

氮磷对污水净化中藻类叶绿素含量的影响*

高玉荣 黄玉瑶 曹 宏 陈俨梅

(中国科学院动物研究所,北京 100080)

提 要

在室内模拟生物净化槽中比较研究了氮磷对污水中藻类叶绿素含量和污水净化的影响。污水中磷含量均为 7mg/L 左右, 氮含量分别为 77.4、44.4、24.8 和 13.5mg/L, 结果发现 $TN/TP = 77.4/7.01\text{mg/L}$ 组, 污水经 7d 净化, 藻类叶绿素含量最高, 污水净化效果较好。四个实验组比较, 叶绿素含量随 TN/TP 比例的上升而上升, 呈显著正相关。

关键词 氮, 磷, 藻类, 叶绿素, 污水净化

叶绿素是组成藻类色素体的重要成分, 其含量高低不但与藻类的种类、数量及发育状况有关, 也与水体污染状况和营养状况有关^[1]。氮磷是藻类叶绿素进行光合作用所必需的营养物质^[2], 有关氮磷对藻类生长的影响已有不少研究^[3,4], 氮磷含量及其比例对污水中藻类叶绿素含量的影响研究并不多见。作者在研究汉沽化工废水生物净化时, 发现氮磷含量及其比例变化较大, 不但对污水净化有影响, 对藻类叶绿素含量及藻类群落结构也有明显影响^[5]。拟进行氮磷含量及其比例对污水净化及藻类叶绿素含量影响的模拟实验研究, 以期为提高污水生物氧化塘的净化效果及污水的渔业利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验是在玻璃温室内模拟氧化槽中进行的。氧化槽由 12mm 厚的塑料板制成, 规格为 $300 \times 120 \times 20\text{cm}$, 平均分隔成 4 纵列, 每纵列又均分为 4 隔, 每隔之间设两块挡板, 一块沉底不露出水面, 一块露出水面而底部留空, 使污水由底部流入从上部流出, 以保持槽内污水上下混合。每个系列前后各设 1 个污水贮备槽和收集槽。这样构成四个实验组, 具体结构见图 1。

实验时槽内水深 18cm, 4 个系列及 4 个等级的体积大体一致(表 1)。每天根据各系列的体积大小加入不同量的污水, 使各实验系列污水停留时间保持一致, 整个流程为 7d。

1.2 污水配制

为使污水成分稳定, 实验用污水由人工配制而成。即将一定量 KNO_3 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、

* 本研究为国家自然科学基金资助项目。

1992 年 4 月 16 日收到; 1994 年 11 月 18 日修回。

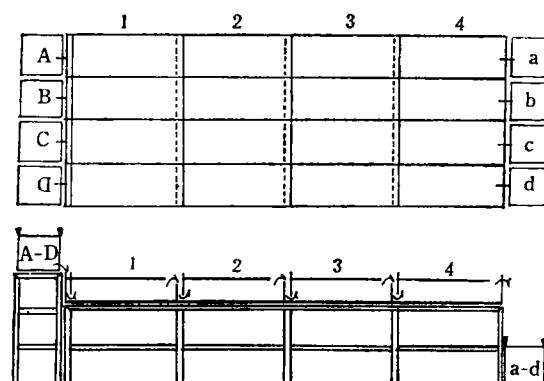


图 1 模拟氧化槽装置示意图

上图为正面观,下图为侧面观;图中 A—D 为污水贮存槽,1—4 为四级氧化槽(串联),
a—d 为净化后污水收集槽

Fig. 1 Diagram of simulation system of stabilization ponds

Above: top view; Bottom: lateral view; A—D: reservoirs of sewage; 1—4: cells of stabilization ponds; a—d: receptive tanks for purifying sewage water

表 1 模拟氧化槽体积及水力停留时间 (d)

Tab. 1 The size of stabilization pond and the period (days) of hydraulic retention

