

华北典型地表水藻类群落演替特征

范振强¹, 崔福义¹, 马 华¹, 何文杰², 阴沛军²

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090;

2. 天津自来水集团有限公司, 天津 300040)

摘要: 2006年2月-10月,对引滦原水藻类的群落结构及影响因素进行了调查研究。期间引滦原水中共检出藻类7门43属68种,藻类群落结构呈明显的季节性变化。春季和秋季的引滦原水中以绿藻为优势类群,藻类含量较低;夏季水温升高,水华微囊藻大量增殖并成为绝对优势种,藻类含量因而大幅上升,同时导致了原水藻类多样性指数的大幅降低。相关性分析表明,在目前的水质条件下,水温是影响引滦原水藻类群落结构变化的关键因素。

关键词: 引滦水;藻;藻类群落结构;演替;水华微囊藻;生物多样性

中图分类号: X52, TU991.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)02-0114-08

Phytoplankton Community Succession of Typical Surface Water in North China

FAN Zhen-qiang¹, CUI Fu-yi¹, MA Hua¹, HE Wen-jie², YIN Pei-jun²

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China; 2. Tianjin Waterworks Group Co. Ltd., Tianjin 300040, P. R. China)

Abstract: To provide consultation for algae removal, an investigation on phytoplankton community in Yinluan raw water was conducted during February to October 2006. It was shown that there were 68 species of phytoplankton in Yinluan raw water, which belonged to 7 phylum and 43 genera. And the structure of the species and concentration of phytoplankton varied seasonally. Chlorophyta was dominant in spring and autumn with low phytoplankton concentration. in while summer, *Microcystis flos-aquae* was dominant with high phytoplankton concentration, and *Microcystis flos-aquae*'s multiplying sharply lead Shannon index to decline. The correlation analysis indicated that water temperature was the key role in variation of phytoplankton community.

Key words: Yinluan raw water, algae, phytoplankton community, succession, *Microcystis flos-aquae*, biodiversity

如何安全高效又经济地去除富营养化原水的藻类是当前饮用水处理的热点之一。在除藻实践和研究中,水中不同的藻类通常被不加区分地视为一个整体去除对象。然而原水中不同藻类之间存在的生

理或生态特征差异,可导致同一工艺对不同藻类去除效率的不同,如混凝工艺对铜绿微囊藻的去除效果就不如绿藻。另外,原水中某些蓝藻能产生藻毒素,除藻工艺选择不当可造成藻毒素的大量释放^[4,5]

收稿日期: 2009-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(50778048); 国家自然科学基金创新研究群体(50821002); 广西重点实验室研究基金(桂科能0804K014)

作者简介: 范振强(1979-),男,博士研究生,主要从事给水处理研究,(E-mail) fanzhenqiang@gmail.com。

崔福义(联系人),男,教授,博士生导师,主要从事水处理工艺理论与技术研究,(E-mail) cuifuyi@hit.edu.cn。

和消毒副产物产生^[6],从而威胁饮用水水质安全。因此,有必要对原水中的藻类群落结构特征变化以及相关影响因素进行全面了解。该研究对引滦原水藻类群落结构变化进行了调查,分析了藻类含量、藻类群落结构、生物多样性变化趋势及影响因素,为提高除藻效率和除藻工艺选择的针对性提供了有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 样品的取得

在天津某水厂进水口取引滦原水样品,采样时间为2006年2月至2006年10月。

1.2 水质参数的测定

水温、浊度、pH值、高锰酸盐指数、总磷、叶绿素a等参数的检测均按照国家标准方法进行^[7]。

依据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规范》对引滦原水的富营养化水平指数(TLI)进行计算。评价标准:TLI<30,贫营养,30≤TLI≤50,中营养;50<TLI≤60,轻度富营养;60<TLI≤70,中度富营养;TLI>70,为重度富营养。

1.3 藻类的鉴定与计数

取水样量为1L,加鲁哥氏碘液固定。从该水样中取500mL,用醋酸纤维膜(孔径0.65μm)过滤。然后将带有浮游植物的滤膜放入50mL烧杯中,加高纯水定容至30mL。将该盛有滤膜的烧杯放入超声波清洗器中(CBL,C5860A型)振荡10min,取出。以微量移液器吸取0.1mL样品注入0.1mL藻类计数框(中科院武汉水生所定制),在显微镜(OLYMPUS,BX41型)10×40倍镜下分类计数,其中,对群体水华微囊藻也是按细胞计数。镜检50个

