

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究

孙秀秀, 丛海兵*, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩

(扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127)

摘要: 为了探究混合控藻技术对蓝藻运动分布特性的影响, 实验测定了太湖蓝藻在不同光照度、温度、压力等条件下的上浮/下沉速度. 蓝藻在 1 500 ~ 6 000 lx 光照度范围内均表现出很强的上浮性能, 光照度大于 1 500 lx 时, 上浮速度大于 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的藻颗粒占 58%; 当光照度小于 1 500 lx 或大于 6 000 lx 时上浮速度将减弱. 在 8 ~ 25℃ 环境下, 蓝藻呈上浮运动, 且随着温度的升高, 上浮速度增加. 在 0 ~ 0.1 MPa 压强条件下蓝藻上浮, 且随着压强的增加上浮速度减慢; 当压强达到 0.2 ~ 0.3 MPa 时大部分蓝藻悬浮于水中, 只有少部分上浮或下沉; 当压强达到 0.4 ~ 0.6 MPa 时, 蓝藻明显下沉, 且随着压强的增加下沉速度增大, 0.6 MPa 压强下, 下沉速度大于 $1.0 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的藻颗粒占 52.5%. 当外界压力超过藻细胞气囊所能承受的范围, 气囊开始破裂, 藻细胞的浮力变小直至小于其重力, 导致藻颗粒下沉. 常压下, 藻颗粒粒径越大, 上浮速度越快, 密度越小; 高压下, 藻颗粒粒径越大, 下沉速度越快, 密度越大.

关键词: 蓝藻; 曝气混合; 运动特性; 气囊; 密度

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1781-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.020

Movement Characteristics of *Cyanobacteria* Under Stress of Water-Lifting Aeration

SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, CUI Chao-jie, CAO Qian-qian

(School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In order to study the impact of algae control mixing technology on the distribution characteristics and movement of *Cyanobacteria*, the floating and subsiding velocity of *Cyanobacteria* in Taihu Lake was measured under different conditions such as different illuminance, temperature and pressure. The *Cyanobacteria* showed strong propensity of floating under the illuminance from 1 500 lx to 6 000 lx. The *Cyanobacteria* particle with floating velocity of more than $0.8 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ accounted for 58% under the illuminance of 1 500 lx. The floating velocity slowed down when the illuminance was lower than 1 500 lx or higher than 6 000 lx. In the temperature range of 8 to 25 Celsius degree, the *Cyanobacteria* floated and the floating velocity increased with temperature. The *Cyanobacteria* floated under the pressure of 0-0.1 MPa and the floating velocity slowed down as the pressure increased. Most *Cyanobacteria* were suspended in the water when the pressure reached 0.2-0.3 MPa and only a small part of the *Cyanobacteria* floated or settled. When the pressure reached 0.4-0.6 MPa, the *Cyanobacteria* notably settled and the subsiding velocity increased with the increase of pressure. The *Cyanobacteria* particles with subsiding velocity of more than $1.0 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ accounted for 52.5% when the pressure was 0.6 MPa. Gas vesicles bursted when the gas vesicles of the *Cyanobacteria* could not bear the external pressure. The buoyancy of the *Cyanobacteria* diminished until the floating force became smaller than its weight, causing the particles of the *Cyanobacteria* to settle. Under normal atmospheric pressure, the particle diameter was positively correlated to the floating velocity, while negatively correlated to the density. Under high pressure, the particle diameter was positively correlated to the subsiding velocity and the density.

Key words: *Cyanobacteria*; water-lifting aeration; movement characteristic; gas vesicle; density

蓝藻是水源水体中危害最大的藻种, 其中的微囊藻属是最普遍的代表属^[1~5]. 大多数蓝藻细胞内存在气囊, 为蓝藻提供浮力, 使其悬浮于适宜的水深, 以获得最适宜光照条件而大量繁殖. 蓝藻细胞内气囊为柱状结构, 横断面为六边形, 气囊壁为蛋白质结构, 能透过气体, 不能透过水, 能抵御 400 ~ 700 kPa 的外压, 当外压超出这一压强时气囊就不可逆转地破裂. 蓝藻细胞内的气囊总是在不停地组装和破裂, 表层水体中的蓝藻利用充足的光照合成大量淀粉, 导致细胞体重增加, 且细胞内渗透压增大, 衰老气囊在较大的渗透压作用下破裂, 浮力减小, 当体

