

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第23期 Vol.31 No.23 **2011**

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 31 卷 第 23 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

不同海拔高度高寒草甸光能利用效率的遥感模拟·····	付 刚,周宇庭,沈振西,等 (6989)
天山雪岭云杉大气花粉含量对气温变化的响应·····	潘燕芳,阎 顺,穆桂金,等 (6999)
春季季风转换期间孟加拉湾的初级生产力·····	刘华雪,柯志新,宋星宇,等 (7007)
降水量对川西北高寒草甸牦牛粪分解速率的影响 ·····	吴新卫,李国勇,孙书存 (7013)
基于 SOFM 网络对黄土高原森林生态系统的养分循环分类研究·····	陈 凯,刘增文,李 俊,等 (7022)
不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征 ·····	王 琰,陈建文,狄晓艳 (7031)
盐生境下硅对坪用高羊茅生物学特性的影响 ·····	刘慧霞,郭兴华,郭正刚 (7039)
高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响·····	黄激激,张念念,胡庭兴,等 (7047)
黄土高原水土保持林对土壤水分的影响 ·····	张建军,李慧敏,徐佳佳 (7056)
青杨雌雄群体沿海拔梯度的分布特征·····	王志峰,胥 晓,李霄峰,等 (7067)
大亚湾西北部春季大型底栖动物群落特征·····	杜飞雁,林 钦,贾晓平,等 (7075)
湛江港湾浮游桡足类群落结构的季节变化和影响因素·····	张才学,龚玉艳,王学锋,等 (7086)
台湾海峡鲈鱼种群遗传结构·····	张丽艳,苏永全,王航俊,等 (7097)
洱海入湖河流苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素·····	于 超,储金宇,白晓华,等 (7104)
转基因鱼试验湖泊铜锈环棱螺种群动态及次级生产力·····	熊 晶,谢志才,蒋小明,等 (7112)
河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征 ·····	王维奇,徐玲琳,曾从盛,等 (7119)
EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及铅锌累积特征的影响 ·····	王红新,胡 锋,许信旺,等 (7125)
不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发的影响·····	卢艳艳,宋付朋 (7133)
垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响·····	马 丽,李潮海,付 景,等 (7141)
DCE 不同施用时间对小麦生长期 N ₂ O 排放的影响 ·····	纪 洋,余 佳,马 静,等 (7151)
氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用 ·····	刘建芳,周瑞莲,赵 梅,等 (7161)
东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价 ·····	罗 燕,乔玉辉,吴文良 (7170)
土壤施硒对烤烟生理指标的影响·····	许自成,邵惠芳,孙曙光,等 (7179)
不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响·····	宋 伟,赵长星,王月福,等 (7188)
西花蓟马的快速冷驯化及其生态学代价·····	李鸿波,史 亮,王建军,等 (7196)
温度对麦长管蚜体色变化的影响·····	邓明明,高欢欢,李 丹,等 (7203)
不同番茄材料对 B 型烟粉虱个体发育和繁殖能力的影响 ·····	高建昌,郭广君,国艳梅,等 (7211)
基于生态系统受扰动程度评价的白洋淀生态需水研究·····	陈 贺,杨 盈,于世伟,等 (7218)
两种典型养鸡模式的能值分析 ·····	胡秋红,张力小,王长波 (7227)
四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系分析的数学模型设计 ·····	何宗祥,张庭廷 (7235)
流沙湾海草床重金属富集特征·····	许战州,朱艾嘉,蔡伟叙,等 (7244)
基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析 ·····	张培峰,胡远满,熊在平,等 (7251)
景观空间异质性及城市化关联——以江苏省沿江地区为例·····	车前进,曹有挥,于 露,等 (7261)
基于 CVM 的太湖湿地生态功能恢复居民支付能力与支付意愿相关研究·····	于文金,谢 剑,邹欣庆 (7271)
专论与综述	
北冰洋海域微食物环研究进展·····	何剑锋,崔世开,张 芳,等 (7279)
城市绿地的生态环境效应研究进展·····	苏泳娴,黄光庆,陈修治,等 (7287)
城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应 ·····	方凤满,林跃胜,王海东,等 (7301)
研究简报	
三峡库区杉木马尾松混交林土壤 C、N 空间特征 ·····	林英华,汪来发,田晓堃,等 (7311)
广州小斑螟发生与环境因子的关系·····	刘文爱,范航清 (7320)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 39 * 2011-12



封面图说:黄河的宁夏段属于中国的半荒漠地区,这里气候干燥、降水极少(250mm 以下)、植被缺乏、物理风化强烈、风力作用强劲、其蒸发量超过降水量数十倍。人们从黄河中提水引水灌溉土地,就近形成了荒漠中的绿洲。有水就有生命,有水就有绿色。这种独特的条件形成了人与沙较量的生态关系——不是人逼沙退就是沙逼人退。

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

何宗祥, 张庭廷. 四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系分析的数学模型设计. 生态学报, 2011, 31 (23): 7235-7243.

He Z X, Zhang T T. Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic *Microcystis aeruginosa*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (23): 7235-7243.

四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系 分析的数学模型设计

何宗祥¹, 张庭廷^{2,*}

(1. 安徽师范大学数学计算机科学学院, 芜湖 241000; 2. 安徽师范大学生命科学学院 安徽, 芜湖 241000)

摘要: 脂肪酸类物质可有效抑制蓝藻水华。根据 4 种 18C 脂肪酸对产毒铜绿微囊藻抑制的试验数据, 建立了: (1) 不同脂肪酸单独抑藻的时-效关系分析的数学模型。根据该类时-效模型能够比较方便、快捷地得到不同时间要求下的半抑制浓度 (EC_{50})、最小有效浓度 (MIC) 等指标的预测值。(2) 多种脂肪酸复合抑藻的时-效关系分析的数学模型。该模型的建立, 为不同类型脂肪酸抑藻进行量效关系分析奠定了较好的基础。通过与试验观测值比较, 这两大类时-效关系分析的数学模型是适用的、有效的、具有很好的预测精度。