级 别 Levels	体积 Volume (L)				水力停留时间 Days of hydraulic retention (d)
	A	B	C	D	
1	32.5	32.8	32.3	32.7	1.75
2	33.6	35.1	30.9	34.2	1.75
3	33.8	34.2	32.1	34.8	1.75
4	31.1	30.4	28.6	32.9	1.75
合计 Total	131.0	132.5	123.9	134.6	7.00

可溶性淀粉及洗涤灵 (LAS) 加入到一定体积的自来水中,再加入等量微量元素,具体参考 A_5 溶液配制方法^[6]。使四个组污水的 BOD_5 含量保持在 328—363mg/L 范围内,洗涤灵有效成分 (LAS) 为 10mg/L, 磷 (TP) 含量 5mg/L, 氮 (TN) 含量分别为 80、40、20 和 10mg/L。采用的北京日化二厂生产的金鱼牌洗涤灵,经测定其有效成分为 27.72% 磷含量 0.045mg/L, 氮未检出。

实验进行两次,分别于 1988 年 1989 年春、夏之间进行。前后两次实验对各组的位置进行了对换,以减少光照条件不同的影响。

1.3 藻类的接种和培养

氧化槽灌满污水一周后,于各组的 1—4 级槽中各接入室内培养的混合藻液,使藻密度达 100×10^4 个/L 左右。接入藻类以栅藻为主,其余为菱形藻、隐藻、蓝隐藻、小球藻、衣藻、韦氏藻、颤藻、针杆藻、纤维藻、蓝纤维藻等。

前后两次实验水温分别为 20.1—25.0℃ 和 17.2—25.8℃ 之间。光照以自然光为主, 阴雨天加日光灯照明, 照度保持在 $(2.1-6.1) \times 10^3 \text{ Lux}$ 之间。

1.4 实验的管理与测定

藻类培养两周后, 每天定时定量加入预先配好的污水, 调好流速, 使污水在 6h 内全部流入 1 级槽。再经过 2 周预实验后, 正式实验每周测定 1 次各级槽中的 PH、DO、BOD₅、TN、TP 及 LAS 含量, 同时测定藻类种类、密度、叶绿素含量及初级生产力。每天定时测定水温、照度。分析方法参考“水和废水标准检验法”, 生物量由叶绿素 a 推算⁷。每次正式实验持续 6 周以上。

2. 结果与讨论

2.1 污水净化与叶绿素变化趋势

四个实验组, 污水经过 7d 的净化, 水质和叶绿素含量发生了较大变化, 两次实验趋势十分一致, 现以 1989 年 4—5 日结果为代表加以叙述。

2.1.1 水质变化 污水随流程和停留时间的延长, BOD₅、TN、TP、LAS 的含量均有明显下降, TN 去除率在 59.7—90.8% 之间, TP 去除率在 65.7—77.8% 之间, BOD₅、LAS 去除率均在 80% 以上。群落呼吸量由无限大降至 $4.30 \text{ g O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 以下。同时 DO 和

表 2 各实验组进水几项指标变化

Tab. 2 Variations of some parameters in influents and effluents of the four test groups

项目 Items	组别 Test groups		A(80/5)	B(40/5)	C(20/5)	D(10/5)
	进水 Influent (mg/L)	出水 Effluent (mg/L)				
TN	进水 Influent (mg/L)	77.40	44.40	24.84	13.50	
	出水 Effluent (mg/L)	31.20	4.15	2.29	1.63	
	去除率 Removing rate (%)	59.69	90.65	90.78	87.93	
TP	进水 Influent (mg/L)	7.01	6.98	6.56	7.11	
	出水 Effluent (mg/L)	1.56	1.74	2.14	2.44	
	去除率 Removing rate (%)	77.75	75.07	67.38	65.68	
BOD ₅	进水 Influent (mg/L)	342.40	337.10	328.00	363.70	
	出水 Effluent (mg/L)	27.60	29.60	46.40	62.10	
	去除率 Removing rate (%)	91.94	91.22	85.85	82.93	
LAS	进水 Influent (mg/L)	8.06	8.30	7.68	7.88	
	出水 Effluent (mg/L)	0.17	0.17	0.24	0.37	
	去除率 Removing rate (%)	97.89	97.95	96.88	95.30	
PH	进水 Influent	4.91	4.70	4.86	4.89	
	出水 Effluent	8.75	8.50	9.31	9.24	
DO	进水 Influent (mg/L)	0	0	0	0	
	出水 Effluent (mg/L)	8.93	8.28	7.73	9.24	
Oxygen consumption	进水 Influent ($\text{g O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	∞	∞	∞	∞	
	出水 Effluent ($\text{g O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	2.69	2.57	4.28	4.30	

