

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息(1490,1496,1586,1743)	

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响

齐飞¹, 刘晓媛², 徐冰冰³, 贲岳⁴, 封莉¹, 张立秋¹

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京市水体污染源控制技术重点实验室, 污染水体源控与生态修复工程北京市教委工程研究中心, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学化学与环境学院, 北京 100191; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4. 国核电力规划设计研究院, 北京 100084)

摘要: 以我国湖泊典型固氮蓝藻发状念珠藻(*Nostoc flagelliforme*)为研究对象, 考察了氮、磷营养盐对发状念珠藻生长特性及其胞外有机物产生的影响。采用藻细胞浓度计数法表征发状念珠藻生长特性; 分别采用溶解性有机碳(DOC)、三维荧光光谱(EEM)和紫外-可见光谱法, 从总量和主要物质方面分析了发状念珠藻胞外有机物的产生规律。结果表明, 在不同氮、磷营养水平下, 发状念珠藻的4个关键生长时期基本相同, 氮是控制发状念珠藻生长的关键营养控制要素; 氮营养元素浓度的增高, 有利于发状念珠藻产生胞外有机物, 其产生量逐渐增大, 而磷营养元素浓度的增高对胞外有机物产生量贡献较小, 氮营养盐是发状念珠藻产生胞外有机物的关键限制因子; 通过EEM谱图分析, 发状念珠藻胞外有机物主要以类氨基酸类物质和类富里酸物质为主。以磷为控制营养盐时, 类富里酸是主要的胞外有机物之一, 以氮为控制营养盐时, 类富里酸产生量极低; 作为主要的胞外有机物, 蛋白质和碳水化合物产生规律显著不同, 其中蛋白质含量显著高于碳水化合物含量。

关键词: 磷; 氮; 营养盐; 发状念珠藻; 藻类胞外有机物

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1556-08

Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of *Nostoc flagelliforme*

QI Fei¹, LIU Xiao-yuan², XU Bing-bing³, BEN Yue⁴, FENG Li¹, ZHANG Li-qiu¹

(1. Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, Research Centre for Water Pollution Source Control and Eco-Remediation, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. State Nuclear Electric Power Planning Design and Research Institute, Beijing 100084, China)

Abstract: In this study, *Nostoc flagelliforme*, which is a typical nitrogen-fixing cyanobacteria alga in lakes, was selected as the object and effects of nitrogen and phosphate concentration on the growth and the generation of extracellular organic matters (EOM) were investigated. The growth of algae concentration was characterized by counting method. The releasing characteristic of extracellular organic matters (EOMs) was analyzed by DOC, EEM, and spectroscopy methods. At different levels of nitrogen and phosphorus nutrition, *Nostoc flagelliforme* exhibited a same growth period basically. Nitrogen is the key factor to controlling the growth of *Nostoc flagelliforme*, compared with phosphate. The increasing of the nitrogen concentration enhanced the concentration of EOMs; the increasing of the phosphate concentration was not good for the releasing of EOMs. Nitrogen is also the key factor to controlling the releasing of EOMs by *Nostoc flagelliforme*. By the analysis of EEMs, when phosphate was the controlling factor, the main EOMs was amino acid-like and fulvic acid-like organic substances; when nitrogen was the controlling factor, the main EOMs was amino acid-like organic substances. As main components, the concentration of carbohydrate was much lower than that of protein.

Key words: phosphorus; nitrogen; nutrition salts; *Nostoc flagelliforme*; extracellular organic matter

近年来,随着我国社会和经济的快速发展,城市生活污水和工业废水的产生量显著增加。氮、磷等营养元素随着污水的排放大量进入湖库水体之中,导致我国湖泊的富营养化问题日趋严重^[1,2]。目前,我国部分大型淡水湖泊(如太湖、巢湖和滇池等)都有不同程度的蓝藻水华问题发生,严重者(如滇池)终年都存在水华^[3]。藻类的大量繁殖不仅对湖泊水生生态系统造成严重污染,也会对饮用水处理技术产生极大的负面影响。

念珠藻(*Nostoc flagelliforme*)是淡水湖泊中常见的一种丝状固氮蓝藻,广泛分布于我国各大湖泊水

收稿日期: 2011-07-16; 修订日期: 2011-10-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(HJ2010-5, YX2010-20); 国家自然科学基金项目(51108030); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100014120001); 哈尔滨工业大学“城市水资源与水环境”国家重点实验室开放课题项目(ES200901); 中国博士后科学基金项目(20100470216, 201104060); 北京林业大学新进科研启动项目(BLX2W8024); 北京林业大学校级大学生科技立项(SRT项目)

