

人为活动对金沙江一级支流龙川江流域 输沙量的影响分析

周跃¹, 朱云梅¹, 吕喜玺²

(1 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650093; 2 新加坡国立大学 地理系, 新加坡 117570)

摘要: 用多种方法分析了金沙江一级支流龙川江流域的输沙量时空变化及其受人为干扰的情况. 结果表明, 在流域中游和下游, 尽管龙川江流量在 1970~2001 年期间没有明显上升, 也修建了大量拦蓄了泥沙的水库, 但河流输沙量仍出现了明显的增加. 该增加与当地森林覆盖率变化、耕地面积扩大和道路修建关系密切. 输沙量增加最明显的是位于下游河段的元谋干热河谷. 龙川江流域输沙量的变化对于长江中上游和三峡库区解决河流泥沙问题提出了更高的要求.

关键词: 龙川江流域; 输沙量; 人类活动

中图分类号: X37 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2006)01-0077-06

Human Impacts on River Sediment Flux——A case study of Longchuan River basin

ZHOU Yue¹, ZHU Yun-mei^{1,2}, LU Xi-xi²

(1 Faculty of Environmental Science and Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093 China

2 National University of Singapore, Singapore 117570)

Abstract The sediment flux data measured from a dry-hot valley of the Longchuan River, a tributary of the lower Jinsha River, are analyzed with Mann-Kendall test, Seasonal Mann-Kendall test and Sen's test. In both the upper reaches (Xiaohokou) and the lower reaches (Xiaohuangguayuan), the sediment fluxes show a significant increase from 1970 to 2001, despite the fact that water discharge does not change significantly during the period and numerous reservoirs are constructed to trap sediment. These can be attributed to the intensification of human activities, especially the activities related to land surface disturbances, such as deforestation and afforestation, expansion of agriculture land, and road constructions. This increase is more significant in the lower reaches of the river observed at the place of Xiaohuangguayuan due to the dry-hot climate. The profound increase in sediment flux has significant implication for effective management of the sedimentation problems of the on-going Three Gorges Reservoir.

Key words Longchuan River basin; sediment flux; human activity

0 引言

研究表明^[4], 长江上游河流泥沙量的变化多数是人类活动造成的. 有学者认为^[1~3], 近几十年里上游地区河流泥沙量的增加与当地土地利用转型和各种基础设施建设对地表形态和森林覆盖产生的巨大扰动有关. 还有的学者认为^[5], 水库建设同样引起输沙量的改变, 主要表现在水库能够截获泥沙而减少所在地区河流的对外输沙量. 根据他们分析, 20 世纪 50~80 年代长江上游地区修建的水库库容超过 160 亿 m³,

收稿日期: 2005-05-16 基金项目: 国家 973 项目专题 (项目编号: 2003CB415105-6) 和新加坡国立大学研究基金 (项目编号: R-109-000-034-112).

第一作者简介: 周跃 (1958~), 男, 博士, 教授. 主要研究方向: 水土保持. E-mail: yuezhou@public.km.yn.cn

水库沉积了大量泥沙,虽然整个地区土壤侵蚀日益严重,宜昌水文站测得的泥沙输出量并没有增加^[5]。基于这样的背景,在金沙江一级支流龙川江流域,人类活动强烈,河流泥沙量的变化应该具有相似的特点。

本文以龙川江为例,分析在 1970~2001 年期间金沙江中下游地区河流输沙量的时空变化,探讨本区域地区改变森林覆盖、水库和道路修建等人为活动对这些变化的影响。

1 研究地区概况

龙川江是长江中上游金沙江的一级支流,位于云南省楚雄州境内, ($24^{\circ}45' \sim 26^{\circ}15' N$, $10^{\circ}56' \sim 102^{\circ}02' E$), 流经南华、楚雄、牟定、禄丰、元谋五县市进入金沙江,流域最高海拔 3 000 m,最低 700 m。沿龙川江有两个水文控制站,即小河口水文站(控制面积 1 788 km^2)和小黄瓜园水文站(5 560 km^2)。整个流域属亚热带季风气候,80%以上的降雨和河川径流发生在雨季(5~11月),主要集中在 7、8、9 三个月,年平均降雨量 800~1 000 mm,年平均温度 14~18 $^{\circ}\text{C}$ (表 1)。在元谋河谷盆地,四周群山环抱,气候干热,是我国著名的干热河谷。基岩主要是三叠纪页岩、砂岩和少量的花岗岩、石灰岩和第四纪沉积物。紫色砂岩在当地气候条件下风化较快,形成的紫色土特别容易发生侵蚀,细粒物质流失迅速。

