

长江上游侵蚀产沙格局及其控制因素

杜俊^{1,2}, 师长兴^{*}, 周园园^{1,2}

(1. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100149)

摘要: 基于长江上游 110 个相互独立的子流域控制性水文站 1956~1987 年的输沙模数, 结合 GIS 空间分析技术, 对长江上游侵蚀产沙空间分布特征进行研究, 并从土壤、地形、降雨、土地利用和岩性等方面分区探讨了侵蚀产沙区域分异的原因。结果表明: (1) 上世纪 50 年代至 80 年代, 长江上游侵蚀产沙的空间变化主要受自然环境控制, 人为活动的影响是次要的。降雨是侵蚀产沙的主控因子, 土壤特性与地形条件也有重要影响。(2) 降雨和土壤特性对各地区产沙分异的影响最为普遍; 地形在地势起伏不大的地区, 表现更为突出; 岩性在重点产沙区具有显著影响。总体上自然因子对西部人口分布较少的地区解释力较高, 对东部人口密度较大的地区解释力较低。

关键词: 长江上游; 侵蚀产沙; 影响因素; 区域分异

中图分类号: P512.2 S157

文献标识码: A

长江上游是长江泥沙的主要来源。近年来随着三峡水库的蓄水拦沙, 宜昌站泥沙通量锐减, 然而仅靠水库拦沙并不能从根本上解决泥沙问题, 找到重点产沙区及影响产沙区域分异的原因, 从源头上遏制泥沙的产生, 才能长远有效的控制河流泥沙, 减轻洪涝灾害, 延长沿线水利工程使用寿命, 维护好整个流域健康稳定的生态环境。

关于长江上游侵蚀产沙, 过去已有大量研究, 其中探讨了地形、降水、人口密度对该区侵蚀产沙的影响^[1-2], 从岩性、地势、气候、工程建设等方面解析了金沙江、嘉陵江 1956~1996 年泥沙通量的变化^[3], 分析了近期长江上游主要干支流输沙量及粒径变化与降水、植被、土地利用和水库建设的关系^[4-8]。主要结论认为: 金沙江下游和嘉陵江上游是长江上游的重点产沙区, 降水、地质地貌条件与人类活动是该区产沙的主要控制因素, 人类活动特别是水库建设是近期河流输沙锐减的主要原因。

已有研究对长江上游产沙分布与影响因素取得

一定深度的认识, 但研究的范围、视角多着眼于主要干支流把口站点的水沙关系, 注重“线”上的时间序列研究, 而从“面”上探讨产沙格局及其成因的研究较少, 对原因的定量分析也显不足。研究区域的产沙格局, 从空间上把握输沙模数变化, 有利于直观地了解区域产沙地带性分布特征, 因地制宜地开展各项水土保持和大江大河治理工作。本文尝试应用长江上游各水文站点输沙资料, 结合 GIS 空间分析工具, 从区域的角度确立产沙分布格局。同时, 将降水、岩性、土壤、地形、土地利用等影响要素引入产沙变化分析之中, 定量探讨不同地区侵蚀产沙空间差异的控制性因子, 以为流域管理提供科学的宏观决策依据。

1 研究区概况及研究思路

长江上游系指宜昌以上流域范围, 流域面积 $100.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 干流全长 4 511 km。该区地跨我

收稿日期 (Received date): 2010-03-15; 改回日期 (Accepted): 2010-07-30.

基金项目 (Foundation item): 水利部公益性行业科研专项 (编号: 2007SHZ0901034)。[Supported by Chinese Ministry of Water Resources (No. 2007SHZ0901034).]

作者简介 (Biography): 杜俊 (1983-), 男, 安徽人, 在读博士, 研究方向: 长江上游泥沙迁移。[Du Jun (1983-), male, was born in Anhui, doctoral candidate, major in sediment transport of the Upper Yangtze River.]

