

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2016. 06. 001

我国中小河流入海水沙变化对人类活动响应 ——以滦河为例

康雪宁¹, 印萍², 刘金庆²

(1. 海南省海洋地质调查研究院, 海口 570100; 2. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:基于 1958—2008 年滦河入海径流量、泥沙通量及流域降水数据, 采用线性趋势法和 Mann-Kendall 检验法来分析滦河入海水沙通量变化规律, 结果表明: 1958—2008 年间, 滦河流域年入海水沙通量显著减少, 入海径流量与泥沙通量时序均存在显著突变转折, 突变发生于 1980 年前后, 突变点出现时间与强烈人类活动介入时间相吻合, 滦河入海水沙变化与流域人类活动影响密切相关。

关键词:Mann-Kendall 检验; 突变点; 人类活动; 滦河

中图分类号:P333.5

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2016)06-0001-06

河流入海水沙通量对陆海物质循环与迁移具有重要的意义, 为海岸带地区提供重要的陆域物质来源, 是陆海相互作用的物质载体和纽带^[1]。我国海岸带河流分布众多, 中小入海河流的入海水沙是当前海岸带研究的一个热点。虽然根据已有水文观测资料, 我国中小河流的入海泥沙通量大多比较低, 明显少于黄河、长江和珠江三大主要河流, 或台湾西部的河流输沙总量, 但这些中小河流是我国漫长海岸带上重要的沉积物来源^[2]。

目前, 我国对中小入海河流径流和泥沙方面研究的程度还较低, 黄河、长江、珠江等平原大江大河水文站点较多, 相关研究十分集中且全面, 包括入海水沙通量变化、海岸动力地貌效应等^[3-7], 与之相比, 中小入海河流的调查研究工作十分薄弱, 主要是由于过去对规模较小、水文站点较少的中小河流重视不够, 研究较少。更值得关注的是, 中小河流流域大多受到强烈的人类活动影响, 对流域各种水利设施和灌溉活动更敏感, 特别是近几十年入海水沙特性受人类活动的干扰严重, 此问题曾引起国内众多学者的广泛关注, 并集中在河流水沙动态、变化驱动力以及可能影响等方面开展了大量研究^[8-13]。然而, 对入海水沙通量突变点问题却关注较少。

滦河是我国华北地区一条代表性中小河流, 发源于河北省丰宁县之巴彦古尔图山麓, 于河北省乐

亭县注入渤海, 全长 877 km, 流域面积 4.49×10^4 km², 属山溪性河流, 是典型的水少沙多的河流。本文依据 1958—2008 年滦河滦县站水沙数据, 并结合同时期流域内典型站位的年降水数据, 采用线性趋势分析和 Mann-Kendall 检验剖析滦河入海水沙通量变化趋势及变异特征, 对我国中小入海河流水沙通量变化特征及影响因素作初步讨论。

1 Mann-Kendall 检验法原理与计算步骤

1.1 Mann-Kendall 检验法的原理

从任一时间序列是否有假定样本的分布形态来说, 统计检验方法主要分为参数统计检验方法及非参数统计检验方法。Mann-Kendall 法为非参数统计检验方法。具体计算方法如下:

对具有 n 个样本量的时间序列 x 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i)$$

可见, 秩序列 S_k 是第 i 时刻值入于第 j 时刻值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

基金项目:科技部基础性专项(2013FY112200)

作者简介:康雪宁(1988—), 男, 硕士, 从事海洋地质工作。

通讯作者:印萍(1971—), 女, 博士后, 研究员, 从事海洋与海岸带环境地质研究, E-mail: pingyin@fio. org. cn

收稿日期:2016-06-20; **改回日期:**2016-10-28. 张光威编辑

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$, $Var(S_k)$ 分别为累计数 S_k 的均值和方差。在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立且有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$\begin{cases} Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \\ E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \end{cases} \quad (3)$$

UF_k 为标准正态分布, 它是按时间序列 x 的顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列。给定显著性水平 α , 查正态分布表。若 $|UF_k| > U_\alpha$ 则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列 x 的逆序 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 再重复上述过程, 同时使 UB_k (序列的逆序值) $= -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。