视野,根据藻类标准图谱^[8]进行鉴定并分别计数各种藻类的数量,再折算出1L水样中的藻类数量。

1.4 多样性指数的计算

采用Shannon指数表征引滦原水藻类生物多样性,计算方法如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \right) \quad (1)$$

式中:H为Shannon多样性指数,S为藻类种数,N为藻类总量, N_i 为第*i*种藻的藻类含量。

以多样性指数判断污染程度的标准:当H为0~1时,说明水体受到严重污染,当H为1~2时为中等污染,当H为2~3时为轻度污染,当H大于3时说明水体比较清洁。

2 结果与分析

2.1 引滦原水水质

引滦原水水温呈现春季上升,夏季最高,秋季下降的趋势,如表1所示。其中8月份平均水温最高,达27.3℃,最高水温(28.2℃)出现在8月中下旬。引滦原水的pH值在2月-4月间是上升的,但从4月下旬开始,pH值呈现与水温相反的变化趋势。随着水温上升,浊度也在上升,并在春季4月份出现一个小高峰,峰值出现在9月。高锰酸盐指数变化幅度并不大,总磷的高峰期出在夏季,二者的变化趋势与浊度相似。

基于总磷和高锰酸盐指数计算得到的富营养化水平指数(TLI)表明,引滦原水处于中营养~轻度富营养状态,见表1。关于水质变化,将在下文中结合藻类进行深入讨论。

表1 引滦原水水质逐月变化

项目	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
水温/℃	2.30	6.30	12.10	18.60	23.51	26.34	27.30	23.03	20.50
pH值	8.19	8.35	8.63	8.34	7.97	7.82	7.82	7.96	8.00
浊度/(NTU)	0.76	1.82	9.01	5.74	6.57	9.92	11.85	14.23	6.16
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	-	-	3.87	3.45	4.17	3.68	4.16	4.79	3.31
TP/(mg·L ⁻¹)	-	-	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.03
TLI(COD _{Mn})	-	-	36.53	33.69	38.78	35.72	38.87	42.59	32.77
TLI(TP)	-	-	34.95	41.50	45.50	46.81	47.49	50.20	38.96

2.2 引滦原水中的藻类

取样期间,在引滦原水中检出藻类共7门43属68种,其中蓝藻门7属11种,绿藻门21属36种,硅藻门7属10种,隐藻门1属1种,裸藻门5属8种,

甲藻门1属1种,黄藻门1属1种。藻类组成的逐月变化见表2。需要注意的是,在Palmer^[9]所列的能耐污的20个属中,引滦原水中就检出13属。

表2 引滦原水藻类组成逐月变化

序号	门	属	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1		微囊藻属	+	+	+	+	++	++++	++++	++++	++
2		色球藻属					+		+		
3		集胞藻属				+	+	++	+	+	
4	蓝藻门	平裂藻属					+	++	++	++	
5		束球藻属						+++	+++	++	
6		鱼腥藻属				+		+			
7		螺旋藻属				+	+	+			
8	隐藻门	隐藻属		+	+		+	+	+	+	
9		囊裸藻属		+	+	+	+	+	+	+	+
10		鳞孔藻属	+								
11	裸藻门	扁裸藻属			+		+				
12		裸藻属						+	+	+	
13		卡克藻属			+						
14		异极藻属			+	+	+	+	+	+	
15		脆杆藻属		+	+	+	+	++	+	+	+
16		针杆藻属		+							
17	硅藻门	小环藻属	+	+	+	+	+	+	+	+	
18		舟形藻属		+	++	+	+	+	+	+	+
19		冠盘藻属					+	+	+	+	+
20		桥弯藻属			+	+	+	+	+	+	
21		鼓藻属					+	+	+	+	+
22		棒形鼓藻属			+	+		+	+	+	
23		新月藻属			+	+	+	+	+		+
24		角星鼓藻属		+	+	+	+	++	+	+	+
25		多芒藻属					+	+	+	+	+
26		弓形藻属		+	+	+	+	+	+	+	
27		小球藻属	++	++	+++	++	++	+	+	++	++
28		顶棘藻属						+		+	
29		四角藻属	++	++	++	+	++	+	+	+	++
30		蹄形藻属	+	+	+	+	+	+	+	+	
31	绿藻门	月牙藻属	+	+	+	+	+			+	
32		透明针形藻属	+	+	+	+	+	++	+	++	+
33		单针藻属	+	+	++	+	+	+	+	+	+
34		集球藻属	+	+	+		+	+	+	+	
35		纤维藻属	+								
36		盘星藻属		+	+	+	+	+	++	++	+
37		栅藻属	+	+	++	++	++	++	++	++	++
38		十字藻属				+	+	+	+	+	
39		衣藻属	++	+	+	+	++	+	+	+	
40		丝藻属				+					
41		四片藻属		+	++	+	+	+			
42	甲藻门	角甲藻属					+	+			
43	黄藻门	黄丝藻属			+	+	+	+	+	+	
总计		属数	13	20	26	27	33	35	31	31	15
		种数	15	23	38	39	46	46	46	41	18

