

文章编号:1000-2367(2018)04-0095-07

DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2018.04.015

# 丹江口水库着生藻类群落特征及其水质评价

郑保海<sup>1,2</sup>,朱静亚<sup>1,2</sup>,许信<sup>2,3</sup>,辛英督<sup>2,3</sup>,宋俊丽<sup>2,3</sup>,时燕飞<sup>2,3</sup>,郭诗君<sup>1,2</sup>,李玉英<sup>1,2</sup>

(1.南水北调中线水源区生态安全河南省重点实验室,南阳师范学院 农业工程学院,河南 南阳 473061;

2.南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心,河南 南阳 473061;

3.南水北调中线渠首环境监测应急中心,河南 淅川 474475)

**摘要:**旨在为湖库型水体水质评价提供多途径的评价方法和掌握人工基质上着生藻类群落时空变化特征,在丹江口水库陶盆(中线工程取水口)和台子山(湖北和河南交界处)2个典型水域采样点设置了自制水泥板和聚乙烯聚酯薄膜2种人工基质采样点,于2015年9月—2016年10月对着生藻类进行了6次连续监测,研究了着生藻类的种类组成和水质变化.结果表明,丹江口水库共检出着生藻类6门27科46属181种(或变种),其中硅藻为全年优势群,占着生藻类总种数的55.81%;绿藻和蓝藻分别占37.21%和6.98%.着生藻类群落存在时空差异性;人工基质种类对着生藻类种类组成影响不大,对着生藻类密度影响明显,同一采样点以水泥板为基质的着生藻类密度约为以聚乙烯聚酯薄膜为基质的着生藻类密度的1.2倍.着生藻类污染指示种4门12科13属17种(或变种),其中中营养型指示种占总指示种的78.57%.着生藻类香农威尔多样性指数为2.12,水质营养状态指数(EI)为38,水体处于中营养型状态.

**关键词:**丹江口水库;着生藻类;人工基质;水质评价

**中图分类号:**X824

**文献标志码:**A

着生藻类也被称为底栖藻类,是附着在水体基质上生活的一些微型附着藻类<sup>[1]</sup>.着生藻类营固着生活,拥有较大的生物膜面积,与水体物质交换迅速,是理想的水环境监测生物指标.国际上对着生藻类的研究已有较多,Hameed<sup>[2]</sup>研究了人工基质上附生硅藻的演替特征,Albay等<sup>[3]</sup>对土耳其浅水湖自然基质与人工基质上着生藻类的周期性变化进行了研究,Franca等<sup>[4]</sup>对亚马逊湖枯丰水期着生藻类群落结构进行了研究;国内对着生藻类的研究多见于江河湖泊水体,顾泳洁等<sup>[5]</sup>采用标准载玻片研究了苏州河8个断面着生生物在不同季节的种类组成,王自业等<sup>[6]</sup>研究了三峡库区古夫河着生藻类分布与水质因子的关系,周彦锋等<sup>[7]</sup>通过挂片法研究五里湖着生藻类建群模式.大型湖库中着生藻类研究鲜见报道.着生基质是着生藻类建群的第一步,天然基质由于面积不易测量,研究者更多利用具有标准采样面积的人工基质代替天然基质,目前利用较多的人工基质有载玻片、花岗岩和聚酯薄膜等<sup>[8-10]</sup>.

丹江口水库地处豫、鄂、陕三省交界处,为南水北调中线工程水源区,一直倍受关注.杨广等<sup>[11]</sup>于1986—1987年对丹江口水库浮游生物资源进行调查,1992—1993年邬红娟<sup>[12]</sup>和彭建华<sup>[13]</sup>分别对丹江口水库浮游植物和浮游甲壳动物进行了调查,李玉英等<sup>[14]</sup>和申恒伦等<sup>[15]</sup>分别于2004—2006年和2007—2008年对丹江口水库浮游植物动态分布进行了调查研究,谭香等<sup>[16]</sup>于2009—2010年对丹江口水库浮游植物时空动态及多样性指数进行了研究,主要集中在浮游生物与水质评价方面.为提供大型湖库多途径的水质评价方法,本研

**收稿日期:**2017-09-20;**修回日期:**2018-04-10.

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0402204;2016YFC0402207);水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108);国家自然科学基金项目(U1704124;231400367;41601332);河南省重点科技攻关项目(2016151;17454;182102311021);河南省教育厅重点项目(16A210012).

