

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第11期 Vol.34 No.11 **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 11 期      2014 年 6 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

土壤大孔隙流研究现状与发展趋势..... 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等 (2801)

### 能源基地生态修复

我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述..... 吴 钢,魏 东,周政达,等 (2812)

国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例.....

..... 魏 东,全 元,王辰星,等 (2821)

基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系 ..... 周政达,王辰星,付 晓,等 (2830)

西部干旱区煤炭开采环境影响研究..... 雷少刚,卞正富 (2837)

露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例..... 高 雅,陆兆华,魏振宽,等 (2844)

草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例.....

..... 康萨如拉,牛建明,张 庆,等 (2855)

三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价 ..... 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等 (2868)

某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究..... 刘 庚,毕如田,权 腾,等 (2876)

### 个体与基础生态

杉木人工混交林对土壤铝毒害的缓解作用 ..... 雷 波,刘 彬,罗承德,等 (2884)

基于  $\delta^{15}\text{N}$  稳定同位素分析的人工防护林大型土壤动物营养级研究 ..... 张淑花,张雪萍 (2892)

铅镉抗性菌株 JB11 强化植物对污染土壤中铅镉的吸收 ..... 金忠民,沙 伟,刘丽杰,等 (2900)

陕北地区石油污染土壤中不动杆菌属的筛选、鉴定及降解性能 ..... 王 虎,吴玲玲,周立辉,等 (2907)

祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性..... 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等 (2916)

新疆沙冬青 AM 和 DSE 真菌的空间分布 ..... 姜 桥,贺学礼,陈伟燕,等 (2929)

聚糠茶水剂对不同积温带玉米花后叶片氮同化的影响..... 高 娇,董志强,徐田军,等 (2938)

内蒙古河套灌区玉米与向日葵霜冻的关键温度..... 王海梅,侯 琼,云文丽,等 (2948)

四种类型栓皮栎栲胶含量..... 尹艺凝,张文辉,何景峰,等 (2954)

食物胁迫对翅二型丽斗蟋飞行肌和繁殖发育的影响..... 吴红军,赵吕权,曾 杨,等 (2963)

颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响..... 杨小凡,马春森,范 凡,等 (2971)

缓释单萜类挥发物对落叶松毛虫行为及落叶松主要防御蛋白的影响..... 林 健,刘文波,孟昭军,等 (2978)

### 种群、群落和生态系统

黄土丘陵沟壑区不同植被恢复格局下土壤微生物群落结构 ..... 胡婵娟,郭 雷,刘国华 (2986)

刺参池塘底质微生物群落功能多样性的季节变化..... 闫法军,田相利,董双林,等 (2996)

基于 DGGE 技术的茯砖茶发花过程细菌群变化分析 ..... 刘石泉,胡治远,赵运林 (3007)

景观、区域和全球生态

中国区域间隐含碳排放转移..... 刘红光,范晓梅 (3016)

西南地区退耕还林工程主要林分 50 年碳汇潜力 ..... 姚 平,陈先刚,周永锋,等 (3025)

青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征..... 李广泳,李小雁,赵国琴,等 (3038)

黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算..... 魏书精,罗碧珍,孙 龙,等 (3048)

三峡库区森林植被气候生产力模拟..... 潘 磊,肖文发,唐万鹏,等 (3064)

三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制..... 朱爱民,李嗣新,胡 俊,等 (3071)

流域库坝工程开发的生物多样性敏感度分区..... 李亦秋,鲁春霞,邓 欧,等 (3081)

城乡与社会生态

基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价..... 檀菲菲,张 萌,李浩然,等 (3090)

江西省自然保护区发展布局空缺分析 ..... 黄志强,陆 林,戴年华,等 (3099)

鄱阳湖生态经济区生态经济指数评价 ..... 黄和平,彭小琳 ,孔凡斌,等 (3107)

基于有害干扰的中国省域森林生态安全评价..... 刘心竹,米 锋,张 爽,等 (3115)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 328 \* zh \* P \* ￥90.00 \* 1510 \* 35 \* 2014-06



**封面图说：**三峡库区森林植被——三峡地区属亚热带区域,山高坡陡、地形复杂、物种丰富,森林是其最重要的自然资源之一,其面积占到库区总面积的 37%左右,库区内现有森林可初步分为 2 个植被型组,8 个植被型,18 个群系组,44 个群系,102 个群丛,主要树种有马尾松、杉树、柏树等,低海拔处多为落叶阔叶林、常绿阔叶林,较高海拔分布有针阔混交林、针叶混交林、灌木林等,人工林主要有经济林、竹林等。对三峡库区森林气候生产力进行模拟,分析库区森林植被的生产力并进行预测,可以为三峡库区的生态建设决策提供科学依据。

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/stxb201304090646

朱爱民, 李嗣新, 胡俊, 周连凤, 郑志伟, 赵先富, 董方勇. 三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制. 生态学报, 2014, 34(11): 3071-3080.

Zhu A M, Li S X, Hu J, Zhou L F, Zheng Z W, Zhao X F, Dong F Y. The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 3071-3080.

## 三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制

朱爱民, 李嗣新, 胡俊, 周连凤, 郑志伟, 赵先富, 董方勇\*

(水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 三峡水库支流的拟多甲藻水华发生已成为近年的常态, 但是其发生机制依然不清楚。2009 年到 2011 年期间, 对拟多甲藻水华频发的童庄河回水区进行重点监测, 并扩展到三峡水库长江干流及 26 条支流未淹没区和回水区浮游植物的四季调查。结果表明, 四季调查中, 拟多甲藻出现率、平均密度、最大密度和最大优势度, 4 月最高, 相同季节, 回水区最高。2—4 月, 童庄河回水区各点拟多甲藻密度均为升高到下降变化, 最高密度自上游至下游大幅下降。2010 年, 拟多甲藻水华于 2 月最先在童庄河回水区上游出现, 逐步向中下游发展, 维持一定规模和时间后消退。与此同时, 长江干流拟多甲藻出现率、密度和最大优势度大幅低于童庄河回水区。童庄河回水区发生 (2005 年、2007 年和 2010 年) 比不发生 (2009 年) 拟多甲藻水华年份, 三峡水库 1—3 月日出库流量 (平均值 4489.9—5623.3 m<sup>3</sup>/s) 较小, 1—2 月水位日变幅 (平均值 0.148 m、0.246 m) 和 2 月水位日升降 (平均值 -0.223 m) 较大。研究认为, 藻类在适宜水温时形成水华, 2—4 月支流回水区水温适宜、氮磷含量满足甲藻营养能力和生活习性需要。拟多甲藻能否形成水华, 首先取决于回水区上游是否存在满足要求的水动力条件。其次, 三峡水库出库流量、水位波动等水文条件, 通过改变回水区上游水动力条件和回水区流速, 影响水华能否形成及形成时间、程度、范围和维持时间。由于尺度效应不同, 三峡水库相同水文条件对不同位置支流拟多甲藻水华形成的影响不一样。

**关键词:** 三峡水库; 支流; 拟多甲藻; 水华; 形成机制; 浮游植物

## The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir

ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, ZHOU Lianfeng, ZHENG Zhiwei, ZHAO Xianfu, DONG Fangyong\*

Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Recent occurrence of *Peridiniopsis* blooms has become a routine phenomenon in the tributaries of the Three Gorges Reservoir, however the mechanism under them is still unknown. In the present study, ecological surveys on phytoplankton were intensively performed in the *Peridiniopsis* blooms occurring Tongzhuang River, then extending to the main stem of the Yangtze River and 26 tributaries in Three Gorges Reservoir during 2009 to 2011. The results showed that the occurring frequency, average and maximum densities, and maximum dominance of *Peridiniopsis* sp. were highest in backwater areas of the tributaries in April. During February to April, the density of *Peridiniopsis* sp. had a pattern with initial increase and later decreased at each sites in backwater area of Tongzhuang River, and the highest density of *Peridiniopsis* sp. dramatically decreased from the upstream to the downstream. In 2010, *Peridiniopsis* bloom firstly occurred in the upstream of backwater area of Tongzhuang River in February, gradually developed into the downstream, and disappeared after a long duration. The occurring frequency, density, and maximum dominance of *Peridiniopsis* sp. in main

