

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

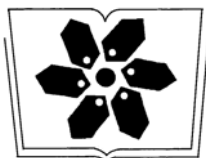
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

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 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201210291500

何宗祥, 刘璐, 李诚, 张庭廷. 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型. 生态学报, 2014, 34(6): 1527-1534.

He Z X, Liu L, Li C, Zhang T T. Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1527-1534.

普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型

何宗祥¹, 刘璐², 李诚², 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, 芜湖 241000)

摘要: 利用大型水生植物的化感作用抑制水华藻类是水域生态研究的热点课题之一。探讨了不同浓度普生轮藻浸提液对产毒铜绿微囊藻和斜生栅藻(单纯以及混合藻类)的抑制作用, 并根据实验过程中得到的数据和数据特征, 在传统的 Logistic 模型和 Lotka-Volterra 模型基础上, 通过微元法建立了普生轮藻浸提液对单纯产毒铜绿微囊藻、单纯斜生栅藻抑制的数学模型以及两藻混合时抑制的数学模型。结果表明, (1) 普生轮藻浸提液无论对单独的毒性铜绿微囊藻或斜生栅藻还是共生状态的毒性铜绿微囊藻和斜生栅藻均有很强抑制作用, 且对毒性铜绿微囊藻的抑制作用要显著高于对斜生栅藻; (2) 所建立的抑藻模型可有效表征和预测在一定范围内的产毒铜绿微囊藻、斜生栅藻及其混合藻在普生轮藻浸提液胁迫下藻密度随时间变化的规律; 通过这些模型可方便地计算出实验期间任何时间节点上普生轮藻浸提液的半抑制浓度(EC_{50})、最小有效浓度(MIC)等指标的预测值、混合藻在小生境中相对稳定时的预测值等等。该研究可为实际抑藻的方案制定和实施提供有价值的支撑和参考, 具有一定的理论与应用意义。

关键词: 普生轮藻; 铜绿微囊藻; 斜生栅藻; 抑藻效应; 数学模型

Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species

HE Zongxiang¹, LIU Lu², LI Cheng², 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: Study concerning the allelopathic inhibition of water bloom-forming algae by aquatic macrophyte is one of the hot topics in aquatic ecology. Researches on the mathematic model of allelopathic algae control received less attention so far. The present study investigated the inhibitory effects of *Chara vulgaris* extracts on *Microcystis aeruginosa*, a toxin-producing algae, and on *Scenedesmus obliquus* Kütz (single and combined). Mathematic models were constructed based on the data obtained during experimentation, the characteristics of data, the traditional Logistic model and Lotka-Volterra model by using the infinitesimal method in terms of the inhibitory effect of the extracts on *M. aeruginosa*, *S. obliquus* and their mixtures, respectively. The results showed that, (1) *C. vulgaris* extracts inhibited significantly both *M. aeruginosa*, *S. obliquus* and their mixture, and *M. aeruginosa* was more sensitive to the inhibition of *Chara vulgaris* extracts than *S. obliquus*. (2) The constructed mathematical models can effectively characterize and predict, to a certain degree, the exposure time-dependent dynamics of algal density of *M. aeruginosa*, *S. obliquus* and their mixture in the context of *Chara vulgaris* extracts. According to these models the predicted value of the maximal 50% effective concentration (EC_{50}), and

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170443); 安徽省高校省级自然科学研究重点项目(KJ2013A139)

收稿日期: 2012-10-29; **修订日期:** 2013-09-26

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

the minimal inhibitory concentration (MIC) at any time point during experimentation, as well as the predicted value of algae mixture in the relatively stable microhabitat. The traditional Logistic model that describes the growth of a single population can characterize only the trend of population growth in a certain spatial scale, but can't calculate quantitatively the biomass of a population under stress at any time point. The Lotka-Volterra model can describe the quantitative relationship of two competitive populations, but can not solve thoroughly the problem of exclusion and coexistence in the context of inhibitors and other distracting agents, which makes it hard to get the biomass at any time point. Our group ever examined the inhibitory model of a single or two kinds of allelochemicals against a single algae. The present study constructed a mathematical model concerning the inhibitory effect of the extracts of aquatic macrophyte against a single algae or algae mixture by using the infinitesimal method based on the traditional Logistic model and Lotka-Volterra model mentioned above. These models can well solve the calculation problem of algal biomass of populations under stress, or two competitive populations. As a result, the study can provide valuable data support and reference for the complex biological problems and for the establishment and implementation of actual algal inhibition plan by integrating mathematics into biology.