**作者简介:**郑保海(1981—),男,河南郑州人,南阳师范学院在读研究生,从事环境监测和水域生态学研究,E-mail:532522571@qq.com.

**通信作者:**李玉英(1969—),女,河南南阳人,南阳师范学院教授,博士,从事水域生态学和环境保护研究,E-mail:lyying200508@163.com.

究于2015年9月—2016年10月对丹江口水库不同人工基质上的着生藻类进行了连续监测,掌握人工基质上着生藻类群落时空变化特征,旨在为丹江口水库水质保障及南水北调中线干渠长期生态学研究提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 样点设置与人工基质制备

根据丹江口水库的地理位置特征,在丹江库区陶岔(111°42'22" E, 32°40'10" N, 中线工程取水口)和台子山(111°35'11"E, 32°39'43"N, 河南与湖北两省交界处)两个典型生态水域设置着生藻类采样点。自制16 cm×10 cm×0.7 cm水泥板作和聚酯薄膜为人工基质,用蒸馏水浸泡24 h,自然风干,作为研究着生藻类的附着基质。本研究中所有批次的人工基质一次放入水体。

### 1.2 样品的采集与分析

在丹江口水库陶岔和台子山两个采样点,放置水平串联等面积的水泥板和聚酯薄膜于约50 cm深的水中,每个样点各放置12块,分别挂在中线取水口上游100 m的浮船边和台子山自动监测站的浮桥边。分别于2015年9月、11月,2016年1月、5月、7月、10月在采样点依次收集水泥板和聚酯薄膜各1块,分别用软毛刷将基质上的着生藻类刷至敞口容器中,并用蒸馏水将基质冲洗多次,现场加入鲁哥试剂固定,带回实验室静置24 h后浓缩至50 mL供镜检。依据文献进行着生藻类种类的鉴定<sup>[17-19]</sup>,鉴定到属/种。水质理化指标测定和着生藻类计数参照《水和废水监测分析方法(第四版)》进行<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 丹江口水库着生藻类群落结构特征

#### 2.1.1 着生藻类群落结构组成

2015年9月—2016年10月对丹江口水库两个典型采样点进行6次着生藻类调查采样,共鉴定出硅藻(Bacillariophyta)、绿藻(Chlorophyta)、蓝藻(Cyanophyta)、裸藻(Euglenophyta)、隐藻(Cryptophyta)和黄藻(Cryptophyta)6门27科46属181种(或变种),其中硅藻占优势,18属108种,占着生藻类总数的55.81%;其次为绿藻14属43种,占着生藻类总种数的37.21%;蓝藻9属25种,占着生藻类总数的6.98%;隐藻2属2种,黄藻2属2种,占着生藻类总数的4.65%;裸藻1属1种,占着生藻类总数的2.33%(图1)。

硅藻门中,桥弯藻属物种数最多,共鉴定出23种(或变种),常见种包括粗糙桥弯藻(*Cyambella aspera*)、近缘桥弯藻(*Cyambella affinis*)、膨胀桥弯藻(*Cyambella tumida* (Bréb.) Kütz.)、新箱形桥弯藻(*Cymbella neocistula*)、桥弯藻(*Cymbella schweiberdtii*)。异极藻属22种,常见种为赫迪异极藻(*Gomphonema hedinii*)、近棒形异极藻(*Gomphonema subclavatum*)、纤细异极藻(*Gomphonema gracile* Ehr.)、缢缩异极藻(*Gomphonema constrictum* Ehr.)。舟形藻属11种,常见种类有放射舟形藻(*Navicula radiosa* Kütz.)、系带舟形藻(*Navicula cincta*)、燕麦舟形藻(*Navicula avenacea* (Bréb.) Grun.)。硅藻其他属常见种有扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula* var. *euglypta*)、普通等片藻(*Diatoma vulgare*)和肘状针杆藻(*Synedra ulna* (Nitzsch.) Ehr.)。其他门常见种为泥泞颤藻(*Oscillatoria limosa*)、单角盘星藻(*Pediastrum simplex* Mey.)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bréb.)、转板藻(*Mougeotia* sp.)、水绵(*Spirogyra* sp.)。

