒸散发量在 1978—1982 年存在 2 a 左右相关显著周期,年潜在蒸散发量与年

平均流量的 2~3 a 显著周期变化主要分布在 1999—2003 年,其中年潜在蒸散发量与年平均流量在 1987—2001 年叠加 7~9 a 的周期(图 2d—2f)。

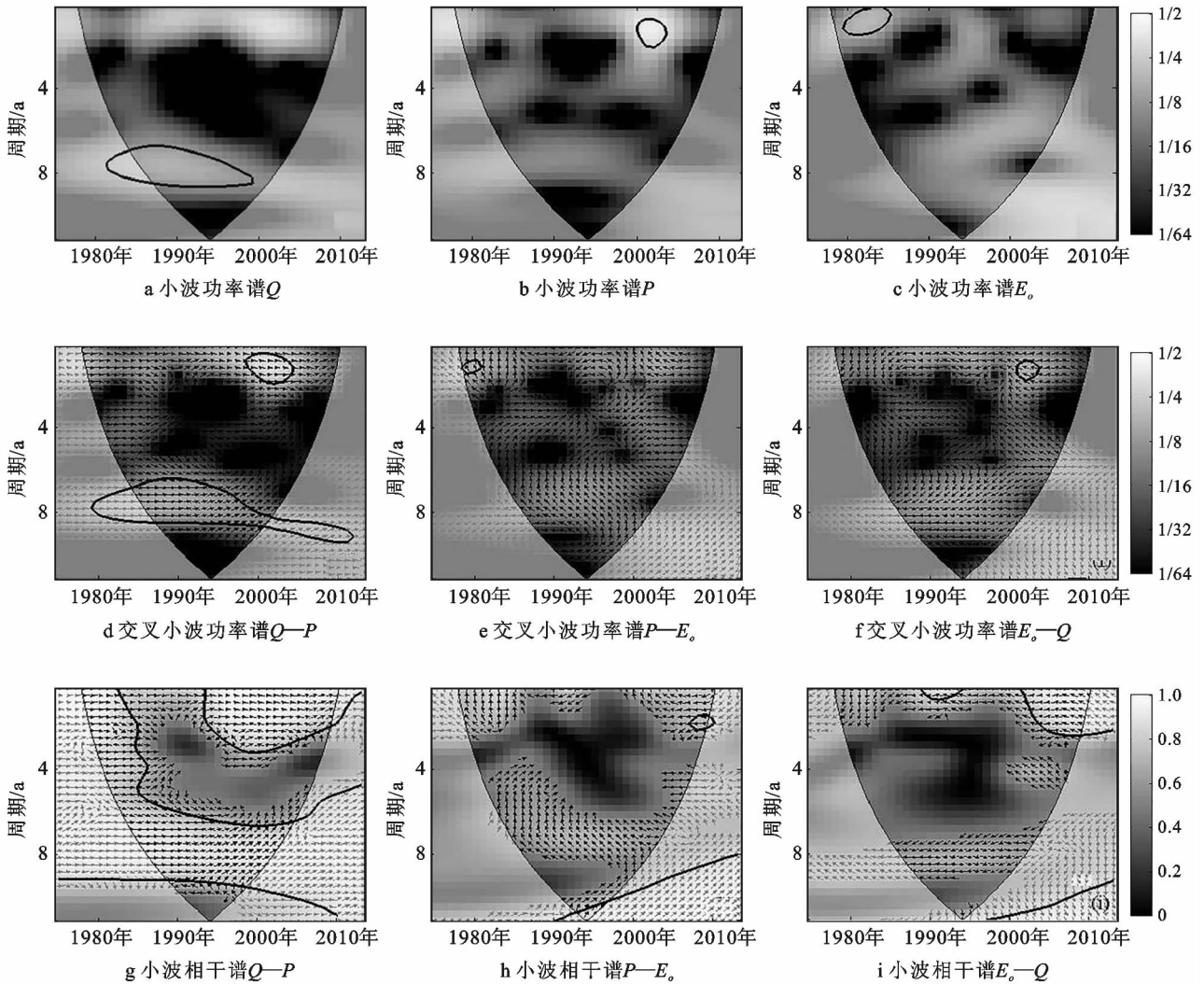


图 2 年平均流量(Q)、降水量(P)和潜在蒸散发量(E₀)的小波功率谱、交叉小波功率谱和小波相干谱

由图 2g 可知,年平均流量和年降水量在大部分时频域中表现同相位关系,1987—2013 年年平均流量和年降水量在 2~6 a 左右的共振周期上表现为同相位正相关变化特征,相反,年降水量和年潜在蒸散发量则表现为明显的反向位关系(图 2h),1980—1984 年在 2 a 左右、1998—2005 年在 3.5 a 左右的共振周期上存在显著的负相关,在 1998—2013 年亦趋于负相关,但并不显著。年潜在蒸散发量和年平均流量在 1990—2005 年两者趋于反向位负相关变化,在约 3 a 左右的周期上较为显著。

综上所述,水文气象要素变化周期具有一定差异,也存在相似性,年平均流量、降水和潜在蒸散发量变化的年代际周期特征,以 2~3 a 周期为常见,这与以往研究淮河上游年平均流量存在的主要周期相一致^[21]。

3.3 径流对气候要素变化的响应

为进一步评估气候要素对径流的影响,定量分析出两气候因子在流量变化中所在的比重,年降水和年潜在蒸散发对年平均流量的弹性系数 ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 分别为 2.30 和 -0.47(表 2),即 10% 的降水减少导致 23.0% 的流量减少,而潜在蒸散发增加 10%,将导致流量减少 4.7%,这说明随着降水的减少,年平均流量减少的速度更快些。可能是因为降水较少的时候,地下流量的比例较大,而降水较多时,地下流量的比例较小,这就导致地表流量变化的速度要快于降水变化速度。各季节气候因子对年平均流量的贡献有一定差异,四季降水对年平均流量的弹性系数均为正值,其中夏季降水的弹性系数最大。夏季和冬季的潜在蒸散发对年平均流量的弹性系数为负值,而春季和

