

气候变化和人类活动对灞河流域输沙量影响的定量评估

夏伟^{1,2}, 周维博^{1,2}, 何庆龙^{1,2}, 李文溢^{1,2}

(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)

摘要:采用小波分析法、累积距平法分析了灞河流域输沙量和降水量的变化趋势,应用累积量斜率变化率比较法分析了不同时期气候变化和人类活动在灞河流域输沙量变化中的相对贡献率。结果表明:灞河流域输沙量存在 1988 年和 2002 年两个突变点;以 1960—1987 年为基准期,1988—2001 年降水量和人类活动在灞河流域输沙量减小中的贡献率分别为 12.22% 和 87.78%,2002—2012 年降水量和人类活动在灞河流域输沙量减小中的贡献率分别为 6.56% 和 93.44%。

关键词:输沙量;气候变化;人类活动;贡献率;灞河流域

中图分类号:P333.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)04-0051-06

Quantitative evaluation on impact of climate change and human activities on sediment discharge in Bahe River Basin//XIA Wei^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, HE Qinglong^{1,2}, LI Wenyi^{1,2} (1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Taken the Bahe river basin as the research object, the wavelet analysis method and the cumulative anomaly analysis were employed to analyze the variation trends of the sediment discharge and precipitation. It is revealed that the year 1988 and 2002 are two mutational points for the sediment discharge variation. The comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity was adopted to analyze the contributions of climate change and human activity to sediment discharge in different time periods. The results were obtained by taking 1960-1987 as the baseline period without considering the influence of evapotranspiration. It shows that the contribution rates of precipitation and human activities to the decreased sediment discharge were 12.22% and 87.78% from 1988 to 2001, and changed to be 6.56% and 93.44% from 2002 to 2012, respectively. The present study reveals the changing trend of sediment discharge of the Bahe river basin during 1960-2012 and the contribution rates of the main influencing factors, which is of great importance to the water loss and soil erosion control in the future.

Key words: sediment discharge; climate change; human activity; contribution rate; Bahe River Basin

流域的水沙通量在自然状况下主要受气候变化的影响。随着社会经济的快速发展,人类活动不断加剧,全球河流的水沙通量(尤其是输沙量)发生了巨大的变化^[1-3]。Walling 等^[4,5]分析了全球 142 条河流的下游站,发现年输沙量增加、降低和基本不变的河流分别占 2.8%、47.9% 和 49.3%,有近一半河流的年输沙量呈下降趋势。

我国很多学者对我国各大流域的水沙特性及其影响因素也作了大量研究。刘成等^[6]对我国主要入海河流水沙变化的分析表明,我国最主要的 10 条河流下游站 1997—2006 年输沙量的平均值低于多年平均值的一半。姚文艺等^[7]综合利用水文法、水保法和数学模型法等多种方法对黄河流域 1997—2006 年的水沙变化情势进行了研究,结果表明黄河实测输沙量较 1970 年以前年均减小 11.80 亿 t,其中人类活动的减沙作用与降雨的影响基本相当。史红玲等^[8]研究了淮河流域水沙变化趋势及其成因,表明淮河流域来沙量呈现显著减小的趋势,发生突变的年份在 1973—1975 年之间。

目前,已有学者对灞河流域水沙特性进行了研

究。赵建春等^[9]对灞河流域水沙特性的研究表明,1985 年后的来沙量基本保持在较小的水平;魏炳乾等^[10]认为灞河流域的水沙量自 20 世纪 70 年代以后呈减小趋势,其中 20 世纪 90 年代减小十分显著,人类活动和气候变化是灞河水沙量减小的主要因素。为研究各因素对灞河流域水沙量减小的影响程度,采用累积量斜率变化率比较法(SCRCQ)^[11-15]对气候变化和人类活动在灞河流域输沙量变化中的相对贡献率进行定量分析评估。

