

# 嘉陵江流域水系形态特征与侵蚀产沙响应

李进林<sup>1</sup>, 韦杰<sup>1,2</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘要:**流域水系形态指示着流域地貌发育和水文过程,研究其形态特征有助于流域水力开发、生态保护、水土流失治理等规划的制定。基于 DEM 数据,运用分形维数、河段蜿蜒度、灰色关联度和非线性响应模型分析了嘉陵江流域水系形态特征以及侵蚀产沙与水系形态的关系。结果表明:嘉陵江流域内各子流域水系形态差异显著,其中,渠江子流域水系形态分形维数为 5.102,水系分叉总数增加最快,分枝形态最复杂,溯源侵蚀能力最强。其余 4 个子流域水系形态分形维数分别为白龙江子流域 3.706,干流上游子流域 3.605,干流中下游子流域 3.576,涪江子流域 3.548。各子流域河段均以低蜿蜒度为主,约占河段总数的 73%~82%;中蜿蜒度河段数约占总数的 12%~20%。平均输沙量和泥沙淤积量与水系分形维数间的关联度分别为 0.618,0.641,与河段平均蜿蜒度的关联度分别为 0.588,0.591。河段蜿蜒度和分枝结构复杂度对输沙量的相对贡献率分别为 21%和 79%,对泥沙淤积量的相对贡献率分别为 18%和 82%。

**关键词:**分形维数;河段蜿蜒度;灰色关联度;相对贡献率;侵蚀产沙

中图分类号:K903;P931

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0007-07

## Features of River System Morphology and Its Response to Sediment Yield in the Jialing River Basin, China

LI Jinlin<sup>1</sup>, WEI Jie<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The features of river system morphology represent the geomorphic development and hydrological processes, which helps make planning for hydropower development, ecological protection and soil and water conservation. However, it is not well understood in the Jialing River Basin, as well as its relation to the sediment yield and deposition. The fractal dimension and the sinuosity of river reaches are used to quantify the river system morphology in the Jialing River Basin. And then, the grey relation degree and nonlinear response model are applied to analyze the relationships between the fractal dimension, the sinuosity of river reaches and the sediment load and deposition, based on the DEM data by GIS software. The results show that the significant differences occur in the river system morphology among sub-basins. Among these sub-basins, the fractal dimension of the Qu River is 5.102, with a fastest bifurcation increment, the most complex branches and the most severe headwater erosion potential. The fractal dimensions for the Bailong River, the upper reach of the main stream, the middle and lower reaches of main stream and the Fu River are 3.706, 3.605, 3.576 and 3.548, respectively, indicating that no significant differences were found among the rest 4 sub-basins except for the Qu River from a perspective of branches complexity. Most of the reaches in each sub-basin are gentle meandering with a proportion about 73%~82% of the total, and the moderate meandering about 12%~20%. The number of high sinuosity reaches in the upper reaches of main stream, the middle and lower reaches of main stream, the Qu Rivers, the Fu River and the Bailong River is 79, 137, 158, 168 and 247, respectively. The grey relation degrees between the mean sediment loads, the depositions and the fractal dimensions are 0.618 and 0.641, respectively, showing stronger influence of the river system complexity on the sediment deposition than the sediment load. And the grey relation degrees between the mean

收稿日期:2015-12-29

修回日期:2016-02-23

资助项目:重庆市教委科技项目“三峡库区河流泥沙负荷变化的驱动力判别研究”(KJ100601)

第一作者:李进林(1991—),男,重庆开州人,硕士研究生,主要研究方向为水土保持与生态建设。E-mail:cqnulijinlin@sina.com

通信作者:韦杰(1979—),男,四川苍溪人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:wei\_jie@mails.ucas.ac.cn

sediment loads, the depositions and the sinuosity of rive reaches are 0.588 and 0.591, respectively, indicating that a more sensitive response of the sediment deposition to the sinuosity of rive reaches than the sediment load. In addition, the relative contributions of the sinuosity of river reaches and the branches structure complexity to the sediment load is 21% and 79%, while they are 18% and 82% for the sediment deposition.