重大于浮力时, 蓝藻开始下沉; 随着蓝藻的下沉, 光照度逐步减弱, 合成物质减少, 渗透压减小, 气囊的破裂速度小于气囊的组装速度, 同时由于呼吸作用消耗细胞内储藏物质, 体重减小, 当体重与浮力相等时, 蓝藻悬浮于水中; 当蓝藻体重小于浮力时, 蓝藻开始上浮^[6~9]. 自然条件下, 蓝藻呈现上下少、中间

收稿日期: 2013-09-03; 修订日期: 2013-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178408); 国家科技支撑计划项目(2012BAC04B02)

作者简介: 孙秀秀(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为富营养化水体水质改善, E-mail: 1058010928@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: chb9903@126.com

多的竖向分布,最大藻类数量出现在水体 2~3 倍透明度处^[10,11]. 此外,衰老和死亡的蓝藻重量降低,会一直漂浮在水面形成水华. 湖泊和水库平缓的水流及水体分层特性为蓝藻的悬浮生长提供了良好的水力条件^[12~14]. 可采用空气混合上下水层的方法干扰蓝藻在湖泊水库中的生长环境,目前国内外采用的空气混合技术包括空气羽混合^[15,16]和扬水曝气混合^[17~21]两种,利用压缩空气混合水库上下层水体,将上层水体的蓝藻输送到下层水体,使其在弱光^[22]、低温^[23]、高压等胁迫条件下生长受到抑制. 空气混合控制水体蓝藻过程中,必须有足够大的混合强度,使得向下流动的水流速度大于蓝藻上浮速度,才能将上层藻类带到下层. 本研究的主要目的是探索水体中蓝藻在不同光照度、压力、温度条件下的运动特性,以期空气混合技术抑制蓝藻提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 实验水样

本实验所使用的藻样取自江苏太湖梅梁湾,取样时间为 2011~2013 年的 7、8、9 月,优势藻种为铜绿微囊藻,图 1 为利用显微镜放大 400 倍后看到的水样中的蓝藻. 水样取回后放入有机玻璃培养装置内,并提供光照和慢速搅拌条件进行培养待用.

1.2 实验装置

蓝藻上浮/下沉速度测定装置如图 2 所示,有机玻璃柱上下端封闭,高 3.2 m,直径 150 mm,沿高度每隔 0.5 m 设一个取样口,在柱顶开设进样口与原水箱相连,柱底设放空阀. 柱顶与加压泵出口连接,通过调节加压泵回流管上的阀门开启度调节加压压力,同时有机玻璃柱安装在人工气候室内,室内温度及光照度分别由空调和日光灯控制,水温用冰块调节.

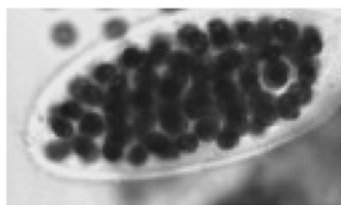


图 1 水样中蓝藻显微图片

Fig. 1 Micrograph of *Cyanobacteria*

1.3 实验方法

1.3.1 蓝藻在光照梯度下的运动特性

控制实验用水样温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,实验光照度分别为: 0、100、800、1 500、3 000、6 000、

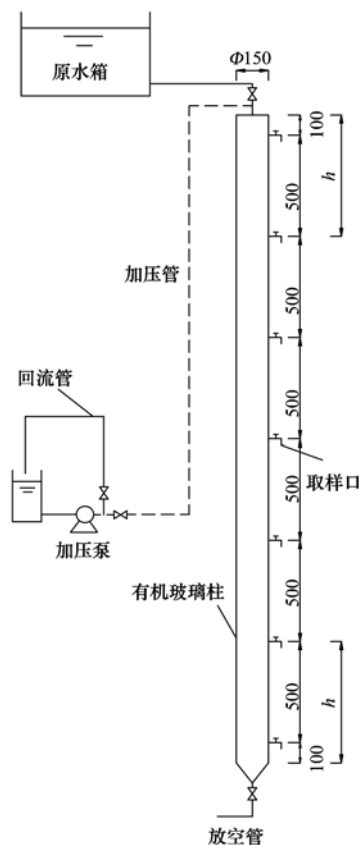


图 2 藻类上浮(下沉)速度测定装置

Fig. 2 Algae floating (subsiding) velocity measuring device

10 000、15 000、25 000 lx,实验压强为常压.

