ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第8期
2014年8月15日

目 次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 …… 刘庆阳,刘艳菊,赵强,张婷婷,张美根,王存美(2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 …… 陈秋方,孙在,谢小芳(2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 …… 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪(2857)
龙凤山本底站大气 CO_2 数据筛分及浓度特征研究 …… 栾天,周凌晞,方双喜,姚波,王红阳,刘钊(2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 …… 苏彬彬,许楉洋,张若宇,纪贤鑫(2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 …… 张诗建,姬亚芹,张雷波,赵雪艳,朱振宇,杨文(2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 …… 梁俊宁,李文慧,葛毅,陈洁,宋丽娜,刘杰(2883)
KI改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 …… 沈伯雄,陈建宏,蔡记,何川,李卓(2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 …… 陈文和,邓明佳,罗辉,张婧赢,丁文杰,刘俊新,李琳(2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 …… 白利平,王业耀,郭永丽,周友亚,刘俐,颜增光,李发生(2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 …… 张柏发,陈丁江(2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 …… 蔡春晓,刘红玉,李玉凤,王聪,侯明行(2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 …… 李瑞利,柴民伟,邱国玉,石福臣,Sasa Kaichiro(2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 …… 蓝家程,孙玉川,师阳,徐昕,袁道先,胡宁(2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 …… 张陶,蒲俊兵,袁道先,章程,何师意,于奭,刘文,莫雪,周建超,杨会,唐伟(2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 …… 肖可,沈立成,王鹏(2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 …… 刘文,蒲俊兵,于奭,章程,区绎如,袁道先,杨会,唐伟(2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究 …… 陈莉薇,徐晓春,王军,陈芳(2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 …… 王巍,丛海兵,徐亚军,陈雯婧,徐思涛,吴军,蒋新跃(2974)
酸性条件下Ti(Ⅳ)催化 O_3/H_2O_2 降解邻苯二甲酸二甲酯 …… 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平(2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(Ⅱ)、Hg(Ⅱ)的影响 …… 施秋伶,周欣,张进忠,邱昕凯(2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 …… 方巧, 林建伟, 詹艳慧, 杨孟娟, 郑雯婧(2992)
不锈钢201、304和316L在模拟污水管道反应器中的腐蚀 …… 鲍国栋,左剑恶,王雅娇,干里里(3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 …… 王磊,王磊,黄丹曦,王旭东(3007)
不同类型LDHs对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 …… 张翔凌,郭露,陈俊杰,刘小婷,徐璐,陈巧珍,王晓晓(3012)
SPG膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 …… 刘春,龚鹏飞,肖太民,张明,年永嘉,杨景亮,张晶(3018)
SPG膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 …… 张磊,张明,刘春,张静,刘俊良(3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 …… 陈烜,汤兵,张姿,宾丽英,黄绍松,付丰连,邱兵(3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 …… 刘文如,阴方芳,王建芳,沈耀良(3038)
UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 …… 李亚峰,马晨曦,张驰(3044)
开封周边地区地表灰尘砷、汞背景值及其应用 …… 陈彦芳,马建华,董运武,刘德新,陈星(3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 …… 段恒轶,吴亚涛,王珏,刘兆荣(3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 …… 朱智成,陈社军,丁南,王璟,罗孝俊,麦碧娴(3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 …… 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,孙良杰,刘欣超,何亚婷,贾军强,曹丛丛(3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 …… 刘希玉,邹敬东,徐丽丽,张心昱,杨风亭,戴晓琴,王忠强,孙晓敏(3083)
低分子有机酸对土壤中Cu化学形态的影响 …… 黄国勇,付庆灵,朱俊,万田英,胡红青(3091)
EDTA与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究 …… 尹雪,陈家军,蔡文敏(3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N_2O 排放的关系 …… 陈玲,范会,蒋静艳(3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N_2O 产生的不同过程及贡献 …… 孙文广,孙志高,甘卓亭,孙万龙,王伟(3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响 …… 王聪,沈健林,郑亮,刘杰云,秦红灵,李勇,吴金水(3120)
我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 …… 袁相洋,张巍巍,孙敬松,胡恩柱,张玉龙,张红星,田媛,冯兆忠(3128)
丛枝菌根影响纳米ZnO对玉米的生物效应 …… 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴(3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 …… 李霞,彭霞薇,伍松林,李志茹,冯红梅,江泽平(3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 …… 雷鸣,曾敏,廖柏寒,胡立琼,周航,龙水波(3149)
重金属铬(Ⅵ)的生态毒性及其土壤环境基准 …… 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红(3155)
维生素 B_{12} 对脱氯功能蓝藻降解2,4,4′-三氯联苯的促进作用研究 …… 刘嘉裕,肖文丰,鲁莉萍,张杭君(3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 …… 徐冉芳,孙敏霞,刘娟,汪泓,李欣,朱雪竹,凌婉婷(3169)
多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 …… 王俊霞,王春艳,刘莉莉,周啸宇,刘洋成,林匡飞(3175)
稀有鮈鲫HMGR基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 …… 邓川,毛思予,熊力,张晓峥,李伟,高香,刘秋萍,陈韵,刘堰(3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒MS2存活的影响 …… 何强,吴庆庆,马红芳, 周真明,苑宝玲(3192)
多胺功能化介孔炭对Pb(Ⅱ)的吸附动力学与机制 …… 李坤权,王艳锦,杨美蓉,朱志强,郑正(3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 …… 崔延瑞,郭焱,吴青,马罗丹,孙剑辉,崔凤灵(3206)
经济结构调整的污染减排效应:以COD减排为例 …… 李名升,周磊,陈远航,李茜,张建辉(3212)
中国铅流改变原因分析 …… 马兰,毛建素(3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 …… 汪诗平,Andreas Wilkes,汪亚运,白玲(3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 …… 徐志伟,张心昱,于贵瑞,孙晓敏,温学发(3230)
《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究