**Keywords:** fractal dimension; sinuosity of river reach; grey correlation degree; relative contribution; basin erosion and riverine sediment

水系是流域内不同等级河流所构成的河道系统,是陆地水循环的主要路径和活跃的外营力<sup>[1]</sup>。水系发育主要受流域地质构造、地形地貌、岩性、土壤、气候、植被条件等因子的影响<sup>[1-4]</sup>,反过来,水系又影响着流域水文过程、地表形态、土壤侵蚀、植被和气候形成乃至区域发展<sup>[4-5]</sup>。水系形态特征是决定流域水生态与水环境的基础之一<sup>[6]</sup>,准确把握水系形态特征对理解流域地貌发育、水文过程和指导制定流域水力开发、水土流失治理规划等具有重要意义<sup>[7]</sup>,但水系具有结构多样性和空间组合的复杂性,给科学精确地量化流域水系形态带来了困难。20 世纪 70 年代美国数学家 B. Mandelbrot<sup>[8]</sup>建立了分形理论并将该理论引入水文地理学研究中,采用分形维数描述流域水系尺度不变性和形态的复杂性<sup>[9]</sup>,为水系形态特征量化提供了有效工具。随后该理论进一步发展和完善,Tarboton<sup>[10]</sup>、Robert<sup>[11]</sup>、Rosso<sup>[12]</sup>等推演出了一系列流域水系分形维数计算方法。

常用于表征水系形态的分形维数主要有计盒维数、霍顿(Horton)比维数和分枝维数 3 种。其中,计盒维数能从总体上刻画水系的复杂程度<sup>[13]</sup>,该方法因计算过程简单和物理意义明确而被广泛应用<sup>[14]</sup>;但计盒维数主要刻画河流的弯曲复杂特征,无法体现特定流域内水系分枝形态的复杂性。霍顿比维数能从一定程度上体现特定流域水系形态的复杂程度,但其前提是流域水系要满足分形树结构时,其结果才具有一定的可靠性<sup>[15-16]</sup>,而完全满足这一前提的自然水系比较少见。Tarboton 等<sup>[10]</sup>应用霍顿比法计算出水系分形维数高于上限值也证实了该方法的可靠性不高。分枝维数广泛应用于交通网络、城镇体系、区域水系等空间结构研究<sup>[4,17]</sup>,侧重体现研究对象间的集散状态和相对位置的空间变化关系。该方法同样不能很好地刻画流域不同级别水系分枝形态特征,主要原因是水系不存在纵横交错的结构特征,只是从各发源地向流域出水口方向逐级汇流合并,同时,流域水系“枢纽点”的确定也缺乏科学依据。

目前关于嘉陵江流域的研究主要集中在水土流失及治理、面源污染及控制、水文过程等方面<sup>[18-22]</sup>,而关于水系形态特征及其与侵蚀产沙的关系很少报道。

本文基于 DEM 数据和 ArcGIS 软件平台,利用河段蜿蜒度和改进的水系分形维数探讨嘉陵江流域水系形态特征,并利用灰色关联度和非线性响应模型分析水系形态特征与流域侵蚀产沙量和泥沙淤积量间的关系,为认识该流域水系形态和地貌发育、制定水土流失治理规划等提供依据。

## 1 研究区概况

嘉陵江流域(29°17′30″—34°28′11″N,102°35′36″—109°01′08″E)东北部以秦巴山脉与汉水为界,东南部以华蓥山与长江相隔,西部及西南部与沱江接壤,西北部以龙门山与岷江相连。流域面积约 16 万 km<sup>2</sup>,包括渠江、涪江和嘉陵江干流三大水系,各水系上游均为河床比降大、河谷狭窄的山区,下游出水口在重庆市合川区附近汇合,构成扇形向心水系。流域横跨三大构造单元,地质构造复杂,地貌类型多样,地层分布主要是中生界侏罗系红色岩层。土壤类型主要有紫色土、黄壤土、冲积土、水稻土、潮土和红壤。干流长约 1 120 km,发源于陕西省凤县秦岭南麓,向西南流经陕、甘、川、渝后汇入长江,是长江上游流域面积最大的一条支流。流域内大部分地区属于亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量和蒸发量分别为 931 mm 和 513 mm,年内降水主要集中在 5—10 月,占全年降水量的 82%,多年平均最高气温和最低气温分别为 19.4℃和 4.3℃,多年平均日照时间为 1 450 h<sup>[20]</sup>。第三次土壤侵蚀遥感调查结果显示,嘉陵江流域水土流失面积 51 297.45 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 49.24%,其中,轻度、中度、强度、极强度和剧烈水土流失面积分别占流域水土流失面积的 32.26%,47.37%,16.36%,3.12%和 0.88%。流域多年平均悬移质输沙量和卵石推移质输沙量分别为 1.11 亿 t 和 7 万 t,是三峡水库泥沙的重要来源之一。自 1989 年实施“长治”工程以来,流域内累计水土流失治理面积已经超过 1.65 万 km<sup>2</sup>,水土流失已经得到初步控制<sup>[22]</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 数据来源与处理

