

# 东莞燕岭湿地景观水体富营养化的现状及机理分析

李萍<sup>1,2</sup>, 钟敏<sup>1</sup>, 吴鹏举<sup>2</sup>, 黄娜<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; 2. 东莞松山湖高新技术产业  
开发区绿色低碳发展促进中心, 广东 东莞 523668)

**摘要:** 跟踪检测东莞燕岭湿地景观水体中叶绿素 a、TN、TP、COD、BOD<sub>5</sub> 等水质指标, 并分析了景观水体富营养化的现状及其机理。结果表明, 景观水系统不同检测断面的叶绿素 a 含量差别较大(0.1~32.5 mg/m<sup>3</sup>), 叶绿素 a 含量沿水流方向逐渐增大, 且呈现季节性暴发的特点; 垂直流人工湿地对叶绿素 a 的去除率在 90% 以上。叶绿素 a 与 TP、TN、COD、BOD<sub>5</sub> 浓度的相关性分析显示, 氮和磷促进藻类生长的同时, 藻类的增殖将有助于降低水体中的氮、磷浓度, 同时会增加水体中的有机物浓度。建议在提高高位水池和垂直流人工湿地脱氮除磷能力的同时, 在景观河流中补充食藻生物孵化器, 通过生物除藻降低水体富营养化程度。

**关键词:** 景观水体; 富营养化; 叶绿素 a; 人工湿地

**中图分类号:** TU993.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0047-05

## Eutrophication Status and Mechanism of Landscape Water Body in Yanling Wetland in Dongguan

LI Ping<sup>1,2</sup>, ZHONG Min<sup>1</sup>, WU Peng-ju<sup>2</sup>, HUANG Na<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Dongguan Songshan Lake High-tech Industrial Development Zone Green Low-carbon Development Promotion Center, Dongguan 523668, China)

**Abstract:** Chlorophyll a (chl-a), TN, TP, COD, BOD<sub>5</sub> and other water quality indicators of Yanling wetland landscape water body in Dongguan were detected, and status and mechanism of the landscape water body eutrophication were analyzed. The results showed that chl-a concentrations (0.1~32.5 mg/m<sup>3</sup>) in different detection sections of the landscape water system were significantly different. The content of chl-a gradually increased along the river direction which showed the characteristics of seasonal outbreak. The removal rate of chl-a by vertical flow constructed wetland was more than 90%. Correlation analysis of the concentrations of chl-a, BOD<sub>5</sub>, TN, COD and TP showed that the growth of algae could be promoted by nitrogen and phosphorus, while the proliferation of algae would be helpful to reduce the concentrations of nitrogen and phosphorus, which simultaneously increase the content of organic matter in water. Except for increasing the height of the head tank and improvement of nitrogen and phosphorus removal ability of vertical flow constructed wetland, installation of biological incubator for algae predation could be also took into account where eutrophication degree of landscape water body was reduced by biological alga-killing technique.

**Key words:** landscape water body; eutrophication; chlorophyll a; constructed wetland

景观水体大多数为静止或流动性差的封闭缓流水体,水域面积小、水深较浅、水环境容量小、自净能力差,容易发生富营养化<sup>[1]</sup>。景观水体富营养化,直接影响水体的透光性和观赏性,大大削弱了其生态环境效益和社会效益,防治景观水体富营养化是我国当前水环境整治面临的一个重大问题。

燕岭湿地位于东莞生态园湿地景区的西北端,占地为 62.7 hm<sup>2</sup>,在空间上由占地为 3 000 m<sup>2</sup>、容积达 15 000 m<sup>3</sup>、发挥枢纽型配水和反硝化作用的高位配水池与占地为 25.6 hm<sup>2</sup> 的垂直流人工湿地以及近 10 km 长的景观河流为主的自然湿地等三部分构成,其中高位反硝化池中设置有以风车草为主的生态浮床和阿科曼填料为主的生态滤层,配水量为  $(5 \sim 7) \times 10^4$  m<sup>3</sup>,实际水力停留时间只有 5 ~ 7 h。按照城市水“生态循环、梯级利用”的模式,燕岭湿地以城市污水处理厂(南番朗污水处理厂)的出水(再生水)作为补给水源,再生水经过反硝化脱氮和垂直流人工湿地深度净化后进入自然湿地的景观水体。近年来,东莞燕岭湿地景观水体出现水色泛绿、透光性下降等影响水体景观效果的富营养化问题。为此,笔者对东莞燕岭湿地景观水体不同位点的水质污染状况进行监测,通过对比分析,找出问题所在,以期对富营养化景观水体的治理提供理论依据。

