

文章编号: 1000-5641(2018)06-0122-09

上海东区水质净化厂尾水湿地池水质与蚊幼孳生分析

陆昕渝^{1,2}, 肖冰^{1,2}, 黄民生^{1,2}, 何岩^{1,2},
李欣然^{1,2}, 尹超^{1,2}, 冷培恩³

- (1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241;
2. 华东师范大学上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241;
3. 上海市疾病预防控制中心, 上海 200031)

摘要: 以上海东区水质净化厂尾水深度处理人工湿地池为例, 探究其水质等环境因子与蚊幼孳生的关系. 使用综合污染指数 (P) 法及有机污染指数 (A) 法对 2017 年 5 月至 11 月内湿地池水质进行了评价; 使用勺捕法于同期内对湿地池中共 14 个样点的蚊幼孳生情况进行了监测. 分析表明: ①上海市东区水质净化厂湿地池水质优于地表水 V 类标准; ②淡色库蚊蚊幼密度在水质综合污染指数较高的水中更大, 最高可达 143.1 条/勺; ③淡色库蚊蚊幼密度在 5 月至 8 月内较高, 且随着温度的降低而减少; ④淡色库蚊蚊幼密度在可受到阳光直射的区域显著小于长期受遮蔽的区域 ($p < 0.05$); ⑤淡色库蚊蚊幼密度在叶绿素 a 浓度偏高时较小, 过量的浮萍覆盖可抑制蚊幼孳生.

关键词: 人工湿地; 水质; 蚊幼孳生

中图分类号: X835 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.015

Analysis of water quality and mosquito larval breeding at the tail water wetland of the Shanghai East Water Purification Plant

LU Xin-yu^{1,2}, XIAO Bing^{1,2}, HUANG Min-sheng^{1,2}, HE Yan^{1,2},
LI Xin-ran^{1,2}, YIN Chao^{1,2}, LENG Pei-en³

- (1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
3. Shanghai Municipal Center for Disease Control & Prevention, Shanghai 200031, China)

Abstract: In this study, a constructed wetland for advanced treatment of tail water at the Shanghai East Water Purification Plant was taken as an example to explore

收稿日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(51278192); 上海市科技创新重大项目(16495810201); 上海市普陀区高层次人才科研创新项目(2014-A-18)

第一作者: 陆昕渝, 男, 博士研究生, 研究方向为水环境治理与修复. E-mail: xinyulu0722@foxmail.com.

通信作者: 黄民生, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水环境治理与修复.

E-mail: mshuang@des.ecnu.edu.cn.

the relationship between environmental factors, such as water quality and mosquito (*Culex pipiens pallens*) larval breeding. The comprehensive pollution index (*P* Value) method and organic pollution index (*A* Value) method were used to evaluate the water quality of wetland from May to November of 2017. The breeding status of mosquito larvae at 14 sample points in the wetland were monitored by the standard dipping method during this period. The subsequent analysis showed that: ① The water quality of the wetland was better than Class V of the environmental quality standard for surface water; ② The larval density was higher in water whose *P* Value was equal to or greater than 143.1 per spoon; ③ The larval density was high between May and August and declined with the decrease of temperature; ④ The larval density was significantly lower in areas where the water surface could be exposed to direct sunlight ($p < 0.05$); and ⑤ The larval density was small when the concentration of Chlorophyll *a* was high, and excessive duckweed coverage can inhibit mosquito breeding.

Keywords: constructed wetland; water quality; mosquito larval breeding

0 引言

人工湿地是一种新型的污水深度处理技术,具有高效率、低成本等特点^[1],被广泛应用于污水厂尾水的处理中^[2-4]。蚊虫是一种可传播多种疾病的有害生物^[5],其生命周期的前3个阶段均生活在水中。人工湿地由于其特殊的水质和植被条件,可为蚊虫提供潜在的孳生场所^[6]。