将水样从有机玻璃培养装置中取出放入原水箱中,充分搅拌均匀,取样测定水样初始叶绿素 a 质量浓度 c_0 . 将水样注入有机玻璃柱内,在初始状态,各种上浮速度的藻颗粒在有机玻璃柱内竖向是均匀分布的. 由于水样中蓝藻颗粒的上浮速度有大有小,经过 t 时段静置后,有机玻璃柱内上下层藻类分布出现了明显的差别. 设某一藻颗粒上浮速度为 v ,若它从有机玻璃柱最底端出发,经过 t 时间后,它上浮的距离为 $h = v \cdot t$,则在距离最底端 h 位置处及其以下已测不到该颗粒,而上浮速度小于 v 的藻颗粒仍然能被测到,它们的质量浓度为 c_{ht} ,则上浮速度小于 v ($v = h/t$) 的蓝藻占总量的比例为 c_{ht}/c_0 ,而上浮速度大于 v 的藻类占总量的比例为 $E = 1 - c_{ht}/c_0$.

1.3.2 蓝藻在压力梯度下的运动特性

控制实验用水样温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,实验光照度为 6 000 lx,当注满水时调节加压泵回流管阀门开启度,调节有机玻璃柱内压强分别为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa,其余方法同 1.3.1 节. 测定在不同压强条件下经过 t 时段后有机玻璃柱内各个取样口叶绿素 a 质量浓度 c_{ht} . 设取样口距有机玻

璃柱顶的距离为 h , 可计算出下沉速度大于等于 v ($v = h/t$) 的藻颗粒的比例为 $E = 1 - c_{ht}/c_0$.

1.3.3 蓝藻在温度梯度下的运动特性

空调控制室温, 冰块调节实验用水样温度分别为 25、20、17、8℃, 实验光照度为 6 000 lx, 在常压下进行藻类上浮/沉淀实验, 其余方法同 1.3.1 节. 测定在不同温度条件下经过 t 时段后有机玻璃柱内各个取样口叶绿素 a 质量浓度 c_{ht} .

1.3.4 蓝藻在水深综合条件下的运动特性

为了模拟扬水曝气混合条件下蓝藻被混合到不同水深处, 受到光照度、温度、压力等综合胁迫条件影响下的运动特性, 参考黑河水库不同水深处的光照度、温度和压强条件, 作为本实验水深综合条件, 见表 1.

表 1 水库不同水深综合条件

Table 1 Integrated conditions in different depths of the water			
水深/m	光照度/lx	温度/℃	压强/MPa
0	20 000	25	0
10	150	20	0.1
20	0	18	0.2
30	0	17	0.3
40	0	14	0.4
50	0	8	0.5
60	0	8	0.6

用冰块调节水温, 日光灯调节光照度, 加压泵提供实验所需压强, 其余方法同 1.3.1 节, 测定在不同水深综合条件下原水样叶绿素 a 质量浓度 c_0 、经过 t 时段后有机玻璃柱内各个取样口叶绿素 a 质量浓度 c_{ht} 及蓝藻粒径分布.

1.3.5 测试方法

藻类叶绿素 a 采用分光光度法测定^[24], 丙酮提取时间为 24 h, 测定仪器型号为 UV759S 紫外-可见分光光度计. 各取样口蓝藻粒径的测定采用丹东百特公司生产的 BT-9300ST 激光粒度分布仪. 藻细胞场发射超薄切片透射电镜扫描委托扬州大学测试中心测定, 透射电镜为美国 FEI 公司生产的 Tecnai G2 F30-TWIN 型.

2 结果与讨论

2.1 不同胁迫条件对蓝藻运动特性的影响

2.1.1 光照度对蓝藻运动特性的影响

共进行了 9 种不同光照度下蓝藻运动特性的测定. 经过一定的静置时间, 各取样口水样的叶绿素 a 质量浓度均小于初始值, 且下层质量浓度小于上层, 说明藻类发生了上浮.

绘制不同光照度下蓝藻上浮速度分布曲线, 如图 3 所示. 由于 25 000 lx 光照度下蓝藻上浮趋势不明显, 故在图中未绘出.

