

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*

田清¹ 王庆¹ 战超¹ 刘亚龙¹ 李希国² 刘雪萍³

(1. 鲁东大学海岸研究所 烟台 264039; 2. 烟台市水文水资源勘查局 烟台 264025;

3. 烟台市气象局 烟台 264025)

提要 采用 Mann-Kendall 非参数检验法、累积距平法、有序聚类分析法及线性回归等数学方法, 以胶东半岛五龙河流域为例, 对最近 60 年来气候变化和人类活动对山地河流入海径流、泥沙的影响进行了研究。结果表明, 20 世纪 50 年代以来五龙河入海径流、泥沙量均呈现出显著的阶段性逐级减少趋势。最近 60 年来, 五龙河年径流量和输沙量主要集中在 6—9 月; 主要受年降水量变化影响, 年径流量从 1980 年开始显著减少, 并在 1966 年出现较大波动; 受年降水和径流变化影响, 年输沙量也分别在 1966 和 1980 年呈减少突变; 总体来看, 年输沙量减少的趋势性要强于径流量。除气候变化影响外, 1966 年以来流域内大面积坡耕地改梯田和园地、林地建设等人类活动, 也是造成河流径流、泥沙减少的重要原因。整体而言, 最近 60 年来, 气候变化和人类活动因素对五龙河入海水沙总量减少的贡献率分别为 70%—80% 和 20%—30%。

关键词 径流量, 输沙量, 气候变化, 人类活动, 五龙河

中图分类号 P731

河流径流与输沙是河口海岸地区最重要的陆域物质来源之一, 其变化必然导致河口海岸水动力、水环境、沉积、地貌及资源和生态环境的深刻变化(Lu *et al.*, 2008)。研究表明, 最近数十年来, 包括尼罗河、密西西比河、长江等著名河流在内的全球许多河流入海径流、泥沙量都呈不同程度的减少趋势(Xu *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2009; Walling, 2006; Liu *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2006), 其原因主要是气候变化和人类活动(如流域内水库堤坝建设、土地覆被变化以及调水引水等)的影响(陈亚宁, 2008; Fu *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2005; Flavio *et al.*, 2010)。近年来, 许多学者采用各种时间序列分析方法, 以定量研究人类活动和气候变化对河流径流和泥沙的影响程度(Fu *et al.*, 2007;

Wang *et al.*, 2007)。

比较而言, 过去关于河流入海径流、泥沙变化及其海岸动力地貌效应的研究, 以水文站点较多的平原大江大河为主, 而对规模较小、水文站点较少的山地河流重视不够。但是, 近年来的研究结果表明, 全球山地河流的入海泥沙不仅数量超过平原大河, 而且因其流域坡地侵蚀泥沙的搬运比率高、速度快, 其对流域人类活动的响应比大河更为灵敏(Farnsworth *et al.*, 2003)。本研究以胶东半岛五龙河流域为例, 探测其最近 60 年来河流入海径流、泥沙的变化特征及对气候变化和人类活动的响应机制, 以期为进一步研究河流水文要素变化对河口海岸地貌演变的影响提供依据。

* 国家自然科学基金项目, 41071011 号, 41171158 号; 教育部重点项目, 210122 号; 山东省高等学校科技计划项目, J09LE07 号。田清, E-mail: tianqing0405@163.com

通讯作者: 王庆, 教授, E-mail: schingwang@tom.com

收稿日期: 2011-09-15, 收修改稿日期: 2011-11-12

1 研究区概况

五龙河发源于我国胶东半岛中部的低山丘陵,流经山东省栖霞市、海阳市、莱阳市,向东南流入丁字湾,并最终注入南黄海(图 1)。五龙河是胶东半岛最大的河流之一,上游有白龙河、蚬河、清水河、墨水河、富水河五大支流,河流干流全长 128.0km,流域面积约 2652.0km²(孙庆基等, 1987)。受胶东半岛中部高、周围低的地势及半岛狭长轮廓的影响,五龙河河床纵比降较大,河流源短流急。五龙河流域为典型的暖温带湿润季风气候,冬季寒冷干燥,降水较少,1月(最冷月)均温-3—-1℃;夏季温暖湿润,8月(最热月)均温约 25℃;受东亚夏季风影响显著,70%以上年降水集中在夏季(6—9月),且降水强度大,常出现暴雨。五龙河属于季风雨源型河流,径流年内分布不均,洪枯悬殊,水位、流量过程线随降水变化而迅速涨落,汛期径流占全年径流总量的 70%—80%,易形成春季干旱,夏、秋洪灾;枯水季节上游河床暴露,甚至发