上海东区水质净化厂(以下简称“东厂”)是我国最早建设的水质净化厂之一。基于对东厂出水水质和景观效果的提升需求,其闲置的辐流式二沉池现改建为人工湿地以用于其二级出水的深度处理。目前,国外对人工湿地内蚊虫孳生的研究较多^[6-9],而国内鲜有报道。本文以东厂两座人工湿地之一为例,分析其水质及其他环境因素与蚊幼孳生的关系,以期污水厂尾水湿地的建设及控蚊提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样区域概况及样点分布

上海市东区水质净化厂位于上海市杨浦区,建成于1926年,经五次扩建后其设计处理能力由最初的6 000 m³/d扩容至最大处理量34 000 m³/d。东区水质净化厂采用多点进水吸附再生常规活性污泥法工艺,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准。本研究对象为其中由二沉池改造而成的尾水深度处理湿地池。原二沉池为辐流式沉淀池,直径18 m,半地下式构筑物。

如图1所示,圆形水池外侧设双层环形槽,其内共有3块水平流潜流式人工湿地(A、B、C)。圆池进水为污水厂二级出水,各湿地单体(见图2)的过水方式:进水经溢流堰进入进水槽,由穿孔花墙均匀布水进入湿地,经人工湿地处理后再经穿孔花墙流至出水槽,最后通过溢流管排出。由于湿地池进水水质较好,因此其水力负荷设计值为0.4~1.0 m/d,设计流量为100~250 m³/d。湿地内种植有红花檵木、小叶女贞和小叶黄杨等植物。

水质监测样点为DC 1—10,共10个,蚊幼监测样点较水质监测增加DC 11—14,共计14个。其中,DC 1、2、9、11和12在走道木桥下方避光处进行水质及蚊幼监测;DC 3—8在湿地进出水槽内进行监测;DC 10在湿地B通气管内进行监测;DC 13、14在双层环形水槽内

随机进行蚊幼监测. DC 11、13 和 DC 12、14 水质不另做监测, 分别以 DC 1、2 的水质作为参考.

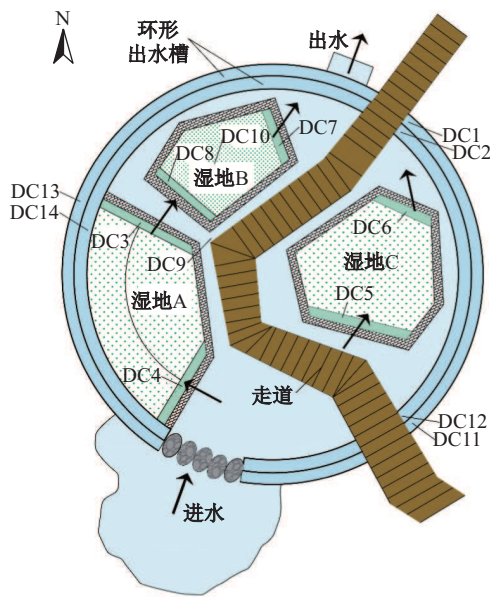


图1 东厂湿地池水质及蚊幼监测样点分布

Fig.1 Sample points at the wetland in the Shanghai East Water Purification Plant

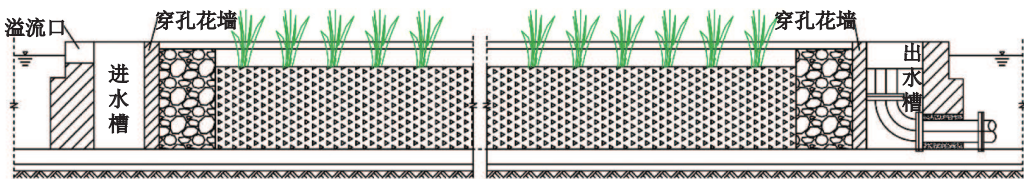


图2 湿地池单体结构示意图

Fig.2 Diagram of structure of wetland unit

1.2 水质及蚊幼监测方法

自 2017 年 5 月至 2017 年 11 月对东厂水质及蚊幼进行监测, 每月采集水样一次, 监测蚊幼两次, 避开暴雨、大风等极端天气. 2017 年 6 月下旬的蚊幼监测由于连续强降雨而取消, 10 月起蚊幼监测频率降为每月一次. 现场原位测定样点水质溶解氧值, 总氮、氨氮、总磷、5 日生化需氧量、高锰酸盐指数和叶绿素 a 等指标的测定于 24 h 内在实验室完成. 具体监测设备及分析方法见表 1.