根据图 3 绘制不同光照度下蓝藻上浮速度分别大于 0.4、0.8、1.2 cm·min⁻¹ 时所占比例, 见图 4. 从中可知, 蓝藻在光照度 1 500 ~ 6 000 lx 范围内均表现出较强的上浮性能, 光照度为 1 500 lx 时, 上浮速度大于 0.4、0.8、1.2 cm·min⁻¹ 的蓝藻分别占总量的 72.5%、58%、46%; 当光照度小于 1 500 lx 时, 随着光照度的减小, 蓝藻上浮性能逐渐减弱; 当光照度大于 6 000 lx 时, 随着光照度的增大, 蓝藻上浮性能逐渐减弱. 原因是, 在光线很弱时, 蓝藻的生长趋于停滞, 不再组装新的气囊, 而老化的气囊在不断破裂, 使得上浮速度降低; 在光线很强时, 光合作用合成了大量的淀粉储存在细胞内, 增加了藻细胞的重量, 同时, 合成物质增加了胞内渗透压, 加速了气囊的破裂, 浮力减小, 从而使蓝藻上浮速度降低, 当藻颗粒重力与浮力平衡时便不再上浮.

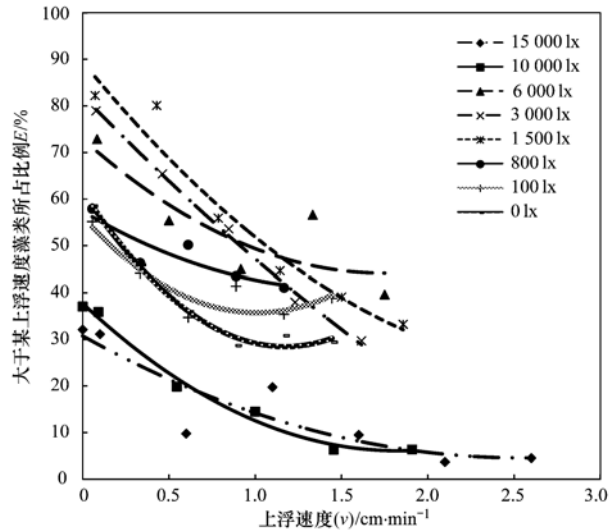


图 3 不同光照度下蓝藻上浮速度分布

Fig. 3 Distribution of the floating velocity of the *Cyanobacteria* under different illuminance

2.1.2 外界压力对蓝藻运动特性的影响

共进行了 7 种不同压强下蓝藻运动特性的测定. 不同压强条件下, 蓝藻表现出不同的运动特性. 在 0、0.1 MPa 两种压强下, 蓝藻明显呈上浮趋势; 0.2 MPa 压强下, 有少量蓝藻漂浮在顶端, 中间各取样口蓝藻质量浓度与初始值差别不大; 0.3 MPa 压强下, 顶端与底端蓝藻质量浓度均增加, 中间各取样口蓝藻质量浓度比初始值稍小, 说明在此压强下部分蓝藻开始下沉, 部分上浮, 而大部分蓝藻既不上浮也不下沉, 悬浮于水中; 当压强达到 0.4 MPa 以上

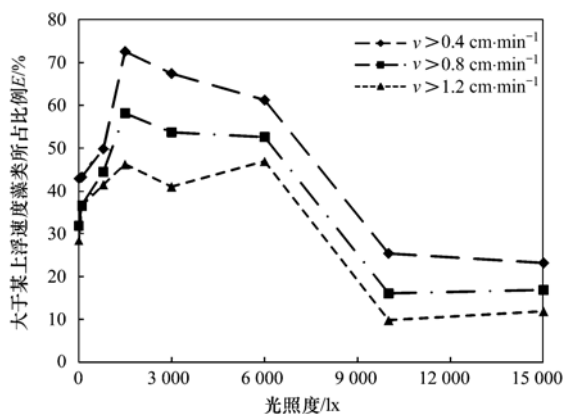


图4 光照度与蓝藻上浮速度关系图

Fig. 4 Relationship of the illuminance and the floating velocity of the *Cyanobacteria*

时,蓝藻表现出很强的沉降性能,顶端蓝藻质量浓度减小,最底端蓝藻质量浓度明显增大. 绘制不同压强下蓝藻运动速度分布曲线,如图5所示. 由于0.2~0.3 MPa 压强下蓝藻上浮/下沉趋势不明显,故未绘制速度曲线. 图6为蓝藻运动速度与压强的关系图,从中可以看出,0~0.1 MPa 下,随着压强的增大,蓝藻上浮速度基本不变;0.4~0.6 MPa 下,随着压强的增大,蓝藻下沉速度增大,压强为0.6 MPa 时,下沉速度大于0.5、1.0、1.5、2.0 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的蓝藻分别占总量的64.5%、52.5%、41.5%、31.4%.