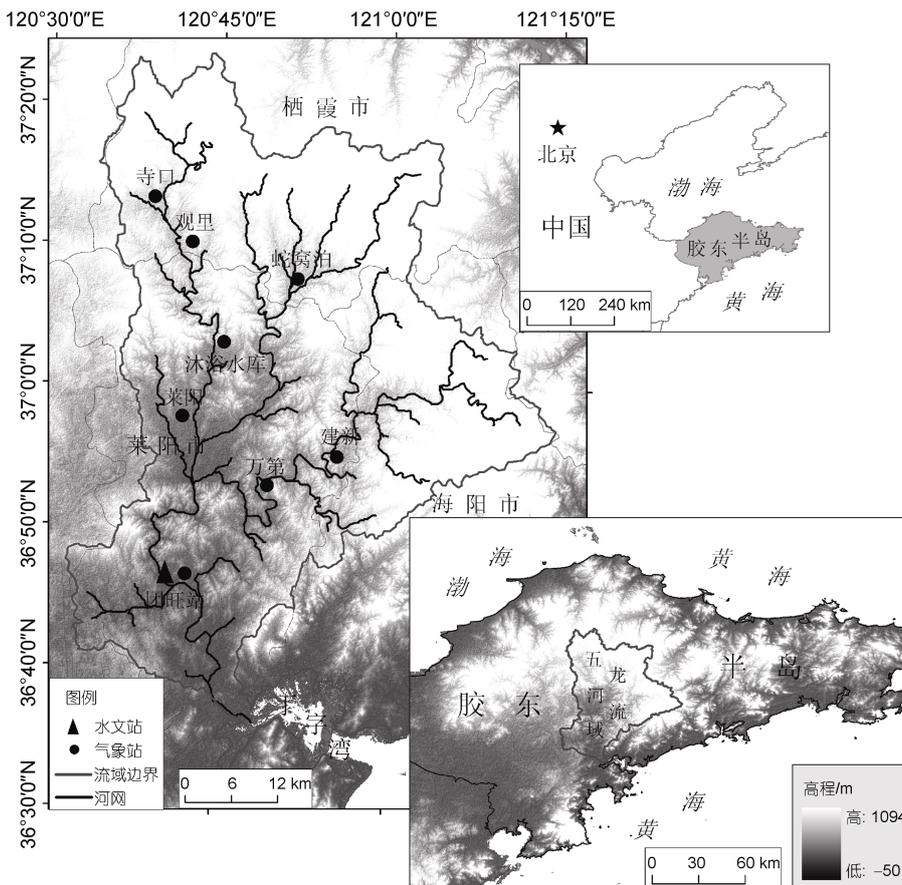


图 1 胶东半岛五龙河流域位置图

Fig.1 Location map of Wulong River Basin in Jiaodong Peninsula

生河水断流和枯涸现象(山东省国土资源厅, 2007)。

五龙河流域所在的胶东半岛是我国经济社会发展水平较高的地区,最近 60 年来流域内人类活动强度显著增大。首先,五龙河流域于 1958 年到 1960 年建设了大量水库,包括沐浴水库、建新水库、龙门水库、小平水库等大中型水库,主要分布在五龙河各支流上。其中,以沐浴水库规模最大,集水面积约 455km²,总库容为 1.836km³。此后,为解决流域水资源供需矛盾,从 1965 年开始在五龙河干支流上共兴建拦河闸坝 65 座,其中大型 15 座、中型 27 座、小型 23 座(山东省水利厅, 1999)¹⁾。其次,最近 60 年来,五龙河流域土地利用/覆被类型变化剧烈。五龙河流域的土地利用/覆被类型主要有耕地、园地、林地和其它(包括水体、草地和建筑用地等)。历史调查资料显示,20 世纪 60 年代中期到 70 年代,正值全国范围内推广“农业学大寨”,五龙河流域坡耕地几乎全被改造为梯田。而 70 年代末、80 年代初以后,我国调整了农村土地利用政策,流域内大面积梯田被改建为果园(如苹果园)。与此同时,流域内加强了水土保持措施建设,大面积草地和部分梯田被改建为林地。因此,此时期流域内园地和林地面积迅速增加。此外,由于流域内人口数量不断增长,近 60 年来河流引水量不断增加,以满足农田灌溉等需求;为满足大规模经济建设和人民生活改善对建筑用沙的需求,近 40 年来五龙河流域河道采砂活动非常普遍。

2 数据与方法

2.1 数据来源

从 1952 年开始,五龙河下游河口段设有团旺水文观测站,拥有最近 60 年来的河流水文连续观测资料,可以代表整个流域的入海径流和泥沙量(图 1)。本文中,五龙河年径流量、输沙量和平均含沙量数据均来自于团旺站;降水数据来自流域内的 8 个代表性

1) 山东省水利厅, 1999. 山东省大中型水库注册登记资料汇编: 17

气象站(寺口、观里、沐浴水库、蛇窝泊、莱阳、建新、万第、团旺站), 并采用 8 站全年累计降水量数据的空间平均值代表整个流域的年降水量; 气温数据以莱阳站年平均温度数据为代表。

2.2 研究方法

首先, 用 Mann-Kendall 检验法检测气候及水文要素序列的整体变化趋势。Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法, 已经在水文-气象时间序列分析中得到广泛应用(Xu *et al*, 2010; Hao *et al*, 2008)。Mann-Kendall 检验法以设定原假设 H_0 (即假设时间序列没有明显变化趋势)为前提, 其结果包含 Mann-Kendall 统计量 Z_c 和 Kendall 倾斜度 β 。其中, Z_c 反映了序列的总体变化趋势, β 表示单位时间内的变化量。

其次, 绘制径流、输沙量的累积距平曲线, 根据曲线变化趋势分析各要素的阶段性变化。曲线的纵轴表示累积距平 ($X_t - \bar{X}$), 横轴表示时间(年)。曲线上上升表明该时段处于相对高温期或丰水期; 反之则为低温期或枯水期。一般认为, 曲线趋势发生变化很可能是气候或水文要素发生突变的结果(Hao *et al*, 2008)。

然后, 用有序聚类分析法(Order Cluster Analysis, 简称 OCA 法)探测河流径流和输沙序列发生突变的具体时间。用 OCA 法推求突变点的实质是寻找最优分割点, 但在分类时不能打乱原序列的顺序(李香云等, 2003)。

最后, 对河流水文时间序列及其影响因素建立线性回归方程, 以此探究各影响因素对径流和输沙变化的影响程度(Wang *et al*, 2007)。其基本原理是: 河流径流量、输沙量发生突变前不受或较少受人类活动影响, 而主要与自然因素特别是气候因素(降水、气温)密切相关, 因此对突变前河流径流量和输沙量与