表 1 水质理化指标监测设备或测定方法

Tab. 1 Equipments or methods for measuring physical and chemical indicators of water quality	
监测指标	监测设备或监测方法
溶解氧(DO)	HACH 便携式溶氧仪
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
氨氮(NH ₄ ⁺ -N)	纳氏试剂光度法
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法
五日生化需氧量(BOD ₅)	稀释接种法(GB 11892—89)
高锰酸盐指数(COD _{Mn})	重铬酸钾法
叶绿素 a(Chl a)	分光光度法

蚊幼监测采用勺捕法 (GB/T 23797—2009) 对其进行采集. 使用 500 mL 标准采样勺于各采样点水池内监测蚊幼虫数量并记录阳性勺数. 以阳性率 (PR , %) 及蚊幼密度 (LD , 条/勺) 表征蚊幼虫在各单元内的孳生情况.

$$PR = \frac{N_p}{N_s}, \quad LD = \frac{N_i}{N_p}, \quad (1)$$

其中, N_s 为采样勺数(勺); N_p 为采样阳性勺数(勺); N_i 为蚊幼数量(条).

将勺捕法获得的蚊幼带回实验室培养以供蚊种鉴别. 结果显示, 培养后存活成蚊全部为淡色库蚊. 因此, 在本研究中认为, 东厂湿地池优势蚊种为淡色库蚊, 所有监测蚊种归类为淡色库蚊, 以便统计和分析.

1.3 数据分析方法

采用综合污染指数 (P) 法和有机污染指数 (A) 法对湿地池水质进行分析评价. 综合污染指数可通过计算得出相应数值, 以表征水体的污染程度并直观地判断目标水体水质是否达标; 有机污染指数则侧重于水体的有机污染状况^[10]. 计算公式如下,

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{0i}}, \quad (2)$$

式中, P 为综合污染指数; C_i 为第 i 种污染物的实测浓度, mg/L; C_{0i} 为第 i 种污染物评价标准值, mg/L; 其中, 对于 DO 浓度等数值越大越优型指标, C_i/C_{0i} 应采用 C_{0i}/C_i 形式计算.

$$A = \frac{C_i(\text{BOD})}{C_0(\text{BOD})} + \frac{C_i(\text{COD})}{C_0(\text{COD})} + \frac{C_i(\text{NH}_3 - \text{N})}{C_0(\text{NH}_3 - \text{N})} - \frac{C_{\text{饱}}(\text{DO}) - C_i(\text{DO})}{C_{\text{饱}}(\text{DO}) - C_0(\text{DO})}, \quad (3)$$

式中, A 为有机污染指数; C_i 为实测浓度, mg/L; C_0 为评价标准值, mg/L; $C_{\text{饱}}$ 为 20° 时水中饱和溶解氧浓度值, 取 9.07 mg/L.

公式中的评价标准值采用地表水环境质量标准 V 类值(见表 2).

表 2 地表水环境质量标准(V类)

指标	范围
TN	≤ 2
NH_4^+	≤ 2
TP	≤ 0.4
BOD_5	≤ 10
COD_{Mn}	≤ 15
DO	≥ 2

2 结果与讨论

2.1 湿地池水质评价

图 3 为各点位水质综合污染指数 (P) (见图 3(a)) 及有机污染指数 (A) (见图 3(b)) 月度变化趋势. 根据水质分级标准^[11](见表 3), 除 DC 4 在 7 月时 P 值大于 2.0 外, 其余点位各月水质均未达重污染水平. DC 1、2、9 样点于各月的 P 值均小于 0.8, 处于合格水平. 其中 DC 9 的 P 值最低, 仅为 0.24 ± 0.07 . DC 7、8、10 除少数月份 P 值大于 1.0 外, 其余月份水质也均在合格水平. DC 3、4、5 三点位的各月水质则略有波动, 其水质处于基本合格或污染水平. DC 6 在各点位中平均综合污染指数最高, 其各月 P 值均大于 1.0, 水质长期处于污染水平. 数据显示, TP 为

其主要的污染因子. 这可能是由于, DC 6 位于湿地 C 北侧, 长期背阴, 光合作用较少, 造成其平均 DO 为各点位中最低. 厌氧条件下有利于池中底泥中磷的释放, 进而导致了其 P 值的升高. 显然, 较之环形槽及中心水池, 各湿地进、出水槽水质综合污染指数明显较高. 总体来说, 东厂湿地池水质较好, 优于地表水 V 类标准.