注: 括号内为配制污水 (TN/TP) 的预期浓度, 表中数据为 6 次测定平均值。(以下各表同上)。

pH 值大幅度上升,尤其是 DO 由 0 上升至 7.36mg/L 以上(表 2)。

2.1.2 叶绿素含量变化 随净化时间和流程的延长,在水质变化的同时,各组叶绿素含量也发生了较大变化(图 2)。

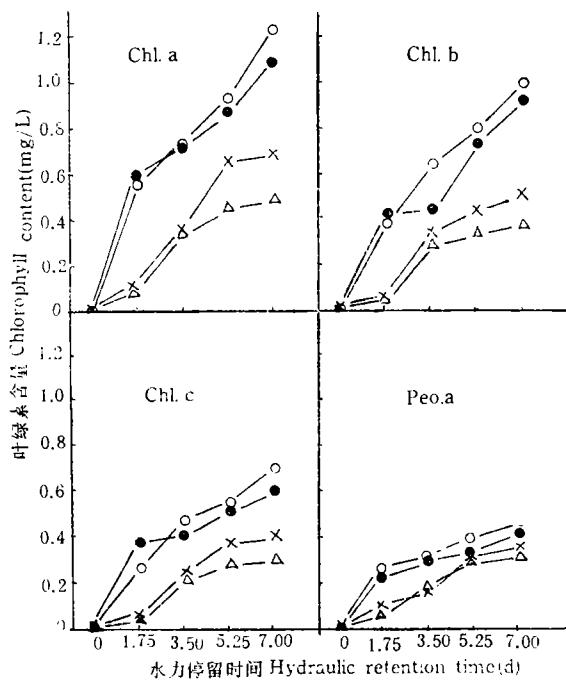


图 2 四个实验组叶绿素各成分的变化(1989 年)

Fig. 2 The variations of chlorophyll compositions in the four test groups (1989)

A 组 B 组 C 组 D 组

○——A test group ●——B test group ×——C test group △——D test group

从贮存槽流来的污水无藻类生存,叶绿素含量为零。随净化时间的延长,藻类出现并逐渐增多,叶绿素也从无到有,并大幅度上升,到第 4 级槽叶绿素总量上升到 1.14mg/L 以上,最高的 A₄ 级平均达 2.97mg/L,其中 ChL.a 上升幅度最大, A₄ 平均达 1.22mg/L,最低的 D₄ 级也达 0.49mg/L。 ChL.b 含量居第二位, ChL.c 含量最低,甚至有时还低于 ChL.a 的降解产物脱镁叶绿素 a(Peo.a)。这种状况的出现与槽中藻类种类组成有关,本实验中绿藻在各组中均占绝对优势,只有少量的硅藻、甲藻、蓝藻、裸藻存在^[3],只含 ChL.a 和 ChL.b 的藻类数量大大超过了同时含有 ChL.c 藻类的数量,造成了 ChL.c 含量相对较低。按藻类的组成状况, ChL.a 本应更高些,但由于净化后 4 级水中 BOD₅、TN、TP 等较高,仍为富营养水体。水体富营养化程度越高,导致 ChL.a 降解为 Peo.a 就越多,致使 ChL.a 下降。

