

基于最大流原理的湖泊系统富营养化新模型

韦海英, 柴立和

天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

[摘要] 针对目前现有的湖泊富营养化模型的不足, 以最大流原理为基础, 以自组织特征映射神经网络(SOM)为算法实现手段, 从复杂系统结构演化的角度提出了一个新的湖泊系统的富营养化模型; 进而使用该模型对我国 10 个湖泊进行了富营养化评价并和以往的评价方法作了详细比较, 结果表明该方法具有较好的合理性和可操作性。由于该模型从一定程度上体现了湖泊富营养化系统的演化动力学机理和湖泊系统时空演变特性, 因此, 不仅在评价上有一定的优越性, 在湖泊富营养化发展变化状态的预测上也具有潜力。

[关键词] 富营养模型; 统计力学; 最大流原理; 复杂系统

[中图分类号] O414.22, X524

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2007)02- 0054- 06

New Eutrophication Model for Lakes Based on Maximum Flux Principle

WEI Haiying, CHAI Lihe

School of Environment Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Taking account of the shortcomings of available eutrophication models for lake water quality, a novel mathematical model based on maximum flux principle is proposed, where the spatial structure of system is better considered than available methods. By invoking self-organization feature map (SOM), the new model can better represent the characters of eutrophication. The model is applied to ten typical lakes and the results show that the method is reasonable and practicable. It can also be used for the predictions of lake water eutrophication.

Key Words: eutrophication model; statistical mechanics; maximum flux principle; complex system

CLC Numbers: O414.22, X524

Document Code: A

Article ID: 1000- 7857(2007)02- 0054- 06

0 引言

湖泊的富营养化现象愈来愈严重, 现已成为国内外许多学者关注的对象。早在 20 世纪 60 年代, 许多国家就通过建立湖泊富营养化模型来开展研究, 从模型的发展来说, 大概经历了如下几个阶段: 简单的回归模型^[1-2]、简单的营养物平衡模型^[3-5]、复杂的生态-水质-水动力学模型^[6-9]、复杂的生态结构动力学模型^[10-12]。不可否认, 这些模型对于解决湖泊富营养化的实际问题确实提供了很大帮助。但是, 由于湖泊系统是一个典型的复杂系统, 湖泊各环境因子之间具有非常强烈的非线性作用, 当环境因子发生改变或它们之间的联系发生

变化时, 湖泊富营养状态及其结构也必然会发生变化, 因而现有的这些富营养化模型主要存在的问题是: 随着外界环境的变化, 湖泊生态系统的结构和功能也发生着变化, 要客观准确地反映湖泊生态系统的这种真实的变化, 生态模型的结构与参数必须是可变的; 但是在目前的大多数湖泊生态模型中, 这种模型的结构与参数却是不变的^[13], 所以它们的评价、预测结果往往只是对湖泊富营养状态进行粗略的预测和模拟^[14-15], 而不能真实地反映湖泊生态系统的运行状态。所以建立一套新的数学模型, 以能够真实反映湖泊水生态结构的时间、空间上的动力学演化, 从而对湖泊进行富营养化

收稿日期: 2006- 11- 08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50406018), 天津大学杰出人才引进基金项目 (W20201), 教育部留学回国人员科研启动基金 (413042)

作者简介: 韦海英, 女, 天津大学环境学院, 硕士生, 研究方向为湖泊生态系统; E-mail: tjdxwhy@163.com

柴立和(通讯作者), 男, 天津大学环境学院, 副教授, 研究方向为复杂系统理论、非线性科学、统计物理及最大流原理等;

E-mail: lhchai@tju.edu.cn

评价与预测已势在必行。

1 最大流原理及模型的提出

1.1 最大流原理及模型的非平衡统计力学理论基础

湖泊水生态系统是一个不断与外界环境进行物质和能量交换的远离平衡的复杂开放系统,当湖泊营养评价中的参数受内外条件的影响而发生改变时,整个系统都必然会发生变化。显然由于湖泊系统组元的复杂性及其所处环境的多变性,利用现有的理论进行处理还有相当的困难。构筑一套新的理论基础是十分必要的,下面给出本研究小组考虑的方法。

