

流域非点源污染与水系分维关系研究

荣 琨¹, 陈兴伟², 王 林², 林文娇², 高 杨²

(1. 福建师范大学 化学与材料学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007)

摘 要: 以东南沿海晋江西溪流域为例, 初步研究了流域非点源污染与水系分维的关系。以 ArcView GIS 3.2 为研究平台, 运用水系分维的计盒方法, 计算了晋江西溪流域水系的宏观分维和划分为 5 个亚流域的微观分维, 根据应用 SWAT 模型的模拟结果分析了西溪各亚流域非点源污染负荷与相应水系分维值的关系。研究结果表明, 水系分维值越大, 农田面积比例越大, 流域土壤侵蚀程度越大, 因此非点源污染负荷越大; 此方法为流域非点源污染研究提供了新的途径。

关键词: 地理信息系统; 水系分维; 非点源污染; 西溪流域

中图分类号: S157; P349.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)02-0128-04

Research on the Relationship Between Non-point Source Pollution and River Fractal Dimension

RONG Kun¹, CHEN Xing-wei², WANG Lin², LIN Wen-jiao², GAO Yang²

(1. College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: By taking Xixi watershed of the southeast coastal area as an example, the relationship between the non-point source pollution and the river fractal dimension is preliminarily studied. Using ArcView GIS 3.2, the fractal dimension of Xixi watershed and its five subbasins have been calculated with the box-counting method. According to the SWAT model simulation results, the relationship between the non-point source pollution and the river fractal dimension of the five subbasins is analyzed. The results show that, the higher the watershed fractal dimension is, the higher the farmland area ratio is, and more serious the soil erosion is, so more serious the non-point source pollution is. The fractal analysis can bring forward a new method for the study of non-point source pollution.

Key words: geographic information system; watershed fractal dimension; non-point source pollution; Xixi watershed

自从 1977 年分维理论的创始人 Mandelbrot^[1] 首先把分维研究引入流域地貌研究以来^[2], 国内外学者^[3-8] 对地貌特征量间的统计分维进行了研究, 发现水系分维与地貌发育、地貌类型、土地利用等因素密切相关。水系分维反映的是水系所处流域地貌侵蚀发育的程度, 水系分维的差异反映的是流域地貌发育程度的差异, 当水系的分维值小于 1.6 时, 流域地貌处于侵蚀发育的幼年期, 分维值越接近 1.6, 流域地貌越趋于幼年晚期^[4]。河网密度及切割强度越

高, 水系分维值越高, 且地貌类型为低地和平原, 其水系分维值较高^[5]; 水系分维可以反映河流的平均河网密度^[8], 反映地面被径流切割的程度, 从而间接反映出区域土壤侵蚀的程度^[7]。但目前国内的水系分维研究大多运用 GIS 技术分析数字高程模型 (DEM), 计算分维值, 而对水系分维值的生态环境意义研究较少。研究^[9-10] 还表明非点源污染与径流量、土地利用也关系密切, 径流量及切割强度越大, 非点源污染负荷越高, 且主要地处于低地平原的农

* 收稿日期: 2008-09-10

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目 (D0710007)

作者简介: 荣琨 (1983-), 男, 山东滨州人, 在读硕士, 主要从事水环境方面的研究。E-mail: rongkun_007@163.com

通信作者: 陈兴伟 (1963-), 男, 福建福鼎人, 教授, 博导, 主要从事水资源及水环境研究。E-mail: cxwchen215@163.com

田面积越大, 非点源污染负荷越高。从上述结论看, 水系分维值、非点源污染负荷均与土地利用等有密切关系, 水系分维与非点源污染应该存在某种相关性。由于非点源污染的难以监测等特点, 目前流域非点源污染的定量化研究大都通过 SWAT、AG-NPS 等模型模拟研究。因此, 本文以东南沿海晋江西溪流域为例, 基于该流域 SWAT 模型的非点源污染模拟和水系的分维值计算, 来探讨流域非点源污染与水系分维的关系。

1 基于 GIS 的西溪流域分维研究

1.1 水系分维计算方法

目前, 水系分维常用的计算方法是传统的计盒方法。设粗视化网格的边长为 ε , 包含河流片段的网格数为 $N(\varepsilon)$, 当 ε 不断变化时, 即对应一组 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_k$, 得到一组 $N(\varepsilon_1), N(\varepsilon_2), N(\varepsilon_3) \dots$, 以点 $(\ln \varepsilon, \ln N(\varepsilon))$ 为坐标作双对数图, 用最小二乘法可以拟合一条直线:

$$\lg N(\varepsilon) = A - D \lg \varepsilon \tag{1}$$

直线的斜率 D 即为水系分维数。可以利用不同的比例尺进行测量, 计算河长、河网密度的分维数, 河网的形态特征一般用河网密度来表示^[6]。比例尺比值不同时对应不同的 ε , 分别对河长和河网中的干支流总长度进行测量, 得到不同测量次数 $N(\varepsilon)$, 代入式(1), 进行直线拟合所得斜率 D 分别为河长分维数 D_l 和河网分维数 D_n ^[11]。