作者简介: 齐飞(1980~),男,博士,副教授,主要研究方向为藻类有机物特性及强化去除技术, E-mail: qifei@bjfu.edu.cn

体. 作为一种典型的固氮蓝藻, 其体内含有丰富的有机质组分, 主要包括叶绿素 a、叶黄素、胡萝卜素和藻蓝蛋白等. 念珠藻体内的有机质组分是湖泊地球化学组分的主要来源之一^[4]. 作为湖泊生态系统中的重要固氮蓝藻, 念珠藻具有固碳和固氮的重要环境功能, 是湖泊生态系统中的重要组分^[5]. 因此, 掌握念珠藻在富营养化条件下的生长特性及其胞外有机物组成特性, 为解析湖泊营养类型演变及防止湖泊水体富营养化提供基础科学数据, 对于了解湖泊生态系统中有机质的生物地球化学特性及有机质组成具有重要意义. 此外, 在饮用水源中存在的大量藻类有机物是消毒副产物的主要前驱体, 水源中藻类有机物的特性决定了消毒副产物的种类和产量, 深入研究藻类有机物特性对强化饮用水处理技术也具有重要的工程意义.

本研究以发状念珠藻 (*Nostoc flagelliforme*) 为对象, 分析营养条件对其生长特性的影响, 探讨发状念珠藻胞外有机物的组成特性及其受营养条件的影响规律.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所需发状念珠藻购自中国科学院水生生物研究所, 保存在 pH 为 8.6 的 BG-11 培养基中, 培养条件为 28℃, 光暗比 12 h/12 h, 照度为 2 200 lx. 每 5 d 转接 1 次, 重复 2 次, 所得发状念珠藻密度为 1×10^6 个·mL⁻¹ 时, 作为实验藻种.

培养基与分析方法中所用主要化学试剂 (硝酸钠、磷酸氢二钾、硫酸镁、氯化钙、碳酸钠、柠檬酸铁、EDTA、牛血清蛋白、考马斯亮蓝 G-250、乙醇、H₃PO₄、葡萄糖、苯酚、浓硫酸) 均为分析纯级别.

1.2 实验方法

首先对实验藻种进行饥饿培养: 选取符合条件的藻液 (100 mL), 在 5 000 r·min⁻¹ 条件, 进行离心处理 5 min, 取出上清液, 用无菌水冲洗离心后藻种除去所吸附的氮、磷等营养元素, 进行二次离心, 重复上述洗涤工作 3 次, 将洗净的藻种接入 100 mL 无磷培养基中培养 48 h, 使藻类体内的磷消耗殆尽^[6].

实验中以磷元素为控制条件, 通过改变培养液中磷酸氢二钾 (K₂HPO₄) 浓度控制营养元素磷的浓度水平, 培养液中磷酸氢二钾浓度分别为 0.15、0.45、0.75 mg·L⁻¹, 使培养基中总磷浓度分别为: 0.026、0.080、0.13 mg·L⁻¹. 实验中以氮元素为控制条件, 通过改变培养液中硝酸钠 (NaNO₃) 浓度控

制营养元素氮浓度水平, 培养液中硝酸钠浓度分别为 1、5、10 mg·L⁻¹, 使培养基中总氮浓度分别为: 0.16、0.82、1.65 mg·L⁻¹. 根据目前我国湖泊营养状态, 上述 3 个营养条件分别代表贫营养、中营养和富营养水平.

吸取一定体积饥饿培养后的藻液置于 500 mL 培养液 (500 mL 或 1 L 锥形瓶为容器) 中, 使培养液中藻细胞浓度为 5×10^4 个·mL⁻¹.

1.3 分析方法

1.3.1 藻细胞浓度

培养周期开始后, 隔天定期将一定量的实验藻种按一定的稀释配属逐级进行稀释, 在显微镜下通过血球计数板计数, 得到相应的藻细胞密度, 绘制藻类生长曲线.

1.3.2 胞外代谢有机物的提取

采用离心-过滤的方法提取藻类胞外代谢有机物^[7], 将藻液在离心力为 10 000 G, 转速为 5 200 r·min⁻¹ 条件下离心 15 min, 采用 0.45 μm 醋酸纤维超滤膜对上清液进行过滤, 滤液中所含有机物为发状念珠藻胞外代谢有机物.

1.3.3 DOC、碳水化合物及蛋白质

采用 TC/TN 分析仪 (3100 TC/TN 分析仪, 德国耶拿分析仪器股份公司) 对提取后发状念珠藻胞外代谢有机物样品中 DOC 进行分析; 考马斯亮蓝 G-250 比色法^[8] 和苯酚-硫酸比色法^[9] 分析胞外代谢有机物中蛋白质和碳水化合物含量.

1.3.4 三维荧光光谱

以氙灯为光源, 将提取分离后的发状念珠藻胞外代谢有机物溶液进行荧光扫描, 使用荧光光谱仪为 F-7000 分子荧光分光光度计 (日立公司, 日本), 激发波长 E_x 为 200 ~ 400 nm; 发射扫描波长 E_m 为 300 ~ 500 nm; 狭缝宽度为 10 nm, 扫描间隔为 5 nm, 扫描速度为 1 200 m·s⁻¹, 电压为 400 V^[10].