秋季潜在蒸散量对年平均流量的弹性系数为正值,可能是日照时数和风速的下降造成了潜热通量减少,出现“蒸发悖论”现象^[22]。

表 2 弹性系数法定量分析气候变化对淮河上游径流变化的影响

弹性系数	全年	春季	夏季	秋季	冬季
降水弹性系数	2.30	1.72	1.97	1.61	0.39
蒸散发弹性系数	-0.47	0.53	-0.62	0.33	-1.11

基于弹性系数法定量评估气候变化和人类活动对流域流量变化的影响,结果显示气候变化和人类活动对流量减少的影响率分别为 70.07% 和 29.93%,气候变化是导致淮河上游流量减少较为主要的原因。由此可见,长台关年平均流量与降水量关系密切,而与潜在蒸散发的关系不大,未来降水的变化是影响水资源变化的主要因素。

4 讨论与结论

4.1 讨论

河川径流的减少与气候变化有着密切的联系,人类活动的加剧也会对径流产生一定影响,如控制性水利工程、生产生活用水和水土保持措施等,这些人类活动均会造成河道径流量的减少。长台关上游 14 km 处正在建设一个大型水库——出山店水库,总库容达到 $1.72 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。出山店水库上游有中型水库 6 座,小型一类水库 16 座,小型二类水库 83 座,以上 105 座水库总库容达 $2.17 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。水库建设对汛期径流量影响较大,但对于年径流量影响相对较小,所以本文的年平均流量数据为 1975—2014 年淮河上游长台关站的实测数据,并未进行资料还原。本文研究表明降水量的减少和潜在蒸散发的增加在一定程度上影响了淮河流域上游的径流量,而潜在蒸散发的变化对径流减少的影响微弱,降水量减少和下垫面变化是造成径流减少的重要因素,这与张树磊等^[23]的研究结果相吻合。由于研究区以农业为主,生产和生活过多用水,也会致使流域上游径流减少。另外,土地覆被/土地利用变化对流域径流的减少也有重要影响^[24]。20 世纪 80 年代以来,淮河流域开始实行水土保持工作,改变了研究区的土地利用和植被覆盖,一定程度上引起了径流的减少^[25],径流量的周期变化受降水量的影响小,这与图 1 中平均流量过程线变化趋势一致。

