

气候变化与人类活动驱动下的元江-红河流域泥沙变化

任敬 何大明* 傅开道 李运刚

(云南大学亚洲国际河流中心, 昆明 650091; 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650092.)

*联系人, E-mail: dmhe@ynu.edu.cn)

摘要 以元江蛮耗水文站 1960~2000 年泥沙变化为线索, 结合与其相关的区域气候变化和社会经济统计资料, 采用同步资料对比、传统相关分析、线性回归拟合与 Granger 因果关系检验等方法, 深入探究了元江-红河 40 年来的泥沙变化及其驱动因素. 主要结论: (1) 元江蛮耗水文站 1960s 以来, 断面年悬移质泥沙含量及其输沙量逐年递增, 总的趋势是 1960s 和 1970s 较为平稳、1980s 剧增、1990s 下降, 其中 1960s, 1970s, 1980s 和 1990s 不同时段内的泥沙含量与悬移质输沙量分别为 1.87, 2.49, 3.12 和 3.63 kg/m³ 以及 28.7×10⁶, 40.3×10⁶, 44.1×10⁶ 和 60.3×10⁶ t/a; (2) 相关分析与 Granger 因果检验证明, 1960s 与 1990s 的区域气候变化是河道泥沙变化的主要原因, 而 1970s 与 1980s 流域内的人类活动对河道泥沙变化的解释意义明显于气候变化; (3) 对比研究时段内的泥沙与流域内的森林覆盖率变化趋势, 发现流域森林覆盖率和含沙量呈反比的关系, 结合流域社会经济发展历程, 进一步证实了各年代流域泥沙变化与区域气候变化和人类活动的影响密切相关.

关键词 泥沙变化 Granger 因果检验 元江-红河 纵向岭谷区

元江-红河是中国西南纵向岭谷区重要的国际河流, 在中国 15 条最主要的国际河流中, 它属于水资源丰富、互补效益好, 主要涉及中国与越南两国, 虽然具有广阔合作前景, 但它是自然灾害危害严重的国际河流^[1](图 1). 1980s 以前, 在中越航运史上曾出现过“大船三百, 小船如蚁”的繁荣局面. 新世纪以来, 随着该流域成为大湄公河次区域经济合作(GMS 合作)和中国-东盟自由贸易区建设(“10+1”合作)的重要组成部分, 其上下游水道水文情势变化、水土流失、泥沙沉积变化、水污染、界河整治和生物多样性消失等跨境问题更受到国际关注^[1].

1998 年, 在河内中越“元江-红河资源开发和环境保护”国际研讨会上, 双方科学家曾就跨境污染问题进行讨论^[2], 至今, 国内学者对红河流域的研究主要聚焦于红河流域径流、洪水、泥沙等水文特征, 污染物的时空分布和跨境水质问题, 水土流失规律与防控等. 例如, 谢淑琴^[3]对元江干流出境断面以上流域的气象、径流、洪水等年内年际变化及地区分布规律进行了分析; 柏绍光^[4]、罗扬生^[5]分别根据相关资料, 揭示了红河流域的暴雨洪水特性、洪水特征量和洪水统计参数的地区分布规律; 刘嘉麒^[2,6]利用水质监测资料, 研究污染物的时空迁移规律, 对元江-红

河跨境水质环境问题进行分析并提出相应的保护建议; 卢培泽^[7]分析了红河流域的水土流失特点, 并提出防治水土流失的生物措施. 国外有关红河流域的研究则更多地关注上下游的水文变化、泥沙输移特征, 及其对红河三角洲的影响等. Maren^[8,9]从动力学角度出发, 分析红河来水输沙对红河河口海岸的调整作用; Bergh^[10]通过对红河河口海区底泥沉积的声学测量研究, 反推流域泥沙变化, 完成了相关原因分析.

1 流域自然环境概况

元江-红河流域总面积约 11.3×10⁴ km², 为中国、越南、老挝共享, 其中越南约 3.55×10⁴ km², 老挝约 1500 km², 中国约 7.6×10⁴ km²(云南占 7.42×10⁴ km², 广西占 1758 km²). 主要由主源元江, 次源李仙江和支流藤条江、南溪河、盘龙河、普梅江(又称那马河、南利河)等水系组成(图 1). 主源元江在中国境内全长 677 km, 天然落差 2674.6 m, 河床平均比降 3.85‰, 出境多年平均流量 450.0 m³/s. 元江流域面积 38073.6 km², 占中国境内流域面积的 50.9%, 占全流域总面积的 33.7%. 流域南北长约 680 km, 跨越约 3 个纬度, 地势起伏大, 海拔从 3200 m 下降到 76.4 m. 流域内降雨差异较大, 从 700 mm 以上到 3000 mm.

