

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.006

南水北调终端泵站调节池内藻类特征和沉积分析

许嘉慧¹, 翟洪艳¹, 孙凌², 罗文璟¹, 邱春生³, 路楨⁴,
穆艳宇¹

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津师范大学 生命科学学院, 天津 300382; 3. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300192; 4. 天津水务集团有限公司 引江市区分公司, 天津 300122)

摘要: 南水北调水源终端城市泵站调节池中的高有机物泥沙淤积是目前急需解决的运行问题,已经影响到供水水质稳定和成本,然而定量分析藻类对淤积问题的影响还鲜见报道。为此,调研了2021年4月—10月泵站调节池进水、池内水体、出水以及底泥中的藻种类和藻密度,估算了藻细胞质量及其对悬浮固体和淤积底泥的质量贡献。研究发现,引江水中的藻类均以硅藻(*Bacillariophyta*)为主,其次是绿藻(*Chlorophyta*)和蓝藻(*Cyanophyta*)。6月—9月调节池进水、池内水体、出水中的藻密度分别高达 $(2.10\sim 2.73)\times 10^6$ 、 $(0.55\sim 4.20)\times 10^6$ 、 $(1.06\sim 1.22)\times 10^6$ 个/L。经计算,调节池进水、池内水体、出水中的藻细胞质量浓度最高可达5.04、3.35、2.31 mg/L,淤泥中被计数的藻细胞质量浓度为17~984 $\mu\text{g/g}$ 。藻细胞质量浓度占悬浮固体浓度的2%~77%(平均为36%)。大量藻类滞留在调节池内,据估算,夏季滞留在调节池内的藻类质量浓度为0.60~2.72 mg/L,占SS的9.2%~52%,夏季高藻期30 d进水最多携带几十吨至几百吨藻细胞进入并滞留在调节池,而且藻细胞在调节池还会发生增殖,这将严重影响调节池的水质和供水安全。

关键词: 南水北调工程; 藻类; 淤泥; 调节池; 供水安全

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0034-09

Algal Characteristics and Deposition in Regulating Tank of a Terminal Pumping Station Belonged to the South-to-North Water Diversion Project

XU Jia-hui¹, ZHAI Hong-yan¹, SUN Ling², LUO Wen-jing¹, QIU Chun-sheng³,
LU Zhen⁴, MU Yan-yu¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Life Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300382, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300192, China; 4. Yinjiang Branch, Tianjin Water Group, Tianjin 300122, China)

Abstract: The current deposition of sediment with high organic content in the regulating tank of a terminal pumping station belonged to the South-to-North Water Diversion Project has become an urgent operational problem, which has affected the stability of the water supply quality and the operational cost.

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52270009); 天津水务集团有限公司项目(2020GFW-0334)

通信作者: 翟洪艳 E-mail: zhaihy@tju.edu.cn

However, quantitative analysis of the effect of algae on sediment deposition is rarely reported. In this study, the species and density of algae in the influent, inside, effluent and sediment of the regulating tank from April to October 2021 were investigated, and the algae mass and its contribution to the suspended solids and sediment were estimated. *Bacillariophyta* was the dominant algal species in the Yangtze River raw water, followed by *Chlorophyta* and *Cyanophyta*. From June to September, the algal densities in the influent, inside and effluent of the regulating tank were as high as 2.10×10^6 – 2.73×10^6 cells/L, 5.50×10^5 – 4.20×10^6 cells/L and 1.06×10^6 – 1.22×10^6 cells/L, respectively. The maximum mass concentration of algal cells in the influent, inside and effluent of the regulating tank was 5.04 mg/L, 3.35 mg/L and 2.31 mg/L, respectively, and the mass concentration of the recorded algal cells in the sediment was 17–984 $\mu\text{g/g}$. The mass concentration of algal cells accounted for 2% to 77% (average 36%) of the suspended solids. Large amounts of algae remained in the tank. The mass concentration of algae retained in the regulating tank in summer was estimated to be 0.60–2.72 mg/L, accounting for 9.2%–52% of the suspended solids. The influent introduced ten to hundred tons of algal cells into the regulating tank at most during the 30 days high algae period in summer, and algal cells retained and proliferated in the regulating tank, which seriously affected the water quality and water supply safety.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; algae; sediment; regulating tank; water supply safety

南水北调中线工程从2014年运行以来,已经为河南、河北、北京和天津运送了超过 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的长江水^[1],极大地改善了这些地区的饮用水紧张问题和饮用水品质。但随着工程的运行,引江水中藻类的增殖逐渐引起一系列的新问题。南水北调中线干渠中藻密度达到 2.16×10^6 ~ 1.92×10^7 个/L,而且藻密度具有沿程递增趋势^[1-2]。夏季的藻类密度显著高于其他季节,藻类以硅藻、绿藻、蓝藻为主,其占比可达到91.38%~95.65%^[2-3]。高密度藻类造成了源水水质的下降。调查发现,随着管渠北上,源水的高锰酸盐指数(COD_{Mn})、生化需氧量等呈现升高趋势^[3-6],至天津境内多数时段 COD_{Mn} 超过2 mg/L,高于国家地表水Ⅰ类标准限值^[5]。而且藻密度的突变点与 COD_{Mn} 的突变点高度吻合,藻类释放的溶解性有机质可能是造成 COD_{Mn} 升高的主要原因^[6]。另外,藻类的大量繁殖,可能造成臭味物质超标^[7-8],引起水厂滤池堵塞等问题。王雪松^[9]发现藻类暴发期水厂的混凝剂消耗量、氯消耗量是其他时期的1.7倍和1.4倍,滤池反冲洗水大量消耗,制水成本大幅度上升。