关键词: 数学模型; 脂肪酸; 时-效关系; 量效关系

Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic *Microcystis aeruginosa*

HE Zongxiang¹, ZHANG Tingting^{2,*}

1 College of Mathematics and Computer, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

2 College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

Abstract: Water eutrophication is one of the most serious environmental problems in the world, and the concomitant bloom of blue-green algae has become a great threat to the aquatic ecosystem including inland lakes, leading to an array of economic, ecological and social problems. It has been characterized that some allelochemicals, i. e. fatty acids, derived from aquatic macrophytes can inhibit effectively the growth of blue-green algae. The relationship between the inhibitory effect of fatty acids on the growth of blue-green algae and the chemical structure of fatty acids can be summarized as follows: firstly, the more unsaturated bonds in fatty acid, the stronger on the blue-green algae growth inhibition; secondly, the shorter the carbon chain of fatty acid, the better on the inhibition of algal growth, and thirdly, fatty acids with odd-numbered carbon atoms are more effective than those with even-numbered ones on the growth of blue-green algae. In order to further reveal the time- and concentration-dependent growth-inhibiting scenario of fatty acids on blue-green algae, two mathematical models were constructed based on the experimental data obtained from the inhibitory effects of four 18-carbon fatty acids, i. e. α -linolenic acid (cis-9,12,15-octadecatrienoic acid), linoleic acid (cis-9,12-octadecadienoic acid), oleic acid (cis-9-octadecenoic acid), and stearic acid (octadecanoic acid) on the growth of toxic *Microcystis aeruginosa*. The first model was constructed based on the time-efficacy analysis of individual fatty acid on the growth of *Microcystis aeruginosa*. According to this model the half maximal effective concentration (EC_{50}) and minimal inhibitory concentration (MIC) at varying exposure time can be calculated easily and quickly. The second model was constructed according to the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30870429)

收稿日期: 2010-09-30; 修订日期: 2011-01-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyhzt@mail. ahnu. edu. cn

time-efficacy analysis of multi-fatty acids (α -linolenic acids, linoleic acid and oleic acid complex) on toxic *M. aeruginosa*. These two kinds of models will lend fundamental support to the time- and concentration-dependent analysis of different fatty acids on the growth-inhibiting effects of algae. Compared to the experimental data, such models are practical, effective and accurate with respect to the time-efficacy relationship analysis of fatty acids on the growth-inhibiting of *M. aeruginosa*. These models are of important significance in two aspects. It will shed light on the design of most economical scheme for blue-green algae control and on the development of environmental friendly algacide on the one hand, and on the other, it changes the macroscopic water bloom control into a micro-scale one and converts the conventional quantitative analysis to fine prediction and budget.

Key Words: mathematical model; fatty acids; time-effect relationship; concentration-effect relationship

近年来,蓝藻水华的治理引起全世界的高度关注。利用植物分泌的化感物质来控制水华藻类是一种具有发展潜力的新型生物技术^[1-2]。脂肪酸类物质在陆生和水生植物中普遍存在,被认为是化感物质中的一大类型,如张庭廷从大型水生植物普生轮藻(*Chara vulgaris*)中分离得到3种脂肪酸类化感物质—亚油酸、软脂酸和豆蔻酸,发现3种脂肪酸均有不同程度的抑藻作用^[2], Alamsjah 等^[3]从大型海藻裂片石莼(*Ulva fasciata* Delile)分离鉴定出数种多不饱和脂肪酸,如4,7,10,13-十六碳四烯酸、6,9,12,15-十八碳四烯酸、 α -亚麻酸,发现这些不饱和脂肪酸对海洋浮游藻类如卡盾氏藻(*Chattonella antiqua*)、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi* Hansen)具有强烈抑制作用。Greca 等^[4]从马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica*)分离出亚油酸和亚麻酸,证明其具有很强的抑藻效应。张庭廷等^[5]进一步研究了17种脂肪酸抑藻的构效关系,发现了脂肪酸的抑藻活性与其结构的有关规律,即不饱和脂肪酸的抑藻效果较含有相同碳链的饱和脂肪酸好,饱和脂肪酸碳链越短抑藻效果越好,奇数碳脂肪酸总体较偶数碳脂肪酸抑藻效果好;多种脂肪酸组合具有协同抑藻作用等。尽管有关脂肪酸的抑藻作用已引起人们的广泛重视和研究^[6],但在所有文献中,有关脂肪酸抑藻的时-效关系分析的数学模型方面的研究却鲜见报道,这一空白急需填补,以便对脂肪酸抑藻的规律有更全面的了解和认识,为脂肪酸抑藻分析、设计和建立出合理的数学模型,为利用脂肪酸进行抑藻,开发出满足要求且最经济的除藻方案提供有用的依据,同时也为利用其他化感物质等抑藻的数学模型设计探索出一个有用的模式。

因此,本研究根据单一脂肪酸抑藻的实验数据,通过对单一脂肪酸抑藻的深入分析,建立了不同脂肪酸单独抑藻的时-效关系分析的数学模型。该模型不仅揭示和反映了单一脂肪酸抑藻的时-效关系,同时还可以比较方便、快捷得到不同时间节点上的半抑制浓度(EC_{50})、最小有效浓度(MIC)等指标的预测值。进而可以为利用单一脂肪酸进行抑藻提供决策依据和行为参考。

同时在此基础上,对多种脂肪酸联合抑藻也建立了时-效关系分析的数学模型。该模型不仅反映了在多种脂肪酸联合作用下铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的状况,而且还可以由此得到不同类型脂肪酸抑藻的量效关系分析,同时也为进一步利用多种脂肪酸联合抑藻、研制生物杀藻剂提供预测的量化指标。

1 单一脂肪酸单独抑藻的时-效关系分析的数学模型设计

1.1 实验数据

文献^[5]已就实验材料、实验方法、单一脂肪酸的抑藻实验作了具体的描述。在此基础上进行了重复性试验,结果见图1。

1.2 对照组的时-效关系分析的数学模型

根据铜绿微囊藻种群生长的特点,选择 Logistic 模型^[7]作为对照组铜绿微囊藻生长的时-效关系分析的数学模型。

该模型的基本形式为:具有初值问题的微分方程 $\frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K}\right)$, 式中, $N(t)$ 为 t 时刻铜绿微