* 通讯作者 (Corresponding author): 师长兴 [Shi Changxing], E-mail: shixc@igsnrr.ac.cn

国第一、二级阶梯,地质地貌类型复杂多样,高差悬殊。西部以高原高山为主,中部中山低山广布,东部为丘陵平原区。不同地质地貌类型区的岩性、植被、成土类型、气候条件、河谷形态、河道比降、人类活动强度不同,侵蚀类型各异,造成的产沙程度也不尽相同。因而本文在研究中将长江上游依地质地貌类型分为长江源区、横断山区、盆周山区、云贵喀斯特地貌区以及川中丘陵区五个类型区分别探讨,具体的分区边界根据《长江流域地图集》的“综合工程地质”图修改得到。成都平原和三峡库区(黄陵背斜段)未予考虑,前者是因为地势低平、城市化水平很高,产沙很少且人为影响太大;后者是因为产沙样点较少且分布不均,得到的结果可靠性不能保证。

影响侵蚀产沙的主要因素包括地区降水、下垫面条件以及人类活动等,这些因素大多也是通用土壤流失方程(RUSLE)所考虑的内容,本文应用该方程所考虑的降雨侵蚀力(R)、土壤可蚀性(K)、坡度坡长(LS)、植被覆盖与管理(C)、水土保持措施(P)五类因子,同时选取反映成土母岩易蚀性的岩性因子(R_o),与各类型区输沙模数建立回归模型,定量分析六类因子对地区产沙分异的影响。

2 数据与方法

2.1 侵蚀产沙格局的输出

研究侵蚀产沙格局,需要明确特定区域的产沙模数(specific sediment yield, SSY)。在一个流域系统中,通常有两种方法获得局域侵蚀产沙量,一种是将本站输沙量减去上站输沙量,再除以本站增加的控制面积^[9],另一种是直接提取各个互相独立的子流域输沙模数。前者在沿程沉积较多的区段,特别是在下游容易产生负值。本文采用后一方法。基础输入数据方面,收集了长江上游 1956~1987 年 270 个水文站悬移质泥沙输沙模数及经纬度数据作为本底资料(图 1),从中提取 110 个相互独立的子流域水文站输沙模数信息(其中金沙江流域 30 站,嘉陵江流域 27 站,岷江流域 20 站,乌江流域 10 站,沱江流域 6 站,其他流域 17 站),并在 GIS 平台下将其定位于相应流域的几何中心,¹⁾最后通过插值完成输沙模数空间分布栅格图的输出。

常用的空间插值方法有 DW (Inverse Distance Weighted)和 Kriging 法(这里指 Ordinary Kriging 下

同),两者均是依照“距离越近的事物越相近”这一基本法则,通过设置已知点对未知点的影响权重来估算未知点的数值,所不同的是 IDW 法在设置权重时只考虑各未知点与已知点之间的空间距离,而 Kriging 法还考虑了样本总体的空间分布,因而一般更适合空间特征的表现。作图比较和交叉检验后发现, Kriging 法生成的图像较 IDW 法的平均误差(mean prediction errors)更小,但削弱了部分较大值样本的影响,生成图像极值范围与原样本有较大差异,而 IDW 法则不存在这一问题。两种方法生成的图像在产沙宏观格局上都有较好的表现。在总体情况描述时,样本极值的准确性更为重要,因此本文在描述长江上游产沙格局时使用 IDW 法生成的图像;而在控制性因子分析时,文章对 IDW 法及 Kriging 法生成的图像都进行了回归分析处理,两者定性定量上的结果差异很小,只是 Kriging 法获得的结果决定系数 R^2 普遍较高,因此本文给出的是 Kriging 法生成的产沙模数与自变量各因子回归得到的结果。

2.2 侵蚀产沙控制(RUSLE)因子计算

RUSLE 作为经典的土壤侵蚀预报模型,国内已有大量报道。需要说明的是,虽然该模型最初开发只是用于面蚀预报,且对陡坡预报不力,但其所考虑的因子涵盖了土壤侵蚀发生的基本要素,相关公式经改进后仍可用于土壤侵蚀评价分析^[10-12],在更有针对性的算式开发应用之前, RUSLE 仍是目前最为简洁有效的侵蚀产沙分析工具之一。这里借用 RUSLE 的控制参数来分析长江上游各控制因子对侵蚀产沙的影响。

RUSLE 中的因子包括 R 、 K 、 LS 、 C 和 P 值,其中 R 是降雨侵蚀力因子, K 是土壤可蚀性因子, LS 是坡长和坡度因子, C 和 P 是植被覆盖与管理因子。本文作者曾对各因子的计算方法和所依据的数据在文献^[7]中做过详细介绍,这里不再赘述。

2.3 岩性因子(R_o)的输出

岩性控制着土壤侵蚀的空间分布和发展程度^[13],对长江上游的侵蚀产沙具有重要影响。由于目前国内对岩性与土壤侵蚀关系的研究很少,且多停留在定性描述,本文采用专家打分法对长江上游分布的主要成土母岩易蚀性进行赋值。打分时先确定岩性,然后确定结构产状,再依表 1 打出分数,最后在 GIS 中完成栅格化。

