

改良型生物稳定塘对滇池流域受污染河流净化效果*

赵学敏¹, 毓清伟¹, 周广杰², 许振成^{1**}

(1: 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

(2: 广东省环境科学研究院, 广州 510045)

摘要: 对滇池流域大清河生物稳定塘系统中的水质净化效果进行了分析, 同时对各塘中的浮游藻类种类组成、细胞密度和多样性进行了调查. 结果表明, 当污水流经预处理塘、好氧塘、水生植物塘、养殖塘的过程中, pH、DO、叶绿素 a 浓度呈逐渐上升趋势, TN、TP、NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD 浓度呈逐渐下降趋势, 生物稳定塘系统对 TN、TP、NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD 的去除率分别达 29.29%、48.68%、33.68%、68.14% 和 71.25%. 叶绿素 a 浓度和 pH ($r=0.955, P<0.05$)、DO ($r=0.992, P<0.01$) 显著正相关, 而和 TN ($r=-0.936, P<0.05$)、TP ($r=-0.925, P<0.05$) 以及 NH₄⁺-N ($r=-0.927, P<0.05$) 等显著负相关. 在塘系统中, 共出现浮游藻类 53 种, 藻类种类数和生物多样性呈增加趋势, 总细胞密度呈下降趋势; 塘系统中共出现 6 种藻类优势种, 其中绿色微囊藻和惠氏微囊藻细胞密度呈现出逐渐下降的趋势, 梅尼小环藻、蚀蚀隐藻、美丽网球藻和球囊藻细胞密度呈现出逐渐上升的趋势.

关键词: 生物稳定塘; 受污染河流; 净化效果; 滇池流域

Purification effect of improved biological stabilization ponds on the polluted river in Lake Dianchi catchment

ZHAO Xuemin¹, GUO Qingwei¹, ZHOU Guangjie² & XU Zhencheng¹

(1: South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, P. R. China)

(2: Guangdong Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, P. R. China)

Abstract: Wastewater treatment effect, together with species composition, cell densities and diversity of phytoplankton, was investigated in biological stabilization ponds of Daqing River. The results showed that pH, DO and chlorophyll-a concentration increased gradually, and TN, TP, NH₄⁺-N, BOD₅ and COD decreased gradually when wastewater flew from the first pond to the last pond. The removal rates of TN, TP, NH₄⁺-N, BOD₅ and COD in biological stabilization ponds were 29.29%, 48.68%, 33.68%, 68.14% and 71.25%, respectively. Chlorophyll-a concentration was correlated significantly positively with pH ($r=0.955, P<0.05$) and DO ($r=0.992, P<0.01$), but significantly negatively with TN ($r=-0.936, P<0.05$), TP ($r=-0.925, P<0.05$) and NH₄⁺-N ($r=-0.927, P<0.05$). A total of 53 algal taxa including six dominant species were identified in biological stabilization ponds. Algal species and diversity increased gradually and total cell densities decreased gradually in the system of ponds. The cell density of *Microcystis viridis* and *Microcystis wesenbergii* decreased gradually, and that of *Cyclotella meneghiniana*, *Cryptomonas erosa*, *Dictyosphaerium pulchellum* and *Sphaerocystis Schroeteri* increased gradually.

Keywords: Biological stabilization ponds; polluted river; purification effect; Lake Dianchi catchment

大清河发源于昆明北郊松花坝水库, 是一条直泄入滇池北部外海的河流, 也是一条受污染的城市河流. 2006 年建成并投入使用的大清河截污综合整治工程, 使得沿河部分城市污水和高浓度的雨污混合水截流进入昆明市第二污水处理厂和大清河截污系统, 有效减少了入滇污染. 但是污水处理厂尾水、面源污染以及部分直排入河内的污水尚未得到完全控制, 导致大清河依然常年黑臭, 蓝藻水华严重, 河口区水体的污染负荷也远远

* 国家高技术研究发展计划项目(863)(2005AA601010)资助. 2009-04-08 收稿; 2009-07-21 收修改稿. 赵学敏, 女, 1981 年生, 博士; E-mail: zhaoxm@scies.com.cn.

** 通讯作者; E-mail: xzc@scies.com.cn.

超出其自净能力^[1,2], 大清河仍是滇池污染的主要入口之一. 因此, 削减大清河入湖负荷对保护滇池意义重大.