在湖泊营养状态评价中,本研究小组把几种评价参数,如水体中的 TP, TN, COD, SD, Chla 含量作为几个大的竞争子系统,在营养物输入输出量、底泥释放营养物速率、温度、光照、湖泊生产阶级的生产能力大小和湖泊水体上界面与大气的氧交换能力等的作用下互相竞争和协作,来调控湖泊营养状态。如果再把上述几个大的子系统分成若干小的子系统,可以建立如图 1 所示的整个水生态系统的作用非平衡统计系统。

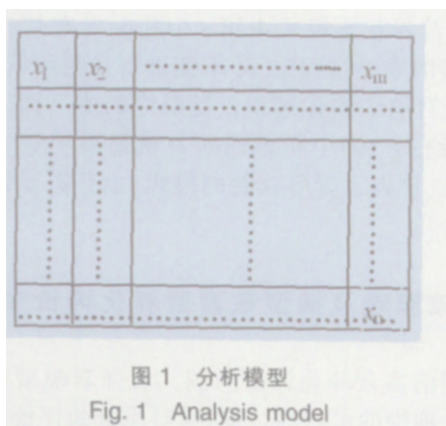


图 1 分析模型

Fig. 1 Analysis model

如图 1 所示,设定湖泊富营养评价系统是一个由 n 个子系统组成的复杂开放系统,组元之间具有复杂的非线性相互作用,并处于复杂多变的环境中。首先给出一个定义“广义流”——表征一种对决定特定系统性质起重要作用的耦合,此类耦合常常是某种载于结点之间的连接上的流,这种“流”的概念又可理解为具有相互作用功能的某种联系。广义流泛函 J 可以一般化地表示成

$$J = \eta + \sum_i \gamma_i x_i + \sum_{ij} \gamma_{ij} x_i x_j + \sum_{ijk} \gamma_{ijk} x_i x_j x_k + \dots + \sum_{ijkl} \gamma_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \dots \quad (1)$$

设定系统的驱动力,即从环境获得广义流的动力和原因可以表示为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 写成向量的形式为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 驱动力可以代表营养物输入输出量、底泥释放营养物速率、温度、光照、湖泊生产阶级的生产能力大小

和湖泊水体上界面与大气的氧交换能力等。设 t 时刻系统状态处于体积单元时获得的广义流是 J , 则所有可能的微观态所获得的平均广义流为

$$\bar{J} = \int \rho(x, t) J(x) \rho(x) dx \quad (2)$$

约束就是组元或节点应满足一定的守恒关系,它代表质量连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程等。在信息量不足的条件,它代表已知的条件,可以写成

$$x_i = f_1, x_i x_j = f_2, x_i x_j x_k = f_3, x_i x_j x_k x_l = f_4 \quad (3)$$

引用最大流原理 (MFP, 也称 Chai's Principle)^[16-19]: 一个远离平衡的开放复杂系统总是寻找一种优化过程,使得系统在给定的约束或代价下获得的广义流最大。广义流泛函与微分方程(质量连续性方程, 动量守恒方程, 能量守恒方程)的边值问题描述等价。从数学上来讲最大流原理就是让广义流泛函(2)在约束条件(3)达到最大,得到

$$J = \frac{C}{\alpha \sum_i \beta_i x_i - \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j - \sum_{ijk} \beta_{ijk} x_i x_j x_k - \sum_{ijkl} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)得

$$J = \frac{C}{\eta + \sum_i (\gamma_i - \beta_i) x_i + \sum_{ij} (\gamma_{ij} - \beta_{ij}) x_i x_j + \sum_{ijk} (\gamma_{ijk} - \beta_{ijk}) x_i x_j x_k + \sum_{ijkl} (\gamma_{ijkl} - \beta_{ijkl}) x_i x_j x_k x_l + \dots} \quad (5)$$

