

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.003

基于分形理论的水体富营养状况评价及其验证

武国正¹, 徐宗学¹, 李畅游²

(1. 北京师范大学水科学研究院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875 ;
2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要 :在简要介绍分形维数算法的基础上,以乌梁素海 2006 年 5 月实测资料为例,初步分析分形理论在水体营养状况评价中的适用性,将基于分形理论的评价结果与国家环境保护部推荐使用的综合营养状态指数法评价结果进行比较分析。结果表明:在对 22 个采样点的评价中,二者评价的一致性达到 91%。两种方法的评价结果仅有两个采样点不同。从全湖的评价结果看,乌梁素海已经达到富营养-重富营养水平,与已有的研究成果相一致。评价结果充分说明分形维数法可以应用于乌梁素海的富营养化评价研究,但其在其他水体的普适性尚待进一步验证。另外,分析了分形理论在水体营养状况评价研究中存在的问题和不足,并对未来的发展趋势进行展望。

关键词 :分形理论;富营养化评价;分形维数;综合营养状态指数

中图分类号 :X824 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2012)04-0012-05

Water eutrophication assessment and validation based on fractal theory

WU Guo-zheng¹, XU Zong-xue¹, LI Chang-you²

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China ;
2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract :Based on the fractal dimension algorithm, a case study was conducted in Wuliangsu Hai Lake using data observed in May of 2006, in order to analyze the applicability of the fractal theory to eutrophication assessment. The results of assessment using the fractal theory were compared with those using the overall trophic state index, which was recommended by the Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China (MEP). The results from 22 sampling sites show that the two methods have an agreement of 91%. There are only two sampling sites that have different results. From the assessment results of the whole lake, it can be found that the lake has been in a eutrophic to severely eutrophic status, which is consistent with other results of evaluation conducted in the lake. It can be concluded that the fractal dimension algorithm is applicable to the evaluation of the eutrophic status of Wuliangsu Hai Lake. However, the applicability of the algorithm to other water bodies should be further verified. In addition, the disadvantages of the fractal theory used for eutrophication assessment are analyzed, and its future development is discussed.

Key words : fractal theory ; eutrophication assessment ; fractal dimension ; overall trophic state index

富营养化是指水体中由于营养盐的增加而导致藻类和水生植物生产力增加、水质下降等一系列的变化,从而使水的用途受到影响的现象^[1]。富营养化评价的目的就是通过分析与水体营养状态有关的

一系列指标及指标间的相互关系,对水体的营养状态作出准确的判断,从而指导水环境管理。目前,水体富营养化评价的方法很多,主要包括营养状态指数法、水生生物指标法、模糊数学综合评价法、随机

评价法、灰色聚类分析法以及神经网络法等^[2-12]。这些评价方法各有其自身的特点,文献[13-16]对这些评价方法分别进行了对比分析。为了丰富水体富营养化评价的手段与方法,笔者尝试使用一种新的计算方法——分形理论进行分析与探讨。

分形理论(fractal theory)是非线性科学研究中的一个活跃分支^[17],它以分形几何为基础,主要研究和揭示复杂自然现象和社会现象中所隐藏的规律性、层次性和标度不变性^[18-19]。1977年,Mandelbrot发表了《分形:形式、机遇与分维》^[20]一书,标志着分形几何作为一门独立的学科正式诞生^[21]。

所谓分形,是指其组成部分以某种方式与整体相似的几何形态,或者是指在很宽的尺度范围内,无特征尺度却有自相似性和自仿射性的一种现象^[22]。它反映了自然界中很广泛的一类物质的基本属性:局部与局部,局部与整体在形态、功能、信息、时间与空间等方面具有统计意义上的相似。分形理论作为一种新的概念和方法,正在许多领域得到应用和推广^[23-32]。

水体富营养化评价就是采用“局部”的水质指标来综合反映“整体”的富营养化水平。笔者正是采用分形理论在揭示整体与局部之间关系与规律上的突出优势,根据实测数据对乌梁素海富营养化进行评价,初步探讨该方法在水体富营养化评价中的有效性和适用性。