1 研究区概况

灞河系渭河的一级支流,发源于秦岭北麓蓝田县灞源乡麻家坡以北,位于东经 109°00′~109°47′,北纬 33°50′~34°27′,流经西安市灞桥区、未央区,于高陵区汇入渭河,全长 104 km,流域总面积为 2581 km²,主要支流有浐河、清河、道沟峪等。灞河上游河道比降较大,平均为 0.9%;中游为平原弯曲型河道,平均比降为 0.235%;下游河道比较缓,平均比降为 0.158%。灞河流域的基本情况如图 1 所示。



图 1 灞河流域

2 基础数据与研究方法

2.1 基础数据

马渡王水文站设立于 1952 年 6 月,位于浐河汇入灞河的入汇口附近,距离渭河口 30 km,是灞河下游干流控制站,控制流域面积 1 601 km²。马渡王水文站观测资料系统全面、时间序列较长,因此选用该水文站 1960—2012 年的实测水沙数据作为基础数据。

2.2 研究方法

2.2.1 小波分析法

小波分析^[16]属于时频分析的一种,它能够清晰地揭示出隐藏在时间序列中不同的变化周期,充分反映系统在不同时间尺度上的变化趋势,且能对系统在未来的变化趋势作定性分析。其基本思想是:用一簇小波函数系来表示或逼近某一信号或函数,因此,小波函数是小波分析的关键,它是指具有震荡

性、能够迅速衰减到零的一类函数,即小波函数 $\Psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 且满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) d(t) = 0 \tag{1}$$

式中 $\Psi(t)$ 为基小波函数。选用 Morlet 小波函数作为基小波函数,它可通过对基小波函数在尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一族函数系:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{2}$$

式中: $\Psi_{a,b}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子,反映小波的周期长度; b 为平移因子,反映时间上的平移。

2.2.2 累积距平法

累积距平法^[17-18]是一种由曲线直观判断离散数据点变化趋势的统计方法,通过先计算每年输沙量的距平值,然后按照时间序列逐年累加,从而得到累积距平值随时间的变化趋势。如果输沙量累积距平曲线上上升,则输沙量为逐年增加的趋势;反之,输沙量为逐年减小的趋势,趋势的转折点即为突变点。

2.2.3 累积量斜率变化率比较法

由王随继等^[11]提出的 SCRCQ 方法以客观年份作为自变量,以各因子的累积量作为因变量,因累积量在一定程度上消除了实测数据年际变化的影响,使年份与累积量之间具有非常高的相关性,为进一步进行定量分析创造了条件,并避免了采用常用的多元回归法进行定量分析时的人为因素的影响。其基本公式为

$$R_s = \frac{K_{Sb} - K_{Sa}}{K_{Sb}} \tag{3}$$

$$R_p = \frac{K_{Pb} - K_{Pa}}{K_{Pb}} \tag{4}$$

$$R_E = \frac{K_{Eb} - K_{Ea}}{K_{Eb}} \tag{5}$$

式中: R_s 为累积输沙量斜率变化率; K_{Sa} 、 K_{Sb} 分别为累积输沙量-年份线性关系式在拐点前后两个时期的斜率,万 t/a; R_p 为累积降水量斜率变化率; K_{Pa} 、 K_{Pb} 分别为累积降水量-年份线性关系式在拐点前后两个时期的斜率,mm/a; R_E 为累积蒸散发量斜率变化率; K_{Ea} 、 K_{Eb} 分别为累积蒸散发量-年份线性关系式在拐点前后两个时期的斜率,mm/a。

根据 SCRCQ 方法,降水、蒸散发、人类活动对输沙量的贡献率 C_p 、 C_E 、 C_H 分别为

$$C_p = \frac{R_p}{R_s} \tag{6}$$

$$C_E = \frac{R_E}{R_s} \tag{7}$$

$$C_H = 1 - C_p - C_E - C_T - C_C \tag{8}$$

式中: C_T 为气温对输沙量的影响; C_C 为气象条件的

变化引起的天然植被的变化对输沙量的影响。

由于气温主要是通过影响蒸散发进而影响输沙量,所以不考虑气温对输沙量的影响。气候条件的变化引起的天然植被的变化会影响产沙量,进而影响输沙量,而天然植被的变化主要是受人类活动的影响,可不考虑气象条件的变化引起的天然植被的变化对输沙量的影响。根据魏炳乾等^[8]对灞河流域水沙特性的研究,蒸散发对输沙量的影响很小,式(8)可以简化为