**基金项目:** 湖北省自然科学基金重点项目 (2008CDA092); 水利部经常性专项业务费项目 (1261120242002); 国家自然科学基金项目 (31000188, 51279113); 国家重大水专项 (2009ZX07528-003)

**收稿日期:** 2013-04-09; **修订日期:** 2014-02-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dfy@mail.ihe.ac.cn



stem of Yangtze River were far lower than those in backwater area of Tongzhuang River on the same seasons. Compared with the year without occurrence of *Peridiniopsis* bloom, the years with *Peridiniopsis* blooms were characterized with lower daily water discharge out of the Three Gorge Reservoir (average values range from 4489.9 to 5623.3 m<sup>3</sup>/s) from January to March, and with higher daily water level amplitude in January (average value is 0.148 m) and February (average value is 0.246 m) and daily water level lift (average value is -0.223 m). The results demonstrated that water temperature in backwater area of tributaries from February to April was optimal to the occurrence of the *Peridiniopsis* blooms, indicating the importance of water temperature triggering the blooms. The nitrogen and phosphorus levels were shown to meet the capability of nutrient and life habit of *Peridiniopsis* sp.. It was concluded that formation of *Peridiniopsis* blooms in the Three Gorges Reservoir should depend on the following conditions: hydrodynamic conditions in upstream of backwater area, hydrological conditions such as water discharge out of Three Gorges Reservoir and water level variation by changing flow rates in backwater area and hydrodynamic conditions in its upstream to influence the occurrence, timing, extent, scale and duration time of the blooms. Due to the effects by the different scales, the influence of same hydrological conditions of the Three Gorges Reservoir on occurrence of *Peridiniopsis* blooms at different sites were not the same.

**Key Words:** Three Gorges Reservoir; tributary; *Peridiniopsis* sp.; blooms; mechanisms; phytoplankton

三峡水库长江沿岸主要的一级支流有 40 条,流域面积 90.6—157900.0 km<sup>2</sup>、库区境内长 11.9—218.0 km、年均流量 1.3—2120.0 m<sup>3</sup>/s,距三峡大坝 1.0—654.0 km<sup>[1]</sup>。175 m 正常蓄水位,从上游至下游,水位升高 3—100 余米,长江干流回水末端到达重庆,支流河口以上形成数千米到数十千米的回水区。干支流水面变宽、水流减缓、泥沙含量降低<sup>[1]</sup>。由于流速改变不同,长江干流为河流型或过渡型水体,支流回水区为湖泊型水体<sup>[2]</sup>,成为三峡水库库湾,在枯水期更适合甲藻生长<sup>[3]</sup>。虽然各支流位置、大小和回水区长度不同,但拟多甲藻(*Peridiniopsis* sp.)水华在支流回水区中发生范围最广、持续时间最久<sup>[4]</sup>。据不完全统计和作者调查,库区至少有 15 条支流回水区发生了该藻类水华,一些支流发生频率较高<sup>[4-5]</sup>。除三峡水库支流外,我国云南、广东、福建等地水库<sup>[6-8]</sup>和武汉东湖<sup>[9]</sup>也发生了甲藻水华。日本在 1970 年代已有水库发生甲藻水华<sup>[10]</sup>,法国、匈牙利、巴西、韩国、美国、澳大利亚、阿根廷和以色列也有水库、河流、湖泊出现甲藻水华<sup>[11-16]</sup>。

有关淡水甲藻水华的研究,主要包括水体理化<sup>[6,8-9,12,14,17]</sup>、水文气象<sup>[9,14]</sup>、浮游植物、原生动物和浮游细菌群落多样性及丰度<sup>[17-18]</sup>与甲藻种群变化,水华形成的细胞集聚机制及数学模拟<sup>[10,19]</sup>,水体热分层对甲藻水华发展和消失影响<sup>[15]</sup>,甲藻的分布和迁移<sup>[20]</sup>,甲藻摄食<sup>[21]</sup>,色素对不同光强的反应<sup>[22]</sup>和拟多甲藻毒性<sup>[4,6]</sup>等。由于水华发生具有不确定性,

在水库甲藻水华出现前一段时间内,甲藻种群变化与相关因子关系研究还未见报道。为此作者在三峡水库常发拟多甲藻水华的童庄河回水区,在水华出现前一段时间,对拟多甲藻及相关因子进行了 2a 跟踪监测,并对三峡水库长江干流及其 26 条主要支流未淹没区和回水区浮游植物进行了四季调查,试图揭示三峡水库支流拟多甲藻水华形成机制,为防治三峡水库支流拟多甲藻水华提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点及采样时间

童庄河位于湖北省秭归县境内,为三峡水库长江一级支流,河口距三峡大坝 42.0 km,全长 36.6 km,流域面积 248 km<sup>2</sup>,多年平均流量 6.4 m<sup>3</sup>/s<sup>[1]</sup>。根据童庄河回水区河道形态、比降变化,结合三峡水库运行典型水位,在 172 m 尾水下设 I 点,145 m 尾水以下依次设 II 点、III 点和 IV 点,在距河口约 1 km 处的长江干流上游设 V 点(图 1)。2009 年 2 月 8 日—4 月 1 日每 3—6 d、6 月 20 日、12 月 30 日和 2010 年 2 月 26 日、3 月 5 日、3 月 17 日、3 月 28 日、4 月 13 日、5 月 6 日、6 月 8 日同步采集浮游植物和氮磷分析样品。

在三峡水库长江干流江段,从上游重庆朱沱至下游坝前银杏沱设 13 个断面,每个断面设左中右 2—3 个采样点。在三峡水库 26 条一级支流未淹没区(175 m 以上主河道)设 1—3 个采样点,共 65 个