1 分形维数计算

分形特征的度量用分形维数(fractal dimension)来表示。分形维数是分形理论中最核心的概念与内容。常用的分维类型主要有相似维数、Hausdorff 维数、盒子维数、信息维数和关联维数等。笔者利用关联维数来进行计算。Grassberger 等^[33]在嵌入理论和重构相空间理论的基础上提出的由时间序列数据求其动力系统吸引子的关联维方法,具体步骤如下。

a. 设某研究水质指标 X_i 的数据序列为 x_k ($k = 1, 2, \dots, n$), n 为样本数据的总数。将其嵌入到 m 维欧氏空间 R^m 中。

$$X^m = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n-m+1} & x_{n-m+2} & \dots & x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $m = 1, 2, \dots, \lambda$ (需要时可多达 9 维或更大些)。

b. 建立 m 维相空间后,分别计算每维相空间两点之间的距离 $r_{p,q}(m)$ 与平均距离 Δx_m , 计算公式为

$$r_{p,q}(m) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{pk} - x_{qk})^2} \quad (2)$$

式中: $p, q = 1, 2, \dots, n - m + 1$, 为不同相空间的点数、列数; $m = 1, 2, \dots, w$, 为相空间维数, 其中 w 为最大相空间维数。

$$\Delta x_m = \frac{1}{(n - m + 1)^2} \sum_{p=1}^{n-m+1} \sum_{q=1}^{n-m+1} r_{p,q}(m) \quad (3)$$

c. 分别计算每维相空间两点之间距离小于 m 维的超球半径 r 的概率 $C_m(r)$, 从而得到关联积分函数

$$C_m(r) = \frac{1}{(n - m + 1)^2} \sum_p \sum_q H[r - r_{p,q}(m)] \quad (4)$$

式中: H 为 Heaviside 函数。

$$H[r - r_{p,q}(m)] = \begin{cases} 1 & (r - r_{p,q}(m) \geq 0) \\ 0 & (r - r_{p,q}(m) < 0) \end{cases} \quad (5)$$

在求关联维数的过程中,超球半径 r 的选择是关键。如果 r 取的太大,则任何一对矢量都发生“关联”,此时 $C_m(r) = 1$, 这样的 r 反映不了系统的内部性质;当 r 取的太小时, $C_m(r) = 0$, 也不能表征内部性质。适当地选择 r , 使得在 r 的某个区间内有:

$$C_m(r) = r^D \quad (6)$$

式中, D 为关联维数。

d. 根据每维相空间求出不同 r 值下的一组 $C_m(r)$ 值, 拟合出 $\ln C_m(r) - \ln r$ 的曲线, 曲线的斜率就是所要求的关联维数^[34], 即:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C_m(r)}{\ln r} \quad (7)$$

e. 若关联数随着相空间维数的升高趋向极限, 则此极限值为空间的分维数。在实际工作中, 若分维数没有严格地趋向某一极限, 则采取比较不同相空间的分维数, 选择其趋于稳定的最大者或相邻空间分维数之差满足一定精度者, 作为该水质指标的关联维数, 即分形维数。

2 实例验证

乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内, 是全球荒漠半荒漠地区极为少见的大型草型浅水湖泊, 是我国北方候鸟重要的迁徙和繁殖地。乌梁素海湿地生态系统在维护周边地区生态平衡中起着相当重要的作用, 因此在 2002 年被国际湿地公约组织正式列入国际重要湿地名录。

笔者利用乌梁素海 2006 年 5 月 10 日水质指标实测结果(表 1)进行湖泊富营养化等级分区评价。采样点布置见图 1。

表1 乌梁素海水质指标实测结果(2006年5月10日)

序号	采样点	$\rho(\text{Chl-a})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{TP})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{TN})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{COD})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$h(\text{SD})$ m
1	I12	65.49	181	18380	110.2	0.37
2	J11	47.5	179	13750	108.4	0.52
3	J13	150.65	366	21570	113.3	0.25
4	K12	106.43	453	24610	117.6	0.23
5	L11	158.99	333	17660	96.9	0.19
6	L13	188.62	325	20990	108.6	0.26
7	L15	97.26	189	10857	102.6	0.43
8	M12	84.65	303	20990	98.2	0.33
9	M14	170.52	338	27940	116.1	0.28
10	M16	7.857	85.5	1810	76.0	0.83
11	N13	69.39	250	26060	93.5	0.32
12	O10	13.381	84.5	723	85.5	1.46
13	P9	17.87	54.6	1737	83.2	0.93
14	P11	1.413	80.1	2895	83.1	0.76
15	Q8	6.142	79.6	1737	84.9	0.90
16	Q10	5.876	74.8	869	80.8	1.00
17	R7	59.6	49.7	1810	88.8	1.45
18	S6	5.845	64.6	1448	81.7	1.76
19	S8	3.338	83.2	2171	73.4	0.91
20	T5	1.75	75.3	1810	91.3	1.57
21	U4	6.075	72.6	2171	89.2	1.07
22	V3	6.551	84.1	1810	95.8	1.75

$$F = \sum_{i=1}^n D(i)S(i) \quad (8)$$

式中: F 为评价标准值; $i=1, 2, \dots, n$,代表第*i*种水质指标; $D(i)$ 为第*i*种水质指标的分形维数; $S(i)$ 为第*i*种水质指标的实测值。