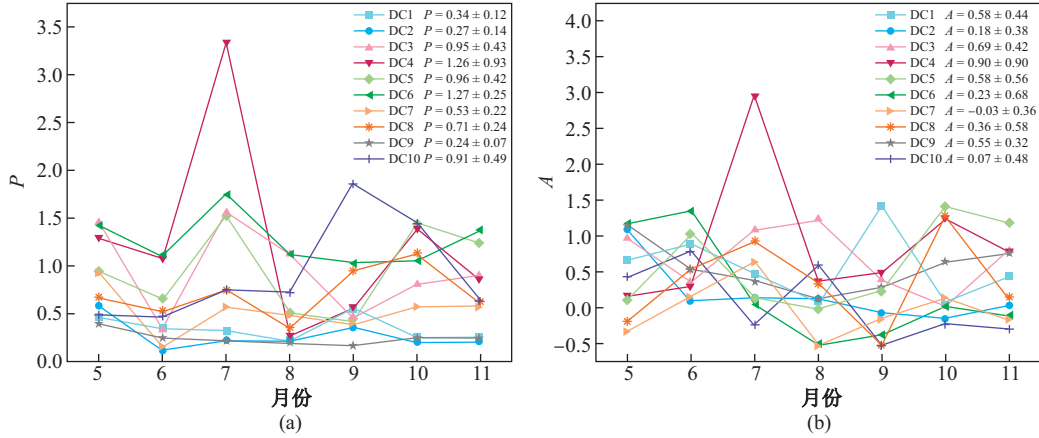


图3 2017年各点位水质综合污染指数及水质有机污染指数月度变化

Fig. 3 Monthly change of P value and A value at the sample points in 2017

表 3 综合污染指数水质分级

Tab. 3 Comprehensive pollution index classification

综合污染指数(P)	水质等级
$P \leq 0.8$	合格
$0.8 < P \leq 1.0$	基本合格
$1.0 < P \leq 2.0$	污染
$P > 2.0$	重污染

与综合污染指数相似, DC 4 的 A 值最高且其月间波动较大, 最高于 7 月时达 2.97, 处于有机污染水平^[12]. 这可能是由于, 7 月时天气炎热, 属于用水高峰, DC 4 最接近进水口, 其所受到的冲击负荷最为明显, 因此表现的水质状况也相对较差. 而 DC 7 的平均 A 值则仅为 -0.03 ± 0.36 , 相比于 DC 4, 其位置则最接近于出水口, 且水流已经过湿地 A、B 的处理, 水质状况良好. 总体看来, 东厂各点位水质有机污染指数普遍较低, 其平均值全部小于 1.0, 受有机污染程度较小.

2.2 湿地蚊幼孳生情况分析

在共计 11 次蚊幼监测中, 5—8 月的全部 7 次监测呈现阳性, 9 月起即呈现阴性. 在共计 14 个蚊幼监测样点中, 有 8 个样点呈现阳性, 其中有两个样点阳性率较高.

图 4 为采样期内阳性月及阳性样点蚊幼密度时空分布情况. DC 6 样点蚊幼密度明显高于其他点位, 其于 5 月 13 日及 6 月 15 日采样时分别达 143.1 条/勺和 80.0 条/勺, 且在前五次采样中阳性率全部达到 100%(见图 4). 但其蚊幼密度在 8 月时出现骤降, 两次采集的阳性率亦降至 90% 和 10%. DC 5 的蚊幼密度水平仅次于 DC 6, 其最高值同样出现在 5 月的两次采样中, 分别达 23.7 条/勺和 10.5 条/勺, 且阳性率均为 100%. DC 13 样点在 5 月 27 日的采样中, 阳性率及蚊幼密度分别达 60% 和 9.3 条/勺, 而其他阳性样点 (DC 4、9、11、12、14) 虽有采集到少量蚊幼, 但其密度均不大于 2.3 条/勺.