研究选用 1: 10 000 栅格形式(30 m×30 m) 的 DEM, 运用美国 ESRI 公司地理信息系统软件 ArcView GIS 3.2 的水文分析功能^[12], 结合水系分维的计盒方法, 对西溪流域进行水系的河网分维研究。

1.2 西溪全流域水系分维结果分析

晋江流域是福建省内水土流失最严重的流域之一, 年均侵蚀模数为 835 t/km²^[13], 非点源污染比较严重。晋江西溪发源于福建省安溪县戴云山脉东麓的梯仔岭, 向东南流经福建东南部泉州市的安溪、永春、南安等县, 研究区内的西溪全长 105 km, 流域集水面积约 2 451 km², 占晋江流域总面积的 55%。晋江有东西两源, 其正源为西溪, 两溪汇于南安的双溪口。晋江西溪流域海拔在 50~ 1 500 m, 其中海拔在 200 m 以下的占 12. 15%; 境内地形以山地丘陵为主。土地利用以林地(49%)、草地(25%)、水田(11%) 和旱地(10%) 等 4 类为主, 约占 95%^[14]。

通过计算得到西溪流域水系分维的相关系数都在 0. 999 以上, 说明网格边长取值范围在 50~ 4 000 m 能很好地作为该分维的无标度区间。计盒方法

计算的西溪流域水系分维值为 1. 058 7, 此值与王林^[15] 等人应用水系的河网分维方法通过 ArcView GIS 3. 2 软件计算得到的晋江流域水系分维值 1. 056 相近。

1.3 西溪各亚流域水系分维结果分析

水系分维的研究可分为宏观与微观两方面, 从整个流域的角度来探讨的分维可称为水系的宏观分维, 目前大多数对水系分维的研究都是宏观上的^[8], 当要进行流域间的比较研究时, 宏观分维是具有参考价值的。就河网的分维来说, 对于同一流域的不同亚流域, 它们的土地利用、地貌类型、侵蚀发育程度等都不完全相同, 其水系的河网分维(微观分维) 也是不同的。就本文所要探讨的非点源污染问题来说, 对于不同的亚流域, 其非点源污染负荷是不同的, 那么其水系宏观分维的意义就不大了。

因此, 研究流域内部水系分维与非点源污染的关系时, 要从微观上考虑, 把流域根据某一标准划分为若干个亚流域, 分别计算出每个亚流域的水系分维, 然后把各亚流域的水系分维值与该亚流域的产沙量、非点源污染负荷等对应起来研究, 只有这样对水系分维的研究才有实际意义。基于上述想法, 将晋江西溪流域划分为 5 个亚流域如图 1 所示。计算某亚流域的水系分维时, 采用了实际距离从 50~ 4 000 m 不等的栅格边长来进行网格分析, 算出的各亚流域水系分维值如表 1 中所示。表中的各分维值, 其相关系数均在 0. 999 以上, 说明网格边长取值范围(实际距离 50~ 4 000 m) 能很好地作为该分维的无标度区间, 在该区间内分维值能很好地反映流域河网的特征。

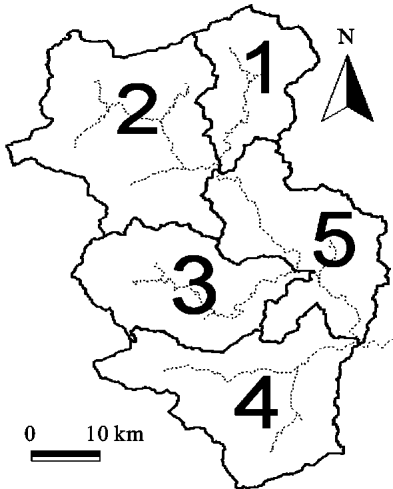


图 1 西溪流域水系图及亚流域划分

2 非点源污染研究

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型

是 20 世纪 90 年代初美国农业部(USDA) 开发的分布式非点源污染负荷模型, 主要用于模拟土地管理措施对农业非点源污染物排放的影响, 包括水文、土壤侵蚀和营养物迁移等子模型。SWAT 模型的水文子模型采用 SCS 曲线数方程 CN(Curve Number) 进行计算, 土壤侵蚀子模型采用 MUSLE 方程预测土壤侵蚀量, 对于河道内的水质变化, 模型采用 QUAL2E 模型进行模拟。模型运行时, 首先将研究流域按一定的面积阈值划分为若干个子流域, 在子流域上进一步按土地利用与土壤划分水文响应单元(HRU), 并应用各子模型来估算 HRU 上的径流、泥沙和污染物产生量, 通过河道汇流演算, 最后求得出口断面流量、泥沙和污染负荷^[16]。