采用的 ASTER GDEM V2 (ASTER Global Digital Elevation Model V2)数据来源于中国科学院

计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。考虑到流域不同部位地貌特征的显著差异,利用 ArcGIS 软件的水文分析工具将嘉陵江流域划分为白龙江子流域、干流上游子流域、涪江子流域、渠江子流域和干流中下游子流域 5 个子流域(图 1)。为使各子流域水系结构复杂程度存在可比性,从 DEM 数据提取各子流域水系时,将汇水量阈值统一设置为 5 000。水系提取完成后,依据 Strahler 分级法将水系河段分级,该分级法是将流域内所有无支流的河段定为第 1 级水系,由两条 1 级河段汇流形成的河段定为第 2 级水系,以此类推,一直到流域出水口<sup>[16]</sup>;在这种分级法中,当且仅当两条相同级别的河段汇流成一条时,该河段级别才会增加,对于低级别河段汇入高级别河段时,高级别河段的级别不会改变。最终,白龙江流域和渠江流域分为 7 级,其余 3 个流域分为 6 级;完成分级后删除了河网中的伪沟谷和孤河。

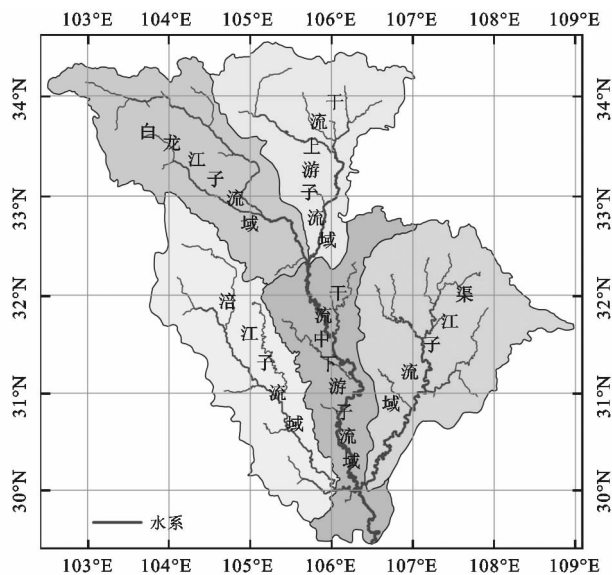


图 1 嘉陵江流域区位图及子流域划分

多年平均输沙量和泥沙输移比是采用马炼<sup>[18]</sup>、许全喜<sup>[19]</sup>和李继承<sup>[20]</sup>的部分研究结果,数据来源于研究区内相关水文站 1954—1998 年的水沙监测资料。

## 2.2 水系形态分形维数

采用的水系形态分形维数计算方法是由计盒维数改进得到,具体的做法是将计盒维数中的盒子尺寸改为水系级别、所对应的非空盒子数目改为累计(向高级别水系累加至最高级别水系)水系河段数;随着流域水系级别的不断变化,可获得累计河段数目序列,水系级别序列与累计河段数目序列满足式(1):

$$N_r \propto r^{-D} \quad (1)$$

$$N_r = \sum_{r=i}^n N_i \quad (2)$$

式(1)两边同时取对数可得式(3):

$$\lg N_r \propto -D \lg r \quad (3)$$

以 $(\lg r, \lg N_r)$ 为坐标系,用 $(r_1, r_2, r_3, \dots)$ 序列和 $(N_1, N_2, N_3, \dots)$ 序列绘制双对数图,并利用最小二乘法拟合直线(4)。

$$\lg N_r = -D \lg r + A \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $r$ 为水系级别( $r=1, 2, 3, \dots, n$ ), $n$ 为最高级别水系, $N_i$ 为第 $i$ 级水系河段数, $N_r$ 为 $r=i$ 级及其以上级别水系累计河段数, $A$ 为常数, $D$ 为分形维数,其本质是由水系河流分枝累计数目变化所决定; $D$ 值越高,表示水系从流域出水口向各发源地分叉总数增加相对较快,即水系分叉发育能力和溯源侵蚀能力越强、结构越复杂;反之则表示水系分叉总数增加相对较慢,水系分叉发育能力和溯源侵蚀能力较弱、结构较简单。