其主要自然影响因素建立多元线性回归方程。

$$Y = mX_1 + nX_2 + c \quad (1)$$

式中, Y 表示河流径流量、输沙量等水文要素, X 代表降水、气温等自然影响因素, m 、 n 为系数, c 为常数项。

根据方程(1), 由突变后 X 的实测值计算 Y 的理论值, 则突变前、后理论 Y 值的多年平均值差值 R_1 为自然因素影响下的 Y 变化量, 突变前、后实测 Y 值的多年平均值之差 R_2 为人类活动和自然因素共同影响下的 Y 变化量, $R_3 = R_2 - R_1$ 为人类活动对 Y 变化的影响量。因此, R_3/R_2 、 R_1/R_2 分别代表人类活动和气候变化对 Y 变化的贡献率。此外, 突变后各年份 Y 的理论值和实测值之差即为不同时期人类活动因素造成的。

以上方法均满足 95% 的显著性水平, 并由 Matlab 软件实现。

3 研究结果

3.1 最近 60 年来五龙河流域气候变化

3.1.1 年平均温度变化 最近 60 年来, 五龙河流域年平均温度整体呈显著上升趋势。Mann-Kendall 检验结果表明, 年平均温度序列参数 Z_c 值大于在 95% 显著性水平下的临界值 1.96, 因此拒绝原假设 H_0 。也就是说, 在 95% 的显著性水平下, 最近 60 年来五龙河流域年平均温度上升趋势极其显著, 年平均温度共上升约 1.9°C , 平均升温速率约为 $0.33^\circ\text{C}/10\text{a}$ (表 1)。

最近 60 年来, 五龙河流域年平均温度升温过程具有显著的阶段性。累积距平曲线显示, 年平均温度升温过程不是逐渐递增, 而是大致以 1990 年为界分为前、后两个阶段, 前期呈下降趋势、后期呈上升趋势(图 2)。由此推测, 年平均温度可能在 1990 年前

表 1 五龙河流域气候及水文要素时间序列单调趋势检验

Tab.1 Monotonic trend test for the climate and hydrological element time-series in Wulong River Basin

气候和水文要素	时间序列(年)	Mann-Kendall 检验			
		Z_c	β	H_0	趋势
年平均温度($^\circ\text{C}$)	1952—2009	5.98	0.03	R	上升
6—9 月降水量(mm)	1952—2009	-1.73	-2.21	A	下降
年降水量(mm)	1952—2009	-1.81	-2.46	A	下降
6—9 月径流量(10^8m^3)	1952—2009	-2.84	-0.05	R	下降
年径流量(10^8m^3)	1952—2009	-2.82	-0.06	R	下降
6—9 月输沙量(10^4t)	1953—2009	-5.73	-1.61	R	下降
年输沙量(10^4t)	1953—2009	-5.92	-1.74	R	下降
年平均含沙量(kg/m^3)	1953—2009	-6.48	-0.03	R	下降
年平均水位(m)	1952—2009	-7.82	-0.03	R	下降

注: A 表示接受原假设 H_0 , 即变化趋势不显著; R 表示拒绝 H_0 , 即变化趋势显著

后存在升温突变。进一步根据 OCA 法计算结果, 确定年平均温度的具体突变时间为 1994 年。通过对比突变前后年平均温度多年平均值发现, 大致以 1994 年为界, 五龙河流域年平均温度较突变前上升约 11.16%, 升温突变比较显著(表 2)。

3.1.2 年降水量变化 最近 60 年来, 五龙河流域年降水量呈减少趋势。Mann-Kendall 检验结果显示, 最近 60 年来五龙河流域年降水量有所减少, 共减少约 143.0mm, 平均年减少速率为 2.46mm(表 1), 但没有达到 95% 的显著性水平。

五龙河流域年降水量变化过程也具有显著的阶段性。年降水量累积距平曲线大致以 1980 年前后为界划分为前、后两个阶段, 前期呈上升趋势、后期呈下降趋势, 并在 1966 年存在较大波动(图 2)。进一步根据 OCA 法计算结果, 确定年降水量减少突变具体时间为 1977 年, 突变后年降水量减少约 16.73%(表 2)。

最近 60 年来, 五龙河流域 6—9 月降水量减少趋势与年降水量基本一致(表 1)。总体来看, 最近 60 年来 6—9 月降水量约占全年降水的比例为 73.63%。

3.2 最近 60 年来五龙河入海径流、泥沙变化

3.2.1 年径流量变化 最近 60 年来, 五龙河年径流量整体呈显著减少趋势。Mann-Kendall 趋势检验结果表明, 最近 60 年来, 年径流量时间序列呈显著减少趋势, 平均年减少速率约为 $0.06 \times 10^8 \text{m}^3$ (表 1)。累积距平曲线显示, 五龙河年径流量减少过程呈现明显的阶段性, 而不是逐渐递减。大约在前 30 年(1952 年到 70 年代末)曲线呈上升趋势, 但在 1966 年前后出