1.2 水沙系列突变点的计算步骤

本文研究采用的资料为滦河滦县站的年径流量和输沙量资料, 资料系列长度为 1958—2008 年, 共计 51 年。根据上述的 Mann-Kendall 法, 首先计算顺序时间序列的秩序列 S_k , 并按照式(2)计算出 UF_k ; 然后计算逆序时间序列的秩序列 S_k , 也按照式(2)计算出 UB_k ; 最后给出显著性水平, 取 $\alpha = 0.05$, 则临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$, 绘制 UF_k 、 UB_k 曲线和临界值直线图。分析绘出的 UB_k 和 UF_k 曲线图, 若 UF_k 的值 > 0 , 表明序列呈上升趋势, 反之, 序列呈下降趋势。当 UF_k 超过临界值(信度线)时, 表明上升或下降趋势显著。超过临界线(信度线)的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UB_k 和 UF_k 两条曲线出现交点, 并且交点在临界线(信度线)之间, 则交点对应的时刻便是突变的开始时间。

2 结果

2.1 入海水沙通量趋势

河流入海径流量和输沙量的多年变化主要受自然和人类活动两个方面的影响, 在自然因素方面, 由于华北地区的水量补给来源主要是降水, 故本文把降水量作为气候因素的主要因素来研究其对入海水沙通量的影响。

本文首先采用线性趋势估计法分析滦河年降水量、年径流量、年输沙量序列长期变化趋势, 通过线性趋势对 Mann-Kendall 检验法识别水沙时间序列趋势进行对照检验, 其中年降水量的趋势可以反映流域自然气候的变化特征。图 1 描述了 1958—

2008 年滦河入海水沙通量及流域降水量逐年变化趋势。

由图可知, 1958—2008 年间, 滦河流域内的降水量水平总体上保持平稳, 有略微减少的趋势, 线性倾向率为 -1.607 , 变化速率和幅度均不显著, 这显示出滦河流域的自然气候总体上保持稳定。但是相对于降水量的变化, 滦河入海年径流量和年输沙量年际波动很大, 总体呈明显减少趋势, 线性倾向率分别为 -0.978 和 -65.15 , 变化速率和幅度非常显著, 其中 20 世纪 90 年代后期开始接近断流断沙, 之后基本失去自然输水输沙能力。降水的略微减少会对滦河径流的变化有一定影响, 但气候因素明显无法造成水沙通量如此大的变化速率和幅度, 气候因素不可能是造成水沙通量显著变化的决定性因素, 水沙通量的变化应该是强烈人类活动等其他因素造成的。

2.2 入海水沙通量突变

研究表明, 在全球变暖的背景下, 19 世纪末以来, 当河流流域受到大规模人类活动的扰动时, 如大型水利工程的运行调度、土地利用方式显著改变等, 流域下游测站的实测水沙过程会出现较为明显的变化, 使得随后的实测水沙序列显著异于前期的序列, 诊断分析水沙序列的变异点以及演变规律, 是科学评价人类活动水文效应的重要前期基础工作。

由于 Mann-Kendall 非参数检验方法更适合水文时序非正态分布数据的检验分析与变点诊断, 分别对 1958—2008 年降水量、径流量及输沙量序列做 Mann-Kendall(M-K)检验, 结果见图 2。

由图 2 可以看出滦河流域降水量、径流量、输沙量系列变化有如下特点:

滦河降水量 UF_k 曲线在 1958—2008 年间没有超出 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平区间, 说明降水量变化不显著, 这与线性趋势分析的结果吻合; 由于 UF_k 曲线未超过临界线(信度线)的范围, 所以降水量没有出现突变。

径流量 UF_k 曲线在 1960—2008 年之间基本小于 0, 说明在此期间径流量呈减少趋势, 而且自 20 世纪 80 年代以来, 这种减少的趋势明显超过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平, 径流量 M-K 趋势分析结果与线性趋势分析的结果吻合; 根据 UF_k 曲线和 UB_k 曲线交点的位置, 可以确定滦河流域年径流量在 20 世纪 80 年代的减少是一个突变现象, 突变点具体大约在 1980 年前后。

