

沉水植物氧化塘对污水厂尾水深度净化效果与机制的小试研究^{*}

赵安娜^{1,2}, 冯慕华¹, 郭 萧^{1,2}, 柯 凡^{1,2}, 潘继征¹, 李文朝^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:室外采用玻璃缸装置研究了抚仙湖常见的 9 种沉水植物氧化塘对澄江县污水厂尾水营养盐的去除效果及机制. 结果表明: 氧化塘中沉水植物的光合作用导致水体较高的 DO 和 pH 值, 从而提高氧化塘总氮和总磷的去除率, 但沉水植物叶片的腐烂分解则提高了水体氮磷的含量. 沉水植物氧化塘对总氮和总磷的去除率分别介于 19.44%–64.71% 和 28.13%–98.33%. 沉水植物的直接吸收对总氮和总磷量去除的贡献比较低, 占氧化塘总氮和总磷量的 0.26%–1.54% 和 0.47%–1.77%. 沉水植物氧化塘内 DO、pH 变化, 促进了氮的降解及氧化还原分解, 使其对氮的去除占氧化塘总氮量的 30.71%–65.25%, 而磷的去除则主要通过化学沉淀及基质吸附, 占氧化塘总磷量的 73.37%–93.34%. 最终, 选出莼齿眼子菜、苦草、黑藻、金鱼藻和光叶眼子菜对氧化塘中氮磷具有较高的去除率.

关键词: 沉水植物氧化塘; 尾水; 氮; 磷; 抚仙湖

Experimental study on tail water purification of wastewater plant with submerged macrophyte oxidation ponds

ZHAO Anna^{1,2}, FENG Muhua¹, GUO Xiao^{1,2}, KE Fan^{1,2}, PAN Jizheng¹ & LI Wenchao¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: In the field of the wastewater plant in Chengjiang County, an experiment was carried out to investigate the effect and mechanism of nutrient removal in oxidation ponds which were planted by nine submerged macrophyte. The result showed that, photosynthesis of submerged macrophytes in oxidation ponds induced the high level of water DO and pH which increased the removal effects of TN and TP, but the decomposition of submerged macrophyte leaves enhanced the content of TN and TP in the submerged macrophyte oxidation ponds. The removal rates of TN and TP in the ponds are 19.44%–64.71% and 28.13%–98.33% respectively. And the contributions of direct absorption by submerged macrophytes are low, which removed 0.26%–1.54% of TN and 0.47%–1.77% of TP in the oxidation ponds. The change of DO and pH have promoted nitrogen degradation and redox decomposition, which removed 30.71%–65.25% of TN and 73.37%–93.34%, while the removal TP was mainly by ways of chemical deposition and substrate adsorption in the ponds. Finally, *Motamgeton pectinatus*, *Vallisneria spiralis*, *Hydrilla verticillata*, *Ceratophyllum demersum* and *Motamgeton lucens* are chosen as the ones which had high nitrogen and phosphorus removal rates in submerged macrophyte oxidation ponds.

Keywords: Submerged macrophyte oxidation pond; tail water; nitrogen; phosphorus; Lake Fuxian

传统的污水处理方法虽然工艺成熟、处理效果理想, 但建造、运行、维护费用过高^[1]. 因此近年来, 诸如氧化塘等生态技术已成为污水处理研究的热点之一. 氧化塘又称生物塘或稳定塘, 它是一种利用天然净化

^{*} 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2008CB418005)、国家“863”计划项目(2006AA06Z325)和国家水污染治理专项项目(2008ZX07101-007-05)联合资助. 2009-11-09 收稿; 2010-03-18 收改修稿. 赵安娜, 女, 1982 年生, 博士; E-mail: zhao_anna@163.com.

^{**} 通讯作者; E-mail: wehli@niglas.ac.cn.

能力对污水进行生物处理的构筑物的总称,主要用于处理废水中的有机污染物. 氧化塘污水处理系统具有低能耗、低投入、运行维护方便,能有效去除污水中的悬浮质(SS)、生化需氧量(BOD_5)、氨氮和病原微生物^[2-4],且具有较强的抗冲击能力和美化环境等优点. 近年来氧化塘污水处理系统已成为我国着力推广的一项新技术^[5],尤其适用于干旱缺水地区的污水资源化利用.