#### 2.1.2 着生藻类种类密度的时空变化

2015年9月—2016年10月对丹江口水库不同人工基质上的着生藻类采集观察发现,基质材料对着生藻类组成无明显影响,不同基质上的着生藻类均以硅藻为主,蓝藻和绿藻较少,且着生的蓝绿藻多为丝状类,

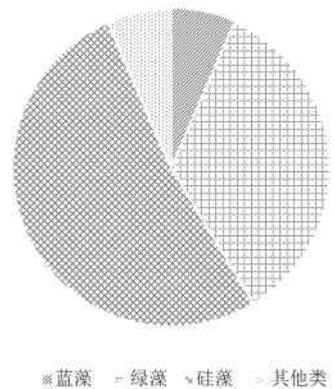


图1 丹江口水库着生藻类组成

这可能与藻类的生态特性有关.同一采样点着生藻类种数随时间变化呈现先增加再减少又增加的趋势,这可能与着生藻类的生长周期短、繁殖能力强有关.2015 年 11 月台子山聚酯薄膜上着生藻类数量最多,达 51 种;2015 年 9 月陶盆水泥板上着生藻类数量最少,仅为 8 种(图 2).同一采样点着生藻类密度呈现夏秋季高春冬季低的变化特征,且同一采样点以水泥板为基质的着生藻类密度约为以聚乙烯聚酯薄膜为基质的着生藻类密度的 1.2 倍(除 2015 年 9 月),表明水泥板表面粗糙更易于着生藻类附着(图 3).

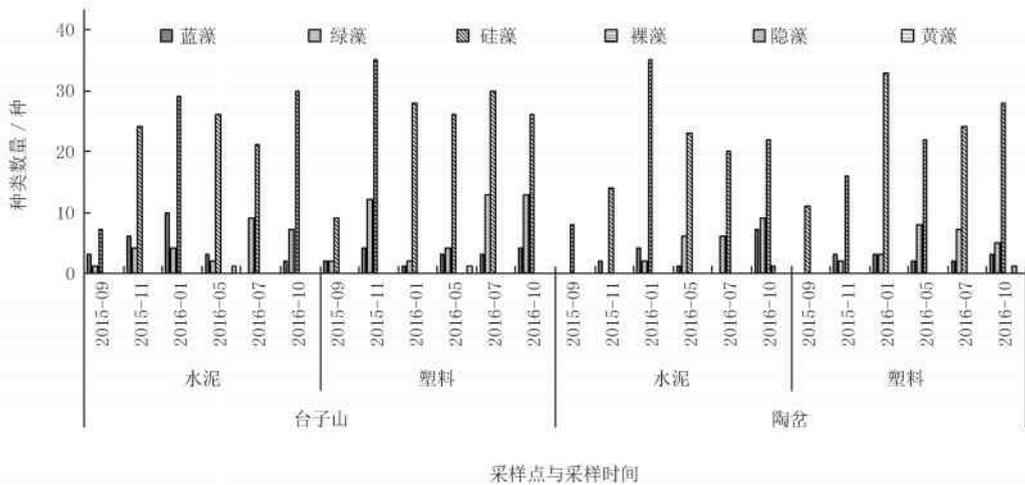


图 2 丹江口水库着生藻类种数的时空动态变化

陶盆监测点鉴定出着生藻类 6 门 19 科 34 属 105 种,台子山监测点鉴定出着生藻类 4 门 23 科 39 属 150 种.在空间分布上,丹江口水库着生藻类的种类和数量表现为台子山监测点多于陶盆监测点(除 2016 年 7 月),但水体的营养盐

