

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.07

气候变化和人类活动对汾河流域 径流量影响的定量评估

夏伟^{1,2}, 周维博^{1,2}, 李文溢^{1,2}, 何庆龙^{1,2}, 安宝军³, 杨浩³

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省西咸新区沣东新城斗门水库建设管理中心, 陕西 西安 710086)

摘要: 以汾河流域为例, 采用小波分析法、累积距平法分析了该流域 1965–2016 年径流量和降水量的变化趋势, 揭示了径流量变化过程中存在 1988 和 1997 年两个突变点。应用累积量斜率变化率比较法分析了不同时期降水量和人类活动对汾河流域径流量变化的相对贡献率。结果表明: 以 1965–1987 年为基准期, 1988–1996 年降水量和人类活动对径流量减小的相对贡献率分别为 37.69% 和 62.31%; 1997–2016 年降水量和人类活动对径流量减小的相对贡献率分别为 -11.92% 和 111.92%。

关键词: 径流量; 气候变化; 人类活动; 贡献率; 汾河流域

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)06-0047-06

Quantitative evaluation on the impact of climate variability and human activities on runoff changes in the Fenghe River Basin

XIA Wei^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, LI Wenyi^{1,2}, HE Qinglong^{1,2}, AN Baojun³, YANG Hao³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xian 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas of Ministry of Education, Chang'an University, Xian 710054, China; 3. Doumen Reservoir Construction Management Center of Fengdong New City of Xixian New Area of Shaanxi Province, Xian 710086, China)

Abstract: The wavelet analysis and cumulative anomaly analysis method were used to analyze the changing trends of runoff and precipitation during 1965–2016 in the Fenghe River Basin. Two mutational points in the runoff in the Fenghe River Basin in 1988 and 1997 were revealed. And the slope change ratio of cumulative quantity was adopted to estimate the relative contribution rates of precipitation and human activities on runoff changes in different time periods. Taking 1965–1987 as a reference period, we obtained the contribution rates of precipitation and human activities to the decreased runoff from 1988 to 1996 which were 37.69% and 62.31% respectively, and -11.92% and 111.92% in 1997–2016.

Key words: runoff; climate variability; human activity; contribution rate; Fenghe River Basin

1 研究背景

河川径流在自然水文循环过程中占据重要一环, 对区域资源环境、自然水文循环和社会经济可持续发展具有重要意义^[1-4]。而近几十年来, 随着全球气候变化和人类活动的加强, 河川径流发生了显

著变化^[5-9]。因此, 针对气候变化和人类活动对河川径流的影响程度的相关研究已经成为水文学领域的研究热点。张调风等^[10]通过对湟水河流域径流量影响因素进行定量评估发现, 气候变化对湟水河流域径流量减少的贡献率为 35.46%, 人类活动对湟水河流域径流量减少的贡献率为 64.54%; 夏军

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-07-03

基金项目: 陕西省水利科技项目(2018slkj-10)

作者简介: 夏伟(1994-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为水生态及水环境。

通讯作者: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源、水环境及节水灌溉。

等^[11]通过对汉江上游径流量影响因素进行分析发现,人类活动相比于气候变化对汉江流域径流变化的影响较大,且其对径流变化的影响呈现增长的趋势;郭爱军等^[12]对渭河流域进行研究表明,人类活动对渭河流域径流量的减少有决定性影响,在1972-1991年和1992-2005年两个时期的平均贡献率接近80%。

沔河作为西安市的第三大河流,是西安市人民主要的饮用水水源地,随着西咸新区的快速发展,沔河将逐渐从城郊河变为城中河,在城市发展中也将占据更加重要的战略地位。可是对于沔河流域径流特征分析及其影响因素分析研究较少,因此本文采用小波分析法^[13]、累积距平法^[14]、累积量斜率变化率比较法(SCRCQ)^[15-18]等方法对沔河流域径流特征及其影响因素进行分析。

2 材料和方法

2.1 研究区概况

沔河流域位于东经108°35'~109°09',北纬33°50'~34°20',属于暖温带半湿润季风气候,流域内多年平均降水量为632 mm。沔河系渭河一级支流,流经西安、咸阳两市部分区县,全长为78.0 km,流域面积为1 460 km²,平均比降为8.2‰。沔河流域水系图如图1所示。