生物稳定塘也称氧化塘, 是一种利用天然净化能力的生物处理构筑物, 可直接利用旧河道、河滩、沼泽及无农业利用价值的鱼塘、荒地等进行改造^[3], 具有基建投资少、运行管理简单、耗能小、处理费用低等优点^[4,5], 曾被应用于农村生活污水处理和城市黑臭河涌治理中^[6-8]. 为了在可控条件下高效削减河道污染物, 现利用大清河旁侧低洼地建立改良型生物稳定塘系统, 自河中引水经处理系统后排入河道, 在可控条件下高效削减河道污染物, 从而达到削减入湖污染物的目的. 本文对塘系统中污水处理效果以及浮游藻类群落结构和生物量变化进行了研究, 以为滇池的水环境保护提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 系统构建

为克服单一塘处理技术的不足, 特组合不同功能塘单元建成生物稳定塘系统. 工程建于大清河下游西岸, 由预处理塘、好氧塘、水生植物塘、养殖塘串联组成. 工程占地约 15 亩. 其中预处理塘面积约 2000m², 平均水深 3m; 好氧塘面积约 1700m², 平均水深 2.6m, 塘内布设 KDT 弹性立体填料便于微生物附着生长, 采用微孔曝气来强化水质净化; 水生植物塘面积约 2350m², 平均水深 2.2m, 设置人工浮床降低水体中的氮、磷等营养物质; 养殖塘面积约 1700m², 塘中放养各种经济鱼类, 通过鱼类捕食水体中悬浮大颗粒有机物、藻类和菌类而进一步去除污染物.

1.2 系统运行情况

塘系统设计处理能力为旱季 5000m³/d, 雨季最大 10000m³/d, 总水力停留时间(HRT)为 2-4d. 设计旱季 COD、NH₄⁺-N 及 TP 等主要污染物去除率超过 50%, 雨季去除率超过 30%. 经测算, 该塘系统的吨水投资为 270 元/吨(旱季规模计), 吨水运行成本 0.089 元/m³, 2007、2008 年处理河流污水均在 150 × 10⁴ m³/年以上.

1.3 采样点、采样时间与方法

本研究共设 5 个采样点, 分别为系统进水口、预处理塘、好氧塘、水生植物塘及养殖塘出水口. 于 2008 年 9 月 8 日进行样品采集, 浮游藻类定性样品用 25# 浮游生物网在水面下作“∞”捞取, 4% 福尔马林固定; 定量水样用 5L 采水器采集表层(水下 0.5m)水样, 取 1.2L 加鲁哥氏液固定. 各采样点取 1200ml 水样回实验室进行理化数据和叶绿素 a 分析.

1.4 理化数据和叶绿素 a 浓度分析

除水温、pH、溶氧(DO)和透明度(SD)现场测定外, 总固体悬浮颗粒物(TSS)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、生化需氧量(BOD₅)、化学耗氧量(COD)和叶绿素 a(chlorophyll-a)浓度的测定均按照标准方法^[9]在室内进行.

1.5 浮游植物分析

定量样品的沉淀、浓缩、定容和细胞计数参照《淡水浮游生物研究方法》^[10]进行, Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀性指数(J)的计算公式分别为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i (P_i = N_i/N); J = H'/\log_2 S$$

式中: S 为种类数, N 为同一样品中的个体总数, N_i 为第 i 种的个体数^[11-12].

1.6 数据分析

相关性分析及其显著性检验均利用 SPSS 13.0 软件包完成.

2 结果与分析

2.1 理化数据

采样期间, 水温平均为 23℃, 在水体流经预处理塘、好氧塘、水生植物塘、养殖塘的过程中, pH 值和 DO 呈逐渐上升趋势, SD 和 TSS 先上升后下降, TN、TP、NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD 均呈下降趋势(图 1). 生物稳定塘系统对 TN、TP、NH₄⁺-N、BOD₅ 和 COD 的去除率分别达 29.29%, 48.68%, 33.68%, 68.14% 和 71.25% (表 1), 其中养殖塘对 TN 和 NH₄⁺-N 的去除率最高, 分别为 11.26% 和 14.98%, 水生植物塘对 TP 的去除率最