年输沙量系列的变化特点同年径流量系列相似, UF_k 曲线在 1960—2008 年之间一直小于 0, 呈

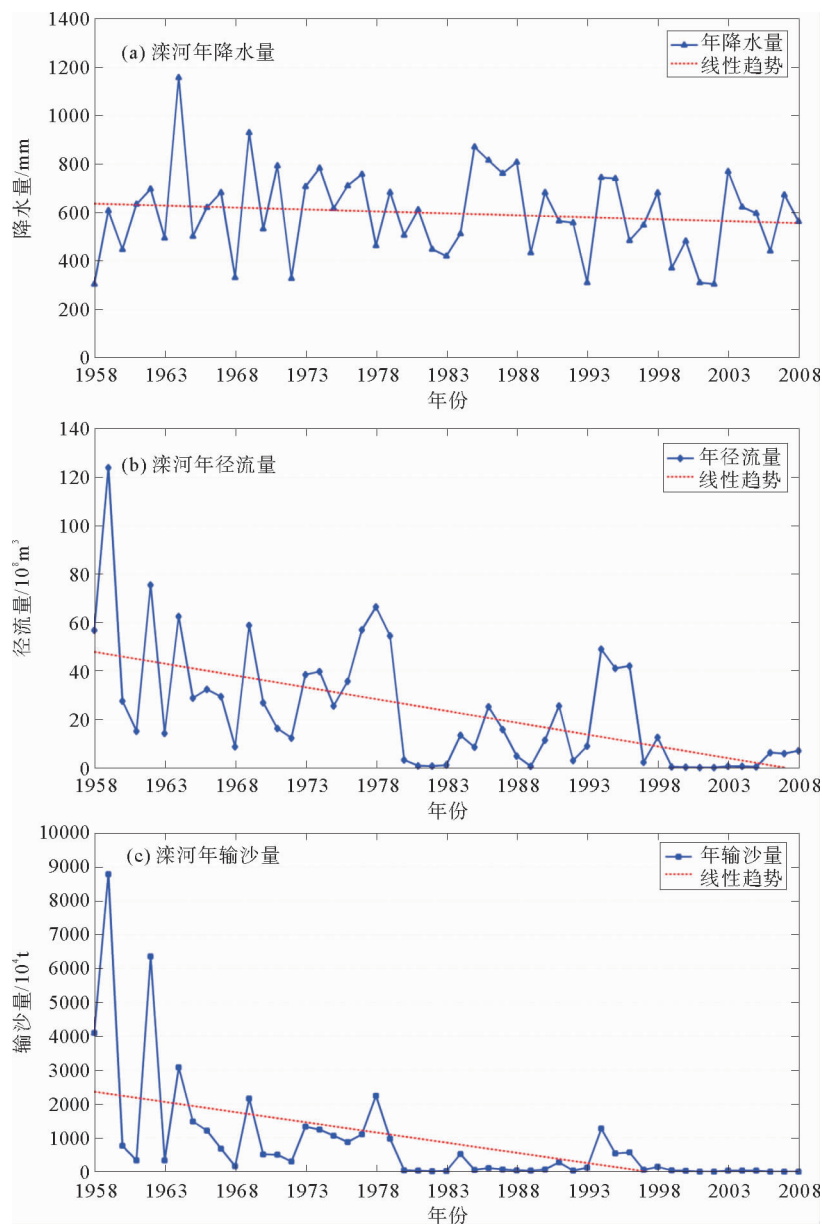


图 1 滦河流域降水量和入海径流量及输沙量年变化曲线(1958—2008 年)
Fig. 1 Changes in annual precipitation, runoff and sediment load of the Luan River (1958-2008)