晋江西溪流域产流模拟的 SWAT 模型见文献

表 1 西溪及各亚流域指标值

流域	水系分维值	面积/ hm ²	农田面积 比例	产沙模数/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总氮流失/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总磷流失/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)
全流域	1. 05870	245053	0. 2100	8254	6. 25	1. 08
亚流域 1	1. 05858	28839	0. 1255	3003	5. 03	0. 82
亚流域 2	1. 05741	66997	0. 13942	3347	5. 59	0. 97
亚流域 3	1. 05647	43860	0. 20204	5972	6. 02	0. 92
亚流域 4	1. 06839	57061	0. 24995	17270	7. 26	1. 38
亚流域 5	1. 06923	48296	0. 23921	9616	6. 92	1. 19

3 流域分维与非点源污染的关系

从表 1 和图 2 可以看出, 西溪各亚流域的农田面积比例与水系分维值有较强的相关性, 两者的相关系数(*R*) 为 0. 8, 说明分维值越高, 其农田面积比例相对越大, 反之越小。

从表 1 和图 2 还可以看出, 西溪各亚流域的产沙模数与水系分维值也有较强的相关性, 两者的相关系数(*R*) 为 0. 82, 说明分维值越高, 其产沙量相对越大, 反之越小。

分析表 1 和图 3 所示结果, 可以看出, 亚流域 1、亚流域 2 和亚流域 3 的水系分维值分别为 1. 058 58, 1. 057 41 和 1. 056 47, 低于亚流域 4 和亚流域 5 的 1. 068 39和 1. 069 23, 前三个亚流域总磷流失量分别为 0. 82 kg/(hm²·a)、0. 97 kg/(hm²·a) 和 0. 92 kg/(hm²·a), 也低于后两个亚流域的 1. 38 kg/(hm²·a) 和 1. 19 kg/(hm²·a)。前三个亚流域的水系分维值相差不多, 其总磷流失量也相差不多, 后两个亚流域的水系分维值变化不大, 其总磷流失量也变化很小, 总磷流失量与分维值的相关系数(*R*) 为 0. 86, 有较强的相关性。从图 3 中可以发现, 总氮流失量与分维值也存在上述关系, 总氮流失量与分维值的相关系

[17]。在此基础上, 开展了非点源污染的模拟分析^[18]。径流模拟的校准期(1972– 1975 年) 月模拟效率系数(*E_{ns}*) 为 0. 91, 相关系数(*R*²) 为 0. 92; 径流模拟的验证期(1976– 1979 年) 月模拟 *E_{ns}* 为 0. 85, *R*² 为 0. 90。产沙模拟中以 1972 年为预热期, 1973– 1979 年的产沙月模拟 *E_{ns}* 为 0. 63, *R*² 为 0. 65, 7 年平均相对误差(*RE*) 为– 14. 1%。非点源污染模拟中以 1972 年为预热期, 1973– 1979 年的氨氮年模拟 *E_{ns}* 为 0. 69, *R*² 为 0. 95, 7 年平均 *RE* 为– 18. 6%; 同期矿物磷年模拟 *E_{ns}* 为 0. 79, *R*² 为 0. 85, 7 年平均 *RE* 为– 1. 5%。通过 SWAT 模型模拟输出文件中的亚流域输出文件(. bsb), 可以得出西溪及其亚流域模拟期 7 a 的年均产沙量、非点源污染负荷^[18] 如表 1 中所示。

数(*R*) 为 0. 89, 相关性也较强。以上分析表明, 非点源污染负荷越大, 水系分维值也越大。

究其原因, 根据王倩等人^[5] 的研究, 水系分维值与地貌类型、土地利用有密切关系, 低地和平原的水系分维值较高, 且农田主要分布在分维值较高的区域; 而同时山地和丘陵的水系分维值较低, 且森林植被主要分布于分维值较低的区域。晋江西溪流域特征也反映了这一点, 表明农田面积比例越大, 水系分维值越大。由于产沙量与土地利用也有密切关系, 农田的产沙模数较森林高, 同时农田多分布于水系分维值较高的区域, 所以水系分维值较高的区域产沙模数也较高^[6]。