2007-01-02 收稿, 2007-04-27 接受

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2003CB415105)和云南大学理(工)科校级科研重点项目(编号: 2005Z003B)资助

1) 何大明. 西南地区国际河流水资源的合理利用与生态环境保护研究, 综合报告. 2002

降水分布规律从下游往上游递减,从河谷向山地递增¹⁾。元江下游蛮耗水文观测站控制流域面积 32037.0 km²(图 1),实测天然年径流量最大 164.0×10⁸ m³(1971 年),最小 66.8×10⁸ m³(1960 年),多年平均流量 257.0 m³/s,最大流量 4620 m³/s(1966 年 8 月 29 日),最小流量 28.7 m³/s(1963 年 5 月 27 日)^[3]。

包括次源李仙江在内的红河流域,1999 年土壤侵蚀面积 33159.66 km²,占流域面积的 44.31%,侵蚀模数 1480 t/km²·a⁻¹,年均侵蚀深为 1.11 mm,仅次于金沙江,多年平均侵蚀量由 1.114×10⁸ t 减少到 1.107×10⁸ t,与 1987 年相比,侵蚀模数由年平方公里 1482 t 减少到 1480 t²⁾。流域多年平均含沙量为 0.36~4.93 kg/m³(各测站 1970~2000 年对比),流域东部石灰岩分布较广,含沙量普遍在 0.8 kg/m³以下。流域西部属哀牢山区,河谷深切,坡陡流急,植被破坏大,水土流失严重,含沙量在云南省各河流中较大。元江干流自上而下多年平均含沙量:大东勇站 4.93 kg/m³(1970~2000 年),元江站 4.22 kg/m³(1960~2000 年)¹⁾,蛮耗站 2.78 kg/m³(1959~2000 年)^[3]。

2 数据与方法

2.1 数据

主体数据采用的是元江下游蛮耗水文站,1959~2000 年的实测月平均悬移质泥沙含量,及其集水区内 19 个气象站 1960~2001 年日实测降水深度资料,经过算数平均获得蛮耗站集水区平均月降水序列,对照同步蛮耗站年均流量与径流数据,采用数种统计诊断方法推理泥沙变化的气候原因。

区域社会经济发展统计数据,以年代为单位,即 1960s 至 1990s 流域面上的森林覆盖率数据,代表该区人类因素变化,与同步泥沙资料对比分析,以判识人类活动的泥沙响应。另外,文章对结果的论证过程中也引用到一些相关成果数据,比如,云南省国土资源遥感综合调查报告等。