现减少趋势,其明显减少程度超过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平的时间与年径流量吻合,也在 20 世纪 80 年代初,输沙量 M-K 趋势分析结果与线性趋势分析的结果吻合;根据 UF_k 曲线和 UB_k 曲线交点的位置,不难看出,年输沙量系列突变点在 1980 年前后。

2.3 入海水沙通量突变原因

滦河的径流量突变点和输沙量突变点都在 1980 年前后,具有明显的一致性。调查资料表明^[14],滦河水沙的突变时间与滦河流域最大的水利工程—引滦工程的建设时间吻合。引滦工程是由滦

河跨流域向天津市和唐山市供水的大型水利工程群。它由引滦枢纽工程(潘家口水利枢纽蓄水工程、大黑汀水利枢纽蓄水工程、分水枢纽工程)、引滦入津输水工程、引滦入唐输水工程、滦河下游的引水渠等部分组成(图 3)。潘家口水利枢纽蓄水工程位于滦河中游,总库容 29.3 亿 m³,调节库容 19.5 亿 m³ (保证率 75%),控制滦河流域面积的 76%;大黑汀水利枢纽蓄水工程位于潘家口水库下游 30 km,总库容 3.37 亿 m³。1979 年 10 月,潘家口水利枢纽蓄水工程、大黑汀水利枢纽蓄水工程开始蓄水^[15], 1983 年引滦工程向天津输水,1984 年开始向唐山输