表2 富营养化评价标准^[35-36]

评价标准	$\rho(\text{Chl-a})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{TP})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{TN})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{COD})$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$h(\text{SD})$ /m
贫营养	1	2.5	30	0.3	10.0
贫中营养	2	5.0	50	0.4	5.0
中营养	4	25.0	300	2.0	1.5
中富营养	10	50.0	500	4.0	1.0
富营养	65	200.0	2000	10.0	0.4
重富营养	160	600.0	6000	25.0	0.3

所建立的评价标准为:贫营养、贫中营养、中营养、中富营养、富营养、重富营养,对应的标准值分别为:52.06、66.30、336.40、569.86、2271.48、6793.32。

2.3 评价结果

由于综合营养状态指数法将富营养状况划分为5个等级,而分形理论法划分为6个等级,为了便于比较,将分析理论法评价等级重新划分为5个等级。等级划分见表3。根据上述方法,采用乌梁素海2006年5月10日的实测水质指标进行分形维数计算并得出每个采样点的富营养化评价结果(表4)。为了检验该算法的准确性,采用国家环保部推荐使用的富营养化评价方法—综合营养状态指数法(I_{TL})^[3,36]对实测数据进行计算,结果见表4。

表3 综合营养状态指数法与分析理论法评价等级对比

综合营养状态指数法		分析维数法		评价等级
指数范围	等级	指数范围	等级	
$I_{TL} < 30$	贫营养	$I < 66.30$	贫营养、 贫中营养	I
$30 \leq I_{TL} \leq 50$	中营养	$66.30 \leq I < 569.86.40$	中营养	II
$50 < I_{TL} \leq 60$	轻度富营养	$569.86 \leq I < 2271.48$	中富营养	III
$60 < I_{TL} \leq 70$	中度富营养	$2271.48 \leq I < 6793.32$	富营养	IV
$I_{TL} > 70$	重度富营养	$I \geq 6793.32$	重富营养	V

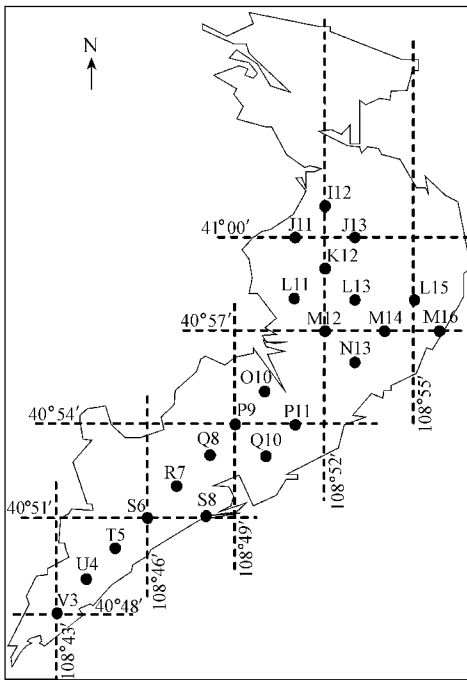


图1 乌梁素海取样点布置

2.1 富营养化评价标准的分形维数计算

根据上述原理对富营养化评价标准(表2)进行分形维数计算,得出Chl-a、TP、TN、COD和SD的分形维数为: $D(\text{Chl-a}, \text{TP}, \text{TN}, \text{COD}, \text{SD}) = D(0.328555, 1.165475, 1.000183, 1.592868, 1.833827)$ 。其中,分形维数越大,说明该水质指标越重要。

2.2 评价标准的建立

利用式(8)来建立每个级别的评价标准。

3 分析和讨论

从两种评价方法的结果比较分析来看(表4),22个评价点中有3个点的评价结果不同,其余19个点评价结果完全一致,一致性达到86%。虽然在O10点和Q10点处,其分形维数法的评价结果比综合营养状态指数法低1个等级,在T5点处分形维数法评价结果比综合营养状态指数法高1个等级,但结果均显示这3处的水体处于富营养状态。造成这3处采样点评价结果差异的原因可能是由于该水域处于