2.2 分析方法

本研究所用数据均为典型的时间序列,讨论若干个时间序列的相互关系,通常可采用传统的相关和线性回归分析方法。线性回归分析要求时间序列

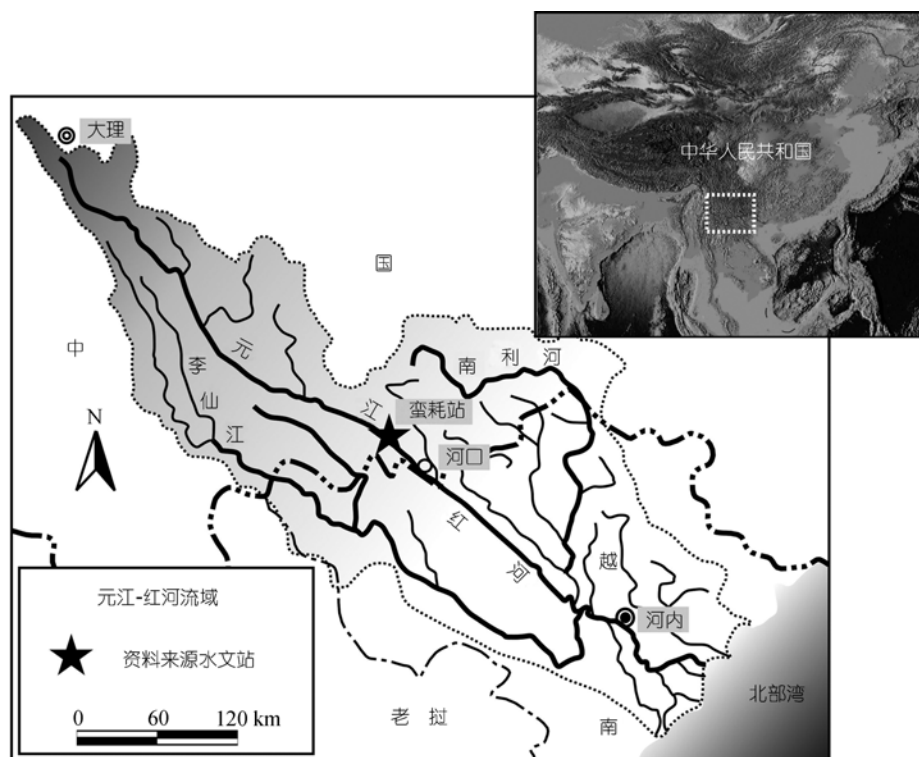


图 1 元江-红河流域及研究区域位置示意图

1) 见 142 页脚注

2) 云南省发展计划委员会, 云南省国土资源厅. 云南省国土资源遥感综合调查报告, 2003 年 6 月, 276—283

数据是平稳的或不含单位根。如果直接在不平稳时间序列间进行回归分析,会产生问题。而且随着样本数的增大,“伪回归”现象不仅不会消失,反而更加严重^[11,12]。所以通行的方法是:在做时间序列变量间线性回归分析前,必须对有关时间序列变量进行平稳性检验。如果某个时间序列是含有一个单位根的不平稳变量,则必须进行第一次差分处理后,才能够用于线性回归。但如果某个时间序列是含有两个以上单位根的不平稳变量,在现有计量技术条件下,无法进行线性回归分析。

传统分析方法,如相关分析法、回归拟合法,并不具有分析时间序列变量间因果关系功能。由于泥沙与流域内气候变化及人类活动的相互关系,隐含着关于时间序列变量间因果关系分析这一逻辑命题,在进行传统的相关回归分析的同时,必须引入其他方法手段,协同解决这一难题。利用格兰吉尔因果关系检验技术分析时间序列变量间的因果关系可以弥补和佐证上述不足^[13]。

分析时间序列间是否存在 granger 因果关系,取决于时间序列是否含有单位根,即时间序列的平稳性。时间序列平稳性检验通常采用 ADF(Augmented Dickey-Fuller)检验技术^[11,14]。

3 河道泥沙变化

蛮耗水文站位于元江下游,距该河出境处河口 97 km,是控制元江-红河出境前最后一个测验项目最

全、施测时间最长的国家水文基本站。蛮耗站(图 2)多年(1959~2000 年)平均泥沙含量为 2.78 kg/m^3 ,输沙量高于 $44.60 \times 10^6 \text{ t/a}$,输沙量主要集中在汛期的 6~11 月,约占年输沙量的 95%^[8]。考察元江蛮耗水文站 1960s 以来实测泥沙数据序列,发现断面年悬移质泥沙含量及其输沙量逐年代递增。1960s~1990s 年泥沙含量与悬移质输沙量分别为 1.87, 2.49, 3.12 和 3.63 kg/m^3 以及 28.7×10^6 , 40.3×10^6 , 44.1×10^6 和 $60.3 \times 10^6 \text{ t/a}$; 5 点平滑曲线显示各年代的泥沙变化趋势,1960s 和 1970s 内泥沙变化较为平稳,1980s 前 5 年亦较为平稳,但后 5 年泥沙变化剧烈,波动极大,1990s 该断面河流挟沙能力很强,泥沙含量与输沙量均很高,但总体呈下降态势。研究时段内河流高挟沙能力期出现在 1980s 后半期与 1990s 前半期(1985~1995 年)。

利用线性回归拟合蛮耗站各年代年泥沙含量与年平均流量关系,结果与上述规律吻合。1960s 和 1970s 流量-泥沙关系拟合直线斜率小,反映泥沙变化不大;1980s 斜率最大,1990s 次之。除了 1980s 回归决定系数为 0.554,表明其拟合程度较高以外,其他时段流量-泥沙关系并不是很密切,总体来说,蛮耗站各时段年均流量与泥沙相关性并不好(图 3)。