除此之外,南水北调中线干渠及其终端构筑物内(例如泵站前调节池)出现了一个特有的、新的、和藻类有关的紧迫问题,即携带大量藻细胞的泥沙

淤积问题。源水携带的泥沙或悬浮物和藻类黏附在一起,随着泥沙的沉积,藻类也沉积,形成了有机质浓度较高的淤泥。实际调研发现,这种有机质较高的泥沙不仅在沿程形成了大量淤积,进入城市枢纽泵站的调节池后同样造成了严重的淤泥沉积,严重降低调节池的有效池容,同时出现厌氧发酵,增加了出水水质恶化的风险,给相关运营管理部门造成了管理和成本的压力。南水北调工程规模巨大、世界罕见,此类人工输水构筑物内高藻泥沙淤积及其引起的相关问题鲜见研究报道,这些问题直接关系到供水的稳定(水量和水质)、安全和成本,不容忽视。为了科学评估藻类对淤泥沉积的影响,笔者以天津市内某泵站调节池为研究对象,调研了不同季节调节池内藻类的密度和种类,计算评估了藻类对调节池内泥沙淤积量的贡献和影响。

1 材料与方法

1.1 采样位点和采样方法

泵站的设计供水量约为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[10],水力停留时间为4~6 h。在泵站调节池的进水处S1、出水处S2、西侧S3和南侧S4布设采样点(见图1),监测时间段为2021年4月—10月,采样频率为每月一次,水质分析平行测定3次。采用手持式水质采样器采集距离岸边0.5 m、水面下方0.5 m处的水样,

采用抓斗式采泥器采集调节池表层淤泥。

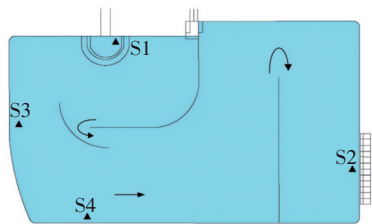


图1 泵站调节池采样点分布

Fig.1 Sampling location in regulating tank of the pump station

1.2 藻类分析方法

采集100 mL水样,现场加入1.5 mL鲁哥试剂固定藻类,在棕色玻璃瓶中低温保存4 h内运送到实验室;水样静置48 h,采取虹吸方法除去上清液,将样品浓缩至10 mL。量取1.0 mL混匀的底泥样品至50 mL离心管中,用离心机在2 000 r/min下离心30 min,取出后用移液枪贴管壁吸取含藻清液25 mL,稀释至100 mL后加入1.5 mL鲁哥试剂固定藻类,静置48 h后采取虹吸方法除去上清液,将样品浓缩至10 mL。吸取浓缩后的样品滴入0.1 mL的浮游生物计数框内,在显微镜下以全片计数法进行浮游藻类的定量计数,每一个样品平行计数2次,取平均值,每次计数结果与平均值之差不大于±15%,否则应增测一次,直至计数结果均符合要求。参照《中国淡水生物图谱》和《中国淡水藻类——系统、分类及生态》鉴定藻种种类。

1.3 其他分析方法

COD_{Mn}、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、SS分别采用酸性高锰酸钾法、碱性过硫酸钾消解-分光光度法、紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、重量法测定;有机质含量采用烧失量法测定;溶解性总有机碳(DOC)含量采用总有机碳分析仪测定;采用超高分辨场发射扫描电镜观察淤泥颗粒形态;采用湿法激光粒度分析仪对淤泥进行粒径分析。

1.4 藻细胞质量估算

参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》中单个藻细胞质量数据以及式(1)和(2)估算藻细胞鲜质量。

$$N_i = \frac{C_s}{F_s \times F_n} \times \frac{V}{U} \times P_n \quad (1)$$

$$m = \sum_{i=1}^n N_i \cdot m_i \quad (2)$$

式中: N_i 为1 L水中藻细胞数量,个; C_s 为计数框

面积,mm²; F_s 为每个视野的面积,mm²; F_n 为计数过的视野数; V 为1 L水样沉淀浓缩后的体积,mL; U 为计数框的体积,mL; P_n 为计数出的藻细胞数量; m 为1 L水中藻细胞鲜质量,mg; m_i 为第*i*种单个藻细胞鲜质量,mg。