王巍,丛海兵*,徐亚军,陈雯婧,徐思涛,吴军,蒋新跃
(扬州大学环境科学与工程学院,扬州 225127)

摘要: 为了探明不同压力作用后蓝藻气囊体积变化规律及其上浮特性,分别采用压力毛细管法和图像分析法测定了不同压力作用后铜绿微囊藻气囊破裂情况及残余气囊体积分数,以及压力作用后气囊恢复生长情况. 结果表明,采用图像分析法测得太湖蓝藻经 0、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa 加压后,藻细胞内的气囊体积分数分别为 29.52%、5.73%、4.43%、2.71%、2.46%、2.19%,传统的压力毛细管法测得的气囊体积分数为 10.93%、1.14%、0.90%、0.27%、0.14%、0.04%. 作用压力大于 0.4 MPa 时,蓝藻因气囊破裂而下沉,沉淀蓝藻经过一段时间培养后气囊逐步恢复,部分藻类再上浮,在1 000 lx 光照度、25℃条件下培养 8、24、48 h 后,藻细胞再生气囊占加压前气囊总体积的比例为 31.02%、45.68%、81.05%. 图像分析法较准确地测定了蓝藻气囊体积,而传统的压力毛细管法测定蓝藻气囊体积偏小.

关键词:蓝藻; 压力; 光照; 时间; 气囊; 上浮
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)08-2974-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.08.019

Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures

WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, CHEN Wen-jing, XU Si-tao, WU Jun, JIANG Xin-yue
(School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to ascertain the volumetric change of gas vesicles in cyanobacteria and the floating characteristics, capillary pressure method and image analysis method were used to study burst situation and remanent volume fraction of gas vesicles in cyanobacteria under different pressures. The reform situation after pressuring was also analyzed in this research. The results showed that the volume fraction of gas vesicles in Taihu Lake were 29.52%, 5.73%, 4.43%, 2.71%, 2.46%, 2.19% under 0 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa, 0.5 MPa, 0.6 MPa, 0.7 MPa determined by the image analysis, and were 10.93%, 1.14%, 0.90%, 0.27%, 0.14%, 0.04% determined by the capillary pressure method; cyanobacteria sank due to the gas vesicles' bursting when the pressure was greater than 0.4 MPa. Gas vesicles and structure after pressure were reformed with the lapse of time, under 1 000 lx, 25℃, after 8 h, 24 h, 48 h, the reformed gas vesicles accounted for 31.02%, 45.68%, 81.05% of total gas vesicles before pressuring. Image analysis method is more accurate in the determination for cyanobacteria gas vesicles' volume, while the volume is smaller measured by traditional capillary pressure method.

Key words: cyanobacteria; pressure; illumination intensity; time; gas vesicle; floating

水华蓝藻覆盖水面,腐烂消耗水体溶解氧,导致水体严重缺氧,产生恶臭; 蓝藻分泌藻毒素,对人体健康造成很大威胁,对水环境造成严重影响[1,2]. 因此,有关蓝藻水华暴发的机制引起国内外学者的广泛重视[3~7]. 蓝藻具有很强的上浮特性,可以通过改变在水体中的纵向位置以适应环境[8~10],当蓝藻聚集漂浮在江河湖泊的内陆水体上时,便会生成水华[11]. 因此,研究蓝藻的浮力调节机制对了解蓝藻水华的暴发机制起着至关重要的作用[12].

蓝藻之所以上浮是因为藻细胞内有气囊(gas vesicle)[13],这些气囊是由蛋白质壁组成的柱状气泡,两端锥形、横断面为六边形[14, 15],气囊为蓝藻提供浮力,使蓝藻能长时间停留于水体表层光照区,获得生长繁殖的机会[16~18].

研究表明,蓝藻气囊能承受 0.4 ~ 0.7 kPa 的外部压力,当压力超过这一压力时,气囊将不可逆转地破裂[19~21],从而使蓝藻失去浮力而下沉. 因此,研究压力作用后气囊破裂、蓝藻下沉规律,对控制蓝藻水华、去除水源水中蓝藻,保障供水安全等方面有重要意义.