## 1 试验方法

本研究沿东莞燕岭湿地景观水的流向设置了 10 个具有代表性的采样点(如图 1 所示),分别为反硝化池的进水口(1<sup>#</sup>)、反硝化池的出水口(2<sup>#</sup>)、垂直流人工湿地北片区的出水口(3<sup>#</sup>)、垂直流人工湿地南片区的出水口(4<sup>#</sup>)、观水台(5<sup>#</sup>)、亲水台(6<sup>#</sup>)、1 号桥(7<sup>#</sup>)、钓鱼台(8<sup>#</sup>)、2 号桥(9<sup>#</sup>)、燕岭湿地公园出水口(10<sup>#</sup>),其中 5<sup>#</sup> ~ 10<sup>#</sup> 是燕岭湿地景观河流中间距相当、人们活动较多且便于采样的不同位点。

2015 年 11 月—2016 年 5 月期间,每个月采样一次,采样点设在采样断面中央、水面以下 0.3 m 处,水样预处理及分析检测方法均采用国家标准方法。其中,叶绿素 a 采用改进丙酮萃取分光光度法测定<sup>[2]</sup>;TP 采用钼酸铵分光光度法测定;TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法测定;COD 采用快速催化消解分光光度法测定;BOD<sub>5</sub> 采用稀释与接种法测

定;pH 值采用便携式 pH 计现场测定。检测数据采用 Origin 8.1 作图和 IBM SPSS Statistics 20 软件进行相关性分析。



图 1 采样点的位置分布

Fig. 1 Location map of sampling spots

## 2 结果与讨论

### 2.1 叶绿素 a 含量的变化

叶绿素 a 作为藻类生物量的参考指标,不仅可代表水体中光能自养浮游生物量,也可作为生产力和富营养化水平的重要指标,我国现行的水体营养化级别划分主要参考水体中的叶绿素 a 含量<sup>[3,4]</sup>。分别采集东莞燕岭湿地景观水体不同位置的水样,测得水体中叶绿素 a 含量的时空变化如图 2 所示。

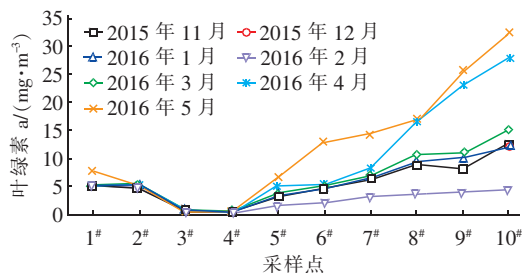


图 2 不同采样点的叶绿素 a 含量变化

Fig. 2 Variation of chlorophyll a contents in different sampling spots

从图 2 可以看出,来自污水处理厂的再生水,在高位水池反硝化过程中叶绿素 a 含量的变化幅度较小,这可能与反硝化过程对叶绿素 a 的去除作用有限,水体中主要藻类的世代周期 > 7 h 等因素有关;

3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>采样点的叶绿素 a 含量很低(0.1~1 mg/m<sup>3</sup>),燕岭湿地南片区和北片区对水体中叶绿素 a 的去除率在 90% 以上;同次采样结果显示,顺着景观河流的水流方向,叶绿素 a 含量逐渐增大;同一地点、不同时间的采样结果显示,4 月和 5 月水体中的叶绿素 a 含量明显偏高,而 11 月一次年 2 月水体中的叶绿素 a 含量明显偏低,表明燕岭湿地景观水体中的叶绿素 a 含量与温度的关系明显,呈现季节性暴发的特点,这是因为温度升高,藻类的各种生理和生化反应变得更活跃,从而促进了藻类的大量繁殖。