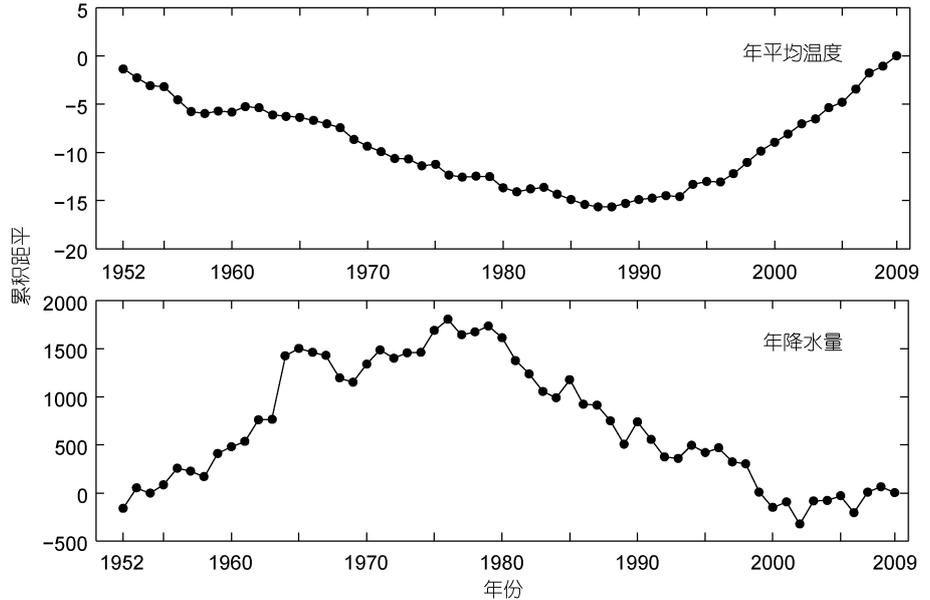


图 2 五龙河流域年平均温度/平均年降水量累积距平曲线

Fig.2 Accumulated difference curve of the annual mean temperature and annual precipitation in Wulong River Basin

现较大波动, 1980 年后曲线呈下降趋势(图 3)。这说明 1980 年以前河流径流量处于相对丰水期, 之后进入枯水期。由此推测, 年径流量可能在 1980 年前后突然明显减少。进一步由 OCA 法检测可得, 年径流量减少突变具体时间刚好为 1980 年(表 2)。突变后年径流量减少了 54.54%, 大约为 $3.29 \times 10^8 \text{m}^3$ (表 2)。因此, 最近 60 年来五龙河年径流量减少突变十分显著。由于径流量显著减少, 最近 60 年来河流下游年平均水位总体下降将近 2m(表 1)。计算结果表明, 最近 60 年来五龙河 6—9 月径流量变化特征与年径流量基本一致(表 1)。其中, 6—9 月径流量约占全年径流量的 75.82%, 与流域内 6—9 月降水量占全年的百分比基本一致。

3.2.2 年输沙量变化 最近 60 年来, 胶东半岛五龙河年输沙量显著减少。Mann-Kendall 检验结果表明, 在 95% 的显著性水平下, 最近 60 年来五龙河年输沙

表 2 五龙河流域气候及水文要素时间序列突变点检验

Tab.2 Transition point test of the climate and hydrological element time-series in Wulong River Basin

气候和水文要素	时间序列	OCA(年)	多年平均值		
			突变前	突变后	变化幅度(%)
年平均温度(°C)	1952—2009	1994	11.28	12.54	11.16
年降水量(mm)	1952—2009	1977	758.36	631.49	16.73
年径流量(10^8m^3)	1952—2009	1980	6.03	2.74	54.54
年输沙量(10^4t)	1953—2009	1966	146.01	23.43	83.95
年平均含沙量(kg/m^3)	1953—2009	1972	1.78	0.44	75.49

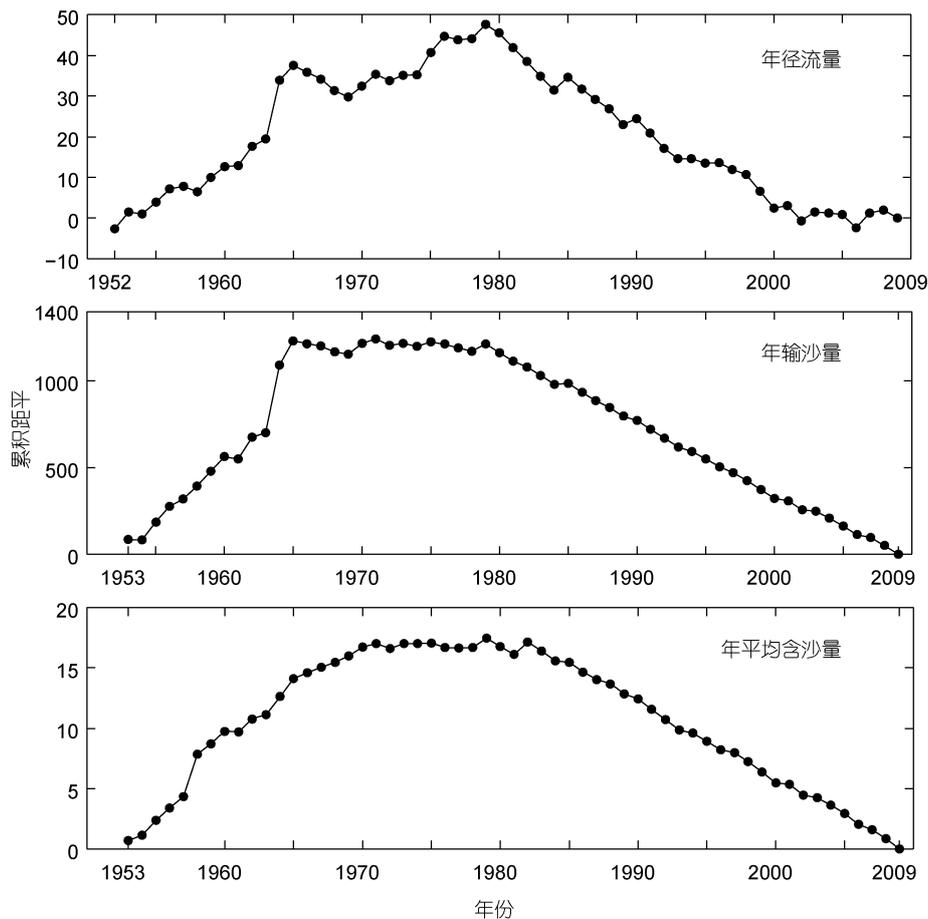


图3 五龙河年径流量/年输沙量/年平均含沙量累积距平曲线

Fig.3 Accumulated difference curve of the annual Runoff / annual sediment load / average annual sediment concentration of Wulong River