目前国内外有关气囊破裂及其对蓝藻上浮性能影响已经有了较多且深入的研究,但是对于不同压力作用下蓝藻气囊的破裂情况的研究还相对较少. 为此,笔者分别利用改进的 Walsby 气囊测定装置[22~24]和透射电镜扫描法,研究了不同压力作用后蓝藻气囊破裂情况,以及压力作用后藻类活性和气

收稿日期: 2014-01-07; **修订日期**: 2014-03-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(51178408); 扬州市"绿扬金凤计划"项目
作者简介: 王巍(1989 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为水处理工艺与技术, E-mail: wangwei947342360@163.com
* 通讯联系人, E-mail: chb9903@126.com

囊恢复生长规律，以期对蓝藻水华的控制和蓝藻水处理提供一定的理论依据.

1　材料与方法

1.1　材料

从太湖梅梁湾取藻类和原水，将其放入实验室透明有机玻璃桶中，给予适当光照、搅拌，自然培养，在一周内使用完毕. 经过镜检，藻类为铜绿微囊藻，太湖水 pH 为 7.9 ~ 8.2.

1.2　实验装置

1.2.1　含藻水加压装置

含藻水加压实验装置如图 1 所示，包括有机玻璃压力罐、加压泵、循环水箱. 自制有机玻璃压力罐容积为 10 L 耐压 1.0 MPa，循环水箱容积为 3 L，加压水泵为 GY2A035F 型不锈钢滑片泵，功率为 80 W.

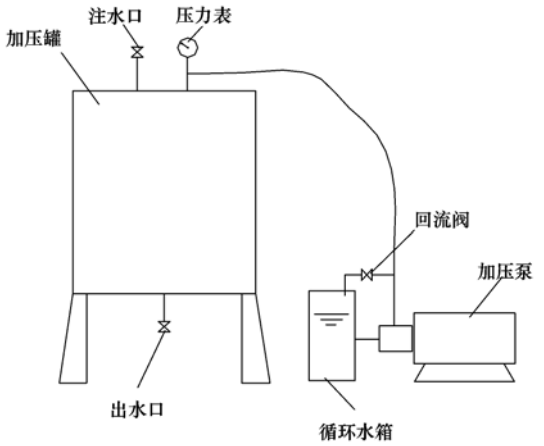

图 1　含藻水加压装置示意

Fig. 1　Algae water pressure device

1.2.2　改进的 Walsby 气囊体积测定装置

改进的 Walsby 气囊测定装置为压力毛细管法测定装置[1,2]，由氮气加压装置、显微镜、压力毛细管、压力套管等部分组成，如图 2 所示. 其中毛细管上有刻度，容积 2.0 mL，长度 12.5 cm，刻度部分长 10.0 cm，每个主刻度 1.0 μL，每个次要刻度 0.1 μL. 显微镜放大倍数 400[12].

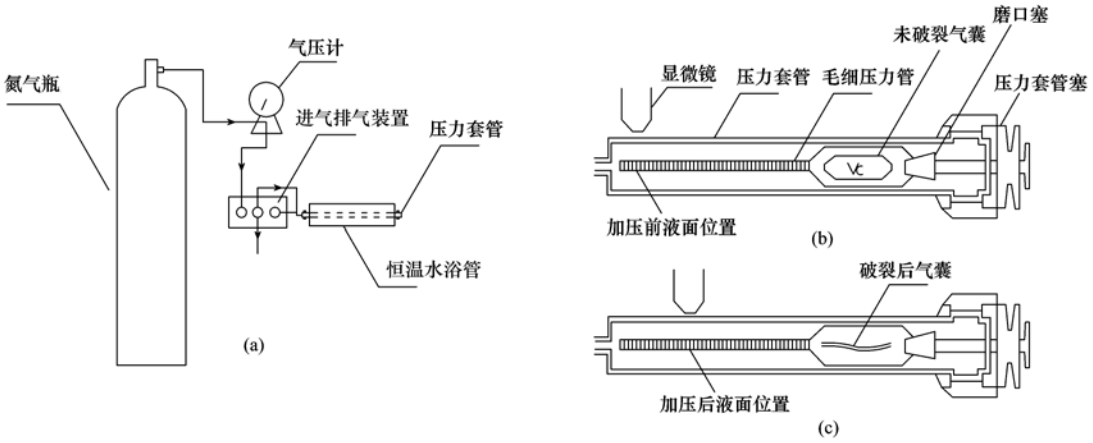

图 2　压力毛细管法气囊体积测定装置

Fig. 2　Capillary pressure device for measuring Gas vesicles'volume

1.3　实验方法

1.3.1　藻类加压

取含藻水充分混匀，将混匀的水样注满含藻水加压罐，开启加压泵，逐步调小回流阀，观察压力表读数，直到压力上升到指定压力，维持 1 min，停止加压，放出压力罐中水样. 重复上述水样加压过程，分别制得 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa 压力下的加压水样.