ChL.b 和 ChL.c 及叶绿素总量变化趋势与 ChL.a 变化趋势基本一致,均随 ChL.a 的上升而上升,呈正相关关系,其关系式为:

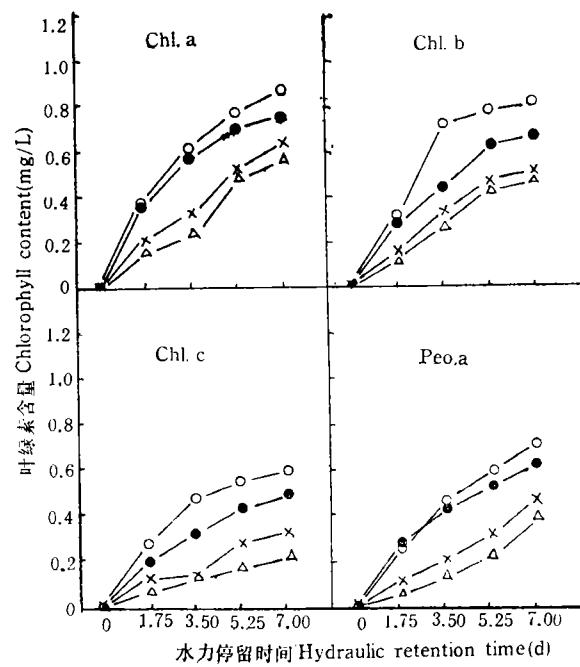


图 3 四个实验组叶绿素含量变化(1988年)

Fig. 3 The variations of chlorophyll compositions in the four test groups (1988)

A组 B组

C组 D组

○——A test group ●——B test group ×——C test group △——D test group

$$Y_{ChL} \text{ 总量} = 2.5548X_{ChL.a} - 0.0453, r = 0.9952 > r_{0.01}, n = 16.$$

$$Y_{ChL.b} = 0.8919X_{ChL.a} - 0.0399, r = 0.9753 > r_{0.01}, n = 16.$$

$$Y_{ChL.c} = 0.6525X_{ChL.a} - 0.0103, r = 0.9812 > r_{0.01}, n = 16.$$

1988 年与 1989 年实验结果基本趋势一致(图 3)，只是 1988 年叶绿素含量略低于 1989 年，尤其是 ChL.a 较其它成分更明显低于 1989 年。叶绿素含量除与藻类数量有关外，还与环境条件有密切关系。实验期间，1988 年水温高于 1989 年，在富营养化水体中，水温越高，ChL.a 降解为 Peo.a 就越多，从图 3 看出，1988 年各级槽，尤其是第 4 级槽的 Peo.a 均高于 1989 年同级槽。

以 ChL.a 推算出的生物量，在不同净化阶段变化也与叶绿素变化规律一致，1 级槽最低，4 级槽由于污染物大量降解，抑制作用下降，丰富的营养盐促进了藻类大量生长，生物量也最高(图 4)。

四个实验组从 1 级槽至 4 级槽，BOD₅，TN，TP 等有明显的去除，富营养程度大幅度下降，但仍在富营养范围内，在自净过程中，随着污染物对藻类抑制作用下降，充足的营养盐使藻类大量繁衍，叶绿素含量不断增加。各组出水的 ChL.a 远远高于 0.14mg/L^[9]，生物量也大大高于 5—10mg/L^[10] 的富营养水体标准。但四个实验组出水的富营养化程度又有所不同，以叶绿素为指标对各组水体评价与水质理化指标评价结果一致^[11,12]。