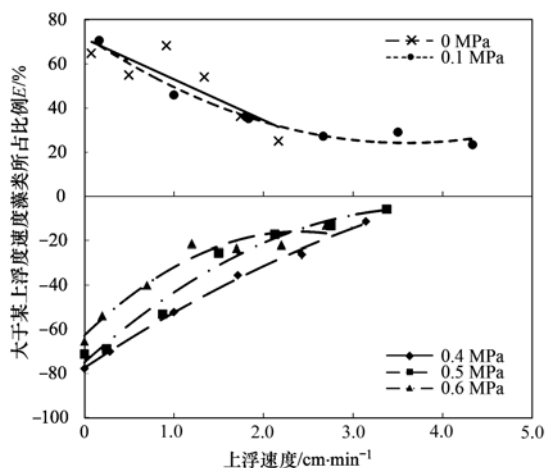


图5 不同压强下蓝藻运动速度分布

Fig. 5 Distribution of the motion velocity of the *Cyanobacteria* under different external pressure

微囊藻细胞内的单个圆柱体气囊能抵抗0.4~0.7 MPa 的外压,当超出“临界压”时,气囊便发生不可逆的破裂. 所以在0~0.3 MPa 压强条件下,大多数气囊都能抵抗这个压强,只有少数老化气囊破裂,虽然蓝藻的上浮速度受到一定的抑制,但绝大部分

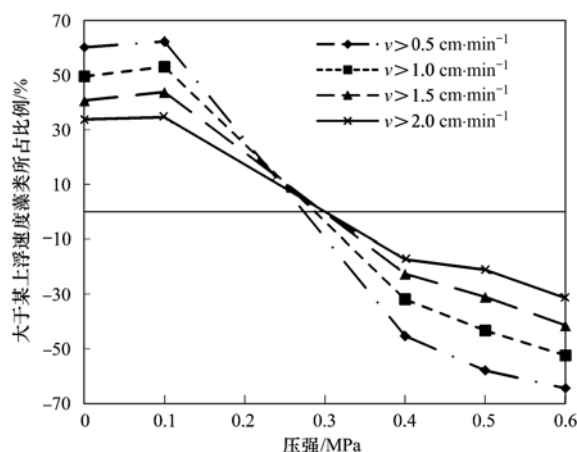
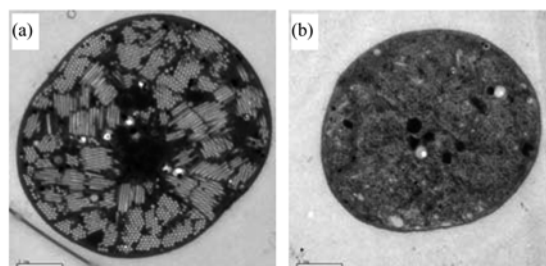


图6 压强与蓝藻运动速度关系

Fig. 6 Relationship of the external pressure and the motion velocity of the *Cyanobacteria*

蓝藻仍然保持上浮运动. 而在0.4~0.6 MPa 的压强条件下,藻细胞内的气囊迅速破裂,浮力迅速减小,藻细胞迅速下沉. 未加压与经0.6 MPa 压强作用后藻细胞内气囊结构变化如图7所示. 未经加压的藻细胞内存在大量的柱状气囊,经0.6 MPa 压强作用后藻细胞内气囊消失,绝大部分气体透过细胞壁外泄,少量残存在藻细胞内,细胞壁完整,细胞壁内充满细胞质,说明藻细胞未破裂.



(a) 未加压藻细胞; (b) 0.6 MPa 加压藻细胞

图7 藻细胞场发射超薄切片电镜扫描

Fig. 7 Algal cell field emission scanning electron microscopy of ultrathin sections

2.1.3 温度对蓝藻运动特性的影响

共进行了4种不同温度下蓝藻运动特性的测定,在4种温度下,蓝藻都是上浮的,各个温度下蓝藻上浮速度分布曲线如图8所示. 图9为蓝藻上浮速度与温度的关系. 随着温度的降低,蓝藻上浮性能有所下降,可能是由于随着温度的降低,藻细胞内气囊体积收缩,浮力减小. 此外,随着水温降低水体黏度增大,从而增加了藻颗粒上浮的阻力.