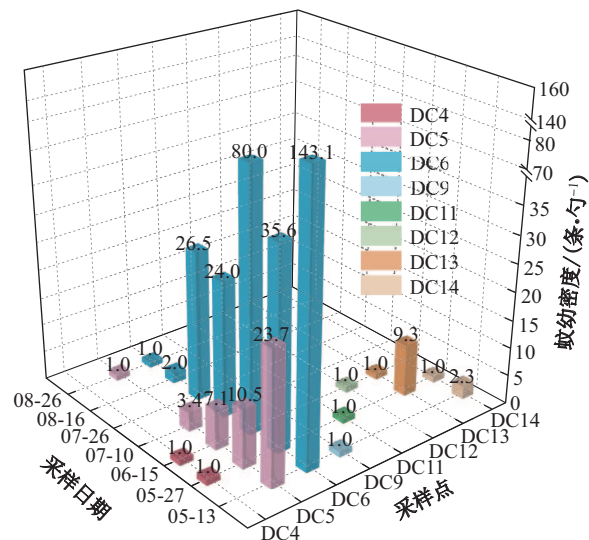


图 4 2017年阳性月及样点蚊幼密度时空分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution of mosquito larval density at positive sample points in positive months in 2017

表 4 蚊幼阳性率时空分布

样点编号	阳性率/%						
	2017-05-13	2017-05-27	2017-06-15	2017-07-10	2017-07-26	2017-08-16	2017-08-26
DC4	0	10	10	0	0	0	0
DC5	100	100	90	70	0	0	20
DC6	100	100	100	100	100	90	10
DC9	10	0	0	0	0	0	0
DC11	0	20	0	0	0	0	0
DC12	0	0	10	0	0	0	0
DC13	0	60	10	0	0	0	0
DC14	30	10	0	0	0	0	0

2.3 蚊幼孳生与水质及其他环境因子的关系

东厂湿地池受到的有机污染较少, 各点位及月份间 A 值差异不大, 因此选用 P 值为参考指标进行水质聚类分析.

图 5 为东厂湿地池各月及各点位水质综合污染指数聚类分析热图. 从空间分布来看, 东厂各点位根据水质可分为三类. 第一类为 DC 3、4、5、6, 其平均 P 值达 1.11 ± 0.59 , 水质状况相对较差. 相应的, DC 5、6 为蚊幼密度最高的样点, 而 DC 3、4 的蚊幼监测则几乎呈现阴性. 第二类为 DC 8、10, 其水质状况一般, 且蚊幼监测全部呈阴性. 第三类为 DC 1、2、7、9, 其水质状况较好, 然而, 在 DC 9 及 DC 11—14 共 5 个样点中均有监测到少量蚊幼. 从样点分布可知, 湿地 C 的 2 个样点 (DC 5、6) 均监测到大量蚊幼, 湿地 A 的 2 个样点 (DC 3、4) 有少量蚊幼, 湿地 B 的 3 个样点 (DC 7、8、10) 则全部呈阴性, 环形水槽 (DC 1、2、11—14) 和中心水池 (DC 9) 亦监测到有少量蚊幼. 一方面, 水质较差的水体内通常含有较高的营养盐浓度, 有利于蚊幼的生长发育. 这与人研究结果相符, 即蚊幼更偏好于水质较差处产卵^[8]. 但这一结论并非适用于所有蚊种, Kengne发现, 冈比亚按蚊则更倾向于在清洁水体中产卵^[13]. 另一方面, 光照对蚊幼生