4 驱动因素分析

4.1 气候变化

流域气候变化对河道泥沙的影响,主要是通过

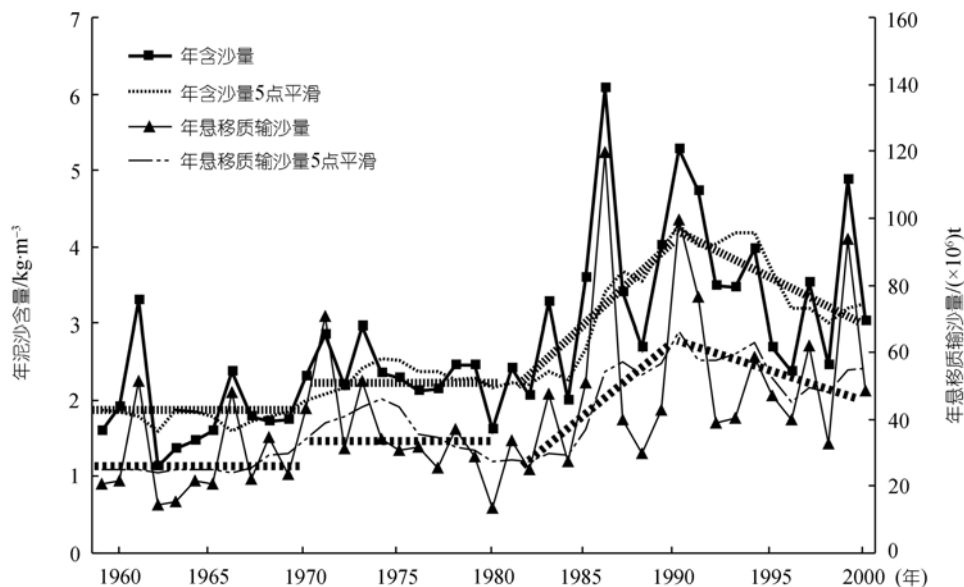


图2 蛮耗水文站 1959~2000 年泥沙含量与输沙量变化趋势

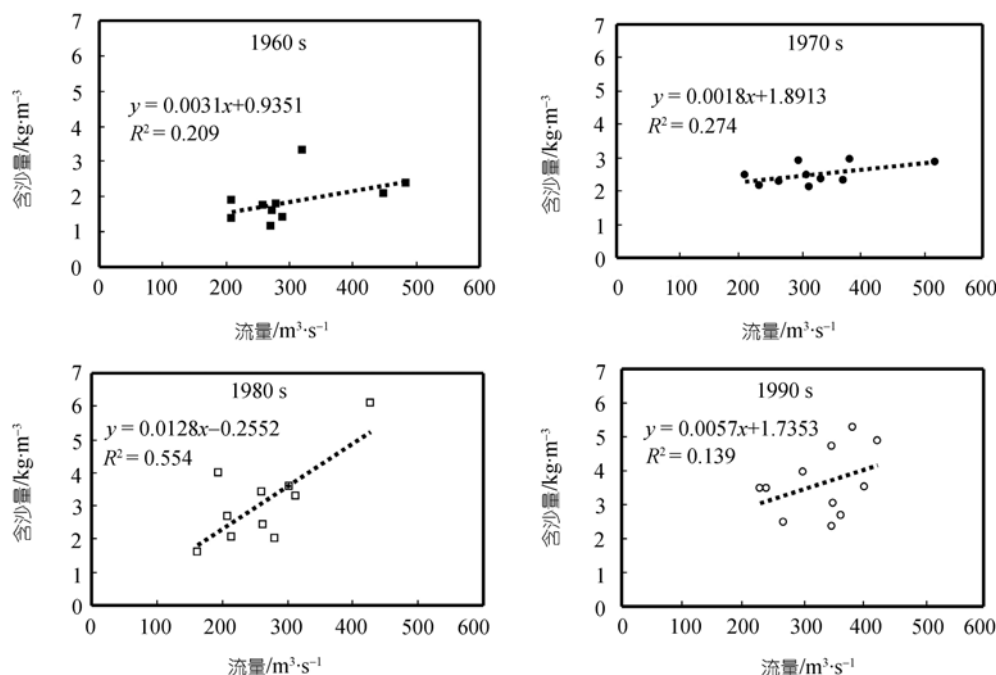


图 3 蛮耗站各年代年泥沙含量与流量关系

降水变化导致流域面上土壤侵蚀产沙, 从而引起河道泥沙的变化^[14,15]. 为了揭示蛮耗站泥沙与其集水区内降水变化关系, 图 4 点绘该站 1960~2000 年逐月实测泥沙含量与集水区平均月降水量对比曲线. 通过对比可以粗略看出, 1960 年以来, 区域降水变化不大, 以 8 年左右的周期波动, 但总体趋势较为平稳; 悬移质泥沙含量具体变化规律上文已述, 研究时段内泥沙总体增加明显. 泥沙与降水变化趋势不一致, 反映出其中叠加了人为因素的驱动作用. 将两个序列同步数据分年代进行相关分析, 分别得到 1960s 至 1990s 两者相关系数分别为 0.808, 0.891, 0.836 和 0.861, 全时段两者相关系数为 0.804, 各时段相关系数均较高, 具有一定的指示意义, 但各相关系数也非常相近, 无法作出哪个时段内气候变化是泥沙变化的主导因素的判断.

因此, Granger 因果检验作为一种对时间序列之间的相互关系判断更为敏感的方法, 被采用于诊断蛮耗站集水区内平均月降水变化是否为河道泥沙变化的原因. 在进行 Granger 因果检验之前, 首先运用 ADF 单根检验方法对各序列进行单根平稳性检验. 其依据是: 当序列的 ADF 统计量大于临界值时, 时

