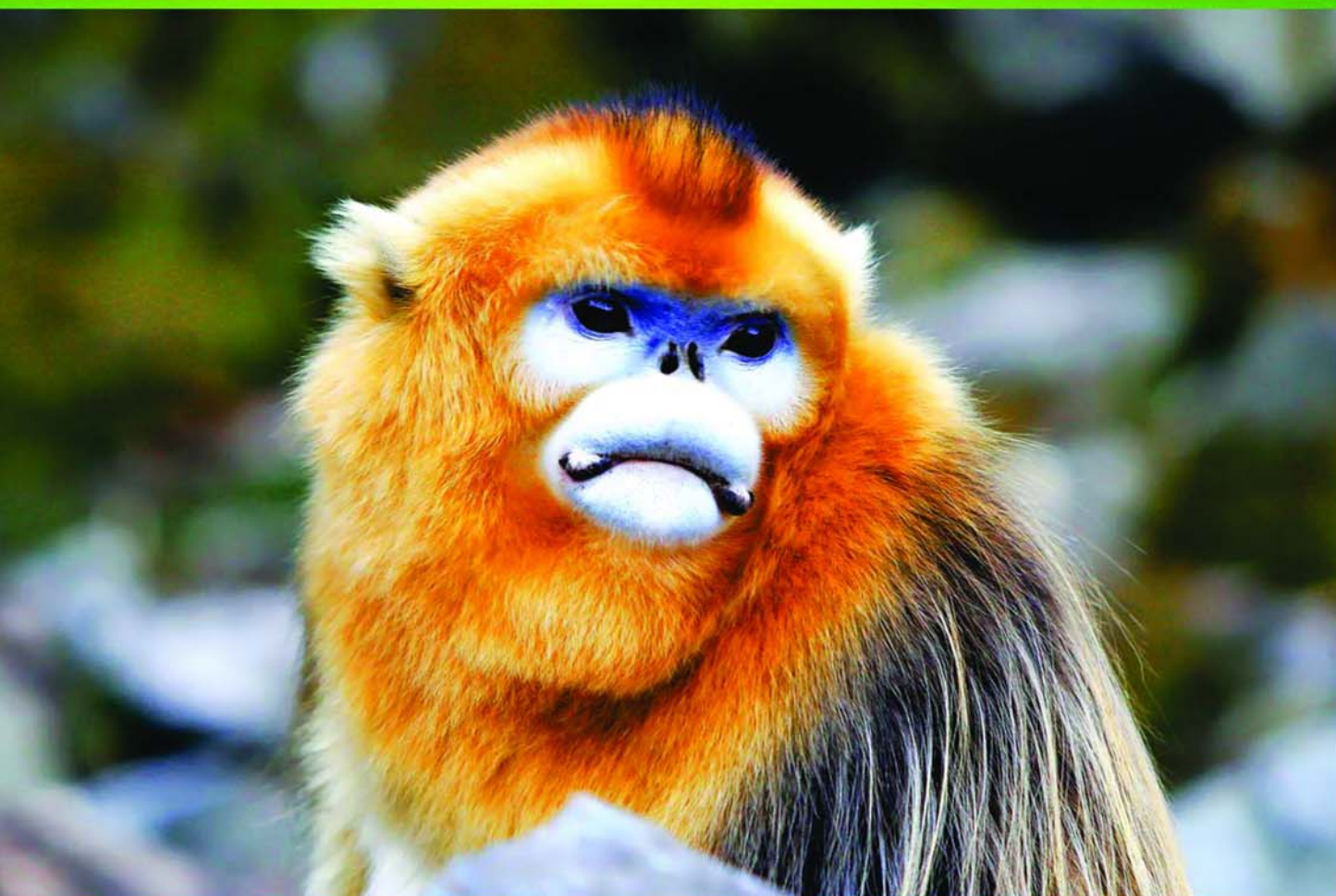


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第2期 Vol.32 No.2 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 2 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

北部湾秋季底层鱼类多样性和优势种数量的变动趋势	王雪辉,邱永松,杜飞雁,等 (333)
中国大陆鸟类和兽类物种多样性的空间变异	丁晶晶,刘定震,李春旺,等 (343)
粉蝶盘绒茧蜂中国和荷兰种群学习行为及 EAG 反应的比较	王国红,刘 勇,戈 峰,等 (351)
君主绢蝶的生物学及生境需求	方健惠,骆有庆,牛 犇,等 (361)
西南大西洋阿根廷滑柔鱼生物学年间比较	方 舟,陆化杰,陈新军,等 (371)
城市溪流中径流式低坝对底栖动物群落结构的影响	韩鸣花,海燕,周 斌,等 (380)
沉积再悬浮颗粒物对马氏珠母贝摄食生理影响的室内模拟	栗志民,申玉春,余南涛,等 (386)
太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制	徐燕青,陈建芳,高生泉,等 (394)
几株赤潮甲藻的摄食能力	张清春,于仁成,宋静静,等 (402)
高摄食压力下球形棕囊藻凝聚体的形成	王小冬,王 艳 (414)
大型绿藻浒苔藻段及组织块的生长和发育特征	张必新,王建柱,王乙富,等 (421)
链状亚历山大藻生长衰亡相关基因的筛选	仲 洁,隋正红,王春燕,等 (431)
太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响	刘忠华,李云梅,吕 恒,等 (438)
程海富营养化机理的神经网络模拟及响应情景分析	邹 锐,董云仙,张祯祯,等 (448)
沙质海岸灌化黑松对蛀食胁迫的补偿性响应	周 振,李传荣,许景伟,等 (457)
泽陆蛙和饰纹蛙蝌蚪不同热驯化下选择体温和热耐受性	施林强,赵丽华,马小浩,等 (465)
麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析	赵紫华,王 颖,贺达汉,等 (472)
镉胁迫对芥蓝根系质膜过氧化及 ATPase 活性的影响	郑爱珍 (483)
生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响	韩春梅,李春龙,叶少平,等 (489)
九州虫草菌丝体对 Mn 的耐性及富集	罗 毅,程显好,张聪聪,等 (499)
土霉素暴露对小麦根际抗生素抗性细菌及土壤酶活性的影响	张 昊,张利兰,王 佳,等 (508)
氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响	沈芳芳,袁颖红,樊后保,等 (517)
火炬树雌雄母株克隆生长差异及其光合荧光日变化	张明如,温国胜,张 瑾,等 (528)
湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能	潘春翔,李裕元,彭 亿,等 (538)
祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响	赵锦梅,张德罡,刘长仲,等 (548)
沙质草地生境中大型土壤动物对土地沙漠化的响应	刘任涛,赵哈林 (557)
腾格里沙漠东南缘可培养微生物群落数量与结构特征	张 威,章高森,刘光琇,等 (567)
塔克拉玛干沙漠南缘玉米对不同荒漠化环境的生理生态响应	李 磊,李向义,林丽莎,等 (578)
内蒙古锡林河流域羊草草原 15 种植物热值特征	高 凯,谢中兵,徐苏铁,等 (588)
不同密度条件下芨芨草空间格局对环境胁迫的响应	张明娟,刘茂松,徐 驰,等 (595)
环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响	任学敏,杨改河,王得祥,等 (605)
海藻酸铈配合物对毒死蜱胁迫下菠菜叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响	栾 霞,陈振德,汪东风,等 (614)
城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例	黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等 (622)
基于遥感和 GIS 的川西绿被时空变化研究	杨存建,赵梓健,任小兰,等 (632)
亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单——以台州地区为例	常 杰,任 远,史 琰,等 (641)
研究简报	
不同水分条件下毛茛苔草枯落物分解及营养动态	侯翠翠,宋长春,李英臣,等 (650)
大山雀对巢箱颜色的识别和繁殖功效	张克勤,邓秋香,Justin Liu,等 (659)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-01	