Key Words: *Chara vulgaris*; *Microcystis aeruginosa*; *Scenedesmus obliquus*; effect of algal inhibition; mathematic model

湖泊富营养化及其导致的蓝藻水华暴发是目前较为突出的环境问题之一。蓝藻水华肆虐,不仅对生态环境造成严重危害,其释放的蓝藻毒素可被水生生物吸收和累积,并随食物链传递,对人类的健康造成极大威胁^[1-2],因此,对蓝藻水华的预防和治理是当前迫切需要解决的重要课题。传统的除藻方法有的存在着二次环境污染,如化学法除藻;有的操作时间长、难度大、费用高,如物理法除藻^[3-4]。作为淡水水体中主要生产者的高等水生植物,对维持水体生态平衡有着其无与伦比的优势。一方面高等水生植物可以吸收和降低水体中氮、磷等营养盐;同时,不少高等水生植物还能够分泌和释放抑制藻类生长的化感物质,这些物质多为植物次生代谢物,在自然水体中易于降解,不会在生态系统中长期积累^[5],因此,利用高等水生植物化感作用及其化感物质来进行抑藻受到了广泛的关注^[4-5]。

目前,已有数十种高等水生植物被报道具有化感抑藻作用,如穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、芦苇(*Phragmites communis*)等被认为是具有较强化感抑藻活性的植物^[5-7]。已有大量文献报道轮藻与其它大型水生植物相比,更能保持水体的清澈透明^[8-9]。Van Donk 等^[10]通过调查提出轮藻植物对浅水区域水体透明度的保持,起着至关重要的作用;Stemann-Nielsen^[11]认为在微咸的水域中,由于普生轮藻植物的存在,浮游植物只有极低的生

物量。但迄今为止有关轮藻化感作用研究报道还相对较少。普生轮藻是广布性种类,几乎遍布我国绝大部分省区^[12],本课题研究人员在芜湖地区调查发现:凡普生轮藻生长的区域,水体清澈,未见水华蓝藻生长。为了深入研究普生轮藻的化感抑藻效应及其规律,包括普生轮藻对单一毒性铜绿微囊藻以及混合藻类的抑制作用、其抑藻的时-效与量-效关系等,本文就普生轮藻浸提液的化感抑藻作用及其数学模型的建立进行了较深入研究。由于经典的描述单个种群增长的 Logistic 模型只能表征种群在一定空间范围内的种群增长趋势,不能定量计算种群在逆境胁迫条件下任何一个时间节点的生物量;Lotka-Volterra 模型描述了两种群在竞争状态下的数量关系,但在有抑制剂等其他因素干扰等限制条件下群落类的排斥与共存问题尚未彻底解决,而使得任何一个时间节点生物量的获得难以实现。本项目组曾对单一化感物质对单一藻类或两种化感物质对单一藻类的抑制作用模型进行了探讨^[13-14],但两种藻类在竞争状态下的化感模型研究尚付阙如。因此本课题在传统的阻滞增长模型即逻辑斯特模型(Logistic 模型)和种间竞争模型即 Lotka-Volterra 模型基础上,通过微元法建立了普生轮藻浸提液对单纯产毒铜绿微囊藻、单纯斜生栅藻以及两藻混合时的抑制数学模型。该研究将可为利用数学和生物学的有机结合来解决复杂多变的生物学问题以及为我国的蓝藻水华治理等提供重要的理论与实验依据。

1 实验材料、方法

1.1 实验材料

普生轮藻(*Chara vulgaris*)采集于安徽师范大学荷花塘;试验藻种产毒铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)均购自中国科学院水生生物研究所,产毒铜绿微囊藻采用 BG-11 培养基培养;斜生栅藻采用 HB-4 培养基培养。

1.2 实验方法

1.2.1 藻种的培养

于无菌条件下,在已洗净消毒的 500 mL 三角锥形瓶中各加入 100 mL 培养基,接入藻种,摇匀,置光照培养箱中进行培养。培养条件:光照度 4000 Lx,光周期 12 L:12 D,温度(24±2)℃,pH 值 7.0。每天摇动锥形瓶 4 次,并加入适量培养基,使藻细胞处于呈几何级数增长的对数增长期^[15]。

1.2.2 普生轮藻浸提液制备

取普生轮藻整株,洗净泥沙,用蒸馏水淋洗,经滤纸吸干其表面水分后,称其鲜重 50 g,剪成 2 cm 长的小段,放入大烧杯中用 500 mL 蒸馏水将其完全浸泡,在 4℃下放置 96 h 后,先用定性滤纸过滤出浸提液,然后减压浓缩至 5 mL,再将其用 0.22 μm 微孔滤膜过滤,除去微生物^[16-17]。

1.2.3 普生轮藻浸提液抑藻实验

(1) 对单纯毒性铜绿微囊藻或斜生栅藻的抑制实验

在已灭菌的三角烧瓶中,分别接入 50 mL 处于对数增长期的铜绿微囊藻或斜生栅藻藻液,藻液起始浓度为 $2.4\text{—}2.5\times 10^5$ 个/mL,然后加入普生轮藻浸提液使其起始浓度分别为 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 mL/L [相当于 0.00, 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00 g 植物(鲜重)/L],每组 3 个平行。放在光照培养箱中按藻种培养条件进行培养,每隔 24 h 用血球计数板在 OLYMPUS 双筒显微镜下计数藻细胞^[18]。