间序列平稳. 经检验, 各时段降水与泥沙序列均平稳 (表 1), 符合 Granger 因果分析条件.

Granger 因果检验的零假设是“变量 1 不是引起变量 2 变化的原因”, 对各时段蛮耗站集水区平均月降水序列与月泥沙含量序列的 10 组变量进行成对 granger 检验, 结果如表 2 所示.

结论是根据当检验概率值是否显著性水平 5% 下的临界值做出. 根据 granger 分析结果, 可以得出如下结论: (1) 1960s 和 1990s 流域降水变化是引起元江河道泥沙含量变化的原因; (2) 1970s 和 1980s 流域降水变化不是引起元江河道泥沙含量变化的原因.

4.2 人类活动

河道泥沙变化能敏感记录流域内的人类活动, 水利工程建设、森林覆盖率变化等人类活动均能导致河道挟沙能力的调整^[13,16,17]. 据有关资料¹⁾, 元江-红河流域目前尚无大型水利工程建成, 干流无水库拦沙, 支流有十多个小型水库建成, 但对河道泥沙变化未能形成太大影响. 故本文以森林覆盖率为人类活动强度变化的反映, 探讨其与河道泥沙变化关系.

森林植被具有截留降雨、减缓径流、保土固土等生态功能, 对控制水土流失起着决定性的作用, 山地

1) 见 142 脚注

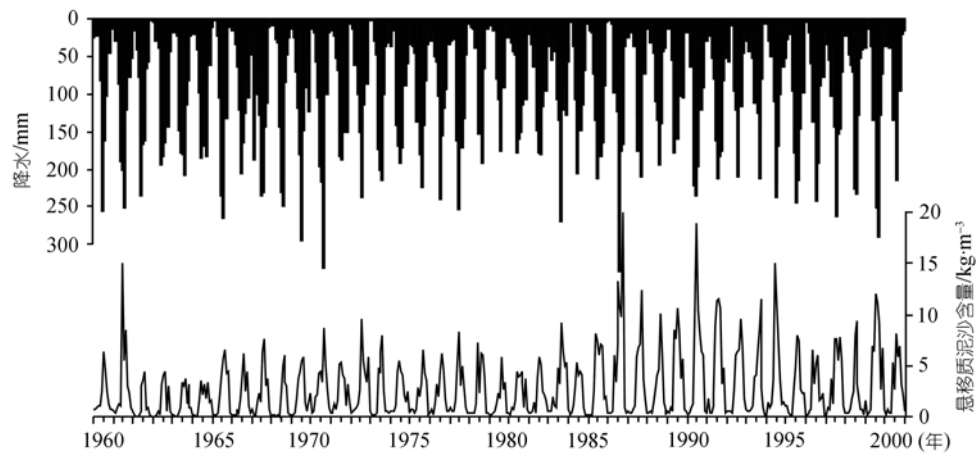


图 4 蛮耗站月泥沙含量与集水区平均月降水变化对比曲线

表 1 蛮耗站各年代月泥沙含量与集水区平均月降水时间序列 ADF 检验(临界值显著水平为 1%)