## 2.2 TN 和 TP 浓度的变化

景观水体实际上是一个巨大的生物反应器,N、P 各营养元素形态的转化非常活跃,在合适的光照和温度条件下,水体的营养盐含量越高,水体富营养化的可能性就越大。东莞燕岭湿地景观水体中 TN 和 TP 浓度的时空变化如图 3 所示。

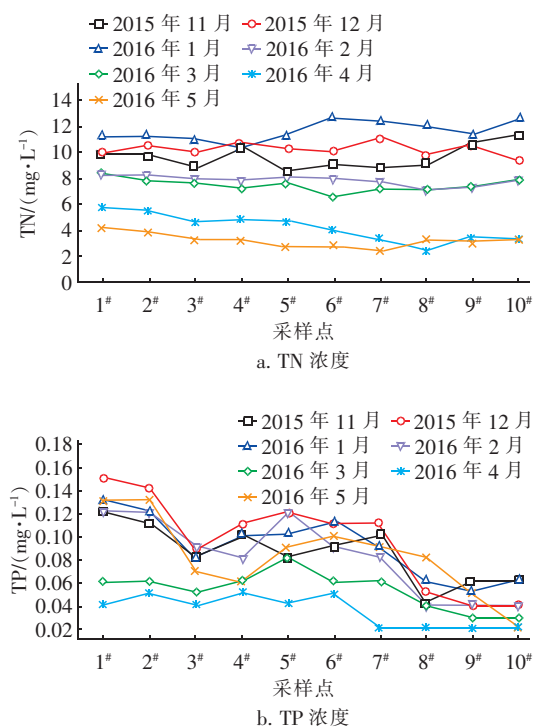


图3 不同采样点的 TN 和 TP 浓度变化

Fig.3 Variation of TN and TP concentrations in different sampling spots

从图3可以看出,在同一检测时间1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>采样点(高位反硝化池进、出水口)的 TN 和 TP 浓度变化不明显,说明高位反硝化池对再生水中 TN 和 TP 的去除作用有限。3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>采样点(燕岭垂直流人工湿地南、北片区)由于植物的种类及其生长周期不同,

在同一检测时间不同片区出水中的 TN 和 TP 浓度不完全相同,但是,与同一时间的进水(2<sup>#</sup>采样点)相比,TN 和 TP 浓度呈下降趋势,说明燕岭垂直流人工湿地对再生水中的氮和磷具有一定的去除效果。5<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>采样点为燕岭湿地景观河流水流方向上的不同采样点,在同一检测时间内 TN 浓度变化规律不明显,说明除了源头再生水所含有的氮,沿途可能还有其他氮的补充来源(如底泥释放氮);而在同一检测时间内,沿景观河水流方向不同采样点的 TP 浓度呈现逐步下降的趋势,说明景观河沿途各种生物对 TP 的去除作用比较明显。

## 2.3 COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度的变化

目前,关于水体中 COD、BOD<sub>5</sub> 浓度与富营养化的关系还不明确,王颢等认为它们可以为浮游植物生长提供碳源,直接促进其生长,因此 COD 与赤潮之间存在密切的关系<sup>[5]</sup>;蔡清海研究发现,COD 对富营养化指数评价的贡献率高达 82%<sup>[6]</sup>。东莞燕岭湿地景观水体中 COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度的时空变化如图 4 所示。

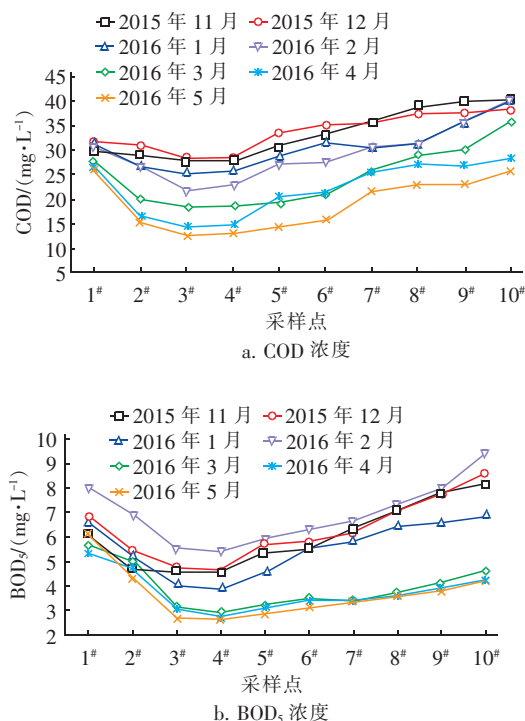


图4 不同采样点的 COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度变化

Fig.4 Variation of COD and BOD<sub>5</sub> concentrations in different sampling spots

