

基于分形信息维数的流域地貌形态与侵蚀产沙关系*

崔灵周^{1,2} 李占斌^{2,3} 郭彦彪⁴ 朱永清^{2,5}

(1 温州大学生命与环境科学学院,浙江温州 325027) (2 西安理工大学水利水电学院,西安 710048)

(3 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100)

(4 华南农业大学资源与环境学院,广州 510642)

(5 长江流域水土保持监测中心站,武汉 430010)

摘 要 流域地貌形态的科学准确量化是建立具有广泛适用性的流域尺度土壤侵蚀预报模型的关键科学问题之一,分形理论的提出为流域地貌形态特征的定量描述开辟了新的思路。本文基于分形理论,利用 GIS 技术和多元回归统计方法,以黄土高原丘陵沟壑区第一副区的岔巴沟流域为例,对该流域以分形信息维数为量化指标的流域地貌形态与降雨侵蚀产沙耦合关系进行了初步探讨。研究表明,引入地貌形态分形信息维数的岔巴沟流域降雨侵蚀产沙与地貌形态耦合关系模型可将岔巴沟各支流差异明显的水沙关系简化为统一的数学表达,消除了由于地貌形态等下垫面因素导致的空间变异性;基于该耦合关系模型的西庄和蛇家沟流域次降雨输沙模数预测值和观测值相对误差较小、总体吻合较好;将地貌形态分形信息维数作为流域土壤侵蚀预报模型中地貌形态因子量化指标不仅可行,而且可靠。

关键词 岔巴沟流域;流域地貌形态;分形信息维数;侵蚀产沙

中图分类号 S157.1

文献标识码 A

小流域是我国水土流失综合治理的基本单元,建立具有广泛适用性的流域尺度水土流失预报模型不仅成为水土流失生态环境建设的迫切现实需求,也一直是土壤侵蚀和水土保持研究的前沿领域^[1,2]。地貌形态作为流域降雨侵蚀产沙过程的重要下垫面影响因子,其量化指标成为流域水土流失预报模型的主要参数之一^[3]。流域地貌形态量化指标目前大多采用平均坡度、平均坡长、沟壑密度、沟谷密度、河网密度、流域高差比(相对高差)和切割深度等单一指标中的一个或若干^[4~10],这些指标是传统地貌形态量化方法的简单沿用,只能表达流域地貌形态某一方面(如长度、起伏度和切割深度等)的特征,不能准确和全面刻画三维立体复杂流域地貌形态的整体性和综合性^[11,12]。分形理论为流域地貌形态特征的定量描述开辟了新的思路^[13,14]。流域地貌形态具有显著的分形特征^[11,17],利用分形维数作为流域地貌形态综合量化指标不仅可揭示流域地貌形态的复杂程度和整体性,还克服了平均坡度

等单一指标的缺点。虽然不少学者已在地貌形态分形特征量化及应用方面作了大量研究工作^[14~25],但对于地貌形态分形维数在流域土壤侵蚀预报模型中的应用还很少涉及^[13,14]。为此,本文以黄土高原丘陵沟壑区第一副区的岔巴沟作为研究流域,在计算出该流域地貌形态分形信息维数的基础上,结合次降雨侵蚀产沙特征,建立研究流域地貌形态分形信息维数与次降雨侵蚀产沙耦合关系模型,阐明地貌形态分形信息维数作为流域土壤侵蚀预报模型地貌形态因子量化指标的可行性和可靠性,为推动具有广泛适用性的流域土壤侵蚀预报模型的建立提供科学理论依据。

1 研究流域概况

本文以黄土丘陵沟壑区第一副区的岔巴沟为研究流域。该流域位于东经 109°47'、北纬 37°31',总面积为 187 km²,主沟道长 24.1 km。地貌形态包括河

* 国家自然科学基金项目(40301026)和中国博士后科学基金(200333518)资助

作者简介:崔灵周(1971~),男,陕西蓝田人,博士后,副教授,主要从事流域土壤侵蚀预报模型等方面研究。E-mail: clingzhou@126.com; Tel: 0577-81310400