量减少趋势达到极显著水平, 平均年减少速率约为 $1.74 \times 10^4 \text{t}$ (表 1)。

累积距平曲线显示, 1953—1965 年曲线呈上升趋势, 经过一段时期水平波动后, 在 1980 年后开始不断下降(图 3)。因此, 最近 60 年五龙河年输沙量变化过程具有显著的阶段性。1966 和 1980 年是年输沙量发生阶段性递减的两个主要时期, 但相较于 1980 年, 1966 年输沙量减少幅度更为明显。进一步根据 OCA 法计算结果, 将年输沙量突变时间定为 1966 年。突变前后年输沙量的多年平均值分别为 $146.01 \times 10^4 \text{t}$ 和 $23.43 \times 10^4 \text{t}$, 突变后输沙量减少了 83.95%, 大约为 $122.57 \times 10^4 \text{t}$ 。可以发现, 与径流量相比, 年输沙量减少幅度更加显著。

最近 60 年来, 五龙河 6—9 月输沙量约占年输沙总量的 97.57%, 夏季输沙几乎是年输沙量的全部来源。这是因为, 夏季多暴雨, 径流量大, 因而对流域产沙及径流输沙贡献较大; 而 6—9 月以外的降水量和径流量均比较小, 降水和径流强度几乎没有达到

流域产沙、输沙的临界值。因此, 与年径流量、降水量相比, 最近 60 年来五龙河年输沙量与 6—9 月经流量、降水量更为相关。

3.2.3 年平均含沙量变化
最近 60 年来, 五龙河年平均含沙量下降趋势十分显著。Mann-Kendall 检验结果显示, 在 95% 的显著性水平下, 年平均含沙量减少趋势极为显著, 年平均速率约为 0.03kg/m^3 (表 1)。年平均含沙量累积距平曲线显示, 1953—1971 年呈上升趋势; 经过短暂水平波动后, 到 1980 年前后曲线开始不断下降(图 3)。由此可见, 最近 60 年来, 大致以 1972 年和 1980 年为转折点, 五龙河年平均含沙量呈明显的阶段性递减过程。根据 OCA 法计算结果, 年平均含沙量减少突变具体时间为 1972 年, 突变后平均含沙量较突变前减少约 75.49% (表 2)。

最近 60 年来, 由于五龙河年输沙量呈阶段性递减, 年平均含沙量也相应表现出相似的变化趋势, 但平均含沙量首次减少突变的时间比输沙量略晚。

3.3 气候变化与五龙河入海径流量、泥沙量变化的关系

3.3.1 气候变化与径流变化的关系 一般认为, 气候变化主要通过温度和降水的变化影响河流径流过程。许多学者研究发现, 由于地理位置和季节不同, 降水和温度变化对径流量的影响表现为不同的特征: 对于冰川融水比例较大的山区河流, 温度主要通过对冰川的生消作用从而影响径流量, 但对冰川融水比例较小的平原河流, 降水是径流的主要来源, 而气温主要通过蒸发作用影响径流(Laurent *et al.*, 2008); 湿润地区径流对降水的变化更为敏感, 而潜在蒸发量对干旱地区径流影响更显著(徐海量等, 2007); 从时间尺度来看, 短期气候变化对河流的影响主要体现在洪峰径流的变化上, 而长期气候变化对年径流量的影响更为明显(Armando *et al.*, 2006)。

根据以上分析,并通过五龙河年降水量和径流量逐年值(图4)可以看出,最近60年来五龙河年径流量呈现出与降水量基本一致的逐年波动趋势;受降水变化影响,年径流量在1980年随之显著减少,并在1966年前后出现一次较大波动。可见,径流量受降水变化影响非常明显,特别是1980年以前,年径流量序列和年降水量相关系数为0.95。最近60年来五龙河流域气温显著升高虽然在一定程度上增加了蒸发量,但对径流量变化的影响并不明显,二者相关系数仅为-0.15。因此,年降水量是影响五龙河径流变化的主要气候因素。这与其它研究认为,在各气候因素中,我国秦岭-淮河以北地区河流径流量受降水影响更为显著的结论是一致的(Fu *et al.*, 2007)。

3.3.2 气候变化与泥沙变化的关系 河流泥沙主要来自于流域内岩石、土壤的机械剥蚀作用。Liu等(2008)通过对世界主要流域影响其输沙变化的主要自然因素进行分析后认为,径流大小决定了河流的携沙能力,因而是影响河流输沙量最直接、最显著的环境因子。而气候变化对河流输沙也存在一定影响:如降雨可以加剧土壤侵蚀,并控制河流径流大小,从而影响输沙量;而气温主要通过影响流域的干旱程度从而对流域产沙量产生较大影响。

五龙河输沙量发生突变前,即1953—1965年,年输沙量与6—9月径流量时间序列相关系数为0.95,与6—9月降水序列相关系数为0.89,而与气温序列相关系数只有0.15。可见,降水和径流是影响五龙河输沙量变化的最主要自然因素。但是降水主要通过控制径流量从而影响输沙量,因而是导致五龙河输沙量变化的间接因素。通过对比五龙河年径流量与输沙量逐年值(图4)及累积距平曲线(图3)可以看出,最近