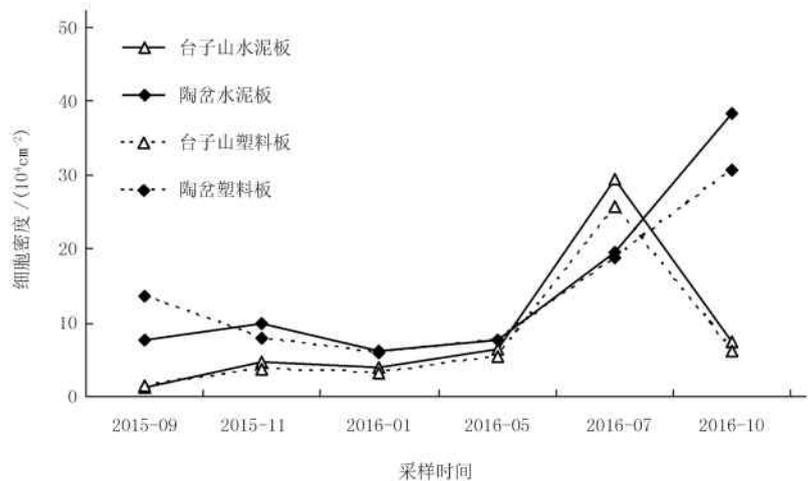


图 3 丹江口水库着生藻类密度的时空动态变化

浓度表现为陶盆高于台子山(表 1),这可能与浮游藻和着生藻种类间竞争有关.

### 2.2 着生藻类污染指示种结构组成

2015 年 9 月—2016 年 10 月,丹江口水库共监测出着生藻类污染指示种 4 门 12 科 13 属 17 种(或变种),其中,os 寡营养型着生藻类 1 属 1 种,占总指示种的 5.88%; $\alpha m$  型着生藻类 3 属 3 种,占总指示种的 17.65%; $\alpha m, \beta m$  型着生藻类 3 属 3 种,占总指示种的 17.65%; $\alpha m, \beta m, os$  型着生藻类 1 属 2 种,占总指示种的 11.76%; $\beta m$  型着生藻类 3 属 3 种,占总指示种的 17.65%; $\beta m, os$  型着生藻类 3 属 4 种,占总指示种的 23.53%; $ps, \alpha m, \beta m$  型着生藻类 1 属 1 种.丹江口水库着生藻类污染指示种种类数量和百分比如图 4~5 所示,台子山和陶盆水泥板上鉴定出着生藻类污染指示种分别为 12 种和 8 种,2 个样点聚酯薄膜上着生藻类污染指示种均为 10 种.总体来说,中营养型指示种占总的指示种 78.57%.

### 2.3 着生藻类物种多样性分析

2015年9月—2016年10月丹江口水库着生藻类多样性指数变化范围为1.50~2.59,平均为2.12,水体为中营养状态.丹江口水库着生藻类多样性随时间变化呈现先增加再减少的趋势,同一采样点不同人工基质对着生藻类多样性有较明显影响,表现为以水泥板为附着基质的着生藻类多样性大于以聚酯薄膜为附着基质的着生藻类多样性(图6),与不同人工基质上着生藻类密度特征一致,说明水泥板更易于反映着生藻类的多样性.在季节上,着生藻类多样性表现为夏秋季低、秋冬季高的趋势;在空间上,台子山着生藻类多样性大于陶岔着生藻类多样性.