(2) 对毒性铜绿微囊藻和斜生栅藻共培养条件下的抑制实验

在已灭菌的三角烧瓶中,分别接入 25 mL 处于对数增长期的铜绿微囊藻和斜生栅藻藻液,两藻液起始浓度均为 $1.2\text{—}1.3\times 10^5$ 个/mL(混合藻密度为

$2.4\text{—}2.5\times 10^5$ cells/mL),然后加入普生轮藻浸提液使其起始浓度分别为 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80, 1.00 mL/L,每组 3 个平行。放在与单一藻抑藻实验相同条件下进行培养,每隔 24 h 进行藻细胞计数^[19]。

2 实验结果与模型建立

2.1 普生轮藻浸提液的抑藻效应

普生轮藻浸提液的抑藻实验结果,见图 1—图 4。

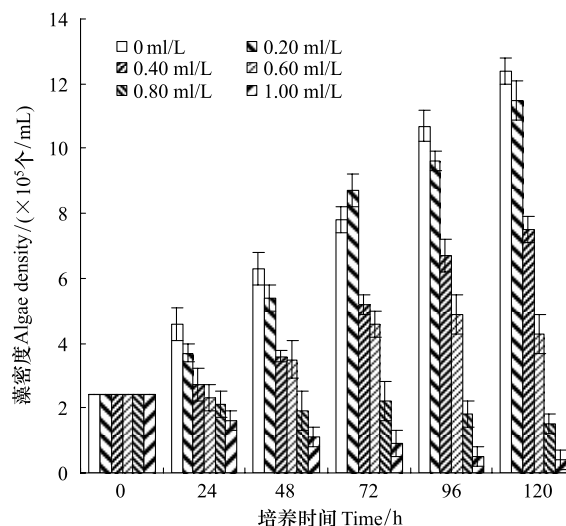


图 1 不同浓度普生轮藻浸提液对产毒铜绿微囊藻生长的影响

Fig.1 Abundance of toxic *Microcystis aeruginosa* after 120 h incubations with *Chara vulgaris* extracts concentrations of 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 and 1.00 mL/L. Error bars represent the standard deviation for triplicate treatments

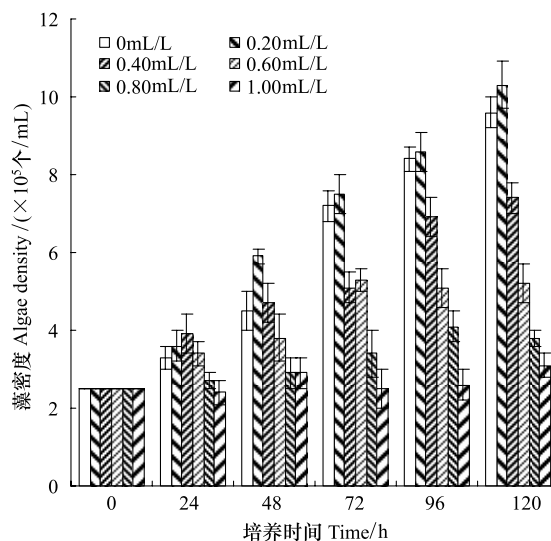


图 2 斜生栅藻在不同浓度普生轮藻浸提液作用下藻密度的实验值

Fig.2 Abundance of *Scenedesmus obliquus* after 120 h incubations with *Chara vulgaris* extracts concentrations of 0.00, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 and 1.00 mL/L. Error bars represent the standard deviation for triplicate treatments

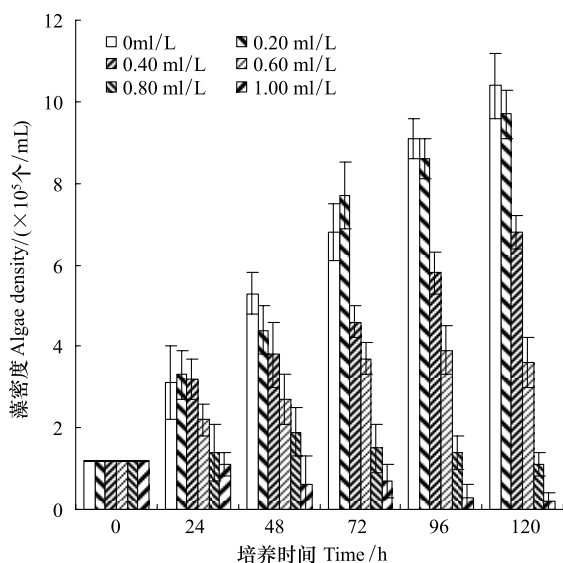


图3 共培养时不同浓度普生轮藻浸提物对产毒铜绿微囊藻生长的影响

Fig.3 The growth inhibitory effect of different concentrations of *Chara vulgaris* extracts on toxic *M. aeruginosa* while the two algal species co-incubations. Error bars represent the standard deviation for triplicate treatments