将得到的各因子栅格数据与之前的输沙模数栅

1) 数据来源:气象数据由国家气象信息中心气象资料室提供;土地利用和土壤类型数据由中科院资源环境数据中心提供。

格数据对应坐标关系一并提取,取对数转为线性关系后导入 SPSS,以各因子作为自变量,各类型区输沙模数作为因变量,构建多元线性回归模型,即可得到各因子对不同地貌类型区输沙模数的回归关系。由于考虑的因子较多,为消除各自变量间相互作用对因变量的影响,同时更准确的考察各因子的影响程度,选择逐步回归方法进行回归分析。另外,本文采用的是栅格数据进行回归,数据量很大,在不影响结果的情况下,为方便计算,将回归分析使用的输沙模数及各 RU SLE 因子栅格数据分辨率均重采样为 2 000 m(原栅格图分辨率为 100 m)。

3 结果分析与讨论

3.1 长江上游侵蚀产沙格局

从长江上游侵蚀产沙的空间分布(图 2)中可以看到,本区侵蚀产沙格局总体可以概括为“四片一带”。产沙较多的地区主要分布在流域的西南和东北,以及连结这两个部分的中间地带。其中西南部金沙江下游的产沙更为突出,输沙模数在 $570 \sim 2\,700 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 间;东北秦巴山地嘉陵江中上游部分输沙模数 $500 \sim 1\,600 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 间,这两个区域之间是龙门山、邛崃山等山脉组成的陇南川滇山地产沙高值带,与前两个地区相比,产沙模数相对较小,在 $400 \sim 1\,300 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 间。西北部长江源区是整个流域的少沙区,输沙模数在 $1.5 \sim 420 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 间。而东南部四川盆地丘陵区和喀斯特地区的输沙模数也较小,在 $210 \sim 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 间。全流域平均输沙模数为 $453 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,与一般报道的 $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 接近。总体上长江上游的产沙格

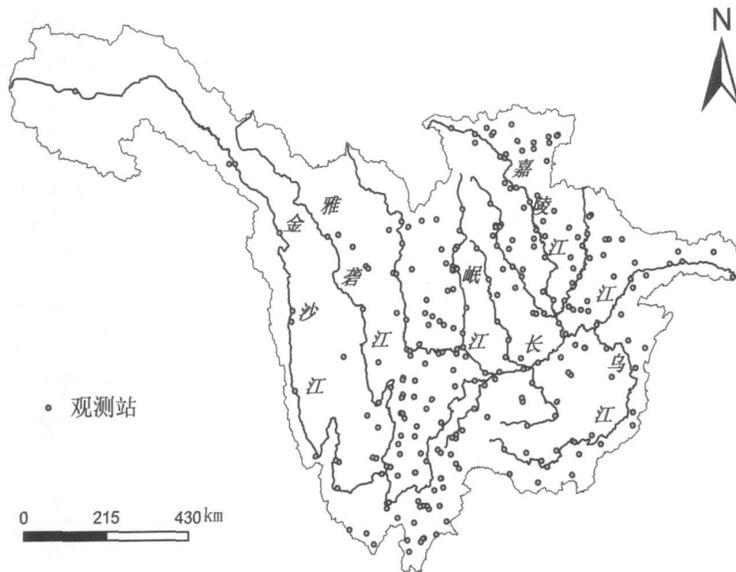


图 1 长江上游流域图及资料来源站点

Fig 1 The hydrological stations with sediment load records in the upper Yangtze River

表 1 长江上游成土母岩可蚀性赋值表

Table 1 The erodibility assignment of pedogenic rocks in the upper Yangtze River

母岩完整性	第四纪 松散堆积	第三纪 沉积岩	中生代 沉积岩	古生代 沉积岩	中、古生代 浅变质岩	元古代 变质岩	岩浆岩	碳酸盐岩
非常强烈破碎	—	12	11	10	9	8	7	7
强烈破碎	—	11	10	9	8	7	6	6
较强烈破碎	—	10	9	8	7	6	5	5
中等破碎	—	9	8	7	6	5	4	4
产状倾斜较完整	—	8	7	6	5	4	3	3
产状水平较完整	—	6	5	4	3	2	1	1
完整	15	—	—	—	—	—	0.5	0.5