1.3.2　藻类气囊体积分数的图像分析方法

(1)藻细胞超薄切片透视电镜扫描

对加压后的含藻水进行低速离心，吸取 2 mL 高浓度藻液，送扬州大学分析测试中心进行生物处理，制作藻细胞超薄切片. 利用荷兰 Philips 公司生产的 CM100 型透射电镜对藻类超薄切片进行拍照，得到清晰的藻细胞切片照片(黑白).

(2)图像分析

自主编制图像分析软件，对藻细胞扫描照片进行分析，将图像分成黑白二色，其中白色部分为气囊，黑色部分为藻液. 由软件自动统计出白色部分所占的面积比例为 X，如图 3 所示. 由于藻细胞为球形，则气囊体积分数为 $Y=(\sqrt{X})^3$. 每种压力作用下选用 15 张照片进行分析，取平均值，得到不同压力下藻细胞中剩余气囊所占体积比例.

1.3.3　藻类气囊体积分数的压力毛细管法

藻类气囊体积分数的压力毛细管法委托中国环

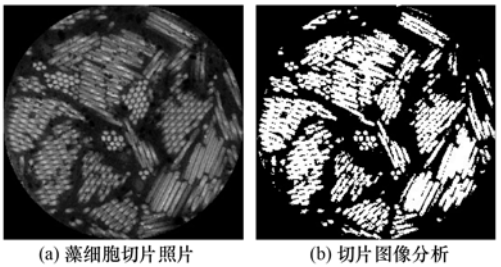

图 3 藻细胞超薄切片照片

Fig. 3 Pictures of algal cell's ultrathin sections

境科学研究院测定,采用与图像分析方法同一批藻类. 将含藻水注入压力毛细管中,用显微镜观察此时毛细管水面所在的刻度位置 1[如图 2(b)]. 向毛细管中通入 1.2 MPa 的压缩氮气,维持一段时间,泄压,用显微镜观察此时毛细管水面刻度位置 2[如图 2(c)]. 由于加压后藻细胞气囊破裂,破裂气囊气体运动到水面,使毛细管中水面右移. 根据加压前后毛细管水面位置的变化,计算出气囊的体积 ΔV,即为压力管中所有藻细胞气囊的总体积[12]. 将压力毛细管中藻细胞倒出,用显微镜计数藻细胞个数 N. 则压力毛细管法测得的气囊体积分数为 $Z = \frac{3\Delta V}{4N\pi r^3}$,式中 r 为藻细胞半径.

1.3.4 压力作用后藻类上浮及气囊恢复

(1)不同光照度下藻类上浮

将含藻水经 0.7 MPa 压力加压,测定初始叶绿素浓度 Chl_0. 取加压水样 250 mL 分别注入 7 个烧杯中,用白布包裹烧杯,放入光照培养箱中,使各烧杯中的光照度分别为 0、500、1 000、1 500、2 000、5 000、8 000 lx. 模仿自然界白天黑夜比控制光照的开关,培养温度 25℃. 在初始时刻,藻类均沉淀于杯底,培养 24 h 后,提取上清液 200 mL,混匀测定叶绿素浓度 Chl_t,计算藻类上浮比例 $F = Chl_t/Chl_0$.

(2)不同培养时间后藻类上浮

采用与(1)相同的含藻水进行实验,将含藻水注入透光率相同的烧杯中,放置在光照培养箱中,分别培养 16、32、40、52、64 h,提取上清液测定叶绿素浓度,分别计算藻类上浮比例. 该实验共进行 3 组,3 组培养的光照度分别为1 000、2 000、8 000 lx. 模仿自然界白天黑夜比控制光照的开关,培养温度 25℃.

(3)压力作用后藻类气囊恢复

将经过 0.7 MPa 加压的含藻水样 250 mL 分别注入 3 个烧杯中,放入光照培养箱中,控制光照度 1 000 lx. 模仿自然界白天黑夜比控制光照的开关,培养温度 25℃. 于 8、24、48 h 各取一个烧杯中上浮的藻类,进行超薄切片透射电镜扫描.