收稿日期:2005-12-07;收到修改稿日期:2005-06-24

谷阶地和黄土丘陵沟壑两类,其中流域上游以梁地沟谷为主,下游以峁地沟谷为主,中游二者皆有,支沟切割很深,垂直节理发育,崩塌严重,坡度变化复杂且不连续,主沟上游及大支流坡度在 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间,沟头及支沟上部减至 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间,峁坡顶和梁顶部的坡度约在 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 以内。全流域有 13 条一级支沟,最大沟壑密度出现在左岸下游的麻地沟,为 1.23 km km^{-2} ;最小沟壑密度出现在左岸中游的刘家沟,为 0.46 km km^{-2} 。流域年平均降水量约为 450 mm,70%集中于 7、8 月间,且多降雨强度较大而历时短暂的暴雨;年平均侵蚀模数为 15780 t km^{-2} ,7~9 月份的输沙量占流域年总输沙量的 90% 以上。

2 研究方法

2.1 流域地貌形态分形信息维数计算模型

分形维数是对分形体进行定量描述的重要参数,是分形体复杂程度的定量表达。由于分形体千差万别,常采用不同的分形维数形式来表达,如豪斯道夫维数、容量维数、信息维数、关联维数和相似维数等。本文根据流域地貌形态空间分布的不均衡性和各种分形维数的特点,采用信息维数作为流域地貌形态分形特征量化指标,并建立了基于盒子覆盖法的流域地貌形态分形信息维数计算模型(见式(1)和式(2))。

$$D_i = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{I(r)}{\lg r} \quad (1)$$

$$I(r) = \lg \sum_{m=1}^N (1/m) P(m, r) \quad (2)$$

其中, D_i 为流域地貌形态分形信息维数; $I(r)$ 为非零分形集(流域地貌)的信息量; r 为盒子的尺度; N 为给定尺度盒子中最大可能包含非零分形集元素(等高线)数目; m 为给定尺度大小的盒子中非零分形集元素(等高线)数目; $P(m, r)$ 为盒子尺度为 r 时,有 m 个非零分形集元素(等高线)的盒子的出现概率, $P(m, r)$ 的计算公式为:

$$P(m, r) = N_m(r) / N(r) \quad (3)$$

式中, $N_m(r)$ 为盒子尺度为 r 时,含有 m 个非零分形集元素(等高线)的盒子数目; $N(r)$ 为盒子尺度为 r 时,覆盖流域地形图的非空盒子总数。

2.2 流域地貌形态分形信息维数计算程序

就目前而言,地形等高线不仅是较为成熟的流域地貌形态表征方法,而且实现了流域地貌形态从三维立体向二维平面的转化,依此为数据源可大大简化直接对三维立体流域地貌形态进行分形信息维数计算的复杂度^[20~22]。为此,本文以岔巴沟流域 15 幅 1:1 万的地形图为基础数据源,利用 PhotoShop、GeoScan 和 AutoCad 等软件对地形图进行扫描、矢量化和格式转换,得到二值化 BMP 格式的栅格影像数据,然后根据流域地貌形态分形信息维数计算模型编制计算软件,利用该软件计算不同盒子尺度下的 $I(r)$ 和 $\lg r$ 并点绘在双对数坐标上,最后进行直线拟合并确定无标度区间,无标度区间内的直线斜率即为相关流域的地貌形态分形信息维数(见图 1)。



图 1 流域地貌形态分形信息维数计算过程

Fig. 1 The calculation procedure of fractal information dimension of watershed topographic feature

2.3 研究流域水沙资料的获取与分析

研究流域具有较为完善的主支沟径流泥沙过程观测站,并进行了长达 11 年(1959~1969)降雨、径流和泥沙观测。本文根据研究流域中野外观测站的空间分布和观测资料初步分析,选取杜家沟岔、西庄、三川口、驼耳巷、蛇家沟、黑矾沟和水旺沟 7 个具有观测资料的支沟和 173 场侵蚀性降雨作为研究对

象,利用统计分析方法,研究其降雨侵蚀产沙特征,并结合流域地貌分形信息维数计算结果,建立研究流域地貌形态与降雨侵蚀产沙耦合关系模型。

3 结果分析

3.1 研究流域地貌形态分形特征

表 1 是利用式(1)、式(2)和式(3)并按照图 1 所

示的地貌形态分形信息维数计算程序所获得研究流域中杜家沟岔、西庄、三川口、驼耳巷、蛇家沟、黑矾沟和水旺沟 7 条支流域的地貌形态分形信息维数。从表 1 可以看出,各支流域地貌形态分形信息维数 D_i 均小于 1,最大为 0.966 1(杜家沟岔),最小为 0.582 1(水旺沟),其余分别为 0.941 9(西庄)、