封面图说: 雄视——中国的金丝猴有川、黔、滇金丝猴三种,此外还有越南和缅甸金丝猴两种。金丝猴是典型的森林树栖动物,常年栖居于海拔 1500—3300m 的亚热带山地、亚高山针叶林、针阔叶混交林,常绿落叶阔叶混交林中,随着季节的变化,只在栖息的生境中作垂直移动。川金丝猴身上长着柔软金色长毛,十分漂亮。个体大,嘴角处有瘤状突起的是雄性金丝猴的特征。川金丝猴只分布在中国的四川、甘肃、陕西和湖北省。属国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012111763

邹锐,董云仙,张祯祯,朱翔,贺彬,刘永. 程海富营养化机理的神经网络模拟及响应情景分析. 生态学报, 2012, 32(2): 0448-0456.

Zou R, Dong Y X, Zhang Z Z, Zhu X, He B, Liu Y. Neural network modeling of the eutrophication mechanism in Lake Chenghai and corresponding scenario analysis. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 0448-0456.

程海富营养化机理的神经网络模拟及响应情景分析

邹 锐^{1,4}, 董云仙², 张祯祯³, 朱 翔², 贺 彬², 刘 永^{3,*}

(1. Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. 云南省高原湖泊国际研究中心, 昆明 650034;
3. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 4. 昆明诚锐环保科技有限公司, 昆明 650034)

摘要:揭示湖泊的富营养化发生机制、定量了解关键生源要素与藻类爆发的因果关联对有效改善湖泊水质和富营养化状况具有重要的科学与决策意义。以云南省程海为例,建立了基于神经网络的响应模型,对富营养化机理进行了研究,并从富营养化核心驱动因子识别、神经网络模型构建与架构分析以及叶绿素 a(Chl a)与 TN、TP 浓度降低的响应模拟几个方面对面临的科学问题进行探索。模拟结果表明,神经网络模型必须在适当的架构下才能产生科学合理的结果;程海的富营养化机制由一个氮(N)、磷(P)共限制的营养盐-藻类动力结构主导,但在此主导结构下拥有氮型限制的次级结构。基于神经网络模型模拟,推导出一系列基于湖体水质控制的 Chl a 响应的非线性函数,为程海的富营养化控制提供了快速决策支持。

关键词:神经网络模型;富营养化;模拟;程海;情景分析

Neural network modeling of the eutrophication mechanism in Lake Chenghai and corresponding scenario analysis

ZOU Rui^{1,4}, DONG Yunxian², ZHANG Zhenzhen³, ZHU Xiang², HE Bin², LIU Yong^{3,*}

1 Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA

2 Yunnan International Center for Plateau Lakes, Kunming 650034, China

3 The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

4 Kunming Challenger Technology, Ltd., Kunming 650034, China

Abstract: Understanding the eutrophication mechanism and quantifying the relationship between key nutrient loadings and the resulting algal blooms has critical scientific and practical significance for effectively improving water quality conditions in Lake Chenghai. Modeling approaches that are typically applied to explore the relationship between nutrients and algal blooms can be grouped into two general categories: (1) data driven approaches, and (2) mechanistic modeling approaches. Although both are potentially applicable approaches for Lake Chenghai, it was determined that only the data driven approach is viable in this case because of the severe data limitations that precluded the development of a mechanistic water quality model. Given the data availability and the need for a universal functional mapping capability, a Neural Network (NN) methodology was selected as the data-driven modeling platform for constructing the Lake Chenghai water quality model. NN models can yield potential deceptive effects caused by inclusion of insensitive parameters in the input nodes. With this in mind, the modeling analysis first used a nonlinear curve-fitting and correlation analytical method to screen all the monitored physical and chemical parameters to identify the key parameters. It was discovered that among all the parameters, only TP and TN were qualified for being included in the Lake Chenghai model because not only did they

基金项目:云南省科技厅社会事业发展专项(2009CA002);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-001)

收稿日期:2010-12-11; **修订日期:**2011-04-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yongliu@pku.edu.cn

show very high correlations with the chlorophyll-a concentration, but also, they are immune to the data-time coupling issues experienced by other parameters such as inorganic nitrogen and phosphorus. Following the identification of the key input parameters, a series of NN models with various architectures were developed to explore the quantitative relationship between chlorophyll-a and nutrients in the lake. Through extensive evaluations, it was discovered that when the complexity of the NN model increased to such a level that the number of hidden node was greater than or equal to 3, the NN models started to show the trait of memorization dominance, suggesting that they mimiced the observed data pattern through memorization rather than reasoning, thereby degrading the generalization capacity of the model. A NN model that cannot be generalized is less useful for practical application; therefore, the more complex network structures (those with greater than or equal to 3 hidden nodes) were discarded. As a result, two simple networks, having one and two hidden nodes respectively, were adopted as the final water quality models for Lake Chenghai. Two network structures were simultaneously applied as the basis of further analysis in this study because of the predictive uncertainty associated with network configurations. The two NN models were used to conduct a number of scenarios for analyzing the eutrophication mechanisms in Lake Chenghai. The modeling results showed that eutrophication in Lake Chenghai is controlled by a nested two-level limiting structure, where the dominant level is a nitrogen-phosphorus co-limiting structure, followed by a secondary limiting structure of nitrogen only. Based on the simulation results of the NN-based water quality models, a series of nonlinear functions relating chlorophyll-a concentration to water quality concentration control in Lake Chenghai were derived as a quick reference for eutrophication control decision making in the future.

Key Words: Neural Network Models; eutrophication; simulation; Lake Chenghai; scenario analysis

自 1960 年代以来,湖泊的富营养化问题已得到广泛研究,并成为国际上水环境研究的焦点^[1-3]。近 30 多年来,随着我国经济的高速发展以及相应的污染控制措施的滞后,使得我国的湖泊富营养化问题日趋严重,以至于目前我国已是世界上湖泊富营养化最严重的国家之一,相应地,对富营养化机理和防治的研究也就成为了我国湖泊研究的热点与难点^[4-5]。程海为云南省 9 大高原湖泊之一,属内陆湖,近十几年来水质情况日趋恶化、藻华现象频发,因此对程海富营养化机理和控制的研究就成为一名重要工作。此前,不少学者对程海的藻类生长以及水质富营养化进行了不同层面的研究^[6-9],但这些研究更多的是对现状的评估及定性建议,缺乏对程海富营养化机制及关键的藻类限制因子的定量了解。