2.1.4 水深综合胁迫条件对蓝藻运动特性的影响

综合条件下蓝藻运动速度分布如图10所示. 0~30 m 水深条件下,在低压、适宜光照度、高温等

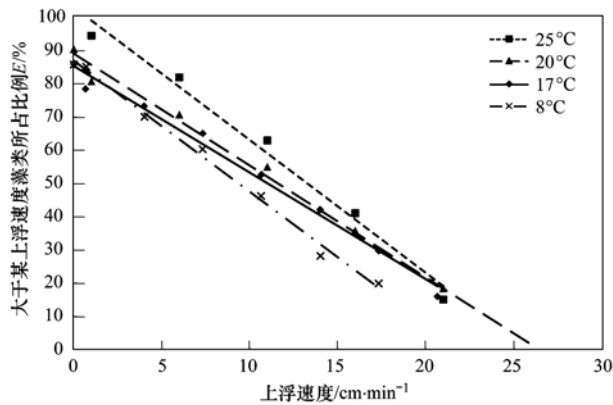


图8 不同温度下蓝藻上浮速度分布

Fig. 8 Distribution of the floating velocity of the *Cyanobacteria* under different temperature

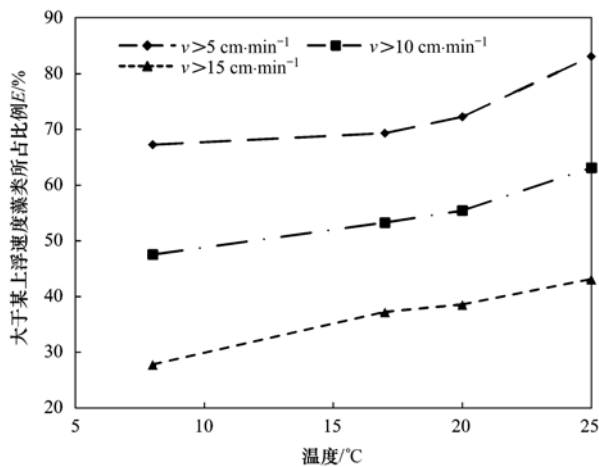


图9 温度与蓝藻上浮速度关系图

Fig. 9 Relationship of the temperature and the floating velocity of the *Cyanobacteria*

有利于蓝藻上浮的因素作用下,蓝藻呈上浮运动状态,且随着水深的增加,其上浮速度变慢;当水深达到 40 m 时,顶端与底端蓝藻质量浓度均增加,中间各取样口蓝藻质量浓度比初始值稍小,说明在此压力下部分蓝藻开始下沉,部分上浮,而大部分蓝藻既不上浮也不下沉,悬浮于水中;当水深达到 50 ~ 60 m 时,在高压、无光、低温等不利于蓝藻上浮的因素作用下,蓝藻表现出下沉运动特性,且随着水深的增加,其下沉速度变大。由于 40 m 水深条件下蓝藻上浮或下沉趋势不明显,故未绘制速度分布。

由于本实验周期较长,2.1.1 ~ 2.1.4 节分别采用的是不同批次的实验原水和蓝藻,而同节实验采用是相同批次的蓝藻。由于不同时期蓝藻生长环境和生理阶段的变化,导致蓝藻的生理特性的差异,因而不同批次实验测得的蓝藻上浮速度有较大差异。但同一实验条件下的藻类是不同的,具有较好的可

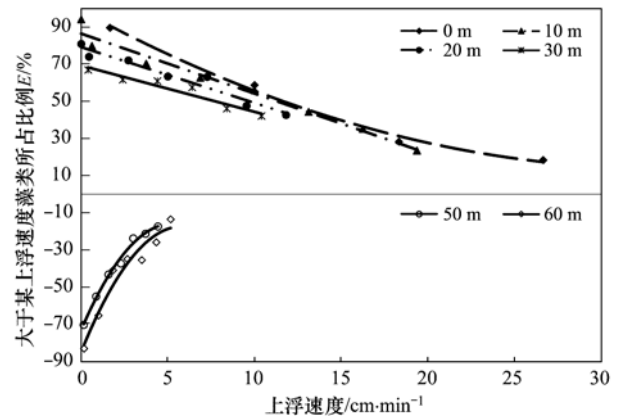


图10 不同水深下蓝藻运动速度分布

Fig. 10 Distribution of the motion velocity of the *Cyanobacteria* in different depth of the water

比性。

2.2 蓝藻颗粒运动速度与粒径的关系

表 2 中列出了综合水深条件下,0 MPa 和 0.6 MPa 两种情况下实验结束时各个取样口蓝藻的峰值粒径和对应运动速度。从中可以看出,粒径大的蓝藻上浮或下沉速度很快,主要是因为藻颗粒粒径越大,其比表面积越小,在水中作上浮或下沉运动时所受到的阻力越小。