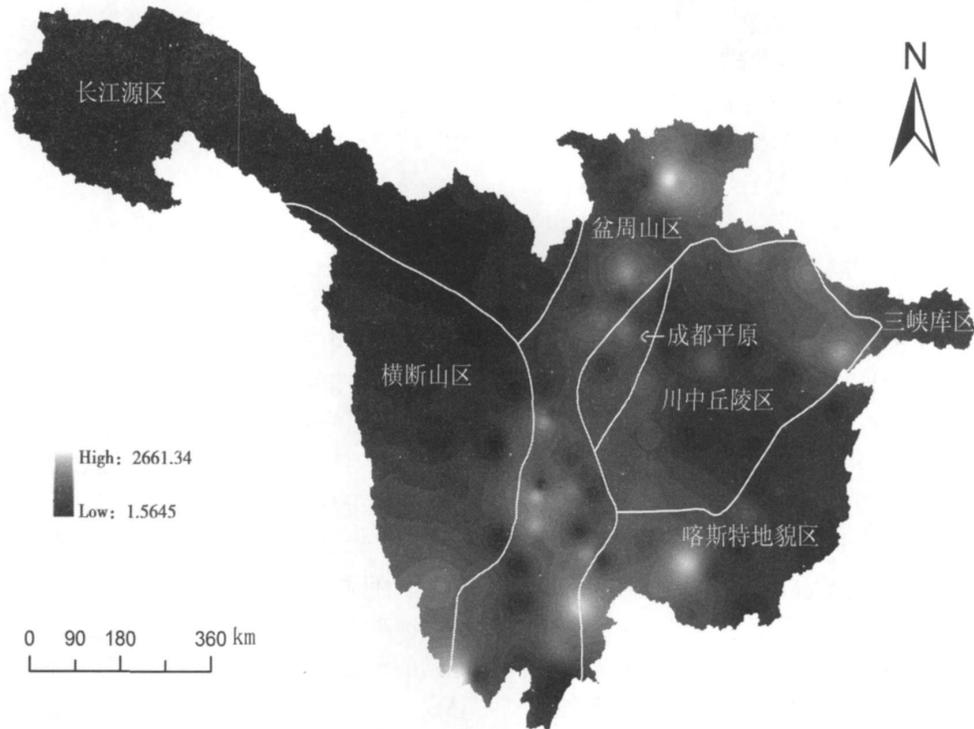


图 2 长江上游侵蚀产沙分布格局 (单位: $t/(km^2 \cdot a)$)

Fig 2 The spatial pattern of sediment yield in the Upper Yangtze River (unit $t/(km^2 \cdot a)$)

局基本与传统观点一致, 即嘉陵江上游和金沙江下游等重点产沙区也是图中输沙模数较大的地区, 图像直观地刻画了长江上游侵蚀产沙分布状况。

3.2 控制性因子分析与讨论

从机理上讲, 气候、植被、土壤、地形、岩性以及人类活动都会对侵蚀产沙过程产生影响, 但在不同的地区, 各因素影响程度与作用机制可能会因为地区自然环境条件的差异而发生变化。人们对侵蚀产沙的一般影响要素已经有了较多的认识, 但在实践中, 面对不同自然环境地区的具体情况, 仍然需要从纷繁复杂的影响要素中找到控制性因子以及主控因子, 才能为地区的水土资源管理提供实践依据。

表 2 为 RUSLE 各组成因子及 R_o 对长江上游各类型区及全上游侵蚀产沙的逐步回归结果, ANOVA 显示各回归方程均通过了 0.01 水平显著性检验。表中显示的是回归系数通过回归模型检验的因子, 表明这些因子对相应地区侵蚀产沙有统计学意义上的显著影响; R^2 为决定系数, 表示相应因子对回归模型的解释力, 有多个影响因子的地区, 后继因子对应的 R^2 为该因子与之前因子的累计值。标准化回归系数表示自变量变化一个单位, 因变量对应变化的单位数, 反映相关因子对侵蚀产沙的影响程度。