$$C_H = 1 - C_P \tag{9}$$

3 研究结果与分析

3.1 年输沙量、年降水量及汛期降水量变化特征

1960—2012 年灞河流域年输沙量、年降水量及汛期降水量的年际变化过程如图 2 所示。由图 2 可知,1960—2012 年多年平均输沙量为 182.86 万 t,年输沙量呈减小的趋势,减小的速率为 6.150 万 t/a;1960—2012 年多年平均降水量为 616.31 mm,年降水量呈减小的趋势,减小的速率为 1.761 mm/a;1960—2012 年多年平均汛期(7—9 月)降水量为

292.73 mm,占多年平均降水量的 47.5%,汛期降水量呈减小的趋势,减小的速率为 0.221 2 mm/a。灞河流域年输沙量小波分析时频分布如图 3 所示,可以看出,年输沙量存在 3~7 a、13~18 a 和 40~45 a 3 类尺度的周期,其中第一主周期为 15 a 左右,在 13~18 a 尺度上存在丰枯交替准 3 次震荡,且该尺度的周期变化在整个分析阶段非常稳定,具有全域性。

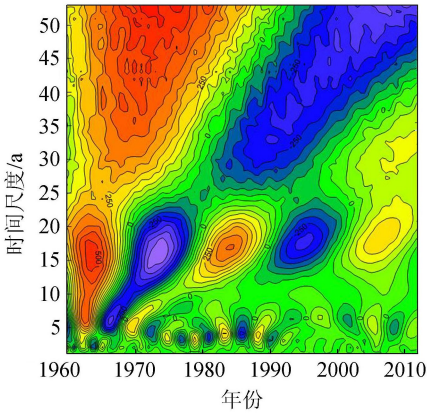


图 3 灞河流域年输沙量小波分析时频分布

3.2 年输沙量突变分析及阶段划分

采用累积距平法计算 1960—2012 年灞河流域年输沙量突变年份,得灞河流域年输沙量累积距平曲线如图 4 所示。由图 4(a)可以看出,年输沙量累积距平曲线在 1960—1987 年表现为上升趋势,而在 1988—2012 年表现为下降趋势,在 1988 年发生明显转折,可确定 1988 年为年输沙量的突变年份。由图 4(b)可以看出,年输沙量累积距平曲线表现出先下降后上升的趋势,其突变年份为 2002 年。