0.893 5(三川口)、0.830 8(驼耳巷)、0.814 0(蛇家沟)和 0.636 8(黑矾沟)。在无标度区间内,各支流域地貌形态的盒子信息量和盒子尺度 r 在双对数坐标系统中所拟合直线的相关指数 (r^2) 均在 0.992 以上,表明各支流域地貌形态在各自无标度区间内均表现出很好的分形特征。

表 1 岔巴沟各支流域地貌形态分形信息维数计算结果

Table 1 Fractal information dimension of topographic feature in Chabagou watershed

| 支流域名称 Watershed name | 流域面积 Watershed area (km ²) | 无标度区 No scaling range (mm) | 相关指数 Correlation index (r^2) | 盒子尺度及规格 Box scale and size (mm) | 地貌形态分形信息维数 Fractal information dimension |
|----------------------------|--|----------------------------------|--|------------------------------------|--|
| 杜家沟岔 Dujiagoucha | 96 | 2-22 | 0.998 3 | 2、4、6、……28、30、32 | 0.966 1 |
| 西庄 Xizhuang | 49 | 2-20 | 0.998 1 | 2、4、6、……28、30、32 | 0.941 9 |
| 三川口 Sanchuankou | 21 | 2-22 | 0.997 5 | 2、4、6、……28、30、32 | 0.893 5 |
| 驼耳巷 Tuoerxiang | 5.47 | 2-14 | 0.998 4 | 2、4、6、……28、30、32 | 0.830 8 |
| 蛇家沟 Shejiagou | 4.72 | 2-16 | 0.997 9 | 2、4、6、……28、30、32 | 0.814 0 |
| 黑矾沟 Heifangou | 0.133 | 2-6 | 0.995 9 | 2、3、4、……12、14、16 | 0.636 8 |
| 水旺沟 Shuiwangou | 0.107 | 2-8 | 0.992 0 | 2、3、4、……12、14、16 | 0.582 1 |

3.2 研究流域次降雨水沙状况

表 2 是在 1959 ~ 1969 年的径流泥沙观测资料基础上得到的研究流域(岔巴沟)及各支流域次降雨水沙特征统计分析结果。从表 2 可以看出,研究流域(岔巴沟)次降雨的平均径流总量、平均径流深、平均输沙量和平均侵蚀模数分别为 72.53 万 m³、3.9 mm、51.49 万 t 和 2 754 t km⁻²,土壤侵蚀十分严重;就不同支流域而言,次降雨的平均径流深和平均侵蚀模数相差较大,其中径流深最大值为 4.8 mm、出现在杜家沟岔,最小值为 1.2 mm、出现在黑矾沟;平均侵蚀模数最大值和最小值也出现在杜家沟岔和黑矾沟,分别为 3 569 t km⁻²和 752 t km⁻²;径流深大于 4.5 mm 的三个支流域(杜家沟岔、三川口和蛇家沟)的平均侵蚀模数也分别在 3 000 t km⁻²以上,而径流深小于 3.3 mm 的其他四个支流域(西庄、驼耳

巷、黑矾沟和水旺沟)的平均侵蚀模数均小于 2 240 t km⁻²。可见岔巴沟流域次降雨大水大沙、小水小沙的特征十分明显。

另外,可以看出次降雨径流深相近的两个流域的平均侵蚀产沙模数也存在一定差别,如杜家沟岔和蛇家沟次降雨的径流深分别为 4.8 mm 和 4.7 mm、相差 0.1 mm,但平均侵蚀模数分别为 3 569 t km⁻²和 3 050 t km⁻²、相差 519 t km⁻²;蛇家沟次降雨的径流深(4.7 mm)较三川口的(4.5 mm)大 0.2 mm,而蛇家沟次降雨平均侵蚀模数(3 050 t km⁻²)较三川口的(3 250 t km⁻²)小 200 t km⁻²。可见,虽然岔巴沟流域次降雨水沙特征在总体上呈现大水大沙、小水小沙,但不同支流域之间存在明显差异,导致这种现象的重要下垫面因素之一是地貌形态的差别。