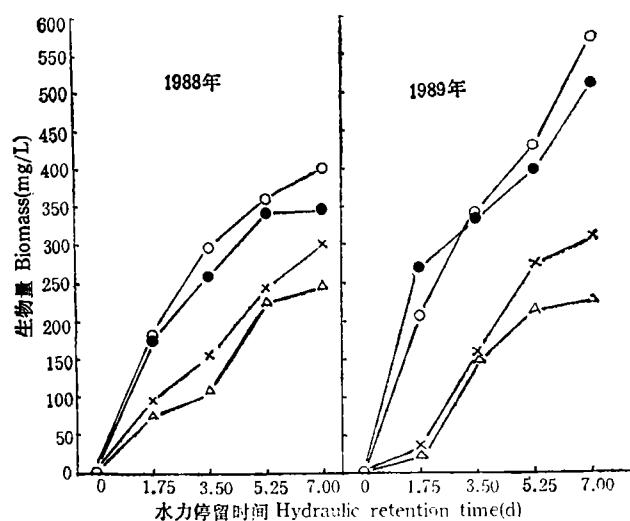


图 4 四个实验组藻类生物量变化

Fig. 4 The variations of biomass in the four groups

○—A test group, ●—B test group, ×—C test group, △—D test group

2.2 四个实验组叶绿素含量比较

从图 2、3 看出, 在不同 TN/TP 比例的四个实验组, 叶绿素含量明显不同。由四个实验组第 4 级槽出水叶绿素含量比较看出, TN/TP 比例高的 A 组, 叶绿素含量最高, 平均高达 2.97mg/L, TN/TP 比例低的 D 组, 叶绿素含量最低, 平均为 1.14mg/L, 不足 A 组含量的 1/2 (表 3)。

表 3 不同氮含量污水第 4 级槽叶绿素含量比较 (mg/L)

Tab. 3 Comparisons of chlorophyll concentrations among the fourth cells containing different concentrations of nitrogen in untreated sewage (mg/L)

项 目 Item	1988 年				1989 年			
	A ₄	B ₄	C ₄	D ₄	A ₄	B ₄	C ₄	D ₄
ChL.a	0.86	0.72	0.64	0.56	1.22	1.09	0.67	0.49
ChL.b	0.80	0.63	0.45	0.44	0.97	0.91	0.50	0.35
ChL.c	0.65	0.58	0.34	0.34	0.78	0.72	0.40	0.30
Chlorophyll total	2.31	1.93	1.43	1.34	2.92	2.72	1.57	1.14

各组第 4 级槽叶绿素含量的方差分析结果, 叶绿素 a, b, c 在四个组之间差异均显著:

$$F_{chL.a} = 7.1973 > F_{(3,16)0.01};$$

$$F_{chL.b} = 4.3663 > F_{(3,16)0.05};$$

$$F_{chL.c} = 5.6137 > F_{(3,16)0.01}.$$

表 4 叶绿素 a 含量与几个生态因素相关性分析
Tab. 4 The correlation analyses of algal chlorophyll a with some ecological factors in the four test groups (1989)

组别 Groups	项目 Items		相关表达式 Relational expression	r	n	相关水平 Correlation level
	Y	X				
A	ChL.a (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	$Y = 1.2330 - 0.0035X$	-0.6082	20	>r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	LAS (mg/L)	$Y = 1.0680 - 0.6117X$	-0.5473	20	>r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	TN (mg/L)		-0.3089	20	<r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	TP (mg/L)		-0.5850	20	>r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	T(°C)	$Y = 1.3533 - 0.1551X$	0.9817	6	>r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	藻密度 (10 ⁴ ind/L) Algal density	$Y = -1.6691 + 0.1154X$	0.9895	4	>r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	ChL.a (mg/L)	$Y = 0.066356 + 0.000005X$			
	pH	ChL.a (mg/L)	$Y = 3.1624 + 4.5132X$	0.9738	5	>r _{0.05}
		ChL.a (mg/L)	$Y = 2.7889 + 5.1327X$	0.6535	20	>r _{0.01}
		净生产量 (gO ₂ /m ² ·d) Net production				
B	ChL.a (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	$Y = 1.0521 - 0.0019X$	-0.4516	20	>r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	LAS (mg/L)	$Y = 1.1091 - 0.6186X$	-0.5247	20	>r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	TN (mg/L)		-0.4393	20	<r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	TP (mg/L)		-0.6646	20	>r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	T(°C)	$Y = 1.3278 - 0.1420X$	0.9231	6	>r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	藻密度 (10 ⁴ ind/L) Algal density	$Y = -0.012605 + 0.000005X$	0.9884	4	>r _{0.05}
	pH	ChL.a (mg/L)	$Y = 4.9612 + 3.3688X$	0.9865	5	>r _{0.05}
		ChL.a (mg/L)	$Y = 0.1279 + 6.9880X$	0.7721	20	>r _{0.01}
		净生产量 (gO ₂ /m ² ·d) Net production				