高,达 22.89%,好氧塘对 BOD_5 和 COD 的去除率最高,分别达 34.42% 和 52.63%,预处理塘对各项指标的去除率均保持在相对较低的水平。

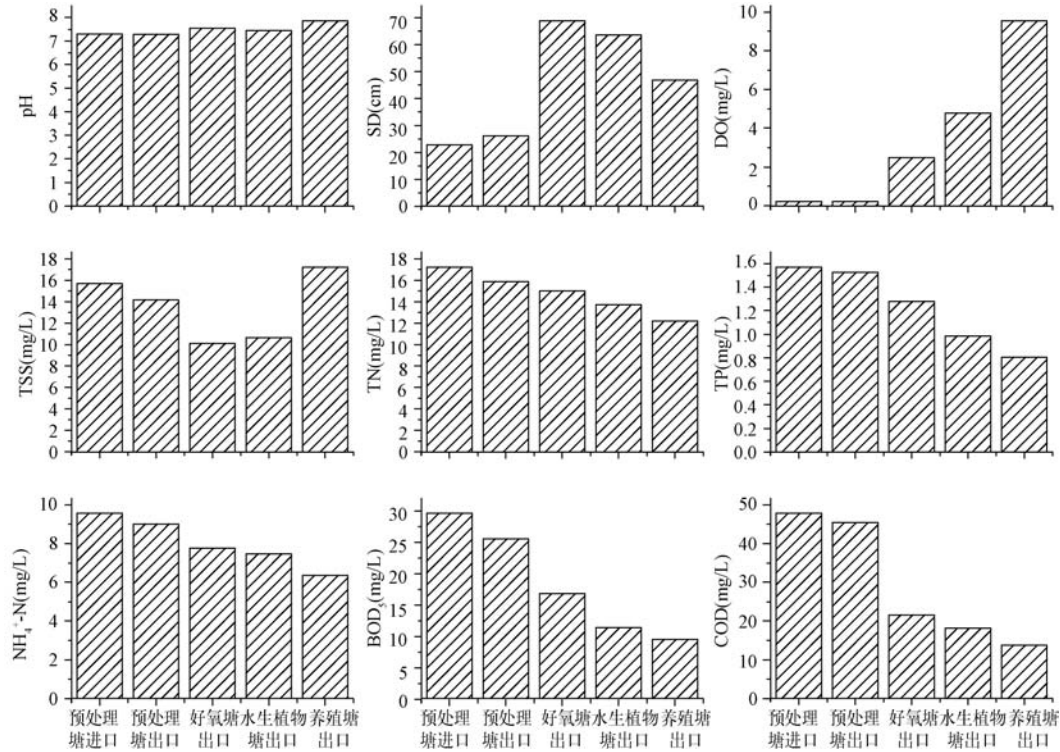


图 1 生物稳定塘的主要环境参数

Fig. 1 Main environmental parameters in the biological stabilization ponds

表 1 生物稳定塘 TN、TP、 NH_4^+-N 、 BOD_5 和 COD 的去除率

Tab. 1 Removal rates of TN, TP, NH_4^+-N , BOD_5 and COD in the biological stabilization ponds

去除率 (%)	预处理塘	好氧塘	水生植物塘	养殖塘	生物稳定塘系统
TN	7.97	5.38	8.50	11.26	29.29
TP	2.83	16.24	22.89	18.23	48.68
NH_4^+-N	5.78	14.00	3.72	14.98	33.68
BOD_5	13.95	34.42	32.14	16.81	68.14
COD	5.00	52.63	15.97	23.97	71.25

2.2 藻类种类组成

在生物稳定塘系统中,共鉴定出藻类 5 门 36 属 53 种,其中蓝藻门 5 属 8 种,硅藻门 4 属 5 种,隐藻门 1 属 1 种,绿藻门 23 属 34 种,裸藻门 3 属 5 种。系统进水、预处理塘、好氧塘、水生植物塘和养殖塘出口分别发现藻类 20、24、32、38 和 33 种,可见污水在逐级经过各塘的同时,藻类种类数也在逐渐增加(图 2)。

2.3 叶绿素 a 浓度和藻类细胞密度

生物稳定塘系统中浮游植物总细胞密度和叶绿素 a 浓度均较高(图 3),总细胞密度波动在 1.19×10^7 cells/L 和 8.04×10^7 cells/L 之间,均值为 3.73×10^7 cells/L; 叶绿素 a 浓度波动在 $32.93 \mu\text{g/L}$ 和 $278.63 \mu\text{g/L}$ 之间,均值为 $114.39 \mu\text{g/L}$ 。总细胞密度在经过生物稳定塘系统的逐级处理后显示了下降趋势,