3.2.1 全域控制性因子分析

降水是侵蚀过程发生的重要地貌外营力。在表 3 中, 降雨侵蚀力在长江上游五个类型区中占据了 2 个第一和 2 个第二控制性因子, 并且在全上游分析中以绝对优势排名第一, 成为地区侵蚀产沙的主控因子, 这显然与长江上游以水力侵蚀为主有关。下垫面因子中, 植被与水土保持活动对区域产沙分异的解释力较弱, 植被覆盖与管理因子 (C) 仅在盆周山区取得第二控制性因子, 而水土保持因子 (P) 未通过任何地区的模型检验, 这一结果与文献^[8]的观点较为一致, 即在长江上游近期, 与土地利用相关的植被覆盖变化与水土保持活动, 对土壤流失量的影响可能很小。这一方面是因为长江上游大规模水土保持工程都在 1980 年代末逐步实施, 生态效益的产生还需要一段时间; 另一方面的原因可能是这一时期水力水电工程建设进程较慢。截至到 1980 年代末, 长江上游全流域水库库容仅 $205 \times 10^8 m^3$, 不到三峡水库库容的 53%, 尚不足以改变整个流域的产沙格局。其他下垫面因子中, 地形与土壤的影响较为突出。地形因子 (LS) 在部分类型区中的影响较大, 但对总体侵蚀产沙解释度不高; 土壤可蚀性 (K) 对各类型区影响较为普遍, 在全域分析时其回归系数远高于

LS , 是长江上游仅次于降雨的第二位控制性因子。

综上所述, 在长江上游, 降雨侵蚀力 (R)、土壤可蚀性 (K) 和地形 (LS) 三类因子累积可解释因变量 70.4% 的变化, 表明 20 世纪 50~80 年代, 长江上游侵蚀产沙的空间变化主要受自然环境控制, 人为活动的影响是次要的。在自然环境条件中, 降水作为水力侵蚀的源动力, 是地区产沙的主控因子; 土壤与地形是泥沙输移直接作用的下垫面环境, 对流域产沙也具有重要影响。其他下垫面因子如植被覆盖、水土保持和岩性虽然在机理上也是影响要素, 但未能通过全域尺度上的模型检验, 因而不是上游产沙的控制性因子。

3.2.2 局域控制性因子分析

1. 长江源区

长江源区地处青藏高原, 属典型的大陆高寒气候, 气温低、年较差大, 降水少, 人类活动强度很小, 植被以中低覆盖草地为主, 生命活动对土壤流失影响不大, 主要的侵蚀类型是水力侵蚀与冻融侵蚀, 但是侵蚀产沙第一控制性因子却是地形, 超过了降水和土壤的影响 (表 3), 可能是因为本地区以高平原地貌为主, 地势相对平缓, 地形成为泥沙输移的瓶颈, 进而影响到产沙的空间分布。

2. 川中丘陵区

川中丘陵区地处四川盆地, 地势相对平缓, 雨量

充沛, 垦殖历史悠久, 人口密度常年保持在 600 人 / km^2 的水平, 是长江上游人口最为密集的地区之一。过高的人口压力使得这一地区人地关系十分紧张, 森林植被破坏严重, 大量的坡耕地被垦殖开发, 加上该区易于侵蚀的紫色土广布, 降雨集中, 土壤侵蚀严重。同时, 该区所处的嘉陵江流域也是水利水电开发较早的地区, 据资料统计, 截至 1980 年代末, 嘉陵江流域水库库容占当时全上游的 27.4%, 这还不包括许多次级小流域广泛分布的塘、库、堰、池。正是由于这些因素的影响, 本区的总体产沙量并不大。

从回归分析的结果来看, 川中丘陵区模型的决定系数 R^2 只有 0.292 处于全上游较低的水平, 表明自然因子对这一地区产沙的解释力偏弱。地形 (LS)、降水 (R) 和岩性 (Ro) 成为该区影响侵蚀产沙的控制性因子, 其中地形和降水回归系数较大, 是该区侵蚀产沙主要的影响因子。而反映人类水土保持活动的水土保持因子 (P) 对侵蚀产沙的影响则没有体现。这一方面是因为本文计算 P 值时未考虑水库修建以及梯田等水保措施的效果, 也与 1980 年代大规模水土保持工程尚未开展有关。另外, 本区侵蚀类型以面蚀为主, 但降水和紫色土的特性并未起到决定作用, 也从侧面反映出人类活动强烈地改变了流域泥沙释放-存储自然格局, 削弱了地貌外营力对地区产沙的影响。

表 2 长江上游各自然因子与侵蚀产沙逐步线性回归结果

Table 2 The result of stepwise linear regression of different impact factors in the upper Yangtze River

类型区	因子	R^2	标准化回归系数	P 值	数据组数
长江源区	LS	0.308	0.380	.000	56 092
	R	0.388	0.327	.000	
	K	0.398	0.106	.000	
盆周山区	K	0.139	0.357	.000	54 653
	C	0.156	0.119	.000	
	Ro	0.167	0.107	.000	
喀斯特地貌区	R	0.378	0.581	.000	31 354
	K	0.401	-0.154	.000	
川中丘陵区	LS	0.160	0.381	.000	41 743
	R	0.263	0.325	.000	
	Ro	0.292	0.172	.000	
横断山区	R	0.783	1.003	.000	47774
	Ro	0.841	0.276	.000	
	K	0.850	0.124	.000	
长江上游	R	0.630	0.591	.000	240 870
	K	0.690	0.338	.000	
	LS	0.704	0.123	.000	