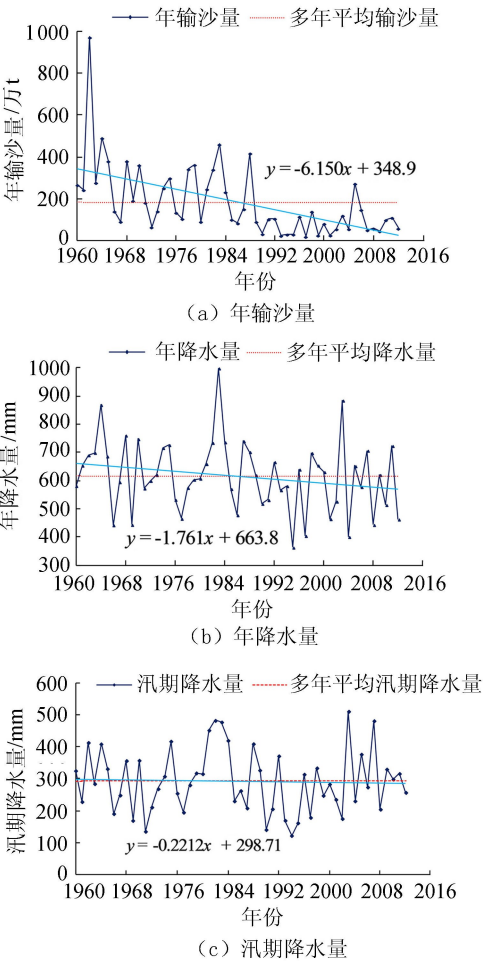


图 2 1960—2012 年灞河流域年输沙量、年降水量及汛期降水量的年际变化

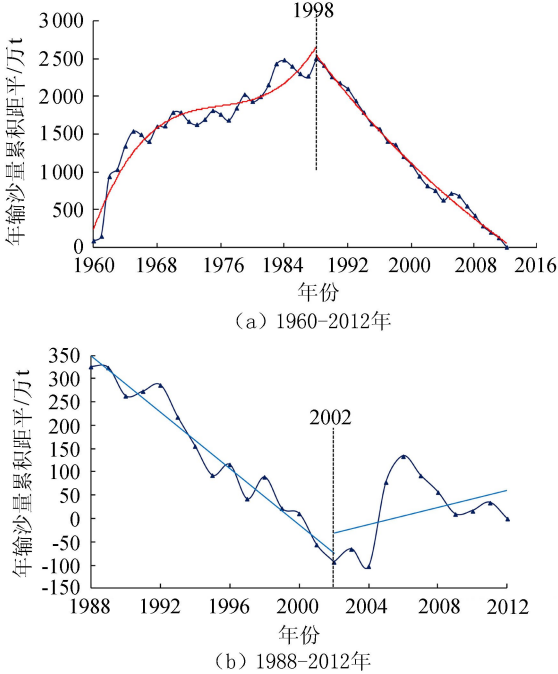


图 4 灞河流域年输沙量累积距平曲线

通过流域调查发现,灞河流域在 20 世纪 80 年代以前,受人类活动的影响相对较小,灞河流域年输沙量变化主要是受气候变化的影响,因此,可以将 1960—1987 年这一阶段看作基准期;在 20 世纪 90 年代以来,人类活动对灞河流域年输沙量变化的影响逐渐加大,灞河流域年输沙量除了受气候变化的影响,在一定程度上还受到人类活动的影响。

3.3 突变年份分割时期的年输沙量及年降水量与年份之间的关系

根据灞河流域年输沙量的两个突变年份,将研究时间分为 1960—1987 年、1988—2001 年和 2002—2012 年 3 个时期,分别记为 A、B 和 C。灞河流域累积输沙量,累积降水量与年份之间的关系如图 5 所示,图中还给出了拟合关系式,各拟合关系式的相关系数 R 均大于 0.969,通过了显著性水平为 0.01 的 Pearson 显著性检验。

