

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第21期 Vol.32 No.21 **2012**

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 32 卷 第 21 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响.....	王衫允,祝贵兵,曲冬梅,等 (6591)
造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应.....	夏孟婧,苗颖,陆兆华,等 (6599)
图们江下游湿地生态系统健康评价.....	朱卫红,郭艳丽,孙 鹏,等 (6609)
适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法.....	陈 展,林 波,尚 鹤,等 (6619)
基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应.....	梁 婕,蔡 青,郭生练,等 (6628)
崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性.....	章振亚,丁陈利,肖 明 (6636)
中国东部亚热带地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的谐波分析.....	赵兴云,李宝惠,王 建,等 (6647)
甘肃臭草型退化草地优势种群空间格局及其关联性.....	高福元,赵成章 (6661)
川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应.....	谭 波,吴福忠,杨万勤,等 (6670)
模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响.....	邓华卫,布仁仓,刘晓梅,等 (6679)
苹果三维树冠的净光合速率分布模拟.....	高照全,赵晨霞,张显川,等 (6688)
拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响.....	郝玉敏,戴传超,戴志东,等 (6695)
落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系.....	苏冬雪,王文杰,邱 岭,等 (6705)
人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究.....	张永宽,陶 冶,刘会良,等 (6715)
山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.....	王 强,袁兴中,刘 红 (6726)
荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系.....	吴忠鑫,张 磊,张秀梅,等 (6737)
北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化.....	杨 青,王真良,樊景凤,等 (6747)
鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.....	蒙古军,朱利凯,杨 倩,等 (6755)
村落文化林与非文化林多尺度物种多样性加性分配.....	高 虹,陈圣宾,欧阳志云 (6767)
不同生计方式农户的环境感知——以甘南高原为例.....	赵雪雁 (6776)
两种预测模型在地下水动态中的比较与应用.....	张 霞,李占斌,张振文,等 (6788)
四川黄龙沟少花鹤顶兰繁殖成功特征.....	黄宝强,寇 勇,安德军 (6795)
硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响.....	杨 扬,孟德龙,秦红灵,等 (6803)
新疆两典型微咸水湖水体免培养古菌多样性.....	邓丽娟,娄 恺,曾 军,等 (6811)
白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性.....	赵玉娟,李凤超,张 强,等 (6819)
双酚 A 对萼花臂尾轮虫毒性及生活史的影响.....	陆正和,赵宝坤,杨家新 (6828)
孵化温度对双斑锦蛇初生幼体行为和呼吸代谢的影响.....	曹梦洁,祝 思,蔡若茹,等 (6836)
黄玛草蛉捕食米蛾卵的功能反应与数值反应.....	李水泉,黄寿山,韩诗畴,等 (6842)
互惠-寄生耦合系统的稳定性.....	高 磊,杨 燕,贺军州,等 (6848)
超微七味白术散对肠道微生物及酶活性的影响.....	谭周进,吴 海,刘富林,等 (6856)
专论与综述	
氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响.....	陈 浩,莫江明,张 炜,等 (6864)
全球 CO_2 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展.....	赵旭辉,孔繁翔,谢薇薇,等 (6880)
跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段.....	石龙宇,李 杜,陈 蕾,等 (6892)
研究简报	
会同和朱亭 11 年生杉木林能量积累与分配.....	康文星,熊振湘,何介南,等 (6901)
退化草地阿尔泰针茅生殖株丛与非生殖株丛的空间格局.....	任 珩,赵成章,高福元,等 (6909)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 35 * 2012-11



封面图说: 白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊湿地。淀区内沟壕纵横交织错落,村庄、苇地、园田星罗棋布,在水文、水化学、生物地球化学循环以及生物多样性等方面,具有非常复杂的异质性。随着上游城镇污废水、农田径流进入水域,淀区富营养化日益加剧。复杂的水环境特点、高度的景观异质性和良好的生物多样性,使得该地区成为探索规模性厌氧氨氧化反应的良好研究地点(详见本期第 6591—6598 页)。

彩图提供: 王为东博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: wdwangh@yahoo.com

DOI: 10.5846/stxb201109221395

赵玉娟, 李凤超, 张强, 张彦. 白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性. 生态学报, 2012, 32(21): 6819-6827.

Zhao Y J, Li F C, Zhang Q, Zhang Y. Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6819-6827.

白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与 环境因子的相关性

赵玉娟¹, 李凤超^{1,*}, 张 强², 张 彦²

(1. 河北大学生命科学学院, 河北省无脊椎动物系统学与应用实验室, 保定 071002;

2. 保定市水文水资源勘测局, 保定 071000)

摘要: 于 2010 年 4 月至 2011 年 3 月调查了白洋淀 3 个典型湖区表层水体异养鞭毛虫丰度和生物量及环境因子的周年变化, 分析了异养鞭毛虫群落与环境因子的相关关系。白洋淀表层水体异养鞭毛虫的丰度和生物量分别介于 100—3200 个/mL 和 35.98—2328.85 $\mu\text{g/L}$ 之间, 周年平均值分别为 1054 个/mL 和 532.93 $\mu\text{g/L}$ 。白洋淀小型异养鞭毛虫 ($<7\ \mu\text{m}$) 的丰度占总丰度的 47.11%, 而生物量只占总生物量的 6.82%; 中型异养鞭毛虫 (约 7—14 μm) 的丰度占总丰度的 37.42%, 生物量占总生物量的 39.21%; 大型异养鞭毛虫 ($>14\ \mu\text{m}$) 的丰度虽只占总丰度的 15.47%, 却贡献了 53.97% 的生物量。相关性分析表明, 异养鞭毛虫丰度与总氮和氨氮呈显著性负相关, 与 pH 值、细菌丰度、纤毛虫丰度及叶绿素 a 含量呈显著性正相关; 异养鞭毛虫生物量与 pH 值、溶解氧、纤毛虫丰度及叶绿素 a 含量显著正相关, 与总氮、氨氮呈显著负相关。结果表明异养鞭毛虫群落在微食物环中起着枢纽作用。

关键词: 异养鞭毛虫; 群落特征; 丰度; 生物量

Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors

ZHAO Yujuan¹, LI Fengchao^{1,*}, ZHANG Qiang², ZHANG Yan²

1 College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China

2 Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Baoding, Baoding 071000, China