本实验是在“云南洱源县污水厂尾水深度净化湿地技术实验工程”的研究结果的基础上而设计^[6]. 该实验工程采用了“一级潜流湿地→沉水植物氧化塘→二级潜流湿地→表层流湿地→复合基质滤床”工艺. 结果表明该工艺脱氮除磷能力相当强,出水接近地表Ⅲ类水标准(GB3838-2002). 实验工程对总氮和总磷的去除率为98.74%和96.00%. 其中,沉水植物氧化塘对应的总氮和总磷去除率分别为28.97%和52.00%. 本文在该实验工程研究结果的前提下,设计独立的沉水植物氧化塘小试进行实验,旨在证实及更深入地了解沉水植物氧化塘对污水厂尾水净化的效果与机制.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本文所选沉水植物包括黑藻(*Hydrilla verticillata*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、竹叶眼子菜(*Motamgeton malaianus*)、穿叶眼子菜(*Motamgeton perfoliatus*)、光叶眼子菜(*Motamgeton lucens*)、篦齿眼子菜(*Motamgeton pectinatus*)和微齿眼子菜(*Motamgeton maackianus*),均为抚仙湖常见种类. 2008年8月20日将所采沉水植物于抚仙湖中清洗表面杂物、幼螺及附着藻类,并选取长势良好的沉水植物放置于云南省玉溪市澄江县污水处理厂的玻璃缸中用污水厂尾水进行驯养适应. 于8月31日将生长良好的沉水植物顶枝(苦草为高15cm左右幼苗)移栽到玻璃缸花盆中进行实验.

1.2 实验设计

实验地设在澄江县污水处理厂内,自然光照. 沉水植物培养容器为54L玻璃缸(30cm×30cm×60cm),且在玻璃缸侧壁距底面5cm位置有一直径1cm孔,插有硅胶管,实验时,封闭硅胶管. 因为露天培养,为防止雨水进入氧化塘,在玻璃缸四面侧壁上沿粘上长10cm、宽5cm的玻璃片,然后再在上面摆放40cm×40cm的玻璃片. 另外,由于沉水植物在培养过程中,会出现大量附着藻类,在玻璃片上再铺上一层25%遮阳网,并且在玻璃缸四壁围上土工布. 向每只玻璃缸内放置9只塑料花盆(口径9.5cm,底面直径7cm,高8cm),花盆中盛满洗净的豆石,种植沉水植物,每盆5g(鲜重). 然后向玻璃缸中加入污水厂尾水40L,开始实验,对照不种沉水植物. 另外,取适量沉水植物称量鲜重,80℃烘箱中烘至恒重,称量,计算含水率,烘干样分析全氮和全磷含量^[7].

实验开始后,每隔5d,上午9:00现场测定各氧化塘水体的物理指标,包括气温、水温、溶氧(DO)、pH、氧化还原电位(ORP). 同时采水样,带回实验室尽快分析总氮、硝氮、总磷和可溶性磷酸盐. 气温、水温和DO用JPB-607型便携式溶氧测定仪,pH和ORP用ORP-412型氧化还原电位测定仪,总氮采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法,硝氮采用酚二磺酸光度法,总磷采用过硫酸钾消解法,可溶性磷酸盐采用钼锑抗分光光度法^[8]. 待各氧化塘水体减少至水体总体积的十分之一时,用污水厂尾水补充因采样和蒸发失去的水分,同时测定各项理化指标. 实验结束时,取上覆水同时,用注射器吸取豆石之间的水体,测定各项化学指标.

2 结果与分析

澄江县污水处理厂尾水符合城镇污水处理厂排放标准(GB18918-2002)一级B标准,其水质DO为6.1mg/L, Eh为189mV, pH为7.21, TN为15.24mg/L, NO_3^- -N为5.42mg/L, TP为0.41mg/L, PO_4^{3-} -P为0.34mg/L. 本实验开始于2008年9月1日,持续39d. 期间大多都是多云及阴雨天气,气温19.1~22.3℃,水温17.0~22.2℃.