2 结果和讨论

2.1 源水水质特征

调节池内的水质较好,在4月—10月时段内COD_{Mn}、DOC、TP、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N浓度分别为(2.4±0.7)、(3.4±0.2)、(0.03±0.03)、(2.2±1.2)、(0.81±0.09)、(0.22±0.08) mg/L。TN的水平约是同年丹江口水库到天津和北京干渠19个采样点TN水平[(1.1±0.1) mg/L]^[1]的2倍。TN中NO₃⁻-N和NH₄⁺-N分别占37%和10%,推测有机氮的比例高达53%。丹江口水库2016年的源水中溶解性有机氮的比例也较高(21.44%~47.39%)^[11],2018年水库中心NO₃⁻-N、溶解性有机氮的比例分别为80.3%和16.6%^[12]。本研究中溶解性有机氮的比例比文献中略高,这可能与调节池内藻细胞淤积并释放藻类有机物(AOM)有关^[13]。藻类有机物由藻细胞生长代谢释放形成,包含低聚糖类物质、多糖、蛋白质、多肽、氨基酸以及少量的有机酸,其中蛋白质、多肽、氨基酸为典型的有机氮类物质。刘成等人^[14]对太湖原水DOC/DON值和藻细胞浓度的研究发现,当藻细胞密度为(4~8)×10⁷个/L时,水中DOC、DON浓度与藻细胞浓度呈正相关,DOC/DON值随着藻类繁殖而降低,在高藻暴发后期达到最低。

2.2 调节池进水中的藻类特征

如表1所示,进水(S1)中藻细胞密度在4月和5月相对较低,为(1.42~8.63)×10⁵个/L,在6月大幅上升,达到2.73×10⁶个/L,7月—10月藻细胞密度均处于较高水平,10月比9月略有下降。

进水中共检出藻类45种,包括3门24属。硅藻的平均丰度最高,共有25种,占总种数的56%;其次是绿藻和蓝藻,分别为14种和6种,分别占总种数的31%和13%。硅藻中的优势藻种包括细小桥弯藻(*Cymbella gracilis*)、系带舟形藻(*Navicula cincta*)、钝脆杆藻(*Fragilaria capucina*)、克洛脆杆藻(*F. crotonensis*)、短小曲壳藻(*Achnanthes exigua*),部分时期浮游辐球藻(*Radiococcus planktonicus*)数量较多。图2显示出不同时间段进水中的优势藻种类不同。

表1 调节池水中不同位置处的藻细胞密度和质量浓度

Tab.1 Algal densities and mass concentrations at different positions in the water of regulating tank

项目	水中藻细胞密度/(10 ⁵ 个·L ⁻¹)						水中藻细胞质量浓度/(mg·L ⁻¹)					
	4月末	5月末	6月中	7月初	9月初	10月末	4月末	5月末	6月中	7月初	9月初	10月末
S1	1.42	8.63	27.30	21.17	21.00	18.02	0.24	1.64	5.04	1.57	0.66	0.39
S2	1.95	7.95	12.22	11.57	10.63	29.08	0.32	1.53	2.31	0.97	0.59	0.74
S3	1.42	2.99	14.93	5.51	37.67	18.93	0.25	0.51	3.00	0.99	1.77	3.35
S4	1.59	3.40	13.73	41.99	17.89	37.62	0.53	0.63	2.61	2.67	0.57	2.44

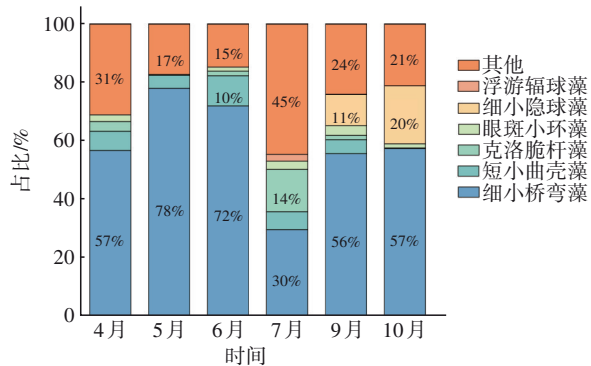


图2 进水中藻种类分布

Fig.2 Distribution of algal species in influent

硅藻一直是南水北调中线水源中的主要藻类。2004年3月—2006年5月的南水北调中线水源区域中共检出藻类8门67属161种,硅藻占39%,藻类群落具有明显的时空变异性^[15]。2014年7月—2015年5月,丹江口水库及中线干渠南阳段共监测到藻类9门44科94属357种,其中硅藻门28属165种,占总藻类的43.70%;绿藻门42属120种,占33.61%;蓝藻门8属40种,占11.20%^[16];调水后硅藻种类数量增加。2018年8月—2019年5月,自河南省南阳市淅川县陶岔渠首到北京市团城湖段南水北调中线干渠中共鉴定出藻类7门83属145种,以硅藻为主(68种),占总种数的46.90%;其次为绿藻(47种),占比为32.41%;蓝藻为16种,占比为11.03%,硅藻在全年占据优势且相对丰度沿程递增^[2]。这与本地水库中的藻种类显著不同,本地水库中春季和夏季的优势藻分别是绿藻[例如四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)]和蓝藻[例如铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginos*)]^[17-18]。