国内外湖沼学的研究表明,要真正有效地为决策者提供决策依据以改善特定湖泊的水质,需要探明该湖泊的富营养化机制;具体而言,就是要定量了解关键的生源要素对藻类爆发的影响^[1-2]。实现这个目的主要依赖 2 类数学方法:基于数据的统计类模型方法、基于数据与机理的混合模型方法。由于后者不止要求拥有湖泊内部数据,且需要有足够数据来解析湖泊边界动力因素,在目前的条件下,对程海这类数据较为缺乏的湖泊开展复杂的机理模拟尚不可行。因此,基于数据的统计类模型就成为唯一可行的方法。这类模型中最常用的是传统多元统计学模型,但是这类模型需要建模者对模型函数类型作先验假设,因此在实际运用中有很大的局限性。国际上针对该问题开展了深入广泛的探索,并研究出了一系列先进的高级模型方法以弥补传统多元统计学模型的不足。人工神经网络模型(Artificial Neural Network, ANN)就是目前国际上研究较多的一种,它没有传统的统计学模型的局限性,并具有很强的函数映射能力,因此在模式识别、自动化控制、知识处理及运输与通信等领域都取得了显著进展^[10-12];在水质评价与预报领域,神经网络模型已得到应用并取得了较好的效果^[13-16]。自 20 世纪 90 年代始,神经网络模型被引入用以水质评价,尔后应用范围逐步扩大,并已由主要应用于湖泊富营养化状态和程度评价^[17-19]扩展到湖泊富营养化预测,如:太湖、杭州西湖、千岛湖等^[20-21],所采用的算法也越来越智能化、多样化和联合化,均取得了很好的效果^[22]。基于上述分析及程海的富营养化控制决策需求,本文采用神经网络模型作为程海富营养化机理模型的数学架构,建立相应的富营养化响应模型对程海的藻类与关键影响因子之间的关系进行了探索和研究,以期程海水水质恢复分析提供科学工具。

1 方法框架

程海富营养化机制响应研究的主要目的在于揭示程海富营养化的发生机制,定量理解关键的生源要素对藻类爆发的影响。采用的研究方法是基于数理统计分析的多层神经网络模型等模型。在本研究中,数理统计模型只是被用来识别程海中对藻类起关键作用的驱动因子,加之考虑到藻类对关键理化因素常呈现非线性的响应关系,在此采用非线性回归与相关分析的数理模型^[23]并耦合神经网络模型^[24]对数据进行分析。该方法包括几个主要的步骤:

(1) 富营养化核心驱动因子识别,依据现有监测数据,应用数理统计方法识别核心驱动因子,剔除不敏感的因子。以核心驱动因子的识别为建模出发点的理论依据在于,根据邹锐等^[25]的研究,在神经网络模型中,非关键驱动因子作为输入可能将会引起对网络预测的欺骗效应,从而可能导致网络过高或过低预测真实的输出,这样的模型将无法为可靠的决策提供依据。

(2) 基于识别的核心驱动因子,构建模拟程海富营养化驱动机制的神经网络模型。

(3) 应用构建的模型对藻类与核心驱动因子的响应关系进行模拟,探索对藻类动力的限制因子结构,并推导快速决策支持函数。

2 程海富营养化机制的神经网络模拟

2.1 富营养化核心驱动因子识别

湖泊富营养化状况通常用叶绿素 a(Chl a) 的数值来表征^[26-27],理论上可以应用多元统计的方法建立多元回归模型来定量描述 Chl a 与影响因子之间的关系;但 Chl a 可能同时对多个理化因子做出响应,而多元回归模型需要预先假定潜在模型形式,这样就给实际应用带来了不便。研究表明,神经网络模型在映射预先不知道具体函数形式的输入-输出参数之间的响应关系方面,较之多元统计回归模型有明显的优势^[28-29]。

为了避免非关键因子对神经网络模型的欺骗效应,本研究首先对关键驱动因子进行识别。程海水质数据库包含的主要理化因子有 COD、TN、TP、氨氮、温度、透明度及水位等,首先应用非线性回归与相关分析方法确定它们与 Chl a 之间的相关关系。本研究通过简单分析得到了各个理化因素与 Chl a 浓度之间的非线性拟合与相关系数,因篇幅所限,在此只给出 Chl a 与 4 个因子的非线性拟合与相关关系(图 1)。但需注意的是,仅仅根据相关系数来判别该因子是否为关键驱动因子是不可靠的,这是因为用于神经网络建模的关键驱动因子必须具备以下条件:

(1) 相关关系 一个特定理化因素能被界定为关键驱动因子的必要但不充分条件是它必须与 Chl a 的含量具有高度相关关系。

(2) 因果关联 在神经网络水质模型中,输入必须和输出具有单向的因果关系,而相关系数本身不具备因果关系的方向识别能力,因此单纯根据相关系数来确定敏感输入就会引起错误。这就是为什么条件(1)被定义为“必要但不充分”的原因。如,相关分析结果表明,Chl a 与浊度有非常高的正相关性,但是高浊度代表对藻类有抑制性的光照条件,所以高浊度应该导致低 Chl a 值,而不是促进 Chl a 增长。正是由于浊度与 Chl a 之间的高度相关性来源于它们在时间上的反向的因果关系,因此浊度不可作为预测 Chl a 的独立指标;同样,COD(或 BOD)在很大程度上是富营养化后蓝藻暴发的结果而不是原因;此外,COD 主要由有机物构成,而这些有机物在 TN、TP 这些指标中已经大部分得到反映;因此,浊度、COD 和 BOD 都不应成为预测 Chl a 的独立指标^[30]。

(3) 时间匹配 在环境因子中,温度、透明度、水位等与 Chl a 的相关系数均很小,但并不代表藻类生长不受这些因素影响,而是这些影响当反映到观测到的 Chl a 浓度值时,其间的关系变成了一种时间滞后的动态响应。而神经网络模型描述的是一种时间匹配的响应关系,所以用时间上不能匹配的因子来建立模型是不恰当的。虽然理论上可以开发具有时间滞后的神经网络模型,但开发这样高度复杂的动力模型在目前的程海数据条件下还是不太可行的。因此,上述环境因子也不适合置入神经网络模型中对程海藻类进行模拟。

在生源要素中,TN、TP 与 Chl a 有很强的相关关系,但 PO_4 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 的相关关系均很小,它们实际是

水体里对藻类生长控制最直接的因子,出现这种现象也是由于上述输入-输出响应的的时间不匹配。因此,温度、透明度、水位、 PO_4 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 这些要素也不适合置入模型中作为输入进行模拟,图 1 仅以温度为例加以说明。

综合上述 3 个判别条件,本研究确定只有 TN 和 TP 适宜于作为关键驱动因子置入程海富营养化神经网络模型,其出发点在于:①N 和 P 都是藻类生长所需的关键元素,从因果上而言它们是因,叶绿素是果,因此满足单向的因果链接条件;②TN 和 TP 不像其他环境因子及无机氮磷因子,没有对叶绿素的时间滞后效应,时间匹配上没有问题,因此满足时间匹配条件;③TN 和 TP 是综合性的因子,包含了无机氮磷的成分,因此使用它们作为模型输入也隐性的包含了无机 N、P 成分;④从统计分析结果看,TN、TP 和 Chl a 之间有很高的相关性,满足作为关键影响因子的相关关系条件(图 1)。