长同样存在影响^[14]. 结果显示, 长期受植物等遮蔽区域的蚊幼密度显著高于受到阳光直射的区域 ($p < 0.05$). 以湿地 C 内的 DC 6 为例, 其长期被树荫遮挡, 水面难以被阳光直射, 为蚊幼创造了较好的生长环境; 相反的, 湿地 B 内的 DC 8 南侧较为开阔, 全天受太阳直射, 不利于蚊幼的生长发育; 对于湿地 A、环形水槽和中心水池而言, 其虽然会在一段时间内受到阳光直射, 但其采样点周边仍有部分树荫遮挡, 且诸如 DC 9 等采样点位于走道下方, 受直射时间较少, 因此, 存在少量的蚊幼孳生现象亦属合理. 这与 Walton 的研究^[15]相似, 其认为, 在湿地内设置适量的开阔水域有利于控制蚊幼孳生. 总体而言, 蚊幼密度在水质较差及难以受到阳光直射的样点明显较高.

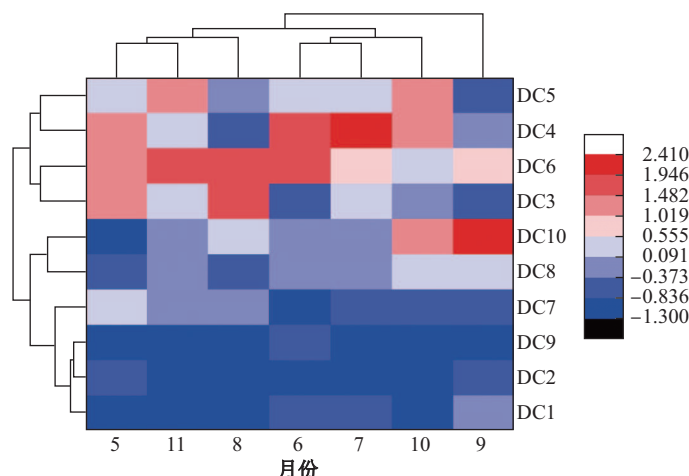


图5 2017年各点位水质时空分布聚类分析热图

Fig. 5 Cluster analysis heat map of temporal and spatial distribution of water quality at sample points in 2017

从时间分布来看, 各月水质可分为 3 类. 第一类为 9 月, 其水质最好且两次采样的蚊幼阳性率均为 0. 第二类为 5 月、8 月和 11 月, 其水质属于中等水平. 其中, 5 月蚊幼密度最高, 8 月蚊幼密度极小, 而 11 月则没有采集到蚊幼. 这是由于, 这 3 个月虽然水质情况接近, 但温度差异较大. 研究表明, 蚊幼数量会随水温的下降而减少^[16], 11 月的低温不利于雌蚊的产卵及蚊幼的生长发育. 第三类为 6 月、7 月和 10 月, 其水质状况相对较差, 6、7 两月蚊幼采集均呈现阳性. 总体而言, 与空间分布类似的是, 淡色库蚊蚊幼偏好于污染程度较高的水体内孳生. 而在水质接近的情况下, 其受温度影响较为明显, 9 月起的降温明显抑制了蚊幼的孳生.

此外, 当叶绿素 a 浓度较高时, 蚊幼密度较低. 从空间分布来看, 以 DC 3、4、7、8 为例, 其综合污染指数虽有差异, 但叶绿素 a 浓度均处于较高水平(见图 6), 平均达 71.61 mg/m^3 , 现场调研也发现, 这 4 个样点水面通常被浮萍所覆盖, 且除 DC 4 发现极少蚊幼外, 其余 3 个样点蚊幼密度全部为 0. 与之相反的, DC 6 的叶绿素 a 浓度相对较低 ($15.39 \pm 17.76 \text{ mg/m}^3$), 而其蚊幼密度极高. 而从时间分布来看, 东厂各点位叶绿素 a 浓度自 9 月起开始陡增, 现场调研同样发现, 秋季时浮萍明显较多. 叶绿素 a 浓度一方面可表征水中藻类生长状况^[17], 另一方面, 由于在其测定过程中包含了水中的浮萍, 其也可在一定程度上显示浮萍的覆盖情况. 蚊幼可以藻类为食源^[18], 因此, 在一定浓度范围内, 叶绿素 a 浓度的增加有利于蚊幼的生长. 然而, 当由于浮萍的大量繁殖而导致叶绿素 a 浓度过高时, 浮萍在水面的覆盖会阻碍蚊幼于水气界面的呼吸作用^[13]并不利于雌蚊的产卵选择, 从而抑制了蚊幼的孳生. 此外, 藻类所释放的藻毒素也不利于蚊幼的生长发育.