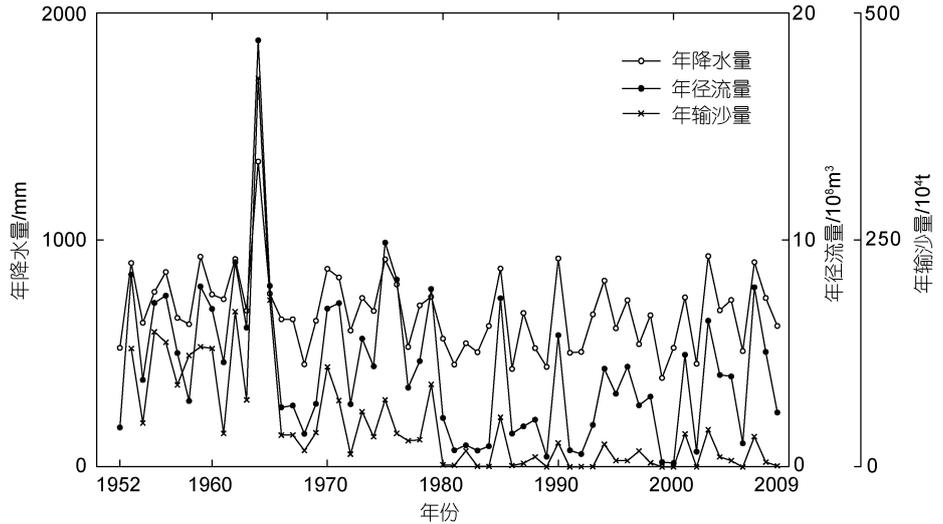


图4 五龙河年降水量、径流量与输沙量逐年值(1952—2009)

Fig.4 Time-series data (1952—2009) of annual precipitation, annual runoff and annual sediment load of Wulong River

60年来,输沙量与径流量逐年波动趋势基本一致,二者均呈现整体显著减少趋势,并均在1966年和1980年前后存在显著突变。但不同于径流量在1980年前后突变更为明显,年输沙量在1966年突变现象更为突出。

3.4 人类活动对径流和输沙量的影响程度

3.4.1 人类活动对径流量的影响程度 径流量发生突变前,即1952—1979年,对五龙河年径流与降水序列建立线性回归方程:

$$R = 0.0194P - 8.4670 \quad (R^2 = 0.91) \quad (2)$$

式中, R 表示五龙河年径流量, P 为年降水量。

据此公式,由年降水的实测值可计算出近60年来假设不受人类活动影响下径流量的理论拟合值。1980年前后径流量拟合值的多年平均值之差,即气候因素造成径流量突变后减少了 $2.32 \times 10^8 \text{m}^3$,而突变前后实测值多年平均值之差为 $3.29 \times 10^8 \text{m}^3$,则1980年后人类活动造成径流量减少约 $0.97 \times 10^8 \text{m}^3$ 。因此,最近60年来气候和人为因素对径流量减少的贡献率分别为70.56%和29.44%(表3)。通过对年径流量理论与实测值的差值列表可以发现,人类活动对径流量减少的影响程度在不同时期也略有差异(表4)。

表3 人为和气候因素对五龙河水文要素贡献率

Tab.3 Contribution rate of the climate and human impact on the hydrological element of Wulong River

参数	实测值多年平均值			理论值多年平均值			R_3	$R_3/R_2(\%)$	$R_1/R_2(\%)$
	突变前	突变后	差值 R_2	突变前	突变后	差值 R_1			
径流量(10^8m^3)	6.03	2.74	3.29	6.04	3.72	2.32	0.97	29.44	70.56
输沙量(10^4t)	146.01	23.43	122.58	145.99	46.57	99.42	23.16	18.89	81.11

表 4 不同时期人类活动对五龙河年径流量减少的影响程度
Tab.4 Contribution of human impact on annual runoff in various periods of Wulong River

径流量(10^8m^3)	实测值	拟合值	差值	人类活动影响程度(%)
1952—1979	168.84	168.84	—	—
1980—1989	18.65	24.48	5.83	23.80
1990—1999	26.91	38.64	11.73	30.36
2000—2009	36.67	48.16	11.49	23.86

3.4.2 人类活动对输沙量的影响程度 五龙河输沙量发生减少突变前, 降水和径流是造成输沙量变化的主要因素。利用多元线性回归法, 对 1953—1965 年流域 6—9 月径流量、6—9 月降水量及年输沙量进行线性拟合:

$$SL = 31.4851R - 0.1013P + 10.9212 \quad (R^2 = 0.90) \quad (3)$$

式中, R 表示五龙河 6—9 月径流量, P 表示 6—9 月降水量, SL 表示年输沙量。

由式(3)计算可以得出, 1966 年以来, 气候和人为因素造成五龙河年输沙量总量分别减少约 81.11% 和 18.89%(表 3)。但不同时期人类活动对输沙量的影响程度又存在显著差异。通过对年输沙量理论值与实测值的差值列表可以发现, 大致以 1990 年为界, 人类活动对输沙量减少的贡献程度显著增加(表 5)。

因此, 从整体来看, 气候变化仍是造成最近 60 年来五龙河径流、输沙量减少的主要因素。但 90 年代以后, 人类活动对径流量, 特别是输沙量减少的影响程度显著增加。

表 5 不同时期人类活动对五龙河年输沙量减少的影响程度
Tab.5 Contribution of human impact on annual sediment load in various periods of Wulong River

输沙量(10^4t)	实测值	拟合值	差值	人类活动影响程度(%)
1953—1965	1898.1	1897.9	—	—
1966—1979	701.6	1000.1	298.5	29.85
1980—1989	97.8	144.05	46.25	32.11
1990—1999	91.1	378.32	287.22	75.92
2000—2009	140.4	526.52	386.12	73.33

3.5 不同人类活动对五龙河径流量和输沙量的影响分析

为了更清晰体现径流量-输沙量变化与外界因素干扰的关系, 本研究将最近 60 年来径流量的逐年累积值作为横坐标, 输沙量逐年累积值作为纵坐标, 点绘二者之间的关系图。在自然情况下, 输沙量主要受径流量影响, 在图上所有点应近似为一直线; 若直线