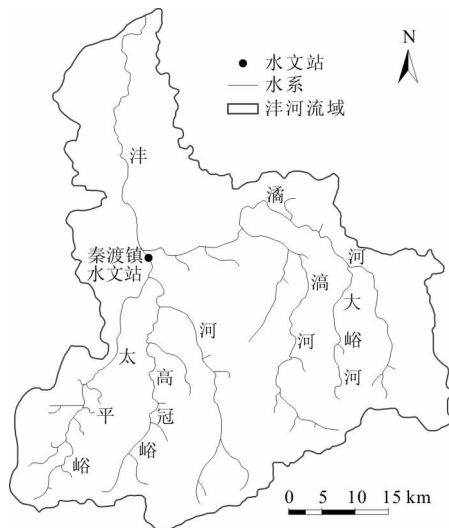


图1 沔河流域水系图

2.2 数据来源

本文选取了秦渡镇水文站1965-2016年径流量和降水量数据。秦渡镇水文站为沔河下游干流控制站,控制流域面积为566 km²。

2.3 研究方法

2.3.1 小波分析法 小波分析法^[13]能够反映沔河流域年径流量在不同时间尺度上的变化情况。采用小波变换系数可以分析沔河流域年径流量变化的主要周期。根据小波方差随时间尺度的变化绘制的小波方差图可以反映出沔河流域年径流量时间序列中所包含的各种时间尺度的波动情况以及其波动的能量大小随时间尺度的分布。因此,结合小波变换系数和小波方差图可以确定出沔河流域年径流量变化的第一主周期。

2.3.2 累积距平法 累积距平法^[14]可以较为直观地反映沔河流域年径流量在不同阶段的阶段变化,同时可以采用该方法来判定年径流量的突变年份。其具体步骤为:先计算沔河流域年径流量的多年平均值,然后利用年径流量减去年径流量的多年平均值得到沔河流域每年径流量的距平值,再将每年径流量的距平值按照时间序列进行累加得到沔河流域年径流量的累积距平值。根据沔河流域年径流量的累积距平值绘制沔河流域累积距平曲线,若累积距平曲线呈现上升的趋势,表明累积距平值增大,年径流量大于年径流量的多年平均值;若累积距平曲线呈现下降的趋势,表明累积距平值减小,年径流量小于年径流量的多年平均值。这两种趋势的交汇处所对应的年份即为沔河流域年径流量的突变年份。

2.3.3 累积量斜率变化率比较法(SCRCQ) 累积量斜率变化率比较法(SCRCQ)^[15]的原理主要为:根据累积距平法确定突变年份,以突变年份为界,绘制突变前后两个时期的累积量-年份关系曲线,然后在突变前后两个时期的累积量-年份关系曲线的基础上绘制突变前后两个时期的累积量-年份的线性趋势线,得到突变前后两个时期的累积量-年份的线性关系式,从而得到累积量-年份的线性关系式在突变前后两个时期的斜率分别为 K_a 和 K_b ,再根据 K_a 和 K_b 计算累积量斜率变化率 S ,其计算公式为:

$$S = (K_b - K_a) / K_b \times 100\% \quad (1)$$

则沔河流域累积径流量斜率变化率 S_R 为:

$$S_R = (K_{Rb} - K_{Ra}) / K_{Rb} \times 100\% \quad (2)$$

沔河流域累积降水量斜率变化率 S_P 为:

$$S_P = (K_{Pb} - K_{Pa}) / K_{Pb} \times 100\% \quad (3)$$

沔河流域累积蒸散发量斜率变化率 S_E 为:

$$S_E = (K_{Eb} - K_{Ea}) / K_{Eb} \times 100\% \quad (4)$$

最后根据沔河流域累积径流量斜率变化率(S_R)、累积降水量斜率变化率(S_P)和累积蒸散发量

斜率变化率(S_E) 计算沂河流域降水对径流量的贡献率(C_P)、蒸散发对径流量的贡献率(C_E) 以及人类活动对径流量的贡献率(C_H),计算公式分别为:

$$C_P = S_P/S_R \times 100\% \quad (5)$$

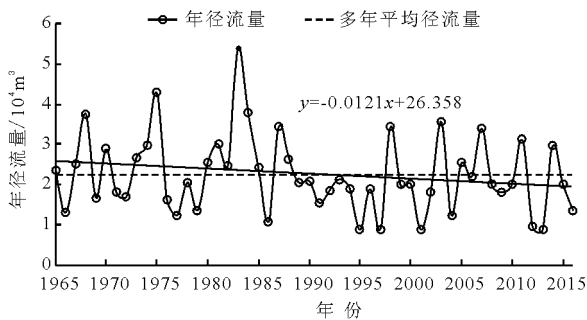
$$C_E = S_E/S_R \times 100\% \quad (6)$$