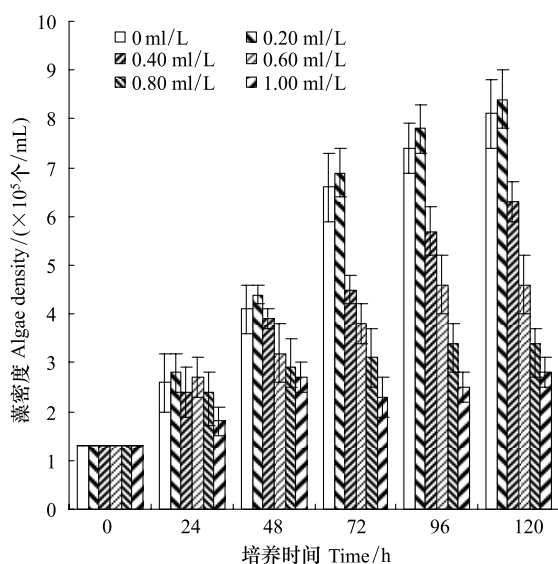


图4 共培养时不同浓度普生轮藻浸提物对斜生栅藻生长的影响

Fig.4 The growth inhibitory effect of different concentrations of *Chara vulgaris* extracts on *S. obliquus* while the two algal species co-incubations; Error bars represent the standard deviation for triplicate treatments

由图1—图4可知,普生轮藻浸提液对单独培养毒性铜绿微囊藻、斜生栅藻以及共生的毒性铜绿微囊藻和斜生栅藻均有抑制作用。但是无论是单独

还是两藻共生,普生轮藻浸提液对毒性铜绿微囊藻的抑制作用均明显强于对斜生栅藻。该结论来自以下三方面的分析:(1)将单独培养的铜绿微囊藻和斜生栅藻对照组藻密度进行比较,尽管两藻的起始密度相同,但第24小时开始两藻密度就有明显差异,铜绿微囊藻密度明显较斜生栅藻高,经配对 t -检验, $P < 0.05$,这种差异一直持续到第120小时;同样,该差异在两藻共培养的对照组中更为明显,经配对 t -检验, $P < 0.05$ 或 0.01 (第96以及第120小时)。(2)实验组中,无论是单独培养还是两藻共培养,从第96小时开始,同期铜绿微囊藻密度明显低于同期斜生栅藻,经配对 t -检验, $P < 0.01$ 。总结(1)与(2),不难看出这种完全不同的变化趋势,反映出普生轮藻对铜绿微囊藻的强烈抑制作用。(3)从抑制率更能直观地说明以上结论,以最大抑制率第120小时为例,对铜绿微囊藻单独和共培养时分别为96.77%和98.08%,而对斜生栅藻则为67.71%和65.43%。普生轮藻的这一特性对治理以铜绿微囊藻为优势种群的蓝藻水华具有重要的应用意义。

2.2 数学模型的确立

2.2.1 在不同初始浓度普生轮藻浸提液作用下,单一藻(铜绿微囊藻、斜生栅藻)藻密度随时间变化的数学模型

根据铜绿微囊藻在其种群生长过程中,其总量具有有限增长^[18]的特点,以及在普生轮藻浸提液胁迫下铜绿微囊藻生长的特征,在传统的 Logistic 模型基础上,通过微元分析法,增加了普生轮藻浸提液对铜绿微囊藻的化感抑制作用项^[13-14](可理解为由于普生轮藻浸提液的化感抑制作用,从而使得铜绿微囊藻细胞死亡率增高或增殖率减低,相当于振动系统中的阻尼项)。根据产毒铜绿微囊藻在不同浓度普生轮藻浸提液环境中藻密度在不同时间的实验值(图1)进行拟合(由于可采用的拟合方法有很多,在这里所采用的是惠普公司生产的 H38G 图形计算器)可得:在不同浓度普生轮藻浸提液环境中,产毒铜绿微囊藻藻密度随时间变化的模型为:

$$\frac{\partial x(c, t)}{\partial t} = 2.4 + 0.50596096624x(c, t) - 0.0282295363634x^2(c, t) - x(c, t)e^{(1-c-c^2-c^3-c^4)A(1-x(c, t)-x^2(c, t)-x^3(c, t)-x^4(c, t)-1)}$$

$$A = \begin{pmatrix} -5248.588587 & 8693.739 & -5583.411 & 1635.259 & -182.737 \\ 52533.99372 & -87510.5 & 56429.689 & -16570.4 & 1854.624 \\ -172948.8012 & 290200.7 & -188115.8 & 55431.59 & -6217.52 \\ 226510.5858 & -383252 & 249948.82 & -73953.1 & 8316.605 \\ -100846.3307 & 171873.2 & -112687.8 & 33461.59 & -3771.89 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, c 是普生轮藻浸提液的原始浓度 (ml/L); $x(c, t)$ 是产毒铜绿微囊藻在原始浓度为 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境中, t 时刻的藻密度值。