注:表中“+”,“++”,“+++”,“++++”分别表示藻类含量数量级为 $10^4 \sim 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,空格表示未检出。

引滦原水中以绿藻最为常见。在 9 个月的研究过程中, 每个月都出现的藻种类中属于绿藻的有小球藻、细小四角藻、直透明单针藻和四尾栅藻, 属于蓝藻的有水华微囊藻。出现过 7~ 8 个月的藻种类属于裸藻的有不定囊裸藻, 属于硅藻的有短线脆杆藻、梅尼小环藻、短小舟形藻, 属于绿藻的有纤细角星鼓藻、三角四角藻、扭曲蹄形藻、布朗单针藻、集球藻、单角盘星藻、二角盘星藻纤细变种、丰富栅藻、双对栅藻和球衣藻。

结合表 1 和表 2 分析可知, 引滦原水中检出的藻类种数与水温有一定的相关性, 水温高的月份检出的藻类种数多, 水温低的月份检出的藻类种数相对较少。

2.3 藻类含量及群落结构变化过程

由于引滦原水中叶绿素 a 与藻类总量变化趋势相似, 因此下文将重点分析藻类含量(C)及群落结构变化。

取样期间, 引滦原水藻类群落结构呈现季节性的演替过程。如图 1 所示(横坐标中(m-d)表示月-日), 引滦原水中春季及秋季以绿藻为优势类群, 藻类含量较低; 夏季时蓝藻为优势类群, 藻类含量高。

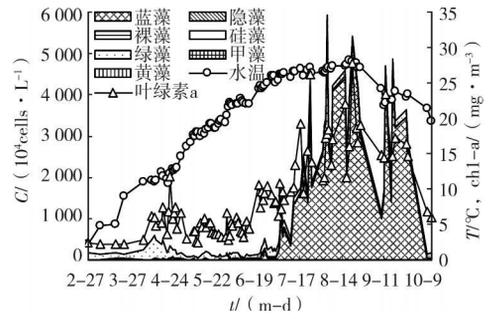


图 1 2006 年引滦原水藻类含量变化

根据上述特点, 按照春季(7月3日之前)、夏季(7月3日-9月26日)和秋季(9月26日之后)分段描述引滦原水藻类群落结构变化过程。

2.3.1 春季(7月3日之前)

如图 1 及表 3 所示, 虽然水温持续上升, 然而引滦原水春季藻类含量较低, 平均含量为 189.4×10^4 cells/L。自 2 月末至 4 月上旬, 引滦原水中藻类含量保持在较低水平, 见图 2。由于绿藻的恢复性增长, 藻类总量在 4 月份出现一个高峰, 达 591.6×10^4 cells/L, 此后藻类总量又降到较低水平。6 月中下旬, 当水温上升至 25 °C 附近时, 由于蓝藻(特别是水华微囊藻)的增殖, 藻类含量有所上升。