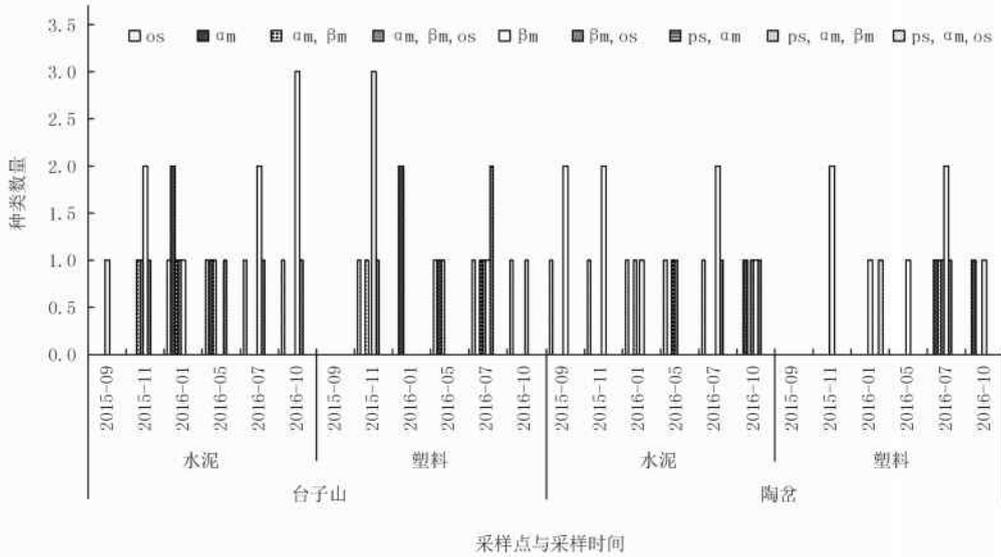


图4 丹江口水库着生藻类污染指示物种种构成

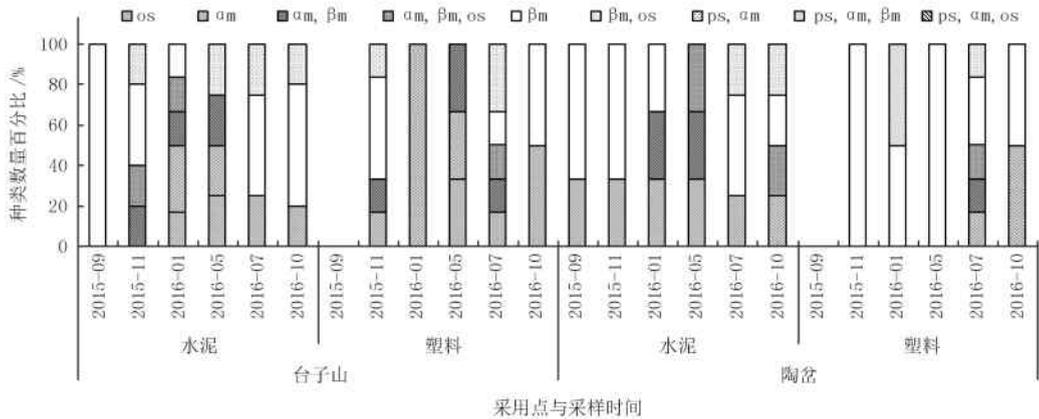


图5 丹江口水库着生藻类污染指示种组成百分比

## 2.4 水质营养状态指数

湖泊、水库的富营养化程度影响因素有很多方面,按照地表水相关规定进行水库营养状态的评价,以透明度、高锰酸盐指数、总氮、总磷和叶绿素 a 5 个参数指标作为丹江口水库水质综合营养状态评价参数,采用线性插值法将水质项目值转换为赋分值  $E_n$ , 计算得出综合营养状态指数  $EI$ , 显示水库水质处于中营养状态(表1).其中,总氮偏高,达到中度富营养状态,其他理化指标显示为贫-中营养状态,水质相对较好.

## 3 结论

2015年9月—2016年10月丹江口水库不同人工基质上的着生藻类共检出着生藻类6门27科46属181种(或变种),其中硅藻为全年优势群,占着生藻类总种数的55.81%;中营养型指示种占78.57%;着生藻

类香农威尔多样性指数变化范围为 1.50~2.55。水质常规理化指标除总氮超标外,其他均达到 I 类或 II 类水质要求,综合评价水体为中营养。基质材料对着生藻类组成无明显影响,但是对着生藻类密度和多样性影响明显,以水泥板为附着基质的着生藻类多样性大于以聚乙烯聚酯薄膜为附着基质的着生藻类多样性。从时间尺度上,着生藻类种数随时间变化呈现先增加再减少又增加的趋势;从空间尺度上,着生藻类种类数量与多样性均表现为台子山点大于陶岔点。