3 结论与展望

本研究以上海东区水质净化厂二沉池改造湿地为研究对象,评价并分析了其水质与蚊幼密度的关系。结果表明:①上海市东区水质净化厂湿地池水质优于地表水V类标准;②淡色库蚊蚊幼密度在水质综合污染指数较高的水中更大,最高可达143.1条/勺;③淡色库蚊蚊幼密度在5月至8月内较高,且随着温度的降低而减少;④淡色库蚊蚊幼密度在可受到阳光直射的区域显著小于长期受遮蔽的区域($p < 0.05$);⑤淡色库蚊蚊幼密度在叶绿素a浓度偏高时较小,过量的浮萍覆盖可抑制蚊幼孳生。

对于针对污水厂尾水处理的小型湿地建设,在注重水质及景观提升的同时应充分考虑蚊虫孳生的风险及危害。对于水质较好的区域,应控制植被密度并设置较宽的开阔水域;对于水质较差且难以被阳光直射的区域,在保证出水水质的同时可不必定期清理浮萍以抑制蚊幼的孳生。

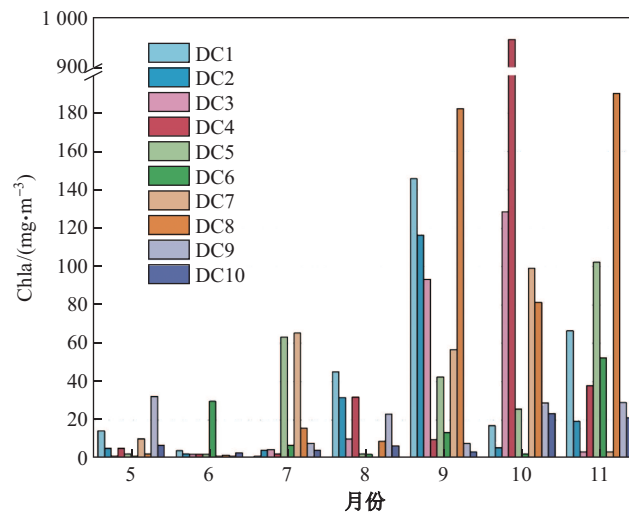


图6 2017年各点位叶绿素a月度变化

Fig. 6 Monthly change in Chlorophyll a at sample points in 2017

[参 考 文 献]

- [1] 秦颂,包宇飞,丁京楠,等. 新型组合式人工湿地处理污水厂尾水的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016(5): 75-79.
- [2] 张俊辉,吴红斌,张冉. 垂直流人工湿地在城镇污水厂尾水深度脱氮除磷中的应用[J]. 工程建设, 2016(2): 70-74.
- [3] 廖冠. 垂直流人工湿地在污水厂尾水处理及景观设计中的应用研究[J]. 轻工科技, 2018(7): 98-99.
- [4] 谷先坤,王国祥,刘波,等. 复合垂直流人工湿地净化污水厂尾水的研究[J]. 中国给水排水, 2011(3): 8-11.
- [5] 徐承龙,姜志宽. 蚊虫防治(一)——蚊虫的危害与形态分类[J]. 中华卫生杀虫药械, 2006(4): 289-293.
- [6] RUSSELL R C. Constructed wetlands and mosquitoes: Health hazards and management options—An Australian perspective[J]. Ecological Engineering, 1999, 12(1): 107-124.
- [7] DIEMONT S A W. Mosquito larvae density and pollutant removal in tropical wetland treatment systems in Honduras[J]. Environment International, 2006, 32(3): 332-341.
- [8] KNIGHT R L, WALTON W E, MEARA G F, et al. Strategies for effective mosquito control in constructed treatment wetlands[J]. Ecological Engineering, 2003, 21(4/5): 211-232.
- [9] WALTON W E, WORKMAN P D. Effect of marsh design on the abundance of mosquitoes in experimental constructed wetlands in southern California[J]. Journal of The American Mosquito Control Association, 1998, 14(1): 95-107.
- [10] 张廷辉. 上海市桃浦工业区(东片)河道水环境变化分析及其成因初探[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [11] 段田莉. 人工湿地+生态塘耦合深度处理污水厂尾水[D]. 山东 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [12] 高云亮. 牡丹江水质现状及污染特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.