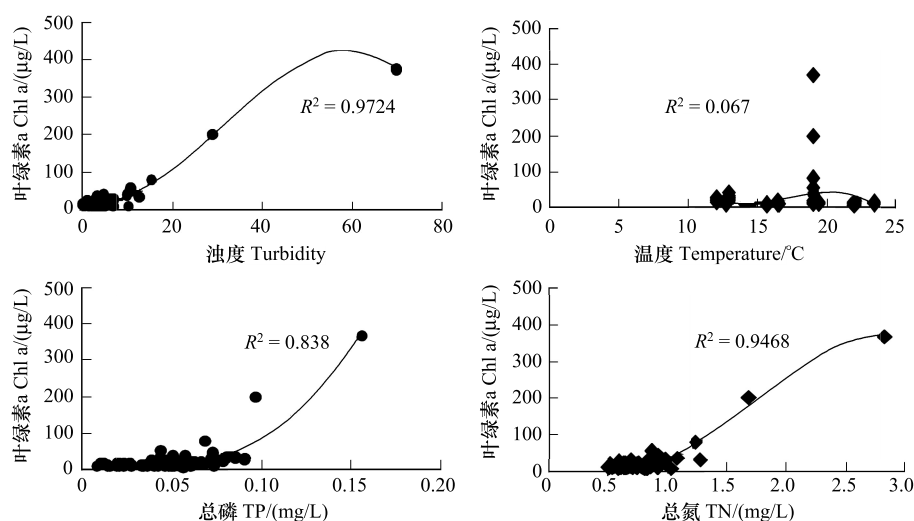


图 1 程海 Chl a 与主要水环境因子的相关关系

Fig. 1 The relationship between chlorophyll a and several environmental factors in Lake Chenghai

2.2 程海富营养化的神经网络模型构建

依据 Kolmogorov 的理论,一个隐层有 $2m+1$ 个神经元的 3 层神经网络模型可以实现一个 m 维的实向量与一个 n 维实向量之间的函数映射^[31]。对程海的神经网络模型而言,由于 $m=2$,因此具有 5 个或 5 个以下隐层神经元就应该足以完成对 TN、TP 与 Chl a 之间的函数映射。但为测试程海神经网络模型隐层中神经元数目的影响,本文构造了 5 个神经元数目分别为 1、2、3、5、7 的三层前向神经网络模型。模型数据基于云南省环境科学研究院在 2009 到 2010 年间所监测到的 95 组多指标水质理化数据;其中,应用随机采样的方法选取 75 组数据作为训练数据,其余 20 组数据作为验证数据。网络的训练采用多次重启的方法以避免陷入局部最优网络,而训练的收敛条件定为当模型泛化度开始下降为止,这样做有助于避免过度训练问题。为进一步确定模型的泛化性,确保这些神经网络模型具有比较可靠的预测能力,对每个网络都进行了 Chl a 对营养盐浓度降低的灵敏度分析。

2.2.1 网络结构 2-1-1

如图 2 所示,该网络对 Chl a 有很好的模拟和预测($R^2=0.957$);但要证明神经网络模型可以描述真实系统中的响应关系,还需关注模型的泛化度问题。神经网络模型的泛化度问题是神经网络模型研究领域的难点。一般来说,如果研究对象存在大量的数据,那么通过设定多组验证与测试数据的方式可以帮助评估神经网络的泛化度。但在本研究中,数据量的局限使得这种方法很难实施。因此,在基于数据的模拟精度评估基础上(图 2),进一步评估其对理论趋势的吻合程度以得到更可靠的泛化度信息。考虑到在本研究中神经网络模型的主要目的是对观测数据进行挖掘从而表达程海湖水中 Chl a 浓度对营养盐浓度的响应关系,这就要求

开发的神经网络模型能够在趋势上与理论结果相吻合,即必须能够从趋势上预测相应于营养盐降低的 Chl a 衰减以及相应于营养盐升高的 Chl a 浓度升高。之所以需要进行这一步的分析是由神经网络模型具有记忆与推理双重特性决定的。对于特定的系统,神经网络通过对观测数据的拟合而实现对其输入-输出响应关系的模拟,而对数据的拟合神经网络模型既可能通过推理,也可能通过记忆来实现。这就带来一个问题,如果神经网络模型是以记忆为主实现的数据拟合,那么这样的网络模型虽然对观测数据有很好的预测精度,但却可能并没有真正把握住系统内部的本质响应。

分析程海神经网络模型对理论趋势的吻合情况采用以下步骤:①将观测到的 TN 和 TP 值代入上述训练

好的神经网络模型中,得到一组 Chl a 预测值;②将观测到的 TN 值降低 20%、TP 值保持不变,代入同一个神经网络模型中,得到第 2 组 Chl a 预测值;③将第 2 组得到的 Chl a 值减去第 1 组的值,得到相应于 20% TN 削减的 Chl a 响应值;④将观测到的 TN 削减 30%、TP 值保持不变,代入上述神经网络模型中,得到第 3 组 Chl a 预测值。⑤将第 3 组得到的 Chl a 值减去第 2 组的值,得到进一步削减 10% TN 的 Chl a 响应值。

如果该神经网络模型泛化程度足够高,即该神经网络模型是以推理而不是记忆为主拟合数据,那么上述得到的 2 组 Chl a 响应值应该绝大多数或全部为负数。如果发现正数较多,就表明该模型没有正确映射到真实系统中的函数响应关系,从而得到与理论趋势相悖的结果。同样上述的 5 个步骤被应用到另外两种情形, TN 保持不变、削减 TP 以及 TN 和 TP 同时削减。由图 3,所有的响应都是负数,再结合图 2,可以认为该网络比较可靠地实现了对数据隐含关系的映射。

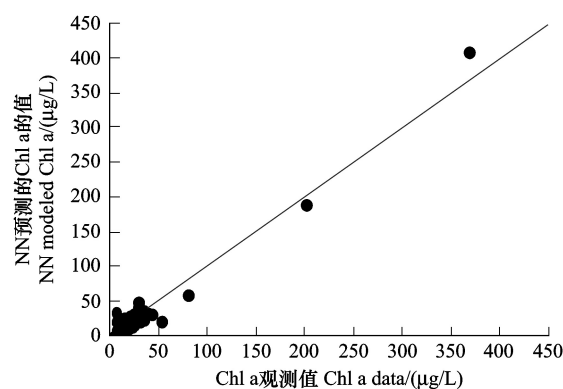


图2 网络结构 2-1-1 的 Chl a 预测值与实测值的对比关系

Fig. 2 The comparison of predicted result and true data of chlorophyll a-structure 2-1-1