川中丘陵区大部为浅丘地貌,地势起伏在长江上游属相对平缓地区,但是和长江源区相似,地形因子(LS)却是影响最大的自然因子。对比以山高坡陡著称的横断山区、盆周山区发现,这些地势起伏较大,以中高山地为主的类型区,地形并不是影响侵蚀产沙的控制性因子。似乎越是地势起伏不大的地区,地形对侵蚀产沙的影响越大。出现这种结果可能是因为,长江上游很多高山峡谷地区通常也是泥石流、崩塌、滑坡等重力侵蚀高发区,这类地区侵蚀下来的物质较以面蚀为主的地区颗粒要大得多,水流难以搬运,大部分堆积于沟谷,造成流域泥沙输移比偏低,影响这部分侵蚀物归槽的主要因素是水力情况,地形条件并不是系统的瓶颈,因而在回归分析中的地位就下降了。事实上有研究表明,长江上游高山峡谷地区大部分粗颗粒泥沙均沉积在沟谷和支流中^[14]。

3. 盆周山区

盆周山区气候与下垫面条件都十分复杂,区域差异很大,其回归模型决定系数也是所有模型中最低的,仅为 0.167,说明自变量只能解释因变量 16.7% 的变化,但土壤可蚀性(K),植被覆盖(C)以及岩性因子(R_o)通过了模型检验,表明这些因子仍对地区产沙有显著性影响。盆周山区南部主要是金沙江下游,北部是嘉陵江上游,都是长江上游的重点产沙区。

为进一步研究重点产沙区的控制因子,将盆周山区分为上、中、下三段(图 3),分别对应嘉陵江上游(这里指亭子口以上),岷江部分流域和金沙江下游地区(龙街渡口以下),仍以 RUSLE 各组成因子与 R_o 为自变量,相应地区输沙模数为因变量进行逐步线性回归,发现岩性和植被条件对两重点产沙区的影响较大(见表 3),其中岩性在两区均为第一控制性因子,显示了其对当地侵蚀产沙绝对的影响力。其他影响因子方面两地区各有不同,除了各种下垫面因子,上段受降水的影响较为突出;而下段进入模型的均为下垫面因子。出现这种差异的原因,可能与两地不同的气候地质条件有关:嘉陵江上游不仅植被稀少和分布着极易侵蚀的黄绵土,而且降水相对丰沛和集中,极易促成白龙江中游的泥石流和西汉水黄土区的水土流失,因而降水在模型中的贡献较大;金沙江下游侵蚀产沙主要发生在干热河谷地区,该区地势起伏较大,气候干热少雨,地表植被条件很差,裸露岩层主要为变质岩,岩性脆弱,加

上构造运动强烈,较少的雨量和雨强即可诱发滑坡、泥石流等山地灾害,因而降雨对产沙的影响不显著。

表 3 盆周山区分段线性回归结果

Table 3 Results of linear regression for the three sections of the mountains round the Sichuan basin

类型区	因子	标准化回归系数	P 值	R^2
上段	R_o	0.567	.000	0.367
	R	0.516	.000	
	C	0.148	.000	
	K	0.145	.000	
中段	R	0.503	.000	0.311
	K	0.112	.000	
下段	R_o	0.540	.000	0.349
	C	0.133	.000	
	LS	0.130	.000	



图 3 盆周山区分段

Fig. 3 Three sections of the mountains round the Sichuan basin

中段与四川盆地接壤区主要为断裂褶皱,上升作用形成的中低山,山体破碎,但由于出露岩层主要为千枚岩和片岩,形成的土壤腐殖质较厚,土壤可蚀性较小^[15],加上岷江中上游植被覆盖较好,所以尽管本地区的降雨侵蚀力在长江上游最高,但产沙量相对较小。降水和土壤可蚀性是该区侵蚀产沙主要的影响因子。

4. 喀斯特地貌区

喀斯特地貌区对应碳酸盐分布区。这一地区化学侵蚀强烈,成土速率缓慢,土层浅薄,石漠化现象严重。作为物理、化学侵蚀发生的源动力,降水是本

区侵蚀产沙的主控因子;土壤可蚀性(K)是第二控制性因子,也是所有模型唯一回归系数为负的因子,主要原因可能是碳酸盐岩形成的石灰质土虽然通常有机质含量较高,结构、透水性能良好,抗蚀性强,但是这些地区由于土层浅薄、山高坡陡,植被覆盖率低,也是水土流失严重的地区^[16]。