2.3 调节池内水体和出水中的藻类特征

4月—5月,本地平均气温为14.3~20.0℃,阳光充足,进水温度在15℃左右,调节池内(西侧S3和南侧S4)水体的藻细胞密度与进水中的近似,为(1.42~3.40)×10⁵个/L(见表1)。6月中旬池内水体的藻细胞密度上升,是5月的4.0~5.0倍,但是比同

期进水中的藻细胞密度要低,说明在水流相对缓慢的西侧S3和南侧S4部分藻细胞可能发生了沉降。7月—10月池内水体藻细胞密度在S3和S4两个位置的差异较大,多数情况低于进水,但也有显著高于进水的情况。10月份出水藻密度明显高于进水,可能是由于春、秋季浮游植物群落结构在垂向上存在显著差异^[19],或原位藻类快速增殖以及出水口处藻类上浮(厌氧发酵导致气泡上浮)造成的。

西侧S3和南侧S4两处检出藻类43~46种,包括3门31属。硅藻最多且种类较稳定,有24~25种,占总种数的54%~56%,其次是绿藻(14~15种)和蓝藻(5~6种)。优势藻种包括细小桥弯藻、短线脆杆藻(*F. brevistriata*)、克洛脆杆藻、微型舟形藻(*N. minima*)、短小舟形藻(*N. exigua*)、短小曲壳藻、肘状针杆藻(*Synedra ulna*)7种硅藻。部分区域单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)、浮游辐球藻、铜绿微囊藻及细小隐球藻(*Aphanocapsa delicatissima*)等绿藻及蓝藻数量较多。夏季(6月—7月)的优势藻种为浮游辐球藻和短小曲壳藻,秋季(9月—10月)的优势藻种为细小隐球藻。

4月—5月,调节池出水(S2)中藻细胞密度较低,为(1.95~7.95)×10⁵个/L,与进水和调节池内水体藻细胞密度水平接近,说明调节池没有显著影响出水中的藻细胞密度。6月—9月出水中藻细胞密度较高,为(1.06~1.22)×10⁶个/L,是同期进水中藻细胞密度的45%~55%,说明此段时间有大量藻细胞滞留在调节池中。10月份出水中藻细胞密度明显升高。S3和S4并不在调节池的主要水流区,因此出水中藻细胞密度与S3和S4相比没有明显规律。进水藻细胞密度、藻细胞沉降、藻细胞池内增殖等因素都可能影响出水中的藻细胞密度。

出水中共检出藻类47种,包括5门28属。图3显示了出水中的优势藻种类,仍以硅藻为主,共有26种,占总种数的55%,其次是绿藻和蓝藻,分别有

15种和4种。出水的优势藻种包括细小桥弯藻、克洛脆杆藻、眼斑小环藻(*Cyclotella ocellata*)、微型舟形藻、短小曲壳藻、肘状针杆藻等6种硅藻,部分时期浮游辐球藻和细小隐球藻数量较多。

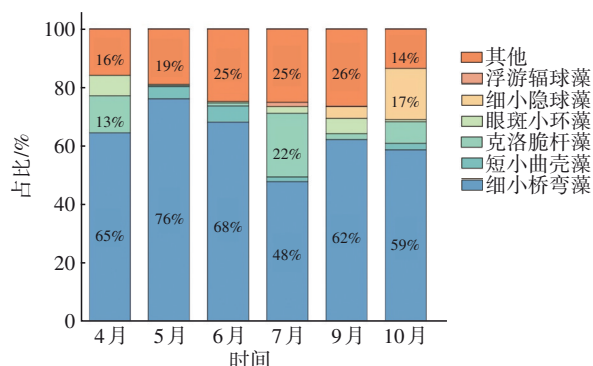


图3 出水中藻种类分布

Fig.3 Distribution of algal species in effluent

2.4 调节池淤泥中的藻类特征

调节池内淤积了大量淤泥,根据相关单位提供的数据,在2019年—2020年期间测得的淤积量达到 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右(进水口区域淤积情况最严重),最大淤积深度为4.8~5.7 m。淤泥的淤积造成夏秋季池内明显的气泡上浮。表层淤泥含水率为82%~

84%,pH约为7,湿泥密度为 $(1.14 \pm 0.2) \text{ g/mL}$,春季和夏季的有机质含量分别为9.1%~16.2%和6.5%~9.8%,表层沉积物中有机质组成受上游来水中悬浮固体的变化而波动。淤泥颗粒粒径较小,淤泥颗粒中值粒径为 $128.96 \mu\text{m}$ 。扫描电镜显示淤泥颗粒被大量的藻细胞附着。