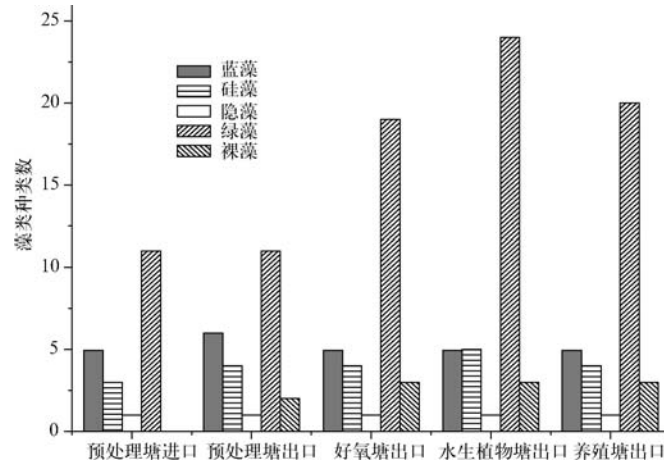


图 2 生物稳定塘系统的藻类组成

Fig. 2 Species composition of algae in the biological stabilization ponds

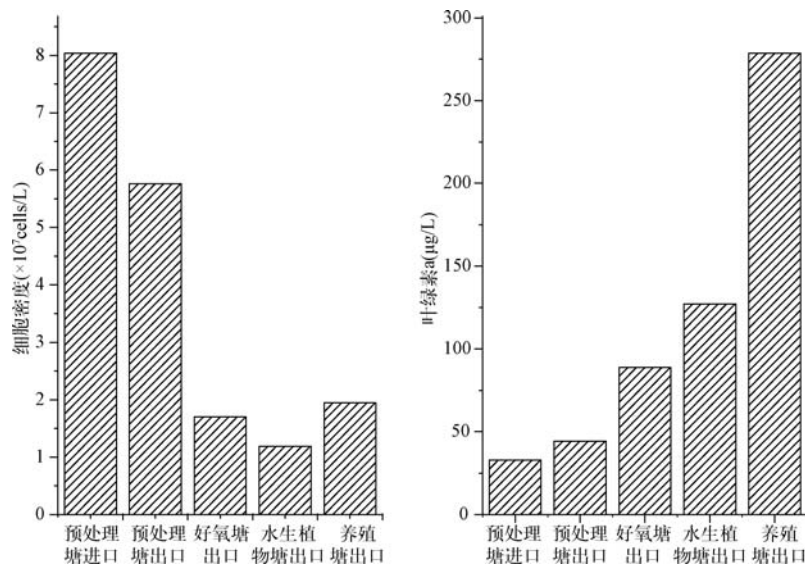


图 3 生物稳定塘系统的总细胞密度和叶绿素 a 含量

Fig. 3 Total cell densities and chlorophyll-a concentration in the biological stabilization ponds

与此相反,叶绿素 a 浓度呈现了一种上升趋势,这种差异是由于各塘中藻类种类组成不同所致. 预处理塘进水口和出水口中均是蓝藻占据绝对优势,所占比例分别为 98.35% 和 98.06%,好氧塘出水口硅藻和绿藻所占比例有所增加,但蓝藻仍占 64.77%,水生植物塘出水口和养殖塘出水口硅藻和绿藻占据优势,同时隐藻所占比例亦有所增加(图 4). 设定相对丰富度(某种藻细胞密度占总细胞密度的比例)大于 5% 为优势种,则生物稳定塘系统中共出现 6 种优势种,分别为蓝藻门的绿色微囊藻(*Microcystis viridis*)和惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*),硅藻门的梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*),隐藻门的嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*),绿藻门的美丽网球藻(*Dictyosphaerium pulchellum*)和球囊藻(*Sphaerocystis Schroeteri*). 它们的细胞密度在各采样点显示出明显差异,在生物稳定塘系统处理过程中,绿色微囊藻和惠氏微囊藻呈现逐渐下降趋势,梅尼小环藻、嗜蚀隐藻、美丽网球藻和球囊藻呈现逐渐上升趋势(图 5).