Abstract: The significance of free living heterotrophic flagellates in the microbial food web as the main consumers of bacteria and picophytoplankton has now been broadly accepted. However, heterotrophic flagellates have been largely overlooked in limnological studies, mainly because of methodological and taxonomic problems. During the period from April 2010 to March 2011, the planktonic heterotrophic flagellate community parameters, namely abundance, biomass, size distribution, and taxonomic composition were investigated monthly using a live-counting technique. Surface water samples were taken from three sampling sites in Baiyangdian Lake, a typical large shallow fresh water lake in north China. In order to determine the factors related to heterotrophic flagellate communities, twelve environmental factors (including physico-chemical index and biotic parameters), namely pH, water temperature ($^{\circ}\text{C}$), electrical conductivity, dissolved oxygen, total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, chlorophyll-a concentration, the abundance of bacteria, planktonic algae and ciliate were also measured. The relationships between the heterotrophic flagellate community parameters and the environmental factors were also analyzed. Results showed that the water temperature and pH of the three

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31172063); 河北省自然科学基金资助项目 (C2012201010)

收稿日期: 2011-09-22; **修订日期:** 2012-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lifengchao2000@126.com

sampling sites varied from 0.2 °C to 34.2 °C and varied from 7.7 to 9.3 respectively; the annual mean concentration of total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen were in the range of 0.20–1.23 mg/L, 1.70–28.91 mg/L, 0.65–21.63 mg/L and 0.63–2.61 mg/L, respectively; the annual mean concentration of chlorophyll-a varied from 1.4 to 19.3 µg/L; the annual mean abundance of bacteria, planktonic algae and ciliate were in the range of $(1.998–4.827) \times 10^6$ cells/mL, 316–9782 ind./mL, and 1–238 ind./mL, respectively; the abundance and biomass of heterotrophic flagellates in surface water of Baiyangdian Lake were in the range of 100–3200 ind./ml and 35.98–2328.85 µg/L, and the annual mean abundance and biomass of heterotrophic flagellates were 1054 ind./ml and 532.93 µg/L, respectively. Some species, such as *Cyathomonas truncata*, *Paraphysomonas vestita*, *Salpingoeca sphaericola*, *Bodo* spp., *Rhynchomonas nasuta*, *Monas* spp., and *Petalomonas pusilla* were dominant species in Baiyangdian Lake during sampling periods. Heterotrophic flagellates in a smaller size ($< 7 \mu\text{m}$ in length) accounted for 47.11% of the total abundance and accounted for 6.82% of total biomass; Heterotrophic flagellates in a middle size (between $7 \mu\text{m}$ and $14 \mu\text{m}$ in length) accounted for 37.42% of the total abundance and accounted for 39.21% of the total biomass; heterotrophic flagellates in a larger size ($> 14 \mu\text{m}$ in length) accounted for 15.47% of the total abundance but contributed 53.97% of the total biomass. Statistical analysis indicated that the abundance of heterotrophic flagellates is significantly and negatively correlated with total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen, but positively correlated with pH, bacterial abundance, ciliate abundance and chlorophyll a concentrations. However, the biomass of heterotrophic flagellates was positively correlated with pH, dissolved oxygen (DO), ciliate abundance and chlorophyll a concentrations, but negatively correlated with total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen. The data obtained in this study demonstrate that heterotrophic flagellate is not only sensitive to environmental factors, but also a key player in the trophic interaction between bacteria and higher trophic levels.

Key Words: heterotrophic flagellates; community characteristics; abundance; biomass

异养鞭毛虫 (Heterotrophic flagellates, HFL) 是专性以有机质为能源, 无色素体以鞭毛为运动胞器的原生动物生态类群。在水生态系统中, 异养鞭毛虫摄食细菌和微型浮游植物, 它本身亦会被较大的浮游动物所摄食, 在食物网中起营养链接的作用, 是微食物环的重要环节^[1-4]。异养鞭毛虫个体微小, 世代周期短, 周转快, 在生态系统的物质循环和能量流转中具有重要作用^[1]。相对于海洋异养鞭毛虫的研究, 淡水环境中异养鞭毛虫群落生态学研究较少^[5]。白洋淀位于河北省中部, 地处东经 $115^{\circ}38' - 116^{\circ}07'$ 和北纬 $38^{\circ}43' - 39^{\circ}02'$ 之间, 面积 366km^2 , 是华北地区最大的淡水湖泊。近年来随着上游及周边人口增长和工农业发展, 白洋淀富营养化加剧。有关白洋淀浮游藻类、纤毛虫、肉足虫、轮虫、枝角类、桡足类等类群的研究已见报道^[6-10], 但异养鞭毛虫群落的研究尤其是异养鞭毛虫群落与环境因子关系的研究尚未见报道。本文通过系统监测白洋淀异养鞭毛虫丰度、生物量的周年变化, 分析异养鞭毛虫群落特征与环境因子的相关关系, 揭示异养鞭毛虫的生态功能, 为淡水异养鞭毛虫的生态学研究提供基础数据。

1 研究方法

1.1 采样点的设置及采样方法

选择白洋淀 3 个典型湖区: 安新桥、端村和圈头为采样点 (图 1)。安新桥采样点位于府河入淀口, 承接保定市城市污水和工业废水; 端村采样点位于白洋淀湖区边缘, 邻近城镇和综合养殖区; 圈头采样点位于湖泊中心地带。采样时间为 2010 年 4 月至 2011 年 3 月, 每月共采样 1 次, 共 12 次 (其中 2011 年 2 月因湖面结冰, 圈头点未采样)。考虑到白洋淀为浅水型湖泊, 本研究只取表层水样。

1.2 研究方法

1.2.1 水体理化指标的测定

溶氧、水温、电导率及 pH 采用便携式水质监测仪现场测定。总磷 (钼酸铵分光光度法)、总氮 (过硫酸

钾—紫外分光光度法)、氨氮(纳氏试剂光度法)和硝酸盐氮(紫外分光光度法)参照《水和废水监测分析方法》测定^[11]。

1.2.2 生物因子的测定

水样采集后避光保存,带回实验室后立即进行异养鞭毛虫活体计数^[12]。具体方法为:水样轻轻摇匀后,吸取 20 μL 于 0.1 mL 浮游生物计数框中,加盖玻片后于微分干涉显微镜下计数,同时测量虫体大小并按小型($<7\ \mu\text{m}$)、中型(约 7—14 μm)和大型($>14\ \mu\text{m}$)分别记数。异养鞭毛虫生物量的计算参照章宗涉等^[13]所述藻类生物量的计算方法。1 L 水样经鲁哥氏液固定、浓缩后,采用 0.1 mL 浮游生物计数框计数浮游藻类和纤毛虫的数量^[13]。细菌丰度采用 DAPI 荧光染色法计数^[14]。叶绿素 a 含量用热乙醇法测定^[15]。