2 研究方法

在龙川江中游的小河口水文站和下游的小黄瓜园水文站获取 1970~2001 年期间每月和极端日输沙量资料,时间跨度 32 年。年输沙量、年最大月输沙量、年最大日输沙量采用 Mann-Kendall 检验分析^[6],考察输沙量的时间序列变化。该方法中的 Kendall 相关系数被大量用于水文资料分析^[7-8]。每月输沙量的变化趋势分析采用考虑季节变化的 Kendall 检验(SKT)方法^[9],其变化趋势(变化率)采用 Sen's 检验方法。在输沙量时间序列分析的基础上比较两个水文站的多年平均输沙量并考察其空间变化。

表 1 龙川江流域部分县市气候情况

Tab 1 Summary of some climate indicators in the Longchaun River basin

地区	年平均温度 / $^{\circ}\text{C}$	年平均雨量 /mm	雨季雨量所占比例 /%	年蒸发量 /mm	干燥指数
南华县	14.9	837.1	89%	1 933.7	2.31
牟定县	15.7	862.2	91%	2 140.3	2.48
楚雄市	15.6	824.6	89%	2 019.4	2.45
元谋县	21.9	619.8	92%	3 823.4	6.17

3 结果分析

3.1 年输沙量变化

图 1 给出了小河口站和小黄瓜园站的年平均输沙量时间序列、5 年滑动平均值、全时段平均值和回归趋势线。小河口站的年输沙量自 1982 年开始波动上升,而小黄瓜园站在 1990 年开始持续增加。两个站的输沙量变化总体趋势呈增加态势

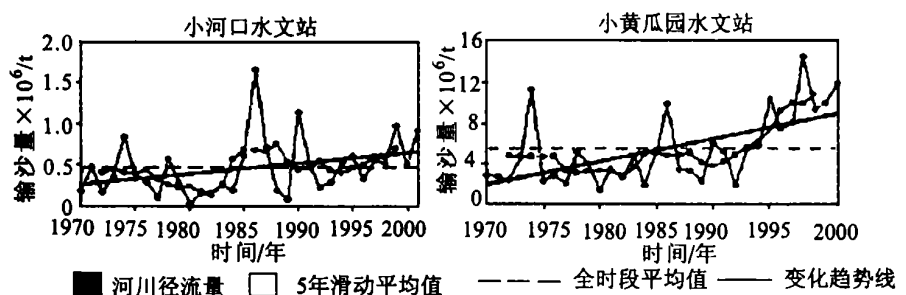


图 1 小河口站和小黄瓜园站两个水文站的年输沙量

Fig.1 Annual sediment discharge at Xiaohekou and Xiaohuangguayuan

(图 1)。两个水文站的全时段年平均输沙量(1970~2001)分别为 47 万 t(相当于 255 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 的泥沙模数)和 550 万 t(947 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 的泥沙模数)。

从输沙率的角度,图 2 给出了 1970~2001 年间小河口站和小黄瓜园站最大月和最大日的输沙率,表

明各自增加的趋势, 其中最大日数值波动幅度较大. Mann-Kendall 检验发现 (表 2), 小河口站年输沙总量、月最大输沙率、每日输沙率三项指标 32 年中都呈上升趋势, 增势显著水平分别为 0.05, 0.05 和 0.1; 小黄瓜园站三项指标同样上升, 显著水平各为 0.01, 0.01 和 0.1. 小河口站和小黄瓜园站相对于输沙量年均值的 Sen's 变化率分别为 2.49% 和 3.95%.

