

DOI: 10.5846/stxb201307031828

王捷, 冯佳, 谢树莲, 张建民, 程革, 连耀俊. 汾河太原河段浮游植物多样性及微囊藻产异味物质成因. 生态学报, 2015, 35(10): 3357-3363.

Wang J, Feng J, Xie S L, Zhang J M, Cheng G, Lian Y J. Phytoplankton diversity and off-flavor-producing *Microcystis* in the Taiyuan region of the Fenhe River. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3357-3363.

汾河太原河段浮游植物多样性及微囊藻产异味物质成因

王 捷^{1,2}, 冯 佳^{1,2}, 谢树莲^{1,2,*}, 张建民^{1,2}, 程 革^{1,2}, 连耀俊^{1,2}

1 山西大学生命科学学院, 太原 030006

2 太原市汾河景区管理委员会, 太原 030002

摘要: 2012 年 7 月和 10 月, 对汾河太原河段浮游植物多样性及微囊藻产异味物质进行了调查研究, 并对其水质进行了评价。结果显示: (1) 共鉴定出浮游植物 6 门 65 属 126 种, 其中绿藻门种类最多, 有 25 属 57 种, 其次为硅藻门, 有 26 属 40 种, 蓝藻门有 9 属 20 种, 其它门种类相对较少, 包括裸藻门 2 属 5 种, 甲藻门 2 属 2 种, 隐藻门 1 属 2 种; (2) 2012 年 7 月份的优势种为蓝藻门的微小平裂藻 (*Merismopedia tenuissima*)、不定微囊藻 (*Microcystis incerta*), 硅藻门的尖针杆藻 (*Synedra acus*), 绿藻门的四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*)、美丽网球藻 (*Dictyosphaerium pulchellum*) 和甲藻门的微小多甲藻 (*Peridinium pusillum*), 10 月份的优势种为蓝藻门的微小平裂藻、阿氏浮丝藻 (*Planktothrix agardhii*)、两栖颤藻 (*Oscillatoria amphibia*), 硅藻门的尖针杆藻, 绿藻门的四尾栅藻和隐藻门的嗜蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*); (3) 2012 年 7 月份和 10 月份迎泽桥段浮游植物平均细胞密度分别为 188.28×10^6 个/L 和 58.66×10^6 个/L, 南内环桥段浮游植物平均细胞密度分别为 83.78×10^6 个/L 和 65.99×10^6 个/L, 表明水体为富营养型; (4) Margalef 多样性指数 (*D*) 为 2.04—2.68, Shannon-Wiener 多样性指数 (*H*) 为 0.49—1.00, Pielou 均匀度指数 (*J*) 为 0.13—0.26, 数据分析显示汾河太原河段水质为中度污染至重污染; (5) 通过对分离纯化的微囊藻挥发性异味物质的检测, 8 株微囊藻中有 6 株可产生明显的异味。经过嗅味判断及与常见异味种类标准品的比对, 确定这 6 株微囊藻产生的异味物质主要为 β -环柠檬醛 (β -cyclocitral)。

关键词: 汾河太原河段; 浮游植物; 多样性; 微囊藻; 异味物质; 水质评价

Phytoplankton diversity and off-flavor-producing *Microcystis* in the Taiyuan region of the Fenhe River

WANG Jie^{1,2}, FENG Jia^{1,2}, XIE Shulian^{1,2,*}, ZHANG Jianmin^{1,2}, CHENG Ge^{1,2}, LIAN Yaojun^{1,2}

1 School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Management Committee of Taiyuan Scenic Segment of Fenhe River, Taiyuan 030002, China

Abstract: The Taiyuan region of the Fenhe River is a large park with a theme of “people, city, ecosystem and culture”, which promotes relaxation, vacationing and sightseeing. This portion of the river is approximately 12 km in length, 500 m in width and covers an area of 600 hm². In recent years, the influx of domestic and industrial sewage in the upper reaches of the Fenhe River has caused the self-cleaning capacity of the river to deteriorate, degraded the river's water quality and enhanced eutrophication in the water body. Subsequently, sensitive species of phytoplankton have dramatically reduced, resulting in a decline in the river's diversity index and a more simplified community structure, which is prone to cyanobacteria blooms. To date, more than 60% of the lakes in China have been subject to eutrophication and have suffered