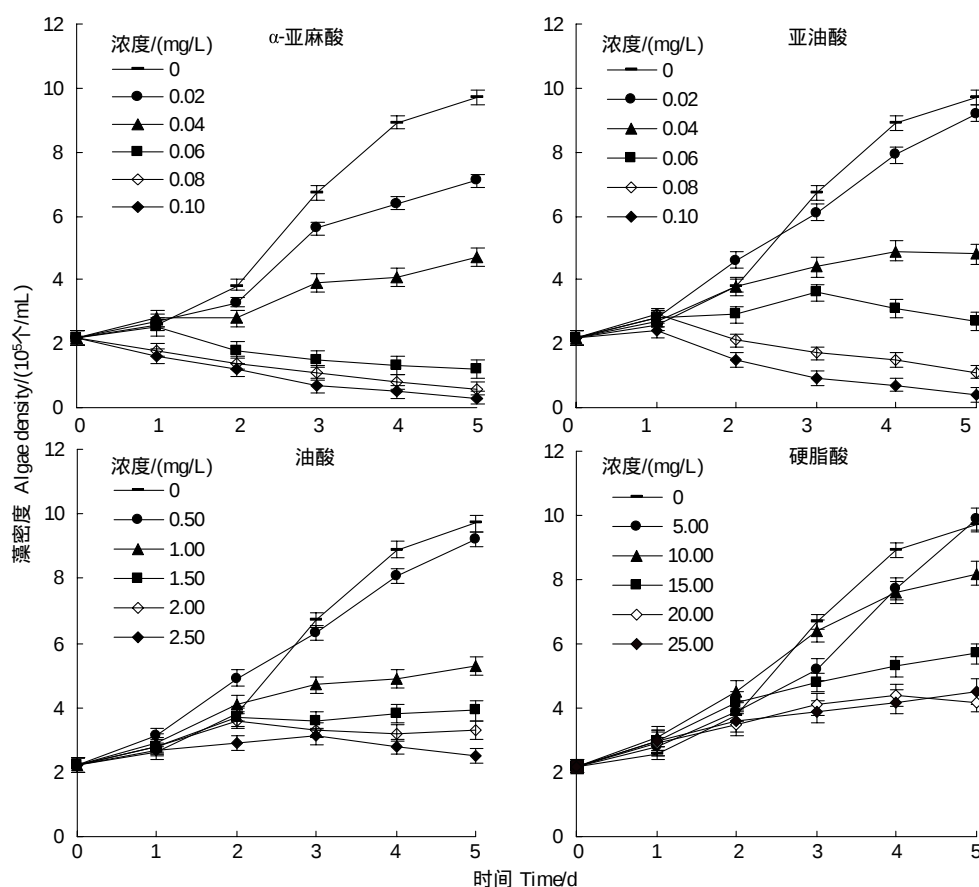


图1 4种脂肪酸在不同浓度下分别对产毒铜绿微囊藻的抑藻效应

Fig. 1 Inhibitory effect of the four kinds of fatty acid at different concentrations on toxic *M. aeruginosa* respectively

囊藻的密度, $N(t_0)$ 为铜绿微囊藻的初始密度, K 为铜绿微囊藻的环境最大容纳量, r 为铜绿微囊藻的增长率。

由该微分方程可立即得出: $\frac{d^2 N(t)}{dt^2} = r^2 N(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K}\right) \left(1 - \frac{2N(t)}{K}\right)$ 利用所求的一阶、二阶导数, 能够比较方便地得到对照组铜绿微囊藻生长的速度、速度的变化率^[8]、弹性、单调区间^[8]、极值、凹凸区间^[8]、拐点等分析性质, 为进一步精确认识、了解对照组铜绿微囊藻生长的状况提供了保证。

该微分方程的解为:

$$N(t) = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{N_0} - 1\right) e^{-r(t-t_0)}}$$

对上述方程进行拟合, (可采用的拟合方法很多, 这里所选择的是 HP38G 图形计算器进行拟合。对照组铜绿微囊藻的藻密度值的实验数据见图 2。) 可得: 对照组铜绿微囊藻生长的时-效关系分析的数学模型:

$$N(t) = \frac{10.3192156885}{1 + 9.9884878418 \cdot 4e^{-1.00549575483t}} \quad (1)$$

图 2 给出了对照组在同一时间节点上, 实验得到的藻密度值与利用上述模型(1)计算出的藻密度值。通

过计算可得: 这两组数据的非线性相关指数^[9] (即非线性可决系数 $R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}$, 式中, $\hat{y}_i$ 是通过模型计算出来的理论值) 为 0.992398。

这表明: 实验得到的藻密度数据和利用上述模型(1)计算出来的藻密度数据的非线性关系的相关程度是

很高的,所拟合的数学模型是合理的、有意义的。

1.3 不同初始浓度的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分析的数学模型设计

1.3.1 建立数学模型的机理分析及建模

从铜绿微囊藻在不同初始浓度的 α -亚麻酸环境下的生长过程中可以发现,铜绿微囊藻种群生长的特点有着比较大的变化,既有别于对照组铜绿微囊藻的生长规律,又与对照组铜绿微囊藻的生长规律有着紧密的联系。

为了方便讨论,根据铜绿微囊藻在不同初始浓度的 α -亚麻酸环境下的生长、死亡的规律,作如下假设:

(i) α -亚麻酸的浓度变化百分率与铜绿微囊藻的浓度成正比,设比例系数为 K_1 。

(ii) 铜绿微囊藻的对照组生长率由(1)知为: $r = 1.0054957548$ 。

(iii) 由于 α -亚麻酸是具有 Δ^9 、 Δ^{12} 、 Δ^{15} 3 个双键的三烯酸,因此可能通过自由基的链锁反应,使铜绿微囊藻氧自由基产生增多,引起细胞膜的脂质过氧化,从而导致铜绿微囊藻的死亡。于是有铜绿微囊藻的死亡速度与 α -亚麻酸的浓度成正比,设比例系数为 K_2 。

(1) 根据以上假设,以及实验过程中, α -亚麻酸的质量的变化关系可得:

在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内,有

$$V[\mu(t + \Delta t) - \mu(t)] = -K_1 N(t) V \mu(t) \Delta t$$

式中, $\mu(t)$ 为 α -亚麻酸的浓度, V 为 α -亚麻酸的容积。

于是,可得 α -亚麻酸浓度变化的规律,用微分方程表示为:

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = -K_1 N(t) \mu(t) \quad (2)$$

该微分方程的解为:

$$\mu(t) = A e^{-K_1 N(t)} \quad (3)$$

(2) 又根据上述假设以及实验过程中铜绿微囊藻的变化量的关系,在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内,铜绿微囊藻总量的变化量为该时间段对照组铜绿微囊藻的生长量与铜绿微囊藻的死亡量的差可得:

$$V[N(t + \Delta t) - N(t)] = (r - \frac{r}{K} N(t)) V N(t) \Delta t - K_2 V N(t) \mu(t) \Delta t$$

于是,以上铜绿微囊藻浓度变化的规律,可用微分方程表示为:

$$\frac{dN(t)}{dt} = r N(t) - \frac{r}{K} N^2(t) - K_2 N(t) \mu(t)$$

将(3)式代入该微分方程,可得:

$$\begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= r N(t) - \frac{r}{K} N^2(t) - K_2 N(t) \mu(t) = r N(t) - \frac{r}{K} N^2(t) - K_2 A N(t) e^{-K_1 N(t)} \\ &= -K_2 A N(t) e^{-K_1 N(t)} + 1.0054957548 N(t) - 0.0974391644832 N^2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

1.3.2 不同初始浓度的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分析的数学模型拟合

根据不同初始浓度的 α -亚麻酸抑藻实验得到的数据(图1),对不同浓度的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分

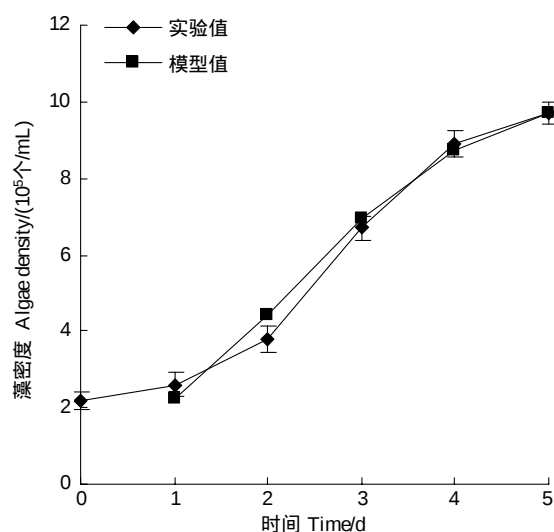


图2 对照组铜绿微囊藻密度的模型值与实验值

Fig. 2 The simulation value and experimental value of toxic *M. aeruginosa* densities in the control group

析的数学模型进行拟合。具体结果见表 1。

表 1 不同浓度的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分析的数学模型

Table 1 The mathematical model based on the time-effect relationship analysis of different α -linolenic acid inhibiting on toxic *Microcystis aeruginosa*

浓度 Concentration/(mg/L)	拟合模型 Fitting model
0.02	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.36902N(t)e^{-0.06072014N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.04	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.51483N(t)e^{-0.00379234N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.06	$\frac{dN(t)}{dt} = -1.087264N(t)e^{-0.09210650N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.08	$\frac{dN(t)}{dt} = -1.31332923N(t)e^{-0.12507064N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.10	$\frac{dN(t)}{dt} = -1.420184N(t)e^{-0.132949144N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$

利用表 1 中的一阶导数,可求出相应的二阶导数如下:

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{d^2N(t)}{dt^2} \right|_{0.02\text{mg/L}} &= [0.136176N(t) - 0.00827N^2(t)]e^{-0.12144N(t)} \\
 &+ [-0.7421N(t) + 0.130401N^2(t) - 0.00218N^3(t)]e^{-0.06072N(t)} \\
 &+ 1.011022N(t) - 0.29392N^2(t) + 0.018989N^3(t) \\
 \left. \frac{d^2N(t)}{dt^2} \right|_{0.04\text{mg/L}} &= [0.26505N(t) - 0.00101N^2(t)]e^{-0.00758N(t)} \\
 &+ [-1.03532N(t) + 0.152457N^2(t) - 0.00019N^3(t)]e^{-0.00379N(t)} \\
 &+ 1.011022N(t) - 0.29392N^2(t) + 0.018989N^3(t) \\
 \left. \frac{d^2N(t)}{dt^2} \right|_{0.06\text{mg/L}} &= [1.182143N(t) - 0.10888N^2(t)]e^{-0.184213N(t)} \\
 &+ [-2.18648N(t) + 0.418521N^2(t) - 0.00976N^3(t)]e^{-0.0921065N(t)} \\
 &+ 1.011022N(t) - 0.29392N^2(t) + 0.018989N^3(t) \\
 \left. \frac{d^2N(t)}{dt^2} \right|_{0.08\text{mg/L}} &= [1.724834N(t) - 0.21573N^2(t)]e^{-0.25014128N(t)} \\
 &+ [-2.64109N(t) + 0.549071N^2(t) - 0.01601N^3(t)]e^{-0.12507064N(t)} \\
 &+ 1.011022N(t) - 0.29392N^2(t) + 0.018989N^3(t) \\
 \left. \frac{d^2N(t)}{dt^2} \right|_{0.10\text{mg/L}} &= [2.016923N(t) - 0.26815N^2(t)]e^{-0.265898288N(t)} \\
 &+ [-2.85598N(t) + 0.604995N^2(t) - 0.0184N^3(t)]e^{-0.132949144N(t)} \\
 &+ 1.011022N(t) - 0.29392N^2(t) + 0.018989N^3(t)
 \end{aligned}$$

利用 Simpson 公式等方法^[10],可以求出表 1 中微分方程在相应的时间节点上铜绿微囊藻密度的近似值。图 3 分别给出了在不同初始浓度的 α -亚麻酸环境下,同一时间节点上,实验得到的藻密度观察数据与利用上述模型(表 1)计算出的藻密度近似数据。并计算得出两组数据的非线性相关指数(可决系数)^[11]分别为 0.9761、0.960595、0.910526、0.998823、0.998021。