1.2.3 数据分析

采用 Origin7.5 绘图,SPSS17.0 软件进行相关性分析。

2 研究结果

2.1 白洋淀 3 个采样点表层水环境因子的周年变化

2.1.1 理化指标的周年变化

采样期间白洋淀三个采样点表层水水温、pH 值、电导率、溶解氧、总磷、总氮、氨氮和硝酸盐氮的周年变化趋势见图 2。表层水温介于 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 和 34.2 $^{\circ}\text{C}$ 之间(图 2),最高为 7 月份安新桥采样点的 34.2 $^{\circ}\text{C}$,最低为 1 月份端村采样点的 0.2 $^{\circ}\text{C}$;pH 值介于 7.7—9.3 之间,呈弱碱性水质。安新桥表层水的电导率高于其它两站点。安新桥采样点溶解氧浓度的年均值为 4.73 mg/L,远低于圈头(8.51 mg/L)和端村(9.35 mg/L)两个采样点。安新桥表层水总磷、总氮、氨氮和硝酸盐氮浓度的年均值分别为 1.23 mg/L、28.91 mg/L、21.63 mg/L 和 2.61 mg/L,均高于圈头(年均值分别为 0.20 mg/L、1.70 mg/L、0.65 mg/L 和 0.63 mg/L)和端村(年均值分别为 0.31 mg/L、2.56 mg/L、0.83 mg/L 和 0.90 mg/L),其中安新桥表层水的总氮和氨氮远高于圈头和端村。上世纪 90 年代,每年约有 0.5 亿 m^3 的污水经府河入白洋淀,年排入总磷约 $4.9\times 10^4\ \text{kg}$,总氮约 $4.8\times 10^5\ \text{kg}$ ^[16]。2007 年府河氮、磷浓度仍严重超标,上游焦庄段总磷、总氮年均值分别为 3.07 mg/L 和 47.44 mg/L^[17]。位于府河入淀口的安新桥采样点理化指标的变化与府河废水的排放有关。

2.1.2 生物因子的周年变化

叶绿素 a 含量 采样期间 3 个采样点叶绿素 a 含量介于 1.4—119.3 $\mu\text{g/L}$ 之间(图 3),最高为端村 12 月份的 119.3 $\mu\text{g/L}$,最低为 1 月份安新桥的 1.4 $\mu\text{g/L}$ 。端村表层水叶绿素 a 含量相对较高,年均值为 57.7 $\mu\text{g/L}$;圈头次之,年均值为 30.6 $\mu\text{g/L}$;安新桥最低,为 12.8 $\mu\text{g/L}$ 。上述 3 个采样点叶绿素 a 含量的年均值为 33.7 $\mu\text{g/L}$ 。

藻类的丰度 采样期间 3 个采样点藻类丰度的周年变化见图 3。各采样点藻类丰度介于 316—9782 个/mL 之间,最高点为 2 月份端村采样点的 9782 个/mL,最低点为 12 月份安新桥采样点的 316 个/mL。从各站点藻类丰度的年均值看,端村最高,为 5037 个/mL;圈头次之,为 3057 个/mL;安新桥最低,为 1253 个/mL。3 个采样点藻类丰度年均值的变化趋势和叶绿素 a 一致。圈头藻类丰度在春、秋季较高,夏、冬季较低,3 月和 10 月份出现两个高峰;端村藻类丰度各月份都相对较高,季节变化无明显规律;安新桥藻类丰度春、夏季较高,秋冬季低。