1.3.5 比增长速率的计算方法

比增长速率的计算方法^[11]:

$$\mu = \frac{\ln c_t - \ln c_0}{t} \quad (1)$$

式中, μ 表示比增长速率; c_t 表示某一时间间隔结束时藻细胞浓度, 个·mL⁻¹; c_0 表示某一时间间隔初始藻细胞浓度, 个·mL⁻¹; t 表示时间间隔.

2 结果与讨论

2.1 不同氮磷浓度对发状念珠藻生长的影响

以氮、磷浓度为控制条件时, 发状念珠藻的生长

周期主要包括适应期、对数生长期、稳定期及衰亡期,如图1所示.在4个典型生长期中,发状念珠藻的适应期较长,达10 d;对数生长期为6~8 d左右,而稳定期则只有4 d.在整个生长周期中,氮、磷对生长周期的影响效果十分显著.在氮、磷元素较为充足的 BG-11 培养基中,发状念珠藻的生长期约为27 d,最大生物量(藻细胞浓度)可以达到 6×10^6 个 $\cdot$ mL $^{-1}$.

随着氮、磷元素在培养基中浓度的降低,发状念珠藻的生长周期逐渐变短,最大生物量有显著减少.在适应期,生物量的差距尚不明显;从对数期后期

开始(14 d左右),随着氮磷元素浓度的增加,生物量就有了显著的增加;在稳定期,氮磷元素的浓度越高,生物量能达到的最大值越高.

此外,氮磷营养元素对发状念珠藻生长特性的影响存在一定的差异性.从图1可以明显看出,与磷营养控制条件相比,在氮营养控制条件下生物量增长较为显著.随着氮营养浓度的增加,发状念珠藻生物量增长量也较高.随着磷营养浓度的增加,生物量增长较低.由此可见,在发状念珠藻生长过程中,氮营养条件是主要的限制生长条件.

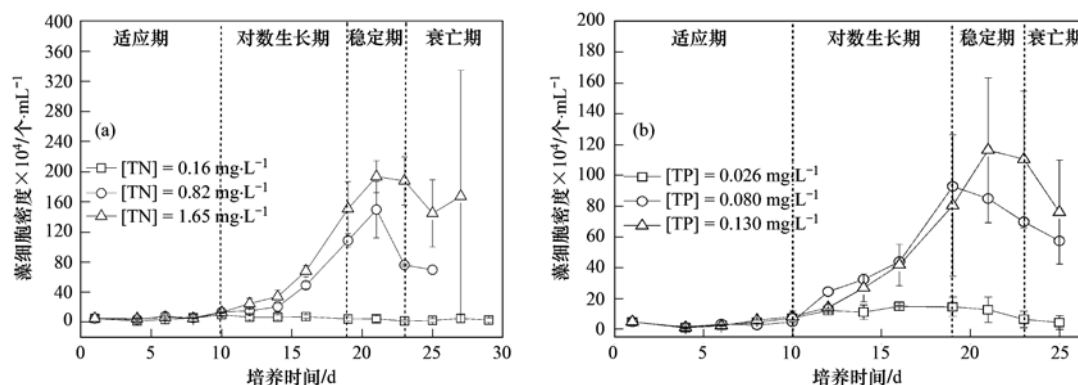


图1 不同营养条件对念珠生长特性的影响

Fig. 1 Effect of nutrition level on growth property of *Nostoc flagelliforme*

比增长速率最大值($\mu_{\max}$)是藻类在浮游植物群落中种类间竞争力和演替顺序的指标.这是水生态系统中生态模型的重要参数之一.此外,比增长速率最大值($\mu_{\max}$)的生长条件,也是藻类生长的最适宜条件和生态位的条件.

不同时期内,氮磷浓度对比增长速率的影响如图2所示.氮、磷浓度对发状念珠藻的比增长速率的影响主要体现在对数期和稳定期,即所达到的最大比增长速率.在对数增长期,氮磷营养盐浓度增加,

促使 $\mu_{\max}$ 逐渐增大;在稳定生长期,磷浓度的增加使 $\mu_{\max}$ 显著增大,当总氮浓度达到0.82 mg $\cdot$ L $^{-1}$ 以上时, $\mu_{\max}$ 基本保持不变.此外,总磷浓度为0.13 mg $\cdot$ L $^{-1}$ 和总氮浓度为1.65 mg $\cdot$ L $^{-1}$ 对数期的比增长速率基本持平,均大于其他氮磷浓度条件下的比增长速率.由此可以看出,培养基的氮磷浓度越大,适宜发状念珠藻的生长.