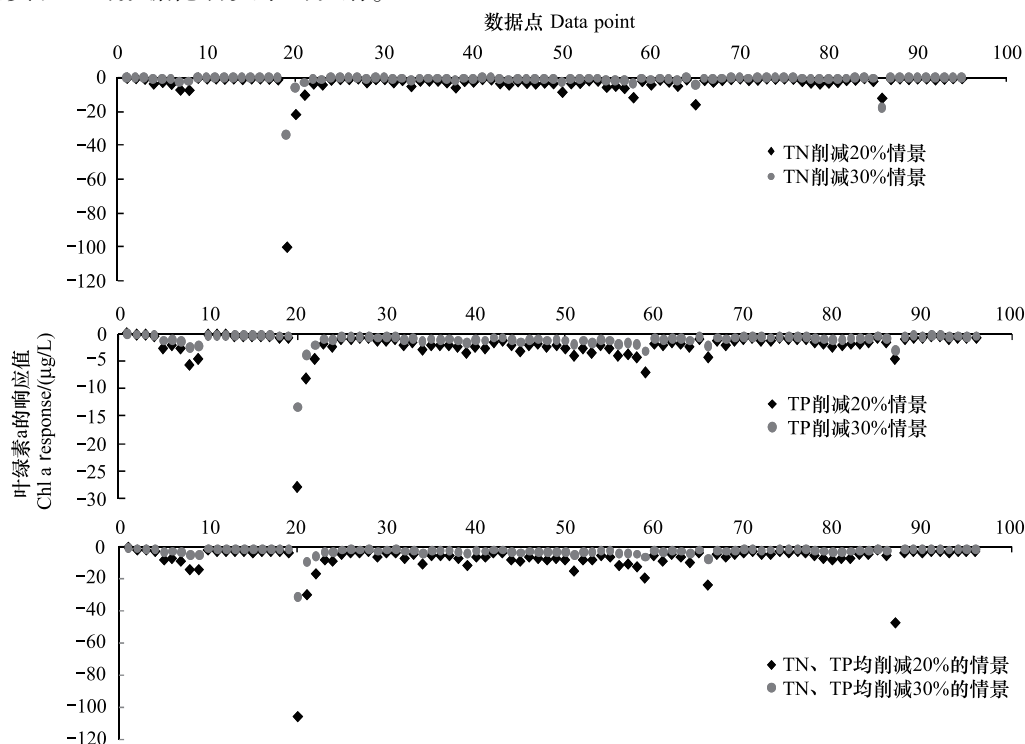


图3 网络结构为 2-1-1 时的 TN、TP 削减与 Chl a 响应

Fig. 3 Chlorophyll a response on TN and TP reduction-structure 2-1-1

2.2.2 网络结构 2-2-1

该神经网络也实现了对 Chl a 观测值很好的模拟和预测, $R^2=0.965$; 灵敏度分析也显示, 该模型与实际理论趋势吻合(图 4), 因此网络 2-2-1 是也比较可靠的模型。

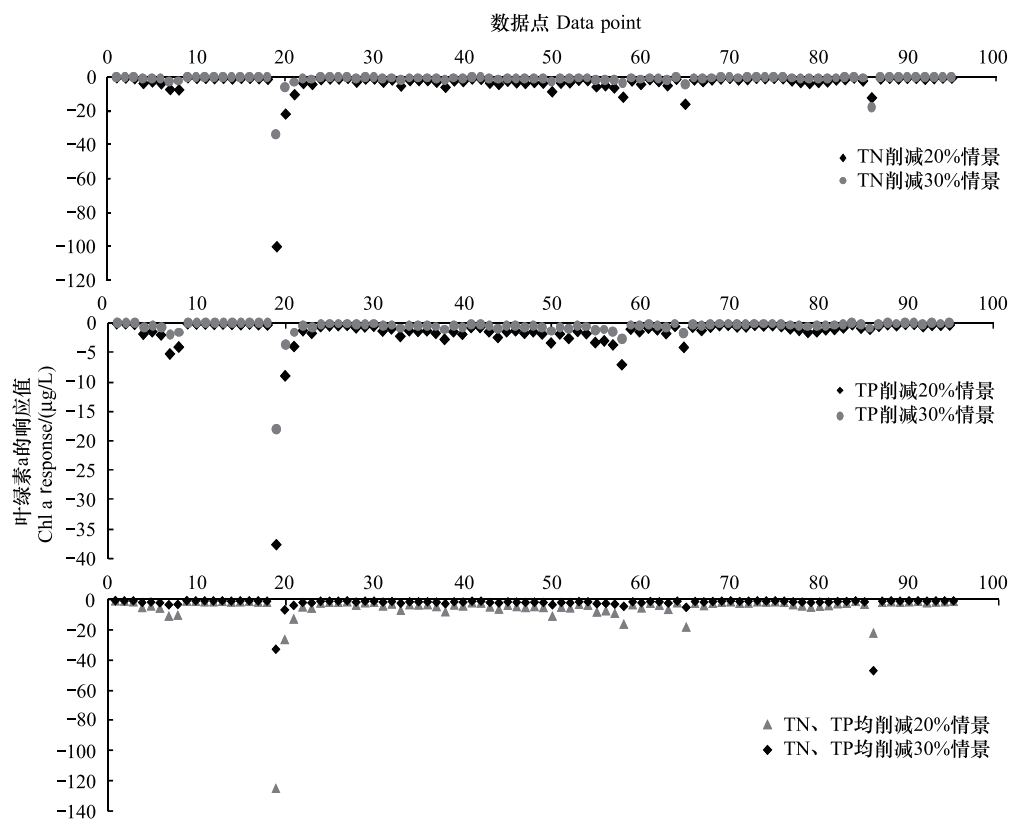


图 4 网络结构为 2-2-1 时的 TN、TP 浓度降低与 Chl a 的响应

Fig. 4 Chlorophyll a response on TN and TP reduction-structure 2-2-1

2.2.3 网络结构 2-3-1

当神经网络结构为 2-3-1 时, $R^2=0.967$, 初步分析网络 2-3-1 似乎也是一个有效的模型。在过去的神经网络模型研究中, 常常基于这样的结果就推断该网络是个准确的模型。但是, 由图 5 可知, 当理论趋势应该是所有响应值都是负数时, 模型预测的 Chl a 响应值却有不少正数, 与真实的理论趋势相反。因此, 这个网络结构尽管实现了表面上的准确性, 但这种表面上的准确性实际上来自神经网络模型对观测数据的记忆功能而非推理功能。一般而言, 过于简单的网络结构可能导致模型不能充分解析数据所隐含的非线性响应关系, 而过于复杂的网络结构则可能导致模型的记忆功能超过推理功能。基于上述分析, 本文推论当隐层神经元数目达到 3 或以上时, 该神经网络模型的复杂性可能就超过了问题所需要的复杂性, 从而导致泛化度的降低与预测能力的削弱。为了对这个推论进一步验证, 本研究接着对具有更高复杂性的两个网络模型 2-5-1 和 2-7-1 进行分析, 结果都出现了和网络 2-3-1 同样的现象。

综上, 当隐层神经元数目达到或超过 3 时, 神经网络结构的复杂性过高, 导致记忆功能超过推理功能, 因而相应模型的泛化程度不足以支撑 Chl a 对 TN、TP 变动的响应分析, 无法进一步用于情景预测模拟和分析。两个相对简单的网络架构, 2-1-1 和 2-2-1, 不仅能够准确地再现观测数据, 而且能够合理的推算输出变量(Chl a)对输入变量(TN 和 TP)的响应, 因此, 它们将作为程海富营养化神经网络模型, 用于进一步的富营养化响应分析。