$$C_H = 1 - C_P - C_E - C_T \quad (7)$$

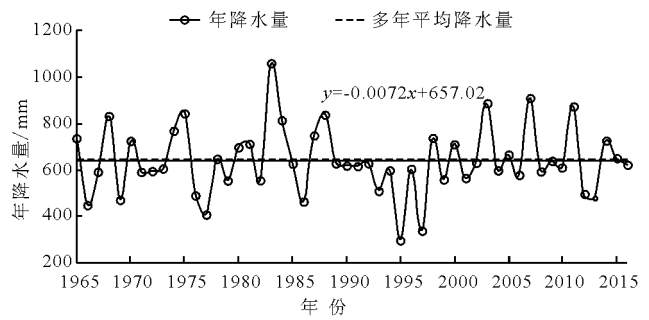
式中: C_T 为气温对径流量的影响。

由于气温主要是通过影响蒸散发进而影响径流量,且根据左德鹏等^[19]对渭河流域径流影响因素的研究,沂河流域蒸散发对径流量的影响很小,因此,本文不考虑气温及蒸散发对径流量的影响。则上述公式(7)可以简化为:

$$C_H = 1 - C_P \quad (8)$$



(a) 年径流量年际变化



(b) 年降水量年际变化

图 2 1965 - 2016 年沂河流域年径流量及年降水量年际变化

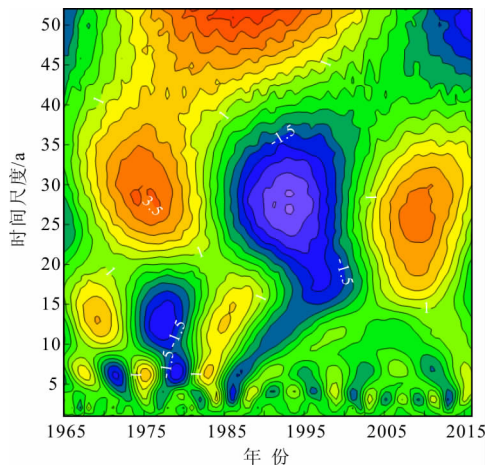


图 3 沂河流域年径流量小波分析时频分布图

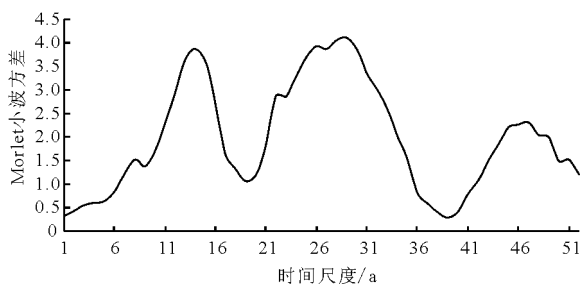


图 4 沂河流域年径流量小波方差图

3 结果分析

3.1 年径流量及年降水量变化特征

图 2 为 1965 - 2016 年沂河流域年径流量及年降水量的年际变化过程。从图 2(a)中可以看出,沂河流域 1965 - 2016 年多年平均径流量为 $2.24 \times 10^4 \text{ m}^3$, 年径流量总体呈减小的趋势,每 10 a 年递减量为 $0.121 \times 10^4 \text{ m}^3$;从图 2(b)中可以看出,沂河流域 1965 - 2016 年多年平均降水量为 644.73 mm,年降水量总体呈减小的趋势,每 10 a 递减量为 0.072 mm。图 3 为沂河流域年径流量小波分析时频分布图,图 4 为沂河流域年径流量小波方差图,结合图 3 和图 4 可以看出,年径流量存在 12 ~ 15 a、25 ~ 30 a 以及 45 ~ 50 a 三类尺度的周期,其中,第一主周期为 29 a。