发生偏转, 则表明输沙量受到了其它因素的影响(Wang *et al*, 2007)。

五龙河输沙量-径流量双累积曲线有两个显著转折点, 分别在 1966 年和 1980 年(图 5)。1966 年, 由于大面积坡耕地改为梯田, 造成输沙量突然显著减少; 而 1980 年前后正值流域内降水减少突变及林地、园地开始大规模建设时期, 五龙河径流量随之显著减少, 输沙量也再次大幅度减少。此外, 曲线在大量水库建成的 1960 年前后并未出现显著偏转。

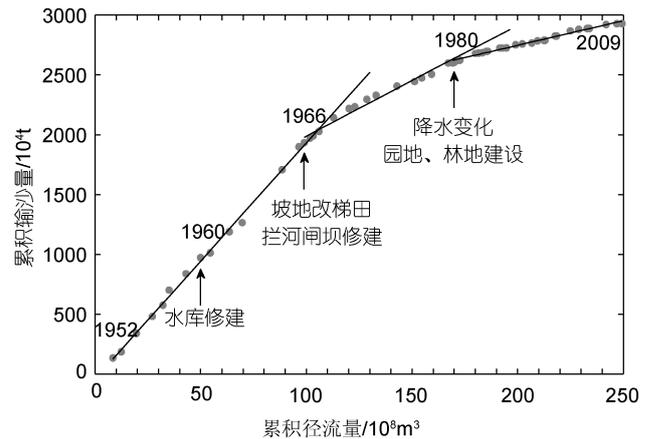


图 5 五龙河年径流量-输沙量双累积曲线

Fig.5 Cumulative annual runoff-sediment load of Wulong River

研究表明, 近几十年来全球范围内许多大河所建水库和堤坝对河流入海径流、泥沙通量产生了重大影响, 水库建设与输沙量的相关程度甚至超过了径流量对输沙量的影响(Rossi *et al*, 2009; Li *et al*, 2011; Liu *et al*, 2008)。例如, 尼罗河入海泥沙量由建坝前的 $1.0 \times 10^8 \text{t/a}$ 到现在几乎减少为 0(Walling, 2006), 2003—2004 年三峡大坝建成后长江宜昌站年输沙量比 2002 年减少 $1.64 \times 10^8 \text{t}$ (Liu *et al*, 2008)。但是, 与平原大江大河不同, 五龙河流域 1958—1960 年期间所修建大量水库, 对入海径流和输沙量变化并未产生显著的影响。其原因有二: 一是受温带季风气候影响, 五龙河径流集中在夏季(6—9 月), 而此段时间山地水库运行以腾空库容、泄洪防灾为主要任务, 其对河流入海径流的拦截作用不大; 二是由于流域内水库均为上游山地水库, 其拦截泥沙主要为粗颗粒的床砂质组分, 对下泄的细颗粒悬浮态的冲泻质组分影响不大, 而位于河口的水文站监测的输沙量、含沙量均为悬移组分。

近几十年来, 沿河大规模城市化建设、修建梯田及各种水土保持措施对河流水文情势影响深刻

(Armando *et al.*, 2006; Ludovic *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2006)。一般而言,随着流域耕地面积的增加,河流输沙量也显著增大,而园地、森林等植被类型对流域地表的保护作用占优势。因此,流经农垦区或裸地的河流含沙量比流经林地的河流明显要高(许炯心等, 2007; Ayed *et al.*, 2010)。坡耕地改为梯田后,地表坡度减缓,从而显著拦截地表径流,并降低土壤侵蚀量(许炯心等, 2007)。Sun 等(2006)经过研究得出,在经历了气候变暖及水资源短缺的我国北方地区,过去几十年中造林(主要是苹果树)和梯田建设工程相结合,造成大部分流域径流量减少 20%—40%。

本文研究结果显示,五龙河入海径流、泥沙量大幅度减少与流域内大面积坡耕地改为梯田(1966 年)、园地(苹果园)和林地大面积增加(1980 年)在时间上基本同步(图 5)。如前所述,从总体来看,最近 60 年气候变化和人类活动对五龙河入海径流和输沙总量减少的贡献率分别为 70%—80%和 20%—30%。因此,与其它大江大河近 60 年来河流径流、输沙减少的主要原因为人类活动(Wang *et al.*, 2007; Hao *et al.*, 2008; Walling, 2006; Li *et al.*, 2011)不同,气候变化是造成五龙河入海径流、泥沙量显著减少的主要原因,但近期人类活动的影响有越来越显著的趋势,特别是进入 90 年代以后。

4 结论

通过以胶东半岛五龙河流域为例,对最近 60 年来气候变化和人类活动影响下山地河流入海径流、泥沙的变化进行了研究,得出以下结论:

(1) 最近 60 年来,五龙河流域气候变化显著并存在明显的突变现象。其中,五龙河年降水量主要集中在 6—9 月(73.63%),最近 60 年来年降水量整体有所减少,但年降水减少不是逐渐递减的结果,而是在 1980 年前后发生一次显著的减少突变,突变后减少约 16.73%,同时,年降水量在 1966 年前后存在较大波动;而年平均温度增温显著,特别是 1990 年以后,较之前上升约 11.16%。

(2) 最近 60 年来,五龙河年径流量年际波动较大,但整体呈显著减少趋势。年径流量主要集中在 6—9 月(75.82%);受降水变化影响显著,年径流量在 1980 年突然显著减少,减少幅度约为 54.54%,并在 1966 年存在较大的波动;由于年径流量显著减少,最近 60 年来五龙河年平均水位下降近 2m。

(3) 最近 60 年来,五龙河年输沙量及平均含沙

量减少趋势十分显著并存在明显的突变现象。五龙河年输沙量主要集中在 6—9 月(97.57%);受径流量影响最为明显,年输沙量在 1966 年和 1980 年发生两次显著的减少突变,以 1966 年为主要突变点,输沙量较之前减少约 83.95%,与径流量相比,输沙量减少幅度更加显著;随着输沙量阶段性减少突变,平均含沙量也呈现出相似的变化趋势。