2.2 不同氮磷浓度对发状念珠藻产生胞外有机物的影响

为了了解和掌握发状念珠藻胞外代谢产物的代谢规律,首先以DOC为指标,分析发状念珠藻在生长过程中胞外有机物的产生规律,结果如图3所示.在控制氮磷营养水平的条件下,不同生长期发状念珠藻代谢DOC的量和代谢规律均有所差异.研究发现,不论氮磷元素浓度如何,发状念珠藻代谢DOC的总量都遵循着同一个规律,即随着藻细胞浓度的增加,藻液中的DOC含量逐渐升高,在稳定期前后达到饱和,随后逐渐降低.但由于氮磷元素的浓度不同,DOC总量的最大值和达到最大值的时间有所不同,其规律基本和氮磷元素浓度对藻细胞浓度的影响相同,即氮磷浓度越高,能达到的最大浓度就越

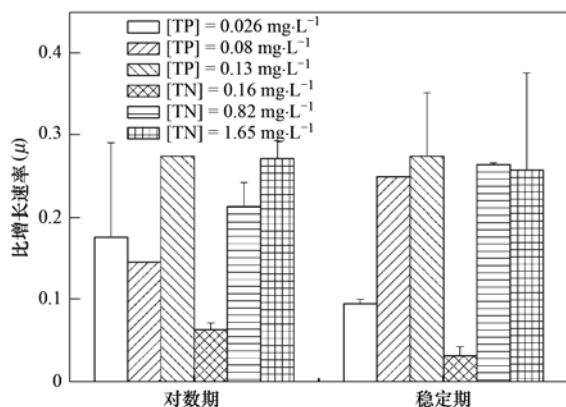


图2 不同营养条件对发状念珠藻生长比增长速率的影响

Fig. 2 Effect of nutrition level on growth rate of *Nostoc flagelliforme*

高,达到最大浓度所需的时间逐渐增长,保持较高浓度的时间也越长.当总氮浓度为 $1.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发状念珠藻代谢 DOC 的最大值可达 $9.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而氮浓度为 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发状念珠藻代谢 DOC 的最大值仅为 $6.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

然而,营养元素氮和磷对发状念珠藻胞外有机物产生量及规律有显著的差异性.其中营养元素氮浓度的增高,有利于发状念珠藻产生胞外有机物,其产生量逐渐增大.而营养元素磷浓度的增高却不利于发状念珠藻胞外有机物的产生.这一现象在发状念珠藻生长的适应期、对数期和稳定期尤为明显.这一研究结果说明,营养元素磷不是发状念珠藻生长及产生胞外有机物的关键营养元素.

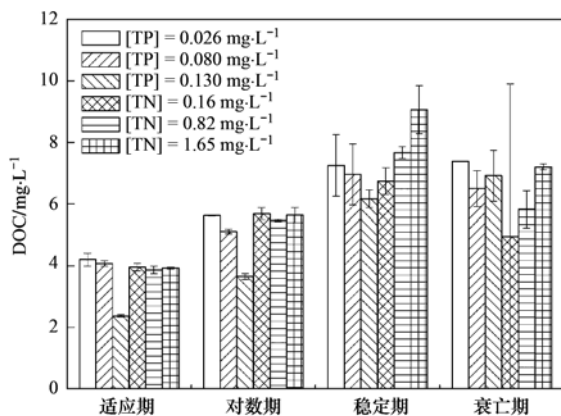


图3 不同营养条件对发状念珠藻胞外有机物总量的影响

Fig. 3 Effect of nutrition level on mass of extracellular organic matter generated by *Nostoc flagelliforme*

单个藻细胞分泌的 DOC 变化如图 4 所示.总磷浓度为 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,单个藻 DOC 的量最大,其次是总氮度为 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时.氮磷营养盐浓度较高的条件下,单个藻细胞代谢的 DOC 值反而更小.结合图 3 的研究结果,总磷浓度为 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时藻类代谢 DOC 的总量与更大浓度时的 DOC 总量相差不多.磷浓度为 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发状念珠藻代谢的 DOC 总量已经接近饱和,此时单个藻的代谢效率最大.而氮浓度作为控制条件时,氮浓度越高发状念珠藻代谢的 DOC 的量越大,但单个藻细胞代谢的 DOC 值越小.研究进一步说明,氮营养元素是促进发状念珠藻胞外有机物产生的关键限制性因子.

综上所述,发状念珠藻代谢 DOC 最旺盛的时期应该是在适应期和对数期,在这 2 个时期藻类为大量增殖做准备,需产生较多的胞外有机物来适应、调节环境.而稳定期的 DOC 浓度最高可能是前期代谢的 DOC 积累与本时期代谢的 DOC 相加所致.为了进一步说明此问题,以胞外有机物产生总量的比增

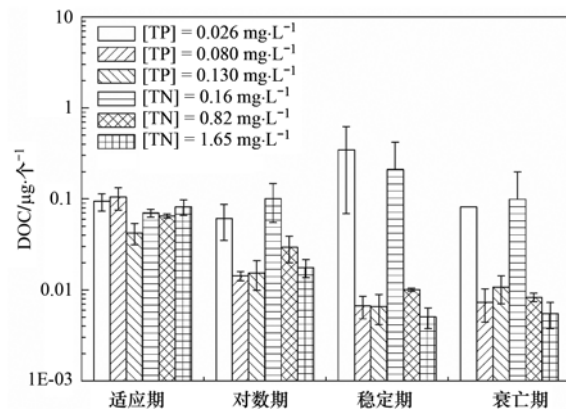


图4 营养条件对发状念珠藻胞外有机物产率的影响

Fig. 4 Effect of nutrition level on generation yield of extracellular organic matter

长速率为指标,进一步研究分析.