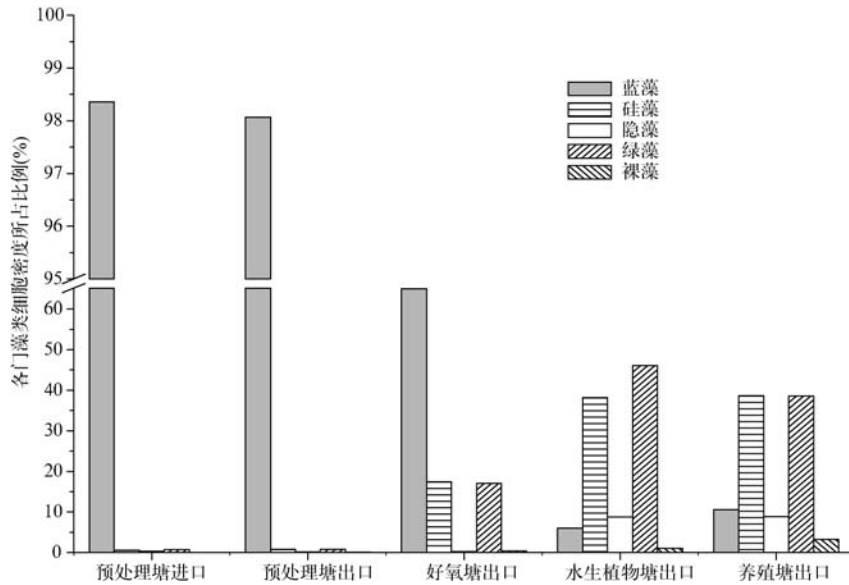


图4 生物稳定塘系统中各门藻类细胞密度所占比例

Fig.4 Ratio of algal cell densities in the biological stabilization ponds

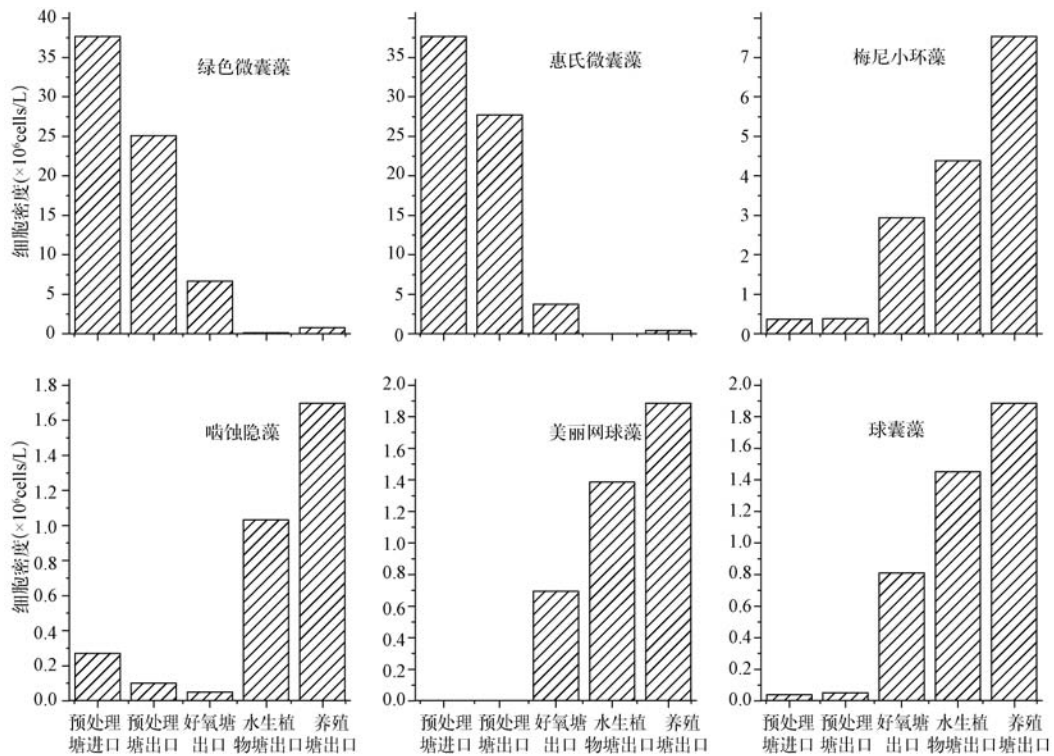


图5 生物稳定塘系统中6种优势藻类的细胞密度

Fig.5 Cell densities of six dominant algae in biological stabilization ponds

2.4 H' 和 J

一般来说,藻类的 H' 越高,其群落结构就越复杂,稳定性越大,水质越好;当水体受到污染时,敏感型种类消失, H' 减小,群落结构趋于简单,稳定性变差,水质下降^[13].研究表明 J 和 H' 具有相关性,例如竞争、捕食、演替等生态过程都能够通过改变 J 来改变 H' ,而不会改变种类丰富度^[14].其对水质的评价标准为: H' :>3,轻或无污染;1-3,中污染;0-1,重污染. J :0-0.3,重污染;0.3-0.5,中污染;0.5-0.8,轻或无污染^[15]. H' 波动在1.52-3.37之间,均值为2.51; J 波动在0.33-0.67之间,均值为0.51.在生物稳定塘系统逐级处理过程中, H' 和 J 均呈现逐渐增加的趋势(图6).根据评价标准可知,预处理塘进水和出水均为中污染,水生植物塘出水为轻污染,好氧塘出水为中污染向轻污染过渡水体.