从图 3 可以看到,在不同初始浓度的 α -亚麻酸环境下,由拟合出来的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分析的数学模型(表 1)所计算出的藻密度的近似数据,与实验得出的藻密度的观测数据的可决系数非常高。这一方面反映这些数据组之间的非线性关系的相关程度非常高,另一方面也表明所拟合的不同初始浓度的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分析的数学模型是合理的、有效的、可靠和有意义的,基本能反映在该初始浓度的水平上,

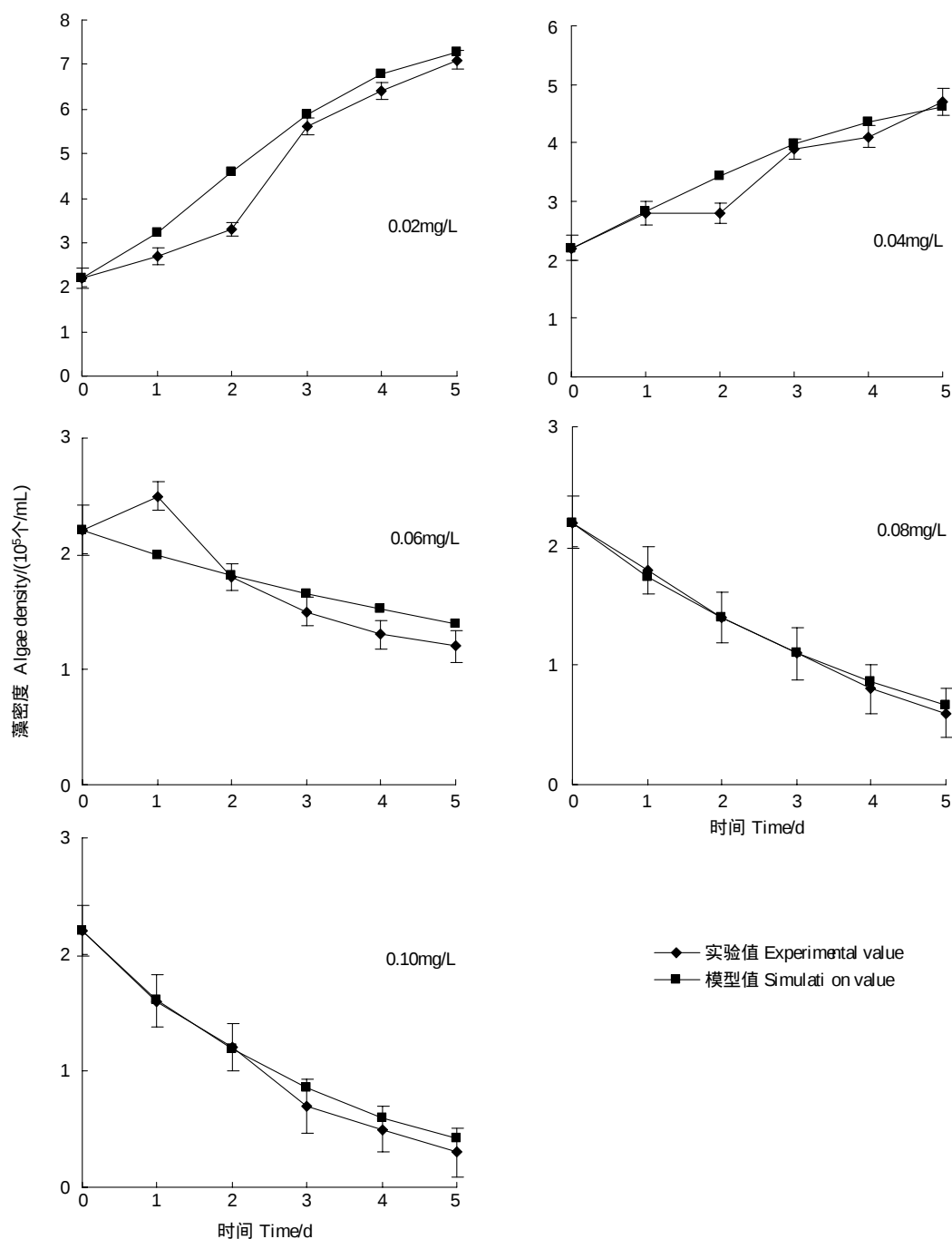


图3 不同初始浓度的 α -亚麻酸抑制产毒铜绿微囊藻的实验值与模型值

Fig. 3 The simulation value and experimental value of different initial concentrations of α -linolenic acid on toxic *M. aeruginosa* respectively

α -亚麻酸抑藻的实际情况。

图4是一张曲面图。它将 α -亚麻酸的初始浓度、实验观察时间、藻密度的模型计算值联系在一起。从图4中可以比较方便、快捷得到不同时间节点上的半抑制浓度(EC_{50})、最小有效浓度(MIC)等指标的预测值。例如,第3天的半抑制浓度(EC_{50})的预测值为0.08 mg/L,第4天的最小有效浓度(MIC)的预测值为0.055 mg/L。

从图4中还可以看出,在 α -亚麻酸初始浓度为0.055 mg/L左右的环境下,铜绿微囊藻的生长基本上处在藻密度变化很小的稳定的、近似均衡的状态。也就是说,在这种状态下,铜绿微囊藻新生长的量与被 α -亚麻酸作用后而死亡的铜绿微囊藻量基本上是相等的。这是一个相对的、动态的平衡。

从图 4 中,除得到以上直观信息外,关键是还能够得出 α -亚麻酸在 0.02—0.10 mg/L 区间以及该区间的拓展区间上其它的初始浓度下的 α -亚麻酸抑藻的时-效关系分析的预测数学模型。

1.4 不同浓度的亚油酸、油酸、硬脂酸抑藻的时-效关系分析的数学模型

与 1.3 一样,根据不同浓度的亚油酸、油酸、硬脂酸抑藻的实验观察数据(图 1),可以进一步拟合出不同浓度的亚油酸、油酸、硬脂酸抑藻的时-效关系分析的数学模型(表 2—表 4)。

利用这些不同类型、不同初始浓度的脂肪酸单独进行抑藻的时-效关系分析的数学模型,可以比较好的认识和了解各类脂肪酸在不同的初始浓度水平上的抑藻能力。也可以进一步通过插值和拟合得出象图 4 那样,能够预测和反映其它的初始浓度水平上各类脂肪酸的抑藻能力的时-效关系分析的数学模型。