蒸发是水文学研究的难题,研究区的实际蒸发量是流域水面蒸发、植被蒸腾和土壤蒸发的总和,而本

文的蒸发数据是基于普通气象资料利用彭曼公式计算出来的(仅考虑流域水面蒸发),只是蒸发的一部分。在探讨径流影响因素时只考虑了径流与降水、潜在蒸散发的相关关系,但径流变化同时会受到温度、社会经济耗水和土地利用等的影响。气候弹性系数法是在假设降水和潜在蒸散发是相互独立的变量前提下,分离降水和潜在蒸散发对径流的影响,这也会降低结果的精确率,因此单纯地对比分析三者的变化特征会存在一定误差。由于本研究采用数据时间序列较短,也未能在更长时间尺度上研究该流域植被、土地利用、水利工程等更多因子对径流的影响。如何细化径流变化对不同人类活动的响应,需要更加深入地探讨。未来应利用水文模型与多变量弹性分析相结合,情景模拟和定量评价流域径流的多时空尺度变化特征,定量区分气候变化和人类活动作用,精确分析流域径流对气候驱动因子的响应。

4.2 结论

(1) 1975—2014 年淮河上游年平均流量和年降水均呈锯齿状震荡,而年潜在蒸散发呈微弱增加趋势(变化不明显),年际变化率分别为 $-3.8 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, $-26.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 和 $2.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。径流量年内分配不均衡, C_v 超过 0.50,径流年际变化较为强烈。

(2) 淮河上游年平均流量、年降水量和年潜在蒸散发量存在 2~3 a 的显著周期。年径流量与降水量在多时间尺度存在显著正相关,年平均流量与年潜在蒸散发量存在显著负相关周期,显著相关区域均主要分布于 20 世纪 90 年代以后。

(3) 基于弹性系数法定量估算了气候变化对径流的影响,10% 的降水减少导致 23.0% 的径流减少,而潜在蒸散发增加 10%,将导致径流减少 4.7%。年平均流量与降水量关系密切,而与潜在蒸散发的关系不大,降水是导致淮河上游径流减少的主要气候要素。

[参 考 文 献]

- [1] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62-70.
- [2] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6.
- [3] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285.
- [4] 郭巧玲,陈新华,窦春峰,等. 近 60 a 来窟野河全流域年径流变化及其影响因素分析研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 90-95.