2.1 沉水植物生长状况

各沉水植物在氧化塘运行的最初阶段,生长状况良好. 但随着氧化塘的运行,各沉水植物的表现不尽相同. 金鱼藻有少量小叶片脱落;黑藻由于表层附着藻类抑制其光合作用,株体生长不良. 研究表明,附着生物

对沉水植物初级生产力的抑制可达 16%–90%^[9]; 穗花狐尾藻第 5d 在顶部产生新生枝条, 且生成花序, 但到第 20d, 枝条基部老叶开始脱落, 进而只有漂浮于水体表层的枝条才有叶片, 而水体中的枝条光秃无叶, 且出现断枝; 苦草生长良好, 并产生花序; 竹叶眼子菜叶片表面在第 5d 出现钙质, 第 10d 水质变浑浊, 这是由于钙质成分脱落进入水体之故, 第 30d, 钙质成分影响了竹叶眼子菜的光合作用, 加之强光照, 使叶片呈现褐色, 且部分叶片, 无论老幼, 变薄、呈透明状, 最终腐烂; 穿叶眼子菜和光叶眼子菜最初生长良好, 且生成花序, 花序数后者多于前者. 后期, 二者均出现断枝、部分叶片腐烂, 穿叶眼子菜尤为严重. 至 30d, 二者的断枝均在叶腋处产生新根. 另外, 部分光叶眼子菜叶片表面亦出现钙质; 微齿眼子菜前期生长良好, 后期则出现部分老叶片脱落、腐烂的现象; 篦齿眼子菜在实验期间, 生长良好.

表 1 实验前后沉水植物各项指标变化
Tab. 1 Changes of the submerged macrophytes' indices before and after the experiment

种类	鲜重增重 百分比(%)	含水率 (%)	TN 占干重 百分比(%)	TP 占干重 百分比(%)
金鱼藻	86.67	94.03	0.25	0.94
黑藻	51.11	91.49	0.25	1.13
穗花狐尾藻	113.33	91.57	0.24	1.37
苦草	37.78	92.69	0.2	0.87
竹叶眼子菜	80.00	86.43	0.19	0.68
穿叶眼子菜	-17.78	87.01	0.2	0.99
光叶眼子菜	37.78	87.9	0.15	0.55
篦齿眼子菜	24.44	89.82	0.15	0.57
微齿眼子菜	35.56	81.7	0.23	1.29

实验期间, 除穿叶眼子菜之外, 各沉水植物鲜重均有不同程度的增加(表 1). 穗花狐尾藻增加百分比最大(113.33%), 最小的为篦齿眼子菜(24.44%). 而穿叶眼子菜生物量则比初始鲜重少 17.78%, 这是由于穿叶眼子菜断枝现象严重, 生长状况不良. 因此, 就实验前后沉水植物生物量的变化而言, 穗花狐尾藻生长状况最好, 其次为金鱼藻和竹叶眼子菜, 再其次为黑藻、苦草、光叶眼子菜、篦齿眼子菜和微齿眼子菜, 最后为穿叶眼子菜.