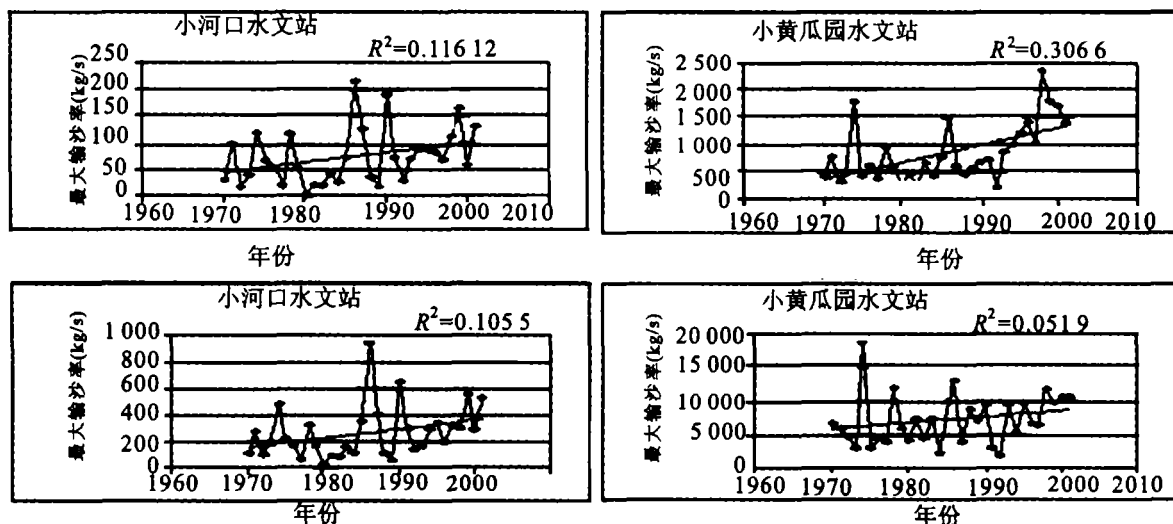


图2 1970~2001年间最大月/最大日输沙率
Fig.2 Maximum monthly/daily sediment fluxes (1970~2001)

表 2 采用检验得到的输沙量变化趋势分析结果

Tab 2 Trend analysis results of sediment flux with Mann-Kendall test

水文站	分析指标	年限	Mann-Kendall 检验统计			变化率	
			Z 值	趋势	α^*	Q 值	Q %
小河口站	年总输沙量 / 百万 t	32	1.99	+	0.05	0.012	2.49
	最大月输沙量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	32	2.04	+	0.05	1.952	2.59
	最大日输沙量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	32	1.95	+	0.1	14.976	2.12
小黄瓜园站	年总输沙量 / 百万 t	32	3.45	+	0.01	0.219	3.95
	最大月输沙量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	32	3.32	+	0.01	31.160	3.69
	最大日输沙量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	32	1.87	+	0.1	139.722	1.95

注: * 表示显著水平.

3.2 输沙量的季节变化

SKT 检验结果表明 (表 3), 两站除 11 月, 32 年中雨季期间的月输沙量都保持增加趋势. 小河口站的输沙量在 9 月明显增加 (显著水平 0.05); 小黄瓜园的输沙量同样保持增势 (7 月, 10 月的显著水平为 0.05, 8 月, 9 月为 0.01). 根据相对于全时段平均值的变化百分比 Q% (表 3), 两个水文站的输沙量在 6~10 月明显上升. 总的来讲, 小黄瓜园站的输沙量增加趋势高于小河口站.

4 讨论

输沙量与径流量高度相关, 但是两者增加速度不同. 图 3 说明 1970~2001 年间年累计径流量与输沙量累计值的变化情况. 很显然, 1980 年后输沙量的增加速度明显高于径流量. 龙川江下游元谋干热河谷由于干热气候和破碎的河谷阶地, 产生了更高的输沙量并带往金沙江. 然而, 两个水文站测得的输沙量低于根据龙川江流域严重的土壤侵蚀情况所预料的水平, 小河口站和小黄瓜园站的年输沙量分别在 $0 \sim 500 \text{ t} / \text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $500 \sim 1000 \text{ t} / \text{km}^2 \cdot \text{a}$ 的范围内. 这两个范围均处于我国输沙量范围的较低水平. 河流输沙量的变化可以从以下方面进行解释.