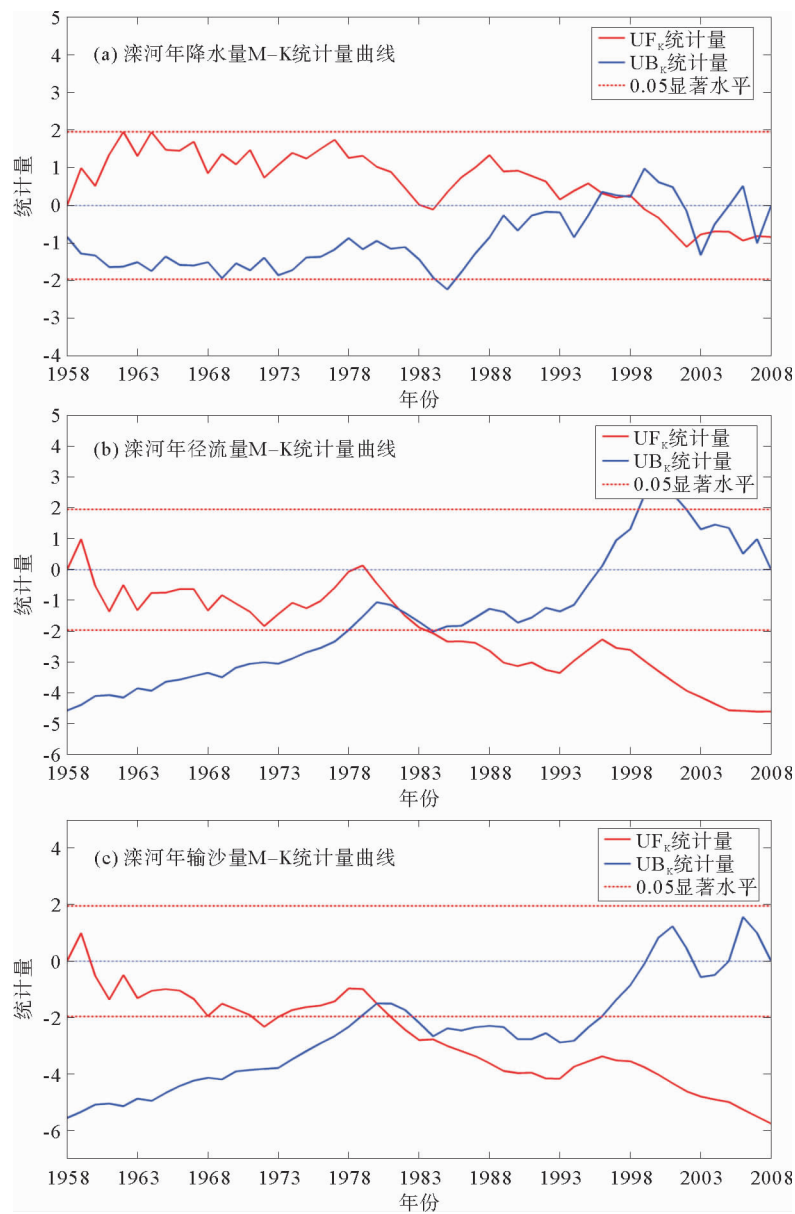


图 2 滦河年降水量和年径流量及年输沙量的 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 2 The Mann-Kendall statistic test results of the annual precipitation, runoff and sediment discharge of the Luan River

水(表 1)。因此,1979 以后,引滦工程已经开始对滦河的水沙造成影响,滦河的径流量、输沙量已不能代表天然情况。滦河水沙的 M-K 突变检验显示水沙的突变点在 1980 年左右,这与 1979 年 10 月潘家口、大黑汀水库开始蓄水的时间基本同步。这说明引滦工程对滦河的拦水拦沙作用非常显著。

引滦后滦河水沙发生剧烈变化,工程前(1971—1979 年)滦河的多年平均入海水量为 38.4 亿 m³,多年平均输沙量为 1 067.7 万 t;工程后(1980—1988 年)由于引滦工程对滦河上游来水的拦蓄,年入海水量为 8.1 亿 m³,入海水量减少了约 80%,其中 1982、1983 年入海水量尚不足多年入海水量平均值的 1%,仅为 0.3 亿 m³,滦河尾间几乎干涸,多年

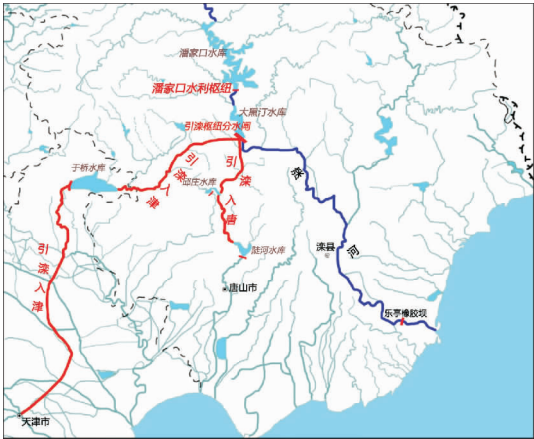


图 3 引滦工程示意图

Fig. 3 Luan River Diversion Project

表 1 引滦工程对滦河水量的影响
Table 1 The impacts of Luan River diversion project

时段	工程引水量/亿 m ³			水库调蓄量/亿 m ³	工程影响水量/亿 m ³
	天津	河北	合计		
1983.8—1984.6	6.888	7.2298	14.1178	—0.957	13.1608
1984.7—1985.6	4.4803	5.25	9.7303	—0.2894	9.4409
1985.7—1986.6	2.5525	5.9765	8.529	7.517	16.046
1986.7—1987.6	4.5043	5.1963	9.7006	6.0825	15.7831
1987.7—1988.6	5.2231	8.2616	13.4847	—3.567	9.9177
平均	4.73	6.38	11.11	1.76	12.87

注:数据来源于文献[16]

表 2 引滦工程建成前后滦河水沙变化
Table 2 Changes in annual runoff and sediment load at Luanxian hydrological station of the Luan River (1971—1988)

测站名	统计年段	径流量 (亿 m ³)	输沙量 (万 t)
滦县	建成前(1971-1979 年)	38.4	1 067.7
	建成后(1980-1988 年)	8.1	95.1
	建成后占建成前百分比	21.1%	8.9%

平均输沙量减到 95.1 万 t,减少了约 90%(表 2)。引滦工程建成后,入海水量急剧减少,导致下游入海河段在枯水期甚至常年断流,1999 和 2000 年滦县下游河段断流天数在 300 天左右,而 2001 和 2002 年则全年断流,2003 年断流天数也不少于 200 天^[17],因此,导致多年通过滦河口入海的泥沙接近为零,这对滦河口环境产生了极大地影响^[18]。