- [5] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [6] Zhang Qiang, Liu Jianyu, Singh V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(14):2562-2576.
- [7] 李雪,李运刚,何娇楠,等. 1956—2013年元江—红河流域径流变化及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2016,38(6):1149-1159.
- [8] 孙悦,李栋梁. 1975—2011年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. *冰川冻土*, 2014,36(2):413-423.
- [9] 张晓晓,张钰,徐浩杰. 1961—2010年白龙江上游水文气象要素变化规律分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015,29(2):172-178.
- [10] 严栋飞,解建仓,姜仁贵,等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016,27(6):13-19.
- [11] 郝婷婷,钟平安,魏蓬. 淮河流域近50a天然径流演变规律分析[J]. *水电能源科学*, 2011,29(9):4-7.
- [12] 唐为安,田红,卢燕宇,等. 1961—2010年降水和土地利用变化对淮河干流上中游径流的影响[J]. *生态环境学报*, 2015,24(10):1647-1653.
- [13] 刘睿,夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. *人民黄河*, 2013,35(9):30-33.
- [14] 郑仕强. 长台关水文站同级水位洪峰流量偏大原因分析[J]. *河南水利与南水北调*, 2012(12):11-12.
- [15] 高月,卞健民,宋超,等. 基于小波分析的抚松县降水量变化对矿泉水资源量的响应研究[J]. *水文*, 2016,36(2):35-40.
- [16] 张洪波,俞奇骏,陈克宇,等. 基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J]. *华北水利水电大学学报:自然科学版*, 2016,37(4):59-66.
- [17] Schaake J, Waggoner P E. From climate to flow[C]// Waggoner P E, Climate Change and U. S. Water Resources, New York: John Wiley and Sons, 1990: 177-206.
- [18] 徐光来. 太湖平原水系结构与连通变化及其对水文过程影响研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [19] 赖天程,张强,张正浩,等. 人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2016,55(4):136-145.
- [20] 党素珍,董国涛,蒋晓辉,等. 气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2014,12(4):30-34.
- [21] 刘永婷,徐光来,李鹏,等. 淮河上游径流年内分配均匀度及变化规律[J]. *水土保持研究*, 2017,24(5):99-104.
- [22] 蒋冲,王飞,刘思洁,等. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. *生态学报*, 2013,33(3):605-613.
- [23] 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):605-613.
- [24] 朱丽,秦富仓,姚云峰,等. 北京市红门川流域森林植被/土地覆被变化的水文响应[J]. *生态学报*, 2010,30(16):4287-4294.
- [25] 肖幼. 对淮河流域水土保持工作的思考[J]. *中国水利*, 2000,21(5):32-33.

(上接第7页)

- [9] 米志英,周丹丹,吴亚东. 风蚀沙埋对沙柳形态特征的影响[J]. *内蒙古林业科技*, 2005(1):10-13.
- [10] 刘海江,郭柯. 沙埋对中间锦鸡儿幼苗生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2005,25(10):2550-2556.
- [11] 聂春雷,郑元润. 鄂尔多斯高原4种主要沙生植物种子萌发与出苗对水分和沙埋的响应[J]. *植物生态学报*, 2005,29(1):32-41.
- [12] 周瑞莲,杨淑琴,黄清荣,等. 小叶锦鸡儿抗沙埋生长与抗氧化酶及同工酶变化的关系[J]. *生态学报*, 2015,35(9):3014-3022.
- [13] 刘福全. 植物枝叶与根系固土抗蚀差异性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [14] 张军红,吴波,雷雅凯,等. 毛乌素沙地油蒿植株形态与结构特征分析[J]. *西南林业科技大学*, 2011,31(5):5-9.
- [15] 廉永善,陈学林. 沙棘的生态地理分布及其植物地理学意义[J]. *植物分类学报*, 1992,30(4):349-355.
- [16] 李根前,唐德瑞,赵一庆. 沙棘的生物学与生态学特性[J]. *西北植物学报*, 2000,20(5):892-897.
- [17] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等. 青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J]. *干旱区地理*, 2014(4):777-785.
- [18] 张登山,高尚玉,石蒙沂,等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [19] 刘增文,高国雄,吕月玲,等. 不同立地条件下沙棘种群生物量的比较与预估[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2007,31(1):37-41.
- [20] 赵彩霞,郑大伟,何文清. 植被盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. *植物生态学报*, 2005,29(1):68-73.
- [21] 高志义,张玉胜. 沙棘根系特性的观察与研究[J]. *北京林业大学学报*, 1989,11(4):53-59.
- [22] 胡建忠,王愿昌,张鉴,等. 影响沙棘生长主要生态因子的灰色优势分析[J]. *中国水土保持*, 1995(4):28-32.
- [23] 张吉科,张小民,张国伟. 中国沙棘表皮毛的形态分布和类群研究[J]. *林业科学*, 1995,31(5):408-413.
- [24] 李丽霞,梁宗锁,王俊峰. 土壤水分和风速对沙棘苗木水分状况和成活率影响的试验研究[J]. *沙棘*, 1999,12(4):18-21.