通过模型(1), 可以计算出在图 1 相应的时间节点上产毒铜绿微囊藻密度的近似值(共 30 个数值)。通过计算可得图 1 所标的、通过实验得到的在不同原始浓度 c (ml/L) 普生轮藻浸提液环境中, 产毒铜绿微囊藻的观察数据与利用上述模型(1)计算出的相对应的藻密度近似值之间的可决系数

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

式中, $\hat{y}_i$ 是通过模型计算出来的理论值约为 0.995。该可决系数反映了所拟合的在不同原始浓度 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境中, 产毒铜绿微囊藻变化的数学模型(1), 具有比较好的拟合度, 是合理的、有效的、可靠和有意义的, 基本能反映产毒铜绿微囊藻变化的实际情况。

根据模型(1)还可以得到在不同原始浓度 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境中, 产毒铜绿微囊藻随时间变化的趋势图(图 5), 从图 5 中可以比较方便、快捷地得到不同时间节点上普生轮藻浸提液的半抑制浓度 (EC_{50})、最小有效浓度 (MIC) 等指标的预测值。例如, 第 120 小时普生轮藻浸提液对产毒铜绿微囊藻的半抑制浓度 (EC_{50}) 的预测值为 0.483 ml/L, 最小有效浓度 (MIC) 的预测值为 0.738 ml/L、

第 72 小时普生轮藻浸提液的半抑制浓度 (EC_{50}) 的预测值为 0.658 ml/L, 最小有效浓度 (MIC) 的预测值为 0.714 ml/L。

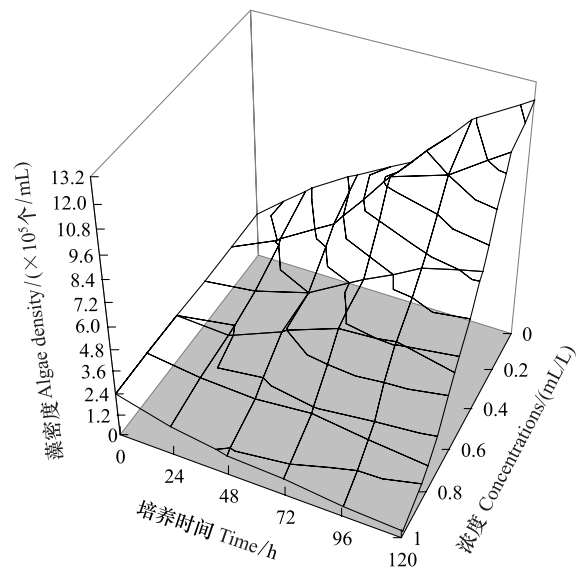


图 5 在不同浓度的普生轮藻浸提液环境下产毒铜绿微囊藻密度的模型预测值

Fig.5 The model predicted value of toxic *M. aeruginosa* density under the pressure of different initial concentrations of *Chara vulgaris* extracts

同理, 根据斜生栅藻在不同浓度普生轮藻浸提液环境中藻密度在不同时间的实验值(图 2)进行拟合(这里仍采用惠普公司生产的 H38G 图形计算器)可得: 在不同浓度的普生轮藻浸提液环境中, 斜生栅藻藻密度随时间变化的模型为:

$$\frac{\partial x(c, t)}{\partial t} = 2.5 + 0.5819853410y(c, t) - 0.049232623241y^2(c, t) - y(c, t)e^{(1 - c - c^2 - c^3 - c^4)B(1 - y(c, t) - y^2(c, t) - y^3(c, t) - y^4(c, t))^{-1}}$$

$$B = \begin{pmatrix} -976.4270346 & 887.257 & -262.3295 & 26.11239 & -0.2371 \\ 8826.172641 & -7842 & 2216.485 & -192.717 & -1.79647 \\ -24291.39754 & 20724.34 & -5332.574 & 308.9927 & 25.53507 \\ 25618.59114 & -20487.3 & 4394.9338 & 29.58018 & -60.0067 \\ -9198.714259 & 6734.275 & -1019.609 & -171.968 & 36.50518 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, c 是普生轮藻浸提液的原始浓度 (ml/L); $y(c, t)$ 是斜生栅藻在原始浓度为 c (ml/L) 的普生轮

藻浸提液环境中, t 时刻的藻密度值。

通过模型(2), 可以计算出在图 2 相应的时间节

点上斜生栅藻密度的近似值(共 30 个数值)。通过计算可得图 2 所标的、通过实验得到的在不同原始浓度 c (ml/L) 普生轮藻浸提液环境中,斜生栅藻的观察数据与利用上述模型(2)计算出的相对应的藻密度的近似值之间的可决系数 R^2 为 0.993。该可决系数反映了所拟合的在不同原始浓度 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境中,斜生栅藻变化的数学模型(2),具有比较好的拟合度,是合理的、有效的、可靠和有意义的,基本能反映斜生栅藻变化的实际情况。