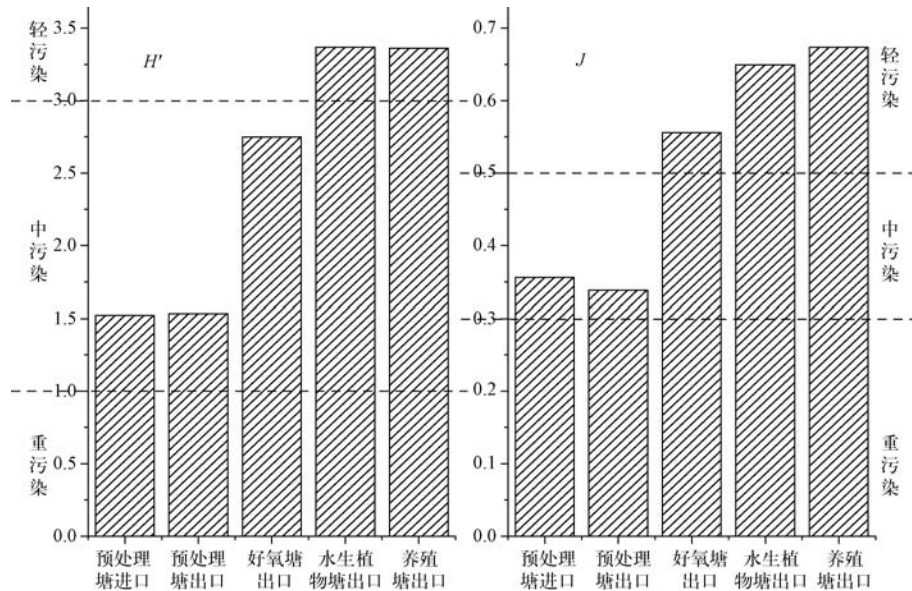


图6 生物稳定塘系统的 H' 和 J

Fig. 6 H' and J in the biological stabilization ponds

2.5 相关分析

叶绿素 a 浓度和 pH ($r = 0.955, P < 0.05$)、DO ($r = 0.992, P < 0.01$) 显著正相关, 而和 TN ($r = -0.936, P < 0.05$)、TP ($r = -0.925, P < 0.05$) 以及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($r = -0.927, P < 0.05$) 等显著负相关(表2). 这说明随着水体中一些高含量 N、P 物质的去除以及溶氧增加等因素, 水体开始适合多种藻类生长, 而不再仅仅只适合微囊藻生长. 总细胞密度和蓝藻细胞密度相关系数达到 0.992, 说明在整个生物稳定塘系统中藻细胞密度主要由蓝藻提供, 相反, 叶绿素 a 浓度并没有和蓝藻细胞密度呈现出好的相关性 ($r = -0.729, P = 0.162$), 叶绿素 a 浓度和硅藻、隐藻、绿藻和裸藻细胞密度分别达到了 0.971 ($P < 0.01$)、0.923 ($P < 0.05$)、0.941 ($P < 0.05$) 和 0.973 ($P < 0.01$), 这说明叶绿素 a 浓度含量主要是这几类藻提供, 而蓝藻中的优势种微囊藻虽然细胞密度很高, 但由于细胞体积相对较小, 对水体叶绿素 a 浓度的贡献并不大. H' 和 J 均和种类数显著正相关, 和总细胞密度显著负相关, 种类数和总细胞密度极其显著负相关, 这说明了藻细胞密度的大量增殖会降低种类数、多样性和均匀性.

3 讨论

3.1 生物稳定塘系统对营养的去除及其机理研究

生物稳定塘在去除河流中的有机物和营养物质等方面起着重要作用^[16-17]. 在本实验中, 塘系统对大清河

表 2 各参数之间的皮尔逊相关系数(r ,倒三角)和概率水平(p ,正三角)(样本含量 n 为 5)
Tab. 2 Pearson correlation coefficients and probability levels between parameters

	pH	SD	DO	TSS	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	BOD ₅	COD	Chl. a	SN	TA	CyA	BaA	CrA	ChA	EuA	H'	J
pH		0.463	0.940*	0.270	-0.870	-0.862	-0.919*	-0.808	-0.829	0.955*	0.582	-0.661	-0.735	0.936*	0.789	0.882*	0.927*	0.780	0.816
SD	0.432		0.443	-0.723	-0.574	-0.617	-0.677	-0.773	-0.843	0.366	0.883*	-0.918*	-0.878	0.557	0.224	0.585	0.168	0.815	0.794
DO	0.018*	0.455		0.265	-0.953*	-0.963**	-0.946*	-0.887*	-0.855	0.992**	0.694	-0.696	-0.780	0.991**	0.940*	0.976**	0.938*	0.859	0.883*
TSS	0.660	0.167	0.666		-0.053	-0.022	0.022	0.201	0.262	0.351	-0.491	0.489	0.383	0.139	0.409	0.076	0.535	-0.254	-0.203
TN	0.055	0.311	0.012*	0.932		0.974**	0.979**	0.959**	0.908*	-0.936**	-0.827	0.836	0.894*	-0.967**	-0.860	-0.963**	-0.854	-0.906*	-0.910*
TP	0.061	0.267	0.008**	0.972	0.005**		0.967**	0.968**	0.935*	-0.925*	-0.856	0.831	0.894*	-0.984**	-0.898*	-0.997**	-0.817	-0.956*	-0.963**
NH ₄ ⁺ -N	0.028*	0.210	0.015*	0.972	0.004**	0.007**		0.972**	0.961**	-0.927*	-0.844	0.881*	0.930*	-0.975**	-0.801	-0.961**	-0.831	-0.938*	-0.947*
BOD ₅	0.098	0.126	0.045*	0.745	0.010**	0.007**	0.006**		0.981**	-0.840	-0.944*	0.943*	0.977**	-0.935*	-0.763	-0.951*	-0.703	-0.983**	-0.978**
COD	0.083	0.073	0.065	0.671	0.033*	0.020*	0.009**	0.003**		-0.807	-0.930*	0.952*	0.979**	-0.916*	-0.692	-0.923*	-0.660	-0.985**	-0.986**
Chl. a	0.011*	0.544	0.001**	0.562	0.019*	0.024*	0.024*	0.075	0.099		0.617	-0.640	-0.729	0.971**	0.923*	0.941*	0.973**	0.797	0.825
SN	0.303	0.047*	0.194	0.401	0.084	0.064	0.072	0.016*	0.022*	0.267		-0.969**	-0.969**	0.774	0.577	0.822	0.431	0.950*	0.925*
TA	0.225	0.028*	0.192	0.403	0.078	0.081	0.049*	0.016*	0.013*	0.245	0.007**		0.992**	-0.778	-0.505	-0.797	-0.473	-0.930*	-0.911*
CyA	0.157	0.050	0.119	0.525	0.041*	0.041*	0.022*	0.004**	0.004**	0.162	0.007**	0.001**		-0.851	-0.608	-0.866	-0.572	-0.963**	-0.950*
BaA	0.019*	0.329	0.001**	0.824	0.007**	0.002**	0.005**	0.020*	0.029*	0.006**	0.125	0.121	0.067		0.905*	0.991**	0.891*	0.917*	0.935*
CrA	0.112	0.717	0.018*	0.494	0.062	0.038*	0.103	0.133	0.196	0.025*	0.308	0.386	0.277	0.034*		0.917*	0.885*	0.747	0.769
ChA	0.048*	0.300	0.004**	0.904	0.009**	0.000**	0.009**	0.013*	0.025*	0.017*	0.088	0.107	0.057	0.001**	0.029*		0.840	0.944*	0.956*
EuA	0.023*	0.787	0.018*	0.352	0.065	0.091	0.081	0.185	0.225	0.005**	0.469	0.421	0.314	0.042*	0.046*	0.075		0.639	0.675
H'	0.120	0.093	0.062	0.680	0.034*	0.011*	0.018*	0.003**	0.002**	0.106	0.013*	0.022*	0.009**	0.028*	0.147	0.016*	0.246		0.997**
J	0.092	0.109	0.047*	0.744	0.032*	0.009**	0.014*	0.004**	0.002**	0.086	0.024*	0.032*	0.013*	0.020*	0.129	0.011*	0.212	0.000**	