5. 横断山区

横断山区回归模型决定系数高达 0.85 即可解释因变量 85% 的变化,是所有模型中解释力最高的。降雨侵蚀力(R)回归系数达 1.003 是这一地区侵蚀产沙的主控因子,岩性和土壤因子分列其后。横断山区是金沙江流经的主要地区,产沙格局是南高北低。该区南北高程跨度极大,气候、地理环境差异显著,南部河谷地区气候干热、构造活跃、岩性脆弱,土壤以易于侵蚀的红壤、燥红土为主,而且雨量集中分布于断裂发育、岩层破碎区域,物理风化和流水侵蚀强烈,产沙量大;而北方高山高原区降雨各季分布相对平均,侵蚀力有限,加上岩层破碎度低,植被覆盖良好,侵蚀物主要来自少量的寒冻风化物 and 谷坡滑坡、崩塌^[17],产沙较少。

总体而言,由于气候与地理环境条件的差异,各类型区侵蚀产沙控制性因子不尽相同,在全域分析中表现不突出的岩性、植被因子开始发挥作用。各因子中,降雨在大部分地区都是极其重要的控制性因子;地形在地势起伏不大的地区,表现更为突出;岩性在重点产沙区具有显著性影响。从各类型区模型的决定系数来看,除较为复杂的盆周山地外,自然因子对西部人口分布较少的地区解释力较高,对东部人口密度较大的地区解释力较低。由于一些原因,本文赋值法得到的水土保持因子(P)并不能很好的解释人类活动对东部类型区的影响,在后继工作中还需要考虑更多的方面加以分析。

4 结 论

本文基于长江上游 110 个独立流域水文站输沙模数,结合 GIS 空间分析技术,对长江上游侵蚀产沙空间分布特征进行研究,并从土壤、地形、降雨、土地利用和岩性等方面分区探讨了侵蚀产沙区域分异的原因,得到了一些以往采用时间序列分析时难以量化的结果。

1. 1956~1987 年长江上游 110 个独立子流域的输沙模数分析结果表明,西南部金沙江下游与东

北嘉陵江上游一带是长江上游的多沙区,长江源区与东南片区是少沙区。

2. 上世纪 50 年代至 80 年代,自然因子对长江上游产沙模数空间变化的贡献达 70.4%,表明长江上游侵蚀产沙的空间变化主要受自然环境控制,人为活动的影响是次要的。降雨是侵蚀产沙的主控因子,土壤特性与地形条件也有重要影响,它们对产沙模数的贡献分别为:降雨侵蚀力(R) 39.5%,土壤可蚀性(K) 22.6%,坡长坡度因子(LS) 8.2% (以自然因子总解释度 70.4% 计算)。

3. 降雨和土壤特性对各类型区产沙的影响最为普遍;地形在地势起伏不大的地区,表现更为突出;岩性在局部地区,特别是嘉陵江上游和金沙江下游两重点产沙区具有较为显著的影响。总体上自然因子对西部人口分布较少的地区解释力较高,对东部人口密度较大的地区解释力较低。

致谢:论文表 1 成土母岩可蚀性赋值表及相关基础栅格图由张信宝老师提供,这里表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] Lu X X, Heggitt D L. Sediment yield variability in the upper Yangtze, China[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 1999, 24(12): 1077~1093
- [2] Dai S B, Yang S L, Li M. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: anthropogenic and natural causes[J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 2009, 51(1): 135~146
- [3] Zhang Xinbao, Wen Anbang. Variations of sediment in upper stream of Yangtze River and its tributary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (4): 56~59 [张信宝, 王安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. *水利学报*, 2002, (4): 56~59]
- [4] 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 [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]
- [5] Xu Jiongxin. Variation in grain size of suspended load in upper Changjiang River and its tributaries by human activities[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005, (3): 8~16 [许炯心. 近 40 年来长江上游干支流悬移质泥沙粒度的变化及其与人类活动的关系[J]. *泥沙研究*, 2005, (3): 8~16]
- [6] Xu Quanxi, Shi Guo yu, Chen Zefan. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 420~426 [许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 420~426]