表 2 岔巴沟及各支流域次降雨水沙特征统计

Table 2 Characteristic of runoff and sediment yield from per rainfall of Chabagou watershed

| 流域名称 Watershed name | 流域面积 Watershed area (km ²) | 平均径流总量 Average total runoff (10 ⁴ m ³) | 平均径流深 Average runoff depth (mm) | 平均输沙量 Average transport sediment yields (10 ⁴ t) | 平均侵蚀模数 Average erosion modulus (t km ⁻²) | 次降雨特征 Characteristic of per rainfall | |
|---------------------------|---|--|---|---|---|--|---------------------------------------|
| | | | | | | 雨强范围 Max rainfall intensity (mm min ⁻¹) | 降雨场次 Rainfall number (times) |
| 岔巴沟 Chabagou | 187 | 72.53 | 3.9 | 51.49 | 2 754 | 0.12 ~ 1.83 | 41 |
| 杜家沟岔 Dujiagoucha | 96 | 46.38 | 4.8 | 34.26 | 3 569 | 0.17 ~ 0.73 | 32 |
| 西庄 Xizhuang | 49 | 14.26 | 2.9 | 10.97 | 2 239 | 0.17 ~ 1.59 | 27 |

续表

| 流域名称 Watershed name | 流域面积 Watershed area (km ²) | 平均径流总量 Average total runoff (10 ⁴ m ³) | 平均径流深 Average runoff depth (mm) | 平均输沙量 Average transport sediment yields (10 ⁴ t) | 平均侵蚀模数 Average erosion modulus (t km ⁻²) | 次降雨特征 Characteristic of per rainfall | |
|---------------------------|---|--|---|---|---|--|---------------------------------------|
| | | | | | | 雨强范围 Max rainfall intensity (mm min ⁻¹) | 降雨场次 Rainfall number (times) |
| 三川口 Sanchuankou | 21 | 9.45 | 4.5 | 6.83 | 3 250 | 0.15 ~ 1.66 | 35 |
| 驼耳巷 Tuoerxiang | 5.74 | 1.91 | 3.3 | 0.99 | 1 725 | 0.16 ~ 0.89 | 22 |
| 蛇家沟 Shejiagou | 4.72 | 2.22 | 4.7 | 1.44 | 3 050 | 0.28 ~ 1.16 | 30 |
| 黑矾沟 Heifangou | 0.133 | 0.016 | 1.2 | 0.01 | 752 | 0.15 ~ 1.80 | 11 |
| 水旺沟 Shuiwangou | 0.107 | 0.024 | 2.2 | 0.02 | 1 869 | 0.15 ~ 1.40 | 16 |

3.3 研究流域地貌形态与降雨侵蚀产沙关系模型

3.3.1 模型建立 为进一步阐明流域地貌形态对降雨侵蚀产沙过程的影响,本文利用岔巴沟流域中杜家沟岔、三川口、驼耳巷、黑矾沟和水旺沟五个支流域的 116 场侵蚀性降雨的水沙资料及前文流域地貌形态分形信息维数计算结果,采用多元回归统计法,建立了基于次降雨输沙模数 M_s 、洪峰流量模数 Q_m 、径流深 h 和地貌形态分形信息维数 D_i 的岔巴沟流域地貌形态与次降雨侵蚀产沙耦合关系模型(见式(4))。

$$M_s = 39.129 Q_m^{0.452} h^{0.832} 23.599^{D_i} \quad (4)$$

其中, M_s 为次降雨输沙模数, t km⁻²; Q_m 为次降雨洪峰流量模数, m³ s⁻¹ km⁻²; h 为次降雨径流深, mm; D_i 为地貌形态分形信息维数, 无量纲; r 为复相关系数, 0.979 9。

从式(4)可以看出,以分形信息维数作为流域地貌形态量化指标,并引入流域次降雨水沙关系定量描述中,可避免由于地貌形态因子导致单一水沙关系的空间变异性,将各支流域差异明显的次降雨水

