

应用分形理论估算丹江口水库 水源区总氮、总磷的流失量

李中原¹, 王国重², 左其亭³, 屈建钢⁴

(1. 河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003; 2. 黄河水文水资源科学研究所, 河南 郑州 450004;
3. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 4. 河南省水土保持监督监测总站, 河南 郑州 450008)

摘要: [目的] 掌握区域农业面源污染物的流失状况, 证明分形计算结果的可靠性。[方法] 采用分形理论对丹江口水库水源区河南省所在的区域 2013 年总氮(TN), 总磷(TP)的流失量进行估算, 并与输出系数法的值进行比较。[结果] 研究区污染物的流失以氮为主, TN 的流失量是 TP 的 7.16 倍; 禽畜养殖引起的流失量最多, 占了总量的 69.93%, 农田化肥中的流失量占 21.99%; 灌河产生的污染物最多, 其次是丹江、淇河、滔河, 但在流失强度上却是滔河最大, 其次是灌河、丹江、淇河; 通过配对 *t* 检验分析将分形方法计算的污染物总量与输出系数法相比, 在 0.1 水平下有统计学意义, 说明前者较后者更能反映实际。[结论] 用分形方法估算区域污染物的面源污染是可行的, 应当加强区域禽畜粪尿和农田化肥的管理, 以确保丹江口水库水质。

关键词: 分形理论; 水系分维; 农业面源污染; TN, TP 流失

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)03-0302-05

中图分类号: X524

文献参数: 李中原, 王国重, 左其亭, 等. 应用分形理论估算丹江口水库水源区总氮、总磷的流失量[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 302-306. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170407.001; Li Zhongyuan, Wang Guozhong, Zuo Qiting, et al. Applying fractal theory to estimate loss of total nitrogen and total phosphorus in Danjiangkou reservoir catchment[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 302-306. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170407.001

Applying Fractal Theory to Estimate Loss of Total Nitrogen and Total Phosphorus in Danjiangkou Reservoir Catchment

LI Zhongyuan¹, WANG Guozhong², ZUO Qiting³, QU Jiangan⁴

(1. Hydrology and Water Resources Bureau in Henan Province, Zhengzhou, He'nan 450003, China;
2. Hydrology and Water Resources of Yellow River Scientific Research Institute, Zhengzhou, He'nan 450004, China,
China; 3. College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450001, China;
4. Soil and Water Conservation Supervision and Inspection Station in Henan Province, Zhengzhou, He'nan 450008, China)

Abstract: [Objective] To grasp the situation of agricultural non-point source pollution in Danjiangkou reservoir catchment areas in He'nan Province, and to prove the reliability of the fractal theory calculation results. [Methods] The fractal theory was applied to estimate the loss of total nitrogen(TN) and total phosphorus (TP) in the Danjiangkou reservoir region of He'nan Province in 2013. The estimated values were compared with the ones from output coefficient method. [Results] Pollutants loss was given priority to with nitrogen in the area, the TN loss was 7.16 times of TP loss. The livestock farming contributed the largest amount of loss, accounting for 69.93% of the total loss. The second was the loss from farmland fertilizer, taking up 21.99% of the total one. The pollutant yield of Guanhe River was the most, followed by Danjiang River, Qihe River and Taohe River. The pollutant erosion intensity had a rank as Taohe River > Guanhe River > Danhe River > Qihe River. The significant paired T test (< 0.1) showed that the pollutant total amounts calculated by fractal method was coincided with the ones by output coefficient method, which indicated the former could reflect the actual situation more than that of the latter. [Conclusions] Fractal method is feasible to estimate

logical agricultural non-point source pollution. It is time to strengthen management of livestock manure and chemical fertilizer to ensure the water quality of Danjiangkou Reservoir.