## 2.3 河段蜿蜒度

河段蜿蜒度是指河流中心线长度与河流所处流域中心线长度的比值,计算方法为式(5):

$$S = L_r / L_v \quad (5)$$

式中: $S$ 为河流蜿蜒度; $L_r$ 为河流中心线长度,即河段本身的长度; $L_v$ 为河流所在流域中心线长度,即河段起止点间的直线距离。

## 2.4 灰色关联度

灰色关联分析是根据两个因素的时间序列发展趋势,衡量因素间关联程度的一种方法。由于流域多年平均输沙量、泥沙淤积量和水系形态参数在短时间尺度内不会发生变化,本文依据“时空对换”思想,将上述“状态数据”转化为“过程数据”,并以平均输沙量和淤积量为参考序列,分别计算二者与比较序列(水系分形维数和平均蜿蜒度)间的关联系数:

$$S(t) = \frac{\min_j \min_i |x_i - x_j| + \rho \max_j \max_i |x_i - x_j|}{|x_i - x_j| + \rho \max_j \max_i |x_i - x_j|} \quad (6)$$

式中: $S(t)$ 为比较序列对参考序列在 $t$ 时刻的关联系数; $\min_j \min_i |x_i - x_j|$ 和 $\max_j \max_i |x_i - x_j|$ 分别为比较序列与参考序列绝对差的最小值和最大值; $|x_i - x_j|$ 为比较序列与参考序列的绝对差; $\rho$ 表示分辨系数,通常取 0.5。

关联系数是某时刻比较序列与参考序列的关联程度值,信息过于分散不便于整体比较。因此,将其平均值作为灰色关联度用于衡量因素间的整体关联程度,计算方法为式(7):

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n S(t) \quad (7)$$

式中: $\bar{S}$ 表示因素间整体灰色关联度,该值越大,关联越强,比较序列对参考序列的影响越大。

## 2.5 相对贡献率分析

输沙量和泥沙淤积量对水系形态特征的响应关系可以表示为:

$$S_{yi} = W^a \cdot D^b \quad (8)$$

$$S_{de} = W^c \cdot D^d \quad (9)$$

式中:  $S_{yi}$  表示流域侵蚀产沙量;  $S_{de}$  表示泥沙淤积量;  $W$  和  $D$  为河段蜿蜒度和水系分形维数,  $a, b, c$  和  $d$  为响应系数, 由非线性拟合得到。

相对贡献率可定量描述水系形态特征对流域侵蚀产沙和泥沙淤积变化的作用大小, 计算方法为:

$$\eta_i = (\alpha_i / \sum_{i=1}^n \alpha_i) \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $\eta_i$  为相对贡献率(%);  $\alpha_i$  为非线性响应方程中因子指数绝对值。

## 3 结果与分析

### 3.1 嘉陵江各子流域水系形态分形

各子流域水系级别与累计河段数目间存在非线性关系, 采用指数曲线拟合时(图 2 左列), 决定系数  $R^2$  值均为 0.99; 从水系级别与累计河段数目的双对数图(图 2 右列)可看出, 二者存在较强对数线性相关, 决定系数  $R^2$  值介于 0.94 到 0.97 之间; 表明水系分枝结构存在分形特征, 其他流域的研究结果也有这样的特征<sup>[16]</sup>。

嘉陵江各子流域水系形态分形维数(图 2 右列)从大到小依次为渠江子流域 5.102, 白龙江子流域 3.706, 干流上游子流域 3.605, 干流中下游子流域 3.576 和涪江子流域 3.548, 表明嘉陵江流域内各子流域水系分枝形态存在差异, 渠江子流域水系分叉总数增加最快, 水系分枝形态最复杂, 溯源侵蚀能力最强。其余 4 个子流域间水系分形维数差异相对较小, 水系分叉发育能力相当, 水系分枝形态复杂程度相似, 溯源侵蚀能力接近, 原因可能是水系结构发育过程主要受构造运动、地形地貌、下覆岩性和气候特征的影响, 其中构造运动起控制作用<sup>[23]</sup>。渠江子流域上游处于大巴山构造带和米苍山构造带(位于扬子地块北缘、秦岭构造带和松潘—甘孜褶皱带间的过渡带), 主要经历了加里东、华力西、印支、燕山和喜马拉雅运动, 地貌条件十分复杂, 中下游位于扬子地块上部的川中盆地丘陵区 and 川东平行岭谷区, 虽基底刚硬, 但上覆抗侵蚀能力较弱的侏罗系泥岩、页岩和粉砂岩; 再加上区内降雨丰沛, 年降雨量为 1 014~1 500 mm, 使渠江子流域水系结构发育相对复杂。白龙江子流域位于扬子地块、西藏—三江造山带与秦祁昆造山带的交汇区, 干流上游子流域主要