3 结语

(1)滦河流域年降水量总体上保持稳定,不存在突变点,气候因素显然不是导致水沙通量显著变化的决定性因素。滦河流域年径流量和年输沙量减少趋势显著,水沙系列的突变点在 1980 年前后,突变与人类活动的突然增强有关。

(2)采用 Mann-Kendall 法分析流域水沙变化时,可以明显看出其水沙变化趋势,而且突变点也容易确定,相对于常用的双累积曲线法,确定流域突变点时减少了模型误差、突变点因素、人为因素等影响。

(3)由于中小河流入海水沙的减少对我国海岸带环境已产生普遍影响,开展相关中小入海河流的研究十分迫切,需要更多重视和工作。

参考文献 (References)

[1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world rivers [J]. Global and Planetary Change, 2003,39:111-126.

[2] 李从先,陈刚,姚明. 我国河流输沙对海岸和大陆架沉积的影响[J]. 同济大学学报, 1988, 16 (2): 37-147. [LI Zhongxian, CHEN Gang, YAO Ming. Influence of Discharge Load and Continental Shelf in China on Coastal Sedimentation [J]. Journal of Tongji University, 1988, 16(2):37-147.]

[3] 李晶莹,张经. 中国主要河流的输沙量及其影响因素[J]. 青岛海洋大学学报,2002, 33(4): 565-573. [LI Jingying, ZHANG Jing. Natural Controls of Sediment Yield in the Major Rivers in China [J]. Journal Of Ocean University Of Qingdao, 2002, 33(4): 565-573.]

[4] 程天文,赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响[J]. 海洋学报, 1985, 7 (4): 460-471. [CHENG Tianwen, ZHAO Chunian. Influence ofand Sediment Yield in the Maior Rivers in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7 (4):460-471.]

[5] 李勇,黎桂喜,潘贤娣. 黄河干流径流泥沙特性变化[J]. 泥沙研究,2002,4:1-7. [LI Yong, LI Guixi, PAN Xiandi. Change on Characteristics of Runoff and Sediment in the Main Stem of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research,2002,4:1-7.]

[6] 许炯心,孙季. 长江上游重点产沙区产沙量对人类活动的响应[J]. 地理科学,2007, 27(2): 211-218[XU Jiongxin, SUN Ji. Sediment Yield in Major Sediment Source Areas of the Upper Changjiang River Basin in Response to Human Activities[J]. Scientia Geographica Sinica,2007,27(2):211-218.]

[7] 赵庚星,张万清,李玉环,等. GIS 支持下的黄河口近期淤、蚀动态研究[J]. 地理科学, 1999, 5: 442-445. [ZHANG Gengxing, ZHANG Wanqing, LI Yuhuan, et al. GIS Supporting Study on Current Siltation and ErosionDynamic Changes of Yellow River Mouth[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 5: 442-445.]

[8] 孙英,蔡体录,柴加龙,等. 闽浙山溪性河口的径流特性及其对河口的冲淤影响[J]. 东海海洋, 1983, 2: 29-35. [SUN Ying,

CAI Tilong, CAI Tilu, et al. Influence on Siltation Dynamic Changes of River Mouth in Fujian Province and Zhejiang Province[J]. Donghai Marine Science,1983, 2:29-35.]

[9] 吴俊秀,张晓红,车延路. 综合治理对大凌河流域泥沙影响分析[J]. 东北水利水电,2005,2:31-32. [WU Junxiu, ZHANG Xiaohong, CHE Yanlu. Impact of Human Activities On The Sediment Load Discharged Into The Sea From Daling Rivers [J]. Northeast Water Resources And Hydropower, 2005,2: 31-32.]

[10] 刘建梅. 韩江下游径流周期变化特征的小波分析[J]. 广东水利水电,2007,1:59-62. [LIU Jianmei. Wavelet Analysis on Runoff Changes of Han River[J]. Guangdong Water Resources And Hydropower,2007,1:59-62.]