2 多种脂肪酸联合抑藻的时-效关系分析的数学模型

利用多种抑藻物质联合抑藻已有不少报道^[12-14],但对联合抑藻的数学模型的分析、讨论和应用却未见报道。以下为多种脂肪酸联合抑藻相应的时-效关系分析的数学模型。

2.1 多种脂肪酸联合进行复合抑藻的时-效关系分析的数学模型设计与拟合

利用 1.3.1 所建立的数学模型的机理,得到多种脂肪酸联合抑藻过程中,藻密度的变化规律所满足的微分方程:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -K_2AN(t)e^{-K_1N(t)} + 1.0054957548N(t) - 0.0974391644832N^2(t) \quad (5)$$

表 2 不同浓度的亚油酸抑藻的时-效关系分析的数学模型

Table 2 The mathematical model based on the time-effect relationship analysis of different linoleic acid on toxic <i>Microcystis aeruginosa</i>	
浓度 Concentration/(mg/L)	拟合模型 Fitting model
0.02	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.10854709N(t)e^{-0.03350277N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.04	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.29239604N(t)e^{-0.12052582N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.06	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.50195818N(t)e^{-0.13601531N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.08	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.91565704N(t)e^{-0.03149107N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
0.10	$\frac{dN(t)}{dt} = -1.46849181N(t)e^{-0.10293493N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$

表 3 不同浓度的油酸抑藻的时-效关系分析的数学模型

Table 3 The mathematical model based on the time-effect relationship analysis of different oleic acid on toxic <i>Microcystis aeruginosa</i>	
浓度 Concentration/(mg/L)	拟合模型 Fitting model
0.50	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.16200529N(t)e^{-0.08013321N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
1.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.13893123N(t)e^{-0.28092381N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
1.50	$\frac{dN(t)}{dt} = -1.55744872N(t)e^{-0.25499286N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
2.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -1.14616564N(t)e^{-0.12993571N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
2.50	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.19094561N(t)e^{-0.4502N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$

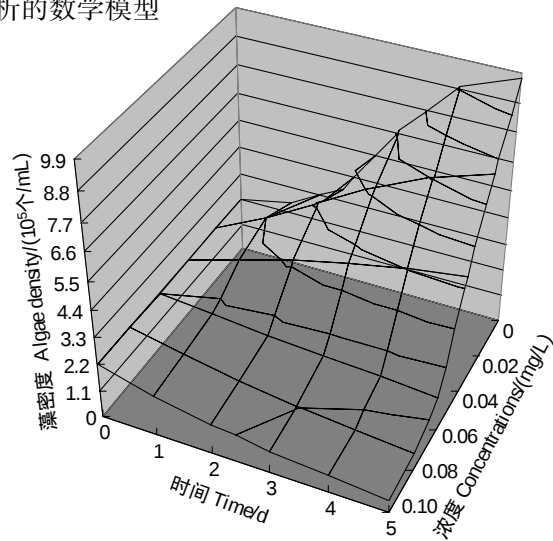


图 4 不同初始浓度 α -亚麻酸对产毒铜绿微囊藻的抑藻效果模型值的曲面状态图

Fig. 4 The surface diagram of the simulation value of different initial concentrations of α -linolenic acid on toxic *M. aeruginosa* respectively

表 4 不同浓度的硬脂酸抑藻的时-效关系分析的数学模型

浓度 Concentration/(mg/L)	拟合模型 Fitting model
5.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.61223999N(t)e^{-0.20142413N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
10.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.31132747N(t)e^{-0.06968425N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
15.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.64529674N(t)e^{-0.08361923N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
20.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.46787069N(t)e^{-0.0267N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$
25.00	$\frac{dN(t)}{dt} = -0.95200817N(t)e^{-0.14165N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$

根据文献^[5]有关多种脂肪酸联合抑藻的数据并进行重复实验得到的数据(图 5),拟合出亚油酸(0.04 mg/L), α-亚麻酸(0.03 mg/L), 油酸(0.70 mg/L)联合抑藻的微分方程:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -1.832376N(t)e^{-0.209158375165N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$$

(6)

图 5 给出了多种脂肪酸联合进行复合抑藻时,在同一时间节点上,实验得到的藻密度值与利用上述模型(6)计算出的藻密度值。通过计算这两组数据的非线性相关指数为 0.998942。

这表明:多种脂肪酸联合抑藻过程中,实验得到的藻密度的观察数据和利用上述模型(6)计算出来的藻密度的预测数据,它们的非线性关系的相关程度很高。因此,所设计的多种脂肪酸联合抑藻的数学模型是合理的、有意义的,所拟合的数学模型是有价值的。

2.2 利用抑藻模型对不同类型的脂肪酸抑藻进行量效分析

由于在上述多种脂肪酸进行复合抑藻的实验中,使用了 α-亚麻酸(0.03 mg/L),故可利用表 1 中所列的不同浓度的 α-亚麻酸抑藻的数学模型进行预测。得出(图 6)α-亚麻酸(0.12 mg/L)单独抑藻的数学模型:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -1.81117N(t)e^{-0.16265N(t)} + 1.00549575N(t) - 0.09743916N^2(t)$$

(7)

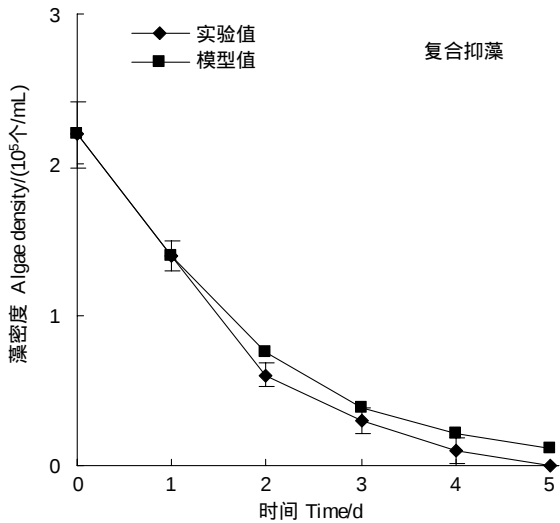


图 5 α-亚麻酸、亚油酸和油酸联合抑制产毒铜绿微囊藻的实验值与模型值

Fig. 5 The simulation value and experimental value of α-linolenic acids, linoleic acid and oleic acid complex on toxic *M. aeruginosa*