基金项目: 山西省自然科学基金项目 (2011011036); 山西省社会发展科技攻关项目 (20130313010-4)

收稿日期: 2013-07-03; 网络出版日期: 2014-05-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiesl@sxu.edu.cn

from cyanobacteria blooms. *Microcystis* is the most frequently reported cyanobacteria genus. It has long been a primary focus of attention because of its potential to produce microcystins and to cause an undesirable taste and odor in freshwater sources. In 2011, the section of river in Taiyuan was subject to an unprecedented cyanobacteria bloom over a large area. While the affected waters spanned a length of several kilometers, the area between the Yingze Bridge and the Nanneihuan Bridge was the most seriously affected. To control eutrophication and prevent the recurrence of blooms, phytoplankton diversity and the presence of odorous compounds produced by *Microcystis* were investigated in the Taiyuan region of the Fenhe River. The water quality assessment was based on data collected during July and October, 2012. A total of 126 phytoplankton species belonging to 65 genera and 6 divisions were identified. Among these, the Chlorophyta was the most dominant division, including 57 species from 25 genera, followed by Bacillariophyta, with 40 species from 26 genera, Cyanophyta with 20 species from 9 genera, Euglenophyta, with 5 species from 2 genera, Dinophyta with 2 species from 2 genera and Cryptophyta, with 2 species from a single genus. The dominant species in July 2012 comprised *Merismopedia tenuissima* and *Microcystis incerta* (Cyanophyta), *Synedra acus* (Bacillariophyta), *Scenedesmus quadricauda* and *Dictyosphaerium pulchellum* (Chlorophyta), *Peridinium pusillum* (Pyrrophyta). In October 2012, the prevalent species were *Merismopedia tenuissima*, *Planktothrix agardhii* and *Oscillatoria amphibia* (Cyanophyta), *Synedra acus* (Bacillariophyta), *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta), *Cryptomonas erosa* (Cryptophyta) in October, 2012. The average cell densities of phytoplankton were 188.28×10^6 cells/L and 58.66×10^6 cells/L at the Yingze Bridge area in July and October 2012, respectively. Meanwhile, the average cell densities of phytoplankton were 83.78×10^6 cells/L and 65.99×10^6 cells/L at the Nanneihuan Bridge area in July and October, 2012, respectively. This indicated that the water body was eutrophic. The Margalef index ranged from 2.04 to 2.68, and the Shannon-Wiener index ranged from 0.49 to 1.00 and the Pielou evenness index ranged from 0.13 to 0.26 at this location. These three indices revealed that the water quality was medium to heavy polluted. Eight purified *Microcystis* strains were isolated from the samples, and their volatile odorous compounds were determined by gas chromatography and flavor analysis. Among these, six strains were found to produce the odorous compound β -cyclocitral. The presence of these problematic species and the resulting compounds highlight the need to improve the water quality in the Taiyuan section of the Fenhe River, to prevent the recurrence of blooms.

Key Words: Taiyuan region of the Fenhe River; phytoplankton; diversity; *Microcystis*; odorous compound; water quality assessment

浮游植物是水生态系统中的初级生产者和溶解氧供应者,是水体中食物链和食物网的基础,维持着水生生态系统的平衡和健康^[1-2]。水环境的变化(尤其是温度和营养盐的变化)会直接影响浮游植物的生物量及群落结构^[3]。目前,随着水体富营养化问题日趋严重,已出现敏感型浮游植物种类大量消失,多样性指数减小,群落结构趋于简单,水质下降等问题^[4]。利用浮游植物评价水体营养水平已受到国内外广泛重视^[5]。