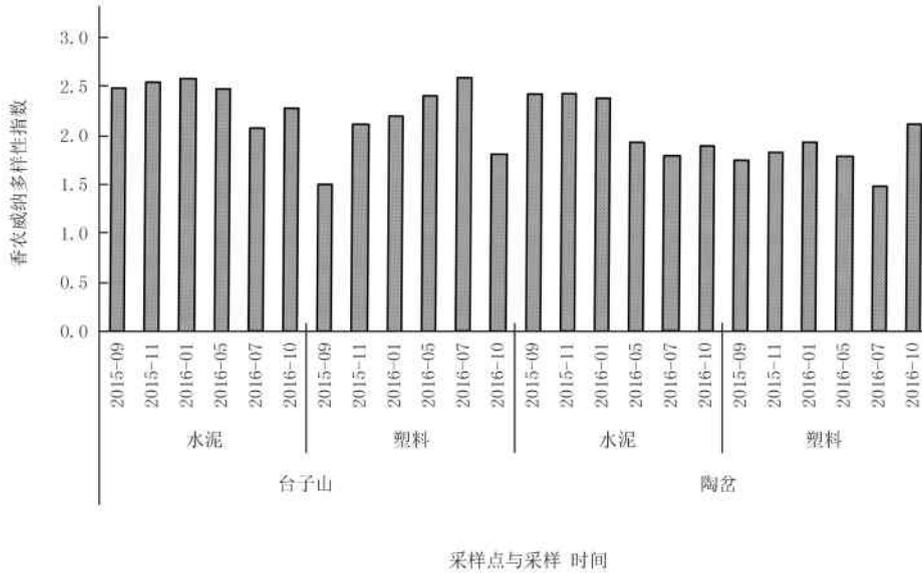


图 6 丹江口水库着生藻类香农威尔多样性指数的动态变化

表 1 丹江口口水库水质营养状态指数(EI)及其营养状态级别

采样点	采样时间	赋分值 $E_n$					综合营养状态指数 $EI$	营养状态等级
		SD	COD <sub>Mn</sub>	TN	TP	Chla		
陶岔	2015-09	34	45	63	36	42	44.00	中营养
	2015-11	19	46	60	36	30	38.20	中营养
	2016-01	29	47	60	36	17	37.80	中营养
	2016-05	30	49	59	36	23	39.40	中营养
	2016-07	29	48	57	39	26	39.80	中营养
	2016-10	25	45	55	30	12	33.40	中营养
	平均值		28	47	59	36	25	39
台子山	2015-09	—	43	63	36	41	45.75	中营养
	2015-11	—	46	61	36	6	37.25	中营养
	2016-01	26	46	60	36	15	36.60	中营养
	2016-05	23	47	60	36	20	37.20	中营养
	2016-07	23	44	57	32	27	36.60	中营养
	2016-10	26	44	60	36	13	35.80	中营养
	平均值		16	45	60	35	20	38

## 4 讨 论

### 4.1 大型湖库中着生基质的选择利用

着生生物作为水体初级生产者,在水生生态系统中占据着重要的作用,因此已被列为水质的生物监测

方法之一,传统多利用载玻片、聚乙烯薄膜、FU块等人工基质获取着生藻类<sup>[9]</sup>。由于大型湖库水域面积较大,水库较深,自制的人工基质由于风浪等因素不易固定且易被破坏,回收率较低,采样困难,给研究带来了较多不便及影响。因此,对大型湖库着生藻类研究应选用合适的基质,合理规划基质放置与回收时间,以期更好地了解大型湖库着生藻类群落演替及反馈水质的变化。本研究利用自制水泥板和聚乙烯聚酯薄膜作为人工基质结果表明,基质材料对着生藻类组成无明显影响,而对着生藻类密度和多样性影响明显,水泥板基质的着生藻类多样性。丹江口水库作为南水北调中线工程水源区,其水质的监测应是长期持续的,水生生物监测与水体理化监测结合能较好地反映水质情况。利用自制规格一致、合适粗糙面的人工基质可作为着生生物长期生态学研究的材料,提供稳定的模拟自然环境试验场,尤其大型湖库所调水水源。