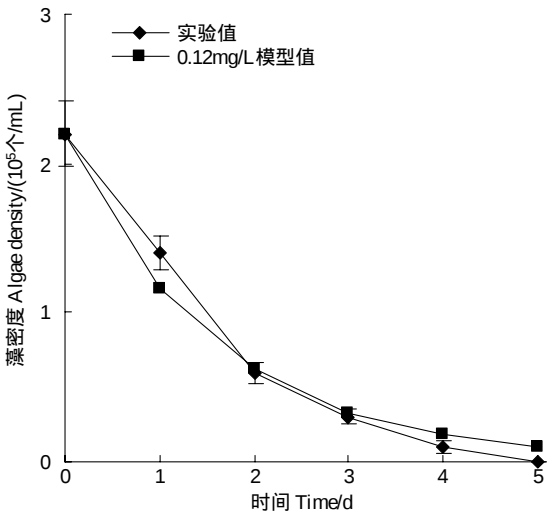


图 6 复合脂肪酸对产毒铜绿微囊藻的联合抑藻的实验值与 0.12 mg/L 浓度的 α-亚麻酸抑藻的模型值

Fig. 6 Compared the experimental value of three kinds of fatty acid complex with the simulation value of 0.12mg/L α-linolenic acids inhibiting on toxic *M. aeruginosa*

在同一时间节点上,该数学模型(7)预测的藻密度的数据与实验过程中所得到的藻密度的观察数据,它们之间的非线性关系的相关程度非常高。通过计算,这2组数据的非线性相关指数为0.991742。

由此可以断言,在上述实验过程中,在各个时间节点上,亚油酸(0.04 mg/L)与油酸(0.70 mg/L)混合抑藻的效果与 α -亚麻酸(0.09 mg/L)单独抑藻的效果基本相同。

仿照上述工作,可以对各类不同的脂肪酸的抑藻效果进行量效分析。这对进一步利用多种脂肪酸联合抑藻、研制生物杀藻剂是非常有意义的。

但是,必需明确上述量效分析仅仅是由实验算出来的近似值。由于实验误差的存在,这种由实验计算出来的预测值与真正的量效关系还可能有一定的差距。这一差距的减少只能通过大量的实验,以及使用数学方法进行可靠性检验和可信限估计。这对数学模型来说,也是一个难得的校正机会。

3 结论

3.1 通过对脂肪酸抑藻进行认真、详细的分析,设计和建立合理的数学模型,再通过对数学模型的进一步分析、讨论,能够对脂肪酸抑藻的规律有更全面、更完整、更深入的了解和认识。这对指导利用脂肪酸进行抑藻,开发出更好的抑制剂、设计出满足要求且最经济的除藻方案等是十分重要的。

3.2 就本研究来说,将脂肪酸抑藻的这一复杂的过程,通过数学模型的设计和建立,使得对脂肪酸抑藻的认识从研究深度方面实现了由“宏观”走向“微观”的转变、从研究精度方面实现了由“普通定量”走向“精细预测预算”的转变。而这一转变的实现,都是建立在明确的、具体的数据以及数学表达的方式上的。本研究一方面仅就4种十八碳脂肪酸抑藻的时-效关系进行了一些有益的探讨,所建立的数学模型基本上反映了脂肪酸抑藻的具体情况;另一方面就多种脂肪酸复合抑藻的量效关系分析也进行了相关的分析和讨论。但对单一抑藻、复合抑藻的深入讨论,比如;各种脂肪酸的相互间的“促进”与“抑制”、以及产生这种“促进”与“抑制”的根本原因;每种脂肪酸对各种不同藻抑制能力的变化、以及导致这种变化的内在本质等等,还有待进一步的研究。

References:

- [1] Alamsjah M A, Hirao S, Ishibashi F, Oda T, Fujita Y. Isolation and structure determination of algicidal compounds from *Ulva fasciata*. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2005, 69: 2186-2192.
- [2] Zhang T T, He M, Wu A P, Nie L W. Allelopathic effect of submerbered macrophyte *Chara vulgaris* on toxic *Microcystis aeruginosa*. *Allelopathy Journal*, 2009, 23(2): 391-402.
- [3] Alamsjah M A, Hirao S, Ishibashi F, Oda T, Fujita Y. Algicidal activity of polyunsaturated fatty acids derived from *Ulva fasciata* and *U. pertusa* (*Ulva* spp., Chlorophyta) on phytoplankton. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20: 713-720.
- [4] Greca M D, Ferrara M, Fiorentino A. Antialgal compounds from *Zantedeschia aethiopica*. *Phytochemistry*, 1998, 49(5): 1299-1304.
- [5] Zhang T T, Zheng C Y, He M, Wu A P, Nie L W. Inhibition on algae of fatty acids and the structure-effect relationship. *China Environmental Science*, 2009, 29(3): 274-279.
- [6] Andrew P. Desbois & Valerie J. Smith. Antibacterial free fatty acids: activities, mechanisms of action and biotechnological potential. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2010, 85: 1629-1642.
- [7] Franklin J. *Methods of Mathematical Economics. Linear and nonlinear programming, fixed point theorems*. Springer-Verlag. New York, 1980.
- [8] East China Normal University Department of Mathematics. *Mathematical Analysis, The third edition*. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [9] Hua L G. *Mathematical model choose*. Changsha: Hunan Education Press, 1991.
- [10] Li S Z. *Mathematical model contest tutorial*. Nanjing: Jiangsu Education Press, 1996.
- [11] Bogs D, ed//Ye Q X trans. *Mathematical Modeling*. Beijing: The World Book Publishing Company, 1997.
- [12] Zhang T T, Zheng C Y, He M, Wu A P, Nie L W. The inhibitory mechanisms of linoleic acid on *Microcystis aeruginosa*. *China Environmental Science*, 2009, 29(4): 419-424.
- [13] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, Murakami A. Growth inhibition of blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*) by *Myriophyllum spicatum*-releasing four polyphenols. *Water Research*, 2000, 34: 3026-3032.
- [14] Inderjit J, Streibig C, Olofsson M. Joint action of phenolic acid mixtures and its significance in allelopathy research. *Physiology Plantarum*, 2002, 11(4): 422-428.