水体富营养化引起的蓝藻水华是全球关注的重要环境问题^[6]。最常见的是微囊藻水华,在生长和分解过程中能产生具有危害的微囊藻毒素(microcystins, MCs)和挥发性的异味代谢产物。目前研究较多的藻源异味物质是2-甲基异茨醇(MIB)、土嗅素(geosmin)、 β -紫罗兰酮(β -ionone)和 β -环柠檬醛(β -cyclocitral)^[7-8]。异味的产生,导致饮用水水质下降,增加了处理成本,对渔业经济造成不可估量的损失,也对风景区的美学价值带来负面影响^[9]。我国的巢湖、东湖、滇池、太湖都发生过水体异味事件,导致当地饮用水危机^[10-13]。由于水体异味生物源广泛、生物活动周期长和产异味类群定位困难,特别是藻源异味,在水环境评价及水处理中已受到关注。

汾河太原河段集休闲、度假、观光旅游为一体,是一个以“人、城市、生态、文化”为主题的大型公园,目前全长 12 km,宽 500 m,占地 600 hm²^[14-15]。2011 年,该河段曾爆发罕见的大面积蓝藻水华,污染水域长达数公里,尤以迎泽大桥到南内环桥段最严重。因此,本文以这段水体为研究对象,分析了其浮游植物群落结构的时

空变化,对其富营养化状况进行评价,并分离纯化水体中的微囊藻细胞,对其产异味物质进行分析,以期对汾河太原河段富营养化调控和水华防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间及位点

2012年7月3日和26日、10月9日和26日,在山西省太原市汾河迎泽大桥和南内环桥段设采样位点(图1),共采样4次。

1.2 样品采集与处理

按照有关文献^[16]采集样品。定量样品采集水样1000 mL,放入贴有标签的标本瓶中,加入15 mL 鲁哥氏剂(Lugol's)现场固定,在室内静置48 h,再浓缩至30 mL,摇匀后,取0.1 mL 浓缩水样于浮游生物计数框中,在10×40倍光学显微镜下计数^[17-18]。定性样品采集用

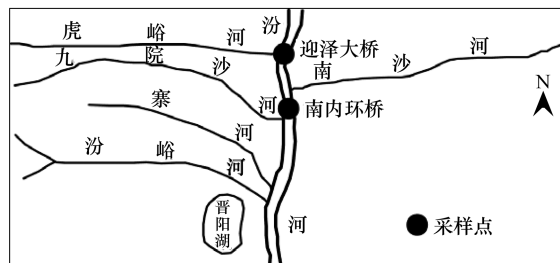


图1 汾河太原河段采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Taiyuan region of the Fenhe River

25号浮游生物网在水体中采集多次,置于两个50 mL采样瓶中,其中一个采样瓶中加入少量的福尔马林固定,用于种类鉴定,另一个采样瓶中为活体水样,带回实验室后,采用经典的毛细管法,即巴斯德吸管制作的毛细管(Pasteur Micropipette)在解剖镜下挑取单个微囊藻群体,ddH₂O清洗6—8次,最后放入含有2 mL MA培养基^[19]的24孔培养平板中培养,4—5周便可得到单克隆藻种。纯化后的微囊藻藻种编号分别为FH0001、FH0002、FH0003、FH0004、FH0005、FH0006、FH0007、FH0008,保存于山西大学生命科学学院藻种库中。

1.3 藻类多样性指数、均匀度指数及优势度计算

Margalef多样性指数^[20-21]为 $D = (S-1) / \ln N$,式中 S 为种类数, N 为个体数; D 值越大水质越清洁:0—1为重度污染,1—2为严重污染,2—4为中度污染,4—6为轻度污染,大于6为清洁水。

Shannon-Wiener多样性指数^[20-21]为 $H = -\sum (n_i / N) \ln (n_i / N)$,式中, H 值越大水质越清洁:0—1为重度污染,1—3为中污染,大于3为轻污染或无污染。

Pielou均匀度指数^[20-21] $J = H / \ln S$,式中, H 为Shannon-Wiener多样性指数, S 为种类数;求得浮游植物的均匀度指数 J 值0—0.3为重污染,0.3—0.5为中污染,0.5—0.8为轻污染或无污染。