在此需要注意的是, 对于神经网络这类人工智能模型, 其收敛性和泛化度确认都没有明确的指标。虽然本研究用了对理论趋势拟合的检验来加强对泛化度的评估, 但是这样的评估并不能为神经网络模型的精度提

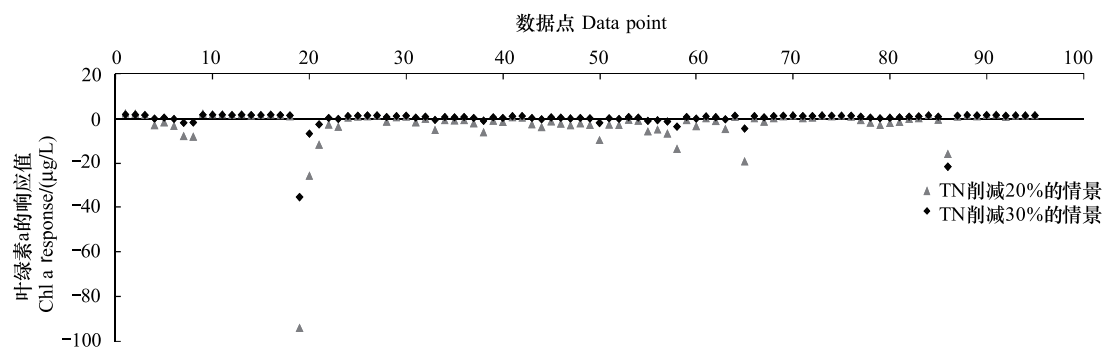


图5 网络结构为 2-3-1 时的 TN 削减与 Chl a 响应

Fig. 5 Chlorophyll a response on TN reduction-structure 2-3-1

供完全的保障。换言之,神经网络模型的预测结果仍会包含一定的不确定性,因此,为了在进一步的分析中考虑模型的不确定性,本研究用上述得到的 2 个可靠的神经网络架构进行分析。

3 基于神经网络模型的程海富营养化响应分析

程海富营养化的响应是通过分析 Chl a 浓度对一系列营养盐变化的响应来实现的。神经网络模型本质上是一类统计模型,因此在应用该模型进行富营养化响应分析时要注意不能无限度地扭曲输入以获取输出,避免不可靠结果。鉴于此,在模拟和情景分析中将 TN 和 TP 浓度的降低比例上限设定为 50%。分别选用 2-1-1 和 2-2-1 网络模型模拟了程海中营养物质浓度降低的 Chl a 响应;在 0%—50% 之间以 10% 为离散步长,对 TN 单因子、TP 单因子和 TN-TP 复合因子进行一系列的模拟(图 6 和图 7)。针对每组因子的 Chl a 响应结果,应用非线性回归的方法得到对应的非线性方程,用以表达程海 Chl a 对营养物质浓度降低的响应。

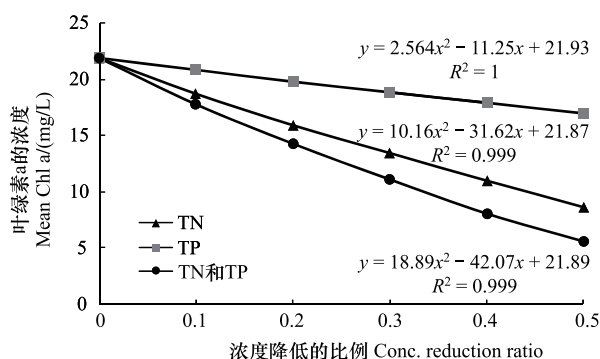


图6 网络结构为 2-1-1 时的 TN、TP 削减率与 Chl a 响应曲线

Fig. 6 Chlorophyll a response on TN、TP reduction ratio-structure 2-1-1

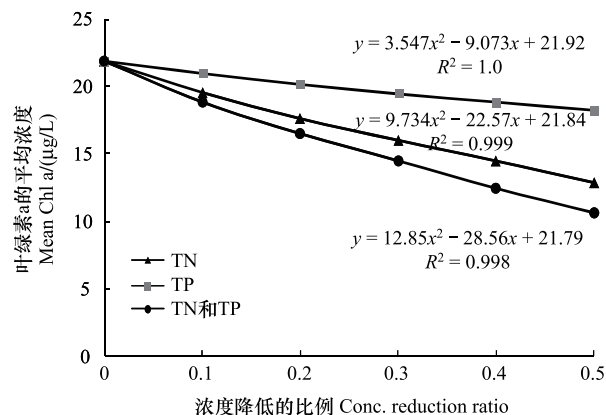


图7 网络结构为 2-2-1 时的 TN、TP 削减率与 Chl a 响应曲线

Fig. 7 Chlorophyll a response on TN、TP reduction ratio-structure 2-2-1

综合分析网络结构为 2-1-1 和 2-2-1 时的结果,可以评估 Chl a 对不同生源因子的响应方式、灵敏性以及为达到期望目标值时的 TN、TP 浓度降低范围。例如,若以 15 $\mu\text{g/L}$ 的 Chl a 值作为富营养化控制的目标,可以得到如下结论:①假设 TP 保持不变、只控制 TN,需使湖水中 TN 浓度降低 23%—38%,这里的削减水平是一个区间,是由采用不同的神经网络架构产生的,代表了模型分析的不确定性;②假设湖水内 TN 浓度不变、只控制 TP,则 2 个模型的结果都表明,在预设的削减上界之内,无论怎样削减 TP 都无法使湖内平均 Chl a 达到 15 $\mu\text{g/L}$ 的富营养控制目标;③如果同时控制 TN 和 TP,则所需的湖内浓度降低率只需要 17%—27%。

对比①和②可知,即使考虑模型的不确定性,程海湖中的藻类爆发主要是受 TN 控制,TP 相对起了比较

小的作用。但不能由此说明程海的藻类完全不受 TP 的限制,由图 6 和图 7 中 TP 削减响应曲线可见,在考虑模型不确定性的条件下,Chl a 对 TP 变化还是具有明显响应的,这说明程海湖中的藻类也在一定程度上受 TP 的限制。由上面的神经网络模型分析可知,程海的富营养化机制是由 N 和 P 两种生源要素共同控制的,削减其中的任何一种都可以引起湖内藻类浓度的下降。但两种生源要素的作用是有强弱区别的,TN 的作用明显要强于 TP 的作用。本研究通过对这种复合富营养机制的识别,为程海的流域水污染控制提供了重要的决策依据。此外,图 6 和图 7 中所给出的非线性函数的相关系数都达到了非常高的水平,介于 0.99 到 1.0 之间,因此可以直接用于初步的决策支持,帮助环境管理者与政府部门确定要实现某特定的 Chl a 目标值时所需要实现的营养盐削减水平。

4 结论

(1)数理统计方法为识别程海富营养化核心驱动因子提供了重要依据,但关键驱动因子的识别还必须结合对因果关系及时间匹配条件的判别。通过综合分析,确定 TN 和 TP 为适宜于置入程海富营养化神经网络模型的关键驱动因子。

(2)通过对多个网络架构的评估分析,发现当网络复杂性较低(即为 2-1-1 和 2-2-1)时,相应的神经网络模型不仅能够准确地再现观测数据,而且能够合理的推算输出变量(Chl a)对输入变量(TN 和 TP)的响应,被确立为程海富营养化神经网络模型;反之,过分复杂的网络架构将导致模型推理能力的下降,不利于对富营养化机理的探索。