从图 5 可以看出,胞外有机物 DOC 的增长速率受氮、磷浓度影响很大.磷营养盐浓度对对数增长期的影响十分显著;对稳定期影响较小.氮营养盐浓度对对数增长期影响较小,对稳定期影响较为显著.这一研究结果说明,磷营养盐是发状念珠藻对数增长期胞外有机物的关键限制因子,氮营养盐是稳定生长期的关键限制因子.

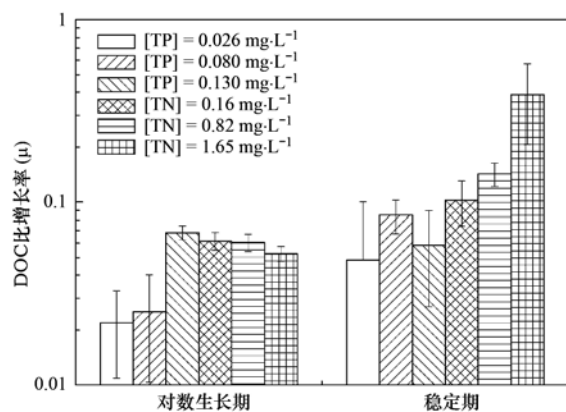


图5 营养条件对发状念珠藻产生胞外有机物比增长速率的影响

Fig. 5 Effect of nutrition level on growth rate of extracellular organic matter of *Nostoc flagelliforme*

2.3 不同氮磷浓度对发状念珠藻胞外有机物荧光特性的影响

鉴于三维荧光光谱(EEM)的高灵敏性,EEM 可以有效地解析溶解性有机物和天然有机物的化学组成,辨析水体中天然有机物的不同类别^[12].本研究通过对藻类过滤液的 EEM 分析来确定藻类胞外代谢有机物的类型.水华藻类胞外代谢有机物主要包括腐殖酸、富里酸、蛋白质和不同相对分子质量范围的碳水化合物及相关化学基团^[13].在 EEM 分析中,