优势度的计算方法按照Mcnaughton优势度指数^[20-21] $Y = n_i / N \times f_i$,求得浮游植物优势度指数,式中 n_i 为第 i 种的个体数, N 为站位中浮游植物总个数, f_i 为第 i 种在各站位中出现的频率。

1.4 微囊藻产异味物质检测

微囊藻藻株产生的异味物质通过顶空固相微萃取-气象色谱法(HS-SPME-GC)测定^[10]。准确吸取处于对数生长期的微囊藻藻液3 mL于25 mL棕色螺口瓶中,补充超纯水至10 mL,加入3.0 g经550℃烘烤6 h的NaCl和一个小的磁力搅拌器转子,将棕色螺口瓶置于磁力搅拌器上60℃水浴预热15 min,搅拌器转子转速调为500 rpm/min,固相微萃取装置固定于螺口瓶上方,将萃取头插入瓶内部顶空萃取45 min,萃取结束后将萃取头拔出,立即插入GC进样口中进行解吸附与GC分析。

分析所用仪器为GC-2014C气相色谱仪,FID检测器(岛津,日本),毛细管色谱柱为GL TC series Wonda Cap 5(0.25 mm×30 m×0.25 μm),固相微萃取(SPME)装置、65 μm聚二甲基硅氧烷/二乙烯基苯涂层纤维(PDMS/DVB)萃取头和25 mL带PTFE涂层硅橡胶垫的棕色螺口瓶均为Supelco®(Sigma-Aldrich公司,美国)产品。 β -环柠檬醛(β -cyclocitral)和 β -紫罗兰酮(β -ionone)标样购自Sigma-Aldrich公司,Geosmin标准品(100 μg/mL)和2-MIB标准品(2-甲基异茨醇,100 μg/mL)为美国Supelco® Sigma-Aldrich公司试剂,NaCl为分析纯(上海国药)。

GC的分析条件^[10]:载气高纯为高纯N₂(≥99.99%),恒压150 KPa;H₂恒压45 KPa,空气恒压40 KPa;无

分流进样 (splitless) 模式, 进样口温度 250 ℃, FID 检测器 270 ℃, 毛细管柱温度程序为 60 ℃, 2 min $\xrightarrow{5^\circ\text{C}/\text{min}}$ 200 ℃, 2 min $\xrightarrow{20^\circ\text{C}/\text{min}}$ 250 ℃, 2 min。

2 结果和分析

2.1 浮游植物区系组成及优势种

通过对采集样品的观察, 共鉴定出浮游植物 126 种, 隶属于 6 门 65 属, 区系组成主要以绿藻、硅藻、蓝藻为主, 其中绿藻门种类最多, 有 25 属 57 种, 占总种数的 45.0%, 其次为硅藻门, 有 26 属 40 种, 占总种数的 31.7%, 蓝藻门有 9 属 20 种, 占总种数的 15.9%, 其它门种类相对较少, 裸藻门 2 属 5 种, 甲藻门 2 属 2 种, 隐藻门 1 属 2 种, 共占总种数的 7.4%。

根据样点中浮游植物出现的频率和相对丰度, 以优势度 $Y>0.02$ 来界定优势种。经计算, 两个样点 7 月份的优势种为蓝藻门的微小平裂藻 (*Merismopedia tenuissima*)、不定微囊藻 (*Microcystis incerta*), 硅藻门的尖针杆藻 (*Synedra acus*), 绿藻门的四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*)、美丽网球藻 (*Dictyosphaerium pulchellum*) 和甲藻门的微小多甲藻 (*Peridinium pusillum*), 10 月份的优势种为蓝藻门的微小平裂藻、阿氏浮丝藻 (*Planktothrix agardhii*)、两栖颤藻 (*Oscillatoria amphibia*), 硅藻门的尖针杆藻, 绿藻门的四尾栅藻和隐藻门的嗜蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*)。