表 3 季节性 SKT 检验得到的输沙量变化趋势分析
Table 3 Results of sediment flux trend analysis with SKT

水文站	月份	年限	Mann-Kendall 检验统计			变化率	
			Z 值	趋势	α^*	Q 值	Q /%
小河口站	5	32	0.03	+		0.012	0.29
	6	32	1.09	+		0.347	1.14
	7	32	1.54	+		0.706	1.84
	8	32	1.64	+		1.135	2.35
	9	32	2.11	+	0.05	1.088	2.79
	10	32	1.18	+		0.171	1.12
	11	32	-0.62	-		-0.001	-0.02
小黄瓜园站	5	32	0.46	+		0.010	0.06
	6	32	1.51	+		7.993	2.08
	7	32	2.59	+	0.01	16.130	3.06
	8	32	2.5	+	0.05	14.867	2.32
	9	32	2.92	+	0.01	15.341	3.85
	10	32	2.24	+	0.05	3.904	3.19
	11	32	-1.17	-		-0.040	-0.19

注: * 表示显著水平.

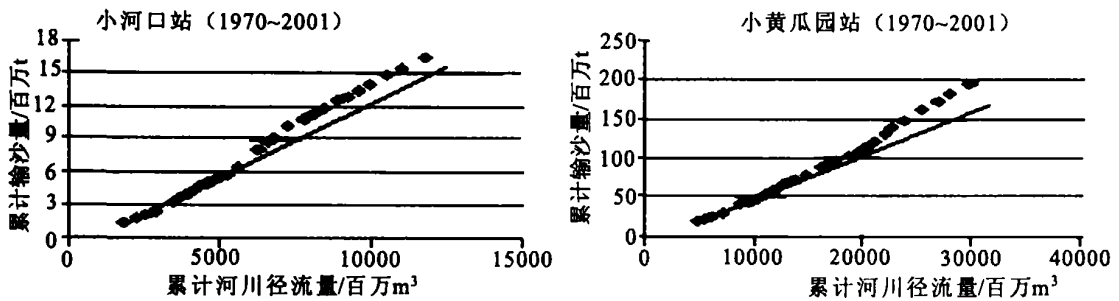


图3 累计河川径流量与输沙量的关系
Fig.3 Relationship between cumulated water discharge and sediment flux

4.1 气候因素

图 4 表明, 1970~ 2001 年间年均温度、年降雨量、年径流量和年输沙量的 Sen's 变化率. 两水文站的年径流量、年输沙量和年降雨量都具有增加的趋势. 从 Sen's 变化率来看, 小河口站、小黄瓜园站的年降雨量增加趋势 (0.84% 和 0.63%) 和年径流量增加趋势 (2.0% 和 1.95%) 明显低于输沙量增加趋势 (2.48% 和 3.94%). 这表明龙川江年降雨量、年径流量与年输沙量的增加不同步, 因而气候变化与对输沙量的影响比较有限.