Keywords: fractal theory; fractal dimension of water system; agricultural non-point source pollution; total nitrogen and total phosphorus loss

大大小小、蜿蜒曲折的河流交汇形成水系,如何反映和分析这种蜿蜒特性及其网状结构的问题一直困扰着学术界。Mandelbrot 1977 年率先将分形的概念引入了地理水文学,开辟了流域地貌形态特征定量研究的先河^[1]。1982 年其专著“自然界的分形几何”的出版,标志着分形理论的初步形成^[2]。分形理论给人类研究自然界纷繁复杂的客观规律及其内在联系提供了新的思路和方法,其优势在于能够揭示看起来支离破碎、处处不可微、不光滑,貌似混乱、无规则、随机现象的内部规律,能够准确、完整地界定实物的主流趋势性质,这是传统方法难以达到的,因而也成为人类解决复杂问题的有力工具。

农业面源污染具有随机性、分散性、隐蔽性、广泛性和不确定性的特点,难以监测,一般需借助模型来定量分析,如 SWAT, AGNPS, SWMM 等^[3]。这些模型含有大量反映土壤、水文、气象、土地利用等方面的参数,且参数的率定过程较为繁琐,其模拟的精度就会大打折扣^[4-5]。输出系数法所需参数少、操作便捷、有一定的精度,而且不计污染产生与发展的过程,因此颇受研究者的青睐^[6]。

农业面源污染带有非线性的特征^[7],就可以采用分形理论来研究区域的农业面源污染,但是这方面的报道目前还比较少见。河流水系分形是目前分形研究的热点,大量研究表明:水系分维数与地貌的发育、地貌的类型、土地的利用等因素密切相关,水系分维数不仅反映了水系的发育程度,还代表它所处流域的地貌侵蚀发育的阶段^[8-9]。但许多研究只是通过 GIS 软件计算水系的分维数,而没有作进一步的研究^[10],

如将水系分维数与环境污染、流域生态相联系。

农业面源污染是影响丹江口水库水质的首要污染源^[11],总氮(TN),总磷(TP)又是导致农业面源污染的主要因素^[12]。本研究拟以丹江口水库水源区河南省所在的区域为研究对象,根据 ArcGIS 软件计算的水系分维值,结合对该区域农业面源污染情况的调查,运用分形理论来估算该区域 TN, TP 的污染情况,并与输出系数法的结果相比较,以期说明分形计算结果的可靠性。

1 研究区概况

丹江口水库由位于湖北省境内的汉库和位于河南省境内的丹库组成,丹库正是所要研究的区域,地处河南省西南部,包含南阳市的西峡县、淅川县,以及内乡县、邓州市、三门峡卢氏县、洛阳栾川县的部分乡镇,流域总面积为 8 047 km²,位于东经 110°52′—112°,北纬 32°54′—34°,海拔 121~2 212.5 m。

区域水系主要为丹江及其支流灌河、淇河和滔河。丹江全长 378.6 km,源于陕西凤凰山,经商南县月亮湾入淅川,在淅川境内长 116.6 km,自滔河镇申明铺以下为丹江口库区;老灌河发源于栾川县小庙岭,经卢氏和西峡县,在淅川县注入丹江,上集镇奕子营以下为库区;淇河发源于卢氏县花园寺西,至淅川县寺湾乡老君洞附近汇入丹江,全长 150 km;滔河发源于陕西商南县白鲁础乡白龙洞,流经商南县、郟县,在淅川县滔河乡滔河街注入丹江,河流全长 155.2 km。根据河南省 2014 年的统计年鉴,结合走访调查,确定了各水系的人口、耕地面积、畜禽养殖情况(表 1)。

表 1 丹江口水库 2013 年基本情况

水系	大牲畜/头	猪/头	羊/只	家禽/只	人口/万	耕地/10 ⁴ hm ²	流域面积/km ²
灌河	107 197	383 528	242 668	3 754 258	83.21	2.770	4 220
淇河	24 101	60 927	51 317	660 212	7.91	0.346	1 500
丹江	114 176	431 567	191 966	4 108 925	53.47	4.950	7 400
滔河	9 760	27 608	15 665	314 282	5.50	0.320	11

2 计盒维数的计算与输出系数法简介

2.1 计盒维数的计算

分形维数是分形理论的主要参数,有多种定义和计算方法,如:相似维数(D_s)、豪斯道夫维数(D_H)、计盒维数(D_b)、信息维数(D_i)、关联维数(D_g)、容量维数(D_C)等。其中,计盒维数(D_b)因计算简便而最为

常用,反映的是分形体对空间的占据程度,用边长为 r 的小方盒子去覆盖分形体,非空小方盒的数量记为 $N(r)$,不断缩小 r 的取值,相应地得到一系列的 $N(r)$ 值,当 $r \rightarrow 0$ 时,则计盒维数定义为:

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

实际的工作中,一般是借助 ArcGIS 软件利用网

格法来计算计盒维数^[13]。GIS 技术可以获得研究区的总体数据,比传统的人工计算或计算机编程计算更为客观、准确、经济、高效。具体步骤如下:

(1) 先由 ArcGIS 工具箱中的 conversion tools 工具设置需要输出的栅格尺寸,将矢量河网数据转换成栅格文件;

(2) 打开相应栅格文件的属性表,统计栅格数量;

(3) 由 Excel 软件将相应数据点绘在双对数坐标图上,相应直线的斜率即为水系分维数。

由中国科学院计算机网络信息中心数据平台获得该区域的 DEM 数据,采用 ArcGIS 软件和网格法提取并计算各水系的计盒维数。水系分维数乘以不同污染物的平均流失率,就得到了考虑下垫面作用的面源污染物的流失率^[14]。

2.2 输出系数法简介

输出系数法就是利用污染物输出系数估算流域输出的面源污染负荷,20 世纪 70 年代初北美国在评价土地利用和湖泊富营养之间的关系时提出的,经不断完善与发展,该法在大的流域尺度上也有一定的精度,其表达式一般为:

$$L_j = \sum_{i=1}^n C_{ij} \times A_i + P \quad (2)$$

式中: L_j ——流域内污染物 j 的总负荷 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; j ——污染物类型; i ——流域内土地、禽畜或人口分类,共有 n 类; C_{ij} ——污染物 j 在第 i 类土地、牲畜、人口的输出系数; A_i ——第 i 类土地的面积 (hm^2) 或牲畜(头)、人口(人)的数目; P ——降雨输入的污染物数量 $[t/(hm^2 \cdot a)]$,这里不考虑此项的影响。

3 结果与分析

3.1 各水系面源污染物 TN,TP 的流失率

中国农用化肥流失率普遍较高,其中氮肥流失率 10%~25%,磷肥流失率 4%~5%,这是因为磷元素能被土壤强烈吸附。根据对研究区西峡县、淅川县施肥及其流失情况的调查,结合统计年鉴以及前人的研究^[15],确定研究区 2013 年氮、磷的流失率分别取该年施肥量的 12.5%和 3%。全国范围内畜禽排泄物中粪便的流失率为 2%~8%,液体排泄物的流失率则可达到 50%^[16]。

研究区养殖较多的是大牲畜、猪、羊和家禽,根据对养殖业污染调查结合相关研究结果^[17],确定了畜禽排泄物相应的流失率(表 2)。根据研究区农民的生活习惯和生活方式,按 5%计算村民粪尿流入水体的量,生活污水的流失率为 50%^[18]。

表 2 丹江口水库禽畜粪污的流失率

污染物	流失率/%					
	大牲畜粪	大牲畜尿	猪粪	猪尿	羊粪	家禽粪
TN	5.70	50	1.09	25	5.3	1.09
TP	5.50	50	0.17	25	5.2	1.16

注:大牲畜粪、尿值为牛、马、骡、驴的均值;家禽粪为鸡、鸭、鹅粪的均值。下同。

各水系所在的地域和环境条件不同,污染物的流失率必然有差异。分形作用下农田、禽畜养殖、农村生活污水的流失率如表 3—4 所示。

表 3 分形对丹江口水库农田化肥、村民生活中 TN,TP 流失率的影响

水系	分维	TN 流失率/%			TP 流失率/%		
		农田化肥	人粪尿	生活污水	农田化肥	人粪尿	生活污水
灌河	1.019	0.127	0.051	0.510	0.031	0.051	0.510
淇河	1.034	0.129	0.052	0.517	0.031	0.052	0.517
丹江	1.020	0.128	0.051	0.510	0.031	0.051	0.510
滔河	0.999	0.125	0.050	0.499	0.023	0.050	0.499

表 4 分形对丹江口水库农村禽畜养殖中 TN,TP 流失率的影响

水系	分维	类型	分形对农村禽畜养殖中 TN,TP 流失率的影响/%					
			大牲畜粪	大牲畜尿	猪粪	猪尿	羊粪	家禽粪
灌河	1.019	TN	0.058	0.510	0.011	0.255	0.054	0.011
		TP	0.056	0.510	0.002	0.255	0.053	0.012
淇河	1.034	TN	0.059	0.517	0.011	0.259	0.055	0.011
		TP	0.057	0.517	0.002	0.259	0.054	0.012
丹江	1.020	TN	0.058	0.510	0.011	0.255	0.054	0.011
		TP	0.056	0.510	0.002	0.255	0.053	0.012
滔河	0.999	TN	0.057	0.500	0.011	0.250	0.053	0.011
		TP	0.055	0.500	0.002	0.250	0.052	0.012