纤毛虫丰度 采样期间各采样点纤毛虫丰度介于 1—238 个/mL 之间(图 3),最高点为 6 月份端村采样

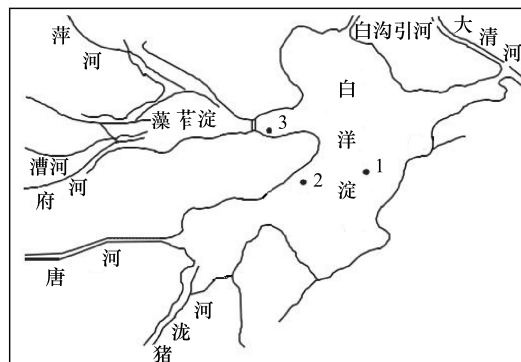


图 1 白洋淀采样点示意图

Fig.1 Sampling sites in Baiyangdian Lake

1. 圈头 2. 端村 3. 安新桥

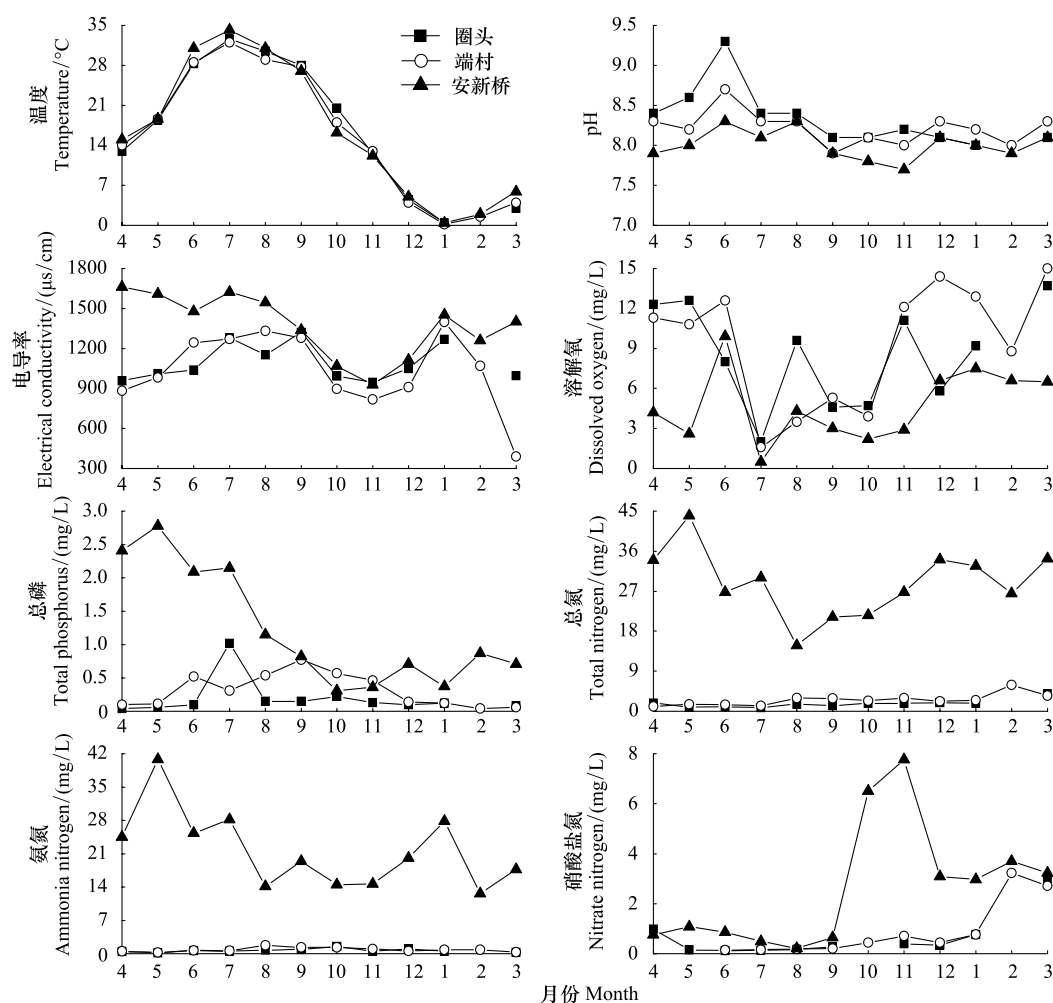


图2 白洋淀3个采样点表层水体理化指标的周年变化

Fig. 2 Annual variations of physical and chemical index in the surface water of the three sampling sites in Baiyangdian Lake

点的238个/mL,最低点为12月和1月份安新桥采样点的1个/mL。端村纤毛虫丰度的年均值最高,为72个/mL;圈头次之,为39个/mL;安新桥最低,为10个/mL。端村纤毛虫丰度季节变化显著,6月份和10月份出现两个峰值;圈头6、7月份纤毛虫丰度较高,冬、春季较低;安新桥纤毛虫丰度周年变化不大。

细菌丰度 各采样点细菌丰度的周年变化趋势见图3,各采样点的细菌丰度介于 $1.998 \sim 14.827 \times 10^6$ cells/mL之间,最高点为7月份圈头采样点的 14.827×10^6 cells/mL,最低点为1月份安新桥采样点的 1.998×10^6 cells/mL。3个采样点细菌丰度均为夏季最高,6、7月份达到高峰,在其它季节波动不大;各站点年平均细菌丰度差异不大,3个采样点年平均值为 4.7627×10^6 cells/mL。

2.2 白洋淀表层水体异养鞭毛虫丰度及生物量的周年变化

白洋淀表层水体异养鞭毛虫丰度及生物量的周年变化见图4。3个采样点异养鞭毛虫丰度介于100—3200个/mL,年均值为1054个/mL;生物量介于35.98—2328.85 $\mu\text{g/L}$ 之间,年均值为532.93 $\mu\text{g/L}$ 。

圈头常见的异养鞭毛虫种类有平截杯隐藻(*Cyathomonas truncata*)、近囊胞藻(*Paraphysomonas vestita*)、球管领鞭虫(*Salpingoeca sphaericola*)等。异养鞭毛虫丰度和生物量分别为225—1817个/mL和73.05—950.37 $\mu\text{g/L}$ 之间。最高丰度为4月份的1817个/mL,最低为1月份的225个/mL,周年均值为1066个/mL。生物量最高为11月份的950.37 $\mu\text{g/L}$,最低为5月份的73.05 $\mu\text{g/L}$,年均值为489.16 $\mu\text{g/L}$ 。

端村常见种类有波豆虫类(*Bodo* spp.)、鼻吻滴虫(*Rhynchomonas nasuta*)以及领鞭毛虫类(Choanoflagellates)。异养鞭毛虫丰度和生物量分别为300—3200个/mL和173.35—2328.85 $\mu\text{g/L}$ 。最高丰

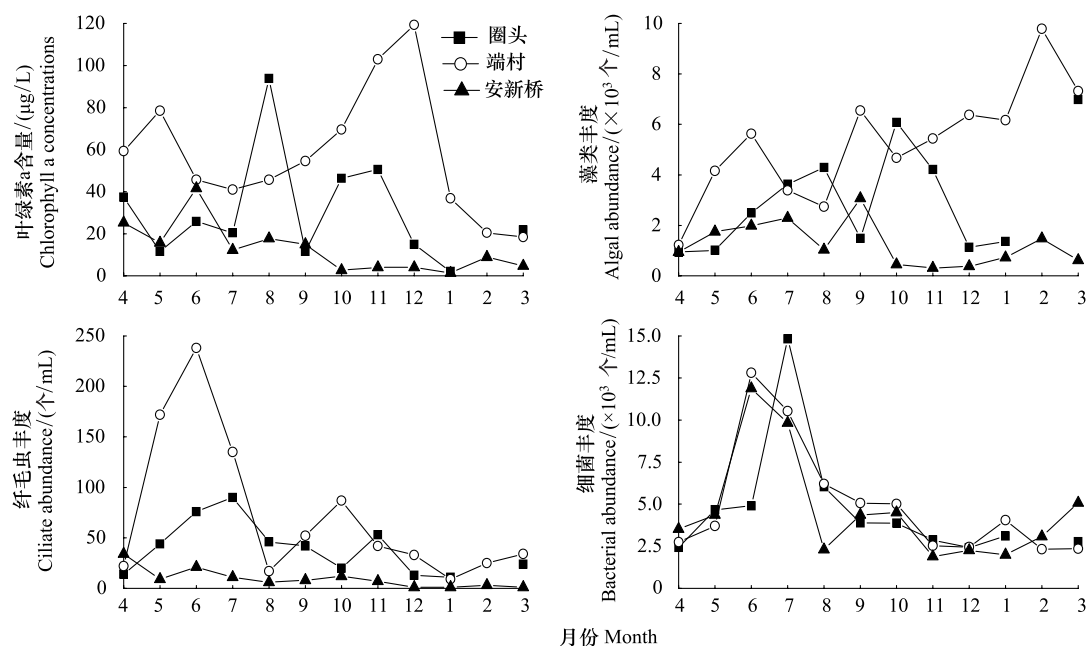


图3 白洋淀表层水体中生物因子的周年变化

Fig. 3 Annual variation of biological factors in the surface water of Baiyangdian Lake