采样点,回水区(175 m 淹没河段)设 2—6 个采样点,共 68 个采样点(图 1)。于 2010 年 4 月、10 月和

2011 年 1 月、6 月进行了四个季度的调查。

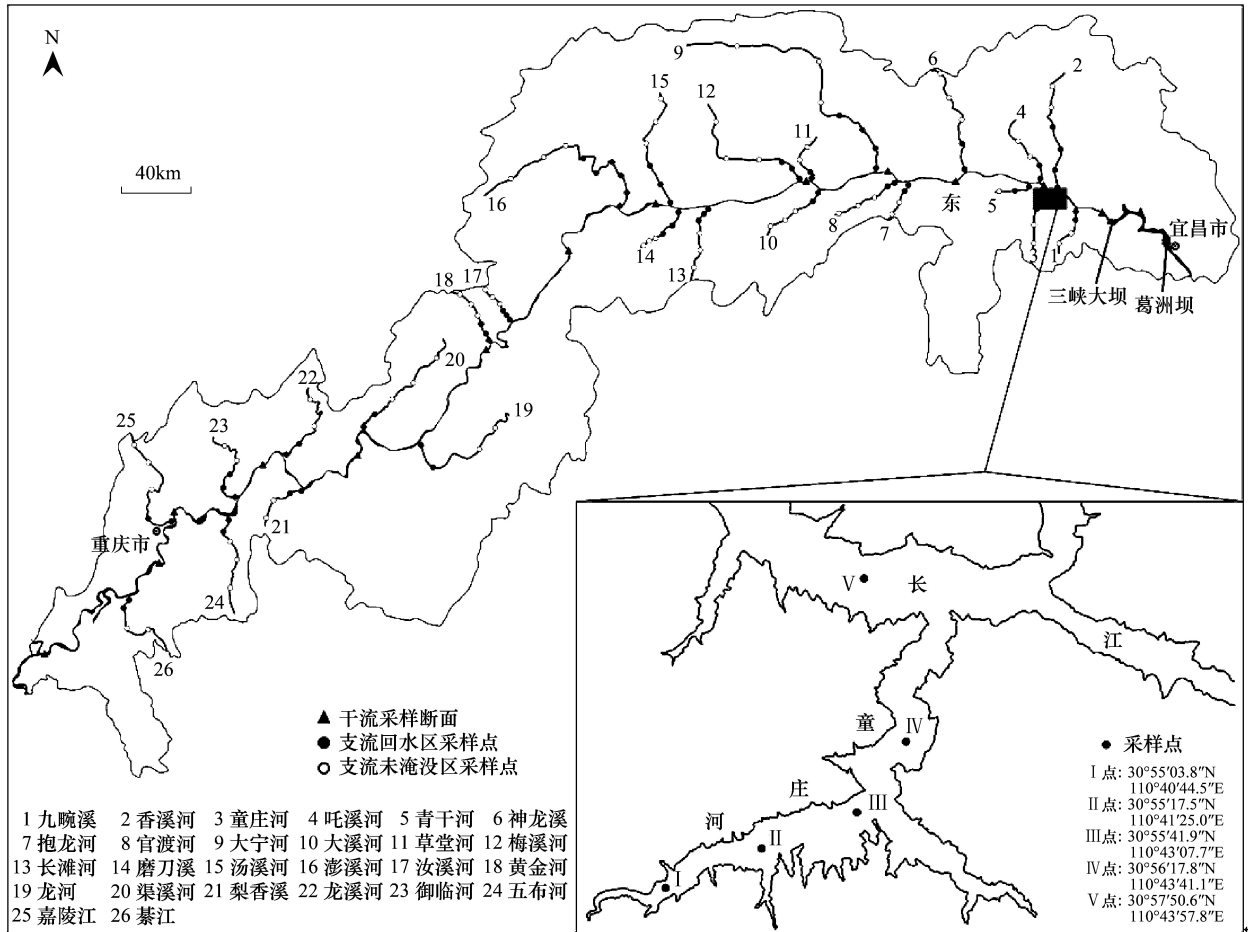


图 1 三峡水库长江干流及其支流和童庄河回水区采样点位置示意图

Fig.1 Geographical distribution of sampling sites in Three Gorges Reservoir and its tributaries, and backwater area of Tongzhuang River

### 1.2 样品采集与分析方法

童庄河等 26 条支流回水区和长江干流浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网在水面下作“∞”捞取,定量样品用 2.5 L 采水器分别在表层、1 m、3 m 和 5 m 等量取水,取 1 L 混合水样。未淹没区定性样品通常用 25 号浮游生物网在水中将网口对水流方向捞取,直接在水中取 1 L 定量样品。在水体较大、较深、流速较缓的地方,采用回水区方法采集。样品现场加鲁哥氏液固定<sup>[23]</sup>。定性样品于光学显微镜下 10×40 倍观察,鉴定种类<sup>[24]</sup>。定量样品在室内沉淀 24 h,浓缩至 30 mL,取 0.1 mL 于 0.1 mL 计数框内进行视野法计数并鉴定种类,根据计数结果,计算拟多甲藻及其它浮游植物种类细胞密度<sup>[23-24]</sup>。氮磷分析样品与浮游植物定量样品一同采集,现场处理后室内测定<sup>[25]</sup>。用温度计现场同步测定水温。

从中国长江三峡集团公司网站获得三峡水库 2005 年、2007 年、2009 年和 2010 年 1—3 月每日分时刻水位、出库及入库流量数据。

采用 Origin6.0 检验数据的差异性,用 SPSS21.0 分别对拟多甲藻密度与营养盐浓度、水文因子进行多元线性逐步回归,即分别把每一个变量都选入模型中,每次保留系数显著水平最高的变量,剔除不显著的变量,通过多次选入和剔除,最终得到系数显著的回归方程,得到影响拟多甲藻密度的营养盐和水文因子。

## 2 结果

### 2.1 三峡水库长江干流及支流拟多甲藻种群时空变化

四季调查,共有 23 条(88.46%)支流未淹没区、

26 条(100%)支流回水区和 11 个(84.62%)长江干流断面检测到拟多甲藻。拟多甲藻出现率,4 月最高,回水区为 84.62%、未淹没区为 69.23%、长江干流为 61.54%。1 月最低,回水区为 50.00%、未淹没区为 23.08%、长江干流为 15.38%。6 月和 10 月出现率(除回水区 6 月与 4 月相同外)在 1 月和 4 月之间。相同季节,回水区出现率最高,未淹没区除 6 月低于长江干流外,其它季节均高于长江干流。

拟多甲藻平均密度和最大密度,相同季节,回水区最高、未淹没区其次、长江干流最低。不同季节,4 月为高峰,回水区和长江干流 1 月、未淹没区 10 月为低谷(图 2)。4 月,拟多甲藻在磨刀溪、梅溪河和神农溪回水区上游形成水华,密度分别为  $230.0 \times$

$10^4$ 、 $382.1 \times 10^4$ 、 $945.6 \times 10^4$  个/L,大幅高于回水区中下游(分别为  $0.2 \times 10^4$ 、 $0.3 \times 10^4$ 、 $0.2 \times 10^4$  个/L)。

拟多甲藻优势度(细胞密度占浮游植物总密度比例),最大值均在 4 月,且回水区最高、未淹没区其次、长江干流最低(图 2)。按优势度高低,有 10 条支流回水区(1 月 3 条、4 月 6 条、6 月 1 条)为第一优势种类(22.94%—96.18%)、4 条支流回水区(6 月、10 月各 2 条)为第二优势种类(20.94%—32.62%),其余优势度不超过 17.65%。仅有 3 条支流未淹没区在 4 月为第一优势种类(20.51%—33.86%),其余优势度不超过 17.24%。长江干流各断面四季优势度不超过 11.43%(图 2)。

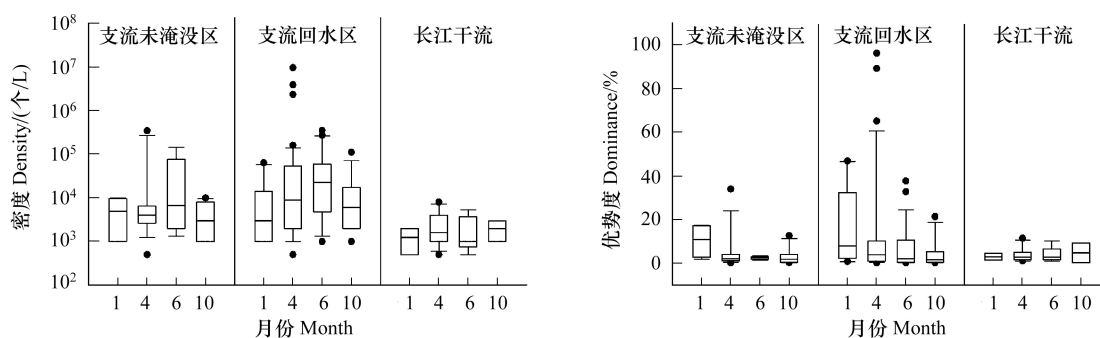


图 2 三峡水库长江干流及支流拟多甲藻密度及其优势度的时空变化

Fig. 2 Temporal and spatial variations of *Peridiniopsis* sp. density and dominance in main stem of Yangtze River and its tributaries in Three Gorges Reservoir