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; SN: 种类数; TA: 总细胞密度(cells/L); CyA: 蓝藻细胞密度(cells/L); BaA: 硅藻细胞密度(cells/L); CrA: 绿藻细胞密度(cells/L); ChA: 绿藻细胞密度(cells/L); EuA: 裸藻细胞密度(cells/L).

的水质净化效果亦很显著,多种污染物在各塘中均得到有效消减.与汉沽生物稳定塘^[18]相比,大清河生物稳定塘 BOD₅ 和 NH₄⁺-N 的去除效率较低(表 3),这可能与进水 BOD₅ 和 NH₄⁺-N 浓度较低有关,因为污染物的进水浓度会影响生物稳定塘水质净化效能;但大清河生物稳定塘 COD 去除效率在其进水浓度低 18 倍时仍高于汉沽生物稳定塘,这表明大清河生物稳定塘对 COD 的去除效果更加明显.大清河污水进入预处理塘后,由于流速降低使得所挟带的部分悬浮物发生沉淀作用,水质得以初步净化.大清河水质长期处于黑臭状态,其重要原因之一是溶氧含量低,水质经过预处理塘之后,溶氧条件并未得到改善,平均仅为 0.23mg/L.河水耗氧主要由还原性物质耗氧、溶解态和胶体态易降解有机污染物生化耗氧、氨氮硝化耗氧、河道底泥等固态有机污染物、难降解有机物耗氧^[19]和生物呼吸耗氧.在好氧塘中,通过用鼓风机曝气来提高水中溶氧,这样上述耗氧物质得以大量降解,故 BOD₅、COD 和 NH₄⁺-N 去除效率在本塘中均很高,分别达到 34.42%、52.63% 和 14.00%(表 1).好氧塘中采用好氧/厌氧交替运行的方式,并设置人工填料,便于形成藻菌生物膜,硝化菌和反硝化菌以有机物为碳源,通过硝化和反硝化过程而达到脱氮的目的,在好氧条件下,微生物对磷吸附、消耗和储存,沉淀到塘底,从而除去水中部分磷.水生植物塘中种植多种不同的水生植物,水生植物在其生长过程中对于氮、磷等营养的吸收与去除起到了重要作用^[20],植物塘对 TP 的去除率(22.89%)较好,与已报道的植物塘净化水质的结果较为一致^[21],水生植物的根和茎,为细菌和微生物提供了生长介质,并可以向塘水供氧,BOD₅ 和 COD 的含量进一步降低.养殖塘中放养各种经济鱼类,通过鱼类捕食水体中悬浮大颗粒有机物、菌类、藻类、原生动物、轮虫、枝角类和桡足类而去除部分污染物,从而有利于水质净化.养殖塘中藻类生物量最高,光照下藻类大量繁殖消耗了水中 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 导致 pH 上升,并产生了大量 O₂,pH 上升引起氨的挥发,同时也会促进磷形成磷酸钙盐沉淀,所以显著降低了 TN、NH₄⁺-N、TP 的浓度,同时 O₂ 的大量产生也又降低了水体的 BOD₅、COD 和 NH₄⁺-N 的浓度.

在整个塘系统中,好氧塘对 BOD₅、COD 的去除率最高,水生植物塘对磷的去除率最高,养殖塘对 TN、NH₄⁺-N 去除率最高.它们是一个将不同处理技术与工艺进行组合后,实现各处理单元处理效果优势互补的系统,从而提高塘系统总体净化能力.该系统可为滇池流域或其它类似地区河道的污染削减和生态修复提供技术支撑.