表 3 2006 年春季引滦原水藻类结构

项目	蓝藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	隐藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	裸藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	硅藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	绿藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	甲藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	黄藻/ (10^4 cells · L ⁻¹), 百分比	藻类总量/ (10^4 cells · L ⁻¹)
最大值	224.9, 42.6%	19.6, 9.6%	22, 8.7%	58.7, 29.4%	569.6, 97.9%	2.4, 0.7%	12.2, 5.2%	591.6
最小值	0	0	0	0	24.4, 42.7%	0	0	36.7
平均值	15.3, 5.9%	2.5, 1.2%	2.8, 1.5%	16, 10.2%	152.7, 81.1%	0	1.2, 0.7%	189.4

春季引滦原水中检出藻类 7 门 40 属 61 种, 其中绿藻是优势类群, 硅藻和蓝藻含量次之。裸藻、隐藻、黄藻和甲藻的含量较低。

春季引滦原水中绿藻平均含量为 152.7×10^4 cells/L, 占藻类总量的比例平均为 81.1%, 最高值出现在 4 月份, 达 569.6×10^4 cells/L, 占到藻类总量的 96.3%, 见图 2 及图 3, 共检出绿藻 20 属 34 种, 优势种有小球藻、细小四角藻、四尾栅藻、球衣藻、双对栅藻等。其中小球藻、四尾栅藻及细小四角藻较为常见。小球藻的平均含量为 66.9×10^4 cells/L、四尾栅藻的平均含量为 17.4×10^4 cells/L。

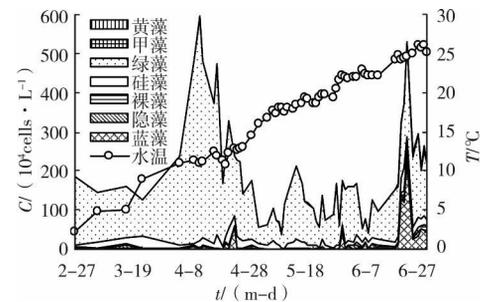


图 2 2006 年春季引滦原水藻类组成变化

如图 3 所示, 春季引滦原水中的硅藻含量及所占比例都比较平稳, 其含量平均为 16×10^4 cells/L

(最高 58.7×10^4 cells/L), 占藻类总量的比例平均为 10.2% (最高 29.4%)。共检出硅藻有 7 属 10 种, 其中常见的硅藻种类有短线脆杆藻和短小舟形藻, 又以短小舟形藻的平均含量最高, 为 5.1×10^4 cells/L。

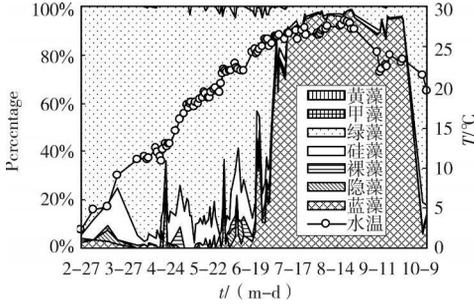


图3 2006年引滦原水藻类比例变化图

蓝藻是春季引滦原水中含量占第3位的藻类, 占藻类总量的比例平均为 5.9% (最高 42.6%), 共检出蓝藻有 4 属 6 种。春季蓝藻的最高含量出现在 6 月份。

春季引滦原水中裸藻、隐藻、黄藻和甲藻的含量较低, 占藻类总量比例的平均值分别为 1.5%、1.2%、0.7% 以及不到 0.1%。春季引滦原水中, 共检出裸藻 5 属 8 种, 隐藻 1 属 1 种, 黄藻 1 属 1 种, 甲藻 1 属 1 种。

2.3.2 夏季(7月3日-9月26日)

夏季的引滦原水中共检出藻类 7 门 37 属 55 种, 比春季少了 6 种。从藻类总量看, 夏季明显高于春季, 藻类总量的平均值为 2724.8×10^4 cells/L (最高 5933×10^4 cells/L), 是春季藻类总量平均值 189.4×10^4 cells/L 的 14.4 倍。所以, 也可称夏季为高藻期。

蓝藻在夏季引滦原水中占绝对优势地位, 其占藻类总量的比例在 53.3%~98.1% 之间, 平均为 90.0%, 见图 3、图 4 及表 4。蓝藻含量在夏季的平均值为 2587.6×10^4 cells/L (最高 5810.8×10^4 cells/L)。