位于西秦岭构造带, 二者同样经历了多期构造演化, 但是水系结构复杂程度与渠江子流域明显不同; 可能是由气候特征和植被条件的不同所造成, 这两种影响因素作用强度相对构造运动非常微弱, 但长时间尺度的累计效应却不可忽视。干流中下游子流域和涪江子流域的气候特征与植被条件与渠江流域相似, 水系复杂程度与渠江子流域同样存在差异, 主要原因可能是地貌条件和受构造运动的影响不同, 前两者主要位于扬子地块上部的川中盆地丘陵区, 水系演化过程主要受扬子板块活动的影响<sup>[24-26]</sup>。

### 3.2 嘉陵江流域水系河段蜿蜒度

根据式(5)计算出 5 个子流域共 11 648 条河段的蜿蜒度, 并参照 Rosgen<sup>[27]</sup> 的分类方法对蜿蜒度进行分类, 即:  $S < 1.2$  为低蜿蜒度,  $1.2 \leq S \leq 1.4$  为中蜿蜒度,  $S > 1.4$  为高蜿蜒度, 结果见表 1。

子流域河段以低蜿蜒度为主, 占河段总数的比例分别为白龙江子流域 78.06%、干流上游子流域 82.40%、涪江子流域 73.40%、干流中下游子流域 73.18% 和渠江子流域 75.03%, 最小蜿蜒度值均接近 1。各子流域中蜿蜒度河段数由多到少依次为渠江子流域 544 条、涪江子流域 481 条、干流中下游子流域 375 条、白龙江子流域 290 条和干流上游子流域 280 条, 分别占河段总数的 19.35%、19.71%、19.64%、11.85% 和 13.73%。高蜿蜒度河段数最多的是白龙江子流域, 247 条, 最少的是干流上游子流域, 79 条, 二者相差 168 条。进一步分析发现, 低蜿蜒度河段主要集中于各子流域 1 级水系中, 原因可能是 1 级水系主要分布在山区, 河段蜿蜒摆动受到限制; 除白龙江子流域外, 其余各子流域最高级别水系河段均为高蜿蜒度, 其中干流中下游子流域和渠江子流域次高级别水系河段同样为高蜿蜒度, 但各子流域河段蜿蜒度最高值均未出现在最高和次高级别水系中, 而是出现在最低和次低级别水系中, 蜿蜒度最低值同样出现在最低和次低级别水系中, 表明特定流域内低级别水系形态特征相对复杂。

### 3.3 流域侵蚀产沙与水系形态特征的关系

侵蚀产沙和泥沙输移受流域地质地貌、土壤、植被等自然因素和水利工程建设、水土保持、河道采砂、开发项目建设等人为因素的共同影响。其中, 自然因素相对较稳定, 对流域不同时期侵蚀产沙和泥沙输移量变化的影响较小; 人为因素通常具有时空异质性, 是影响流域侵蚀产沙和输沙量变化的重要因素。1989 年起, 嘉陵江流域被列为长江上游水土保持重点防治区, 实施的“长治”工程等系列水土保持活动改变了侵蚀产沙格局。因此, 为了从一定程度上剥离人

为因素对侵蚀产沙变化的影响,分析水系形态特征对流域侵蚀产沙的贡献时,采用的输沙量是各子流域1960—1990 年平均值<sup>[18-19]</sup>,并根据泥沙输移比<sup>[20]</sup>推