(4) 1966 和 1980 年是最近 60 年来五龙河水文要素发生显著变化的两个重要时期。从总体来看,气候变化和人类活动对五龙河入海水沙总量变化的贡献率分别为 70%—80%和 20%—30%。因此,气候变化,主要是降水变化,是造成五龙河入海径流、泥沙减少的主要原因,而人类活动为次要驱动因素。但自 1966 年来,人类活动对流域水文要素的影响呈明显增加趋势,特别是进入 90 年代以后。

参 考 文 献

- 山东省国土资源厅, 2007. 山东省国土资源图集. 济南: 山东省地图出版社, 12—13
- 许炯心, 孙 季, 2007. 长江上游重点产沙区产沙量对人类活动的响应. 地理科学, 27(2): 211—218
- 孙庆基, 林育真, 吴玉麟等, 1987. 山东省地理. 济南: 山东教育出版社, 97
- 李香云, 罗 岩, 王立新, 2003. 近 50a 人类活动对西北干旱区水文过程干扰研究——以塔里木河流域为例. 郑州大学学报(工学版), 23(4): 93—98
- 陈亚宁, 2008. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应. 地理学报, 64(11): 1331—1341
- 徐海量, 叶 茂, 宋郁东, 2007. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探. 地理科学, 27(2): 219—224
- Armando B, Alberto M, Greta M, 2006. Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 324(1—4): 141—153
- Ayed G M, Mohammad A A, 2010. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena*, 81(2): 97—103
- Farnsworth K L, Milliman J D, 2003. Effect of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas River example. *Global and Planetary Change*, 39(1—2): 53—64
- Flavio M V, Susana L D P, Marcelo A S, 2010. Analysis of the global warming dynamics from temperature time series. *Ecological Modelling*, 221(16): 1964—1978
- Fu G, Charles S P, Viney N R *et al.*, 2007. Impacts of climate variability on streamflow in the Yellow River. *Hydrological Processes*, 21(25): 3431—3439
- Hao X M, Chen Y N, Xu C C *et al.*, 2008. Impacts of climate

- change and human activities on the Surface runoff in the Tarim River basin over the last fifty years. *Water Resour Manage*, 22: 1159—1171
- Laurent P de Rham, Terry D P, Barrie R B, 2008. Temporal variations in river-ice break-up over the Mackenzie River Basin, Canada. *Journal of Hydrology*, 349(3—4): 441—454
- Li Q F, Yu M X, Lu G B *et al*, 2011. Impacts of the Gezhouba and Three Gorges reservoirs on the sediment regime in the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 403(3—4): 224—233
- Liu C, Sui J Y, Wang Z Y, 2008. Sediment load reduction in Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, 23(1): 44—55
- Lu X X, Chen X Q, 2008. Large Asian rivers and their interactions with estuaries and coasts. *Quaternary International*, 186(1): 1—3
- Ludovic O, Vazken A, Julien L *et al*, 2008. Has land cover a significant impact on mean annual streamflow? An international assessment using 1508 catchments. *Journal of hydrology*, 357(3—4): 303—316
- Rossi A, Massei N, Laiguel B *et al*, 2009. The response of the Mississippi River to climate fluctuations and reservoir construction as indicated by wavelet analysis of streamflow and suspended sediment load, 1950—1975. *Journal of Hydrology*, 377(3—4): 237—244
- Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q *et al*, 2006. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of Hydrology*, 328(3—4): 548—558
- Walling D E, 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79(3—4): 192—216
- Wang H J, Yang Z S, Yoshiki S *et al*, 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 57(3—4): 331—354
- Xu K H, John D M, Xu H, 2010. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese Rivers since 1951. *Journal of Hydrology*, 73(3—4): 219—232
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H *et al*, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 18(7): 1096—1108
- Zhang Q, Xu C Y, Stefan B *et al*, 2006. Sediment and runoff discharge in the Yangtze River basin during the past 50 years. *Journal of Hydrology*, 331(3—4): 511—523

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

TIAN Qing¹, WANG Qing¹, ZHAN Chao¹, LIU Ya-Long¹, LI Xi-Guo², LIU Xue-Ping³

(1. *Coast Institute of Ludong University, Yantai*, 264039; 2. *Yantai Hydrological Bureau, Yantai*, 264025; 3. *Yantai Meteorological Bureau, Yantai*, 264025)

Abstract The non-parametric Mann-Kendall Test, Accumulated Difference Curve, Order Cluster Analysis and Linear-Regression Analysis methods were used in this paper to reveal the effect of the climate change and human activities on the annual runoff and sediment load of mountainous rivers over the past 60 years, taking Wulong River Basin of Jiaodong Peninsula as an example. Results obtained showed a number of observations: the annual runoff and sediment load into the sea from Wulong River Basin showed a periodical decreasing process since 1950s. The annual runoff and sediment load of Wulong River were mostly concentrated from June to September over the last 60 years; the annual runoff showed a significant reduction after 1980, due mainly to the decrease of precipitation, but there was an obvious fluctuation at about 1966; the sediment load showed a periodical decreasing process affected mostly by the annual precipitation and annual runoff, with the abrupt change points detected around 1966 and 1980; in comparison, the decreasing trend of sediment load was more significant than that of the annual runoff. In addition, the human activities, such as a large area of sloping farmland was transformed into the terraced field, as well as the forest and orchard land construction since 1966, also made a great contribution to the decrease of runoff and sediment load in the basin. Overall, the total amount of water and sediment load discharged into the sea from Wulong River reduced by about 70%—80% and 20%—30% owing to the climate change and human factors respectively over the last 60 years.

Key words Runoff, Sediment load, Climate change, Human activities, Wulong River