参考文献:

- [5] 张庭廷,郑春艳,何梅,吴安平,聂刘旺. 脂肪酸类物质的抑藻效应及其构效关系. *中国环境科学*, 2009, 28(3): 274-279.
- [8] 华东师范大学数学系编, *数学分析*, 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [9] 华罗庚. *数学模型选谈*. 长沙: 湖南教育出版社, 1991.
- [10] 李尚志. *数学模型竞赛教程*. 南京: 江苏教育出版社, 1996.
- [11] D. 伯格斯著//叶其孝译. *数学建模*. 北京: 世界图书出版公司, 1997.
- [12] 张庭廷,郑春艳,何梅,吴安平,聂刘旺. 亚油酸对铜绿微囊藻的抑制机理. *中国环境科学*, 2009, 28(4): 419-424.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 23 December, 2011 (Semimonthly)
CONTENTS

Satellite-based modelling light use efficiency of alpine meadow along an altitudinal gradient	FU Gang, ZHOU Yuting, SHEN Zhenxi, et al (6989)
Changes in the concentrations of airborne <i>Picea schrenkiana</i> pollen in response to temperature changes in the Tianshan Mountain area	PAN Yanfang, YAN Shun, MU Guijin, et al (6999)
Primary production in the Bay of Bengal during spring intermonsoon period	LIU Huaxue, KE Zhixin, SONG Xingyu, et al (7007)
Effect of rainfall regimes on the decomposition rate of yak dung in an alpine meadow of northwest Sichuan Province, China	WU Xinwei, LI Guoyong, SUN Shucun (7013)
SOFM-based nutrient cycling classification of forest ecosystems in the Loess Plateau	CHEN Kai, LIU Zengwen, LI Jun, et al (7022)
Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	WANG Yan, CHEN Jianwen, et al (7031)
Effect of silicon supply on Tall Fescue (<i>Festuca arundinacea</i>) growth under the salinization conditions	LIU Huixia, GUO Xinghua, GUO Zhenggang (7039)
Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of <i>Simmondsia Chinensis</i> seedlings from different provenances	HUANG Weiwei, ZHANG Niannian, HU Tingxing, et al (7047)
Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau	ZHANG Jianjun, LI Huimin, XU Jiajia (7056)
The distribution of male and female <i>Populus cathayana</i> populations along an altitudinal gradient	WANG Zhifeng, XU Xiao, LI Xiaofeng, et al (7067)
Analysis on the characteristics of macrobenthic community in the North-west Daya Bay of South China Bay in spring	DU Feiyan, LIN Qin, JIA Xiaoping, et al (7075)
The effects of season and environmental factors on community structure of planktonic copepods in Zhanjiang Bay, China	ZHANG Caixue, GONG Yuyan, WANG Xuefeng, et al (7086)
Population genetic structure of <i>Pneumatophorus japonicus</i> in the Taiwan Strait	ZHANG Liyan, SU Yongquan, WANG Hangjun, et al (7097)
Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors	YU Chao, CHU Jinyu, BAI Xiaohua, et al (7104)
Population dynamics and production of <i>Bellamya aeruginosa</i> (Reeve) (Mollusca: Viviparidae) in artificial lake for transgenic fish, Wuhan	XIONG Jing, XIE Zhicai, JIANG Xiaoming, et al (7112)
Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland	WANG Weiqi, XU Linglin, ZENG Congsheng, et al (7119)
Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil	WANG Hongxin, HU Feng, XU Xinwang, et al (7125)
Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland	LU Yanyan, SONG Fupeng (7133)
Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field	MA Li, LI Chaohai, FU Jing, et al (7141)
Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period	JI Yang, YU Jia, MA Jing, et al (7151)
The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress	LIU Jianfang, ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, et al (7161)
Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain	LUO Yan, QIAO Yuhui, WU Wenliang (7170)
Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco	XU Zicheng, SHAO Huifang, SUN Shuguang, et al (7179)
Influence of different planting patterns on field microclimate effect and yield of peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	SONG Wei, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al (7188)
Rapid cold hardening of Western flower thrips, <i>Frankliniella occidentalis</i> , and its ecological cost	LI Hongbo, SHI Liang, WANG Jianjun, et al (7196)

- Effects of temperature on body color in *Sitobion avenae* (F.) DENG Mingming, GAO Huanhuan, LI Dan, et al (7203)
- Development and reproduction of *Bemisia tabaci* biotype B on wild and cultivated tomato accessions
..... GAO Jianchang, GUO Guangjun, GUO Yanmei, et al (7211)
- Study on ecological water demand based on assessment of ecosystem disturbance degree in the Baiyangdian Wetland
..... CHEN He, YANG Ying, YU Shiwei, et al (7218)
- Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perspective of organic production model in China
..... HU Qiuhong, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (7227)
- Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic
Microcystis aeruginosa HE Zongxiang, ZHANG Tingting (7235)
- Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay XU Zhanzhou, ZHU Aijia, CAI Weixu, et al (7244)
- A gradient analysis of urban architecture landscape pattern based on QuickBird imagery
..... ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (7251)
- Landscape spatial heterogeneity is associated with urbanization: an example from Yangtze River in Jiangsu Province
..... CHE Qianjin, CAO Youhui, YU Lu, et al (7261)
- CVM for Taihu Lake based on ecological functions of wetlands restoration, and ability to pay and willingness to pay studies
..... YU Wenjin, XIE Jian, ZOU Xinqing (7271)
- Review and Monograph**
- Progress in research on the marine microbial loop in the Arctic Ocean HE Jianfeng, CUI Shikai, ZHANG Fang, et al (7279)
- Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces
..... SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, et al (7287)
- Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust
..... FANG Fengman, LIN Yuesheng, WANG Haidong, et al (7301)
- Scientific Note**
- Spatial structures of soilcarbon and nitrogen of China fir and Masson pine mixed forest in the Three Gorger Reservoir Areas
..... LIN Yinghua, WANG Laifa, TIAN Xiaokun, et al (7311)
- The relationship between *Oligochroa cantonella* Caradja and environmental factors LIU Wenai, FAN Hangqing (7320)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 23 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 23 2011

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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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