3.2 年径流量突变分析及阶段划分

根据计算的沂河流域 1965 - 2016 年年径流量累积距平值所绘制的沂河流域年径流量累积距平曲线如图 5(a)所示,可以发现 1965 - 1988 年沂河流域年径流量累积距平曲线呈现上升趋势,1988 - 2016 年沂河流域年径流量累积距平曲线呈现下降趋势,因此在该时期沂河流域年径流量发生突变的年份为 1988 年。再根据沂河流域 1988 - 2016 年年径流量计算 1988 - 2016 年年径流量累积距平值,绘制 1988 - 2016 年年径流量累积距平曲线如图 5(b)所示,可以发现 1988 - 1997 年沂河流域年径流量累积距平曲线呈现下降趋势;1997 - 2016 年沂河流域年径流量累积距平曲线呈现上升趋势。因此在该时期沂河流域年径流量发生突变的年份为 1997 年。据此将研究阶段划分为 3 个不同时期:A:1965 - 1987 年,B:1988 - 1996 年,C:1997 - 2016 年。由于沂河流域在 20 世纪 80 年代以前受到人类活动的影响很小,因此,可以将 1965 - 1987 年这一时期作为基准期,1988 - 1996 年和 1997 - 2016 年两个时期作为计算期。

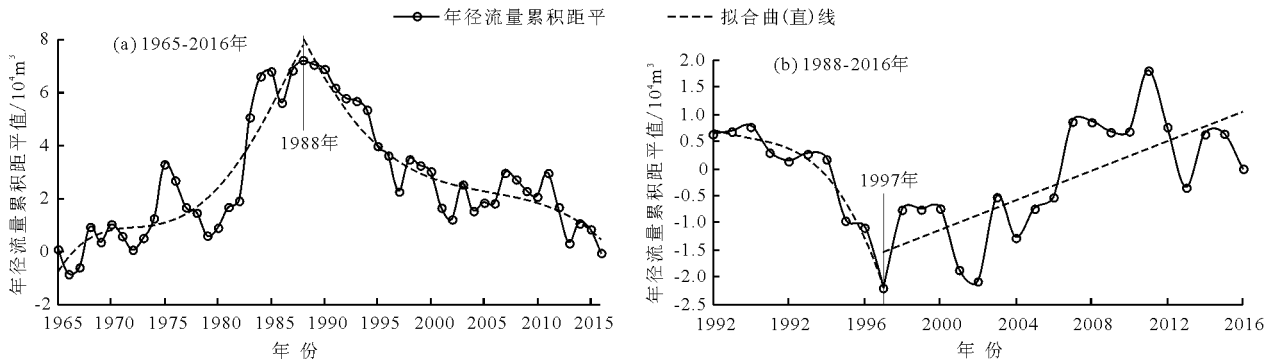


图5 1965 - 2016年泃河流域年径流量累积距平曲线

3.3 突变年份分割时期的年径流量及年降水量与年份之间的关系

根据所划分的3个不同时期绘制泃河流域累积径流量 - 年份和泃河流域累积降水量 - 年份在这3个时期的关系曲线分别如图6(a)和图6(b)所示。

由图6(a)知,泃河流域累积径流量在三个不同时期与年份之间的拟合关系式分别为:

$$A: Y_A = 2.5308X_A - 4972, R^2 = 0.9938 \quad (9)$$

$$B: Y_B = 1.7833X_B - 3483.8, R^2 = 0.9956 \quad (10)$$

$$C: Y_C = 2.1354X_C - 4187.6, R^2 = 0.9964 \quad (11)$$

式中: X 为年份; Y 为累积径流量, 10^4 m^3 。

由图6(b)知,泃河流域累积降水量在3个不同时期与年份之间的拟合关系式分别为:

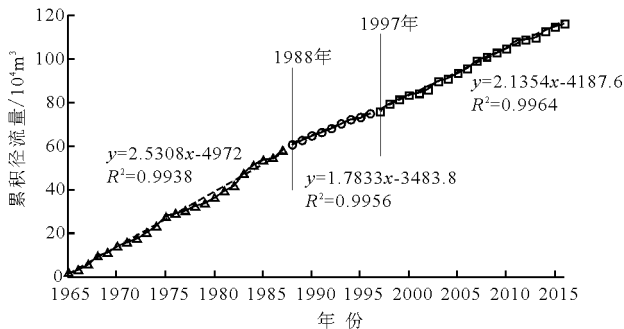
$$A: Y_A = 654.22X_A - 1.29 \times 10^6, R^2 = 0.9984 \quad (12)$$