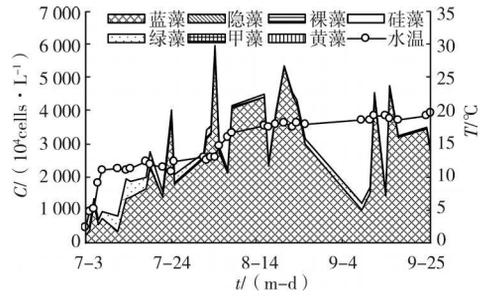


图4 2006年夏季引滦原水藻类组成变化

夏季引滦原水中共检测到蓝藻 7 属 11 种, 其中以水华微囊藻和圆胞束球藻比较常见, 它们的平均含量分别为 2320.8×10^4 cells/L 和 168.3×10^4 cells/L。

表4 2006年夏季引滦原水藻类结构

项目	蓝藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	隐藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	裸藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	硅藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	绿藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	甲藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	黄藻/ (10^4 cells· L ⁻¹), 百分比	藻类总量/ (10^4 cells· L ⁻¹)
最大值	5 810.8, 98.1%	14.7, 2.4%	12.2, 1.9%	90.5, 6.9%	229.8, 40.8%	2.4, 0.3%	9.8, 1.0%	5 933
最小值	220, 53.3%	0	0	4.9, 0.2%	39.1, 0.9%	0	0	413.1
平均值	2 587.6, 90.0%	3.2, 0.3%	3.4, 0.3%	29, 1.6%	125.6, 7.9%	0.1	2.5, 0.1%	2 748.8

蓝藻在夏季引滦原水中成为优势类群是高温条件下水华微囊藻大幅增殖并发挥竞争优势的结果。多项研究^[10-11]表明, 水温高于 25 °C 是微囊藻水华暴发的重要条件。有研究表明, 微囊藻通过分泌藻毒素可以抑制绿藻的生长, 甚至微囊藻还可以抑制鱼腥藻的生长^[12]。在培养小球藻和铜绿微囊藻时, 虽然小球藻最初对磷的利用效率和生长速度都高于铜绿微囊藻, 但最后还是铜绿微囊藻占优势地位^[13]。而铜绿微囊藻与栅藻共培养时, 铜绿微囊藻在高温条件下获得了优势地位^[14]。在 6 月下旬水温上升到 25 °C 左右时, 引滦原水中的水华微囊藻开始增殖。随着水温的上升, 水华微囊藻的含量开始快速增加,

到 7 月 3 日, 水华微囊藻含量占引滦原水藻类含量的 50.3%, 成为优势藻, 而蓝藻也取代了绿藻在原水中的优势地位。整个夏季看, 水华微囊藻占引滦原水藻类总量比例的平均值为 80.9%, 占蓝藻含量比例的平均值为 89.7%。

由于水华微囊藻的竞争抑制作用, 夏季引滦原水中的绿藻含量明显低于春季, 平均含量为 125.6×10^4 cells/L (最高 229.8×10^4 cells/L), 占藻类总量的比例也降为 7.9%。夏季引滦原水中共检测到绿藻 19 属 29 种, 其中以四尾栅藻、双对栅藻、细小四角藻、小球藻、单角盘星藻比较常见。

硅藻在夏季引滦原水中藻类含量占第 3 位, 夏

季引滦原水中共检测到硅藻 6 属 9 种。其中以短线脆杆藻、梅尼小环藻和窄异极藻较为常见。裸藻、隐藻、黄藻和甲藻在夏季引滦原水中占藻类总量的比例都低于 0.5%。在夏季引滦原水中共观察到裸藻 2 属 3 种, 隐藻 1 属种, 黄藻 1 属 1 种, 甲藻 1 属 1 种。

2.3.3 秋季(9月26日之后)

秋季采样虽然只有两次(10月9日与10月12日), 但也能大致反映秋季引滦原水藻类群落结构特征。水温下降不再适合微囊藻生长^[15], 导致水中微囊藻含量急剧下降, 因而引滦原水藻类总量下降为 145.5×10^4 cells/L。而绿藻含量受水温影响不大, 仍保持在 $100 \sim 200 \times 10^4$ cells/L 左右。绿藻在秋季引滦原水中重新成为为优势类群, 藻类群落结构特征与春季相似, 如表 5 所示。秋季引滦原水中共检出藻类 15 属 18 种。