已知有下列展开式

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2!} x^2 + \frac{1}{3!} x^3 + \dots \quad (6)$$

方程(5)可化为

$$J = \exp(\mu + \sum_i \sigma_i x_i + \sum_{ij} \sigma_{ij} x_i x_j + \sum_{ijk} \sigma_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{ijkl} \sigma_{ijkl} x_i x_j x_k x_l) \quad (7)$$

把方程(7)中的指数项看成势函数,它调控着系统的稳定特性。

将方程(7)中指数项表示的势函数进行平移变换,以对变换后的二阶常数项矩阵对角化,则势函数变为

$$\Phi(\lambda, \xi) = \xi + \sum_i \lambda_i \xi_i^2 + \dots \quad (8)$$

式(8)中: ξ 是子系统 x_i 的组合模式,在湖泊系统的富营养化评价中它代表湖泊的营养状态模式; a_{ij} 表示子系统 x_i 之间的连接权值; ζ 在系统的约束条件已知时是一个常数,如果从数学的角度把 a_{ij} 看作一个矩阵,则 λ 就可作为这个矩阵的特征值,公式(8)中的 λ 代表系统各种可能组合模式 ξ 所对应的值。由公式(8)可知,最大 λ 对应的系统的组合模式 ξ 正是我们识别或评价这个系统状态的关键参量。

依据势函数方程与动力学演化方程的联系, 从方程(8)推得随机演化方程为^[13]

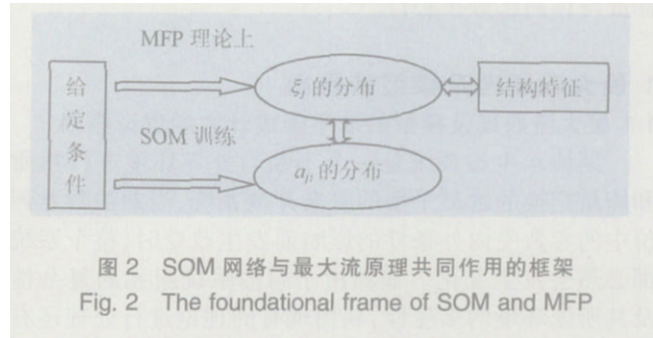
$$\dot{\xi}_j = \lambda_j \xi_j + S_j(\xi) + F_j(t), \quad j=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

带参数拉格朗日乘子法是建立新变分原理的普遍方法, 为近代兴起的广义混合变分原理提供了一个理论基础。上面通过拉格朗日乘子法把诸多难以处理的约束条件(多变环境的影响, 组元的非线性相互作用等)变成了容易处理的自然条件。方程(7)中的常数 σ 或方程(8), (9)中的常数 λ 可由方程(5)中的常数 β 和 λ 来确定。而常数 β 和 λ 是直接与控制参数联系在一起的, 上述理论框架无疑架起了从环境影响、控制参数到结构特性的桥梁。公式(8), (9)可作为判断和分析湖泊系统状态演化中各种营养状态模式(也即广义流分配的模式)稳定性的基础。湖泊系统内部组元的竞争、协同等相互作用(在模型中用 a_{ij} 的数值和正负号来描述其相互作用的关系、大小)调节了系统的运行状态、趋势, 并最终导致湖泊营养状态模式的不同, 也即系统组元间通过不同的合作和竞争方式形成不同的营养模式 ξ_j (对应着不同的 λ_j)。其中式(9)中当 $\lambda_j > 0$, 对应着活跃的营养模式。换句话说, 在这些营养模式中, 只有 λ_j 较大的营养结构才是最活跃的、起主导作用的、合理的, 而其它潜在的模式都是稍纵即逝的快变量, 最终会被绝热消去; 在公式(9)中当 $\lambda_j < 0$, 代表系统是被阻尼的, 可以被绝热消去。这种根据相应控制条件通过竞争来选择活跃、起主导作用的模式而大量淘汰从动模式的方法就构成了湖泊系统营养状态模式结构形成的理论基础。