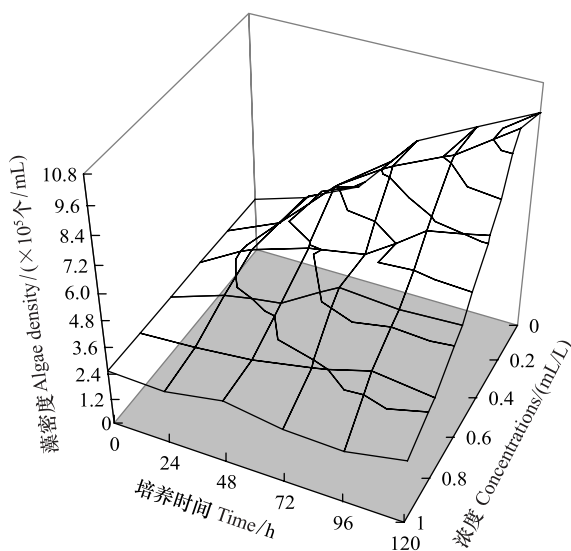


图 6 在不同浓度普生轮藻浸提液环境下斜生栅藻密度的模型预测值

Fig.6 The model predicted value of toxic *S. obliquus* density under the pressure of different initial concentrations of *Chara vulgaris* extracts

$$\begin{aligned} \frac{\partial x(c, t)}{\partial t} &= 282.4 - 2.217387386x(c, t) - 0.0282295363634x^2(c, t) + \\ &\quad 2.30409541864155x(c, t)y(c, t) - 0.842092855462642x(c, t)y^2(c, t) - \\ &\quad x(c, t)e^{(1-c-c^2-c^3-c^4)C(1-x(c, t)-x^2(c, t)-x^3(c, t)-x^4(c, t))^{-1}} \\ \frac{\partial y(c, t)}{\partial t} &= 3.1 - 0.811523757y(c, t) - 0.04923263241y^2(c, t) - \\ &\quad 0.46321765656534x(c, t)y(c, t) + 0.373278747453522x^2(c, t)y(c, t) - \\ &\quad y(c, t)e^{(1-c-c^2-c^3-c^4)D(1-y(c, t)-y^2(c, t)-y^3(c, t)-y^4(c, t))^{-1}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, c 是普生轮藻浸提液的原始浓度 (mg/L); $x(c, t)$ 是产毒铜绿微囊藻在原始浓度为 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境下, t 时刻的藻密度值; $y(c, t)$

根据模型(2)还可以得到的在不同原始浓度 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境中,斜生栅藻随时间变化的趋势图(图 6)。从图 6 可比较方便、快捷得到不同时间节点上普生轮藻浸提液对斜生栅藻的 EC_{50} 、MIC 等指标的预测值。例如,第 120 小时普生轮藻浸提液的 EC_{50} 的预测值为 0.655 ml/L、第 72 小时普生轮藻浸提液的 EC_{50} 的预测值为 0.779 ml/L。

2.2.2 在不同初始浓度普生轮藻浸提液环境中,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下,铜绿微囊藻、斜生栅藻藻密度随时间变化的数学模型

根据在不同初始浓度的普生轮藻浸提液环境中,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下,两个种群生活在同一空间,彼此竞争同一营养来源的特点,以及普生轮藻浸提液对共生藻的化感抑制作用,在传统的 Lotka-Volterra 模型的基础上,通过微元分析法,增加了普生轮藻浸提液对铜绿微囊藻、斜生栅藻的化感抑制作用项(可理解为由于普生轮藻浸提液的化感抑制作用,从而使得铜绿微囊藻细胞、斜生栅藻细胞死亡率增高或增殖率减低,相当于振动系统中的阻尼项)。根据在不同初始浓度的普生轮藻浸提液环境中,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下,铜绿微囊藻、斜生栅藻藻密度在不同时间的实验值(图 3, 图 4)进行拟合(这里仍采用惠普公司生产的 H38G 图形计算器)得到:在不同初始浓度的普生轮藻浸提液环境中,在铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下藻密度随时间变化的模型为:

是斜生栅藻在原始浓度为 c (ml/L) 的普生轮藻浸提液环境下, t 时刻的藻密度值。

$$C = \begin{pmatrix} 2.086951 & 4.346243 & 0.500734 & -2.465718 & 0.818649 \\ 20.88976 & -16.8899 & -23.6529 & 30.0144 & -8.92892 \\ -39.3225 & -3.79139 & 124.1009 & -117.136 & 32.70659 \\ 21.04342 & 79.97759 & -233.701 & 185.9704 & -49.2263 \\ 3.578618 & -70.3181 & 140.4734 & -101.3 & 25.86943 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} -2192.1 & 3794.871 & -2280.61 & 568.037 & -49.2523 \\ 22143.1 & -38329.6 & 23005.33 & -5715.4 & 493.4745 \\ -73836.7 & 127574.8 & -76322.5 & 18869.22 & -1616.69 \\ 97673.58 & -168242 & 100132.3 & -24559.5 & 2077.023 \\ -43377.2 & 74338.33 & -43871.1 & 10615.74 & -877.286 \end{pmatrix}$$