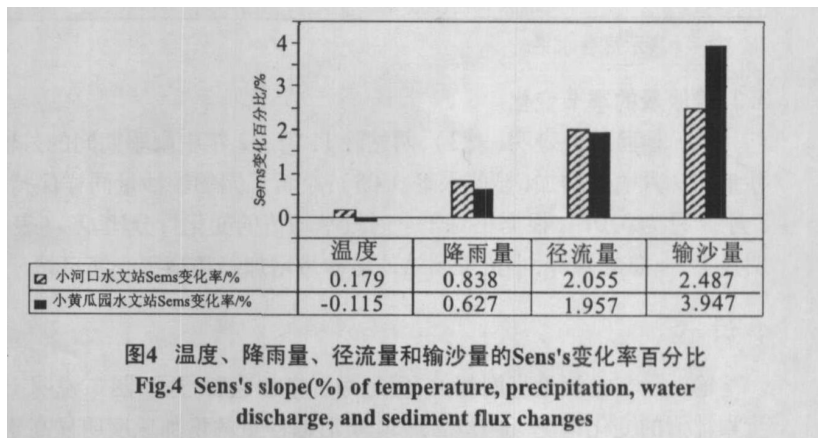


图4 温度、降雨量、径流量和输沙量的 Sen's 变化率百分比
Fig.4 Sen's slope (%) of temperature, precipitation, water discharge, and sediment flux changes

4.2 森林覆盖率变化

龙川江流域的森林覆盖率自上世纪 50 年代以来巨大变化. 由于人口压力和不合理的社会经济决策, 在 50~ 80 年代期间从 55% 下降到 24.1%. 20 世纪 80 年代以后, 为了协调经济发展和环境保护, 当地政府实施了大量生态工程项目, 其中植树造林是一个主要的措施, 因而使森林覆盖率在 1999 年达到 39.5%.

虽然森林覆盖率的增加对径流量、输沙量有一定控制作用, 但是大规模的植树造林在林木生长起来之前也严重干扰了山地坡面的原有状况。造林后地表蒸发量和土壤持水量降低, 可能导致河川径流量的增加^[11]。另外, 原有稀疏灌草植被的破坏连同其他人为活动, 通常使土壤侵蚀状况恶化, 最终导致河流输沙量的增加。

干热河谷是中国西南的一类特殊环境类型, 在长江上游干流和支流都有分布。由于脆弱的自然环境和强烈的人类活动, 多数干热河谷植被破坏、土地退化和土壤侵蚀都非常严重, 成为河流泥沙的主要来源。比如攀枝花和屏山之间的干热河谷产生的泥沙量占整个长江上游泥沙量的 35.9%, 而其年径流量只占长江上游的 8.9%^[10]。元谋干热河谷光热资源丰富, 开发历史长, 植被破坏非常严重, 1999 年海拔 1 350 m 以下的干热河谷区森林覆盖率仅为 0.06%。尽管也开展了植树造林, 但是因为环境脆弱, 植被遭到破坏后很难生长。元谋干热河谷土壤侵蚀十分严重 (国内闻名的元谋土林就是侵蚀的结果), 对龙川江下游明显增加的河流泥沙有巨大贡献。

4.3 工程建设施工

许多诸如修路、开矿或城市建设等工程项目, 都因为其开挖和堆弃土石方、清除植被而不同程度地加速了河谷土壤侵蚀。一旦暴雨来临, 大量的土石被冲刷进入河道, 增加了河流悬沙浓度。另外, 在小河口站和小黄瓜园站之间, 有不少泥石流沟, 侵蚀下来的土石冲到龙川江中。楚雄市在 1952~2003 年中修建的公路从 506 km 增加到 14 081 km。根据楚雄水利局估计, 由此增加了的河流输沙模数 (估计达到 $100 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$), 公路建设成为输沙量增加的主要原因之一。河沙采集是另一个导致输沙量增加的原因。在过去 10 年多的时间, 河底采沙用于房屋、道路施工已经成为当地一个迅速发展的产业, 2003 年在楚雄市以南大约 4 km 的龙川江主河道上就有 6 个采沙点。采沙作业直接把河底泥沙翻腾到河水中, 在水下挖出的大量坑坎在急速的河水中更扬起大量的悬沙。

4.4 水库建设

水库河堤坝的修建可以减少输沙量。龙川江流域自 20 世纪 50 年代以来修建了 14 个中型水库、67 个小(一)型水库、418 个小(二)型水库, 还有 30 060 个坝塘, 总库容大约 3 亿 m^3 。这些水库和堤坝可以截获和拦挡大量的沉积物。表 4 列举了 9 个中型水库的淤积情况。大海波水库于 1959 年修建在小河口站和小黄瓜园站之间的龙川江干流上。根据楚雄水利局估计, 90% 以上经过小河口水文站的泥沙被该水库截获沉积。