#### 4.2 丹江口水库及中线干渠长期水域生态学研究建议

丹江口水库作为南水北调中线工程的核心水源区,其水质符合调水工程的标准<sup>[14-16]</sup>。调水工程中水源水库和干渠水质保护同样重要位置<sup>[21-23]</sup>。于调水前后,通过水库浮游生物调查发现,水位对浮游藻类群落结构影响显著,并且丹江口水库水域生态系统处于强人工扰动后重建过程<sup>[24]</sup>,高通量测序技术与传统显微技术相结合可多尺度评价饮用水水源<sup>[25-26]</sup>。中线干渠通水后对干渠浮游生物与水质的研究较少,王晨溪等<sup>[27]</sup>于2014-2015年研究了南水北调中线工程水源区丹江口水库及南阳段干渠调水前后浮游生物群落结构的动态变化和水质状况,显示调水后水源区水质较好;陈兆进等<sup>[28]</sup>于2016年调查研究了南水北调中线干渠(河南段)浮游细菌群落组成及水质情况,结果表明干渠水质总体较好,陶岔渠首、南阳方城和郑州新郑3点位水体处于中营养状态,焦作温县和安阳2点位水体处于轻度富营养状态。本研究选用两种不同材质的人工基质研究了丹江口水库着生藻类群落特征,在与南水北调中线干渠渠道材质相同的水泥板上获得了较大的着生藻类数量生物量。有研究表明着生藻类在不同条件下的发展过程,基本上可以较清晰地划分为4个阶段:延迟期,指数生长期,成熟衰退期和二次生长期<sup>[29]</sup>。随着调水时间的推移和调水水量的增加,中线干渠渠道上可能会附着一定量的着生藻类。着生藻类经过生长周期衰亡后会脱落水体,可能会加重水体的营养化程度,因此要确保“一泓清水永续北送”,中线水源区和输水干渠的长期水域生态学研究是十分重要的,从而为中线工程水质生态安全提供基础理论数据。

### 参 考 文 献

- [1] 林碧琴,谢淑琦.水生藻类与水体污染监测[M].沈阳:辽宁大学出版社,1988.
- [2] Hameed HA. The colonization of periphytic diatom species on artificial substrates in the Ashar canal, Basrah, Iraq [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2003, 33(1): 54-61.
- [3] Albay M, Akccalan R. Comparative study of periphyton colonisation on common reed (*Phragmites australis*) and artificial substrate in a shallowlake, Manyas, Turkey [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509(1/3): 531-540.
- [4] Franca R C S, Lopes M R M, Ferragut C. Structural and successional variability of periphytic algal community in an Amazonian Lake during the dry and rainy season (Rio Branco, Acre) [J]. *Acta Amazonica*, 2011, 41(2): 257-266.
- [5] 顾詠洁,王秀芝,廖祖荷.利用着生藻类群落动态变化监测水质的研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2005(04):87-94,109.
- [6] 王自业,葛继稳,李建峰,等.三峡库区古夫河着生藻类分布与水质因子的关系[J].植物科学学报,2013,31(03):219-227.
- [7] 周彦锋,周游,尤洋.五里湖人工基质上着生藻类群落结构及其影响因子研究[J].水生态学杂志,2017(02):57-64.
- [8] 陈向,刘静,何琦,等.东江惠州河流段人工基质附着硅藻群落落的季节性动态[J].湖泊科学,2012,24(5):723-731.
- [9] 念宇,韩耀宗,杨再福.不同基质上着生藻类群落生态学特性比较研究[J].环境科技,2009(05):14-17.
- [10] 赵雨峰,赵永哲.自然水体中不同人工基质上着生藻类的比对分析[J].黑龙江环境通报,2014(04):27-29.
- [11] 杨广,杨干荣,刘金兰.丹江口水库浮游生物资源调查[J].湖北农学院学报,1996(01):38-42.
- [12] 邬红娟,彭建华,韩德举,等.丹江口水库浮游植物及其演变[J].湖泊科学,1996(01):43-50.
- [13] 彭建华.丹江口水库的浮游甲壳动物[J].湖泊科学,1995(03):240-248.
- [14] 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(01):14-22.
- [15] 申恒伦,徐耀阳,王岚,等.丹江口水库浮游植物时空动态及影响因素[J].植物科学学报,2011,29(06):683-690.
- [16] 谭香,夏小玲,程晓莉,等.丹江口水库浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J].环境科学,2011(10):2875-2882.
- [17] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
- [18] 水利部水文局,长江流域水环境监测中心.中国内陆水域常见藻类图谱[M].武汉:长江出版社,2012.
- [19] 韩茂森.淡水浮游生物图谱[M].北京:农业出版社,1980.