1.2 最大流原理及模型的数值实现

在上述模式结构形成的理论中, 给出代表系统内外影响的控制参数 β 和 λ 在这里, 根据湖泊生态系统的结构和功能参数是可变的, 所以认为每一组功能参数对应着湖泊某一种状态, 以及所对应的系统结构模式参数 ξ_j 。在实际湖泊系统中这些参数的确定以及它们之间的联系是比较抽象的, 为了使这一理论能够直接应用到实际中去, 下面结合自组织竞争神经网络的计算算法来建立相应的模式识别方法。

自组织特征映射神经网络(SOM)的基本思想是: 网络竞争层各神经元竞争对输入模式的相应机会, 最后仅一个神经元成为竞争的胜者, 并对那些与获胜神经元有关的各连接权 a_{ij} , 朝着更有利于它竞争的方向调整, 这样获胜神经元就表示对输入模式的分类。这一基本思想与上述理论是一致的, 它们有着相同的研究对象和目标, 给出了一样的图像: 在与外界环境的相互作用过程中, 不断调整自己的行为, 以达到与外界环境相应进行和适应的目的。图2为表征最大流原理(MFP)和SOM网络共同作用的机制框架。



在非平衡统计力学的最大流原理中, ξ 代表在不同控制参数 β 和 γ 下所对应的不同湖泊营养状态模式, a_{ij} 代表的是子系统间的连接权值, 它表示 SOM 网络中输入的神经元经过训练后得到的网络权值。在这两者之间建立的联系桥梁, 可用公式表示为

$$\xi = \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \quad (10)$$

参数结合 SOM 网络, 式(10)把非平衡统计理论中表示系统空间结构的 ξ 进行了量化, ξ 代表第 j 种营养状态模式; $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示系统的 n 个控制参数; a_{ij} 表示第 j 种营养状态模式中第 i 个控制参数的权重。在 SOM 网络的聚类过程中, a_{ij} 不断进行自组织调整, 它反映了系统自组织演化过程, 把最终的值(即成功聚类后)代入到式(10)中所得到的 ξ 就是系统竞争优化的形成结果, 它表示竞争获胜的模式, 也是需要识别和评价的模式。

2 最大流原理及模型在富营养化评价中的典型应用

以湖泊富营养化评价为例, 验证新模型在实际湖泊系统处理中的可行性。首先, 对原有的评价标准重新

表 1 我国原有的富营养化评价标准
Table 1 Original eutrophication assessment criteria

评价标准	Chla /mg.m ⁻³	TP /mg.m ⁻³	TN /mg.m ⁻³	COD /mg.l ⁻¹	SD /m
贫营养	1.0	2.5	30	0.3	10
贫中营养	2.0	5.0	50	0.4	5.0
中营养	4.0	25	300	2.0	1.5
中富营养	10	50	500	4.0	1.0
富营养	65	200	2 000	10	0.4
重富营养	100	600	6 000	25	0.3

进行划算, 原有的评价标准^[20]如表 1。

在表 1 中各评价参数不仅各单位不统一、数值分散较广, 而且数值大小反映营养状态优良的趋势也不一致, 像 Chla, TP, TN, COD 这几个参数数值越大, 说明湖泊营养状态越差, 而 SD 却刚好相反。为了使这些标准

状态参数反映状态趋势具有统一性, 笔者首先把这些标准状态参数归一化。对 Chla, TP, TN, COD 这几个参数归一化的公式为

$$b_j=(1.0-(x_6-x_j)/x_6)^{1/2} \quad (11)$$

对 SD 进行归一化的公式为

$$b_j=(1.0-(x_j-x_6)/x_6)^{1/2} \quad (12)$$

上两公式中, b_j , x_j 分别表示已经归一化和未归一化的第 j 种标准状态参数; x_1 , x_6 分别表示第 j 种标准状态参数的第 1 和第 6 级别的数值。经过归一化, 得到如下变