## 2.2 童庄河回水区拟多甲藻种群及其水华时空变化

2009 年,各点拟多甲藻密度呈波动升高、达到高峰后迅速下降的变化(图 3)。2 月 8 日各点均未检出,2 月 14 日各点出现少量的拟多甲藻,随着时间推移,拟多甲藻密度呈波动上升,3 月 22 日Ⅲ点和Ⅳ点、3 月 25 日Ⅰ点和Ⅱ点分别达到高峰,之后密度急剧下降,4 月 1 日,除Ⅲ点出现少量的拟多甲藻外,其它各点均未检出。6 月 30 日和 12 月 30 日,各点均未检出。拟多甲藻最高优势度在 3 月 25 日Ⅰ点,为 51.72%。

2010 年 2 月 26 日,Ⅰ点拟多甲藻密度首先出现高峰,然后以数量级的幅度急剧下降,到 3 月 28 日降到最低(4 月 13 日三峡水库水位降至该点以下)。Ⅱ点、Ⅲ点和Ⅳ点拟多甲藻密度呈升高到下降的变化,3 月 17 日Ⅲ点、3 月 28 日Ⅱ点和Ⅳ点分别达到高峰,之后大幅下降,到 4 月 13 日只有Ⅳ点出现少量拟多甲藻,Ⅱ点和Ⅲ点未检出。5 月 6 日和 6 月 8

日,拟多甲藻虽有所出现,但密度为该点的最低或次低水平(图 3)。拟多甲藻最高优势度在 3 月 5 日Ⅰ点,为 98.70%。

2009 年和 2010 年拟多甲藻最高密度均在上游(Ⅰ点),自上游(Ⅰ点)至下游(Ⅳ点)大幅下降。2009 年拟多甲藻最高密度从Ⅰ点到Ⅳ点依次大幅降低,2010 年Ⅰ点最高密度比其他各点最高密度高一个数量级(图 3)。

现场观察,2009 年未出现水华。2010 年 2 月 26 日Ⅰ点最早出现严重的拟多甲藻水华(细胞密度  $1599.3 \times 10^4$  个/L),持续到 3 月 17 日( $63.7 \times 10^4$  个/L)。3 月 5 日Ⅱ点开始出现水华( $85.1 \times 10^4$  个/L),持续至 3 月 28 日( $158.2 \times 10^4$  个/L)。3 月 17 日Ⅲ点和Ⅳ点开始出现水华( $200.0 \times 10^4$ 、 $147.0 \times 10^4$  个/L),持续至 3 月 28 日( $71.7 \times 10^4$ 、 $247.5 \times 10^4$  个/L)(图 3)。童庄河回水区拟多甲藻水华最先在上游出现,逐步向中下游发展,在维持一定规模和时间后消退。

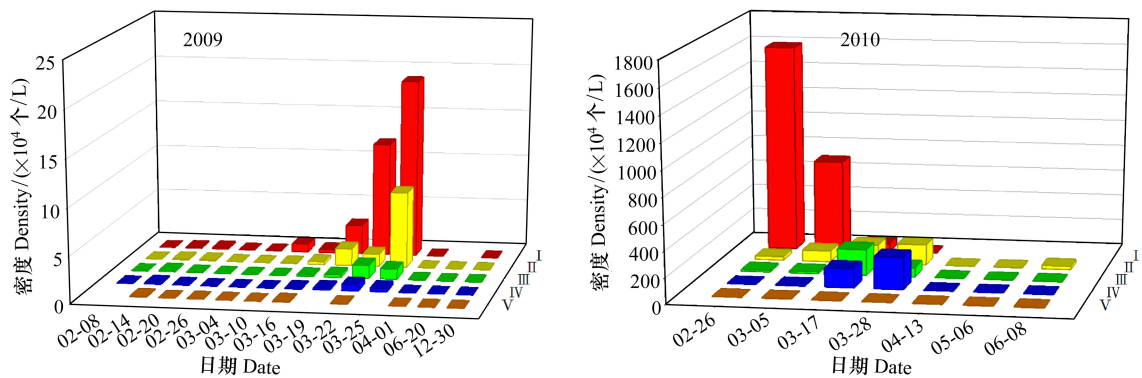


图 3 2009 年和 2010 年童庄河回水区拟多甲藻密度的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variations of *Peridiniopsis* sp. density in backwater area of Tongzhuang River in 2009 and 2010

长江干流(V点)拟多甲藻出现频次不高、密度较低(图3),优势度较低,未出现水华。2009年检出次数只有童庄河回水区的37.50%,密度 $0.05\times 10^4$ — $0.10\times 10^4$ 个/L、最大优势度0.20%,为童庄河回水区同期最高密度的0.40%—66.66%、最大优势度的0.38%。2010年检出次数只有童庄河回水区的57.14%,密度 $0.05\times 10^4$ — $1.66\times 10^4$ 个/L、最大优势度

21.52%,为童庄河回水区同期最高密度的0.02%—0.24%、最大优势度的21.80%。

### 2.3 拟多甲藻水华形成与营养盐浓度关系

2009年和2010年童庄河回水区与长江干流TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等营养盐状况见表1。

表 1 童庄河回水区和长江干流氮磷浓度

Table 1 N and P Concentrations in backwater area of Tongzhuang River and main stem of Yangtze River

		2009 年		2010 年		
		童庄河	干流	童庄河	干流	童庄河
		2—4 月 February to April	2—4 月 February to April	2—4 月 February to April	2—4 月 February to April	水华出现前 Before the algae bloom
						During the algae bloom
样本数 Sample number		68	8	19	5	5
TN/(mg/L)	平均值 Average	1.847	1.930	2.066	2.159	1.901
	标准差 Std *	0.744	0.394	0.505	0.140	0.171
TP/(mg/L)	平均值 Average	0.095	0.116	0.157	0.146	0.114
	标准差 Std *	0.017	0.026	0.142	0.024	0.032
$\text{NH}_3\text{-N}$ /(mg/L)	平均值 Average	0.096	0.092	0.314	0.239	0.203
	标准差 Std *	0.052	0.023	0.125	0.053	0.054
$\text{NO}_3\text{-N}$ /(mg/L)	平均值 Average	1.465	1.526	1.501	1.681	1.487
	标准差 Std *	0.165	0.057	0.312	0.032	0.157
$\text{NO}_2\text{-N}$ /(mg/L)	平均值 Average	0.005	0.005	0.008	0.005	0.002
	标准差 Std *	0.003	0.004	0.006	0.002	0.001
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ /(mg/L)	平均值 Average	0.074	0.091	0.076	0.109	0.092
	标准差 Std *	0.040	0.017	0.043	0.049	0.051

\* Std(standard deviation)

在童庄河回水区和长江干流之间,除2009年长江干流TP浓度极显著( $P<0.01$ )高于童庄河回水区外,二者之间营养盐浓度无显著差异( $P>0.05$ )。

在年际之间,童庄河回水区2010年TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$

和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度极显著( $P<0.01$ )高于2009年,其它指标无显著差异( $P>0.05$ ),2010年水华出现前TP( $P<0.05$ )和 $\text{NH}_3\text{-N}$ ( $P<0.01$ )浓度显著和极显著高于2009年、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度显著( $P<0.05$ )低于2009年,



其它指标无显著差异 ( $P>0.05$ )。长江干流 2010 年  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度极显著 ( $P<0.01$ ) 高于 2009 年, 其它指标无显著差异 ( $P>0.05$ )。

在 2010 年童庄河回水区水华出现前后, 水华出现期间  $\text{NH}_3\text{-N}$  ( $P<0.01$ ) 和  $\text{NO}_2\text{-N}$  ( $P<0.05$ ) 浓度极显著和显著高于水华出现前, 其它指标无显著差异 ( $P>0.05$ )。

结果表明, 除 2009 年长江干流 TP 浓度明显高于童庄河回水区外, 二者之间氮磷浓度无明显差异。童庄河回水区 2010 年水华发生前, TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$  比未发生水华的 2009 年有明显增加。