$$B: Y_B = 564.97X_B - 1.11 \times 10^6, R^2 = 0.9953 \quad (13)$$

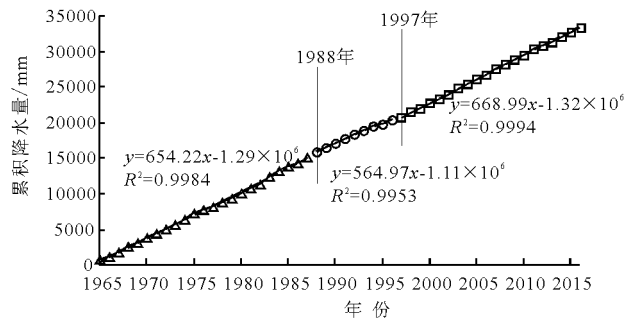
$$C: Y_C = 668.99X_C - 1.32 \times 10^6, R^2 = 0.9994 \quad (14)$$

式中: X 为年份; Y 为累积降水量, mm。

以上各拟合关系式的相关系数 R 值均大于 0.997, 且通过了 0.01 的 Pearson 显著性检验, 这表明所建关系的拟合程度较好, 可以利用年份与累积径流量和累积降水量建立相关关系。



(a) 累积径流量与年份之间的关系



(b) 累积降水量与年份之间的关系

图6 1965 - 2016年泃河流域累积径流量和累积降水量与年份之间的关系

3.4 年降水量和人类活动对年径流量变化的贡献率

表1和2分别给出了泃河流域累积径流量和累积降水量的斜率及其变化情况。

由表1可知,泃河流域累积径流量 - 年份线性关系在 A, B 和 C 3 个时期的斜率分别为 $2.5308 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, $1.7833 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $2.1354 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$; 与基准期(A)相比,计算期(B)和计算期(C)的泃河流域累积径流量 - 年份线性关系的斜率分别减小了 $0.7475 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $0.3954 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 斜率变化

率分别为 -41.92% 和 -18.52% ; 与计算期(B)相比,计算期(C)的泃河流域累积径流量 - 年份线性关系的斜率增大了 $0.3521 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 斜率变化率为 16.49% 。

由表2可知,泃河流域累积降水量 - 年份线性关系在 A, B 和 C 三个时期的斜率分别为 654.22 mm/a , 564.97 mm/a 和 668.99 mm/a ; 与基准期(A)相比,计算期(B)和计算期(C)的泃河流域累积降水量 - 年份线性关系的斜率分别减小了 89.25

mm/a和增大了 14.77 mm/a,斜率变化率分别为 -15.80% 和 2.21%;与计算期(B)相比,计算期(C)的泔河流域累积降水量-年份线性关系的斜率增大了 104.02 mm/a,斜率变化率为 15.55%。

根据公式(5)和(8)计算可知,与基准期(A)相比,计算期(B)的降水量和人类活动对泔河流域径

流量减小的贡献率分别为 37.69% 和 62.31%,计算期(C)的降水量和人类活动对泔河流域径流量减小的贡献率分别为 -11.92% 和 111.92%;与计算期(B)相比,计算期(C)的降水量和人类活动对泔河流域径流量减小的贡献率分别为 94.30% 和 5.70%。

表1 泔河流域累积径流量斜率及其变化

研究阶段	累积径流量-年份线性关系式斜率/ $10^4(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	斜率与时段 A 比较		斜率与时段 B 比较	
		变化量/ $10^4(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%	变化量/ $10^4(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%
A:1965-1987	2.5308				
B:1988-1996	1.7833	-0.7475	-41.92		
C:1997-2016	2.1354	-0.3954	-18.52	0.3521	16.49

表2 泔河流域累积降水量斜率及其变化

研究阶段	累积降水量-年份线性关系式斜率/ $10^4(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	斜率与时段 A 比较		斜率与时段 B 比较	
		变化量/ $10^4(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%	变化量/ $10^4(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	变化率/%
A:1965-1987	654.22				
B:1988-1996	564.97	-89.25	-15.80		
C:1997-2016	668.99	14.77	2.21	104.02	15.55

4 结论

本文采用线性趋势线法、小波分析法、累积距平法和累积量斜率变化率比较法(SCRCQ)对 1965-2016 年泔河流域径流特征及其影响因素进行分析。主要结论有:

(1)泔河流域 1965-2016 年多年平均径流量为 $2.24 \times 10^4 \text{ m}^3$,年径流量呈减小的趋势,每 10 a 递减量为 $0.121 \times 10^4 \text{ m}^3$,且存在 12~15、25~30 以及 45~50a 3 类尺度的周期,其中,第一主周期为 29a。

(2)根据累积距平法将研究阶段划分为 3 个不同时期:A:1965-1987 年,B:1988-1996 年,C:1997-2016 年,在这 3 个时期的累积径流量-年份和累积降水量-年份线性关系式的相关系数(R)均大于 0.997,且通过了 0.01 的 Pearson 显著性检验。

(3)采用累积量斜率变化率比较法定量估算了气候变化和人类活动对泔河流域径流量变化的影响程度。与基准期(A)相比,计算期(B)的降水量和人类活动对泔河流域径流量减小的贡献率分别为 37.69% 和 62.31%,计算期(C)的降水量和人类活动对泔河流域径流量减小的贡献率分别为 -11.92% 和 111.92%;与计算期(B)相比,计算期

(C)的降水量和人类活动对泔河流域径流量减小的贡献率分别为 94.30% 和 5.70%。由此可见,人类活动是泔河流域径流量减小的主要影响因素。

参考文献:

- [1] 赵晨宇,王应祥,温珍珠,等. 泾河平凉市区段径流量变化特征及其影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(3):36-41.
- [2] 李斌,解建仓,胡彦华,等. 基于集对分析法的渭河中下游径流变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):20-25.
- [3] SIVAKUMAR B, JAYAWARDENA A W, FERNANDO T. River flow forecasting: Use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches [J]. Journal of hydrology, 2002, 265(1-4): 225-245.
- [4] ACREMAN M C, DUNBAR M J. Defining environmental river flow requirements: a review [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2004, 8(5): 861-876.
- [5] TAN Xuezhi, GAN Tianyi. Contribution of human and climate change impacts to changes in streamflow of Canada [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17767.
- [6] ROUDIER P, DUCHARNE A, FEYEN L. Climate change impacts on river discharge in West Africa: a review [J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2014, 11

- (2):2483-2514.
- [7] WANG Yan, DING Yongjian, YE Baisheng, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(8):1398-1412.
- [8] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2):488-497.
- [9] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013, 32(3):395-402.
- [10] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学, 2014, 36(11):2256-2262.
- [11] 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.
- [12] 郭爱军, 畅建霞, 黄强, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8):212-220.
- [13] 李春晖, 郑小康, 杨志峰, 等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(1):80-85.
- [14] RAN Lishan, WANG Suiji, FAN Xiaoli. Channel change at Toudaoguai Station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2):231-247.
- [15] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3):388-397.
- [16] 王彦君, 王随继, 苏腾. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2):304-314.
- [17] 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.
- [18] 莫淑红, 王学风, 勾奎, 等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流情势的影响分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9):7-17.
- [19] 左德鹏, 徐宗学, 隋彩虹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2):115-123.

(上接第46页)

- [7] 胡耀躲, 窦同宇, 杨波. 基于GOCI影像反演湖泊悬浮物和叶绿素a含量的研究述评[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2):26-32+39.
- [8] MASKREY A. Disaster mitigation: a community based approach[M]. Oxford: Oxfam, 1989.
- [9] 刘引鸽, 史鹏英, 张妍. 渭河干流陕西段河流水质污染风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3):51-54.
- [10] 武曛, 郭飞. 辽宁省入海河流及近岸海域风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(1):65-70.
- [11] 刘珍, 文彦君, 韩梅, 等. 人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):82-86.
- [12] 封丽, 程艳茹, 封雷, 等. 三峡库区主要水域典型抗生素分布及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(7):1031-1040.
- [13] 严清, 訾成方, 张怡昕, 等. 重庆主城区水域典型PhACs污染水平及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(11):1178-1185.
- [14] 王林, 白洪伟. 基于遥感技术的湖泊水质参数反演研究综述[J]. 全球定位系统, 2013, 38(1):57-61+72.
- [15] 付宇, 韦玉春, 王国祥. 水质参数的遥感反演和遥感监测[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(6):27-30.
- [16] 刘灿德, 何报寅. 水质遥感监测研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(5):40-44.
- [17] 顾清. 浙江省饮用水水库水质演变及风险评估研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.