表 5 2006 年秋季引滦原水藻类结构

项目	蓝藻/ (10^4 cells • L ⁻¹), 百分比	裸藻/ (10^4 cells • L ⁻¹), 百分比	硅藻/ (10^4 cells • L ⁻¹), 百分比	绿藻/ (10^4 cells • L ⁻¹), 百分比	藻类 总量/ (10^4 cells • L ⁻¹)
最大值	22, 13.4%	2.4, 1.9%	14.7, 11.5%	134.5, 82.1%	163.8
最小值	7.3, 5.8%	2.4, 1.5%	4.9, 3.0%	102.7, 80.8%	127.1
平均值	14.7, 9.6%	2.4, 1.7%	9.8, 7.3%	118.6, 81.4%	145.5

2.4 藻类生物多样性

生物多样性是测量生态系统中有机体间相对多样性的尺度。原水的藻类生物多样性指数在一定程度上能够反映水体污染程度。该研究采用广泛应用的 Shannon 指数表征藻类生物多样性, 该指数包含了物种丰富性和物种均匀性 2 方面的信息。对引滦

原水藻类的 Shannon 指数进行计算的结果如图 5 所示。

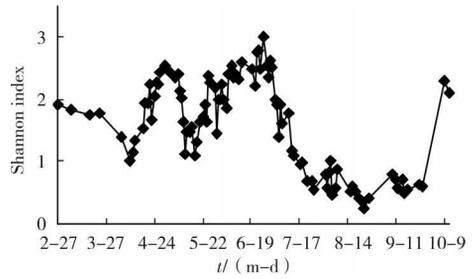


图 5 2006 年引滦原水藻类多样性指数变化

引滦原水藻类的 Shannon 指数在春季、夏季和秋季的平均值分别为 2.03、0.855 和 2.193。根据多样性指数的评价标准, 引滦原水在春秋两季属于轻度污染, 而夏季属于严重污染。从表 2 可知, 夏季的引滦原水中藻类种数明显高于春季, 然而多样性指数却降到最低。这是因为春季绿藻优势类群由多种藻类组成, 藻种之间保持了相对均匀, 而夏季水华微囊藻的大量增殖影响了这种均匀, 从而导致群落结构不平衡。引滦原水多样性指数和水华微囊藻含量之间呈显著的负相关关系($r = -0.793, p < 0.001$), 水华微囊藻的大量增殖导致了多样性指数的降低。

2.5 水质与藻类的相互影响

由前述可知, 水温对引滦原水藻类群落结构的变化有重要影响。水温相对较低的春季和秋季, 引滦原水中绿藻为优势类群、藻类含量相对较低; 而水温较高的夏季, 蓝藻为优势类群、藻类含量相对较高。这种趋势性的判断也得到了 Pearson 相关性分析的数据支持。如表 6 所示, 水温同藻类总量、蓝藻含量及叶绿素 a 含量有显著的正相关关系, 同绿藻呈弱的负相关关系。由于蓝藻对高水温的适应和竞争优势的发挥, 水温升高促进了蓝藻、藻类总量和叶绿素 a 含量的升高, 而导致绿藻含量有所下降。

表 6 引滦原水藻类含量与水质参数相关系数

项目	藻类 总量	蓝藻 含量	隐藻 含量	裸藻 含量	硅藻 含量	绿藻 含量	甲藻 含量	黄藻 含量	叶绿 素 a
水温	0.525**	0.541**	0.177	0.310**	0.344**	-0.390**	0.111	0.381**	0.616**
pH 值	-0.369**	-0.375**	-0.164	-0.279**	-0.265**	0.189	-0.065	-0.326**	-0.418**
浊度	0.568**	0.559**	0.024	0.035	0.593**	0.012	0.009	0.296**	0.706**
COD _{Mn}	0.249*	0.248*	0.201	0.011	0.137	-0.037	0.032	0.221*	0.273*
氨氮	0.197	0.191	-0.030	-0.002	0.273*	0.028	0.048	0.066	0.245*
TP	0.388**	0.394**	0.023	0.111	0.382**	-0.218	0.039	0.306**	0.533**
TDP	-0.081	-0.060	-0.007	0.089	-0.093	-0.333**	-0.041	-0.013	-0.044
多样性指数	-0.784**	-0.778**	0.182	0.252*	-0.236*	-0.030	0.118	-0.110	-0.695**