表 2 归一化后的富营养化评价标准 Table 2 Normalized eutrophication assessment criteria					
评价标准	Chla /mg.m ⁻³	TP /mg.m ⁻³	TN /mg.m ⁻³	COD /mg.l ⁻¹	SD /m
贫营养	0.1	0.064 55	0.0707 11	0.109 545	0.173 205
贫中营养	0.141 421	0.091 287	0.091 287	0.126 491	0.728 011
中营养	0.2	0.204 124	0.223 607	0.282 843	0.938 083
中富营养	0.316 228	0.288 675	0.288 675	0.4	0.964 365
富营养	0.806 226	0.577 35	0.577 35	0.632 456	0.994 987
重富营养	1	1	1	1	1

形的湖泊富营养化评价标准。

非平衡统计理论中所提到控制参数 α 和 β 在 SOM 网络中反映在各种输入变量上, 在这里笔者依据现有的评价经验, 把湖泊中 Chla, TP, TN, COD, SD 这 6 个浓度值定为其系统控制参数, 就如最大流原理所阐述那样, 这 6 个控制参数在系统内部不断地发生竞争、协同合作等相互作用, 正是这种系统内部组元自组织、优化的过程形成了系统在内外约束条件下自己的模式或结构, 在具体计算中这种原理反映在 SOM 网络的聚类过程中。下面对表 2 中 6 个不同级别的营养状态进行

聚类分析, 进而依据 $\xi = \sum_{i=1}^n a_i x_i$ 计算不同级别的 ξ 值。

在计算程序中, 假定训练步数为 200, 输出神经元由

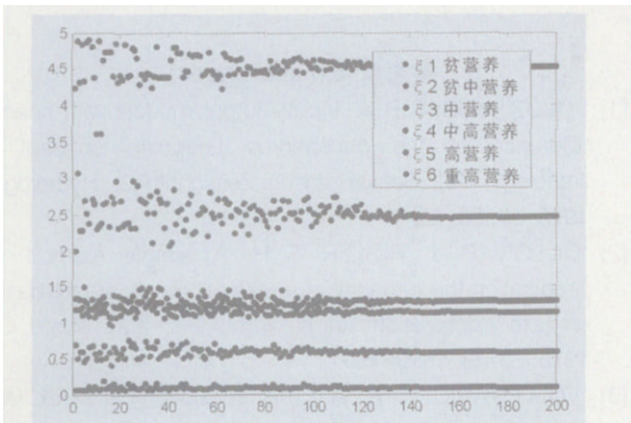


图 3 6 个营养级别的聚类结果

Fig. 3 The classified results of six eutrophication orders

营养状态分为 6 级而定为 6 个, 图 3 是 SOM 网络对 6 个级别营养状态的聚类结果。图 3 展示了在给出不同的营养参数之后, 系统内部组元根据内外环境的约束不断地进行竞争、协作和自组织, 系统由开始的多种组合模式(包括阻力系数大, 而最终会被消散的模式和阻力系数小而活跃的主导模式)经过一定的时间后, 只保持了某种真正反映其营养状态、而最终获胜的主导模式。

表 3 是在上述的假设中和数据处理后所计算得到的湖泊营养状态 6 个营养级别最终主导模式分别对应的不同 ξ 值。

表 3 湖泊不同的营养级别对应不同的 ξ 值 Table 3 Each ξ corresponds to each Lake eutrophication order	
ξ	营养状态
0.095 9	贫营养
0.593 1	贫中营养
1.149 9	中营养
1.295 6	中富营养
2.465 8	富营养
4.533 8	重富营养