2.2 沉水植物氧化塘水体 DO 和 pH 的变化

随着实验的进行, 沉水植物氧化塘中 DO 逐渐升高^[10], 之后有一定程度波动(图 1a), 这是沉水植物光合作用的结果, DO 的变化主要受沉

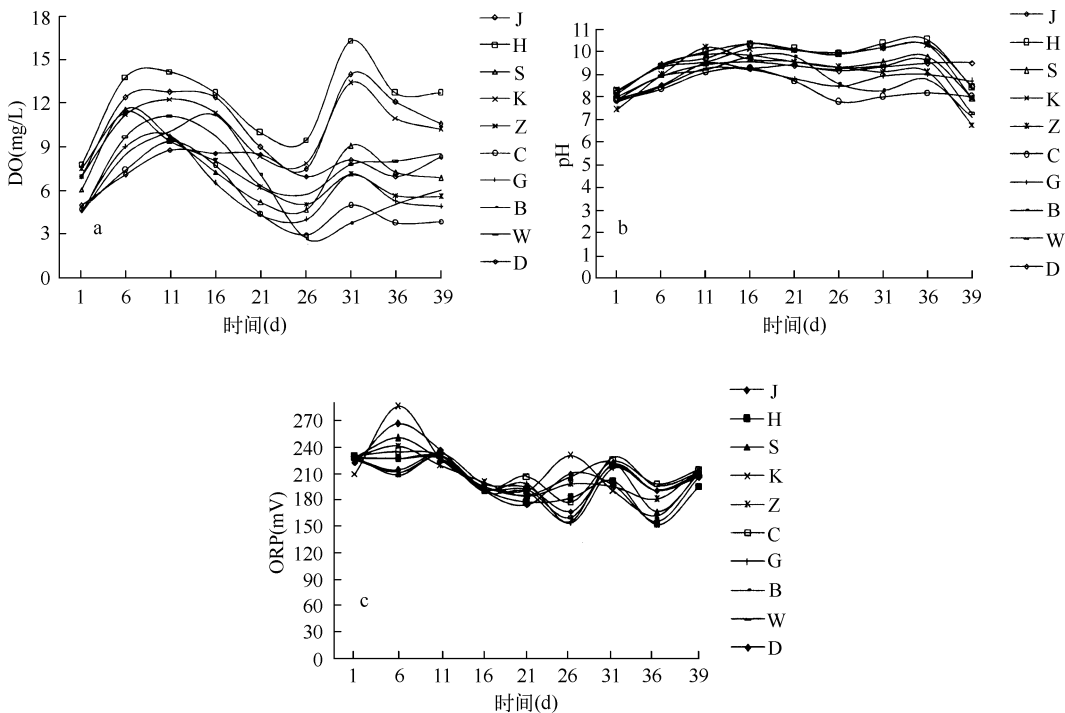


图 1 沉水植物氧化塘水体物理指标变化趋势(J: 金鱼藻; H: 黑藻; S: 穗花狐尾藻; K: 苦草; Z: 竹叶眼子菜; C: 穿叶眼子菜; G: 光叶眼子菜; B: 篦齿眼子菜; W: 微齿眼子菜; D: 对照; 下同)

Fig. 1 The change trend of physical indices in submerged macrophyte oxidation ponds

水植物量、光照强度及水体 CO_2 量影响。9月21日和26日, DO 降幅比较大, 是因为两次采样均为阴雨天气, 氧化塘 DO 受光照影响比较显著。黑藻、金鱼藻和苦草, 在整个实验过程中, DO 含量一直较高, 最高分别达 16.30mg/L 、 14.00mg/L 和 13.40mg/L (图 1a)。这种现象的出现, 部分原因可能是三者氧化塘中有大量藻类出现。

pH 随着实验的进行逐渐升高^[10], 而后维持一个较高的水平 (图 1b), 特别是黑藻、金鱼藻和苦草, 最高分别达 10.54、10.35 和 10.30。pH 值主要受沉水植物和细菌的生理活动影响。沉水植物以及附着藻类的光合作用消耗水体中 CO_2 , 甚至游离的 HCO_3^- , 而沉水植物及细菌的呼吸作用所释放的 CO_2 相比其消耗量甚微, 从而使水体中 OH^- 含量增加, pH 升高。在 9月21日和26日, 沉水植物氧化塘溶氧含量降低, pH 也随之降低, 二者呈现一定的相关性, 但 pH 受光照影响的程度要低于 DO, 其曲线波动较小 (图 1b)。

水体 ORP 主要是由 DO 和 pH 控制, 并受到温度影响, 其数值与 DO 含量的对数和 pH 值呈线性关系, 而温度通过改变 DO 含量间接影响水体 ORP^[11]。本研究中 ORP 在实验的第 5d 达到最高, 之后略有降低, 而后趋于稳定, 但略有波动。ORP 大致在 200mV 左右波动, 这反映了水体的一种强氧化性质 (图 1c)。