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

在2月-4月间,引滦原水 pH 值随着藻类的复苏性增长而升高。但此后 pH 值与藻类含量并未呈正相关关系。一般情况下,由于藻类光合作用消耗 CO₂,藻类含量增加导致 pH 值升高,即藻类含量与 pH 值之间呈现正相关关系。然而,由表6可知,引滦原水藻类总量、蓝藻及叶绿素 a 含量同 pH 值呈负相关关系。为进一步了解水温、藻类总量对 pH 值的影响,进行了偏相关分析。首先控制藻类总量的影响,对水温和 pH 值进行偏相关分析,二者呈负相关关系($r = -0.555, p < 0.01$);控制了水温的影响后,对藻类总量和 pH 值进行偏相关分析,二者无相关关系($r = -0.047, p = 0.648$)。偏相关分析表明,藻类总量对引滦原水 pH 值并无影响,而水温与 pH 值有一定的相关性,这仍与其他水体中的常见趋势不同。推测原因,可能是由于在长距离引水的某个环节中其他因素影响了引滦水的 pH 值,从而破坏了自然水体中藻类总量与 pH 值之间固有的相关关系。

浊度与总磷这2项参数与藻类总量、蓝藻、硅藻及叶绿素 a 含量呈正相关关系。然而控制了水温的影响,分别对浊度与藻类总量以及总磷与藻类总量进行偏相关回归分析之后发现,浊度与藻类总量仍然呈正相关关系($r = 0.465, p < 0.01$),总磷与藻类总量之间几乎没有了相关关系($r = 0.120, p = 0.29$)。这是由于水温升高导致了浊度和藻类含量的同步增加,而浊度升高并不影响蓝藻的增殖。偏相关分析表明,总磷并不是引滦水中藻类含量增加的限制性因素,与前述富营养化水平指数(TLI)分析结果一致。

氮和磷是对藻类的生长有着决定性的影响营养元素,很多情况下,藻类的生长处于氮限制或磷限制的状态。如表1所示,引滦原水处于中营养-轻度富营养状态,藻类生长过程中营养充足甚至相对过剩。因此,文中引滦原水的高锰酸盐指数、氨氮和总溶解性磷等参数与藻类含量之间没有表现出明显的相关性,是可以理解的。

需要指出的是,这里的相关分析是指线性相关,上述的相关性较弱或无相关性都是从线性相关而言,并不表示它们之间不存在更为复杂的非线性相关关系。

3 讨论

引滦原水藻类群落结构变化有很强的季节特点,春季以绿藻为优势类群,虽然在4月份出现过一个月复苏性的藻类小高峰,但整个春季中引滦原水藻

类含量平均小于 200×10^4 cells/L,这个含量不影响给水处理工艺的正常运行。到了夏季,由于水华微囊藻的大量增殖,蓝藻成为优势类群,引滦原水藻类含量平均达到 2748.8×10^4 cells/L,最高时曾接近 6000×10^4 cells/L,如此高的藻类含量当然会影响给水处理工艺的正常运行。由于水温降低,秋季中蓝藻优势不再,绿藻重新成为优势类群,藻类含量也降低到不再明显影响给水处理工艺正常运行的水平。因此,对于引滦原水,应该针对夏季以微囊藻为优势藻的高藻期进行除藻研究或除藻方案制定,并且在选择有可能破坏蓝藻细胞的除藻工艺(如预氧化)时应该特别慎重。

4 结论

根据对引滦原水藻类群落结构的调查及分析,可以得出如下结论:

- 1) 引滦原水中温度对藻类群落结构变化有重要影响。引滦原水中的藻类在春、秋季以绿藻为主,藻类含量较低;夏季由于水华微囊藻的大幅增殖,蓝藻成为优势类群,藻类含量较高。
- 2) 夏季水华微囊藻的大幅增殖导致引滦原水藻类生物多样性指数下降。
- 3) 总磷不是引滦水中藻类含量增加的限制性因素, pH 值与藻类群落结构变化之间也未体现出自然水体中常见的相关关系。