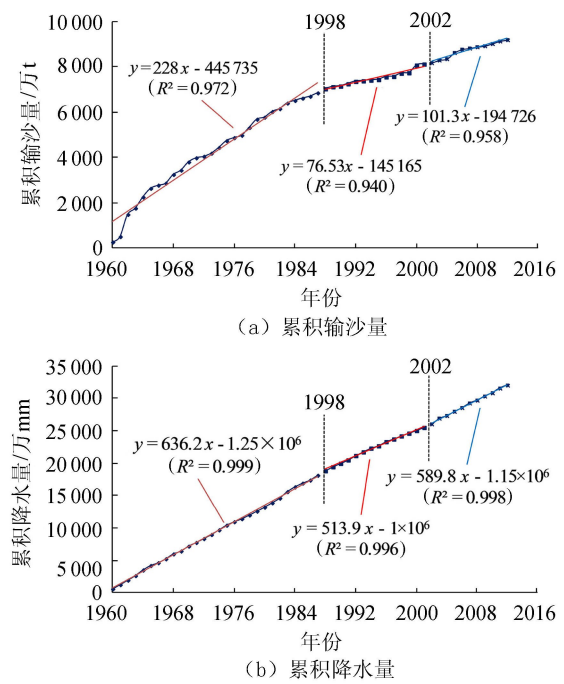


图 5 灞河流域累积输沙量、累积降水量与年份之间的关系

3.4 年降水量和人类活动对年输沙量变化的贡献率

根据 SCRCQ 方法,在基准期内,输沙量主要受自然因子(降水)的影响,受人类活动的影响较小;在变异期内,输沙量主要受自然因子(降水)和人类活动二者的综合影响。

由图 5(a)拟合关系式可得,累积输沙量-年份线性关系式在 A、B 和 C 时期的斜率分别为 228 万 t/a, 76.53 万 t/a 和 101.3 万 t/a;B 时期与 A 时期相比,斜率减小了 151.47 万 t/a,减小率为 66.43%;C 时期与 A 时期相比,斜率减小了 126.7 万 t/a,减小率为 55.57%;C 时期与 B 时期相比,斜率增大了

24.77 万 t/a,增大率为 32.37%。

由图 5(b)拟合关系式可得累积降水量-年份线性关系式在 A、B 和 C 时期的斜率分别为 638.2 mm/a, 513.9 mm/a 和 589.8 mm/a;B 时期与 A 时期相比,斜率减小 124.3 mm/a,减小率为 19.48%;C 时期与 A 时期相比,斜率减小 48.4 mm/a,减小率为 7.58%;C 时期与 B 时期相比,斜率增大 75.9 mm/a,增大率为 14.77%。

根据式(6)~(9),可以计算得到 B 时期与 A 时期相比,降水量的减小对输沙量减小的贡献率为 12.22%,人类活动对输沙量减小的贡献率为 87.78%;C 时期与 A 时期相比时,降水量的减小对输沙量减小的贡献率为 6.56%,人类活动对输沙量减小的贡献率为 93.44%;C 时期与 B 时期相比,降水量的增大对输沙量增大的贡献率为 0.53%,人类活动对输沙量增大的贡献率为 99.47%,降水量对输沙量的影响很小,可以忽略不计,即输沙量增大完全受人类活动的影响。

3.5 年输沙量减小的原因分析

灞河流域年输沙量减小的原因有自然因素(降水量减小和降水强度减小)和非自然因素(水库拦沙、水土保持、人工采砂和土地利用类型的变化)^[18]。

a. 自然因素。由于灞河流域降水量的减小,会减小雨水对地面的冲刷,减少土壤的流失,从而使得灞河流域年输沙量在一定程度上有所减小;同时,由于灞河流域汛期降水强度的减小,也在一定程度上减少产沙量,从而使灞河流域年输沙量有所减小。

b. 非自然因素。自 20 世纪 80 年代以来,人类活动对灞河流域年输沙量减小的影响越来越大,主要表现在:①在灞河流域建了很多水库(如红旗水库),流域内侵蚀的泥沙大量淤积在水库内,使得下游年输沙量减小^[19];②灞河流域于 1997 年开始实施拦河造湖工程,在灞河上规划建造 10 座橡胶坝,形成水面面积 12 万 m²,另外在灞河生态区上游布置大片生态水系涵养绿地,沿河道两岸布置带状公园和防护绿地,在一定程度上遏制了水土流失,使灞河流域年输沙量亦随之减小^[19];③随着西安市经济的快速发展,以及大规模的基础设施建设,在灞河流域存在大量的引水采砂作业,这也是灞河流域年输沙量减小的一个重要原因;④随着大西安城市建设,灞河流域内修建了大量住宅和道路,土壤裸露面积减小,这使土壤流失有所减小,从而使灞河流域年输沙量有所减小。