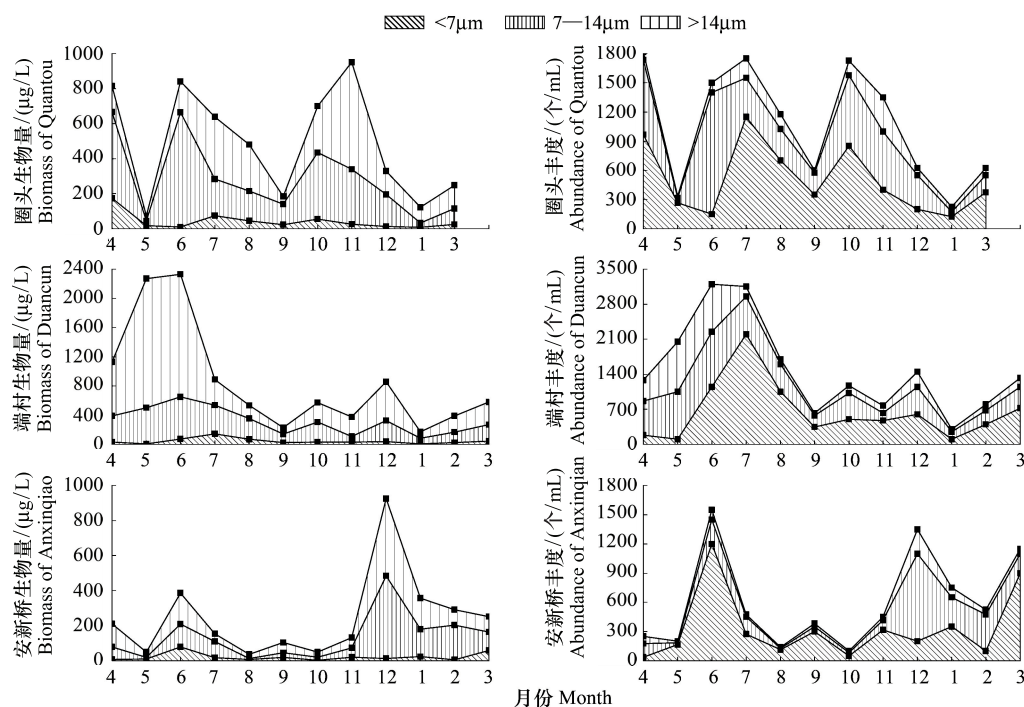


图4 白洋淀表层水体异养鞭毛虫丰度和生物量的周年变化

Fig. 4 Annual variation of abundance and biomass of heterotrophic flagellates in the surface water of Baiyangdian Lake

度为6月份的3200个/mL,最低为1月份的300个/mL。端村异养鞭毛虫丰度于6、7月份达到高峰,其它月份波动不大,周年平均值为1486个/mL。生物量最高为6月份的2328.85 $\mu\text{g/L}$,最低为1月份的173.35 $\mu\text{g/L}$,年均值为860.34 $\mu\text{g/L}$ 。在5、6月份达到高峰,端村异养鞭毛虫生物量与丰度的变化趋势相近。

安新桥常见种类主要有波豆虫类(*Bodo* spp.)、滴虫类(*Monas* spp.)和微小瓣胞藻(*Petalomonas pusilla*)

等。异养鞭毛虫丰度和生物量分别为 100—1550 个/mL 和 35.98—925.65 μg/L。丰度最高为 6 月份的 1550 个/mL,最低为 10 月份的 100 个/mL,年均值为 610 个/mL。安新桥异养鞭毛虫丰度于 6 月和 12 月份出现两次高峰。生物量最高为 12 月份的 925.65 μg/L,最低为 8 月份的 35.98 μg/L,年均值为 245.65 μg/L。安新桥异养鞭毛虫生物量冬、春季较高,也在 6 月和 12 月出现两次高峰。安新桥异养鞭毛虫丰度和生物量显著低于其它两站点,而且由于上游府河污水的不定期排放使安新桥异养鞭毛虫丰度和生物量未表现出明显的季节变化。

3 个采样点小型异养鞭毛虫(<7 μm)的丰度占总丰度的 47.11%,而生物量则只占总生物量的 6.82%;中型异养鞭毛虫(约 7—14 μm)的丰度占总丰度的 37.42%,生物量占总生物量的 39.21%;大型异养鞭毛虫(>14 μm)的丰度虽只占总丰度的 15.47%,却贡献了 53.97%的生物量。

2.3 异养鞭毛虫群落特征与环境因子的相关关系

2.3.1 异养鞭毛虫群落特征与理化因子的相关性

通过 SPSS17.0 对白洋淀 3 个采样点异养鞭毛虫的群落特征(丰度与生物量)与温度、pH 值、电导率、溶解氧、总磷、总氮、氨氮、和硝酸盐氮等理化指标进行相关性分析,结果见表 1。异养鞭毛虫丰度与 pH 值、总氮和氨氮呈显著相关,其中与 pH 值呈显著的正相关,与总氮和氨氮呈显著的负相关;异养鞭毛虫生物量与 pH 值、溶氧、总氮和氨氮呈显著相关,其中与 pH 值和溶氧显著正相关,而与总氮和氨氮呈显著负相关。异养鞭毛虫丰度和生物量与温度、电导率、总磷和硝酸盐氮相关性不显著。