- [7] Shi Changxing Scaling effects on sediment yield in the upper Yangtze River [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 800~810 [师长兴. 长江上游输沙尺度效应研究 [J]. 地理研究, 2008, 27(4): 800~810]
- [8] Shi Changxing Du Jun Causes for stepped changes of sediment load in the upper Yangtze River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2009, (4): 17~24 [师长兴, 杜俊. 长江上游输沙量阶段性变化和原因分析 [J]. 泥沙研究, 2009 (4): 17~24]
- [9] Lajczak A, Jansson M B Suspended sediment yield in the Baltic drainage basin [J]. *Nordic Hydrology*, 1993, 24: 31~52
- [10] Li Cheng Li Junxiang Zhu Feige et al Sensitivity evaluation and key sensitive factors identification of soil erosion around Hangzhou Bay based on RUSLE [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2009, 20(7): 1577~1585 [李铖, 李俊祥, 朱飞鸽, 等. 基于 RUSLE 的环杭州湾地区土壤侵蚀敏感性评价及关键敏感因子识别 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1577~1585]
- [11] Chen YH, Pan WB Cai WY. Assessment of soil erosion sensitivity in Watershed based on RUSLE: A case study of Ji xi watershed [J]. *Journal of Mountain Science* 2007, 25(4): 490~496 [陈燕红, 潘文斌, 蔡莞臻. 基于 RUSLE 的流域土壤侵蚀敏感性评价——以福建省吉溪流域为例 [J]. 山地学报, 2007, 25(4): 490~496]
- [12] Liu K, Kang Y, Cao MM, et al GIS-based assessment on sensitivity to soil and water loss in Shaanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(5): 168~170 [刘康, 康艳, 曹明明, 等. 基于 GIS 的陕西省水土流失敏感性评价 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 168~170]
- [13] Lai Yefa Relationship between lithology of parent rock and soil erosion [J]. *Soil and water conservation in China*, 1989 (7): 41~43 [赖叶发. 试论母岩岩性与土壤侵蚀的关系 [J]. 中国水土保持, 1989 (7): 41~43]
- [14] Wang Zhaoyin, Huang Wendian Li Yitai Sediment budget of the Yangtze River [J]. *Journal of Sediment Research* 2007, (2): 1~10 [王兆印, 黄文典, 李义天. 长江流域泥沙输移与概算 [J]. 泥沙研究, 2007, (2): 1~10]
- [15] Lei Xiaohang Huang lilong Discussion of soil erosion mechanism in some areas of the upper Yangtze River [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1991, 12(4): 9~16 [雷孝章, 黄礼隆. 长江上游部分地区土壤侵蚀与机制探讨 [J]. 四川林业科技, 1991, 12(4): 9~16]
- [16] Zhu Guoan. Comparative study of corrosion resistance of Rendzina viscid yellow soil and sandy yellow soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science* 1981 (6): 5~8 [朱国安. 黑色石灰土与粘质黄壤、砂壤质黄壤抗蚀性能的对比研究 [J]. 土壤通报, 1981 (6): 5~8]
- [17] Chen Songsheng Zhang Ouyang Chen Zefang Variations of runoff and sediment load of the Jinsha river [J]. *Advances in Water Science* 2008 19(4): 475~482 [陈松生, 张欧阳, 陈泽方. 金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析 [J]. 水科学进展, 2008 19(4): 475~482]

Sediment Yield Pattern and Its Controlling Factors in the Upper Yangtze River

DU Jun^{1,2}, SHI Changxing¹, ZHOU Yuanyuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

Abstract Using long-term mean sediment load recorded at 110 independent hydrological stations in the upper Yangtze River and spatial interpolation techniques, this paper explored the spatial distribution of sediment yield of the river basin and the contributions to sediment yield from soil, terrain, rainfall, land use and lithology factors in different regions. The main findings are: (1) The distributive character of sediment yield in the upper Yangtze River could be described well from the sediment load records of independent hydrological stations. (2) The spatial change of sediment yield in the upper Yangtze River was primarily controlled by the natural environment and the impact of human activities was secondary over the period from the 1950s to the 1980s. Rainfall as the main controlling factor to sediment yield, soil and terrain characteristics also exerted significant impacts. (3) Rainfall and soil characteristics were the most common influencing factors to sediment yield in all the subareas of the river basin, but terrain factor greatly affected the sediment yield in the subareas with relatively gentle terrain and lithology became the first influencing factor in the principal sediment source areas. Overall, natural factors played a more important role in the spatial variations of sediment yield in the western sparsely populated areas.

Key words the upper Yangtze River, sediment yield pattern, controlling factors, regional difference