表 4 龙川江流域 9 个典型水库的淤积沉积情况

Tab 4 Status of deposition in 9 typical reservoirs built in the Longchuanjinag basin

水库名称	修建时间	水库库容 / $\times 10^6 \text{m}^3$	库容淤积情况	
			淤积量 / $\times 10^6 \text{m}^3$	占据库容比例 / %
毛版桥	1957	19.4	6.8	35.1
九龙甸	1958	63	5.74	9.1
大海波	1958	33	7.8	23.6
庆丰	1969	11.2	8.93	79.7
猛连	1983	10.4	7.5	72.1
丙间	1982	17.8	2	11.2
中屯	1991	11	1.1	10.0
老厂河	1992	15.7	3.83	24.4
西静河	1999	11.2	5	44.6

Lu and Higgitt 观测分析了当地 7 个径流小区、10 个小(二)型水库的侵蚀和输沙情况^[11], 并与两个水文站的资料对比发现, 径流小区侵蚀模数、水库输沙模数分别达到 $19 700 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $3 536.7 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 而河流输沙模数只有 $601 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 远远低于前两者, 表明这些水库阻止了泥沙进入河流。但是尽管这样, 与长江上游其他重要支流的情况不同^[12], 这些水库的建设并没有改变河流泥沙量增加的趋势。

5 结论

在 1971~2001 年的雨季,龙川江的河流输沙量间明显而持续增加,特别以下游地区最为突出.虽然始建于 20 世纪 50 年代的众多水库截获沉积了大量泥沙,河流输沙量的增加趋势仍然十分明显.其主要原因之一是人类对地表状况的影响,比如改变森林覆盖率、扩大耕地、道路和城镇建设等.人类活动导致的水文过程变化对龙川江流域乃至长江中上游的水土保持规划具有重要意义.影响输沙量变化的因素还很多,比如气候和土地利用形式变迁等,需要更多研究加以探讨,进一步分析这些因素对输沙量变化影响方式和程度.

参考文献:

- [1] CALDER I R. Hydrologic effects of land-use change. In Handbook of Hydrology (ed. by D. R. Maidment) [M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [2] VANACKER V, GOVERS G, BARROS S, et al. The effect of short-term socio-economic and demographic change on landscape dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment. *Ecuador [J]*. *Landscape Ecology*, 2003, 18(1): 1~15.
- [3] CHEN G W. Forest hydrological effects in the upper Yangtze River valley [J]. *Ambio*, 1999, 28: 456~459.
- [4] LU X X, ASHMORE P, WANG J F. Seasonal water discharge and sediment load changes in the Upper Yangtze, China [J]. *Mountain Research and Development*, 2003, 23(1): 56~64.
- [5] DAID Z, TAN Y. Soil erosion and sediment yield in the Upper Yangtze River Basin. In: *Erosion and sediment yield: global and regional perspectives* (ed. by D. E. Walling & B. W. Webb) (Proc. of the Exeter Symposium, 1996), 236: 191~203.
- [6] MANN H B. Nonparametric test against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245~259.
- [7] XIONG L H, GUO S L. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station [J]. *Hydrological Science Journal*, 2004, 49: 99~112.
- [8] YU E S, PILON P. A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection [J]. *Hydrological Science Journal*, 2004, 49: 21~37.
- [9] HELSEL D R, HIRSCH R M. *Statistical methods in water resources* [M]. Amsterdam: Elsevier Publishers, 1992.
- [10] JI Z, et al. The Model of the Plantation Restoration and Ecological Agriculture in the Fragile Ecological Environment in Arid Hot Valley of Jin Sha River [J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2003, 17(5): 9~22.
- [11] LU X X, HIGGITT D L. Sediment delivery to the Three Gorges: local response [J]. *Geomorphology*, 2001, 41: 157~169.
- [12] LU X X, HIGGITT D L. Recent changes of sediment yield in the Upper Yangtze, China [J]. *Environmental Management*, 1998, 22: 697~709.