沙关系简化为统一的数学表达, F 检验表明式(4)达到极显著水平。

3.3.2 模型验证 为进一步检验式(4)的精确性,阐明将分形信息维数作为流域地貌形态量化指标并引入流域降雨侵蚀产沙过程预报的可靠性,本文利用式(4)对岔巴沟流域中没有参与构建式(4)的西庄和蛇家沟两个小流域的 57 场侵蚀性降雨的输沙模数进行了预测计算,并将每场降雨的预测计算值与实际观测值进行了对比分析,具体见图 2、图 3 和表 3。

从图 2 和图 3 可看出,西庄流域次降雨输沙模数预测值与实测值的吻合程度小于蛇家沟流域,次降雨侵蚀性降雨输沙模数预测值与实测值最大相对误差出现在西庄流域,为 254.8%,最小相对误差出现在蛇家沟,为 0.8%。实测输沙模数在 1 000 t km⁻² 左右以及小于 100 t km⁻² 的降雨场次预测相对误差较大,一般都在 40% 以上,其中预测相对误差最大(254.8%)的降雨实测输沙模数仅为 82 t km⁻²;其余场次降雨的预测相对误差一般小于 40%。

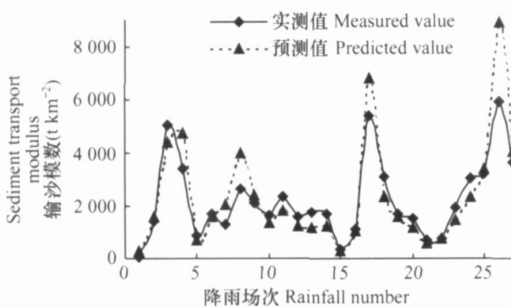


图 2 西庄流域次降雨输沙模数实测值与预测值的关系
Fig. 2 The relationship between Predicted value and measured value of sediment transport modulus in Xizhuang watershed

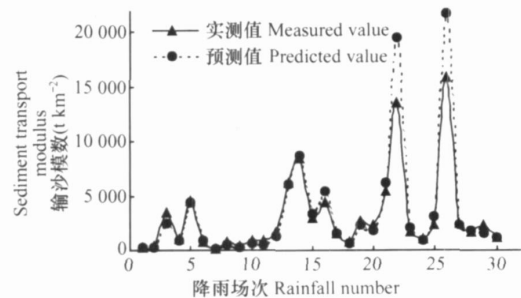


图 3 蛇家沟流域次降雨输沙模数实测值与预测值的关系
Fig. 3 The relationship between Predicted value and measured value of sediment transport modulus in Shejiagou watershed

总体来看,用于检验式(4)可靠程度的57场侵蚀性降雨中预测相对误差小于10%的共13场,占总降雨场次的22.8%;预测相对误差小于20%的共27场,占总降雨场次的47.4%;相对误差小于30%的共43场,占总降雨场次的75.4%;相对误差小于40%的共49场,占总场次的86.0%;相对误差大于40%的共8场,占总场次的14.0%(见表3)。造成

这种误差的原因在于式(4)没有考虑降雨的不均匀分布、植被覆盖程度、土壤类型空间差异和治理程度等其他下垫面因子,但就仅考虑径流和地貌形态两个影响因子所建立的流域侵蚀产沙模型来说,其预测精度是可以接受的,也说明将分形信息维数作为流域地貌形态量化指标引入流域降雨侵蚀产沙预报模型不仅可行,而且可靠。

表3 西庄和蛇家沟流域次降雨输沙模数预测值相对误差分析

Table 3 Relative error of per rainfall sediment transport modulus of Xizhuang and Shejiagou watershed

| 相对误差范围 Variation range of relative error (%) | 降雨场次数 Rainfall number (times) | 占总降雨场次比例 Proportion of total rainfall (%) |
|---|----------------------------------|--|
| 10 | 13 | 22.8 |
| 20 | 27 | 47.4 |
| 30 | 43 | 75.4 |
| 40 | 49 | 86.0 |
| >40 | 8 | 14.0 |

4 结 论

建立具有广泛适用性的流域降雨侵蚀产沙预报模型不仅要求模型构建方法和思路有所创新,更需要对各影响因子的量化方法进行改进,探求能揭示流域尺度各相关因子本质特征的数学量化理论和方法。本文通过对岔巴沟流域降雨侵蚀产沙与以地貌形态分形信息维数为量化指标的流域地貌形态耦合关系的初步探讨,得出如下结论:

1) 岔巴沟各支流域地貌形态在各自无标度区间内均表现出很好的分形特征,其地貌形态分形信息维数 D_i 均小于1;

2) 引入地貌形态分形信息维数的流域水沙关系模型将岔巴沟各支流域差异明显的水沙关系简化为统一的数学表达,消除了单一水沙关系由于地貌形态等下垫面因素导致的空间变异性;

3) 基于地貌形态分形信息维数的岔巴沟流域水沙关系模型经西庄和蛇家沟两个小流域57场侵蚀性降雨的验证和检验,相对误差小于等于30%的降雨场次所占比例达到75.4%,可见以地貌形态分形信息维数作为流域降雨侵蚀产沙预报模型中地貌形态因子量化指标不仅可行,而且可靠。

参 考 文 献

[1] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展. 地理研究, 2001, 20(3): 275~281. Zhang G H. Development of soil erosion models in China (In Chinese). Geographical Research, 2001, 20(3): 275~281

[2] 白清俊. 流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望. 人民黄河, 1999, 21(4): 18~21. Bai Q J. Development of watershed soil erosion models research (In Chinese). Yellow River, 1999, 21(4): 18~21

[3] 贾媛媛, 郑粉莉, 杨勤科. 黄土高原小流域分布式预报模型. 水利学报, 2005, 36(3): 328~332. Jia Y Y, Zheng F L, Yang Q K. Distributed water erosion prediction model for small watershed in Loess Plateau (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 328~332

[4] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. 土壤侵蚀与水土保持学报 1996, 2(1): 1~9. Jiang Z S, Wang Z Q, Liu Z. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in small watershed in Loess Hilly Region (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 1~9

[5] 刘黎明, 林培. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀定量方法与模型的研究. 水土保持学报, 1993, 7(3): 73~79. Liu L M, Lin P. Study on model and quantitative method of soil erosion in hilly region of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(3): 73~79

[6] 白占国. 地貌条件与土壤侵蚀关系的定量研究. 陕西师范大学学报, 1992, 20(2): 63~66. Bai Z G. Study on quantitative relationship between topographical conditions (In Chinese). Journal of Shaanxi Normal University, 1992, 20(2): 63~66

[7] 李矩章, 景可, 李凤新. 黄土高原多沙粗沙区侵蚀模型探讨. 地理科学进展, 1999, 18(1): 46~53. Li J Z, Jing K, Li F X. Study on the erosion model in area with high and coarse sediment yield (In Chinese). Progress in Geography, 1999, 18(1): 46~53

[8] 卢金发. 黄河中游流域特性对产沙量与降雨关系影响. 地理学报, 2000, 55(6): 737~743. Lu J F. Effect of geographical characteristics of river basins on relation of sediment yield and rainfall in the middle Yellow River (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55(6): 737~743