2 结果与讨论

2.1 压力作用后藻类气囊体积分数

藻细胞超薄切片扫描电镜如图 4 所示,从中可

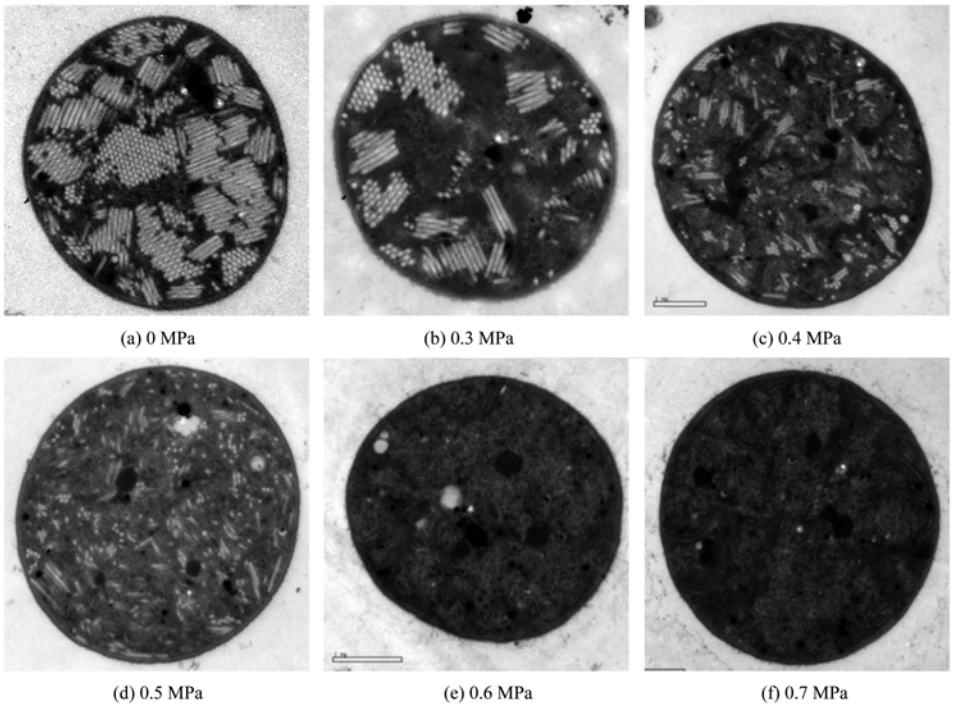

图 4 不同压力作用后藻细胞内气囊形态比较

Fig. 4 Comparison of gas vesicles morphology after different pressures

见，原始藻类中存在蜂窝状白色气囊，黑色部分为藻液. 经 0.3 ~0.5 MPa 压力加压后部分气囊消失，气囊逐步减少；经 0.6 ~0.7 MPa 压力加压后已看不到明显的气囊，破裂后的气囊气体溶解到细胞液中，或扩散渗透到细胞壁外. 对每种压力作用后的藻细胞超薄切片扫描图进行图像分析，得出残余气囊体积分数，15 个细胞气囊体积分数的平均值见表 1. 随着压力的增大，藻类气囊逐渐破裂，细胞内气囊体积逐渐减少.

表 1　不同压力作用下藻类残余气囊体积

Table 1　Remaining volume fraction of gas vesicles for different pressure

压力/MPa	图像分析法		压力毛细管		Y/Z
	气囊体积分数 Y/%	均方差	气囊体积分数 Z/%	均方差	
0.0	29.52	0.067	10.93	0.006 7	2.7
0.3	5.73	0.026	1.14	0.002 8	5.03
0.4	4.43	0.022	0.90	0.001 2	5.38
0.5	2.71	0.022	0.27	0.000 1	10.04
0.6	2.46	0.014	0.14	0.000 2	17.57
0.7	2.19	0.010	0.04	0.000 1	54.75

利用藻细胞超薄切片电镜扫描图，统计计算出藻细胞平均直径 $d = 4.12$ μm，平均体积 $V = 37.7$ μm^3. 从而可计算出压力毛细管法气囊体积分数 Z，结果如表 1. 两种方法测定结果比较两种方法测得的气囊体积分数比较如图 5 所示. 从中可见，采用图像分析法得到的气囊体积分数比传统的压力毛细管法大得多，自然常压下图像分析法测得的气囊体积是压力毛细管法的 2.7 倍. 产生这种差别的原因可以结合图 6 进行说明.

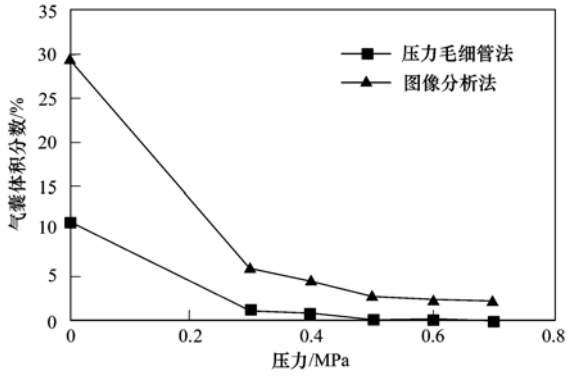

图 5　藻类残余气囊体积分数随压力的变化

Fig. 5　Changes of the remaining volume fraction of gas vesicles as pressure

压力作用后气囊破裂，气体首先溶解到藻液中，其中一部分透过细胞壁进入到水体中，进入水体的气体一部分溶解于水中，另一部分上浮到水面. 图像分析法测得的是图 6(a)中气囊的体积，压力毛细管法测得的是图 6(d)中从水中上浮到水面的气体体积. 压力毛细管法认为，毛细管中水体与藻细胞中气体发生了位置交换，水进入了藻细胞，气囊到达了液面以上，因而毛细管液面发生了移动.

由此可见，上述两种方法从不同角度反映了藻类气囊体积分数，图像分析法测得的是藻细胞内固有的气囊体积，而毛细管法测得的是能释放到水体表面的气囊体积.