算出各子流域平均泥沙淤积量(表 2)。将数据标准化处理后,根据式(6)—(7)分别计算出平均输沙量和淤积量与水系形态参数间的关联度。

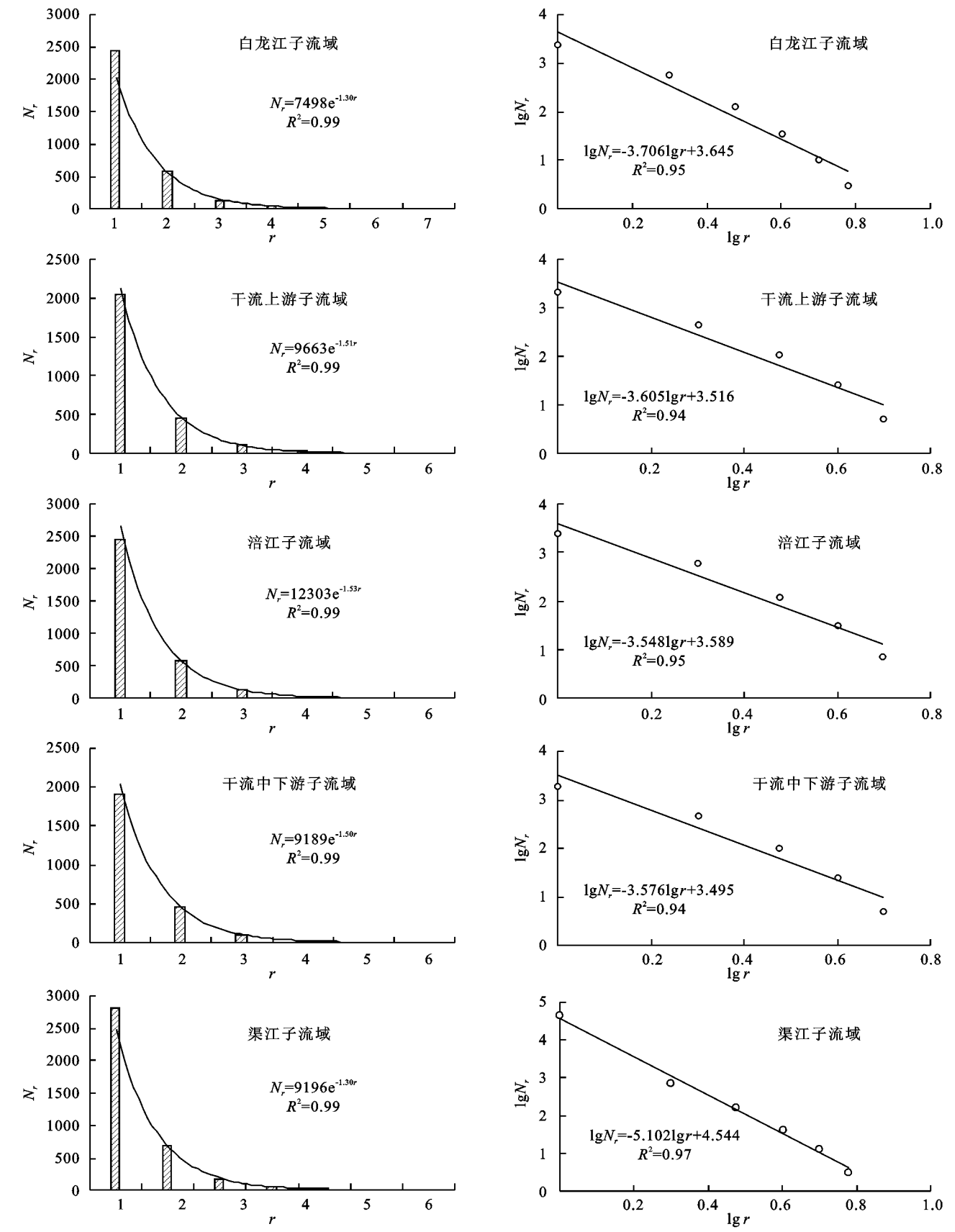


图2 嘉陵江子流域累计河段数—水系级别关系

表 1 嘉陵江各子流域水系河段蜿蜒特征

流域名称	最高蜿蜒度	最低蜿蜒度	平均蜿蜒度	河段数量			
				总数	低蜿蜒度	中蜿蜒度	高蜿蜒度
白龙江子流域	3.45	1.01	1.13	2448	1911	290	247
涪江子流域	5.24	1.01	1.20	2440	1791	481	168
渠江子流域	3.99	1.01	1.16	2811	2109	544	158
干流上游子流域	3.50	1.00	1.14	2040	1681	280	79
干流中下游子流域	2.88	1.01	1.17	1909	1397	375	137

表 2 嘉陵江子流域 1960—1990 年平均输沙量、泥沙淤积量和水系形态参数

流域名称	水文站名称	平均输沙量/万 t	泥沙淤积量/万 t	分形维数	平均蜿蜒度
白龙江子流域	三磊坝	1582	4720	3.706	1.13
涪江子流域	小河坝	1870	5640	3.548	1.20
渠江子流域	罗渡溪	2700	8187	5.102	1.16
干流上游子流域	新店子	3619	10629	3.605	1.14
干流中下游子流域	武胜	1453	4382	3.576	1.17