对应相关上述主要溶解性有机物存在 4 个典型荧光光谱峰——A、C、T、B, 分别对应为可见区类富里酸, 紫外区类富里酸、类色氨酸和类酪氨酸^[14], 如图 6

所示. 可以看出, 随着生长期的变化, 藻类代谢有机物的种类和数量都有所改变, 而氮磷浓度的改变基本只对有机物代谢的量有影响, 而不会影响其代谢

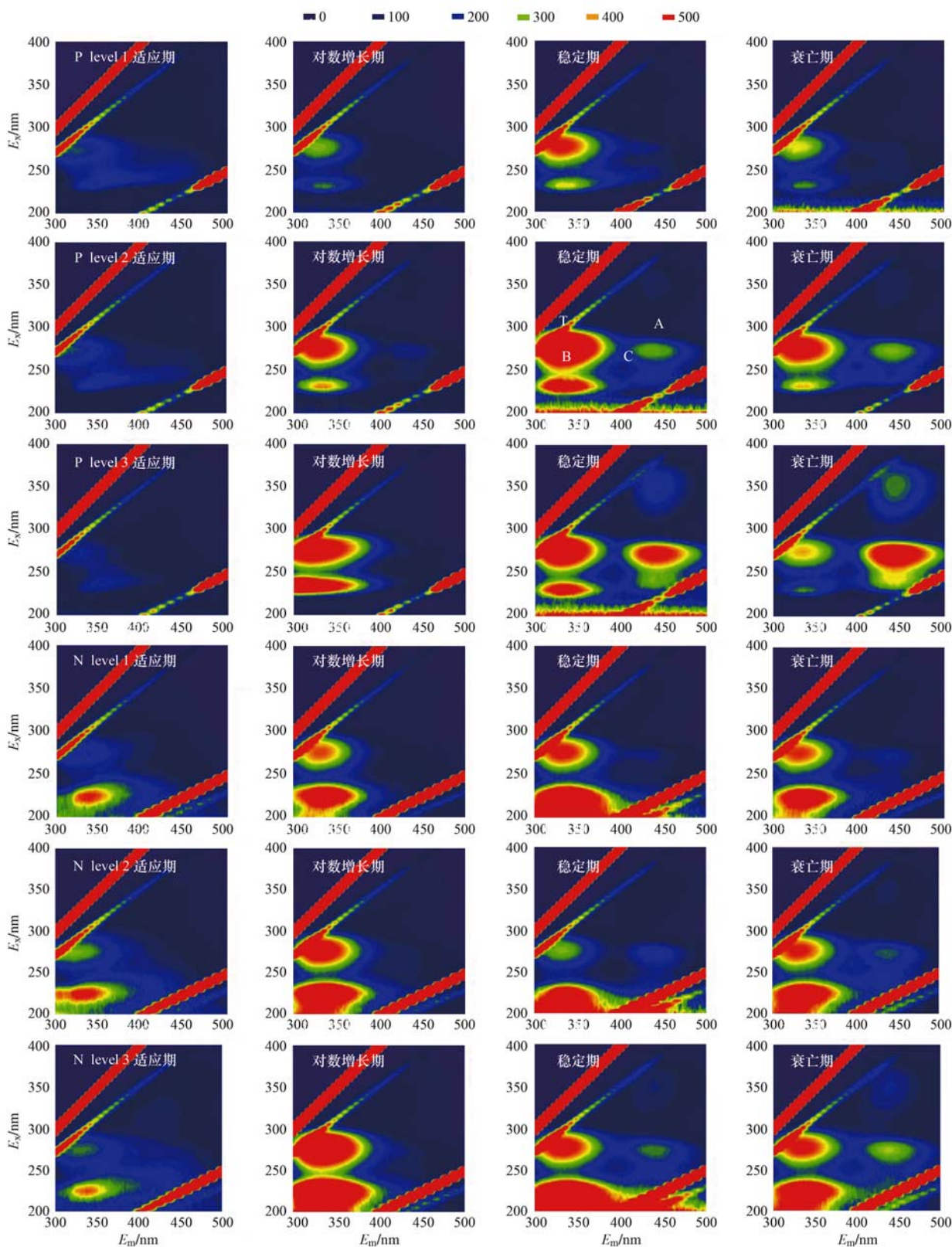


图 6 营养条件对发状念珠藻胞外有机物荧光特性的影响

Fig. 6 Effect of nutrition level on fluorescent characteristic of *Nostoc flagelliforme*

种类。

不论氮磷浓度如何,在适应期发状念珠藻代谢的有机物的峰都集中在 200 ~ 250 nm/300 ~ 400 nm 范围之内,这个范围内主要是类酪氨酸和类色氨酸。在对数期,类酪氨酸和类色氨酸的分泌量显著增加;伴随着藻细胞的衰亡,藻细胞体内的微生物代谢产物逐渐释放出来,表现为 T 峰和 B 峰强度的显著增强。同时还在 230 ~ 270 nm/370 ~ 440 nm 和 310 ~ 360 nm/370 ~ 460 nm 出现 2 个峰,这 2 个区域分别是可见区类富里酸和紫外区类富里酸。其中,A 峰可见区类富里酸强度较高,C 峰紫外区类富里酸强度较弱。A 峰主要出现在藻细胞的稳定生长期,浓度在衰亡期达到最高。在稳定生长期,部分藻细胞开始衰亡,释放出部分可见区类富里酸。随着磷营养元素的增加,藻细胞的浓度快速增长,稳定期和衰亡期提前到来,可见区类富里酸浓度也显著增加。营养元素 N 对 A 峰强度变化的影响较弱。无论在哪个典型生长时期,可见区类富里酸浓度均较低。当以磷浓度为营养盐控制条件时,主要代谢产物为可见区类富里酸、类色氨酸和类酪氨酸。其中类色氨酸和类酪氨酸始终存在于 4 个典型生长时期,而可见区类富里酸出现于稳定期,在衰亡期逐渐减少。当以氮浓度为营养盐控制条件时,主要代谢产物为类色氨酸和类酪氨酸,可见区类富里酸浓度极低。

2.4 不同氮磷浓度对发状念珠藻代谢蛋白质和碳水化合物化合物的影响

发状念珠藻生长过程中产生的胞外有机物中还包含一定的蛋白质和碳水化合物。图 7 表示了发状念珠藻产生蛋白质的情况。纵观整个生长期,蛋白质的产生总量较低。在氮、磷浓度不同的情况下,蛋白质的浓度变化与藻类生长变化规律基本相同,即在

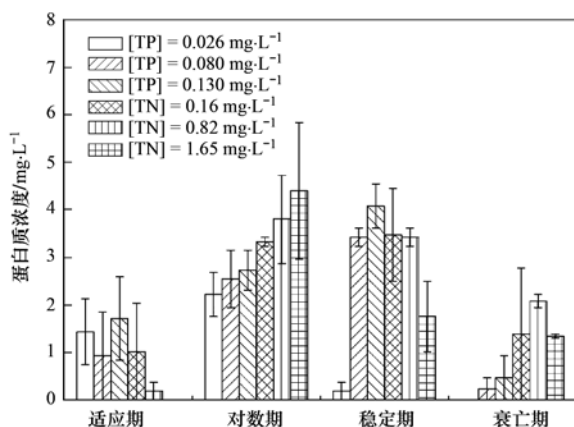


图 7 营养条件对发状念珠藻产生蛋白质的影响

Fig. 7 Effect of nutrition level on protein generated by *Nostoc flagelliforme*

适应期初期代谢量较小,随着藻类生长,代谢量迅速增加,在对数期或稳定期达到峰值;而后随着藻类的衰亡,释放量又大量减少。在磷浓度为控制条件时,蛋白质的产生量持续增加,直至稳定期;而氮浓度为控制条件时,在对数期时蛋白质的产生量已经达到峰值。图 8 表示了不同生长时期蛋白质产生量占胞外有机物总量的情况。可知,发状念珠藻产生的蛋白质占胞外有机物总量的比例较低。随着藻类的繁殖,蛋白质产生量持续增加,在对数期达到最大值,这和藻细胞浓度的变化规律基本相同。而后随着藻密度的增大,发状念珠藻产生蛋白质的量减小,但产生胞外有机物总量还在增加,所以稳定期代谢蛋白质占胞外有机物的比例减小。