4 结 论

a. 自 1960 年以来,灞河流域年输沙量一直呈

减小趋势,减小速率为 6.150 万 t/a;年输沙量存在 3~7 a、13~18 a 和 40~45 a 3 类尺度的周期,其中第一主周期为 15 a 左右;灞河流域年降水量也一直呈减小趋势,减小速率为 1.761 mm/a。

b. 采用累积距平方法确定了灞河流域年输沙量在 1988 年和 2002 年前后发生突变。3 个时期累积输沙量和累积降水量与年份之间的关系较好,相关系数均大于 0.969,且通过了 0.01 的显著性检验。

c. 采用累积量斜率变化率比较方法分析了降水量和人类活动在灞河流域输沙量减小中的相对贡献率,B 时期与 A 时期相比时,降水量和人类活动在灞河流域输沙量减小中的相对贡献率分别为 12.22% 和 87.78%;C 时期与 A 时期相比时,降水量和人类活动在灞河流域输沙量减小中的相对贡献率分别为 6.56% 和 93.44%;C 时期与 B 时期相比时,降水量和人类活动在灞河流域输沙量增加中的相对贡献率分别为 0.53% 和 99.47%。由此可见,人类活动是影响灞河流域输沙量变化的主要因素。

参考文献:

[1] ZHANG Q, XU C Y, BECKER S, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River Basin during last 50 years[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331 (3/4): 511-523.

[2] 叶许春,刘健,李相虎,等.气候和人类活动对赣江径流变化的作用分析[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):196-203. (YE Xuchun, LIU Jian, LI Xianghu, et al. Effects of climate variability and human activities on runoff variation of Ganjiang River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (3): 196-203. (in Chinese))

[3] 吴丽,张爱静.气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J].水利水电科技进展,2016,36(2):10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 10-15. (in Chinese))

[4] WALLING D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. Global & Planetary Change, 2003, 39(1): 111-126.

[5] WALLING D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. Geomorphology, 2006, 79(3/4): 192-216.

[6] 刘成,王兆印,隋觉义.我国主要入海河流水沙变化分析[J].水利学报,2007,38(12):1444-1452. (LIU Cheng, WANG Zhaoyin, SUI Jueyi. Analysis on variation of seagoing water and sediment load in main rivers of China

[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (12): 1444-1452. (in Chinese))

[7] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616. (YAO Wenyi, RAN Dachuan, CHEN Jiangnan. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 607-616. (in Chinese))

[8] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J].水利学报,2012,43(5):571-579. (SHI Hongling, HU Chunhong, WANG Yanguai, et al. Analysis of trends and reasons of variations in runoff and sediment load of the Huaihe River [J]. Advances in Water Science, 2012, 43(5): 571-579. (in Chinese))

[9] 赵建春,王新宏,李九发,等.灞河流域水沙特性研究[J].人民黄河,2008,30(4):20-22. (ZHAO Jianchun, WANG Xinhong, LI Jiufa, et al. Research on characteristics of flow and sediment of Bahe Basin [J]. Yellow River, 2008, 30(4): 20-22. (in Chinese))

[10] 魏炳乾,杨川,石忠科,等.灞河水沙特性变化分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(2):38-40. (WEI Bingqian, YANG Chuan, SHI Zhongke, et al. Analysis on the changing characteristics of sediment and water in the Bahe River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(2): 38-40. (in Chinese))

[11] 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. (WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan Drainage Basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388-397. (in Chinese))

[12] WANG S, YAN M, YAN Y, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River [J]. Quaternary International, 2012, 282(60): 66-77.

[13] 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. (WANG Suiji, LI Ling, YAN Ming. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River Basin [J]. Geographical Research, 2013, 32 (3): 395-402. (in Chinese))

[14] 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. (ZHANG Tiaofeng, ZHU Xide, WANG Yongjian, et al. The impact of climate variability and human activity on runoff changes in the Huangshui River Basin [J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2256-