平均输沙量和泥沙淤积量与分形维数间的关联度分别为 0.618,0.641,表明流域水系复杂程度对泥沙淤积的影响强于输沙量,这是因为流域水系分枝结构越复杂,源区泥沙向流域出水口运动过程中,沿程淤积的机会越大。河段平均蜿蜒度对泥沙淤积的影响也强于输沙量,关联度分别为 0.588,0.591,河道越蜿蜒曲折,越不利于泥沙迁移,原因可能是河段蜿蜒度由水系高度落差决定<sup>[27]</sup>,河道比降大时,其蜿蜒度低,有利于导水输沙,当河道经过地形高度差较小的区域时,河道开始变得蜿蜒曲折,有利于泥沙淤积。上述结果还可以认为,流域水系形态特征对泥沙淤积的影响强于输沙量。

研究表明,流域水系形态与侵蚀产沙间存在显著的非线性关系<sup>[28]</sup>,嘉陵江各子流域输沙量和泥沙淤积量对水系形态特征的非线性响应方程分别为(11), (12),均通过了拟合检验:

$$S_{yi}=W^{0.164}D^{0.601} \quad R^2=0.89 \quad (11)$$

$$S_{de}=W^{0.138}D^{0.649} \quad R^2=0.89 \quad (12)$$

从式(11)可看出,只考虑河段蜿蜒度和水系分枝结构复杂度对流域输沙量的贡献时,非线性响应模型变量系数分别是 0.164,0.601,可见,河段蜿蜒度对输沙量的贡献较小,相对贡献率为 21%,分枝结构复杂度的贡献较大,其相对贡献率为 79%。泥沙淤积量对水系形态特征的响应也表现出相似的规律(式 12),其非线性响应模型中河段蜿蜒度系数为 0.138,对泥沙淤积量的相对贡献率为 18%,水系分枝结构复杂程度系数为 0.649,对泥沙淤积量的相对贡献率为 82%。

4 讨论

流域水系形态特征一直是水文过程和地貌演化研究的热点,研究方法主要有以霍顿定律为代表的经验关系法和以分形理论为基础的定量算法<sup>[7-16]</sup>,定

量计算水系分形维数的方法多种多样,不同的计算方法所得结果意义也不一致。本文采用一种改进的水系分枝维数描述水系形态,与分叉比不同,该分形维数由河流分枝数目变化率所确定,能表征水系分枝发育能力和流域地貌溯源侵蚀能力强弱以及复杂的空间变化特征。利用“时空对换”思想,将水系形态分形维数等“状态数据”转化为“过程数据”以考查流域侵蚀产沙对水系形态的响应。结果表明,流域水系形态特征对泥沙淤积的影响强于输沙量。Jin 等<sup>[28]</sup>认为,流域水系形态与侵蚀产沙间存在显著的非线性关系,在流域水系发育之初期,水系分形维数会随侵蚀产沙模数减小而减小,当水系分形维数跨过临界最小值后,则随侵蚀产沙模数的减小而增大。这主要是在试验条件下,侵蚀产沙和水系发育都是两个连续的过程,时间尺度错动较小。而自然状态下流域水系发育和一次连续的侵蚀产沙过程不在同一个时间尺度内。因此,反过来可以说,流域水系形态只是侵蚀产沙的一般影响因素,不是决定性或控制性因素,与 Zhang 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。进一步分析流域水系形态特征对输沙量和泥沙淤积量的贡献时发现,水系分枝结构复杂度对输沙量和泥沙淤积量的贡献却大于河段蜿蜒度,原因可能是输沙量主要受泥沙来源多寡的影响,复杂水系形态演化的过程伴随着强烈的流域侵蚀;而水系河道作为输沙通道,其冲淤过程对输沙量和泥沙淤积量的影响相对较小,因此,河段蜿蜒度对输沙量和泥沙淤积量的贡献较小。

需要说明的是,流域侵蚀产沙是一个十分复杂的过程,影响因素众多。本文只研究了流域水系形态特征与河段蜿蜒度对流域输沙量和泥沙淤积量的贡献,没有考虑流域结构特征等其他因素的影响,也没有完全剥离人为因素的干扰。在后续研究中,应注重流域水系形态特征对输沙量和泥沙淤积量的影响机制研

究,以及各类输沙量、泥沙淤积量影响因子的贡献率定量研究。

## 5 结论

(1) 嘉陵江流域内各子流域水系形态存在差异,渠江子流域水系分叉总数增加最快,分枝形态最复杂,溯源侵蚀能力最强,其余4个子流域间差异较小。

(2) 各子流域河段均以低蜿蜒度为主,占河段总数的比例分别为白龙江子流域 78.06%、干流上游子流域 82.40%、涪江子流域 73.40%、干流中下游子流域 73.18%和渠江子流域 75.03%。