- [20] 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.
- [21] 吴征,吴凤平,沈俊源.基于集对分析法的水资源配置方案综合评价[J].灌溉排水学报,2016,35(12):73-79.
- [22] 黄朝焯.梯形明渠水力学特征水深的解析计算式研究[J].灌溉排水学报,2016,35(3):73-78.
- [23] 王亚平,岳强,任晨曦,等.基于可变模糊集理论的平原水库健康评价及实例研究[J].灌溉排水学报,2017,36(12):87-94.
- [24] Pan YD,Guo SJ,Li YY,et al.Effects of water level increase on phytoplankton assemblages in a drinking water reservoir [J].Water,2018,10(3),256; doi:10.3390/w10030256.
- [25] 陈兆进,丁传雨,朱静亚,等.丹江口水库枯水期浮游细菌群落组成及影响因素研究[J].中国环境科学,2017(01):336-344.
- [26] Gao WL,Chen ZJ,Li YY,et al.Bioassessment of a drinking water reservoir using plankton: high throughput sequencing vs.Traditionally morphological method [J].Water,2018,10(1),82; doi: 10.3390/w10010082.
- [27] 王晨溪,朱静亚,牛其恺,等.丹江口水库和干渠南阳段微型生物群落的周期性变化[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2016,39(02):150-156.
- [28] 陈兆进,陈海燕,李玉英,等.南水北调中线干渠(河南段)浮游细菌群落组成及影响因素研究.中国环境科学,2017,37(4):1505-1513.
- [29] 裴国凤.淡水湖泊底栖藻类的生态学研究[D].武汉:中国科学院研究生院(水生生物研究所),2006.

## Community structure of periphyton algae and water quality in the Danjiangkou Reservoir

Zheng Baohai<sup>1,2</sup>, Zhu Jingya<sup>1,2</sup>, Xu Xin<sup>2,3</sup>, Xin Yingdu<sup>2,3</sup>, Song Junli<sup>2,3</sup>, Shi Yanfei<sup>2,3</sup>, Guo Shijun<sup>1,2</sup>, Li Yuying<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Ecological Security for Water Source Region of the Mid-route Project of South-to-North

Water Diversion in Henan Province, College of Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;

2.Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of the Mid-route Project of

South-to-North Water Diversion in Henan Province, Nanyang 473061, China; 3.Emergency Centre for Environmental

Monitoring of the Mid-route Project of South to North Water Diversion, Xichuan 474475, China)

**Abstract:** In order to provide a multi-channel evaluation method for the evaluation of water quality of reservoir and understand the dynamic changes of the community structure of periphyton algae on the artificial substrate of the Danjiangkou Reservoir, two stations were monitored during the period of 2015.09-2016.10. Periphyton algae and physico-chemical indexes were measured. There were 181 species (varieties), 46 genera, and 6 divisions of periphyton algae. The dominance Bacillariophyta accounted for 55.81%. Chlorophyta and Cyanophyta accounted for 37.21% and 6.98%, respectively. There was no significant difference in species of periphyton algae between the two artificial substrates. However, the artificial substrates had the significant effects on the density of periphyton algae. There were 17 species (or varieties), 13 genera, and 4 divisions of saprobic indicators, with 78.57% of mesotrophication. The nutrient status index (*EI*) was 38. The Shannon-Weiner diversity index of periphyton algae was 2.12. In conclusion, the nutrition type of the Danjiangkou reservoir could be regarded as mesotrophy.

**Keywords:** Danjiangkou Reservoir; periphyton algae; artificial substrate; evaluation of water quality

[责任编辑 王凤产]