续表 4

组 别 Groups	项目 Items		相关式 Relational expression	r	n	相关水平 Correlation level
	Y	X				
C	ChL.a (mg/L)	BOD ₃ (mg/L)	$Y = 0.7356 - 0.0019X$	-0.7361	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	LAS (mg/L)	$Y = 0.6032 - 0.2168X$	-0.7395	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	TN (mg/L)		-0.3759	20	< r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	TP (mg/L)	$Y = 0.7828 - 0.0876X$	-0.6166	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	T(°C)	$Y = -0.1514 + 0.0263X$	0.9066	6	> r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	藻密度 (10 ⁴ ind/L)	$Y = -0.005416 + 0.000005X$	0.9986	4	> r _{0.01}
	pH	algal density				
	ChL.a (mg/L)	ChL.a (mg/L)	$Y = 6.5499 + 3.8061X$	0.9946	5	> r _{0.01}
	净生产量 (gO ₂ /m ² · d)	Net production	$Y = -0.4029 + 11.1065X$	0.8854	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	BOD ₃ (mg/L)	$Y = 0.6213 - 0.0162X$	-0.8033	20	> r _{0.01}
D	ChL.a (mg/L)	LAS (mg/L)	$Y = 0.5257 - 0.1700X$	-0.6488	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	TN (mg/L)		-0.3331	20	< r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	TP (mg/L)	$Y = 0.5768 - 0.0506X$	-0.5398	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)	T(°C)	$Y = 0.1275 + 0.0104X$	0.8829	6	> r _{0.05}
	ChL.a (mg/L)	藻密度 (10 ⁴ ind/L)	$Y = 0.02575 + 0.000004X$	0.9942	4	> r _{0.01}
	pH	Algal density				
	ChL.a (mg/L)	ChL.a (mg/L)	$Y = 6.7627 + 4.1711X$	0.7046	12	> r _{0.05}
	净生产量 (gO ₂ /m ² · d)	Net production	$Y = -0.2053 + 12.1532X$	0.8337	20	> r _{0.01}
	ChL.a (mg/L)					

四个实验组叶绿素由高到低排列顺序为:

$$A > B > C > D。$$

何林华报道 10mg/L 的 LAS 可使小球藻数量抑制下降 1 个数量级, 使月牙藻数量下降 $1/2^{[13]}$ 。本实验污水中 LAS 的预期浓度 10mg/L , 实测值只达 7mg/L 左右, 且降解很快, 第 4 级槽已降至 0.3mg/L 以下, 已不能成为藻类的限制因子。四个组其它环境条件均相同, 造成四个组叶绿素含量差异的主要因素显然是氮含量的不同, 即 TN/TP 比例的不同。从各组第 4 级槽 ChL.a 变化看出, ChL.a 含量随 TN/TP 比例的上升而上升, 二者呈正相关, 其关系式:

$$Y_{ChL.a} = 0.1008X_{TN/TP} + 0.4159, r = 0.7603 > r_{0.01}, n = 20$$

2.3 叶绿素 a 含量与水体氮磷等生态因素的关系

ChL.a 在本实验中占相当大比例, 与藻类数量一样, 其含量高低受环境条件影响, 随水体水温、PH、DO 含量及藻类数量的上升而上升, 呈正相关。在不同实验组中, ChL.a 随 TN/TP 比例的上升而上升; 在同一实验组中, 则随净化时间的延长, BOD, LAS, TP 的下降而上升, 呈负相关。ChL.a 随水体 TN 的下降而上升, 但相关关系不十分显著, 因各实验组 TN 含量相当充足, 不是藻类生长的限制因子(表 4)。