通过模型(3),可以计算出在图3、图4相应的时间节点上产毒铜绿微囊藻、斜生栅藻密度的近似值(共60个数值)。通过计算可得图3所标的、通过实验得到的在不同初始浓度的普生轮藻浸提液环境中,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下,产毒铜绿微囊藻的观察数据与利用上述模型(3)计算出的相对应的藻密度的近似值(共30个数值)之间的可决系数 R^2 约为0.998。同理,通过计算可得图4所标的、通过实验得到的在不同初始浓度的普生轮藻浸提液环境中,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下,斜生栅藻的观察数据与利用上述模型(3)计算出的相对应的藻密度的近似值(共30个数值)之间的可决

系数 R^2 约为0.995。该两个可决系数反映了所拟合的在不同初始浓度普生轮藻浸提液环境中,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生情况下,铜绿微囊藻、斜生栅藻密度随时间变化的模型(3)是合理的、有效的、可靠和有意义的,基本能反映在共生情况下铜绿微囊藻、斜生栅藻密度随时间变化的实际情况。

通过模型(3),还可以计算得出在不同初始浓度的普生轮藻浸提液胁迫下,铜绿微囊藻、斜生栅藻共生时,随着时间 $t \rightarrow \infty$,铜绿微囊藻、斜生栅藻在小生境中相对稳定存在时的预测值(表1)。这类预测值在实际抑藻过程中,为抑藻方案的制定和实施提供了有价值的支撑,具有重要的实际意义。

表1 不同初始浓度浸提液胁迫下共生的铜绿微囊藻与斜生栅藻在小生境中相对稳定时的预测值

Table 1 The predicted abundance of *S. obliquus* and toxic *M. aeruginosa* while coexist under different concentrations of *Chara vulgaris* extracts

普生轮藻浸提液初始浓度 Concentrations of <i>Chara vulgaris</i> extracts/(mL/L)	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
铜绿微囊藻密度 <i>M. aeruginosa</i> densities/($\times 10^5$ 个/mL)	8.97	4.33	3.85	1.21	1.14	0.61
斜生栅藻密度 <i>S. obliquus</i> densities/($\times 10^5$ 个/mL)	7.85	4.33	4.42	2.09	2.49	2.72

3 结论与讨论

3.1 普生轮藻浸提液对单独和共生状态的毒性铜绿微囊藻和斜生栅藻均具有抑制作用

高等水生植物分泌的化感物质抑藻时常具有种群特异性,这已有很多报道^[19-20]。本课题组在研究脂肪酸类化感物质抑藻效应时发现亚油酸要比棕榈酸的抑藻效果好,而亚油酸对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的抑藻效果又比对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)好^[19];对多酚类化感物质的抑藻作用研究发现:对羟基苯甲酸对水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*)的抑制作用明显强于对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)^[21];从芦苇(*Phragmites communis*)中分离鉴定出化感物质2-甲基乙酰乙酸乙酯,对铜绿微囊藻和蛋白核小球藻具有很强的化感抑制作用,而对普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)的抑制作用不明显^[5];穗状狐尾藻对铜绿微

囊藻、被甲栅藻(*Scenedesmus armatus*)等具有化感抑制作用,而对水华鱼腥藻几乎没有作用^[22]。

本研究表明普生轮藻浸提液无论对单独的毒性铜绿微囊藻或斜生栅藻还是共生状态的毒性铜绿微囊藻和斜生栅藻均有很强抑制作用,且对毒性铜绿微囊藻的抑制作用要显著高于对斜生栅藻。由于水华发生时通常都是以微囊藻为优势种同时也存在一些诸如斜生栅藻等绿藻的多种藻类的混合体系,因此,该研究对如何合理利用高等水生植物化感作用来进行富营养化水体生态修复、水华藻类的防治等无疑具有重要的理论与应用意义。

3.2 所建立的化感物质抑藻模型具有普遍性意义

关于化感物质抑藻的数学模型研究目前相对较少。本研究在传统的Logistic模型基础上,通过微元分析法,增加了化感物质对单纯藻类的化感抑制作用项^[12-13]建立了普生轮藻浸提液对单纯铜绿微囊藻或单纯斜生栅藻抑制作用的数学模型;同时在传统

的 Lotka-Volterra 模型与 Logistic 模型的基础上,通过微元分析法,增加了普生轮藻浸提液对铜绿微囊藻和斜生栅藻共生时的化感抑制作用项,建立了化感物质对复合藻类抑制作用的数学模型。通过对同一时间节点上实验数据与所建立模型计算值的比较可得:增加了胁迫项的数学模型比传统的 Logistic 模型以及 Lotka-Volterra 模型能更好地表征单纯或复合藻类在普生轮藻浸提液胁迫下的生长,此与参考文献^[13-14]中所讨论的结果具有一致性。另外,这几种模型均可有效表征和预测在一定范围内,产毒铜绿微囊藻、斜生栅藻及其混合体系在普生轮藻浸提液胁迫下藻密度随时间变化的规律;通过这些模型可方便地计算出在任何不同时间节点上普生轮藻浸提液抑藻的 EC_{50} 、MIC 等指标的预测值,该模型对指导和利用普生轮藻浸提液以及其他化感物质抑藻、为开发出有效的生物抑制剂以及设计和制定出合理、满足要求且具有经济参考的除藻方案等有重要参考价值。