2.3 沉水植物氧化塘对氮的去除效果

随着实验进行, 各氧化塘内水体总氮含量逐渐降低, 至 20 日达到平衡 (图 2a)。只有篦齿眼子菜一直处于降低趋势, 且比较明显。各沉水植物氧化塘对总氮的去除率由高到低依次为: 篦齿眼子菜 (64.71%) > 苦草 (51.42%) > 黑藻 (47.95%) > 金鱼藻 (43.33%) > 光叶眼子菜 (36.77%) > 穗花狐尾藻 (34.14%) > 对照 (32.65%) > 穿叶眼子菜 (31.88%) > 微齿眼子菜 (25.61%) > 竹叶眼子菜 (19.44%)。篦齿眼子菜对总氮的去除率最高是因为在该氧化塘中有少量螺的出现。苦草、黑藻和金鱼藻氧化塘的 DO 水平最高, 分别为 13.40mg/L 、 16.30mg/L 和 14.00mg/L , 较高的 DO 促进了硝化作用的进行, 进而通过反硝化作用将氮从氧化塘中去除。穿叶眼子菜、微齿眼子菜和竹叶眼子菜氧化塘对总氮的去除率低于对照, 这是由于三种沉水植物在生长过程中, 叶片腐烂分解现象严重, 使其对氮去除作用大于释放。研究发现, 对照亦对总氮有 32.65% 的去除率, 且对照内氮的变化同各沉水植物氧化塘表现出相似的规律性, 这是因为对照在试验期间出现少量藻类, 使水体 DO 维持在 $5.00\text{--}8.30\text{mg/L}$ 之间, 相当于藻类氧化塘, 从而通过氨氮的挥发、微生物的硝化、反硝化等作用将部分总氮去除^[12-13]。最终, 沉水植物氧化塘对总氮的去除量占氧化塘总氮量的 30.72%–65.25% (表 2)。

硝氮在实验的前 20d, 同总氮一样, 表现出逐渐降低的趋势 (图 2b)。但之后, 除篦齿眼子菜氧化塘之外, 各氧化塘硝氮含量又有所增加。因为前 20d 沉水植物对水体中硝氮的吸收起主要作用, 但随着沉水植物的生长, 开始有部分叶片衰老和脱落, 穗花狐尾藻、竹叶眼子菜、穿叶眼子菜和微齿眼子菜尤为明显, 这些叶片被分解, 导致水体中硝氮含量增加。而篦齿眼子菜生长状况良好, 加之少量螺的出现, 硝氮呈逐渐降低趋势。另外, 从 9月26日, 各氧化塘的 DO 含量逐渐增加, 对应的硝化作用增强 (图 1a), 这也是导致各氧化塘硝氮含量增加的原因。