2.2 浮游植物细胞密度

浮游植物细胞密度是反映水体富营养化程度的重要指标。2012 年 7 月份和 10 月份迎泽桥段浮游植物平均细胞密度分别为 188.28×10^6 个/L 和 58.66×10^6 个/L, 南内环桥段浮游植物平均细胞密度分别为 83.78×10^6 个/L 和 65.99×10^6 个/L。从表 1 可以看出, 7 月份和 10 月份, 迎泽桥段和南内环桥段, 均以蓝藻门细胞密度最大, 占总量的 50% 以上。7 月初白天气温在 26 ℃ 以上, 迎泽大桥段和南内环桥段浮游植物细胞密度高达 194.30×10^6 个/L 和 105.40×10^6 个/L, 而 10 月底气温已降到 13 ℃ 左右, 浮游植物细胞密度也降低, 为 56.81×10^6 个/L 和 37.57×10^6 个/L。

表 1 汾河太原河段浮游植物细胞密度 ($\times 10^6$ 个/L)

Table 1 Phytoplanktonic cell density in the Taiyuan region of the Fenhe River

门类 Division	7 月 3 日 July 3		7 月 26 日 July 26		10 月 9 日 October 9		10 月 26 日 October 26	
	迎泽大桥	南内环桥	迎泽大桥	南内环桥	迎泽大桥	南内环桥	迎泽大桥	南内环桥
蓝藻门 Cyanophyta	132.80	61.85	150.75	34.85	42.38	82.75	44.80	28.08
绿藻门 Chlorophyta	33.75	23.95	14.85	14.45	8.75	5.33	7.50	5.33
硅藻门 Bacillariophyta	26.85	19.40	16.40	12.65	9.00	1.75	4.38	4.08
甲藻门 Pyrrophyta	0.45	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.08
隐藻门 Cryptophyta	0.35	0.20	0.10	0.10	0.25	4.42	0.00	0.00
裸藻门 Euglenophyta	0.10	0.00	0.15	0.00	0.13	0.17	0.13	0.00
总计 Total	194.30	105.40	182.25	62.15	60.51	94.40	56.81	37.57

2.3 浮游植物多样性

浮游植物多样性对于群落结构的稳定性起着重要作用, 它反映了群落特有的物种组成和个体密度特征, 与物种丰富度和均匀度指数密切相关^[22-23]。Margalef 多样性指数 D 值介于 2.04—2.68 之间, 7 月份平均值为 2.26, 10 月份平均值为 2.60。Shannon-Wiener 多样性指数 H 值介于 0.49—1.00 之间, 7 月份平均值为 0.85, 10 月份平均值为 0.69。Pielou 均匀度指数 J 值介于 0.13—0.26 之间, 7 月份平均值为 0.23, 10 月份平均值为 0.18。

2.4 微囊藻产异味物质检测结果

对分离纯化的微囊藻挥发性异味物质的检测结果表明, 8 株微囊藻中有 6 株 (FH0001、FH0002、FH0003、

FH0004、FH0005、FH0006)可产生明显的异味。经过嗅味判断及与常见异味种类标准品的比对,确定这6株微囊藻产生的异味物质主要为 β -环柠檬醛(β -cyclocitral),其他三类淡水水体常见的异味物质(Geosmin, 2-MIB 和 β -紫罗兰酮)均未检出。GC 的分析结果显示,6株产异味微囊藻的主要挥发性物质具有同 β -环柠檬醛标样一致的色谱学行为。在上述分析条件下其色谱主峰的保留时间与 β -环柠檬醛标样相同(图2)。结合对藻株气味的嗅味判别(烟草味)可以确定这些微囊藻藻株产生的主要异味物质为 β -环柠檬醛。