将童庄河回水区拟多甲藻密度与氮磷营养盐浓度进行多元线性逐步回归, 得到方程:

$$\text{拟多甲藻密度} = -2490902.2 + 71313853.7 \times \text{NO}_2\text{-N} + 23547294.3 \times \text{TP} \\ (R^2 = 0.933, P < 0.001)$$

式中, TP 解释了拟多甲藻密度 92.1% 的变异 ( $P < 0.001$ ),  $\text{NO}_2\text{-N}$  解释了拟多甲藻密度 1.2% 的变异

( $P=0.002$ )。因此, 童庄河回水区拟多甲藻密度主要受总磷浓度影响, 受其他营养盐浓度影响很小。

#### 2.4 拟多甲藻水华形成与三峡水库水文条件关系

童庄河回水区 2005 年<sup>[4]</sup>、2007 年<sup>[5]</sup> 和 2010 年 2—3 月发生了拟多甲藻水华, 2009 年未发生水华。2005 年、2007 年上半年三峡水库最高蓄水位分别为 139 m 和 156 m, 2009 年、2010 年上半年最高蓄水位为 172 m。各年度 1—3 月三峡水库每日分时刻流量和水位变化的月平均值见表 2。

三峡水库日出库流量, 除 2005 年 3 月和 2010 年 1 月与 2009 年同期无显著差异 ( $P>0.05$ ) 外, 2005 年 1—2 月、2007 年 1—3 月、2010 年 2—3 月 (平均值 4489.9—5623.3  $\text{m}^3/\text{s}$ ) 均极显著 ( $P<0.01$ ) 小于 2009 年同期 (平均值 5397.3—6202.7  $\text{m}^3/\text{s}$ ) (表 2)。在发生拟多甲藻水华年度同月之间的差异无明显规律。三峡水库日入库流量、日出库流量与入库流量之差, 在发生与不发生拟多甲藻水华年度同月之间、发生拟多甲藻水华年度同月之间的差异无明显规律。

表 2 三峡水库不同年份 1—3 月水文条件变化

Table 2 Hydrological conditions in different year from January to March in Three Gorges Reservoir

月份 Month	水文条件 Hydrological condition	2005 年	2007 年	2009 年	2010 年
1	水位日变幅平均值/m	0.119	0.057	0.083	0.148
	水位日升降平均值/m	-0.009	0.012	-0.013	-0.109
	日入库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	5161.7	4722.6	5396.4	4369.6
	日出库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	5147.8	4641	5397.3	5584.0
	日出库流量与日入库流量差平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	-13.8	-81.6	0.9	1214.4
2	水位日变幅平均值/m	0.116	0.110	0.187	0.246
	水位日升降平均值/m	-0.001	-0.092	-0.139	-0.223
	日入库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	4529.9	4251.3	4884.4	3674.6
	日出库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	4489.9	4872.5	6202.7	5623.3
	日出库流量与日入库流量差平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	-40	621.2	1318.4	1948.7
3	水位日变幅平均值/m	0.135	0.090	0.156	0.196
	水位日升降平均值/m	-0.006	-0.063	-0.145	-0.179
	日入库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	5668.8	4398.8	4561	4197
	日出库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	5662.9	4857.4	5831.9	5510.5
	日出库流量与日入库流量平均值/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	-5.9	458.6	1270.9	1313.4

三峡水库水位日变幅 (当日最高水位与最低水位之差)、水位日升降 (翌日 0 时水位与当日 0 时水位之差), 在发生与未发生拟多甲藻水华年度同月之间、发生拟多甲藻水华年度同月之间的差异均无明显规律, 但在上年三峡水库最高蓄水位相同的 2010 年与 2009 年之间, 2010 年 1 月、2 月三峡水库水位

日变幅 (平均值 0.148 m、0.246 m) 显著 ( $P<0.05$ ) 和极显著 ( $P<0.01$ ) 大于 2009 年同期 (平均值 0.083 m、0.187 m), 3 月份无显著差异 ( $P>0.05$ )。2010 年 2 月三峡水库水位日升降 (平均值 -0.223 m) 极显著 ( $P<0.01$ ) 大于 2009 年 2 月 (平均值 -0.139 m), 1 月和 3 月无显著差异 ( $P>0.05$ ) (表 2)。

与未发生拟多甲藻年份相比,童庄河回水区发生拟多甲藻的年份,三峡水库 1—3 月出库流量较小、1—2 月水位日变幅和 2 月水位日升降(下降)较大。

将 2009 年和 2010 年童庄河回水区(I—IV 点)和长江干流(V 点)各点拟多甲藻密度分别与各水文条件(表 2)进行多元线性逐步回归分析,结果同一点不同年度和同一年度不同点拟多甲藻密度受影响的水文条件有较大差别,无明显规律。

### 3 讨论

#### 3.1 三峡水库支流拟多甲藻水华形成条件

拟多甲藻是广温性藻类,可在 10—28 °C 大量繁殖,最适生长水温为 13—15 °C<sup>[8-9]</sup>。温度是控制甲藻种类出现的最重要因子之一,12—18 °C 出现的甲藻种类比 22—26 °C 多<sup>[12]</sup>。在水温适宜的 2—3 月,童庄河回水区拟多甲藻可以从极次要种类,繁殖生长为第一优势种类<sup>[26]</sup>。四季调查中,三峡水库长江干流及其 26 条支流未淹没区和回水区拟多甲藻出现率、平均(最大)密度和最大优势度均在水温适宜的 4 月达到最高。在 26 条支流回水区,拟多甲藻四季能成为第一、第二优势种类(优势度超过 20%),但 4 月成为第一优势种类的支流最多、优势度总体最高(图 2),且只在水温(10.1—18.8 °C)适宜 2—4 月形成水华<sup>[4-5,17,26]</sup>。国内其它水体甲藻(包括拟多甲藻)形成水华时的水温与此相同<sup>[6-9]</sup>。意大利 Tovel 湖也在湖水温度 15—19 °C 时易形成甲藻水华,而在异常寒冷的年份则不形成水华<sup>[27]</sup>。其它藻类也在水温适宜时形成水华。蓝藻最佳生长温度通常高于其它藻类,太湖微囊藻最适生长温度为 30—35 °C,水华多发生于水温较高的夏季<sup>[28]</sup>。硅藻最适水温为 10—17 °C<sup>[29]</sup>,汉江中下游硅藻水华也发生在水温(11.0—12.5 °C)适宜的 2—3 月<sup>[29-30]</sup>。因此,适宜水温是水华形成的重要条件。这与藻类生长生理状况受水温影响有关,在适宜水温,汉江水华硅藻各种色素含量较高、光合作用能力较强,细胞增殖速率、比增长速率和指数生长期达到最佳<sup>[29]</sup>。

藻类水华形成需要经历相应的过程。长江中下游大型浅水湖泊蓝藻生长与水华形成可分为休眠、复苏、生物量增加、上浮和积聚形成水华等 4 个主要阶段<sup>[28]</sup>。海洋甲藻赤潮的种源来源包括原地水体

中增殖、其它海区输运而来、原地底泥中的孢囊萌发和其他海区输运而来的孢囊萌发等<sup>[31]</sup>。26 条支流四季调查发现,1 月和 4 月分别有 23 条和 12 条支流未淹没区主河道下游水温(4.09—11.29 °C、12.60—23.06 °C)比回水区上游水温(5.27—14.31 °C、14.90—23.50 °C)低 0.04—8.95 °C 和 0.21—4.30 °C,低温河水进入回水区时沿河床下潜,而表层水则受下游回水顶托逆流而上,在回水区上游形成局部循环水流。这种水动力条件,一方面有利于将底泥中的甲藻孢囊和营养盐一并带入中上水层<sup>[17]</sup>,并滞留在回水区上游,此时水温适宜,甲藻得以大量繁殖生长。另一方面促使甲藻集聚在这个区域形成水华<sup>[32]</sup>。这就是 2010 年 2 月童庄河拟多甲藻水华最先在回水区上游出现(图 3)、三峡水库其它支流及国内类似水体拟多甲藻及其它甲藻水华均出现在回水区上游及以下一定区域<sup>[4-6,8,17,26]</sup>的缘故。因此,回水区上游水动力条件能否达到上述效果是水华形成的关键条件。不同年份气象条件等因素变化会改变支流流量和水温,回水区上游水动力条件强度会随之变化。