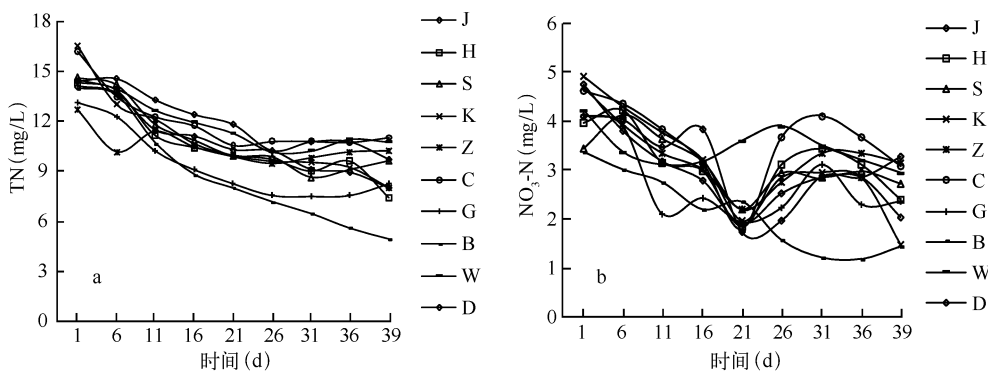


图 2 沉水植物氧化塘氮的变化趋势

Fig. 2 The change trend of nitrogen in submerged macrophyte oxidation ponds

2.4 沉水植物氧化塘对磷的去除效果

氧化塘运行至第5d,黑藻、竹叶眼子菜、光叶眼子菜、篦齿眼子菜和微齿眼子菜氧化塘中总磷水平已经与豆石间的水体达到平衡状态(图3a). 竹叶眼子菜和穗花狐尾藻在第10d,金鱼藻、苦草和对照在第15d和穿叶眼子菜在第20d分别达到平衡. 唯独穗花狐尾藻例外,在第15d降低到0.08mg/L之后,总磷含量又有一定程度的增加,之后保持平衡,这是由于至第20d,穗花狐尾藻枝基部老叶脱落、腐烂分解,且出现断枝所致. 各沉水植物氧化塘对总磷的去除率由高到低依次为:黑藻(98.33%)>苦草(96.34%)>金鱼藻(93.90%)>光叶眼子菜(91.07%)>篦齿眼子菜(85.00%)>对照(83.33%)>穿叶眼子菜(81.67%)>微齿眼子菜(58.11%)>竹叶眼子菜(30.56%)>穗花狐尾藻(28.13%). 研究表明,水体的强氧化性有利于磷的化学沉淀及沉降吸附^[14-15]. 黑藻、苦草和金鱼藻氧化塘水体的DO水平较高,最高分别为16.30mg/L、13.40mg/L和14.00mg/L,因此三者对总磷的去除率最高. 而穿叶眼子菜、微齿眼子菜、竹叶眼子菜和穗花狐尾藻的DO最高分别为9.40mg/L、11.10mg/L、11.40mg/L和11.60mg/L,且四者在实验期间叶片腐烂分解严重,对总磷的去除率较低,甚至低于对照,因为对照有少量藻类产生,DO最高可达8.80mg/L,起到了藻类氧化塘的作用. 对照对总磷的去除作用也证明了化学沉淀及沉降吸附作用对磷在水体中的归趋有重要影响^[16].

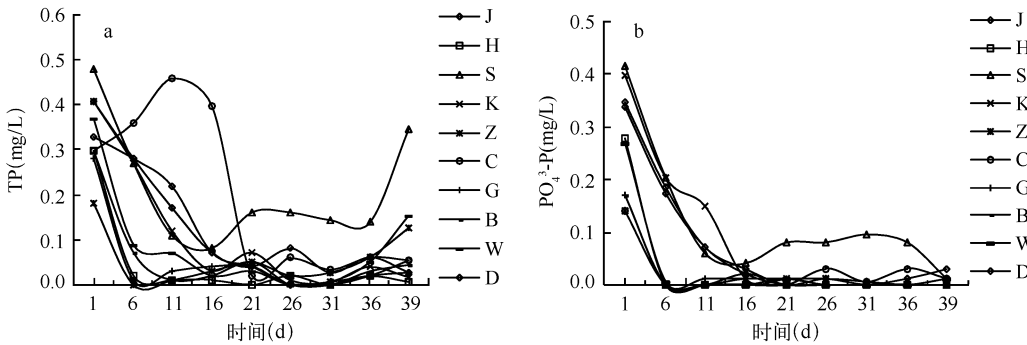


图3 沉水植物氧化塘磷的变化趋势

Fig. 3 The change trend of phosphorus in submerged macrophyte oxidation ponds

对于可溶性磷酸盐,黑藻、竹叶眼子菜、穿叶眼子菜、光叶眼子菜、篦齿眼子菜和微齿眼子菜氧化塘在第5d,金鱼藻、穗花狐尾藻、对照和苦草氧化塘在第10d与豆石间水体的可溶性磷酸盐达到平衡,但同总磷一样,穗花狐尾藻的可溶性磷酸盐水平一直维持在较高水平(图3b). 沉水植物对可溶性磷酸盐的净化效率较高,均在90%以上,最终各沉水植物氧化塘(包括对照)的可溶性磷酸盐降至0-0.01mg/L. 另外,沉水植物对可溶性磷酸盐的净化效率高于总磷,这主要与沉水植物生长时吸收可溶性磷酸盐有关^[17].

实验结束时取各氧化塘上覆水和豆石间水体中水样,测定各营养盐指标. 发现总氮和硝氮在上覆水和豆石间水体中无明显规律可循,但总磷和磷酸盐却表现出一定规律性(图4). 各氧化塘均表现出豆石间水体