[11] 刘敬伟,程岩,李富祥,等. 人类活动对鸭绿江下游水沙变化的影响[J]. 辽东学院学报(自然科学版),2015,22(1):27-32. [LIU Jingwei, CHENG Yan, LI Fuxiang, et al. Influence of Human Activities on Changes of Runoff and Sediment Downstream Yalu River[J]. Journal of Eastern Liaoning University (Natural Science),2015,22(1):27-32.]

[12] 田清,王庆,战超,等. 最近 60 年来气候变化和人类活动对山地河流入海径流、泥沙的影响—以胶东半岛南部五龙河为例[J]. 海洋与湖沼,2012,43(5):891-899. [TIAN Qing, WANG Qing, ZHAN Chao, et al. Impact of Climate Change And Human Activities On The Runoff And Sediment Load Discharged Into The Sea From Mountainous Rivers During The Last 60 Years: A Case Study of Wulong River In Southern Jiaodong Peninsula[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica,2012,43(5):891-899.]

[13] 吴创收. 华南流域人类活动和气候变化对入海水沙通量和三角洲演化的影响—以珠江、南渡江和万泉河为例[J]. 上海:华东师范大学,2012. [WU Chuangshou. Impacts of Human Activities and Climate Change on Sediment Flux and Delta Evolution in Southern China Basin-to the Pearl River, Nandunjiang River and Wanquanhe River as An Example[D]. Shanghai:East China Normal University,2012.]

[14] 张丽云,蔡湛,李庆辰,等. 滦河的水沙关系及水利工程对下游河道的影响[J]. 湖北农业科学,2012,51(15):3222-3225. [ZHANG Liyun, CAI Zhan, LI Qingthen,et al. The Runoff-silt Relationship Conservancy in Luanhe River Projects on the Basin and Effects of the Water Lower Reaches[J]. Hubei Agricultural Sciences,2012,51(15):3222-3225.]

[15] 钱春林,任美镔. 引滦工程对滦河下游水文及河道的影响[J]. 海河水利,1991,4:10-16. [QIAN Chunlin, REN Meie. The Effects on the Basin and the Water Lower Reaches of Luan River Diversion Project[J]. Haihe River Water Resources, 1991,4:10-16.]

[16] 郎洪钢,王海宁. 河北滦河山区水资源情势及影响分析[J]. 海河水利,2006,1:1-3. [LANG Honggang, WANG Haining. Effects of the water resources in the Luanhe River Basin, Hebei Province[J]. Haihe River Water Resources, 2006,1:1-3.]

[17] 黎刚,殷勇. 滦河下游河道及三角洲地貌的近期演化[J]. 地理研究,2010,9(29):1608-1615. [LI Gang, YIN Yong. Recent geomorphological evolution of downstream channel and delta of Luanhe River[J]. Geographical Research 2010,9(29): 1608-1615.]

[18] 钱春林. 引滦工程对滦河三角洲的影响[J]. 地理学报,1994,49(2):158-166. [QIAN Chunlin. Effects of the water conservancy projects in the LuanheRiver Basin on Luanhe River Delta, Hebei Province[J]. Acta Geographica Sinica, 1994,49 (2):158-166.]

VARIATIONS IN WATER AND SEDIMENT DISCHARGES OF
MEDIAM AND SMALL RIVERS AND THEIR RESPONSE TO
HUMAN ACTIVITIES:A CASE STUDY ON THE LUAN RIVER

KANG Xuening¹, YIN Ping², LIU Jinqing²

(1. Marine Geological Survey Institute of Hainan Province, Haikou 570100;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071)

Abstract: This paper addresses the change in runoff and sediment fluxes through the Luan River into the sea based on the record at the Luanxian Hydrological Station for the period from 1958 to 2008. The Mann-Kendall statistic test was used to estimate the long-term trends of the runoff and sediment input with time. The results show that there is a sharp change in both annual runoff and sediment fluxes in the year of 1980. The change points are highly related to human activities in the Luan River basin. It means that the change points may indicate man-made events.

Key words: Luan River; Mann—Kendall test; change point; Human Activities