2262. (in Chinese))
- [15] 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. (WANG Yanjun, WANG Suiji, SU Teng. Contributions of precipitation and human activities to runoff change in the Songhua River Basin[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(2):304-314. (in Chinese))
- [16] 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. (LI Chunhui, ZHENG Xiaokang, YANG Zhifeng, et al. Trends of annual natural runoff in the Yellow River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45 (1): 80-85. (in Chinese))
- [17] RAN L, WANG S, FAN X. 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.
- [18] 刘惠英,程冬兵,张平仑,等. 三峡库区龙河流域降雨和人类活动对水沙关系变化贡献率分析[J]. 长江科学院院报,2015,32(3):20-26. (LIU Huiying, CHENG Dongbing, ZHANG Pingcang, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff and sediment variation in Longhe River Watershed of Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32 (3): 20-26. (in Chinese))
- [19] 李洋洋,白洁芳,周维博,等. 50年来澜河流域水沙变化特征分析[J]. 泥沙研究,2017,42(3):20-25. (LI Yangyang, BAI Jiefang, ZHOU Weibo, et al. Characteristics of flow and sediment of Bahe Basin in recent 50 years[J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(3): 20-25. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-07-14 编辑:郑孝宇)
-
- (上接第37页)
- [4] 朱静,郭建阳,王立英,等. 锑的环境地球化学研究进展概述[J]. 地球与环境,2010,38(1):109-116. (ZHU Jing, GUO Jianyang, WANG Liying, et al. Advances in environmental geochemistry of antimony [J]. Earth and Environment, 2010, 38(1): 109-116. (in Chinese))
- [5] 黄懿,胡军,李倦生,等. 锑工业中锑污染物排放调查及防治对策探讨[J]. 环境科学与技术,2010,33(6E):252-255. (HUANG Yi, HU Jun, LI Juansheng, et al. Emission status survey and control measure discussion on antimony pollutant of antimony industrial [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(6E): 252-255. (in Chinese))
- [6] SMICHOWSKI P. Antimony in the environment as a global pollutant; a review on analytical methodologies for its determination in atmospheric aerosols [J]. Talanta, 2008, 75: 2-14.
- [7] MAHER W A. Antimony in the environment: the new global puzzle[J]. Environ Chem, 2009(6): 93-94.
- [8] 刘飞,邓道贵,祝鹏飞,等. 水环境中不同形态锑的迁移转化及影响因素研究进展[J]. 安全与环境学报,2014,14(2):219-224. (LIU Fei, DENG Daogui, ZHU Pengfei, et al. Advances in studies on migration and transformation of different forms of antimony in water environment and its influencing factors[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2): 219-224. (in Chinese))
- [9] 张亚平,张婷,陈锦芳,等. 水、土环境中锑污染与控制研究进展[J]. 生态环境学报,2011,20(8/9):1373-1378. (ZHANG Yaping, ZHANG Ting, CHEN Jinfang, et al. Advances in antimony pollution and control in water and soil environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(8/9): 1373-1378. (in Chinese))
- [10] 黄艳超,武雪芳,周羽化,等. 水环境中锑污染及其修复技术研究进展[J]. 南京师范大学学报(自然科学版),2015,38(4):122-128. (HUANG Yanchao, WU Xuefang, ZHOU Yuhua, et al. Research progress of antimony contamination in water environment and remediation techniques [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2015, 38 (4): 122-128. (in Chinese))
- [11] 魏代春,苏婧,陈学民,等. 阳澄湖和太湖微囊藻毒素分布及其与富营养化因子的关系[J]. 环境工程学报,2014,8(6):2322-2327. (WEI Daichun, SU Jing, CHEN Xuemin, et al. Distribution of microcystins and its relationship with eutrophication factors in Yangcheng Lake and Gehu Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(6): 2322-2327. (in Chinese))
- [12] 金建平,于鑫,包云轩,等. 阳澄湖东湖蓝藻密度与前期环境因子的关系[J]. 中国农业气象,2013,34(3):324-331. (JIN Jianping, YU Xin, BAO Yunxuan, et al. Study on the relationship between the cyanobacteria density and the previous environmental factors in the east part of the Yangcheng Lake [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(3): 324-331. (in Chinese))
- [13] 于雷,吴舜泽,范丽丽,等. 河流水环境容量一维计算方法[J]. 水资源保护,2008,24(1):39-41. (YU Lei, WU Shunze, FAN Lili, et al. One-dimensional calculation method for river water environmental capacity [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(1): 39-41. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-07-09 编辑:郑孝宇)