表层淤泥的藻细胞密度如表2所示,在 $(1.03 \sim 60.26) \times 10^7$ 个/L范围内。进水处(S1)表层淤泥的藻细胞密度与进水SS关系密切,在5月—7月接近,约为 1.5×10^8 个/L,在4月、9月和10月较低,为 $(1.28 \sim 8.10) \times 10^7$ 个/L。出水口(S2)表层淤泥中的藻细胞密度低于其他3处位置,出水口处的淤泥量也是最少的。调节池内淤泥中藻细胞密度较高,其中西侧(S3)表层淤泥中藻细胞密度显著高于其他位置。进一步计算表明,表层淤泥中藻细胞质量浓度为 $11 \sim 984 \mu\text{g/g}$ (见表2,湿淤泥密度取 1.140 kg/m^3),西侧(S3)和南侧(S4)处藻细胞质量浓度较高。调节池内淤泥中的藻类丰富度及数量都高于同位置的上覆水,图4展示了调节池西侧(S3)和南侧(S4)部分时间淤泥中优势藻种类的变化。

表2 调节池表层淤泥中不同位置处的藻细胞密度和质量浓度

Tab.2 Algal densities and mass concentrations at different positions in the sudge of regulating tank

项目	表层淤泥中藻细胞密度/(10^7 个·L $^{-1}$)						表层淤泥中藻细胞质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)					
	4月末	5月末	6月中	7月初	9月初	10月末	4月末	5月末	6月中	7月初	9月初	10月末
S1	3.55	15.57	15.43	15.57	1.28	8.10	57	242	259	232	17	56
S2	1.03	2.06	1.82		2.14	13.09	17	34	29		11	23
S3	7.05	28.77	14.34	60.26	18.11	34.26	107	474	230	984	307	32
S4	14.75	5.14	13.52	19.93	12.89	8.50	242	74	201	324	212	138

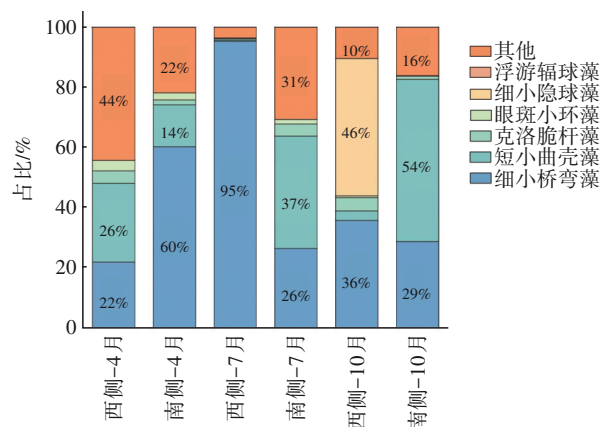


图4 调节池内淤泥中的藻种类分布

Fig.4 Distribution of algal species in sediment of regulating tank

在调节池内淤泥中共检出3门39属83种藻类,其中,硅藻最多,共42种,绿藻和蓝藻依次位列第2和第3,分别为33种和8种。调节池内淤泥中的优势藻种包括细小桥弯藻、克洛脆杆藻、短小舟形藻、短小曲壳藻等硅藻;部分区域单角盘星藻、球状衣藻(*Chlamydomonas microspheara*)、浮游辐球藻等绿藻数量较多。

2.5 水中藻细胞对悬浮固体质量的贡献率估算

为了进一步分析藻类对水中SS的贡献,根据式(1)和式(2)计算调节池中不同位置处的藻细胞密度和质量浓度。如表1所示,调节池中藻细胞质量浓度为 $0.24 \sim 5.04 \text{ mg/L}$ 。调节池中不同位置的藻细胞密度及质量浓度变化趋势有所差异,水中

藻种类在7月上旬发生了明显变化,优势藻种由鲜质量较大的桥弯藻转变为鲜质量较小的浮游辐球藻、克洛脆杆藻等,因此,虽然6月和7月的藻细胞密度相近,但藻细胞质量浓度变小了。此外,9月和10月的样品中,藻细胞密度只是略有下降,藻细胞质量却明显下降。这可能是由于样品中的优势藻种细小隐球藻(蓝藻门)属于原核生物,以聚集体的形态包裹于黏质胶被中,密度高,但其单位生物量远小于真核的硅藻和绿藻类,因此细小隐球藻在藻细胞密度中占比很高,而实际质量占比较低。