(3)神经网络模型对 Chl a 与 TN、TP 的响应模拟表明程海在 N、P 共限制的营养盐-藻类动力主体结构下,同时拥有 N 型限制的次级结构。因此,对程海的富营养化控制要采取和一般淡水湖以控制 P 为主不同的方式,在对营养物质共同控制的前提下以控 N 为核心,从而提高控制和管理效率。

(4)通过系列神经网络模型模拟,推导出一组相关系数很高的非线性函数定量代表程海 TN-TP 控制和 Chl a 的响应关系,可为环境管理者进行快速的目标界定和指定初步的分阶段规划提供有效工具。

References:

- [1] Carpenter S R. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2005, 102(29): 10002-10005.
- [2] Smith V H, Joye S B, Howarth R W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(2): 351-355.
- [3] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, Boesch D F, Seitzinger S P, Havens K E, Lancelot C, Likens G E. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [4] Jin X C, Liu S K, Zhang Z S, Tu Q Y, Xu N N. *Lake in China—Research of Their Environment*, Vol 1. Beijing: China Ocean Press, 1995: 234-302.
- [5] Jin X C. The key scientific problems in lake eutrophication studies. *Acta Scientiae Circum Stantiae*, 2008, 28(1): 21-23.
- [6] Wang R N, Qian C Y. An investigation and research of the algal flora in Chenghai Lake. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences*, 1988, 10(3): 250-258.
- [7] Wu J L, Jiang X Z, Xia W L, Pan H X, Yin Y. Climate and primary productivity over the last 500 years of Chenghai Lake, Yunnan. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(2): 95-98.
- [8] Du J F. Ecological status and comprehensive treatment measures of Lake Chenghai. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(supplement): 130-131.
- [9] Dong Y X, Jin Y, Hu J Q, Guan Z G, He X X. Characteristics and origin and countermeasures of water bloom of Chenghai Lake in the winter. *Environmental Science Survey*, 2010, 29(3): 28-31.
- [10] Flood I, Kartam N. Neural networks in civil engineering II: Systems and application. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1994, 8(2): 149-161.
- [11] Li X D, Zeng G M, Huang G H, Li J B, Jiang R. Chaos neural network(NN) model for short-term predicting on the influent time series of WWTP. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 416-419.
- [12] Wang YJ, Jin S. Comparison of three kinds of BP neural network methods for water regime forecasting. *Water Resources and Power*, 2010, 28(2): 19-21, 12-12.
- [13] Lee J H W, Hodgkiss I J, Wong K T M, and Lam I H Y. Real time observations of coastal algal blooms by an early warning system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(1/2): 172-190.

- [14] Velo-Suárez L, Gutiérrez-Estrada J C. Artificial neural network approaches to one-step weekly prediction of dinophysis acuminate blooms in Huelva (Western Andalusia, Spain). *Harmful Algae*, 2007, 6(3): 361-371.
- [15] Walsh J J, Penta B, Dieterle D A, Paul Bissett W. Predictive ecological modeling of harmful algal blooms. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7(5): 1369-1383.
- [16] Wilson H, Recknagel F. Towards a generic artificial neural network model for dynamic predictions of algal abundance in freshwater lakes. *Ecological Modeling*, 2001, 146(1/3): 69-84.
- [17] Liu S W, Feng S Y. Application of artificial neural network to evaluation of lake eutrophication. *Shanghai Environmental Sciences*, 1996, 15(1): 11-14.
- [18] Lu W X, Zhu T C. Artificial neural network evaluation of lake eutrophication. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 645-650.
- [19] Han T, Li H E, Peng W Q. Application of neural network based on MATLAB toolbox to the evaluation of lake eutrophication. *Water Resources Protection*, 2005, 21(1): 24-26.
- [20] Pei H P, Luo N N, Jiang Y. Applications of back propagation neural network for predicting the concentration of chlorophyll-a in West Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 246-251.
- [21] Liu H, Yan L J. Back-Propagation Network Model for predicting the change of eutrophication of Qiandao Lake. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, 24(3): 411-416.
- [22] Yi Z Q. Review of research on eutrophication prediction in lakes and reservoirs with intelligent algorithm. *Water Resources and Power*, 2010, 28(8): 33-37.
- [23] Tao S. *Application of Mathematical Statistics*. Beijing: China Environmental Science Press, 1994.
- [24] Matthew Z. *Neural Networks in Artificial Intelligence*. West Sussex: Ellis Horwood Limited, 1990.
- [25] Zou R, Zhang Z Z, Liu Y, Guo H C. Neural networks for approximating numerical water quality models: applicability and deceptive effects of insensitive parameters. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 1964-1970.
- [26] Scheffer M. *Ecology of Shallow Lakes*. London: Chapman and Hall, 1998.
- [27] Çamdevyren H, Demyr N, Kanik A, Keskin S. Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of *chlorophyll-a* in reservoirs. *Ecological Modelling*, 2005, 181(4): 581-589.
- [28] Ramamurti V, Ghosh J. Regularization and Error Bars for the Mixture of Experts Network. Piscataway NJ: Proceeding of 1997 International Conference on Neural Networks, 1997: 221-225.
- [29] Zou R, Lung W S, Guo H C. Neural network embedded Monte Carlo approach for water quality modeling under input information. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, 16(2): 135142.
- [30] Liu Y, Guo H C, Yang P J. Exploring the influence of lake water chemistry on Chlorophyll a: A multivariate statistical model analysis. *Ecological Modelling*, 2010, 221(4): 681-688.
- [31] Lawrence S, Giles C L, Tsoi A C. What Size Neural Network Gives Optimal Generalization? Convergence Properties of Backpropagation. Technical Report, UMIACS-TR-96-22 and CS-TR-3617, 补充出版地: Institute for Advanced Computer Studies, University of Maryland, 1996.

参考文献:

- [4] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 屠清瑛, 徐南妮. 中国湖泊环境, 第1册. 北京: 海洋出版社, 1995: 234-302.
- [5] 金相灿. 湖泊富营养化研究中的主要科学问题——代“湖泊富营养化研究”专栏序言. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 21-23.
- [6] 王若南, 钱澄宇. 程海藻类植物调查研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 1988, 10(3): 250-258.
- [7] 吴敬禄, 蒋雪中, 夏威夷, 潘红玺, 尹宇. 云南程海 500 年来湖泊初始生产力的演化. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(2): 95-98.
- [8] 杜菊芳. 程海湖流域生态现状及综合治理措施探讨. *林业调查规划*, 2006, 31(增刊): 130-131.
- [9] 董云仙, 金玉, 胡锦乾, 关兆国, 和熊祥. 程海冬季水华特征、成因与控制对策. *环境科学导刊*, 2010, 29(3): 28-31.
- [11] 李晓东, 曾光明, 黄国和, 李建兵, 蒋茹. 城市污水量短时预测的混沌神经网络模型. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 416-419.
- [12] 王艳君, 金生. 河网水情预测的三种 BP 神经网络方法比较. *水电能源科学*, 2010, 28(2): 19-21, 12-12.
- [17] 刘首文, 冯尚友. 人工神经网络在湖泊富营养化评价中的应用研究. *上海环境科学*, 1996, 15(1): 11-14.
- [18] 卢文喜, 祝廷成. 应用人工神经网络评价湖泊的富营养化. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 645-650.
- [19] 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. *水资源保护*, 2005, 21(1): 24-26.
- [20] 裴洪平, 罗妮娜, 蒋勇. 利用 BP 神经网络方法预测西湖叶绿素 a 的浓度. *生态学报*, 2004, 24(2): 246-251.
- [21] 刘恒, 严力蛟. BP 神经网络在千岛湖水体富营养化变化预测中的应用. *科技通报*, 2008, 24(3): 411-416.
- [22] 易仲强. 智能算法在湖库富营养化预测中的应用研究综述. *水电能源科学*, 2010, 28(8): 33-37.
- [23] 陶澍. *应用数理统计方法*. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [24] 邹锐, 张祯祯, 刘永, 郭怀成. 神经网络模型用于数值水质模型逼近的适用性及非敏感参数的欺骗效应. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 1964-1970.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.2 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Dynamics of demersal fish species diversity and biomass of dominant species in autumn in the Beibu Gulf, northwestern South China Sea	WANG Xuehui, QIU Yongsong, DU Feiyan, et al (333)
Spatial variation in species richness of birds and mammals in mainland China	DING Jingjing, LIU Dingzhen, LI Chunwang, et al (343)
Comparative study on learning behavior and electroantennogram responses in two geographic races of <i>Cotesia glomerata</i>	WANG Guohong, LIU Yong, GE Feng, et al (351)
Biological characteristics and habitat requirements of <i>Parnassius imperator</i> (Lepidoptera: Parnassidae)	FANG Jianhui, LUO Youqing, NIU Ben, et al (361)
Annual variability in biological characteristics of <i>Illex argentinus</i> in the southwest Atlantic Ocean	FANG Zhou, LU Huajie, CHEN Xinjun, et al (371)
The impact of run-of stream dams on benthic macroinvertebrate assemblages in urban streams	HAN Minghua, YU Haiyan, ZHOU Bin, et al (380)
Effect of suspended sediment on the feeding physiology of <i>Pinctada martensii</i> in laboratory	LI Zhimin, SHEN Yuchun, YU Nantao, et al (386)
Potential nutrient limitation of phytoplankton growth in the Western and Central Pacific Ocean	XU Yanqing, CHEN Jianfang, GAO Shengquan, et al (394)
Ingestion of selected HAB-forming dinoflagellates	ZHANG Qingchun, YU Rencheng, SONG Jingjing, et al (402)
Formation of aggregation by <i>Phaeocystis globosa</i> (Prymnesiophyceae) in response to high grazing pressure	WANG Xiaodong, WANG Yan (414)
Growth and reproduction of the green macroalga <i>Ulva prolifera</i>	ZHANG Bixin, WANG Jianzhu, WANG Yifu, et al (421)
Screening of growth decline related genes from <i>Alexandrium catenella</i>	ZHONG Jie, SUI Zhenghong, WANG Chunyan, et al (431)
Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance	LIU Zhonghua, LI Yunmei, LU Heng, et al (438)
Neural network modeling of the eutrophication mechanism in Lake Chenghai and corresponding scenario analysis	ZOU Rui, DONG Yunxian, ZHANG Zhenzhen, et al (448)
The compensatory growth of shrubby <i>Pinus thunbergii</i> response to the boring stress in sandy coast	ZHOU Zhen, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al (457)
Selected body temperature and thermal tolerance of tadpoles of two frog species (<i>Fejervarya limnocharis</i> and <i>Microhyla ornata</i>) acclimated under different thermal conditions	SHI Linqiang, ZHAO Lihua, MA Xiaohao, et al (465)
Effects of landscape structure and key landscape factors on aphids-parasitoids-hyper parasitoids populations in wheat fields	ZHAO Zihua, WANG Ying, HE Dahan, et al (472)
Effects of cadmium on lipid peroxidation and ATPase activity of plasma membrane from Chinese kale (<i>Brassica alboglabra</i> Bailey) roots	ZHENG Aizhen (483)
Effects of ginger aqueous extract on soil enzyme activity, microbial community structure and soil nutrient content in the rhizosphere soil of ginger seedlings	HAN Chunmei, LI Chunlong, YE Shaoping, et al (489)
Manganese tolerance and accumulation in mycelia of <i>Cordyceps kyuusyuensis</i>	LUO Yi, CHENG Xianhao, ZHANG Congcong, et al (499)
Influence of oxytetracycline exposure on antibiotic resistant bacteria and enzyme activities in wheat rhizosphere soil	ZHANG Hao, ZHANG Lilan, WANG Jia, et al (508)
Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation	SHEN Fangfang, YUAN Yinghong, FAN Houbao, et al (517)
Differences in clonal growth between female and male plants of <i>Rhus typhina</i> Linn. and their diurnal changes in photosynthesis and chlorophyll fluorescence	ZHANG Mingru, WEN Guosheng, ZHANG Jin, et al (528)
Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province	PAN Chunxiang, LI Yuyuan, PENG Yi, et al (538)
The effect of different land use patterns on soil properties in alpine areas of eastern Qilian Mountains	ZHAO Jinmei, ZHANG Degang, LIU Changzhong, et al (548)
Responses of soil macro-fauna to land desertification in sandy grassland	LIU Rentao, ZHAO Halin (557)
Characteristics of cultivable microbial community number and structure at the southeast edge of Tengger Desert	ZHANG Wei, ZHANG Gaosen, LIU Guangxiu, et al (567)
Physiological and ecological responses of maize to different severities of desertification in the Southern Taramakan desert	LI Lei, LI Xiangyi, LIN Lisha, WANG Yingju, et al (578)
Characterization of caloric value in fifteen plant species in <i>Leymus chinensis</i> steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia	GAO Kai, XIE Zhongbing, XU Sutie, et al (588)
Spatial pattern responses of <i>Achnatherum splendens</i> to environmental stress in different density levels	ZHANG Mingjuan, LIU Maosong, XU Chi, et al (595)
Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an <i>Abies fargesii</i> - <i>Betula utilis</i> mixed forest	REN Xuemin, YANG Gaihe, WANG Dexiang, et al (605)
Effects of alginate cerium complexes on ascorbate- glutathione cycle in spinach leaves under chlorpyrifos stress	LUAN Xia, CHEN Zhende, WANG Dongfeng, et al (614)
Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: a case study of Xiamen City	HUANG Jucong, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (622)
The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and Remote sensing	YANG Cunjian, ZHAO Zijian, REN Xiaolan, et al (632)
An inventory of BVOC emissions for a subtropical urban-rural complex: Greater Taizhou Area	CHANG Jie, REN Yuan, SHI Yan, et al (641)
Scientific Note	
Litter decomposition and nutrient dynamics of <i>Carex lasiocapa</i> under different water conditions	HOU Cuicui, SONG Changchun, LI Yingchen, et al (650)
Nest-box color preference and reproductive success of great tit	ZHANG Keqin, DENG Qiuxiang, Justin Liu, et al (659)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 2 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 2 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元