参考文献:

- [1] 赵志伟,崔福义,任刚,等. 预氧化对滦河天津段高藻期藻类的控制效果[J]. 沈阳建筑大学学报, 2006, 22(4): 617-621.
ZHAO ZHIWEI, CUI FU-YI, REN GANG, et al. Control algae in Tianjin Luanhe river during high algae period by preoxidation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2006, 22(4): 617-621.
- [2] 张锦,陈忠林,范洁,等. 高锰酸钾及其复合药剂强化混凝除藻除嗅对比[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(6): 736-738.
ZHANG JIN, CHEN ZHONG-LIN, FAN Jie, et al. Comparison between removals of algae and odor by coagulation and enhanced coagulation of potassium permanganate and its composite chemical[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(6): 736-738.
- [3] 王玉恒,王启山,吴玉宝,等. 分段回流式逆流气浮工艺处理高藻水的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3074-3076.
WANG YU-HENG, WANG QI-SHAN, WU YU-BAO, et al. Treatment of high algae laden water by

- step-recycle counter current flotation[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(11): 3071-3076.
- [4] 侯翠荣, 贾瑞宝. 化学氧化破坏藻体及胞内藻毒素释放特性研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(13): 98-101.
HOU CUI-RONG, JIA RU-BAO. Mechanism of decomposing of cyanobacterium cells and release of intracellular Microcystins by chemical oxidation for drinking water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(13): 98-101.
- [5] DALY R I, HO L, and BROOKES D. Effect of Chlorination on *Microcystis aeruginosa* Cell Integrity and Subsequent Microcystin Release and Degradation [J]. *Environmental Science & Technology.*, 2007, 41(12): 4447-4453.
- [6] 方晶云, 马军, 王立宁, 等. 臭氧预氧化对藻细胞及胞外分泌物消毒副产物生成势的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(6): 1127-1132.
FANG JING-YUN, MA JUN, WANG LI-NING, et al. Effect of preozonation on disinfection by-products formation potential of algae cells and extracellular organic matter[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(6): 1127-1132.
- [7] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [8] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [9] PALMER C M. A composite rating of algae tolerating organic pollution[J]. *Journal of Phycology*, 1969, 5(1): 78-82.
- [10] 王得玉, 冯学智, 周立国, 等. 太湖蓝藻爆发与水温的关系的 MODIS 遥感[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(2): 173-178.
WANG DE-YU, FENG XUE-ZHI, ZHOU LI-GUO, et al. Relationship between blue algal bloom and water temperature in Lake Taihu based on MODIS[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(2): 173-178.
- [11] 陈桥, 韩红娟, 翟学晶, 等. 太湖地区太阳辐射与水温的变化特征及其对叶绿素 a 的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 199-206.
CHEN QIAO, HAN HONG-JUAN, ZHAI XUE-JING, et al. Influence of solar radiation and water temperature on chlorophyll-a levels in Lake Taihu, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(1): 199-206.
- [12] LAM C W Y, SILVESTER W B. Growth interactions among blue-green (*Anabaena Oscillarioides*, *Microcystis aeruginosa*) and green (*Chlorella* sp.) algae [J]. *Hydrobiologia*, 1979, 63(2): 135-143.
- [13] QIAN S, KONG F, SHI X, et al. Interspecific interaction between *microcystis aeruginosa* and *Chlorella Pyrenoidosa* in Different Phosphate Media[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2008, 23(4): 635-642.
- [14] 谭啸, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 利用流式细胞仪研究温度对两种藻竞争的影响[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(4): 419-424.
TAN XIAO, KONG FAN-XIANG, CAO HUAN-SHENG, et al. Influences of temperatures on the competition between species of algae assayed by flow cytometry[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(4): 419-424.
- [15] WU Z, SONG L and LI R. Different tolerances and responses to low temperature and darkness between waterbloom forming cyanobacterium *microcystis* and a green alga *Scenedesmus*[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 596(1): 47-55.

(编辑 胡玲)