由于水系分维可以反映河流的平均河网密度^[8], 分维值越大, 河网密度越大, 径流量、地面被径流切割的程度^[7]、泥沙流失量均越大^[6], 而径流和泥沙是非点源污染物的两种载体, 所以非点源污染负荷也越大; 此外, 水系分维值还反映了土地利用信息, 水系分维值大的区域农田相对较多、林地相对较少^[5], 而农田面积越大、林地覆盖面积越小则非点源氮磷负荷越大^[10]。因此, 水系分维值直接或间接反映了径流、泥沙流失、土地利用等多种信息, 水系分维值越大, 非点源污染负荷越大。

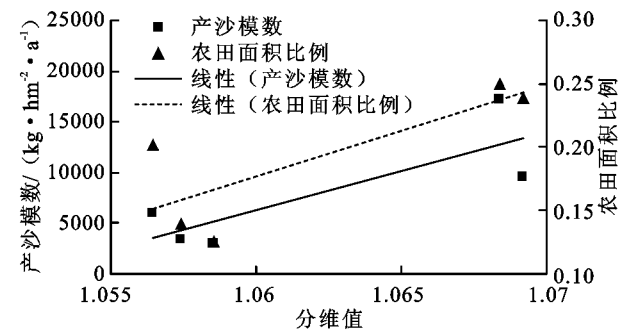


图 2 各亚流域分维与农田面积比例、产沙模数关系

4 结论

(1) 晋江西流域的亚流域水系分维值越大, 农田面积比例越大, 土壤侵蚀程度越大, 因而非点源污染负荷越大。

(2) 对流域非点源污染与水系分维关系的初步分析, 为流域非点源污染研究提供了一个新的方法与手段, 有一定的参考借鉴, 值得进一步探讨。

参考文献:

[1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain. [J]. Science, 1967, 155: 636.

[2] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: WH Freeman and Company, 1983.

[3] La Barbera P, Rosso R. On the fractal dimension of river networks[J]. Water Resources Research, 1989, 25(4): 735.

[4] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 124-128.

[5] 王倩, 邹欣庆, 朱大奎. 基于 GIS 技术的秦淮河流域水系分维研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(6): 751-756.

[6] 王秀春, 吴姍, 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.

[7] 刘新华, 张晓萍, 杨勤科, 等. 不同尺度下影响水土流失地形因子指标的分析与选取[J]. 西北农林科技大学

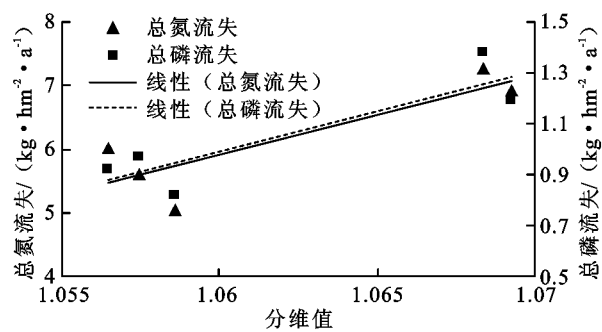


图 3 各亚流域分维与总磷流失、总氮流失关系

学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 107-111.

[8] 马宗伟, 许有鹏, 李嘉峻. 河流形态的分维及与洪水关系的探讨[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 530-534.

[9] 万超. 潘家口水库上游流域面源污染的模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.

[10] 张运生. GIS 和遥感辅助下的江西潦水河流域化学径流计算机模拟探讨[D]. 南京: 南京师范大学, 2003.

[11] 冯平, 冯炎. 河流形态特征的分维计算方法[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 324-330.

[12] 汤国安, 陈正江. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 158-167.

[13] 王新, 郑本暖, 林桂志, 等. 关于晋江流域水土流失类型划分的探讨[J]. 福建水土保持, 2002, 14(4): 32-36.

[14] 陈志强. 区域多尺度 LUCC 及空间数据库研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2006.

[15] 王林, 陈兴伟. 基于 DEM 的流域水系分维计算与结果分析[J]. 地球信息科学, 2007, 9(4): 133-136.

[16] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et. al. Soil and Water Assessment Tool Manual, Version 2000[EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/>. 2002

[17] 王林, 张明旭, 陈兴伟. 基于 SWAT 模型的晋江西流域径流模拟[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 28-33.

[18] 荣琨, 陈兴伟, 林文娇. 晋江西流域非点源污染的 SWAT 模型模拟[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(4): 37-43.