表 3 已经把湖泊 6 种营养级别的最终主导模式的结构耦合模式量化出来了, 依据这个量化标准可以对不同的湖泊进行营养评价。需要指出的是, 由于 SOM 网络是一个对外界环境进行学习或者仿真, 并对自身的网络结构随着输入的变化而进行适当调整的自组织过程, 并且不同的训练步数和时间步长也会导致不同的 ξ 值。但当这些参数设定后, ξ 的值就会稳定在一定范围, 所以在网络训练时要稳定这些参数, 并且在评价其它湖泊的营养状态时, 也要在同一网络下评价。表 4 为取以往文献^[24]所得的 10 个湖泊的 5 个浓度测量值。

表 4 我国 10 个湖泊 5 个浓度的测量值 Table 4 Five concentration measurements of ten lakes					
湖泊	Chla /mg.m ⁻³	TP /mg.m ⁻³	TN /mg.m ⁻³	COD /mg.m ⁻³	SD /m
洱海	4.33	21	180	3.38	2.4
博斯腾海	4.91	50	969	5.42	1.46
巢湖	25.30	30	1 670	6.26	0.25
抚仙湖	19.00	20	210	1.61	7.03
南京玄武湖	202.10	708	6 790	8.86	0.31
滇池	189.30	20	230	10.13	0.50
武汉东湖	1 913.70	105	2 000	10.70	0.40
杭州西湖	95.94	136	2 230	10.18	0.37
广州东山湖	185.10	670	7 200	14.80	0.26
太湖	100	20	900	283	0.50

依据式(12),(13),并且规定当 Chla, TP, TN, COD 的浓度值大于第 6 级别时,值为 1,小于第 1 级别时,值为 0;而 SD 的浓度值小于第 6 级别时,值为 1,大于第 1 级别时,值为 0。把表 4 中的数据归一化后得表 5。

表 5 归一化后的 10 个湖泊浓度测量值
Table 5 Normalized concentration measurements of ten lakes

湖泊	Chla /mg.m ³	TP /mg.m ³	TN /mg.m ³	COD /mg.m ³	SD /m
洱海	0.208 087	0.187 083	0.173 205	0.367 696	0.888 819
博斯腾海	0.221 585	0.288 675	0.401 871	0.465 618	0.940213
巢湖	0.502 991	0.223 607	0.527 573	0.500 4	1
抚仙湖	0.435 89	0.182 574	0.187 083	0.253 772	0
南京玄武湖	1	1	1	0.595 315	0.999 5
滇池	1	0.182 574	0.195 789	0.636 553	0.989 949
武汉东湖	1	0.418 33	0.577 35	0.654 217	0.994 987
杭州西湖	0.979 49	0.476 095	0.609 645	0.638 122	0.996 494
广州东山湖	1	1	1	0.769 415	1
太湖	1	0.182 574	0.387 298	0.336 452	0.989 949

把表 5 中的数据依次代入上文建立的 SOM 网络中进行分类分析,并计算每一个湖泊的 ξ 的值。依据 ξ 的值进行评价时,依据就近原则对其归类,如表 6 所示。为了验证模型评价结果的准确率,同时把这个评价结果与以往的评价方法的评价结果进行比较。

表 6 新评价模型的评价结果和与现有评价方法结果的比较
Table 6 Comparisons of the estimated results by new model with old ones

湖泊	ξ	新评价模型	随机评价	灰色评价	模糊评价
洱海	1.010 1	中营养	中营养	中营养	中营养
博斯腾海	1.171 7	中营养	中富营养	中富营养	中富营养
巢湖	1.827 4	中富营养	富营养	中富营养	中富营养
抚仙湖	0.227 0	贫营养	中营养	贫中营养	贫中营养
南京玄武湖	4.107 8	重富营养	重富营养	重富营养	重富营养
滇池	2.077 8	富营养	中富营养	中营养	富营养
武汉东湖	2.928 4	富营养	富营养	富营养	富营养
杭州西湖	2.952 7	富营养	富营养	富营养	富营养
广州东山湖	4.237 0	重富营养	重富营养	重富营养	重富营养
太湖	2.005 0	富营养	中富营养	中富营养	富营养