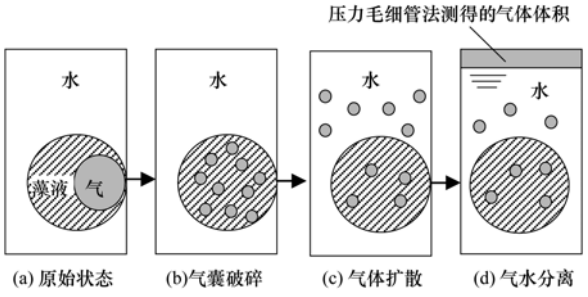

图 6　压力作用后藻细胞气囊破裂与扩散转移

Fig. 6　Transfer and spread of gas in the gas vesicles of algae cells

2.2　压力作用后藻类气囊恢复及上浮特性

(1)不同光照度下藻类上浮特性

加压藻在不同光照度下经过 24 h 培养，藻类都发生了不同程度的上浮，上浮比例如图 7 所示. 从中可见，光照度为 500 lx 时，藻类上浮比例最大，增大或减小光照度均不利于藻类上浮. 沉淀藻类的再上浮受两方面因素控制，一是藻类气囊的重新组装而增加浮力，二是藻细胞光合作用合成淀粉类物质而增加重量. 当光照度较弱时，合成物质较少，重量轻，易上浮. 光照度较强时，合成物质多，重量大，同时渗透压增加，易导致气囊的破裂，因而上浮少. 因此，减小或增大光照度均不利于藻类的上浮，与经典的浮力调节机制是一致的[25].

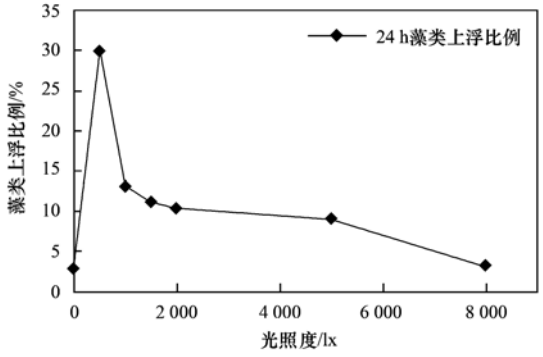

图 7　藻类上浮比例随光照度的变化

Fig. 7　Changes of the algae floating rate as the luminous intensity

(2)不同培养时间后藻类上浮特性

加压藻在不同培养时间后上浮情况如图 8 所示. 从趋势线看,培养 8 h 后藻类发生了上浮,在光照度1 000 lx和2 000 lx时,藻类上浮比例均随着时间的延长呈线性增加,1 000 lx光照度下增加幅度大于2 000 lx光照度,培养 64 h 后上浮比例达到 71%. 而8 000 lx光照度下,藻类基本没有上浮. 这一现象仍然

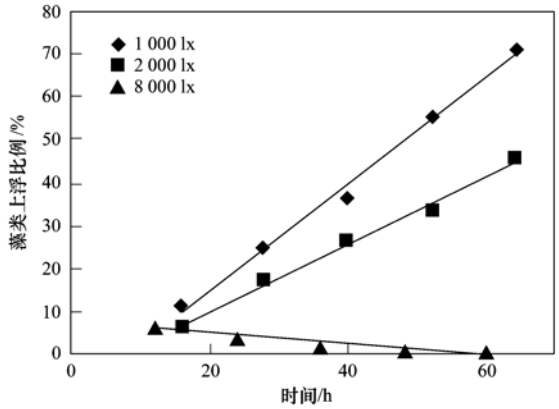

图 8 藻类上浮比例随培养时间的变化

Fig. 8 Changes of the algae floating rate with time

是由于高光照度下光合作用合成大量淀粉物质,增大了藻类的重量,同时渗透压增加,易导致气囊的破裂,不能产生足够的浮力而造成的.

(3)加压藻气囊恢复

对经过 8 ~48 h 培养的加压藻进行细胞切片,结果如图 9 所示,在 0.7 MPa 压力作用下,藻细胞内部的气囊完全破裂,随着培养时间的延长,恢复气囊逐步增多. 经图像分析得到,培养 8、24、48 h 后藻细胞内气囊占加压前气囊总体积比例分别为 31.02%、45.68%、81.05%,气囊的堆叠结构也得到恢复. 加压后蓝藻气囊的消失与再恢复现象可以做如下两种解释,一种是气囊的破裂与再生,传统观点认为,外压超过 0.4 ~0.7 MPa 后气囊就不可逆转地破裂,因而培养后产生的气囊是新生长的. 笔者认为还存在另一种可能,即气囊的泄气与充气过程,加压后由于外压压缩气囊,使气体透过蛋白质壁而进入藻液中,再透过细胞壁扩散到水中,气囊变得空瘪,气囊壁并未破裂,随着藻类光合作用的进行,不断放出氧气进入气囊内部,气囊又如充气的气球变得饱满.