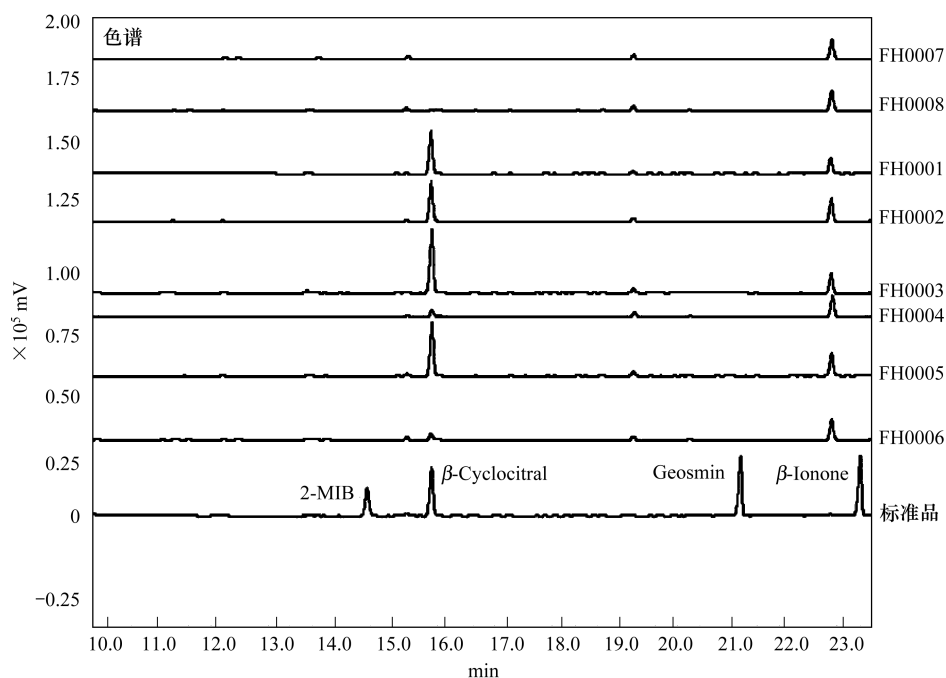


图2 微囊藻藻株溶解性异味化合物与其标准样品的气相色谱图

Fig.2 Gas chromatography (GC) chromatograms of soluble compounds in *Microcystis* strains and the standard sample

3 讨论

3.1 汾河太原河段浮游植物群落特征

浮游植物是水体主要的初级生产者,其群落结构组成和分布对水生态环境起着重要的指示作用,而浮游植物群落结构、优势种类及其变化反映了水体的富营养化程度^[24-26]。一般认为,蓝藻为优势类群指示水体呈富营养化状态,绿藻为优势种指示水体呈中营养化状态,而硅藻为优势种显示水体呈贫营养化状态^[1]。2012年7月和10月共4次调查结果表明,汾河太原河段水体浮游植物以绿藻、硅藻、蓝藻为主,绿藻种类最多,硅藻和蓝藻次之,但蓝藻门细胞密度最高,占绝对优势,表明该区段水体已呈富营养化状态。这和之前对该区段的调查结果相似^[15,27]。在两个季节中优势种群也有一定的变化,7月份除了蓝藻门、绿藻门、硅藻门的一些种类为优势种外,甲藻门的微小多甲藻也为优势种,而10月份隐藻门的嗜蚀隐藻成为了优势种。钱奎梅等^[28]运用浮游植物优势种和生物量的变化研究了太湖富营养化进程。对汾河景区水体富营养化的进一步研究中,也可运用浮游植物优势种和生物量的变化进行调查。

3.2 微囊藻产异味物质

由藻源异味物质引起的水体异味问题已经成为了严重的环境问题,饮用水和水产品中的异味物质也逐渐受到人们的重视,因此,对水体尤其是饮用水源的环境监测变得非常重要。异味包括嗅觉异味和味觉异味,其中嗅觉异味包括土霉味(earthy/musty/moldy)、芳香味(fragrant/vegetable/fruit/flowery)、草木味(grassy/hay/straw/woody)、鱼腥味(fishy/rancid)、沼气味(marshy/swampy)、化学药品味(chemical/hydrocarbon)、氯化物味(chlorineous/ozonous)及药味(medicinal/phenolic)等8类^[29]。水体中藻类产生的异味性次生代谢物种类繁多