从表 6 可以看出新模型的评价结果和现有评价方法的评价结果相差很小,与模糊评价的方法相比最为一致。可见这个基于严格的非平衡统计力学理论基础的新评价模型具有较高的准确性。

非平衡统计理论结合自组织特征神经网络很好地揭示了系统在内部组元的相互作用下不同结构模式的

形成,所以这一模型不仅能对湖泊水质进行营养评价,同时也能预测同一湖泊水质的营养状态发展趋势。最大流原理阐述了一个远离平衡的开放复杂系统总是寻找一种优化过程使得系统在给定的约束或代价下获得的广义流最大,而系统在形成一个稳定的结构模式过程中正如公式(8),(9)所描述那样是由它的序参量控制的。所以当掌握了这些序参量以及这些序参量之间的互相竞争、协同关系的规律趋势之后,就可以对湖泊以后的营养状态所对应的结构模式进行预测。需要重点强调的是,这里所指的湖泊某种营养状态结构模式并不是单纯的、某个简单的单一的值,而是系统竞争演化之后所反映的某种生态斑块结构,也是系统在各种序参量的相互作用下所取得的广义流分配形式。在已知湖泊营养状态的主要影响因素之后,使用自组织特征映射网络对已知的样本数据进行训练,通过找出它们之间的关系作用,从而可通过输入新的检测数据对系统的生态结构和广义流分配模式进行预测。

3 结论

为了能从时空上真实反映湖泊生态的演变状态,本文以最大流原理为基础,以 SOM 神经网络为算法工具提出了一个新的湖泊系统数学模型,并把模型应用在湖泊富营养化评价中,此模型比以往的湖泊富营养化模型更能反映湖泊系统的自组织竞争优化和非线性等特性,可靠性也相当强。而最重要的是这一研究方法更注重从空间演化结构上揭示湖泊各种富营养化级别的结构模式形成机制,这在以往的研究方法中是常常被忽视的。当然湖泊系统的研究是个极其复杂的问题,本文尽管从一个全新的角度进行了分析,但结果无论在理论基础的完善还是实证结果的开展上无疑都是非常初步的,期望能起到抛砖引玉的作用。这一新模型不仅有较好的理论基础,也具有较强的实际可操作性,相信在将来的湖泊富营养化水质预测、评价中一定会有广泛的应用前景。

参考文献(References)

- [1] VOLLENWEIDER R A. Input-output models with special reference to the phosphorus Loading concept in limnology [J]. Schweizerisch Zeitschrift fur Hydrologie, 1975, 37: 53- 58.
- [2] DILLON P J, RIGLER F H. A simple method for predication the capacity of a lake for development based on lake trophication status [J]. J Fish Res Board Ca, 1975, 32 (9): 1519- 1531.
- [3] VOLLENWEIDER R A. The scientific basis of lake eutrophication, with particular to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors [R]. Technical Report DAS: DSI: 68. 27, OECD, Paris, 1968. 159.