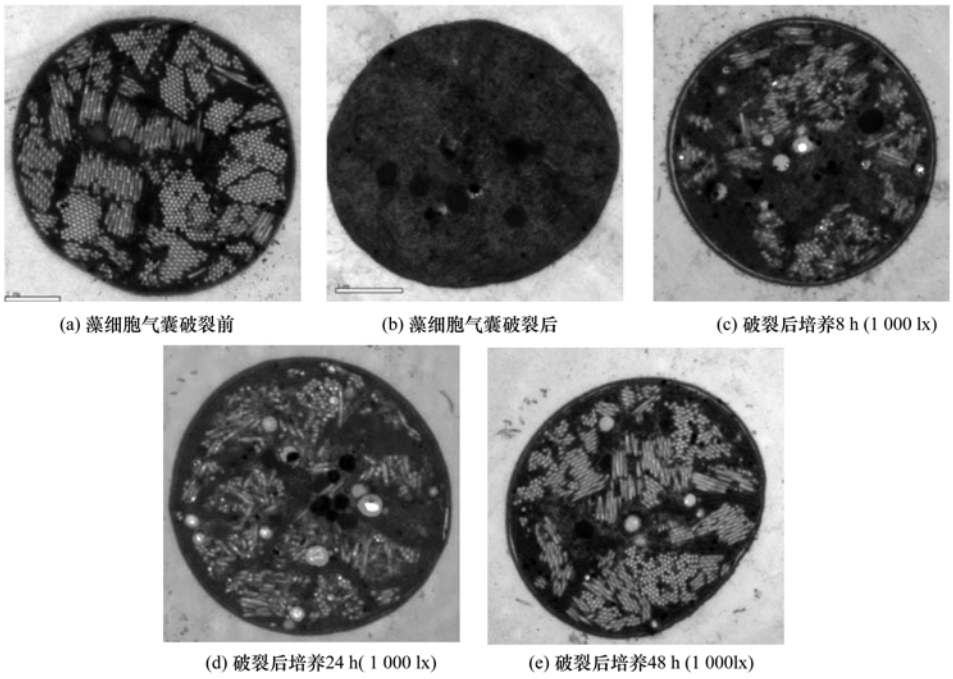

图 9 气囊随着时间再生情况

Fig. 9 Reformation of gas vesicles with time

3 结论

(1)采用透射电镜图像分析法测得太湖蓝藻经 0、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa 加压后,藻细胞内的气囊体积占细胞体积的比例分别为 29.52%、5.73%、4.43%、2.71%、2.46%、2.19%. 传统的压力毛细管法测得的气囊体积比为 10.93%、1.14%、0.90%、0.27%、0.14%、0.04%. 两种测定方法表达了不同内涵的气囊体积,透射电镜图像分析法表达的是藻细胞内气囊总体积,压力毛细管

法表达的是经 1.2 MPa 加压后，破裂气囊气体扩散分离到水面的体积.

(2)加压后失去浮力而下沉的蓝藻，经过 8 h 培养后会重新上浮，且时间越长上浮越多. 在 500 lx 光照度下最容易上浮，8 000 lx 光照度下基本不上浮.

(3)压力作用后藻细胞气囊随着时间逐渐再生，在培养 8、24、48 h 后，藻细胞再生气囊占加压前气囊总体积的比例分别为 31.02%、45.68%、81.05%.

参考文献：

[1] Yang M, Yu J W, Li Z L, *et al*. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes [J]. Science, 2008, **319**(5860): 158.

[2] Reynolds C S, Walsby A E. Water-blooms [J]. Biological Reviews, 1975, **50**: 437-481.

[3] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [J]. Science, 1983, **221**(4611): 669-671.

[4] 吴凯, 李正魁, 冯露露, 等. 水华蓝藻上浮特征与机理的试验研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(1): 137-142.

[5] Robarts R D, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom forming cyanobacteria [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1987, **21**(3): 391-399.

[6] Shapiro J. Current beliefs regarding dominance by blue-greens: the case for the importance of CO_2 and pH [J]. Internationale Vereinigung fuer and Angewandte Limnologie Verhandlungen IVTLAP, 1990, **24**: 38-54.

[7] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京：化学工业出版社, 2001. 5-20.

[8] Konopka A, Kromkmp J, Mur L R. Regulation of gas vesicle content and buoyancy in light-or phosphate-limited cultures of *Aphanizomenon flosaquae* (Cyanophyta) [J]. Journal of Phycology, 1989, **23**(1): 70-78.

[9] 孔繁翔,高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,**25**(3): 589-595.

[10] 张春海, 陈雪初, 李春杰. 光照度对蓝藻垂直迁移特性影响研究[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(5): 64-67.

[11] 黄廷林, 丛海兵, 柴蓓蓓. 饮用水水源水质污染控制[M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2009. 208-209.

[12] 杨波, 储昭升, 潘纲. 蓝藻伪空胞的测定及其前处理方法研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(23): 13914-13917.

[13] Walsby A E. Gas vesicles [J]. Microbiological Reviews, 1994, **58**(1): 94-104.

[14] Bowen C C, Jensen T E. Blue-green algae: fine structure of the gas vacuoles [J]. Science, 1965, **147**(3664): 1460-1462.

[15] 张永生, 孔繁翔, 于洋, 等. 蓝藻伪空胞的特性及浮力调节机制[J]. 生态学报, 2010, **30**(18): 5077-5090.