2.3 蓝藻颗粒的密度模拟与计算

蓝藻颗粒是由数百个藻细胞通过胶质鞘粘连在一起的团体,就一个藻细胞而言,由细胞壁、原生质体组成。蓝藻细胞壁由内外两层组成,内层主要成分为肽聚糖,薄而坚固,外层为胶质鞘,主要成分为果胶质;蓝藻原生质体的核区有许多裸露的环状 DNA 分子,核区周围的周质中存在光合产物,主要包括蓝藻淀粉 (*Cyanophycean starch*)、脂质颗粒 (*Lipid granule*) 等。蓝藻碳水化合物的密度约为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,核酸的密度约为 $1700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,脂类物质的密度约为 $860 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (只占细胞干重约 10%),因而在无气囊时蓝藻颗粒的密度大于水,在有气囊时蓝藻颗粒的密度小于水^[25]。

直接测定藻细胞和藻颗粒的密度难度较大,本研究从藻颗粒在水中的运动速度的角度,反推藻颗粒的表观密度,采用的方法包括 Fluent 水力模拟和 Stokes 公式计算法。

假设蓝藻颗粒为球形,利用 Fluent 模拟软件模拟粒径为 d 、上浮速度为 v 藻颗粒的密度 ρ 的方法是,设一段垂直的水流通道,在初始状态,藻颗粒均匀分布于水流通道中。此后,不含藻的水流自上向下恒定流动,流动速度为 v 。在 Fluent 模

拟过程中,只设定固相(藻颗粒)的密度 ρ 和粒径 d ,而不能设定颗粒的速度,采用两相流二维模型模拟稳态运行后流道中藻类的分布.若设定的藻颗粒密度较大,藻类将随水流向下流动,稳定运行后流道中将不再有藻颗粒,反之亦然.不断改变藻颗粒密度 ρ 值,直到运行后藻颗粒仍然均匀分布于流道中,说明密度为 ρ 和粒径为 d 的藻颗粒上浮速度刚好为 v ,与自上向下的水流速度 v 相抵消,藻颗粒没有发生竖向位移.此时的密度 ρ 值即为藻颗粒的密度.

采用相似的方法,设定流道中水流自下向上,可以模拟粒径为 d 、下沉速度为 v 藻颗粒的密度 ρ .模拟计算的结果如表2所示.

按照 Stokes 公式,藻颗粒的运动速度与密度的

关系为:

$$v=\frac{1}{18}\frac{\rho-\rho_s}{\mu}gd^2$$

由此可推算上浮藻类的密度为:

$$\rho_s=\rho-\frac{18\mu\cdot v}{gd^2}$$

下沉藻类的密度为:

$$\rho_s=\rho+\frac{18\times9.8\mu\cdot v}{gd^2}$$

式中, ρ 为水的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_s 为藻颗粒的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; μ 为水的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

利用 Stokes 公式计算的藻颗粒密度如表2所示.从中可见,采用 Fluent 模拟软件模拟的藻颗粒密度与 Stokes 公式计算值接近.

表2 不同取样口藻类峰值粒径及藻密度
Table 2 Peak value of algae diameter and its density

取样口距柱底高度 /cm	0 MPa				0.6 MPa			
	峰值粒径 / μm	上浮速度 / $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	Fluent 模拟密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Stokes 计算密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	峰值粒径 / μm	下沉速度 / $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	Fluent 模拟密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Stokes 计算密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
原水	562.4	— ¹⁾	—	—	238.5	—	—	—
顶部	538.7	—	—	—	无藻	—	—	—
310	262.7	38.75	790.40	825.97	71.87	0.17	1 008.30	1 008.30
260	229.9	32.50	779.09	809.59	175.2	1.00	1 008.19	1 008.19
210	248	26.25	848.09	867.29	183.8	1.83	1 014.78	1 014.82
160	263.6	20.00	899.01	909.91	185.3	2.67	1 022.00	1 022.05
110	269.2	13.75	935.01	940	185.2	3.50	1 029.50	1 029.50
60	262.8	7.50	963.35	964.89	185	4.33	1 037.01	1 037.01
10	192.2	1.25	987.70	987.82	192.5	5.17	1 040.99	1 040.99
底部	无藻	—	—	—	248.4	—	—	—

1) “—”表示超出实验范畴,无法得出相关数据

通过 Stokes 公式计算与 Fluent 模拟两种方法得出的蓝藻密度值显示,常压下,大颗粒蓝藻很快漂浮到顶部,蓝藻粒径越大,上浮速度越快,密度越轻;高压下,大颗粒蓝藻很快沉淀到底部,蓝藻粒径越大,下沉速度越快,密度越大.