- [4] IMBODEN D M. Phosphorus model of lake eutrophication [J]. Limnology Oceanography, 1974, 19: 297- 304.
- [5] IMBODEN D M, GACHTER R. A dynamic lake model for trophic state prediction [J]. Ecological Modeling, 1978, 4: 77- 98.
- [6] JORGENSEN S E. A eutrophication model for a lake [J]. Ecological Modeling, 1976, 2: 147- 165.
- [7] BENNDORF J, RECKNAGEL F. Problems of application of the ecological model, SALMO, to lakes and reservoir having various trophic states[J], Ecological Modeling, 1982, 17: 139- 145.
- [8] SAGEHASHI M, SAKODA A, MOTOYUKI S. A mathematical model of a shallow and eutrophic lake (the Keszthely basis, lake Balaton) and simulation of restorative manipulations [J]. Water Resources, 2001, 35 (7): 1675- 1686.
- [9] XU F L, JORGENSEN S E, TAO S, et al. Modeling the effects of macrophyte restoration on water quality and ecosystem of Lake Chao [J]. Ecolo Model, 1999, 117: 239- 260.
- [10] JORGENSEN S E. Structural dynamic model [J]. Ecological Modeling, 1986, 31: 1- 9.
- [11] NIELSEN S N. Application of exergy in structural - dynamical modeling [J]. Vert Int Ver Limnol, 1990, 24: 641- 645.
- [12] NIELSE S N. Modeling structural dynamical changes in a Danish shallow lake [J], Ecological Modeling, 1994, 73: 13- 30.
- [13] JORGENSEN S E. Integration of ecosystem theories: a pattern [A]. Kluwer Dordrecht, 1997. 400.
- [14] JORGENSEN S E. Ecological modeling of lakes [A]// Orlob G T. Mathematical modeling of water quality: streams, lakes, and reservoirs. New York: J Wiley, 1983. 116- 149.
- [15] JORGENSEN S E. State- of- the- art management models for lakes and reservoirs [J]. Lakes & Reservoirs: Environment and Management, 19995, 1: 79- 87.
- [16] CHAI L H, SHOJI M. Self - organization and self - similarity in boiling systems [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 124: 505- 517.
- [17] CHAI L H, WEN D S. Hierarchical self- organization of complex system [J]. Chemical Research of Chinese University, 2004, 20(4): 440- 445.
- [18] CHAI L H. A theoretical analysis of bubble interaction in boiling systems [J]. International Journal of Thermal Science, 2004, 43: 1067- 1073.
- [19] CHEN L M, CHAI L H. A theoretical analysis on self- organized formation of microbial biofilms [J]. Physica A, 2006, 370: 793- 807.
- [20] 谢平, 李德, 陈广才, 等. 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, 3 (2): 224- 227.
- XIE Ping, LI De, CHEN Guangcai, et al. A lake eutrophication stochastic assessment method by using Bayesian formula and its verification [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 3(2): 224- 227.
- [21] 刘光萍, 杜萍, 王琨. 分形理论在湖泊富营养化评价中的应用. 江西农业大学学报, 2005, 27(6): 925- 929.
- LIU Guangping, DU Ping, WANG Kun. Application of fractal theory to evaluation of lake eutrophication[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2005,27(6): 925- 929.

(责任编辑 王士泉)

《北京联合大学学报(自然科学版)》征稿、征订启事

《北京联合大学学报(自然科学版)》是北京联合大学主办的自然科学综合性学术理论刊物, 向国内外公开发行人。

《北京联合大学学报(自然科学版)》主要刊登学校有关学科领域中有一定学术水平、有所创新或具有较高应用价值的学术论文、科研报告; 国内外学术领域中的新动向、新理论、新技术的综述、评介; 优秀毕业论文、毕业设计; 高等教育研究, 以及高等学校的科研成果、学术活动报导等。设有: 科技发展论坛、基础理论与应用理论、应用技术研究、实验科学与技术、科研与科技信息管理、生命科学与生物技术、信息技术与计算机应用等栏目。

《北京联合大学学报(自然科学版)》以广大科研、信息工作者, 工程技术人员, 高等学校教师、学生、研究生及有志于学术研究的人员为读者对象, 学报为季刊, 逢季度末月 20 日出版, 每册定价 8.00 元, 全年定价 32 元。

国内邮发代号 80- 375, 国外发行代号 Q7172 欢迎投稿, 欢迎订阅。

通讯地址: 北京市朝阳区北四环东路 97 号北京联合大学学报编辑部(邮编 100101)

联系电话: 010- 64900023; 投稿信箱: ldxbbj3@buu.com.cn