3 小结

1988 年和 1989 年两次室内模拟净化实验结果得出, 污水中氮磷含量及其比例对污水生物净化及藻类叶绿素含量有明显影响。磷含量在 7mg/L 左右, 氮含量分别为 77.4 、 44.4 、 24.8 和 13.5mg/L , 经过 7d 自然净化, 在同一实验组, 污水中藻类叶绿素含量随流程和水力停留时间的延长而上升, 随污水中 BOD, LAS, TN, TP 浓度的下降而上升, 随藻类数量、水温的上升而上升; 叶绿素含量的增加, 引起水体净生产力、DO, pH 值上升。

叶绿素含量与氮磷及其比例有密切关系, 本实验氮磷均充足情况下, 处于同一净化阶段的不同 TN/TP 比例组比较, 叶绿素 a 含量随氮磷比例的上升而上升, 呈正相关关系。本实验条件下, 以 $TN/TP = 77.4\text{mg/L}/7.01\text{mg/L}$ 的含量及比例经过 7d 的净化, 藻类叶绿素含量最高, 污水净化效果也很好。

参 考 文 献

- [1] 高玉荣。北京四海浮游藻类叶绿素含量与营养水平研究。水生生物学报。1992, **16**(3): 237—244。
- [2] 郑重。浮游生物学概论。北京: 科学出版社。1964: 242—243。
- [3] Chu S P. The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae. I. Methods and culture media. *J. Ecol.* 1942, **30**: 284—325。
- [4] Barnes R S K et al. Fundamentals of aquatic ecosystems. Blackwell Scientific Publications. London. 1978. 208—212。
- [5] 黄玉瑶等。京津地区生物生态学研究。北京: 海洋出版社。1991: 174—214。
- [6] 邱国雄等译 (J. 库姆斯等主编)。生物生产力和光合作用测定技术。北京: 科学出版社。1986: 203—207。
- [7] 宋仁元等译 (American public Health Association et al)。水和废水标准检测法 (第 15 版)。北京: 中国建筑工业出版社。1985: 324—911。
- [8] 高玉荣等。氮磷对污水净化中藻类群落结构的影响。生态学报, 1994, **14**(1): 68—74。
- [9] 合田健。水环境指标。东京: 思考社, 1979: 228。
- [10] 何志辉。浮游生物和淡水渔业讲座——第四讲, 浮游生物生物量和鱼产力。淡水渔业, 1982, **4**: 21—24。
- [11] 黄玉瑶等。氮对藻类生长与污水净化的影响。生态学报, 1990, **10**(4): 299—304。
- [12] 高玉荣等。磷对藻类生长与污水净化的影响。应用生态学报, 1991, **2**(4): 355—360。

[13] 何林华。藻类生物监测中测试参数对效应浓度的影响。环境科学,1989,10(3): 32—37。

EFFECTS OF NITROGEN AND PHOSPHORUS ON THE CHLOROPHYLL CONTENT OF ALGAE IN SEWAGE

Gao Yurong, Huang Yuyao, Cao Hong and Chen Yanmei

(Institute of Zoology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract

The effects of nitrogen and phosphorus on the chlorophyll content of algae in model systems of stabilization ponds have been studied in green house during spring and summer in 1988 and 1989. When the concentration of TP was all kept constantly at about 7 mg/L, and that of TN respectively at 13.5, 24.8, 44.4 and 77.4mg/L in four experiment series of raw sewage, the increase of chlorophyll content in algae of the sewage was observed with the ratio of TN to TP. The highest chlorophyll content was detected when the TN/TP ratio equals to 77.4/7.01 mg/L, and so was the best result of waste water purification.

Key words Nitrogen, Phosphorus, Algae, Chlorophyll, Sewage purification