表 1 白洋淀异养鞭毛虫与理化因子的相关系数

	温度 Temperature	pH	电导率 Electrical conductivity	溶解氧 Dissolved oxygen	总磷 Total phosphorus	总氮 Total nitrogen	氨氮 Ammonia nitrogen	硝酸盐氮 Nitrate nitrogen
异养鞭毛虫丰度 Abundance of HFL	0.222	0.475 **	-0.263	0.181	-0.247	-0.339 *	-0.351 *	-0.258
异养鞭毛虫生物量 Biomass of HFL	0.125	0.442 **	-0.309	0.358 *	-0.274	-0.364 *	-0.366 *	-0.243

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

2.3.2 异养鞭毛虫群落与生物因子的相关关系

异养鞭毛虫的群落特征(丰度与生物量)与细菌丰度、纤毛虫丰度、藻类丰度以及叶绿素 a 含量等生物因子的相关性分析结果见表 2。异养鞭毛虫丰度与细菌丰度、纤毛虫丰度和叶绿素 a 含量呈显著性正相关,与藻类丰度相关性不显著;异养鞭毛虫生物量与纤毛虫丰度及叶绿素 a 含量呈显著性正相关,与细菌丰度以及藻类丰度相关性不显著。

表 2 白洋淀异养鞭毛虫丰度和生物量与生物因子的相关关系

	细菌丰度 Bacteria abundance	纤毛虫丰度 Ciliate abundance	藻类丰度 Algae abundance	叶绿素 a 含量 Chlorophyll-a concentration
异养鞭毛虫丰度 Abundance of HFL	0.433 **	0.671 **	0.195	0.360 *
异养鞭毛虫生物量 Biomass of HFL	0.254	0.800 **	0.235	0.437 **

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

纤毛虫和细菌作为异养鞭毛虫的捕食者和被捕食者在微食物环中有着重要的地位,经相关性分析发现,纤毛虫的丰度与细菌丰度显著相关($r=0.528$, $P<0.01$),同时也与叶绿素 a 含量显著性相关($r=0.366$, $P<0.05$),而与藻类丰度的相关性不显著。

3 讨论

3.1 白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其周年变化

根据舒金华等^[18]提出的中国湖泊营养类型的分类标准,从白洋淀 3 个采样点表层水总磷、总氮的含量看,圈头和端村为富营养化,安新桥为超富营养化;按叶绿素 a 含量的标准,3 个站点均为富营养化。综合总磷、总氮和叶绿素 a 含量 3 项指标,3 个站点富营养化水平的顺序为:安新桥>端村>圈头。已有的研究结果表明,淡水湖泊异养鞭毛虫随水体富营养化程度的升高而增大。武汉东湖异养鞭毛虫丰度和生物量在超富营养化湖区分别为 29200—115000 个/mL 和 3600—14300 $\mu\text{g/L}$,富营养化湖区分别为 22500—83100 个/mL 和 2800—10300 $\mu\text{g/L}$,中富营养化湖区分别为 11200—65200 个/mL 和 1390—8080 $\mu\text{g/L}$ ^[19]。白洋淀 3 个采样点表层水体异养鞭毛虫丰度和生物量分别介于 100—3200 个/mL 和 35.98—2328.85 $\mu\text{g/L}$,周年平均值分别为 1054 个/mL 和 532.93 $\mu\text{g/L}$,低于武汉东湖中富营养化的湖区,与波兰富营养化湖泊 Masurian Lake 异养鞭毛虫丰度((700 $\pm$ 700) — (5800 $\pm$ 1000) 个/mL) 相接近^[20]。上述结果表明异养鞭毛虫的丰度和生物量与白洋淀富营养化的状况基本一致。

白洋淀 3 个采样点异养鞭毛虫的丰度和生物量表现出不同的特征及周年变化规律。端村异养鞭毛虫丰度和生物量周年均值分别为 1486 个/mL 和 860.34 $\mu\text{g/L}$ 均高于圈头(丰度、生物量周年均值分别为 1066 个/mL 和 489.16 $\mu\text{g/L}$) 和安新桥(丰度、和生物量周年均值分别为 1066 个/mL 和 489.16 $\mu\text{g/L}$)。由于圈头位于湖泊中心区,受人为因素的干扰相对较小,异养鞭毛虫丰度和生物量表现出明显的季节性变化;而处于白洋淀湖区边缘、邻近城镇和综合养殖区的端村和处于府河入淀口的安新桥采样点则无明显的季节变化规律,这可能与人为干扰和废水的排放有关。特别是安新桥采样点的总磷、总氮以及氨氮含量极高(图 1),而异养鞭毛虫丰度和生物量却最低,可能与府河污水的毒性胁迫有关^[16-17,21],上述结果也反映了异养鞭毛虫群落对环境因子的敏感性。

3.2 白洋淀异养鞭毛虫与环境因子的相关关系

3.2.1 白洋淀异养鞭毛虫与理化因子的相关关系

白洋淀异养鞭毛虫丰度与 pH 值、总氮和氨氮呈显著相关,其中与 pH 值呈显著的正相关,与总氮、氨氮和溶氧呈显著的负相关;异养鞭毛虫生物量与 pH 值、溶氧、总氮和氨氮呈显著相关;表明上述因子对异养鞭毛虫群落特征有重要影响。pH 值是一个综合性水质指标,其变化受自养生物的光合作用和异养生物的呼吸作用以及有机质分解作用的综合影响,同时 pH 值的变化会影响浮游动物的代谢、生殖与发育等生命活动以及对盐类的吸收^[22]。异养鞭毛虫丰度和生物量均与水体 pH 值显著相关,也间接反映出异养鞭毛虫群落与多种环境因子的复杂关系。异养鞭毛虫丰度和生物量也与氨氮显著相关,而氨氮的毒性较强,其渔业水质标准为 0.2 mg/L,3 个采样点氨氮浓度均高于此标准,已表现出较强的毒性作用。温度是影响浮游生物群落的重要因子,而本文的研究表明白洋淀异养鞭毛虫的丰度和生物量与温度相关性并不显著,表明水体中充足的营养盐和食物来源可以校正低温的影响^[19]。异养鞭毛虫群落同样也会影响到理化因子的变化,异养鞭毛虫将有机质摄食后,能够将超过自身需求的那部分氮、磷以铵盐和磷酸盐的形式释放出来,促进浮游植物和细菌生长^[1]。