水系分维反映了水系发育的复杂程度,分维数越大说明水系发育的越好。由表4可知,由于引入了分形维数,各水系的TN,TP流失率随着分维值的不同而不同,淇河水系TN,TP的流失率稍大,因其分维值稍大,相应的滔河的流失率较低。

3.2 面源污染物TN,TP的流失量

污染物的流失率乘以其产生量既为污染物的流失量。据实地调查,河南省2014年统计年鉴和相关文献[19-20],结合河南省农村生活用水定额和生活污水排放标准,确定了研究区2013年各水系农田化肥中TN,TP的施用量、禽畜养殖中TN,TP的排

量、生活污染物中TN,TP的产生量见表5所示。相应污染物的流失量见表6。

从表6可以看出,研究区2013年共流失污染物6864.458t,其中TN总量为6022.855t,TP总量为841.603t,前者是后者的7.16倍,说明研究区产生的污染物以氮的流失为主;禽畜流失的污染量为4800.116t,占研究区污染物总量的69.93%,这表明应当加强对禽畜粪尿的管理;农田中化肥产生的污染量为1509.608t,占研究区污染物总量的21.99%,说明农田中的养分流失也是农业面源污染的重要来源。

表5 丹江口水库污染物全氮(TN),全磷(TP)的产生量

t/a

水系	TN产生量			TP产生量		
	农田化肥	禽畜粪尿	农村生活	农田化肥	禽畜粪尿	农村生活
灌河	7296.6	9318.448	991.863	3648.3	2179.150	2645.412
淇河	1324.2	1923.298	94.287	662.1	424.322	251.475
丹江	6667.5	9907.861	637.362	3333.7	2342.994	1699.918
滔河	505.5	793.217	65.560	252.7	179.917	174.856

表6 丹江口水库污染物全氮(TN),全磷(TP)的流失量

水系	TN流失量/(t·a ⁻¹)			TP流失量/(t·a ⁻¹)			流失强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	合计/(t·a ⁻¹)	贡献率/%
	化肥	禽畜	生活	化肥	禽畜	生活			
灌河	600.916	1858.169	161.709	94.289	157.610	145.708	0.007	3018.402	43.972
淇河	111.256	410.861	15.623	17.459	33.574	14.077	0.004	602.851	8.782
丹江	551.662	1995.309	103.982	86.572	169.405	93.693	0.004	3000.624	43.713
滔河	41.018	161.859	10.490	6.4352	13.328	9.452	0.221	242.583	3.533
合计	1304.852	4426.198	291.805	204.756	373.917	262.930	—	6864.458	100

从水系角度,灌河产生的污染物最多,对研究区污染的贡献也最大,达43.97%;其次是丹江;污染物流失最少的是滔河,对环境污染的贡献率仅为3.53%。从流失强度上来看,滔河>灌河>丹江(0.00405)>淇河(0.00402),而水系分维数上却是:淇河>丹江>灌河>滔河,水系分维数越大其污染物的流失强度越小,流失强度小并不代表其产生的流失量就少,这取决于流

域地形地貌、土壤、植被、人类活动等的作用。

3.3 与输出系数法计算结果的比较

本文在用分形方法计算的同时,也用输出系数法估算了研究区的农业面源污染物TN,TP的流失量,结果如表7所示。2种方法计算的污染物流失量适合用配对t检验进行分析,其总量差值的t检验结果详见表8。

表7 两种方法计算的污染物流失量结果

计算方法	污染物	污染物流失量/(t·a ⁻¹)			
		灌河	淇河	丹江	滔河
分形	TN	2620.794	537.741	2650.953	213.367
	TP	397.607	65.110	349.670	29.216
	总量	3018.401	602.851	3000.623	242.583
输出系数	TP	2587.085	520.008	2604.041	213.666
	TN	391.896	62.963	343.427	29.256
	总量	2978.981	582.971	2947.468	242.922