- [13] KENGNE I M, BRISSAUD F, AKOA A, et al. Mosquito development in a macrophyte-based wastewater treatment plant in Cameroon (Central Africa) [J]. *Ecological Engineering*, 2003, 21(1): 53-61.
- [14] 陈奇. 上海某组合式污水处理试验系统中蚊虫孳生规律及影响因素研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [15] WALTON W E, POPKO D A, VAN DAM A R, et al. Width of planting beds for emergent vegetation influences mosquito production from a constructed wetland in California (USA) [J]. *Ecological Engineering*. 2012, 42: 150-159.
- [16] SUNLISH I P, REUBEN R. Factors influencing the abundance of Japanese encephalitis vectors in ricefields in India-I. Abiotic [J]. *Medical & Veterinary Entomology*, 2001, 15(4): 381.
- [17] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 [J]. *环境科学*, 2015(6): 2061-2069.
- [18] 徐承龙, 姜志宽. 蚊虫防制(二)——蚊虫的生态习性与常见种类 [J]. *中华卫生杀虫药械*, 2006(5): 403-407.

(责任编辑: 张 晶)

(上接第 73 页)

- [50] SCHUBERT C J, DURISCH-KAISER E, WEHRLI B, et al. Anaerobic ammonium oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika) [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, 8: 1857-1863.
- [51] 徐栎亚, 赵雪, 庄林杰, 等. 基于hzsB 功能基因研究典型湿地沉积物中厌氧氨氧化细菌的群落结构 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(12): 4636-4645.
- [52] 沈李东, 胡宝兰, 郑平, 等. 西湖底泥中厌氧氨氧化菌的分子生物学检测 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(8): 1609-1615.
- [53] YANG Y Y, DAI Y, LI N N, et al. Temporal and spatial dynamics of sediment anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) bacteria in Freshwater Lakes [J]. *Microbial Ecology*, 2017, 73(2): 285-295.
- [54] DYKSMA S, BISCHOF K, FUCHS B M, et al. Ubiquitous gammaproteobacteria dominate dark carbon fixation in coastal sediments [J]. *Isme Journal*, 2016, 10: 1939-1953.
- [55] SHAO M, ZHANG T, FANG H H. Sulfur-driven autotrophic denitrification: diversity, biochemistry and engineering applications [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 88(5): 1027-1042.
- [56] 张玉, 贺惠, 米铁柱, 等. 东海海域表层沉积物中硫酸盐还原菌分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3750-3758.
- [57] 张伟, 张丽丽. 云南洱海沉积物中硫酸盐还原菌的时空分布特征 [J]. *地球与环境*, 2016, 44(2): 177-184.
- [58] 刘建丽, 赵吉, 武琳慧. 乌梁素海湖滨湿地硫酸盐还原菌种群分布 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 358-363.
- [59] 蔡靖, 蒋坚祥, 郑平. 一株硫酸盐型厌氧氨氧化菌的分离和鉴定 [J]. *中国科学: 化学*, 2010, 40(4): 421-426.
- [60] 赖杨岚. 硫酸盐型厌氧氨氧化的启动特性与影响因素研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [61] 刘正川, 袁林江, 周国标, 等. 从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 [J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3345-3351.
- [62] RIKMANN E, ZEKKER I, TOMINGAS M, et al. Sulfate-reducing anammox for sulfate and nitrogen containing wastewaters [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 57(7): 3132-3141.
- [63] 完颜德卿. ANAMMOX 培养物对氨与硫酸盐同步转化机制的研究 [D]. 江苏 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [64] 姚丽平. 城市黑臭河道底泥微生物群落结构对人工曝气的响应特征及机理研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

(责任编辑: 李 艺)