表 4 分形维数法与综合营养状态指数法评价结果比较

序号	采样点	分形维数法		综合营养状态指数法		序号	采样点	分形维数法		综合营养状态指数法	
		计算结果	评价等级	计算结果	评价等级			计算结果	评价等级	计算结果	评价等级
1	I12	31784.2	V	85.9	V	12	O10	1502.5	III	63.1	IV
2	J11	23877.1	V	82.8	V	13	P9	3188.6	IV	66.7	IV
3	J13	37586.2	V	92.5	V	14	P11	5170.7	IV	62.8	IV
4	K12	42823.5	V	93.0	V	15	Q8	3209.4	IV	65.0	IV
5	L11	30874.0	V	92.0	V	16	Q10	1719.3	III	62.0	IV
6	L13	36587.8	V	92.4	V	17	R7	3372.8	IV	68.8	IV
7	L15	19027.7	V	84.7	V	18	S6	2692.7	IV	61.1	IV
8	M12	36398.7	V	88.5	V	19	S8	3930.5	IV	63.3	IV
9	M14	48416.9	V	93.1	V	20	T5	3332.7	IV	59.7	III
10	M16	3329.7	IV	65.8	IV	21	U4	3945.2	IV	65.0	IV
11	N13	44923.2	V	87.9	V	22	V3	3358.7	IV	63.7	IV

营养等级过渡带,其营养等级差别不太明显所致。另外,T5处的营养状态指数法评价结果为59.7,已非常接近IV类等级。就全湖范围来说,这几点的差异并不影响整体的评价结果,因此,分形维数法用于乌梁素海的富营养化评价是合理可行的。

从表4可以看出,乌梁素海枯水期的大部分采样点处于重富营养化程度,占到了所有采样点的45.5%,重富营养化程度的采样点同样也占了45.5%,而中富营养水平的点仅有O10和Q10两个点,仅占到9%。在所有的监测点中已经没有贫营养、贫中营养甚至中营养的区域出现。由此可以看出,乌梁素海枯水期的整体营养水平已达到了重富营养-富营养程度。这与李畅游等^[37-39]用其他计算方法得出的结论一致。此外,从评价结果还可以看出Q8—Q10一线以北的区域呈重富营养状态,以南区域呈富营养状态。造成这一现象的主要原因是河套灌区的绝大部分农田退水和部分工业废水、生活污水由I12点附近排入乌梁素海,在湖水向南流动的过程中,湖中的水生植物起到了一定的净化作用,因此,湖泊南区的水质要比北区的水质好一些。

本研究中,分形维数的计算过程均通过Excel实现,体现出了计算步骤少、计算过程简单、计算速度快、计算量小、计算精度高的特点。但是,本研究中仅采用了环保部推荐的综合营养状态指数法作为对比方法,与其他评价方法之间的差异尚需作进一步的对比分析,从而验证其适用性和有效性。

4 结 论

a. 将分形理论应用于乌梁素海水体的富营养化评价,并与综合营养状态指数法进行了比较。二者计算结果一致性很高,而且与他人采用其他方法计算得出的结论相一致,充分说明该方法能够应用于乌梁素海的富营养化评价,为水体富营养化评价作了进一步的尝试性研究,丰富了富营养化评价的

方法与手段。

b. 分形理论在富营养化评价中表现出一定的优势,但是,仅凭该方法来对水体进行评价不能保证计算结果客观、合理,对于其他评价方法也存在这样的问题。因此,要想对水体进行合理评价,有必要采用多种评价方法进行综合分析和评价,这样可以取长补短,使评价结果更趋客观、合理。但如何对多种方法的研究评价结果进行综合有待进一步探索。

c. 分形理论在富营养化研究中应用深度和广度不够。当前的研究仅停留在揭示对水体形状分形特征上,对于水环境质量的分形研究尚处于对现象的揭示和描述阶段,未能进一步从分形维数的变化中找出研究对象内在的规律特征。此外,在一些水体研究对象分形性质的确定及其分形维数所表示的意义等方面有待于进一步的研究。

d. 目前,水体富营养化的分形研究尚处于起步阶段,与其他新理论和新技术相结合的研究还很少。湖泊系统是一个复杂的系统,它包含着许多不规则的影响因子和非线性过程。仅用分形理论难对其进行全面的刻画和描述,只有将该理论与其他理论和方法相结合才能更好地揭示水体中众多的不规则事物和非线性过程。

参考文献:

[1] OECD. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control [C]. // OECD cooperative program on monitoring of inland waters (eutrophication control), environment directorate. Paris: OECD, 1982: 154.

[2] 段焕丰,俞国平,俞海宁. 湖泊富营养化评价方法的探讨[J]. 苏州科技学院学报:工程技术版, 2005, 18(2): 53-57.

[3] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.

[4] 周林飞,谢立群,周林林,等. 灰色聚类法在湿地水体富营养化评价中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36

(5) 594-598.