References:

- [1] Jiang J L, Song R, Ren J H, Wang X R, Yang L Y. Advances in pollution of cyanobacterial blooms-producing Microcystins and their ecotoxicological effects on aquatic organisms. *Progress in Chemistry*, 2011, 23(1): 246-253.
- [2] Xie P. A review on the studies related to the effects of microcystins on human health. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(5): 603-613.
- [3] Jeong J H, Jin H J, Sohn C H, Suh K H, Hong Y K. Algicidal activity of the seaweed *Corallina pilulifera* against red tide microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 2000, 12(1): 37-43.
- [4] Jin Q, Dong S L. Comparative studies on the allelopathic effects of two different strains of *Ulva pertusa* on *Heterosigma akashiwo* and *Alexandrium tamarense*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 293(1): 41-55.
- [5] Li F M, Hu H Y. Allelopathic effects of different macrophytes on the growth of *Microcystis aeruginosa*. *Allelopathy Journal*, 2005, 15(1): 145-152.
- [6] Zhu J, Liu B Y, Wang J, Gao Y N, Wu Z B. Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion. *Aquatic Toxicology*, 2010, 98(2): 196-203.
- [7] Hilt S, Ghobrial M G N, Gross E M. *In situ* allelopathic potential of *Myriophyllum verticillatum* (*Haloragaceae*) against selected phytoplankton species. *Journal of Phycology*, 2006, 42(6): 1189-1198.
- [8] Peeter N, Tuvikene L, Feldmann T, Tõnno L, Künnap H, Luup H, Salujõe J, Nõges T. The role of charophytes in increasing water transparency: a case study of two shallow lakes in Estonia. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509(1/3): 567-573.
- [9] Mulderij G, van D E, Roelofs J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from *Chara*. *Hydrobiologia*, 2003, 491(1/3): 261-271.
- [10] Van Donk E, Van Dund W J. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto-and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms. *Aquatic Botany*, 2002, 72(3/4): 261-274.
- [11] Steemann N E. *Prevention of Hydrobiologi-Polyteknisk Forlag*. Lyngby, 1984, 36: 25-37.
- [12] Qiu L C, Ling Y J. Studies on Distribution of Characeae in China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(5): 756-759.
- [13] 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.
- [14] He Z X, Zhang T T. Model development and optimization on the combined algal growth inhibition effects of two allelochemicals. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 1894-1901.
- [15] Zhang T T, Wang L L, He Z X, Zhang D. Growth inhibition and biochemical changes of cyanobacteria induced by emergent macrophyte *Thalia dealbata* roots. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2011, 39(2): 88-94.
- [16] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M. Allelopathic effects of polyphenols released by *Myriophyllum spicatum* on the growth of cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Allelopathy J*, 2001, 8: 201-210.
- [17] Nakai S, Yamada S, Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*. *Hydrobiologia*, 2005, 543(1): 71-78.
- [18] Wang G. *Practical Computer and Mathematical Modeling*. Hefei: Anhui University Press, 2000.
- [19] 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.
- [20] Hilt S, Gross E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear-water states in shallow lakes? *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(4): 422-432.
- [21] Zhang T T, He M, Wu A P, Liu W N. Allelopathic inhibition of *p*-hydroxybenzoic acid on *Microcystis aeruginosa* Kuetz with no toxicological effects on *Cyprinus carpio* Linnaeus. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(9): 1887-1893.
- [22] Körner S, Nicklisch A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes. *Journal of Phycology*, 2002, 38(5): 962-971.

参考文献:

- [1] 姜锦林, 宋睿, 任静华, 王晓蓉, 杨柳燕. 蓝藻水华衍生的微囊藻毒素污染及其对水生生物的生态毒理学研究. *化学进展*, 2011, 23(1): 246-253.
- [2] 谢平. 微囊藻毒素对人类健康影响相关研究的回顾. *湖泊科学*, 2009, 21(5): 603-613.
- [12] 邱丽飏, 凌元洁. 中国轮藻植物分布研究. *水生生物学报*, 2007, 31(5): 756-759.
- [13] 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.
- [14] 何宗祥, 张庭廷. 两种化感物质联合抑藻的模型建立及数学最优化. *环境科学学报*, 2012, 32(8): 1894-1901.
- [18] 王庚. *实用计算机数学建模*. 合肥: 安徽大学出版社, 2000.
- [19] 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, 29(3): 274-279.
- [21] 张庭廷, 何梅, 吴安平, 聂刘旺. 对羟基苯甲酸对铜绿微囊藻的化感效应以及对鲤鱼的毒性作用. *环境科学学报*, 2008, 28(9): 1887-1893.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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 90 元/册,全年定价 2160 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

本期责任副主编 薛建辉

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 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元