多,最常见的是具有土霉味的 2-甲基异莰醇(2-methylisoborneol, 2-MIB)和土嗅素(geosmin, GSM),此外,还有 β -环柠檬醛(β -cyclocitral)、 β -紫罗兰酮(β -ionone)、香叶基丙酮(neryl acetone)和 2,4-癸二烯醛(2,4-decadienal)等^[30]。Juttner 的研究表明, β -环柠檬醛主要是由微囊藻所产生,在发生微囊藻水华的水体中,会有高浓度的 β -环柠檬醛存在^[31]。李林等研究表明,武汉大莲花湖 β -环柠檬醛与微囊藻日变化显著相关^[32]。本研究发现,6 株微囊藻产生的异味物质均为 β -环柠檬醛,这种异味物质可能会给汾河太原河段造成臭味问题,进而影响该段的整体水质^[29,33]。

3.3 汾河太原河段水质评价

浮游植物生物多样性指数是湖泊水质监测的重要指标,广泛应用于水体环境质量评价中^[26,34]。浮游植物的优势种和细胞密度通常也可以反映水体的富营养化程度。蓝藻多是耐污性比较强的种类,其细胞密度急剧增加并最终成为优势类群是水体富营养化的重要表征之一,即蓝藻细胞密度越高,水体富营养化程度越严重^[35]。

本文的研究数据显示,汾河太原河段浮游植物 Margalef 多样性指数 D 值较低,指示水体为中度污染,Shannon-Wiener 多样性指数 H 值介于 0—1 之间,表明浮游植物群落结构简单且不稳定,对环境变化敏感,为重污染水体,Pielou 均匀度指数 J 值介于 0—0.3 之间,表明浮游植物群落中各物种个体数目分配不均匀,优势种明显,为重污染水体。综合分析,汾河景区段水质为中度污染至重污染。据有关文献,浮游植物细胞密度小于 30×10^4 个/L 时水体为贫营养型, 30×10^4 — 100×10^4 个/L 时为中营养型,大于 100×10^4 个/L 时为富营养状态^[36]。2012 年 7 月和 10 月,汾河景区段的浮游植物细胞密度均大于 100×10^4 个/L,并且蓝藻门的细胞密度最大,占总量的 50 % 以上,表明水体为富营养状态。出现这种情况的主要原因是由于气温的升高,上游生活污水和工业废水的排入,导致景区水自净能力降低,水质恶化,水体富营养化程度加重。

致谢:中国科学院水生生物研究所李仁辉研究员对本文写作给予帮助,中国科学院武汉植物园王中杰助理研究员完成对异味物质的测定,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Water*, 2004, 34(3): 236-248.
- [3] 李秋华, 韩博平. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析. *生态学报*, 2007, 27(6): 2355-2364.
- [4] 张俊芳, 冯佳, 谢树莲, 王石会. 山西宁武亚高山湖群浮游植物群落结构特征. *湖泊科学*, 2012, 24(1): 117-122.
- [5] 田志强, 田秉晖, 辛丽花, 贾大伟, 张磊. 于桥水库秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系. *环境污染与防治*, 2011, 33(5): 64-68.
- [6] 施丽梅, 蔡元锋, 杨华林, 李朋富, 孔繁翔, 孔令东. 太湖梅梁湾水华微囊藻基因型组成和产毒微囊藻丰度的变化. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 801-805.
- [7] 齐敏, 孙小雪, 邓绪伟, 陈隽, 谢平. 太湖不同形态异味物质含量、相互关系及其与环境因子关系的探讨. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 31-38.
- [8] Chen J, Xie P, Ma Z M, Niu Y, Tao M, Deng X W, Wang Q. A systematic study on spatial and seasonal patterns of eight taste and odor compounds with relation to various biotic and abiotic parameters in Gonghu Bay of Lake Taihu. *China. Science of the Total Environment*, 2010, 409(2): 314-325.
- [9] 宋立荣, 李林, 陈伟, 甘南琴. 水体异味及其藻源次生代谢产物研究进展. *水生生物学报*, 2004, 28(4): 434-439.
- [10] 李林. 淡水水体中藻源异味化合物的分布、动态变化与降解研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005.
- [11] Guo L. Ecology—doing battle with the green monster of Taihu Lake. *Science*, 2007, 317(5842): 1166-1166.
- [12] 刘立明. 巢湖典型区域水体异味物质时空动态及土霉异味的去除研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2011.
- [13] 徐盈, 黎雯, 吴文忠, 张甬元. 东湖富营养水体中藻菌异味性次生代谢产物的研究. *生态学报*, 1999, 19(2): 212-216.
- [14] 郭春燕, 李砧, 谢树莲. 太原市汾河景区浮游藻类及水质评价研究. *山西大学学报: 自然科学版*, 2006, 29(2): 205-208.
- [15] 王捷, 谢树莲, 王中杰, 徐瑶, 李仁辉. 汾河(太原市景区段)微囊藻的分子多样性及产毒能力. *湖泊科学*, 2011, 23(4): 505-512.