变量	检验值	临界值	变量	检验值	临界值
1960s 泥沙含量序列	-17.733	-3.488	1960s 降水序列	-0.351	-3.488
1970s 泥沙含量序列	-9.31	-2.887	1970s 降水序列	-3.392	-2.887
1980s 泥沙含量序列	-7.892	-2.580	1980s 降水序列	-2.707	-2.580
1990s 泥沙含量序列	-6.161	-3.482	1990s 降水序列	-3.590	-3.482
全时段泥沙含量序列	-3.825	-3.446	全时段降水序列	-3.825	-3.446

表 2 蛮耗站各年代月泥沙含量与集水区平均月降水变化 Granger 因果检验

时段	假设	F 统计量	概率(%)	结论
1960s	降水变化不是泥沙变化的原因	2.608	1.9	在 5% 的显著水平下拒绝零假设
1970s	降水变化不是泥沙变化的原因	2.269	35.3	在 5% 的显著水平下接受零假设
1980s	降水变化不是泥沙变化的原因	1.689	29.4	在 5% 的显著水平下接受零假设
1990s	降水变化不是泥沙变化的原因	2.670	2.5	在 5% 的显著水平下拒绝零假设
全时段	降水变化不是泥沙变化的原因	3.087	0.5	在 5% 的显著水平下拒绝零假设

植被覆盖率的大小直接影响土壤侵蚀的强弱,进而决定河道泥沙变化^[17].图5显示了元江流域不同时期森林覆盖率和悬移质泥沙含量变化的趋势,可以看出流域森林覆盖率和含沙量呈反比的关系($R = -0.868$).1959 年以来,由于道路网建设和坡地开垦等人类活动的推动,导致流域在 1959~1969 年,1970~1979 年,1980~1989 年时段的森林覆盖率呈现减少趋势,这与泥沙变化趋势是一致的.1960s 经历“大跃进”运动,在农业上“以粮为纲”,工业上“全民大炼钢铁”还有大办公共食堂等思想的指导下,使森林资源遭到严重破坏,但当时的人类活动能力还是相对有限,况且区域环境变化有滞后效应,因此河道泥沙受人类活动影响程度较小,主要受气候变化所致.1990s 虽然是改革开放、社会经济快速发展阶段,但由于政府重视发展过程中的环境保护,实行人工造林、封山育林、天然林保护和退耕还林政策,森林覆

盖率开始缓增,体现在该阶段泥沙含量开始呈下降趋势上,人类活动影响的减小,气候变化的作用便得到凸显(表 2).与西南地区其他流域一样^[18],1970s 与 1980s 也是元江-红河流域发展的混乱时期,经历了“文化大革命”以及之后过热的中越边境贸易,导致流域环境恶化,无序的过度开发直接导致森林覆盖率的减少,面上土壤侵蚀严重,在同等降水强度下,来沙系数增大.

5 结论

()元江蛮耗水文站 1960s 以来,断面年悬移质泥沙含量及其输沙量 1960s~1990s 呈递增趋势,1960s, 1970s, 1980s 和 1990s 年泥沙含量与悬移质输沙量分别为 1.87, 2.49, 3.12 和 3.63 以及 28.7×10^6 , 40.3×10^6 , 44.1×10^6 和 60.3×10^6 t/a; 1960s 和 1970s 泥沙变化较为平稳,1980s 泥沙剧增;1995 年以后,呈现短暂的减少趋势,变化较大,然而总体趋势仍在增加.