3 结论

(1)蓝藻在光照度1 500~6 000 lx 范围内均表现出很强的上浮性能,光照度为1 500 lx 时,上浮速度大于0.4、0.8、1.2 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的蓝藻分别占总量的72.5%、58%、46%;当光照度小于1 500 lx 时,随着光照度的减弱,蓝藻上浮性能逐渐减弱;当光照度大于6 000 lx 时,随着光照度的增大,蓝藻上浮性能逐渐减弱.

(2)在8~25℃环境下,蓝藻呈上浮运动,且随着温度的升高,上浮速度增加.

(3)随着压强的增大,蓝藻由上浮转变为下沉.0~0.1 MPa 压强条件下蓝藻上浮,0.2~0.3 MPa 压强时大部分蓝藻悬浮于水中,只有少部分上浮或下沉;压强0.4~0.6 MPa 时,蓝藻明显下沉,且随着压强的增加下沉速度加快,压强为0.6 MPa 时,下沉速度大于0.5、1.0、1.5、2.0 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的蓝藻分别占总量的64.5%、52.5%、41.5%、31.4%.常压下,蓝藻粒径越大,上浮速度越快,密度越轻;高压下,蓝藻细胞内气囊破裂,浮力减小,蓝藻粒径越大,下沉速度越快.

(4)下层水体中压力高、温度低、无光照,蓝藻上浮受到抑制,甚至下沉,利用混合技术将蓝藻混合到下层水体中,有利于控制蓝藻水华.

参考文献:

[1] 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. 208-309.

- [2] 吴宇. 富营养化: 中国湖泊面临的治理难题[J]. 生态经济, 2008, (9): 14-19.
- [3] 彭芳, 黄廷林, 张延凤, 等. 水源水库中藻类生长及分布特征[J]. 供水技术, 2009, 3(1): 1-4.
- [4] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 21-26.
- [5] 刘昂俊, 余华章, 赵孟绪, 等. 汤溪水库富营养化特征与水质管理对策[J]. 生态科学, 2006, 25(3): 193-197.
- [6] 成慧敏, 邱保胜. 蓝藻的伪空泡及其对蓝藻在水体中垂直分布的调节[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(5): 974-980.
- [7] 张海春, 陈初雪, 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.
- [8] 唐忠波. 蓝藻垂直迁移及沉积物氮磷释放对其浮力调节影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008. 5-18.
- [9] 黄钰铃, 朱纯, 周召红, 等. 不同光照下微囊藻垂直迁移模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 21-25.
- [10] 周真明, 黄廷林, 丛海兵. 于桥水库中铜绿微囊藻生长特性与上浮性能试验研究[J]. 供水技术, 2007, 1(2): 14-17.
- [11] 段婷婷. 水源水中藻类监测及水质变化原因分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009. 35-36.
- [12] 田泽斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季蓝藻水华成因研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2083-2089.
- [13] 李凤彬. 洋河水库热成层对水质的影响[J]. 给水排水, 1999, 25(9): 19-21.
- [14] 王晓东, 陈雪初, 黄莹莹, 等. 泽雅水库热成层形成过程及其对水体溶解氧的影响[J]. 给水排水, 2008, 34(3): 37-38.
- [15] Visser P M, Ketelaars H A M, Mur L R. Reduced growth of the *Cyanobacterium microcystis* in an artificially mixed lake and reservoir [J]. Water Science and Technology, 1995, 32(4): 53-54.
- [16] Simmons J. Algal control and destratification at Hanningfield Reservoir [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(2): 309-316.
- [17] 丛海兵, 黄廷林, 赵建伟, 等. 扬水曝气技术在水源水质改善中的应用[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(3): 215-218.
- [18] 丛海兵, 黄廷林, 周真明. 于桥水库铜绿微囊藻上浮运动规律及其控制[J]. 给水排水, 2009, 35(11): 140-145.
- [19] 马越, 黄廷林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用[J]. 给水排水, 2012, 38(4): 7-12.
- [20] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 水体修复装置——扬水曝气器的开发[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 41-45.
- [21] 丛海兵. 扬水曝气水源水质改善技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007. 37-78.
- [22] 陈雪初, 孙扬才, 张海春, 等. 遮光法控藻的中试研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1830-1834.
- [23] 金相灿, 储昭升, 杨波, 等. 温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 50-55.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 670-671.
- [25] 刘健康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 1-197.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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