将藻细胞质量浓度除以同时期的SS,得到调节池中不同位置处藻细胞质量对SS的贡献情况,结果见图5。

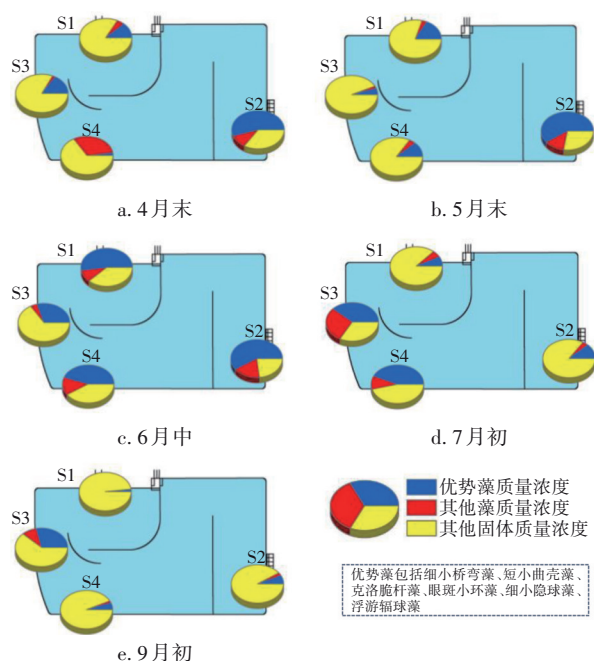


图5 调节池水中SS质量浓度组成的分布

Fig.5 Mass composition of SS in the regulating tank

4月—5月进水中藻细胞对SS的贡献率为16%~20%;而在夏季藻细胞密度显著上升,对SS的贡献率可达到61%左右。其中,优势藻种(短小曲壳藻、细小桥弯藻、系带舟形藻)的藻细胞密度可达到 2.19×10^6 个/L,对SS的贡献率达到53%。4月—5月进水中估算的藻细胞有机物对SS的贡献率(16%~20%)与春季表层淤泥中有机质含量(9.1%~16.2%)接近但略高,但是夏季进水中藻细胞有机物对SS的贡献率(11.85%~61.10%)高于表层淤泥中有机质含量(6.5%~9.8%)。由于采样方法和深度

等原因的局限,进水SS的测量中忽略了密度较大、沉淀较快的泥沙,这部分固体应该是淤泥的重要组成部分,这可能是泥沙中有机质浓度低于藻细胞有机物对SS的贡献率的原因之一。另外,进水中的悬浮泥沙是实时变化的,其藻类附着程度、其他有机质含量变化多样,淤泥中的有机质含量是一段时间积累后的结果。尽管如此,春季藻细胞有机物对SS的贡献率和淤泥有机质含量的相近性表明藻类可能是淤泥中有机物的主要来源。

调节池内(S3和S4)水体藻细胞对SS的贡献率与进水不同。4月—5月,藻细胞对SS的贡献率为6%~35%;6月—7月藻细胞对SS的贡献率大幅度上升到35%~66%。不同时期对SS贡献大的藻类不同,以调节池南侧(S4)为例,6月藻细胞对SS的总贡献率为58%,其中优势藻微型舟形藻、肘状针杆藻和细小桥弯藻3种硅藻对SS的贡献率为49%;7月藻细胞对SS的总贡献率为53%,其中优势藻浮游辐球藻、克洛脆杆藻和细小桥弯藻对SS的贡献率为42%。

调节池出水中,藻细胞对SS的贡献率波动较大。4月—5月,藻细胞对SS的贡献率较高,为64%~72%,6月份贡献率高达77%,表明出水SS中包含了高比例的密度较低的藻细胞。6月份优势藻种包含微型舟形藻、短小曲壳藻、肘状针杆藻、细小桥弯藻,优势藻种对出水SS的贡献率达到60%。7月和9月,藻细胞对SS的贡献率较小,为8%~14%,这可能与同时期进水SS中藻类占比较低有关。

2.6 水中藻细胞对淤泥质量的贡献率估算

根据进、出水藻细胞密度分析,在高温期6月—9月出水中的藻细胞密度显著低于进水。以6月份为例,被调节池截留的藻细胞质量浓度平均为2.72 mg/L。该泵站当时的日处理水量 $>100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。假设日处理水量为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,则调节池日截留藻细胞质量为2.72 t,如果在这种情况下运行一个月(30 d),将有81.6 t藻细胞滞留在调节池。扫描电镜结果显示,底泥基本就是藻细胞包裹的细小颗粒,理论上藻细胞质量密度应该低于底泥密度,这里假设藻细胞质量密度等于底泥密度(1140 kg/m^3),则由于藻细胞滞留调节池内一个月而增加的体积约为 71.6 m^3 。调节池面积约为 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^2$,底泥淤积主要发生在调节池进水区域(假设淤积面积为池面积的1/4),则一个月内藻细胞可造成底泥升高2.86 mm。

该计算结果是根据调节池内上层较清水层(水下0.5 m)中的估算。按照进水SS的估算,滞留的藻细胞质量会更高。调节池中的SS浓度多变,夏季6月—9月进水SS浓度范围为1.5~56.0 mg/L(水下0.5~3 m)、平均为(26.8±7.9) mg/L,出水SS浓度范围为0.1~10.0 mg/L(水下0.5~3 m)、平均为(3.5±2.3) mg/L。则截留在调节池内的固体颗粒物浓度平均约为23.3 mg/L,一个月(30 d)内滞留到调节池的固体约为699 t。根据前面藻细胞对SS贡献率的计算,夏季藻细胞对SS的贡献率为50%左右。贡献率按照50%计算,一个月(30 d)内进水中携带的藻细胞物质等于349.5 t,则一个月藻细胞可以造成底泥升高12.26 mm。