#### 3.2 三峡水库支流拟多甲藻水华形成影响因子

大多数学者认为水体富营养化是水华发生的物质基础<sup>[17]</sup>。氮磷是藻类繁殖生长必须的大量营养元素,蔡庆华等指出,三峡水库主要库湾水域 TN、TP 浓度都相当高,已远超国际公认富营养化产生所需的阈值<sup>[33]</sup>。未发生拟多甲藻水华的 2009 年 2—4 月,童庄河回水区 TN、TP 平均浓度(表 1)为国际公认富营养化阈值标准(TN = 0.2 mg/L, TP = 0.02 mg/L)<sup>[34]</sup>的 9.24 倍和 4.75 倍,是日本国立公害研究所富营养标准(TN > 1.2 mg/L, TP > 0.11 mg/L)<sup>[35]</sup>的 1.54 倍和 0.86 倍,已达到富营养状态,具备水华形成的营养盐基础。尽管多元线性逐步回归分析显示,童庄河回水区拟多甲藻密度主要受 TP 影响,其它营养盐影响很小,但 2010 年童庄河回水区 TP、NH<sub>3</sub>-N 浓度明显高于 2009 年(表 1),不一定是 2010 年拟多甲藻形成水华的影响因子。甲藻自身的营养能力和生活习性并不苛求水体中营养盐浓度。甲藻有 3 种营养方式,拟多甲藻可采取管摄食<sup>[21]</sup>,还可以通过增加合成能水解有机磷的胞外磷酸酶以满足自身对磷的需求<sup>[36]</sup>,也能通过在水中上下垂直迁移,选择所需要的营养盐浓度及其它生长条件最佳

水层<sup>[37-38]</sup>。此外,甲藻胞内磷库的存在对于维持种群持续增长也非常重要<sup>[39]</sup>。因此,甲藻水华并不总是发生在富营养水体中,也经常发生在中营养或贫营养水体<sup>[40-41]</sup>。出现甲藻水华的意大利 Tovel 湖,水质良好,并不存在富营养化状态<sup>[16,27]</sup>。

2009 年和 2010 年,长江干流除 2009 年 TP 浓度极显著高于童庄河回水区外,二者之间氮磷浓度无明显差异(表 1),但长江干流拟多甲藻出现频次、密度和最大优势度大幅低于童庄河回水区(图 3)。在三峡水库长江干流及其 26 支流未淹没区和回水区的四季调查中,支流回水区拟多甲藻平均(最大)密度、最大优势度均最高,其中 4 月长江干流拟多甲藻平均密度、最大密度和最大优势度分别只有回水区的 0.68%、0.08% 和 11.88%(图 2)。回水区比长江干流更适合拟多甲藻生长,主要是水流慢,三峡水库蓄水后,长江干流为河流型或过渡型水体,支流回水区为湖泊型水体<sup>[2]</sup>,1—4 月支流回水区流速只有干流的 3.5%—17.8%<sup>[42-43]</sup>。童庄河回水区发生拟多甲藻水华年份,三峡水库 1—3 月出库流量明显小于未发生水华年份同期,同时,1 月和 2 月水位日变幅、2 月水位日升降明显大于未发生水华年份同期(表 2)。三峡水库出库流量明显减小,回水区流速更低,水滞留时间延长,有利于 k-策略者即大型的和有鞭毛的藻类如拟多甲藻繁殖生长<sup>[3]</sup>。汉江下游三次硅藻水华发生期间,其流量、流速均明显小于未发生水华年份<sup>[30]</sup>。1—2 月是拟多甲藻水华形成前期,此时水位波动大而出库流量小,有利于维持和增大回水区上游已经存在的水动力条件及其强度,促进拟多甲藻繁殖生长和集聚形成水华,否则不利于或不能形成水华。因此,三峡水库出库流量、水位波动等水文条件通过维持、增大或减弱回水区上游水动力条件强度及回水区流速,影响水华能否形成,其作用的时间、强度和持续时间影响拟多甲藻水华形成的时间、程度、范围和维持时间,是支流拟多甲藻水华形成与否的影响因子。由于回水区上游水动力条件形成的时间差异以及三峡水库不同水文条件所影响的远近尺度不同,位于三峡大坝不同距离支流回水区拟多甲藻水华形成及消失的时序也不一致,如 2010 年 4 月童庄河水华已消失(图 3),磨刀溪、梅溪河和神农溪仍有不同程度水华。

致谢:池仕运、汪红军、冯坤、万力、潘晓洁、邹曦等同

志参加部分野外采样和氮磷测定,程郁春同志完成部分样品室内处理,在此表示感谢。

## References:

- [1] Huang Z L, Li Y L, Chen Y C, Li J X, Xing Z G, Ye M, Li J, Lü P Y, Li C M, Zhou X Y. Water Quality Prediction and Water Environmental Carrying Capacity Calculation for Three Gorges Reservoir. Beijing: China Water Power Press, 2006: 6-18.
- [2] Zhang Y, Zheng B H, Liu H L. Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of the Three Gorges Reservoir. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(2): 254-258.
- [3] Zhu A M, Hu J X, Li S X, Zhou L F, Liang Y G. Phytoplankton diversity and water quality in the main stream and tributaries of Three Gorges Reservoir region of Yangtze River during dry season. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(3): 378-385.
- [4] Zhou G J, Kuang Q J, Liu G X, Tang H B, Hu Z Y. Investigation on algal water-Blooms in the Three Gorges Reservoir and its toxicological study. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(1): 37-41.
- [5] Zhu A M, Wu G B, Liang Y Q, Xie W X, Yu F H, Hu X J. Spatial and temporal dynamic of phytoplankton community in tributary Tongzhuang River estuary after 156m impoundment of the Three Gorges Reservoir. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 101-106.
- [6] Wang H Z, Liu Y D, Shen Y W, Xiao B D, Liu Y M. Preliminary research on water bloom of Dinophyceae in Yunnan Manwan Hydropower Station Reservoir. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28(2): 213-215.
- [7] Sun Y P, You J T, Lei L M, Han B P. The feature of particulate fatty acids composition in a dinoflagellates bloom in Huanglongdai Reservoir, South China. Ecological Science, 2008, 27(5): 394-397.
- [8] Bian G G, Chen N, Hu Z Y, Liu G X. A river in Fujian algal dinoflagellate relationship with the pollution index. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(3): 405-410.
- [9] Tang H B, Hu S, Hu Z Y, Kuang Q J, Liu G X. Relationship between *Peridiniopsis* sp. and environmental factors in Lake Donghu, Wuhan. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 632-636.
- [10] Kishimoto N, Somiya I, Ohnishi Y, Nakamura T. Mathematical simulation on accumulation process of a blooming plankton *Peridinium bipes* (Dinophyceae) in a dam reservoir. Water Science and Technology: Water Supply, 2001, 1(2): 37-48.
- [11] Leitao M, Ten-Hage L, Mascarell G, Coute A. *Peridiniopsis corillionii* sp. nova (Dinophyta), une nouvelle dinophycee d'eau douce de France responsable de maree rouges en riviere. Algological Studies, 2001, 102: 1-15.