3.2.2 白洋淀异养鞭毛虫与生物因子的相关关系

生态学者曾长期将异养鞭毛虫视为单一的菌食者类群。最近的研究表明,除菌食者(Bacterivores)外,还包括植食者(Herbivores)、食碎屑(Detritivores)和渗透营养(Osmotrophs)者,甚至有些种类为混合营养者(Mixotrophy)。在捕食食物链中,异养鞭毛虫扮演细菌和微型浮游植物捕食者的角色,同时它本身也是其它原生动物和后生动物的饵料;在碎屑食物链中,异养鞭毛虫是 DOM 和 POM 的重要摄食者^[1,5],通过打包作用,将营养向下一营养级传递。本研究异养鞭毛虫丰度与细菌丰度、纤毛虫丰度和叶绿素 a 含量呈显著性正相关;异养鞭毛虫生物量与纤毛虫丰度及叶绿素 a 含量呈显著性正相关的结果,表明异养鞭毛虫与细菌、纤毛虫和自养的单细胞藻类存在紧密的食物联系。由于上述生物因子是构成微食物环的研究的重要组成,加之异

养鞭毛虫摄食方式多样,食性广泛,使其在微食物环中起着枢纽作用。

本研究异养鞭毛虫丰度及生物量均与叶绿素 a 含量显著相关,而与藻类丰度相关性不显著;异养鞭毛虫丰度与细菌丰度显著相关,而其生物量却与细菌丰度相关性不显著的结果可能与以下因素有关:1)异养鞭毛虫种类繁多、个体大小差异极大,且食性多样,其丰度主要以小型个体决定,而生物量主要以大型个体决定;2)由于白洋淀水体悬浮颗粒较多,浮游生物框法准确计数 5 μm 以上的藻体较为困难,而水体中小于 5 μm 的藻类对叶绿素 a 含量有较大的贡献,这就造成了藻类丰度和叶绿素 a 含量的不对等性。上述结果尚需进一步研究证实。

References:

- [1] Li F C, Cao W R, Kang X J. Diversity and ecological function of free-living heterotrophic flagellates. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 5023-5029.
- [2] Gifford D J. The protozoan-metazoan trophic link in pelagic ecosystems. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 1991, 38(1): 81-86.
- [3] Hondeveld B J M, Nieuwland G, van Duyl F C, Bak R P M. Temporal and spatial variations in heterotrophic nanoflagellate abundance in North Sea sediments. *Marine Ecology progress Series*, 1994, 109: 235-243.
- [4] Epstein S S. Microbial food webs in marine sediments. I. Trophic interactions and grazing rates in two tidal flat communities. *Microbial Ecology*, 1997, 34(3): 188-198.
- [5] Pan K, Huang L F, Guo F, Huang B Q. The quantitative relationship between flagellates and suspended particles in the Huanghai Sea and the East China Sea in summer. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(6): 107-115.
- [6] Gao Y R, Xu M Q. Study on Water Pollution Control for Baiyangdian Lake Area. Beijing: Science Press, 1994: 154-164.
- [7] Xu M Q. Evaluation of self-purification efficiency of Fuhe Stream-Baiyangdian Lake through zooplankton. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, 20(3): 212-218.
- [8] Xu M Q, Zhu J, Cao H. The relationship between the protozoan community diversity and the water quality in the Baiyangdian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1114-1120.
- [9] Zhang Y W, Liu C Q, Xing X G, Wang J X, Zhang Y J. Cladocerans and copepods in Baiyangdian Lake of Hebei province. *Sichuan Journal of Zoology*, 2008, 27(5): 730-730.
- [10] Li F C, Zhao Y J, Zhang Q, Zhang Y, Li L. Preliminary study on the diversity and community structure of rotifer in Baiyangdian Lake. *Sichuan Journal of Zoology*, 2011, 30(5): 734-736.
- [11] State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and Analyzing Method of Water and Waste Water. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [12] Markus W, Hartmut A. Structure of the heterotrophic flagellate community in the water column of the River Rhine (Germany). *European Journal of Protistology*, 2003, 39(3): 287-300.
- [13] Zhang Z S, Huang X F. Research Methods in Freshwater Plankton. Beijing: Science Press, 1991.
- [14] Ke L, Hong H S. Brief introduction of methods to study the grazing rate of protozoa in marine ecosystems. *Ocean Science*, 1999, (1): 40-43.
- [15] Zhang L B, Wang Q S, Xu H X, Ding L L, Ren H Q. Discussion on measurement of chlorophyll-a in phytoplankton with ethanol. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 24(6): 9-10.
- [16] Wen L Q. Eco-environmental change and impact factors in Baiyangdian Lake. *Environmental Science*, 1995, 16(Suppl1): 50-52.
- [17] Wang J, Pei Y S, Yang Z F. Effects of nutrients on the plant type eutrophication of the Baiyangdian Lake. *China Environmental Science*, 2010, 30(Suppl1): 7-13.
- [18] Shu J H, Huang W N, Wu Y G. Studies on the classification of trophic types of China's Lakes. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(3): 193-200.
- [19] Zhao Y F. Studies on Biology of Free-Living Heterotrophic Flagellates [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [20] Chróst R J, Tomasz A, Krystyna K. Abundance and structure of microbial loop components (bacteria and protists) in lakes of different trophic status. *Journal of Microbiology Biotechnology*, 2009, 19(9): 858-868.
- [21] Li F C, Feng W S, Wang J X, Wang H W, Guan Y Q, Shen Y F. Ecotoxicity of industrial wastewater from Baoding City to microbial communities in the Baiyangdian Lake. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, 11(3): 315-318.
- [22] Hou L L. Study on the Community Characteristics of Zooplankton of Gaotang Lake in Huainan [D]. Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2007.