表 8 两种方法计算的污染物流失量的配对 t 检验

配对 t 检验	均值	标准差	标准误	t 值	DF	p (双侧)
总量差值	28.029	23.325 382	11.662 691	2.403	3	0.096

由表 7—8 不难看出,2 种方法计算的结果不管是 TN 还是 TP,这几条河流的差值不大,虽然数据样本量不大,两者总量差值配对 t 检验的 $p=0.096$,在显著性水平 0.1 下具有统计学意义,也能够说明分形方法的计算结果相对于输出系数法是可靠的。此外,各个水系在地形地貌、土壤、植被、岩性等方面存在差别,分形方法能够反映这些因素的影响;灌河、淇河、丹江的分维数均大于 1,相应的 TN,TP 的流失量大于输出系数的结果;滔河的分维数小于 1,相应的流失量也小于输出系数的值。

4 结论

(1) 研究区污染物的流失主要表现为氮的流失, TN 的流失量是 TP 的 7.16 倍,其中禽畜养殖产生的污染物占了污染物总量的 69.93%,农田中化肥的流失占了总污染量的 21.99%,这表明:应当加强对禽畜粪尿的管理,采取措施减少农田中养分的流失。

(2) 灌河产生的污染物最多,其次是丹江、淇河、滔河,但在流失强度上却是滔河最大,其次是灌河、丹江、淇河,这表明分形方法能够反映水系对农业面源污染的影响,因为流域地形地貌、土壤、植被、人类活动等因素与水系分维息息相关。

(3) 通过配对 t 检验分析,分形方法计算的污染物总量与输出系数法的差值,在 0.1 水平下具有统计学意义,说明前者的结果较后者可靠;此外,分形法考虑了下垫面因素的影响,并以水系分维数来表征,而输出系数法没有考虑这些差异,将之平均化,认为其流失率相同,使得分形法的结果要优于后者,更能反映实际。

[参 考 文 献]

- [1] 江滔,武伟,刘洪斌.基于 DEM 的重庆长江流域水系分维估算[J].中国农学通报,2010,26(15):365-368.
- [2] Mandelbrot B B, Wheeler J A. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: Freeman W H, 1982.
- [3] 孙本发,马友华,胡善宝,等.农业面源污染模型及其应用研究[J].农业环境与发展,2013,30(3):1-5.
- [4] 耿润哲,王晓燕,焦帅,等.密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J].环境科学学报,2013,33(5):1484-1492.
- [5] 杨立梦,付永胜,高红涛.四川省茫溪河流域非点源污染负荷研究[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2014,28(11):57-63.
- [6] 周跃龙,汪怀建,余辉,等.应用输出系数模型对太湖流域面源污染负荷测算研究[J].江西农业大学学报,2014,36(3):678-683.
- [7] 肖新成,倪九派,何炳辉,等.三峡库区重庆段农业面源污染负荷的区域分异与预测[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(4):634-646.
- [8] 王平,刘少峰,郑洪波,等.四川盆地东部弧形构造控制的地形和水系发育[J].第四纪研究,2013,33(3):461-470.
- [9] Turcotte D L. Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models [J]. Geomorphology, 2007,91(3):302-310.
- [10] 王箴,陈雯静,徐璐.基于 GIS 的小流域地貌分形维数测定方法研究[J].沈阳农业大学学报,2011,42(4):500-503.
- [11] 姜世英,韩鹏,贾振邦,等.南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析[J].农业环境科学学报,2010,29(11):2153-2162.
- [12] 陈英旭.总氮总磷应纳入重点流域水体污染物总量减排指标[J].中国产业,2011(4):6-6.
- [13] 李精忠,刘剑炜,杨泽龙. DEM 数据谷地分维值的估算[J].武汉大学学报:信息科学版,2014,39(11):1277-1281.
- [14] 姚素珍.基于分形理论的清河水库流域非点源污染研究[D].辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [15] 夏颖,汪荣勇,高立,等.湖北省油菜原棉花轮作系统地表径流氮磷流失特征[J].湖北农业科学,2014,53(23):5751-5754.
- [16] 李晓光,周其文,胡梅,等.中国畜禽粪便污染现状及防治对策[J].中国农学通报,2008,24(S):77-80.
- [17] 全国规模化畜禽养殖污染调查办公室.全国规模化畜禽养殖业污染情况调查技术报告[R],2001.
- [18] 孙瑞敏.湖北省农村生活污水水量水质调查与分析[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [19] 刘钦普.河南省化肥施用强度地理分布及其环境风险评价[J].河南农业科学,2014,43(6):66-70.
- [20] 国务院第一次全国污染源普查办公室.第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册[R],2009.