表 3 大清河和汉沽生物稳定塘中污染物去除效果比较

Tab. 3 Comparison of removal rates of pollutants between Daqing River and Hangu biological stabilization pond

名称	BOD ₅		COD		NH ₄ ⁺ -N	
	去除率 (%)	进水水质 (mg/L)	去除率 (%)	进水水质 (mg/L)	去除率 (%)	进水水质 (mg/L)
大清河生物稳定塘系统	68.14	31.06	71.25	53.33	33.68	9.51
汉沽生物稳定塘系统 ^[18]	86.2	546.4	70.1	966.1	60.3	28.13

3.2 水质改善与生态系统恢复

在受污染水体的治理过程中,水生植物因具有拦截外源营养、吸收水体中氮磷元素等作用而常被用来净化水质.但在溶解氧较低的富营养化水体中,并不适合通过直接种植植物实现恢复生态系统的目的^[22-23].对于这样的富营养化水体,更需要依靠工程技术等手段改善环境条件后恢复生态系统.本实验在好氧塘中采用的人工曝气增氧等工程措施能快速改变水体环境条件,使得水体溶解氧含量迅速增加(平均从 0.23mg/L 增加到 2.48mg/L),改变了藻类生存环境,蓝藻(以微囊藻为主)细胞密度迅速降低,绿藻、硅藻、隐藻、裸藻所占比例上升,水质处于中污染型向轻污染型的过渡期.此后再经过植物塘与养殖塘处理,水体中蓝藻比例进一步降低,藻类种类数与生物多样性增加,水质完全从中污染型转变为轻污染型.这说明污染严重的富营养化水体在经过工程措施处理得到一定改善后(如增加水体溶解氧),在有利于水生态系统恢复的情况下,再加以种植水生植物进行生物净化,最终能够实现改善水质和恢复生态系统的目的.

4 结论

(1) 生物稳定塘系统组合了预处理塘、好氧塘、水生植物塘、养殖塘的优势,提高了污水处理效果,塘系

统对 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 、 BOD_5 和 COD 的去除率分别达 29.29%、48.68%、33.68%、68.14% 和 71.25%，这表明生物稳定塘系统是一种有效的污水处理系统，能为滇池流域或其它类似地区河道的污染削减和生态修复提供技术支撑。

(2) 生物稳定塘系统在污水处理过程中，藻类种类数从 20 种增加到 33 种，水体生物多样性增加；微囊藻细胞密度逐渐减少，硅藻和绿藻比例增加。藻类种类和生物量的变化反映了水体质量和水质净化趋势。

致谢：野外采样及室内分析得到颜仁强、洪世冠、张永亮、蒋为及桂腾杰等的大力帮助，特此致谢。

5 参考文献

- [1] 吴乃成,徐耀阳,唐 涛等.滇池入湖河流大清河河口段浮游藻类格局研究.生态科学,2008,27(4):212-216.
- [2] 谭 夔,陈求稳,毛劲乔等.大清河河口水体自净能力实验.生态学报,2007,27:4736-4742.
- [3] 李穗中.氧化塘污水处理技术.北京:中国环境科学出版社,1992.
- [4] Zhao QL, Wang BZ. Evolution on a pilot-scale attached-growth pond system treating domestic wastewater. *Water Research*, 1996, 30: 242-245.
- [5] Cauchie HM, Salvia M, Weicherding J *et al.* Performance of a single-cell aerated waste stabilisation pond treating domestic wastewater: a three-year study. *International Review of Hydrobiology*, 2000, 85: 231-251.
- [6] 江 栋,李开明,刘 军等.黑臭河道生物修复中氧化塘应用研究.生态环境,2005,14(6):822-826.
- [7] 刘汝鹏,曲 莹,于水利.生物稳定塘系统在城市污水处理中的应用.水处理技术,2006,32(11):68-70.
- [8] 黄翔峰,池金萍,何少林等.高效藻类塘处理农村生活污水研究.中国给水排水,2006,22(5):35-39.
- [9] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法.北京:科学出版社,1991.
- [11] Shannon CE, Wiener W. The mathematical theory of communication. Illinois: University of Illinois Press, 1963: 125.
- [12] Pielou EC. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10:370-383.
- [13] 况琪军,马沛明,胡征宇等.湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展.安全与环境学报,2005,5(2):87-91.
- [14] Gao XL, Song JM. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50:327-335.
- [15] 周广杰,况琪军,胡征宇等.三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治.中国环境科学,2006,26(3):337-341.
- [16] Polprasert C, Agarwalla BK. A facultative pond model incorporating biofilm activity. *Water Environment Research*, 1994, 66(5):725-732.
- [17] Kim Y, Giokas DL. Design of the water hyacinth ponds for removing algal particles from waste stabilization ponds. *Water Science and Technology*, 2003, 48(11/12):115-123.
- [18] 黄玉瑶,许木启,高玉荣等.汉沽生物稳定塘净化效果研究.应用与环境生物学报,1999,5(4):362-366.
- [19] 李开明,刘 军,刘 斌等.黑臭河道生物修复中3种不同增氧方式比较研究.生态环境,2005,14(6):816-821.
- [20] Li XP, Manmana C, Anderson BC. Design and performance of a water quality treatment wetland in a public park in Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(1):18-24.
- [21] 黄 亮,黎道丰,蔡庆华等.不同水生植物对滇池入湖河道污水净化效能的比较.生态环境,2008,17(4):1385-1389.
- [22] 郭和蓉,卢小良.水生植物净化水环境与水生植被的修复.长江大学学报,2005,2(5):65-69.
- [23] 李宽意,刘正文,王春忠等.低溶解氧对苦草生长的影响.长江流域资源与环境,2006,15(5):670-673.