[16] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. Hydrobiologia, 2000, **438**(1-3): 1-12.

[17] Irene K E, Brunberg A K. The importance of shallow sediments in the recruitment of *Anabaena* and *Aphanizomenon* (Cyanophyceae) [J]. Journal of Phycology, 2004, **40**(5): 831-836.

[18] 储昭升,金相灿,杨波,等. 不同群体形态蓝藻的气囊与光的相互作用研究[J]. 环境科学学报, 2006,**26** (11) :1909-1913.

[19] Walsby A E. The mechanical properties of the *Microcystis* gas vesicle[J]. Journal of General Microbiology, 1991, **137**: 2401-2408.

[20] Kinsman R, Ibelings B W, Walsby A E. Gas vesicle collapse by turgor pressure and its role in buoyancy regulation by *Anabaena flosaquae* [J]. Journal of General Microbiology, 1991, **137**: 1171-1178.

[21] 代然, 储昭升, 于秀娟, 等. 压力下伪空胞破裂对 3 种水华蓝藻生长及光合作用的影响[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(1): 30-35.

[22] 储昭升, 杨波, 金相灿, 等. 6 株蓝藻伪空胞的临界破裂压力研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2695-2699.

[23] Walsby A E, Bleything A. The dimension of cyanobacteria gas vesicles in relation to their efficiency in providing buoyancy and with standing pressure [J]. Journal of General Microbiology, 1998, **134**: 2635-2645.

[24] Walsby A E, Kinsman R, George K I. The measurement of gas vesicle volume and buoyant density in planktonic bacteria [J]. Journal of Microbiological Methods, 1992, **15**(4): 293-309.

[25] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京：科学出版社, 1999. 184-185.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 8

Aug. 15, 2014

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM_{10}) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China ····· LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, *et al.* (2843)

Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou ····· CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)

Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou ····· DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, *et al.* (2857)

Atmospheric CO_2 Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China ····· LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, *et al.* (2864)

Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China ····· SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, *et al.* (2871)

Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin ····· ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, *et al.* (2878)

Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter ····· LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, *et al.* (2883)

Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency ····· SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, *et al.* (2890)

Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process ····· CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, *et al.* (2897)

Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management ····· BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, *et al.* (2903)

Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period ····· ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)

Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing ····· CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, *et al.* (2920)

Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain ····· LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, *et al.* (2928)

Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, *et al.* (2937)

Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China ····· ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, *et al.* (2944)

Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet ····· XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)

Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China ····· LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, *et al.* (2959)

Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China ····· CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, *et al.* (2967)

Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures ····· WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, *et al.* (2974)

Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(Ⅳ)-catalyzed O_3/H_2O_2 Under Acidic Conditions ····· GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, *et al.* (2980)

Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(Ⅱ) and Hg(Ⅱ) in Water by Zero-Valent Iron ····· SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (2985)

Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution ····· FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2992)

Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor ····· BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, *et al.* (3002)

Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration ····· WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, *et al.* (3007)

Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies ····· ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, *et al.* (3012)

Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor ····· LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, *et al.* (3018)

Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane ····· ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, *et al.* (3024)

Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling ····· CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, *et al.* (3031)

Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular ····· LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, *et al.* (3038)

Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB ····· LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)

Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application ····· CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, *et al.* (3052)

Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing ····· DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, *et al.* (3060)

Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China: Sources and Human Exposure and Health Risks ····· ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, *et al.* (3066)

Reponses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China ····· QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, *et al.* (3073)

Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil ····· LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, *et al.* (3083)

Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil ····· HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, *et al.* (3091)

Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil ····· YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)

Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N_2O Emission ····· CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)

Contribution of Different Processes in Wetland Soil N_2O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China ····· SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, *et al.* (3110)

Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH_4 and N_2O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping ····· WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, *et al.* (3120)

Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China ····· YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, *et al.* (3128)

Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize ····· WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, *et al.* (3135)

Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of *Zenia insignis* Chun Seedlings ····· LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, *et al.* (3142)

Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice ····· LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, *et al.* (3149)

Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(Ⅵ) ····· WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, *et al.* (3155)

Promotion Effects of Vitamin B_{12} on the Degradation of 2,4,4′-Trichlorobiphenyl by *Nostoc* PD-2 ····· LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, *et al.* (3162)

Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain *Serratia* sp. ····· XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, *et al.* (3169)

Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake ····· WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, *et al.* (3175)

Cloning of Full-length cDNA of HMGR from *Gobiocypris rarus* and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol ····· DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, *et al.* (3183)

Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 ····· HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, *et al.* (3192)

Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(Ⅱ) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon ····· LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, *et al.* (3198)

Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment ····· CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, *et al.* (3206)

Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD ····· LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, *et al.* (3212)

Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China ····· MA Lan, MAO Jian-su (3219)

Discussion on Reduction Potential of CH_4 Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak ····· WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, *et al.* (3225)

Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China ····· XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, *et al.* (3230)

《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）

2014 年 8 月 15 日　第 35 卷　第 8 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 8　Aug. 15, 2014

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：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行