- [16] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 中国科学出版社, 1991: 333-344.
- [17] 陈家长, 孟顺龙, 尤洋, 胡庚东, 瞿建宏, 吴伟, 范立民, 马晓燕. 太湖五里湖浮游植物群落结构特征分析. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1358-1367.
- [18] 庞科, 姚锦仙, 王昊, 刘松涛, 李翀, 吕植. 额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征. 生态学报, 2011, 31(12): 3391-3398.
- [19] Kasai F, Kawachi M, Erata M, Watanabe M M. NIES-Collection List of Strains. 7th ed. Tsukuba: National Institute for Environmental Studies Japan, 2004: 257-257.
- [20] Andersen R A. Diversity of eukaryotic algae. Biodiversity and Conservation, 1992, 1(4): 267-292.
- [21] Broady P A. Diversity, distribution and dispersal of Antarctic terrestrial algae. Biodiversity and Conservation, 1996, 5(11): 1307-1335.
- [22] 沈会涛, 刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析. 湖泊科学, 2008, 20(1): 773-779.
- [23] 王晓臣, 杨兴中, 吕彬彬, 邢娟娟, 张建军, 刘静. 黄河下游浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9819-9821.
- [24] Marchetto A, Padedda B M, Mariani M A, Lugliè A, Sechi N. A numerical index for evaluating phytoplankton response to changes in nutrient levels in deep Mediterranean reservoirs. Journal of Limnology, 2009, 68(1): 106-121.
- [25] 邓建明, 蔡永久, 陈宇炜, 张路. 洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2010, 22(1): 70-78.
- [26] 朱为菊, 王全喜. 滴水湖浮游植物群落结构特征及对其水质评价. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2011, 40(4): 405-410.
- [27] 冯佳, 沈红梅, 谢树莲. 汾河太原段浮游藻类群落结构特征及水质分析. 资源科学, 2011, 33(6): 1111-1117.
- [28] 钱奎梅, 陈宇炜, 宋晓兰. 太湖浮游植物优势种长期演化与富营养化进程的关系. 生态科学, 2008, 27(2): 65-70.
- [29] Sufet I H, Khiari D, Bruchet A. The drinking water taste and odor wheel for the millennium: beyond geosmin and 2-methylisoborneol. Water Science and Technology, 1999, 40(6): 1-13.
- [30] 缪恒锋, 陶文沂. 富营养化水体异味物质的臭氧氧化研究. 环境科学, 2008, 29(12): 3439-3444.
- [31] Juttner F. β -Cyclocitral and alkanes in *Microcystis* (Cyanophyceae). Zeitschrift für Naturforschung, 1976, 31: 491-495.
- [32] 李林, 万能, 甘南琴, 宋立荣. 武汉大莲花湖异味化合物日变化及其相关因子分析. 水生生物学报, 2007, 31(1): 112-118.
- [33] Mattin J F, Suffet I H. Chemical etiologies of off-flavor in channel catfish aquaculture. Water Science and Technology, 1992, 25(2): 73-79.
- [34] 王瑜, 刘录三, 舒俭民, 刘存歧, 朱延忠, 田志富. 白洋淀浮游植物群落结构与水质评价. 湖泊科学, 2011, 23(4): 575-580.
- [35] 王朝晖, 林秋奇, 胡韧, 范春雷, 韩博平. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(2): 117-123.
- [36] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.