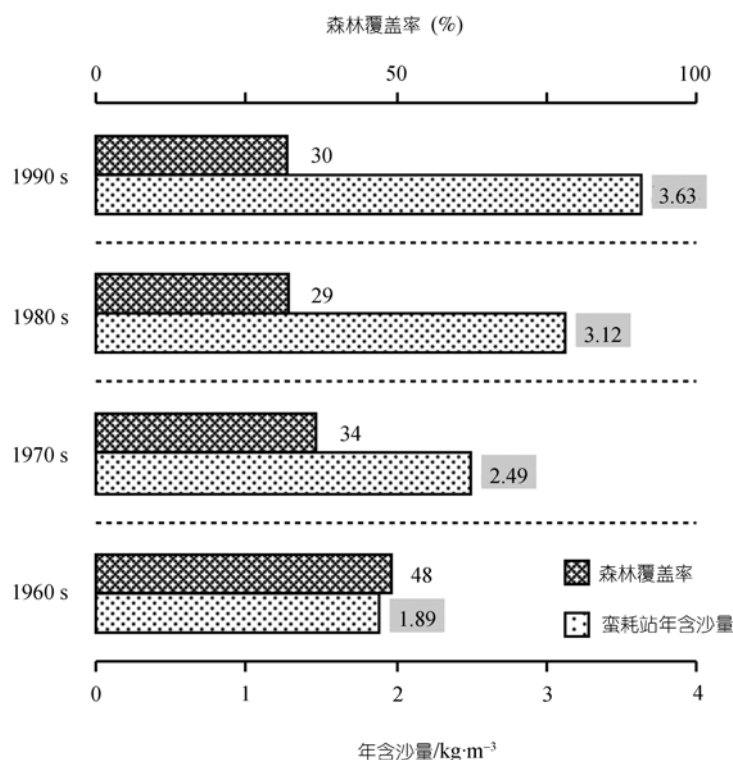


图 5 元江流域不同时期森林覆盖率和悬移质泥沙含量变化趋势对比柱状图

() 相关分析与 Granger 因果检验证明, 1960s 与 1990s 的区域气候变化是河道泥沙变化的主要原因, 而 1970s 与 1980s 流域面上过度的人类活动对河道泥沙变化的解释意义明显于气候变化。

() 1985 年后, 受国家土地政策变化和当地社会经济快速发展影响, 流域的土地快速开发, 导致水土流失加剧, 反映在流域森林覆盖率和含沙量呈明显的反比关系, 从而进一步证实各年代流域泥沙变化对区域气候变化与人类活动的响应程度。

() 1995 年以后, 由于受到新一轮社会经济快速发展和土地利用、环境保护政策的影响, 以及降水增加的作用, 河道泥沙变化的响应更加敏感和复杂。

本次研究的结果, 对流域生态环境的治理工程, 制定流域整体开发与保护规划具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 何大明, 吴绍洪, 彭华, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. 地球科学进展, 2005, 20(3): 338—344
- 刘嘉麒. 红河干流主要水污染物的时空变化规律. 地理学报, 1999, 54(增刊): 146—151
- 谢淑琴. 红河流域水文特性. 水文, 2002, 22(4): 57—63
- 柏绍光. 红河流域洪水特性及统计参数分析. 水文, 2001, 21(4): 32—34
- 罗扬生. 我国西南国际河流暴雨洪水特性. 水文, 2000, 20, (3):

- 59—62
- 刘嘉麒. 元江-红河跨境水质环境问题和保护研究. 云南地理环境研究, 2005, 17(5): 1—5
- 卢培泽. 云南红河流域的水土流失与重点防治. 云南环境科学, 2000, 19(1): 21—23
- Van Maren D S. Water and sediment dynamics in the Red River mouth and adjacent coastal zone. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, Doi:10.1016/j.jseas.2006.03.012
- Van Maren D S, Hoekstra P L. Dispersal of suspended sediments in the turbid and highly stratified Red River plume. Continental Shelf Research, 2005, 25: 503—519
- Van den Bergh G D, Van weering Tj C E, Boels J F, et al. Acoustical facies analysis at the Ba Lat Delta front (Red River Delta, North Vietnam). Journal of Asian Earth Sciences, 2007. 532—544
- 邹高禄, 罗怀良. 澜沧江河道冲淤变化与来沙系数的格兰吉尔因果分析. 地理科学, 2004, 24(6): 698—703
- Fuller W A. Introduction to Statistical Time Series. New York: John Wiley, 1976. 373
- 傅开道, 何大明, 李少娟. 澜沧江干流水电开发的下游泥沙响应. 科学通报, 2006, 51(增刊): 100—105
- 唐克丽, 等编著. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004. 114—158
- 许炯心. 流域降水和人类活动对黄河入海泥沙通量的影响. 海洋学报, 2003, 25(5): 125—135
- 何大明, 冯彦, 甘淑, 等. 澜沧江干流水电开发的水文效应. 科学通报, 2006, 51(增刊): 14—20
- 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展. 生态学报, 2006, 26(9): 3138—3143
- 中国科学院西部地区南水北调综合考察队. 川西滇北地区水文地理. 北京: 科学出版社, 1985, 54—61