(3) 平均输沙量和泥沙淤积量与分形维数间的关联度分别为 0.618,0.641,与河段平均蜿蜒度的关联度分别为 0.588,0.591。

(4) 河段蜿蜒度和分枝结构复杂度对输沙量的相对贡献率分别为 21%和 79%,对泥沙淤积量的相对贡献率分别为 18%和 82%。

### 参考文献:

- [1] Veltri M, Veltri P, Maiolo M. On the fractal description of natural channel networks[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 187: 137-144.
- [2] 沈晓华,邹乐君,阳峰,等.长江河道分形与流域构造特征的关系[J]. *浙江大学学报:理学版*, 2001, 28(1): 107-111.
- [3] Shen X H, Zou L J, Zhang G F, et al. Fractal characteristics of the main channel of Yellow River and its relation to regional tectonic evolution[J]. *Geomorphology*, 2011, 127: 64-70.
- [4] Liu C L, Duan D Z, Zhang H. Relationships Between Fractal Road and Drainage Networks in Wuling Mountainous Area: Another Symmetric Understanding of Human-Environment Relations[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4): 1060-1069.
- [5] 张丽,戴斌祥,王光谦,等.基于 Tokunaga 网络的河网形态特征量化[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2009, 39(10): 1413-1420.
- [6] 袁雯,杨凯,吴建平.城市化进程中平原河网地区河流结构特征及其分类方法探讨[J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 401-407.
- [7] 王秀春,吴姗,毕晓丽,等.泾河流域水系分维特征及其生态意义[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2004, 40(3): 364-368.
- [8] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. *Science*, 1967, 155: 636-638.
- [9] 冯平,冯焱.河流形态特征的分维计算方法[J]. *地理学报*, 1997, 52(4): 324-330.
- [10] Tartobon D G, Bras R L, Rodriguez-iturbe I. The fractal nature of river networks[J]. *Water Resource Research*, 1988, 24(8): 1317-1322.
- [11] Robert A, Roy A G. On the fractal interpretation of the main stream, length drainage area relationship[J]. *Water Resource Research*, 1990, 26(5): 839-842.
- [12] Rosso R, Bacchi B, Barbera P L. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks [J]. *Water Resource Research*, 1991, 27(3): 381-387.
- [13] 孙祝友,杜国云,朱大奎,等.莱州湾东岸河流的分形特征与流域地貌发育研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(5): 755-759.
- [14] 蔡凌雁,汤国安,熊礼阳,等.基于 DEM 的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 141-144.
- [15] Garcia-Ruiz J M, Otálora F. Fractal trees and Horton's laws[J]. *Mathematical Geology*, 1992, 24(1): 61-71.
- [16] Kim J C, Jung K. Fractal tree analysis of drainage patterns[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(4): 1217-1230.
- [17] 柏春广,蔡先华.南京市交通网络的分形特征[J]. *地理研究*, 2008, 27(6): 1419-1426.
- [18] 马炼,张明波,郭海晋,等.嘉陵江流域水保治理前后沿程水沙变化研究[J]. *水文*, 2002, 22(1): 27-31.
- [19] 许全喜,陈松生,熊明,等.嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J]. *泥沙研究*, 2008(2): 1-8.
- [20] 李继承.嘉陵江流域非点源污染负荷模拟研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [21] 刘腊美,龙天渝,李崇明.三峡水库上游流域非点源颗粒态磷污染负荷研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 320-325.
- [22] 韦杰,贺秀斌.人类活动对嘉陵江流域泥沙负荷的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(2): 196-201.
- [23] 张斌,艾南山,黄正文,等.中国嘉陵江河曲的形态与成因[J]. *科学通报*, 2007, 52(22): 2671-2682.
- [24] 黄汲清,任纪舜,姜春发,等.中国大地构造基本轮廓[J]. *地质学报*, 1977(2): 117-135.
- [25] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等.中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1-4.
- [26] 贾营营,付碧宏,王岩,等.青藏高原东缘龙门山断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 825-836.
- [27] Rosgen D L. A classification of natural rivers[J]. *Catena*, 1994, 22(3): 169-199.
- [28] Jin D S, Chen H, Guo Q W. Material component to non-linear relation between sediment yield and drainage network development: A flume experimental study[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, 24(3): 271-381.
- [29] Zhang H Y, Shi Z H, Fang N F, et al. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China[J]. *Geomorphology*, 2015, 234: 19-27.