从图4可以看出,沿着东莞燕岭湿地景观水系的水流方向,COD 和 BOD<sub>5</sub> 浓度均呈现先稳步下降,



至垂直流人工湿地3<sup>#</sup>或4<sup>#</sup>出水口降至最低,然后稳步上升的变化趋势。这说明高位配水池和垂直流人工湿地对再生水中的COD和BOD<sub>5</sub>有较好的去除效果;景观河流水体中的COD和BOD<sub>5</sub>浓度沿水流方向逐渐升高,与图2不同采样点叶绿素a含量的

变化规律比较相似。

## 2.4 燕岭湿地水体富营养化状况评价

目前国内还没有发布水体富营养化的评价标准,参考国内学者已有的研究成果,即三峡水库库区营养状态评价标准,如表1所示<sup>[7]</sup>。

表1 三峡水库库区营养状态评价标准

Tab.1 Assesment standards for nutrition status of Three Gorges Reservoir

项 目	贫营养	中营养	富营养		
			轻	中	重
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.004~0.02	0.02~0.04	0.04~0.08	0.08~0.16	0.16~1.2
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.01~0.3	0.3~0.6	0.6~0.8	0.8~1.2	1.2~90
叶绿素a/(mg·m <sup>-3</sup> )	0.1~3	3~10	10~20	20~40	40~1 000
透明度/m	4~4.8	1.5~4	1.2~1.5	0.5~1.2	0.12~0.5

注: 透明度只在春季敏感期(3月—6月)参与评价。

结合表1与图2、图3分析可得,经过高位水池的反硝化脱氮和垂直流人工湿地净化后,各项指标都有所改善,尤其是叶绿素a和TP,水体营养级别从中营养变为贫营养。而流经5<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>采样段后,各营养指标浓度又逐渐升高,营养级别由贫营养变为中营养,甚至达到富营养状态,导致这种现象的原因可能是高位水池的脱氮除磷效果欠佳;垂直流人工湿地除藻能力突出,但不能完全解决再生水体中氮和磷的污染问题。景观水体中藻类滋生,有利于降

低水体中的总氮和总磷浓度,但必须要配合食藻生物孵化器等措施解决藻类影响水体透明度的问题。

## 2.5 景观水体富营养化的机理分析

景观水体富营养化直接表现为叶绿素a含量的升高,藻类的数量和密度增加,水体中TN、TP、COD和BOD<sub>5</sub>等营养盐和碳源是水体富营养化的必要条件。东莞燕岭湿地景观水系10个监测位点的叶绿素a含量与TP、TN、COD、BOD<sub>5</sub>浓度的相关性分析结果见表2。

表2 叶绿素a含量和TP、TN、COD、BOD<sub>5</sub>浓度的相关性分析

Tab.2 Correlative relationship between chl-a content and TP, TN, COD, BOD<sub>5</sub> concentration

项目	2015年11月	2015年12月	2016年1月	2016年2月	2016年3月	2016年4月	2016年5月
TN	0.429	0.419	0.648*	0.126	0.055	-0.74*	-0.238
TP	-0.476	-0.545	-0.545	-0.035	-0.671*	-0.74*	-0.57
COD	0.914**	0.927**	0.901**	0.684*	0.935**	0.782**	0.766**
BOD <sub>5</sub>	0.916**	0.935**	0.888**	0.823**	0.429	0.33	0.231