参考文献:

- [1] 李凤超, 曹卫荣, 康现江. 自由生活的异养鞭毛虫多样性及生态功能. 生态学报, 2009, 29(9): 5023-5029.
- [5] 潘科, 黄凌风, 郭丰, 黄邦钦. 夏季黄海、东海鞭毛虫的丰度与悬浮颗粒物的关系. 海洋学报, 2005, 27(6): 107-115.
- [6] 高玉荣, 许木启. 白洋淀区域水污染控制研究. 北京: 科学出版社, 1994: 154-164.
- [7] 许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果. 水生生物学报, 1996, 20(3): 212-218.
- [8] 许木启, 朱江, 曹宏. 白洋淀原生动物群落多样性变化与水质关系研究. 生态学报, 2001, 21(7): 1114-1120.
- [9] 张跃伟, 刘存歧, 邢晓光, 王军霞, 张亚娟. 河北白洋淀的枝角类和桡足类. 四川动物, 2008, 27(5): 730-730.
- [10] 李凤超, 赵玉娟, 张强, 张彦, 李丽. 白洋淀轮虫多样性与群落结构的初步研究. 四川动物, 2011, 30(5): 734-736.
- [11] 国家环境保护总局. 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.
- [13] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [14] 柯林, 洪华生. 海洋生态系统中原生动物摄食速率的研究方法简述. 海洋科学, 1999, (1): 40-43.
- [15] 张丽彬, 王启山, 徐新惠, 丁丽丽, 任洪强. 乙醇法测定浮游植物叶绿素 a 含量的讨论. 中国环境监测, 2008, 24(6): 9-10.
- [16] 文丽青. 白洋淀水生态环境的变迁及影响因素. 环境科学, 1995, 16(增刊): 50-52.
- [17] 王珺, 裴元生, 杨志峰. 营养盐对白洋淀草型富营养化的驱动与限制. 中国环境科学, 2010, 30(增刊): 7-13.
- [18] 舒金华, 黄文钮, 吴延根. 中国湖泊营养类型的分类研究. 湖泊科学, 1996, 8(3): 193-200.
- [19] 赵玉娟. 自由生活异养鞭毛虫的生物学研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2000.
- [21] 李凤超, 冯伟松, 王军霞, 王宏伟, 管越强, 沈韞芬. 保定市工业废水对白洋淀微生物群落的生态毒性. 应用与环境生物学报, 2005, 11(3): 315-318.
- [22] 侯来利. 淮南市高塘湖水域浮游动物群落特征研究[D]. 安徽: 安徽理工大学, 2007.

CONTENTS

Widespread of anaerobic ammonia oxidation bacteria in an eutrophic freshwater lake wetland and its impact on nitrogen cycle	WANG Shanyun, ZHU Guibing, QU Dongmei, et al (6591)
Responses of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent	XIA Mengjing, MIAO Ying, LU Zhaohua, et al (6599)
Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream	ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al (6609)
An index of biological integrity: developing the methodology for assessing the health of the Baiyangdian wetland	CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al (6619)
MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake	LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al (6628)
The diversity of invasive plant <i>Spartina Alterniflora</i> rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary	ZHANG Zhengya, DING Chengli, XIAO Ming (6636)
Analyzing the azimuth distribution of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in subtropical regions of eastern China using the harmonic analysis	ZHAO Xingyun, LI Baohui, WANG Jian, et al (6647)
In the process of grassland degradation the spatial pattern and spatial association of dominant species	GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (6661)
Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan	TAN Bo, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (6670)
Simulating the effects of forestry classified management on forest biomass in Xiao Xing'an Mountains	DENG Huawei, BU Rencang, LIU Xiaomei, et al (6679)
The simulation of three-dimensional canopy net photosynthetic rate of apple tree	GAO Zhaoquan, ZHAO Chenxia, ZHANG Xianchuan, et al (6688)
The effect of <i>Phomopsis</i> B3 and organic fertilizer used together during continuous cropping of strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> Duch) ...	HAO Yumin, DAI Chuanchao, DAI Zhidong, et al (6695)
Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties	SU Dongxue, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (6705)
Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of <i>Eremosparton songoricum</i> populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China	ZHANG Yongkuan, TAO Ye, LIU Huiliang, et al (6715)
Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China	WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong (6726)
Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng	WU Zhongxin, ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, et al (6737)
Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009	YANG Qing, WANG Zhenliang, FAN Jingfeng, et al (6747)
Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China	MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qianet al (6755)
Additive partition of species diversity across multiple spatial scales in community culturally protected forests and non-culturally protected forests	GAO Hong, CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun (6767)
Environmental perception of farmers of different livelihood strategies: a case of Gannan Plateau	ZHAO Xueyan (6776)
Application and comparison of two prediction models for groundwater dynamics	ZHANG Xia, LI Zhanbin, ZHANG Zhenwen, et al (6788)
Pollination success of <i>Phaius delavayi</i> in Huanglong Valley, Sichuan	HUANG Baoqiang, KOU Yong, AN Dejun (6795)
Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil	YANG Yang, MENG Denglong, QIN Hongling, et al (6803)
Archaea diversity in water of two typical brackish lakes in Xinjiang	DENG Lijuan, LOU Kai, ZENG Jun, et al (6811)
Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors	ZHAO Yujuan, LI Fengchao, ZHANG Qiang, et al (6819)
Effects of bisphenol A on the toxicity and life history of the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LU Zhenghe, ZHAO Baokun, YANG Jiaxin (6828)
Effect of incubation temperature on behavior and metabolism in the Chinese cornsnake, <i>Elaphe bimaculata</i>	CAO Mengjie, ZHU Si, CAI Ruoru, et al (6836)
Functional and numerical responses of <i>Mallada besalis</i> feeding on <i>Coreyra cephalonica</i> eggs	LI Shuiquan, HUANG Shoushan, HAN Shichou, et al (6842)
Stability analysis of mutualistic-parasitic coupled system	GAO Lei, YANG Yan, HE Junzhou, et al (6848)
Effect of ultra-micro powder qiweibaishuan on the intestinal microbiota and enzyme activities in mice	TAN Zhoujin, WU Hai, LIU Fulin, et al (6856)
Review and Monograph	
The effects of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: a review	CHEN Hao, MO Jiangming, ZHANG Wei, et al (6864)
Effect of enhanced CO ₂ level on the physiology and ecology of phytoplankton	ZHAO Xuhui, KONG Fanxiang, XIE Weiwei, et al (6880)
Transboundary protected areas as a means to biodiversity conservation	SHI Longyu, LI Du, CHEN Lei, et al (6892)
Scientific Note	
The energy storage and its distribution in 11-year-old chinese fir plantations in Huitong and Zhuting	KANG Wenxing, XIONG Zhengxiang, HE Jienan, et al (6901)
Spatial pattern of sexual plants and vegetative plants of <i>Stipa krylovii</i> population in alpine degraded grassland	REN Heng, ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, et al (6909)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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 32 卷 第 21 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 21 (November, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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 70.00 元