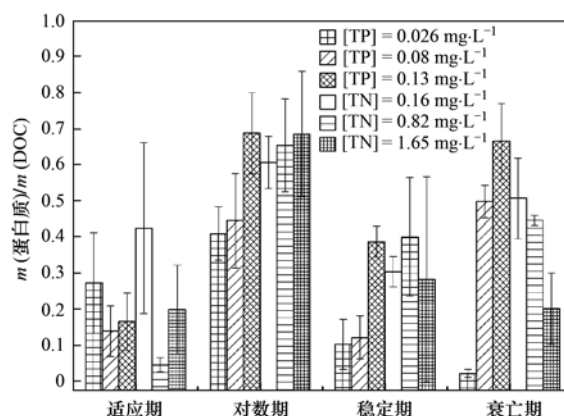


图 8 营养盐对发状念珠藻产生蛋白质占胞外有机物总量的影响

Fig. 8 Effect of nutrition level on the contribution of protein to the total mass of EOMs

图 9 表示了发状念珠藻生长过程中碳水化合物化合物的产生情况。在适应期,碳水化合物的释产生量一直维持在较低水平,进入对数期之后有一个显著的增高,在稳定期有所降低但基本还维持在较高水平,在将要进入衰亡期时则降低至最大值的一半左右,随

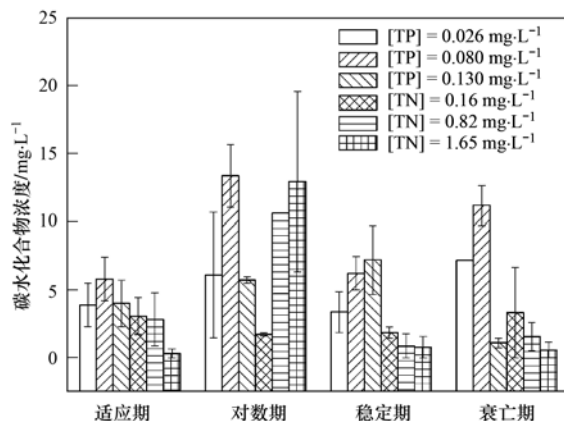


图 9 营养条件对发状念珠藻产生碳水化合物的影响

Fig. 9 Effect of nutrition level on carbohydrate generated by *Nostoc flagelliforme*

后维持这个水平或有小幅度提高. 与蛋白质产生规律不同,主要体现在碳水化合物在胞外有机物中所占的比重较大.

根据图 9 和图 10 的研究结果,可以看出氮、磷的浓度对发状念珠藻产生碳水化合物的影响十分显著. 总磷浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,大部分时期碳水化合物的代谢总量和整个生长期中在胞外有机物中所占的比例都是最小的. 结合图 9,与 $[\text{TP}] = 0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $[\text{TP}] = 0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时相比, $[\text{TP}] = 0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时发状念珠藻代谢活性最大,产生的胞外有机物总量最多,但代谢碳水化合物的能力则不是最强,导致碳水化合物所占比例降低. 在高磷浓度下,发状念珠藻产生的碳水化合物浓度最高,这些物质很容易被其他植物和非自养型微生物所利用,导致水体中植物大量生长、溶解氧迅速消耗等结果. 当以氮为营养控制条件时,总氮浓度越高,发状念珠藻产生的碳水化合物量越多,并且碳水化合物占 DOC 的比值越大.

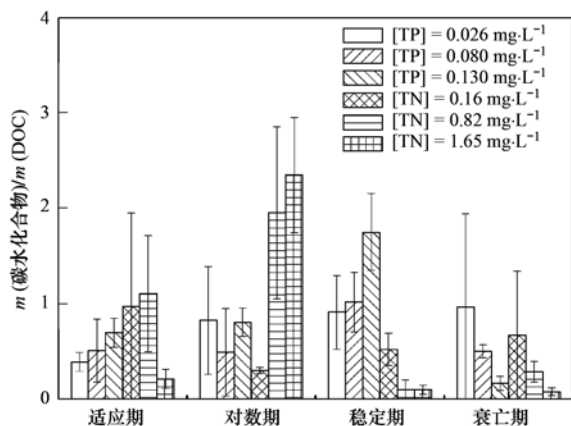


图 10 营养盐对发状念珠藻产生碳水化合物占胞外有机物总量的影响

Fig. 10 Effect of nutrition level on the contribution of carbohydrate to the total mass of EOMs

图 11 表示了胞外有机物中蛋白质和碳水化合物的质量比. 从中可以明显看出氮、磷浓度对这 2 种物质代谢规律的影响. 总体来说,在胞外有机物中蛋白质的含量是多于碳水化合物的,且氮磷浓度越高,这一趋势越明显. 当氮磷浓度降低时,由于碳水化合物代谢总量的明显降低,使得蛋白质/碳水化合物的质量比在稳定期和衰亡期迅速增加.