不仅如此,藻类进入调节池后将继续进行光合作用、生长增殖。一般采用Monod模型计算藻类的生长速率。由于藻类生长受到多种因素的制约,在营养受限的条件下,藻细胞并不以最大速率增长,而是以较低的速率生长。源水中的营养物质相对较低,假设影响藻类生长的营养物质主要为氮和磷,藻类的生长速率采用式(3)计算^[20]。

$$\mu = \mu_{\max} \frac{PS}{KP + PS} \times \frac{NS}{KN + NS} \quad (3)$$

式中: μ 为藻的生长速率, d^{-1} ; μ_{\max} 为藻的最大生长速率, d^{-1} ; PS、NS分别为用于光合作用的磷和氮浓度; KP、KN分别为磷和氮的半饱和常数。根据文献中实际河段试验得到的藻类生长速率为0.912 d^{-1} ^[21],氮、磷的半饱和浓度分别为0.326、0.163 mg/L^[21],代入式(3),得到藻类的平均生长速率计算公式如下:

$$\mu = 0.912 \times \frac{PS}{0.163 + PS} \times \frac{NS}{0.326 + NS} \quad (4)$$

依据南水北调中线干渠的水质数据^[18]和本次调节池水质,用于光合作用的TP、TN浓度设定为较高的0.02和2.0 mg/L,计算得到生长速率为0.086 d^{-1} 。6月中旬藻细胞质量浓度最高为5.04 mg/L,则水中藻细胞1个月(30 d)的生长量为59.9 g/m³。调节池的池容为4.6×10⁵ m³,设1/2池容的水中藻细胞以此速率繁殖,则池内水中藻细胞在夏季高藻期1个月的生长量为13.8 t。由于池内水质清澈、透光率高,淤积较高的表层淤泥中藻类同样会发生增殖,因此由于藻类增殖产生的藻细胞质量还会更高。

滞留到调节池的藻细胞和原位增殖的藻细胞在夏季高藻期的1个月内可能会使调节池淤泥固体质量增加几十吨至几百吨。因此,藻细胞对调节池内淤泥的质量和体积具有重要影响,在这个空间有限的调节池内藻细胞的死亡和堆积对水质将会产生极大的危害。

3 结论

① 随着南水北调中线工程将长江水源源不断地运送到北方城市,大量泥沙和藻细胞等固体物质不可避免地同时运送到了终端泵站调节池,甚至后方水厂。这些泥沙粒径小、附着大量藻细胞,长时间运行后形成了显著不同于北方水体的悬浮物和淤泥,给供水质量和安全造成了新的挑战。

② 调节池进水、出水和池内均含有较高浓度的藻类,在6月—9月藻细胞密度高达10⁶个/L数量级,藻类有机质最高达到5.04 mg/L,淤泥中活性可计数的藻细胞质量浓度最高可以达到984 μg/g。

③ 调节池水中共鉴定出5门39属72种藻类,淤泥中共鉴定出3门39属83种藻类,均以硅藻为主。

④ 在6月—9月,藻细胞质量占SS的2%~77%(平均为36%),有大量藻细胞滞留在调节池,估算夏季高藻期30 d内能有几十吨至几百吨藻细胞滞留到调节池,输送水量越大,沿程藻类浓度越高,调节池内增加的藻细胞淤积量将会越高,而且藻细胞在调节池还会发生增殖。

⑤ 调节池内大量藻类的淤积和增殖,以及随后出现的厌氧发酵、清淤时有机物上浮都会严重影响调节池的水质,因此有必要进一步研究有效控制进水中藻类密度和增殖的方法。

参考文献:

- [1] ZHANG L, YIN W, WANG C, et al. Untangling microbiota diversity and assembly patterns in the world's largest water diversion canal [J]. *Water Research*, 2021, 204: 117617.
- [2] 张春梅, 朱宇轩, 宋高飞, 等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 675-686.
ZHANG Chunmei, ZHU Yuxuan, SONG Gaofei, et al. Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the

- middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 675–686 (in Chinese).
- [3] 张春梅, 米武娟, 许元钊, 等. 南水北调中线总干渠浮游植物群落特征及水环境评价[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 47–54.
- ZHANG Chunmei, MI Wujuan, XU Yuanzhao, *et al.* Phytoplankton community characteristics and water environment assessment in the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 47–54 (in Chinese).
- [4] 司鹏媛. 南水北调中线工程(河北段)干渠水质评价及藻类变化研究[D]. 保定:河北农业大学, 2020.
- SI Pengyuan. The Study on Water Quality Valuation and Algae Change of Main Channel of South-to-North Water Transfer Project (Hebei Section)[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020 (in Chinese).
- [5] 孙甲, 韩品磊, 王超, 等. 南水北调中线总干渠水质状况综合评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 102–112.
- SUN Jia, HAN Pinlei, WANG Chao, *et al.* Study on the comprehensive evaluation of water quality status of the middle route main channel of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 102–112 (in Chinese).
- [6] 范傲翔, 王智鹏, 王超, 等. 南水北调中线总干渠水体耗氧特征及成因[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 871–879.
- FAN Aoxiang, WANG Zhipeng, WANG Chao, *et al.* The characteristics and cause analysis of oxygen consumption substances for the waterbody in the main channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(3): 871–879 (in Chinese).
- [7] MAENG M, SHAHI N K, DOCKKO S. Enhanced flotation technology using low-density microhollow beads to remove algae from a drinking water source [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 42: 102131.
- [8] SUVI S, GONZALO V, GOMEZ S, *et al.* Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds[J]. *Water Research*, 2015, 68: 56–66.
- [9] 王雪松. 典型北方水源地藻类特征及其对自来水厂处理效率的影响研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- WANG Xuesong. Characteristics of the Typical Northern Water Resource Algae and Its Impact on the Water Plant Treatment Efficiency[D]. Changchun: Jilin University, 2009 (in Chinese).
- [10] 王连来, 李洪清. 南水北调配套工程西河原水枢纽泵站调节池设计[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 52–53.
- WANG Lianlai, LI Hongqing. Design of equalization tank in Xihe raw water pumping station: auxiliary project of the middle route of South-to-North Water Diversion in Tianjin [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(16): 52–53 (in Chinese).
- [11] 朱媛媛, 刘琰, 周北海, 等. 丹江口水库流域氮素时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(2): 50–57.
- ZHU Yuanyuan, LIU Yan, ZHOU Beihai, *et al.* The temporal and spatial distribution of nitrogen in the Danjiangkou Reservoir watershed [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(2): 50–57 (in Chinese).
- [12] CHEN Z J, YUAN J, SUN F, *et al.* Planktonic fungal community structures and their relationship to water quality in the Danjiangkou Reservoir, China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10596.
- [13] 古励, 郭显强, 丁昌龙, 等. 藻源型溶解性有机氮的产生及不同时期藻类有机物的特性[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2745–2753.
- GU Li, GUO Xianqiang, DING Changlong, *et al.* Formation of algae-derived DON and characterization of algae organic matter (AOM) from different stage [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(9): 2745–2753 (in Chinese).
- [14] 刘成, 朱浩强, 曹军, 等. 水厂处理工艺对藻源含氮有机物的去除效能分析[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(3): 35–38.
- LIU Cheng, ZHU Haoqiang, CAO Jun, *et al.* Removal of algae dissolved organic nitrogen by water treatment process in waterworks [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(3): 35–38 (in Chinese).
- [15] 李玉英, 高宛莉, 李家峰, 等. 南水北调中线水源区浮游植物时空分布及其营养状态[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(1): 14–22.
- LI Yuying, GAO Wanli, LI Jiafeng, *et al.* Spatiotemporal distribution of phytoplankton and trophic status in the water resource area of the middle route of

- China's South-to-North Water Transfer Project [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1): 14-22 (in Chinese).
- [16] 施建伟, 朱静亚, 黄进, 等. 南水北调中线工程水源头区浮游生物群落研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 114-119.
- SHI Jianwei, ZHU Jingya, HUANG Jin, *et al.* Study on plankton community in the water source area of the mid-line project of South-to-North Water Diversion [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 114-119 (in Chinese).
- [17] 刘宪斌, 聂瑜, 赵兴贵, 等. 2014年于桥水库浮游植物群落与环境因子的关系[J]. 中国环境监测, 2016, 32(3): 64-68.
- LIU Xianbin, NIE Yu, ZHAO Xinggui, *et al.* A correlation analysis of the phytoplankton community and environmental factors in the Yuqiao Reservoir in spring and summer of 2014 [J]. Environment Monitoring in China, 2016, 32(3): 64-68 (in Chinese).
- [18] 李荣, 贾霞珍, 胡建坤, 等. 天津于桥水库臭味物质来源及变化原因分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 37-43.
- LI Rong, JIA Xiaozhen, HU Jiankun, *et al.* Analysis on origin and change of odor substances of water body in Yuqiao Reservoir of Tianjin [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 37-43 (in Chinese).
- [19] 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 等. 千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3575-3586.
- WANG Jiyi, HUO Zhai, GUO Chaoxuan, *et al.* Vertical distribution characteristics and influencing factors of phytoplankton community structure in Qiandao Lake [J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3575-3586 (in Chinese).
- [20] 张志浩. 南水北调中线干渠生物增殖趋势及风险管控策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- ZHANG Zhihao. Study on the Bio-proliferation Trends and Risk Management Strategies of the Main Canal in South-to-North Water Diversion Middle Route Project [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [21] 卜发平. 临江河回水河段富营养化特性、机制及人工浮床控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 145.
- BU Faping. Study on Eutrophication Characteristics, Mechanism, and Its Countermeasures with Artificial Floating Beds in the Backwater of the Linjiang River [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011: 145 (in Chinese).

作者简介: 许嘉慧(1999-), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向为饮用水安全和控制技术。

E-mail: xujh@tju.edu.cn

收稿日期: 2022-08-27

修回日期: 2023-01-06

(编辑: 刘贵春)

加快推动发展方式绿色低碳转型,
因地制宜发展新质生产力,
积极稳妥推进碳达峰碳中和