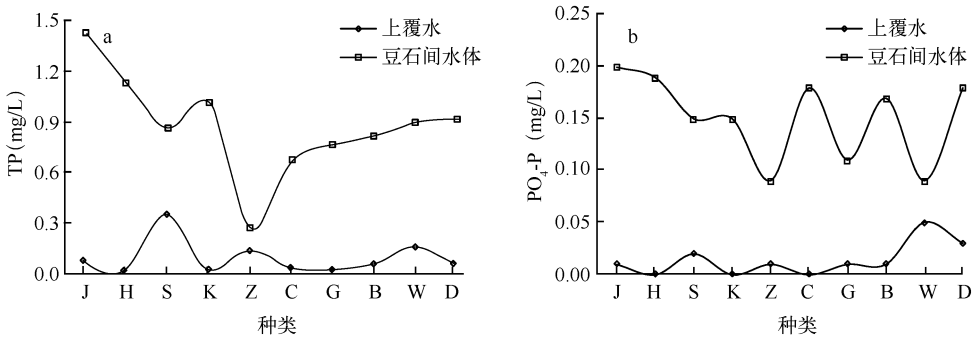


图4 沉水植物氧化塘上覆水和豆石间水体的磷含量

Fig. 4 The phosphorus content of overlying water and pore water in submerged macrophyte oxidation ponds

中总磷和磷酸盐浓度明显高于上覆水,且 73.37%–93.34% 的磷进入基质(表 2),即水体中的磷大部分都是通过化学沉淀和沉降吸附转移至基质^[18].

表 2 沉水植物氧化塘中 TN、TP 的分配百分比(%)
Tab. 2 Distribution percentage of TN, TP in submerged macrophyte oxidation ponds

营养物质	分配	J	H	S	K	Z	C	G	B	W	D
TN	水体	55.79	57.31	54.01	49.59	67.74	63.45	50.26	34.49	66.21	60.77
	植物	0.90	0.73	1.53	0.33	1.54	-0.31	0.51	0.26	1.02	-
	去除部分	43.31	41.96	44.46	50.08	30.72	36.86	49.23	65.25	32.77	39.23
TP	水体	12.53	5.14	24.98	8.21	16.51	18.39	5.69	7.91	11.26	15.60
	植物	1.65	1.58	1.65	0.73	1.77	-0.75	0.97	0.47	1.77	-
	化学沉淀、基质吸附	85.82	93.28	73.37	91.06	81.72	82.36	93.34	91.62	86.97	84.40

3 讨论与结论

沉水植物氧化塘处理污水的原理与自然水域自净过程极其相似. 本实验结果表明,各沉水植物氧化塘对总氮和总磷的去除率不同,分别介于 19.44%–64.71% 和 28.13%–98.33%,且不同种类沉水植物氧化塘的净化效果也不尽相同. 所以沉水植物氧化塘的应用,沉水植物种类的选择显得至关重要. 本实验得出菹齿眼子菜、苦草、黑藻、金鱼藻和光叶眼子菜氧化塘对营养盐的去除效果较为理想.

3.1 沉水植物氧化塘对氮的去除机理

本试验的结果表明,沉水植物氧化塘对总氮的去除率介于 19.44%–64.71% 之间,占氧化塘总氮量的 30.72%–65.25% (表 2). 研究表明稳定塘中总氮的去除方式包括氨氮挥发、生物吸收、硝化反硝化、死生物量的沉降和淤泥层的积聚^[19]. 对于本实验所用的沉水植物氧化塘,总氮去除的主要方式则为沉水植物吸收、氨氮挥发和硝化反硝化作用.

沉水植物根系及茎叶均能够直接吸收水体中的氮^[20]. 本研究表明,沉水植物对氮直接吸收的最大量也仅占氧化塘总氮的 1.54%. 所以,沉水植物的直接吸收对水体氮的去除贡献比较微弱.

沉水植物氧化塘水体 pH 的变化主要为沉水植物和细菌的生理活动所控制. 沉水植物的光合作用消耗水体中 CO₂,甚至 HCO₃⁻ 游离出的 CO₂,而沉水植物及细菌的呼吸作用所释放的 CO₂ 相比其消耗量甚微,从而 pH 值上升. 在高的 pH 值条件下,水体中的氨氮能够以气态的形式逸出. 本实验中的沉水植物氧化塘 pH 值最高可达 10.54,因此水体中的部分氨氮会以气态形式脱离氧化塘. 早期的研究表明,氧化塘中总氮的主要去除机制是氨氮的挥发^[21],但近年来的研究越来越倾向于尽管氨氮可以通过直接挥发等途径从水体中去除^[22],但硝化和反硝化作用才是总氮去除的主要途径^[23-24].