- [12] Grigorszky I, Borics G, Padisák J, Tótmérész B, Vasas G, Nagy S, Borbély G. Factors controlling the occurrence of dinophyta species in Hungary. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509 (1/3): 203-207.
- [13] de Souza Cardoso L, Fagundes P B, Becker V. Spatial and temporal variations of dinophyceae in subtropical reservoirs in southern Brazil. *Hydrobiologia*, 2010, 654(1): 205-214.
- [14] Canion A K, Ochs C. The population dynamics of freshwater armored dinoflagellates in a small lake in Mississippi. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(4): 617-626.
- [15] Viner-Mozzini Y, Zohary T, Gasith A. Dinoflagellate bloom development and collapse in Lake Kinneret: a sediment trap study. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(6): 591-602.
- [16] Zhang Q, Miao R L, Liu G X, Hu Z Y. The review of the studies on freshwater dinoflagellate bloom. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(2): 352-360.
- [17] Tang H B, Liu G X, Hu Z Y. Preliminary research on the algal bloom of *Peridiniopsis* sp. in Gaolan River of the Three Gorges Researvoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 47-51.
- [18] Graham J M, Kent A D, Lauster G H, Yannarell A C, Graham L E, Triplett E W. Seasonal dynamics of phytoplankton and planktonic protozoan communities in a northern temperate humic lake: diversity in a dinoflagellate dominated system. *Microbial Ecology*, 2004, 48(4): 528-540.
- [19] Yamada M, Ono Y, Somiya I. Accumulation of freshwater red tide in a dam reservoir. *Water Science and Technology*, 1998, 37(2): 211-218.
- [20] Xu Y Y, Cai Q H, Wang L, Kong L H, Li D F. Diel vertical migration of *Peridiniopsis niei*, Liu et al., a new species of dinoflagellates in an eutrophic bay of Three-Gorge Reservoir, China. *Aquatic Ecology*, 2010, 44(2): 387-395.
- [21] Hansen P J, Calado A J. Phagotrophic mechanisms and prey selection in free-living dinoflagellates. *The Journal of Eukaryotic Microbiology*, 1999, 46(4): 382-389.
- [22] Liu X J, Yacob Y Z. The response of *Peridinium gatunense* to different light regimes: its pigmentation and possible implications on the light-shade adaptation. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(4): 307-316.
- [23] Zhang Z S, Huang X F. *The Research Methods for Freshwater Plankton*. Beijing: Science Press, 1991: 333-344.
- [24] Hu H J, Wei Y X. *The Freshwater Algae of China — Systematics, Taxonomy and Ecology*. Beijing: Science Press, 2006: 1-915.
- [25] State Environmental Protection Administration of China. *Monitory and Analysis Methods of Water and Waste Water*. 4th ed. Beijing: Chinese Environment Science Press, 2002: 88-285.
- [26] Zhu A M, Qiao Y, Liang Y G, Zheng Z W, Zhou L F, Zou Q, Wang H J. Monitoring and investigation of *Peridiniopsis* sp. water bloom in Tongzhuang River of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(4): 49-53.
- [27] Cavalca L, Ferrari P, Andreoni V. *Glenodinium sanguineum* March, and the reddening phenomenon of Lake Tovel: biological and environmental aspects. *Annals of Microbiology*, 2001, 51(2): 159-177.
- [28] Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 589-595.
- [29] Zheng L L. *The Physiological and Ecological Research about the Dominant Species in Han-jiang River Ditom Bloom [D]*. Fuzhou: Fujian Normal University, 2005: 42-59.
- [30] Dou M, Xie P, Xia J, Shen X L, Fang F. Study on algal bloom in Hanjiang River. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 557-561.
- [31] Chen H L, Lü S H, Zhang C S, Zhu D D. A survey on the red tide of *Prorocentrum donghaiense* in East China Sea, 2004. *Ecologic Science*, 2006, 25(3): 226-230.
- [32] Zhu M L, Chen F Y, Jin F, Huang M H. Reservoir dinoflagellate bloom and numerical simulation of the control effect. *Yangtze River*, 2007, 38(11): 157-159, 165-165.
- [33] Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 7-11.
- [34] Cao M, Cai Q H, Liu R Q, Qu X D, Ye L. Comparative research on physicochemical factors in the front of Three Gorges Reservoir before and after the initiate impounding. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 12-19.
- [35] Liu Y M, Jia S F, Jiang L W, Zhang S F. A study on the impact of the Three Gorges Reservoir on potential eutrophication in backwaters of tributaries of Chongqing section of Yangtze River. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 67-72.
- [36] Cao X Y, Štrojsová A, Znachor P, Zapomělová E, Liu G X, Vrba J, Zhou Y Y. Detection of extracellular phosphatases in natural spring phytoplankton of a shallow eutrophic lake (Donghu, China). *European Journal of Phycology*, 2005, 40(3): 251-258.
- [37] Regel R H, Brookes J D, Ganf G G. Vertical migration, entrainment and photosynthesis of the freshwater dinoflagellate *Peridinium cinctum* in a shallow urban lake. *Journal of Plankton Research*, 2004, 26: 143-157.
- [38] Taylor F J R. *The biology of Dinoflagellates*. Botanical Monographs, 1987, 17: 462-481.
- [39] Kawabata Z, Hirano Y. Growth pattern and cellular nitrogen and phosphorus contents of the dinoflagellate *Peridinium penardii* (Lemm.) Lemm. causing a freshwater red tide in a reservoir. *Hydrobiologia*, 1995, 312(2): 115-120.
- [40] Cantonati M, Tardio M, Tolotti M, Corradini F. Blooms of the dinoflagellate *Glenodinium sanguineum* obtained during enclosure experiments in Lake Tovel (N. Italy). *Journal of Limnology*, 2003, 62(1): 79-87.