3 结论

(1)在不同氮磷营养水平下,发状念珠藻的 4 个关键生长时期基本相同,且氮是控制发状念珠藻生长的关键营养控制要素.

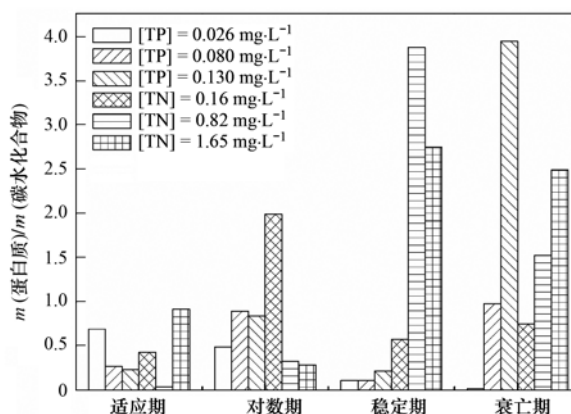


图 11 营养条件对发状念珠藻代谢蛋白质与碳水化合物比值的影响

Fig. 11 Effect of nutrition level on the ratio of protein of carbohydrate

(2)不论氮磷元素浓度如何,发状念珠藻代谢 DOC 的总量都遵循着同一规律,即随着藻细胞浓度的增加,藻液中的 DOC 含量逐渐升高;营养元素氮浓度的增高,有利于发状念珠藻产生胞外有机物,其产生量逐渐增大,而营养元素磷浓度的增高却不利于发状念珠藻胞外有机物的产生;氮营养盐是发状念珠藻产生胞外有机物的关键限制因子.

(3)EEM 谱图分析表明,发状念珠藻胞外有机物主要以类氨基酸物质和类富里酸物质为主. 以磷为控制营养盐时,可见区类富里酸是主要的胞外有机物之一,以氮为控制营养盐时,类富里酸产生量极低;作为主要的胞外有机物,蛋白质和碳水化合物的产生规律显著不同,其中蛋白质含量显著高于碳水化合物含量.

致谢:感谢香港城市大学郭怡对本研究中部分实验数据的分析及对本文提出的宝贵意见.

参考文献:

- [1] 高柳青,晏维金. 富营养化对三湖水环境影响及防治探讨[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 19-25.
- [2] 秦伯强,杨柳燕,陈非洲,等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [3] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [4] 向刚,龚西旭,蒋欣琳,等. Ca^{2+} 对普通念珠藻 (*Nostoc commune* Vanch.) 生长影响的试验[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2003, 21(2): 49-51.
- [5] 游萍,张以忠,聂忠平. 3 种无机盐对念珠藻生长和胞外多糖分泌的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(4): 57-60.
- [6] 陈国永,杨振波,马昱,等. 氮和磷对铜绿微囊藻细胞生长的影响[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(9): 675-679.
- [7] 高乃云,王昊,黎雷,等. 铜绿微囊藻细胞内外有机物特性

- 及氯消毒副产物[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(9): 1314-1318.
- [8] 冯昕, 王吉中, 尧俊英, 等. 考马斯亮蓝法测定乳与乳制品中蛋白质含量[J]. 粮食与食品工业, 2007, **17**(3): 57-59.
- [9] Zhang X Q, Bishop P L, Kinkle B K. Comparison of extraction methods for quantifying extracellular polymers in biofilms[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(7): 211-218.
- [10] Liu T, Chen Z L, Yu W Z, *et al.* Characterization of organic membrane foulants in a submerged membrane bioreactor with pre-ozonation using three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Water Research, 2011, **45**(5): 2111-2121.
- [11] 金相灿, 郑朔方. 有机磷和无机磷对铜绿微囊藻生长的影响及动力学分析[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(5): 41-44.
- [12] Pan X L, Liu J, Zhang D Y, *et al.* Binding of dicamba to soluble and bound extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic activated sludge: A fluorescence quenching study[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, **345**(2): 442-447.
- [13] Henderson R K, Baker A, Parsons S A, *et al.* Characterisation of algogenic organic matter extracted from cyanobacteria, green algae and diatoms[J]. Water Research, 2008, **42**(13): 3435-3445.
- [14] Fang J Y, Yang X, Ma J, *et al.* Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor(am)ination[J]. Water Research, 2010, **44**(20): 5897-5906.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人