- [5] 谢平,李德,陈广才.基于贝叶斯公式的湖泊富营养化随机评价方法及其验证[J].长江流域资源与环境,2005,2(2):224-227.
- [6] 韩涛,李怀恩,彭文启.基于MATLAB的神经网络在湖泊富营养化评价中的应用[J].水资源保护,2005,21(1):24-26.
- [7] 胡著邦,徐建民,全为民.模糊评价法在湖泊富营养化评价中的应用[J].农业环境科学学报,2002,21(6):535-536,539.
- [8] 高世荣,潘力军,孙凤英,等.用水生生物评价环境水体的污染和富营养化[J].环境科学与管理,2006,31(6):174-176.
- [9] CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2):361-369.
- [10] LIU Y T, LO S L. A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters[J]. Water Research, 2005, 39(7):1415-1423.
- [11] STROBL R O, FORTE F, PENNETTA L. Application of artificial neural networks for classifying lake eutrophication status[J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2007, 12(1):15-25.
- [12] PAN A, HU L H, LI T S, et al. Assessing the eutrophication of Shengzhong Reservoir based on grey clustering method[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2009, 7(2):83-87.
- [13] 安乐生,赵全升,刘贯群,等.代表性水质评价方法的比较研究[J].中国环境监测,2010,26(5):47-50.
- [14] 尹海龙,徐祖信.河流综合水质评价方法比较研究[J].长江流域资源与环境,2008,17(5):729-733.
- [15] 贝竹园.象山港海域营养盐污染特征及多种富营养化评价方法的比较[D].上海:华东师范大学,2009.
- [16] 薛巧英.水环境质量评价方法的比较分析[J].环境保护科学,2004,30(4):64-67.
- [17] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:292-401.
- [18] 李毅,王文焰.农业土壤和水资源研究中的分形理论[J].西北水资源与水工程,2004(4):12-17.
- [19] 杨国安,甘国辉.基于分形理论的北京市土地利用空间格局变化研究[J].系统工程理论与实践,2004(10):131-137.
- [20] MANDERLBORT B B. Fractal: form, chance and dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977.
- [21] 谢和平,薛秀谦.分形应用中的数学基础与方法[M].北京:科学出版社,1998.
- [22] 孙博文.分形算法与程序设计[M].北京:科学出版社,2004.
- [23] 刘莹,胡敏,余桂英,等.分形理论及应用[J].江西科学,2006,24(2):205-209.
- [24] 李洁,朱金兆,朱清科.分形维数计算方法研究进展[J].北京林业大学学报,2003,24(2):71-78.

- [25] FALCONER K. Fractal geometry: mathematical foundations and application[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2003.
- [26] WEST B. Fractal physiology and chaos in medicine[M]. Singapore: World Scientific, 1990.
- [27] NONNENMACHER T F, LOSA G A, WEIBEL E R. Fractals in biology and medicine[M]. Birkhauser - Verlag: Basel and Boston, 1994.
- [28] JACKSON W. Heaven's fractal net: retrieving lost visions in the humanities[M]. Bloomington: Indiana University Press, 2004.
- [29] TURCOTTE D L. Fractals and chaos in geology and geophysics [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [30] WILLIAMS B. Trading chaos: applying expert techniques to maximize your profit[M]. New York: Wiley, 1995.
- [31] 牛志广,陆仁强,王晨婉.天津市近海水质预测方法研究[J].水科学进展,2009,20(2):222-226.
- [32] 陈奕,许有鹏,宋松.基于压力-状态-响应模型和分形理论的湿地生态健康评价[J].环境污染与防治,2010,32(6):27-31,59.
- [33] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Characterization of strange attractors[J]. Phys Rev Lett A, 1983, 50(5):346-349.
- [34] 陈世华,陆君安.混沌动力学初步[M].武汉:武汉大学水利电力大学出版社,1998:54-58.
- [35] 陈守煜.湖库水体富营养化评价级别特征值与识别模型[J].黑龙江水专学报,1999,26(1):1-8.
- [36] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990.
- [37] 李畅游,高瑞忠,刘廷玺,等.乌梁素海水水质富营养化评价及其年季动态变化特征[J].水资源与水工程学报,2005,16(2):11-15.
- [38] 李畅游,武国正,李卫平,等.乌梁素海浮游植物调查与营养状况评价[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):283-287.
- [39] 郝伟罡,李畅游,高瑞忠,等.乌梁素海水环境质量现状评价[J].环境科学与技术,2005,28(S1):86-88.

(收稿日期 2011-09-26 编辑 徐娟)