- [41] Fukuj S, Takahashi T, Kawayoke T. Statistical analysis of freshwater red tide in Japanese reservoirs. *Water Science and Technology*, 1998, 37(2): 203-210.
- [42] Zhang S, Song D, Zhang K, Zeng F H, Li D G. Trophic status analysis of the upper stream and backwater area in typical tributaries, Three Gorges Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 201-207.
- [43] Huang C, Zhong C H, Deng C G, Xing Z G, Li Y J, Wang D R, Meng W L. Preliminary study on correlation between flow velocity and algae along Daning River's backwater region at sluice initial stages in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 453-457.
- 参考文献:
- [1] 黄真理, 李玉樑, 陈永灿, 李锦绣, 幸治国, 叶闽, 李嘉, 吕平毓, 李崇明, 周雪漪. 三峡水库水质预测和环境容量计算. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 6-18.
- [2] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2): 254-258.
- [3] 朱爱民, 胡菊香, 李嗣新, 周连凤, 梁友光. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质. *湖泊科学*, 2013, 25(3): 378-385.
- [4] 周广杰, 况琪军, 刘国祥, 汤宏波, 胡征宇. 三峡库区藻类水华调查及其毒理学研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 37-41.
- [5] 朱爱民, 吴广兵, 梁银铨, 谢文星, 俞伏虎, 胡小健. 156m 蓄水后三峡水库支流童庄河河口段浮游植物群落的时空动态. *水生态学杂志*, 2009, 2(2): 101-106.
- [6] 王海珍, 刘永定, 沈银武, 肖邦定, 刘永梅. 云南漫湾水库甲藻水华生态初步研究. *水生生物学报*, 2004, 28(2): 213-215.
- [7] 孙育平, 游江涛, 雷腊梅, 韩博平. 黄龙带水库甲藻水华的脂肪酸组成特征. *生态科学*, 2008, 27(5): 394-397.
- [8] 边归国, 陈宁, 胡征宇, 刘国祥. 福建某河流甲藻水华与污染指标的关系. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 405-410.
- [9] 汤宏波, 胡圣, 胡征宇, 况琪军, 刘国祥. 武汉东湖甲藻水华与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2007, 19(6): 632-636.
- [16] 张琪, 缪荣丽, 刘国祥, 胡征宇. 淡水甲藻水华研究综述. *水生生物学报*, 2012, 36(2): 352-360.
- [17] 汤宏波, 刘国祥, 胡征宇. 三峡库区高岚河甲藻水华的初步研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 47-51.
- [22] 刘学君, Yacob Y Z. 多甲藻对不同光照强度的反应: 色素沉着及暗光适应的可能性. *水生生物学报*, 2000, 24(4): 307-316.
- [23] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 333-344.
- [24] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统·分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006: 1-915.
- [25] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 88-285.
- [26] 朱爱民, 乔晔, 梁友光, 郑志伟, 周连凤, 邹清, 汪红军. 三峡水库支流童庄河拟多甲藻水华的监测. *水生态学杂志*, 2012, 33(4): 49-53.
- [28] 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. *生态学报*, 2005, 25(3): 589-595.
- [29] 郑凌凌. 汉江硅藻水华优势种生理生态学研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2005: 42-59.
- [30] 窦明, 谢平, 夏军, 沈晓鲤, 方芳. 汉江水华问题研究. *水科学进展*, 2002, 13(5): 557-561.
- [31] 陈翰林, 吕颂辉, 张传松, 朱德弟. 2004 年东海原甲藻赤潮暴发的现场调查和分析. *生态科学*, 2006, 25(3): 226-230.
- [32] 朱木兰, 陈飞勇, 金峰, 黄明海. 水库甲藻水华与防治效果数值模拟. *人民长江*, 2007, 38(11): 157-159, 165-165.
- [33] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 7-11.
- [34] 曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 渠晓东, 叶麟. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 12-19.
- [35] 刘永明, 贾绍风, 蒋良维, 张士锋. 三峡水库重庆段一级支流回水河段富营养化潜势研究. *地理研究*, 2003, 22(1): 67-72.
- [42] 张晟, 宋丹, 张可, 曾凡海, 李斗果. 三峡水库典型支流上游区和回水区营养状态分析. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 201-207.
- [43] 黄程, 钟成华, 邓春光, 幸治国, 李永建, 王德蕊, 蒙万伦. 三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 453-457.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.11 June, 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

Review on macropore flow in soil ..... GAO Zhaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al (2801)

### Ecological Restoration

A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China .....  
..... WU Gang, WEI Dong, ZHOU Zhengda, et al (2812)

The ecology and environment monitoring technical systems in national large-scale coal-fired power base: a case study in Xilingol  
League, Inner Mongolia ..... WEI Dong, QUAN Yuan, WANG Chenxing, et al (2821)

Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the dpsir conceptual model .....  
..... ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al (2830)

Research progress on the environment impacts from underground coal mining in arid western area of China .....  
..... LEI Shaogang, BIAN Zhengfu (2837)

Ecological risk receptors analysis of pingzhuang western open-cut coal mining area in inner mongolia .....  
..... GAO Ya, LU Zhaohua, WEI Zhenkuan, et al (2844)

Impacts of mining on landscape pattern and primary productivity in the grassland of Inner Mongolia: a case study of Heidaigou  
open pit coal mining ..... KANG Sarula, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (2855)

Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk .....  
..... LIN Longyong, YAN Xiulan, LIAO Xiaoyong, et al (2868)

3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China ... LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al (2876)

### Autecology & Fundamentals

Catabatic effect from artificial mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* on soil aluminum toxicity .....  
..... LEI Bo, LIU Bin, LUO Chengde, et al (2884)

Study on the trophic levels of soil macrofauna in artificial protection forests by means of stable nitrogen isotopes .....  
..... ZHANG Shuhua, ZHANG Xueping (2892)

Lead- and cadmium-resistant bacterial strain JB11 enhances lead and cadmium uptake in the phytoremediation of soils .....  
..... JIN Zhongmin, SHA Wei, LIU Lijie, et al (2900)

Identification and oil-degrading performance of *Acinetobacter* sp. isolated from North Shaanxi oil-contaminated soil .....  
..... WANG Hu, WU Lingling, ZHOU Lihui, et al (2907)

Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains .....  
..... MA Aiai, XU Shijian, MIN Yuxia, et al (2916)

Spatial distribution of AM and DSE fungi in the rhizosphere of *Ammopiptanthus nanus* .....  
..... JIANG Qiao, HE Xueli, CHEN Weiyan, et al (2929)

Effects of PASP-KT-NAA on maize leaf nitrogen assimilation after florescence over different temperature gradients .....  
..... GAO Jiao, DONG Zhiqiang, XU Tianjun, et al (2938)

Key temperatures of corn and sunflower during cooling process in Hetao irrigation district, Inner Mongolia .....  
..... WANG Haimei, HOU Qiong, YUN Wenli, et al (2948)

The content of tannin extract in four types of *Quercus variabilis* ..... YIN Yining, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, et al (2954)

Effect of food stress on flight muscle and reproduction development in a wing dimorphic cricket, *Velarifictorus ornatus* .....  
..... WU Hongjun, ZHAO Lüquan, ZENG Yang, et al (2963)

- Effect of colours on oviposition preference of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* Busck ..... YANG Xiaofan, MA Chunsen, FAN Fan, et al (2971)
- Monoterpene volatiles affecting host selection behavior of *Dendrolimus superans* and the activities of defense protein in larch needles ..... LIN Jian, LIU Wenbo, MENG Zhaojun, et al (2978)
- Population, Community and Ecosystem**
- Soil microbial community structure under different vegetation restoration patterns in the loess hilly area ..... HU Chanjuan, GUO Lei, LIU Guohua (2986)
- Seasonal variation of functional diversity of microbial communities in sediment and shelter of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) cultural ponds ..... YAN Fajun, TIAN Xiangli, DONG Shuanglin, et al (2996)
- Analysis of bacterial flora during the fahua-fermentation process of fuzhuan brick tea production based on DGGE technology ..... LIU Shiquan, HU Zhiyuan, ZHAO Yunlin (3007)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- CO<sub>2</sub> emissions transfer embedded in inter-regional trade in China ..... LIU Hongguang, FAN Xiaomei (3016)
- Carbon sequestration potential of the major stands under the Grain for Green Program in Southwest China in the next 50 years ..... YAO Ping, CHEN Xiangang, ZHOU Yongfeng, et al (3025)
- Characteristics of spatial and temporal phenology under the dynamic variation of grassland in the Qinghai Lake watershed ..... LI Guangyong, LI Xiaoyan, ZHAO Guoqin, et al (3038)
- Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012 ... WEI Shujing, LUO Bizhen, SUN Long, et al (3048)
- Simulation of the climatic productivity of forest vegetation in Three Gorges Reservoir area ..... PAN Lei, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al (3064)
- The mechanism for occurrence of *Peridiniopsis* blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir ..... ZHU Aimin, LI Sixin, HU Jun, et al (3071)
- Biodiversity sensitivity zoning of river dam and reservoir engineering development ... LI Yiqiu, LU Chunxia, DENG Ou, et al (3081)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Assessment on coordinative ability of sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on set pair analysis ..... TAN Feifei, ZHANG Meng, LI Haoran, et al (3090)
- Vacancy analysis on the development of nature reserves in Jiangxi Province ..... HUANG Zhiqiang, LU Lin, DAI Nianhua, et al (3099)
- Evaluation of ecological economy index in the poyang lake ecological economic zone ..... HUANG Heping, PENG Xiaolin, KONG Fanbin, et al (3107)
- Research on China's provincial forest ecological security appraisal based on the detrimental interferences ..... LIU Xinzhu, MI Feng, ZHANG Shuang, et al (3115)

# 《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

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 11 期 (2014 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 34 No. 11 (June, 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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元