注: “\*\*”表示在0.01水平(双侧)显著相关,“\*”表示在0.05水平(双侧)显著相关。

从表2可以看出,叶绿素a含量与TN浓度,在温度较低、藻类生长速度较慢的11月—次年3月期间表现为正相关,在温度较高、藻类生长速度较快的4月和5月表现为负相关;叶绿素a含量与TP浓度呈负相关,尤其在3月和4月,呈显著的负相关。藻类的生长离不开氮和磷,在一定的浓度范围内,氮和磷浓度越高,则藻类的生长速度就越快。在以再生水为唯一补充水源的东莞燕岭湿地景观水系中,由于磷的来源比较单一,藻类对磷的吸收会造成随着藻类数量的增加,水体中磷浓度下降的现象。从表2还可以看出,COD、BOD<sub>5</sub>浓度与叶绿素a含量之间存在较显著的正相关关系,说明藻类增殖过程中

会增加水体中可氧化有机物的含量,从而导致COD和BOD<sub>5</sub>浓度的增加;COD和BOD<sub>5</sub>浓度的升高会促进景观水体中藻菌共生系统的完善,加速水体的富营养化。

## 3 结论

东莞燕岭湿地再生水景观回用系统中垂直流人工湿地对叶绿素a、TN、TP、COD和BOD<sub>5</sub>都有较好的去除效果,对解决景观水体富营养化问题具有标本兼治的作用;景观河流沿水流方向,叶绿素a、COD和BOD<sub>5</sub>浓度逐渐升高,TN浓度变化不规律,TP浓度逐渐降低;相关性分析结果表明,藻类的增殖将有助于降低水体中的氮和磷浓度,但是,藻类增

殖的同时会带来水体中 COD 和  $BOD_5$  浓度升高的问题。东莞燕岭湿地景观水体富营养化的根本问题还是水体中的氮和磷浓度过高,强化高位反硝化水池的脱氮除磷功能,将有助于从源头上解决景观水体富营养化问题。补充食藻生物孵化器生态除藻设施将有助于控制藻类数量,降低景观水体富营养化的程度。

#### 参考文献:

- [1] Moore J W, Schindler D E, Scheuerell M D, *et al.* Lake eutrophication at the urban fringe, Seattle region, USA [J]. *Ambio*, 2003, 32(1): 13–18.
- [2] 韩桂春, 谷丰, 张忠臣. 淡水中叶绿素 a 测定方法的探讨[J]. *中国环境监测*, 2005, 21(1): 55–57.
- Han Guichun, Gu Feng, Zhang Zhongchen. Discussing about chlorophyll a determination method in fresh water [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(1): 55–57 (in Chinese).
- [3] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 64–69.
- Zhang Sheng, Li Chongming, Zheng Jian, *et al.* Seasonal variation of trophic states in backwater areas of tributaries in Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 64–69 (in Chinese).
- [4] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3382–3386.
- Deng Jiancai, Chen Qiao, Zhai Shuijing, *et al.* Spatial distribution characteristics and environmental effect of N and P in water body of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3382–3386 (in Chinese).
- [5] 王颢, 石晓勇, 张传松, 等. 2004 年春季东海赤潮高发区 COD 分布及其与赤潮关系的初步研究[J]. *海洋科学*, 2008, 32(12): 82–86.
- Wang Hao, Shi Xiaoyong, Zhang Chuansong, *et al.* Primary studies on the COD distribution and relationship with HAB for high frequency HAB occurrence areas of the East China Sea in spring 2004 [J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(12): 82–86 (in Chinese).
- [6] 蔡清海. 福建南部海岛周围海域的化学耗氧量分布[J]. *海洋通报*, 1998, 17(5): 40–45.
- Cai Qinghai. Distribution of COD in the sea area around island in the southern Fujian [J]. *Marine Science Bulletin*, 1998, 17(5): 40–45 (in Chinese).
- [7] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6): 1022–1030.
- Zheng Binghui, Zhang Yuan, Fu Guo, *et al.* On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 1022–1030 (in Chinese).



作者简介:李萍(1971–), 男, 湖南衡阳人, 博士, 副教授, 主要从事景观水污染控制技术研究。

E-mail: lipinggd@163.com

收稿日期: 2017–07–18

大力推行节约用水, 全面建设节水型社会