[9] 尹国康, 陈钦彦. 黄土高原小流域特征性指标与产沙统计模

- 式. 地理学报, 1989, 44(1):32~44. Yin G K, Chen Q L. Characteristic index and statistical model of sediment yield in small drainage basins of Loess Plateau in China (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(1):32~44
- [10] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 等. 不同土地利用/ 土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征. 土壤学报, 2005, 42(2):336~339. Hu Y F, Liu J Y, Zhuang D F, *et al.* Fractal dimension of soil particle size distribution under different land use/ land coverage (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2):336~339
- [11] 王协康, 方绎. 流域地貌系统定量研究的新指标. 山地研究, 1998, 16(1):8~12. Wang X K, Fang D. A new index of quantitative study on the drainage geomorphic system (In Chinese). *Mountain Research*, 1998, 16(1):8~12
- [12] 朱永清, 李占斌, 崔灵周. 流域地貌形态特征量化研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(9):149~154. Zhu Y Q, Li Z B, Cui L Z. The quantification study of watershed topography characteristics (In Chinese). *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.)*, 2005, 33(9):149~154
- [13] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用——分形地貌学研究综述及展望. 地理研究, 1994, 13(3):104~111. Zhang J, Bao H S. Fractal geomorphology: Review and prospect (In Chinese). *Geographical Research*, 1994, 13(3):104~111
- [14] 秦耀辰, 刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展. 地理科学进展, 2003, 22(4):426~436. Qin Y C, Liu K. Advancement of applied studies of fractal theory in geography (In Chinese). *Progress in Geography*, 2003, 22(4):426~436
- [15] 程先富, 史学正. 分形几何在土壤学中的应用及其展望. 土壤, 2003, 35(6):461~464. Cheng X F, Shi X Z. Application of fractal geometry in pedology and its prospects (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(6):461~464
- [16] 刘慧, 刘建立. 估计土壤水分特征曲线的简化分形方法. 土壤, 2004, 36(6):672~674. Liu H, Liu J L. A simplified fractal method to estimate soil water retention characteristics (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(6):672~674
- [17] 李猛, 朱令人, 龙海英. 不同类型地貌的各向异性分形与多重分形特征研究. 地球学报, 2003, 24(3):237~242. Li M, Zhu L R, Long H Y. On Fractal and multifractal properties for different types of landforms (In Chinese). *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(3):237~242
- [18] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. 土壤学报, 2005, 42(4):545~550. Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4):545~550
- [19] 朱晓华, 杨秀春, 蔡运龙. 中国土壤空间分布的分形与分维. 土壤学报, 2005, 42(6):881~888. Zhu X H, Yang X C, Cai Y L. Fractal and fractal dimension of spatial distribution of China soil system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6):881~888
- [20] 朱永清, 李占斌, 崔灵周. 基于 GIS 地貌形态特征分形信息维数与等高距关系研究. 水土保持学报, 2005, 19(1):105~108. Zhu Y Q, Li Z B, Cui L Z. Study on relationship between topography characteristics fractal information dimension and contours line interval base on GIS (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):105~108
- [21] 朱永清, 李占斌, 鲁克新, 等. 地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系研究. 水利学报, 2005, 36(3):333~338. Zhu Y Q, Li Z B, Lu K X, *et al.* Relationship between fractal dimensions of watershed topography characteristics and grid cell size (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3):333~338
- [22] 崔灵周, 李占斌, 肖学年. 基于 GIS 技术的流域地貌形态分形盒维数测定方法研究. 水土保持通报, 2004, 24(2):38~40. Cui L Z, Li Z B, Xiao X N. GIS-based approach for measuring the fractal box dimension of watershed topography (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(2):38~40
- [23] Cheng Z H, Zhang J B, Zhu A N. Introducing fractal dimension to estimation of soil sensitivity to preferential flow. *Pedosphere*, 2002, 12(3):201~206
- [24] Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method. *Pedosphere*, 2006, 16(2):137~146
- [25] Liu J L, Xu S H. Applicability of fractal models in estimating soil water retention characteristics from particle-size distribution data. *Pedosphere*, 2002, 12(4):301~308

FRactal-Information-Dimension-Based Relationship Between Sediment Yield and Topographic Feature of Watershed

Cui Lingzhou^{1,2} Li Zhanbin^{2,3} Guo Yanbiao⁴ Zhu Yongqing^{2,5}

(1 School of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325027, China)

(2 Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(5 Monitoring Center Station of Changjiang Valley Water and Soil Conservation, Wuhan 430010, China)

Abstract Scientific accurate quantification of topographic feature of watershed is one of the key issues in establishing an

extensively applicable model for prediction of soil erosion on a watershed scale on Loess Plateau. Based on the fractal theory and with the aid of the GIS technology and multianalysis method, coupling relationship between sediment yield from rainfall erosion and topographic features was studied in the Chabagou watershed, which lies on Loess Plateau. Results show that the coupling relationship model, into which fractal information dimension of topographic feature of watershed is introduced, can simplify the relationship between runoff and sediment yield that varies from branch to branch of the Chabagou watershed to a uniform mathematic expression. As a whole, the relative error of the prediction of sediment transport modulus of the Xizhuang and Shejiagou watersheds using the model is low. It is feasible and reliable to use fractal information dimension of topographic features of watershed as an index to quantify topographic features of watershed, which is one of the important influencing factors in establishing models for soil erosion prediction on a watershed scale.

Key words Chabagou watershed; Topographic feature of watershed; Fractal information dimension; Erosion and sediment yield