沉水植物对氮的去除过程中,细菌的降解作用占主导地位^[25]. 氧化塘内平均 DO 含量达到 6mg/L 足以维持硝化作用的进行^[26]. 本实验氧化塘水体的最高 DO 可达 16.30mg/L,而水体 ORP 又在 200mV 左右波动,因此氧化塘较强的氧化环境有助于硝化作用的进行,硝化作用产生的硝氮进而通过反硝化作用产生的 N₂ 或 N₂O 而去除^[26]. 另外,沉水植物在生长过程中会出现不同程度的腐烂分解,若沉水植物分解严重,将增加水体的氮磷含量,影响氧化塘对氮磷的去除率. 因此,本实验中有少量螺出现的菹齿眼子菜氧化塘对氮的去除效果最好,其次为 DO 水平较高(7.00–16.30mg/L)的黑藻、苦草和金鱼藻氧化塘,而去除效果最差的为 DO 水平略低(3.00–11.40mg/L)、而腐烂分解严重的穿叶眼子菜、微齿眼子菜和竹叶眼子菜氧化塘.

3.2 沉水植物氧化塘对磷的去除机理

本研究表明沉水植物氧化塘对总磷的去除率介于 28.13%–98.33%,沉水植物的直接吸收作用对磷去除的贡献不甚明显,最大吸收量仅占沉水植物氧化塘总磷量的 1.77%.

沉水植物光合作用释放氧气,使氧化塘水体的 DO 水平最高可达 16.30mg/L,且较高的 ORP 水平(200mV 左右波动),体现了水体的一种强氧化性质,这使 Fe(Ⅱ)被氧化为 Fe(Ⅲ),进而形成不溶于水的三价铁磷复合物,最终进入氧化塘的基质中. 另外,研究表明磷酸盐的去除率和 pH 呈现一定的相关性. 当 pH

大于9时,水体中磷酸盐的去除率达89%;而当pH低于8.6时,磷酸盐的去除率明显下降^[27].本实验氧化塘的pH介于6.78~10.54之间,且2/3以上测量数据的pH均高于9(图1b),而对实验结束时各沉水植物氧化塘上覆水及豆石间水体的监测结果亦表明沉水植物氧化塘中73.37%~93.34%的磷进入基质(表2).因此,本实验中水体氧化性较强(7.00~16.30 mg/L)、pH偏高(7.99~10.35)的苦草、黑藻和金鱼藻氧化塘对氮的去除效果最好,最差的则为氧化性较弱(3.00~11.60 mg/L)、pH偏低(6.78~9.88)且腐烂分解严重的穗花狐尾藻、竹叶眼子菜、微齿眼子菜和穿叶眼子菜氧化塘.

4 参考文献

- [1] 朱亮,苗伟红,严莹.河流湖泊水体生物-生态修复技术述评.河海大学学报(自然科学版),2005,33(1):59-62.
- [2] 刘恒福,杨武学.近年来渭河中下游污染状况及带来的问题.陕西水利,2002,(科技专辑):79-80.
- [3] 张东生,韩德刚.10万m³/d污水处理厂新型稳定塘工艺技术经济分析.上海环境科学,2003,22(6):439-444.
- [4] Mara D. Water stabilization ponds: past, present and future. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 4: 85-88.
- [5] Picot B, Andrianarison T, Olijunuk DP *et al.* Nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 4: 103-110.
- [6] 李爱权.洱源污水厂尾水深度净化湿地技术实验工程水量平衡概算及营养盐去除效果研究[硕士论文].南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2006.
- [7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法.北京:中国农业出版社,1999.
- [8] 《水和废水监测分析方法》编委会.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.
- [9] 秦伯强,宋玉芝,高光.附着生物在浅水富营养化湖泊藻-草型生态氧化塘转化过程中的作用.中国科学,2006,36(3):283-288.
- [10] 丁玲,沈耀良,王正兴等.三种沉水植物净化受污水体的比较研究.苏州科技学院学报(工程技术版),2007,20(2):44-48.
- [11] 唐晓,王佳.海水ORP的影响因素.环境作用机理与防护,2004,8:37-39.
- [12] Garcia J, Mujeriego R, Hernández-Maríné M. High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen removal. *Journal of Applied Phycology*, 2000, 12(3-5):331-339.
- [13] Garcia J, Hernández-Maríné M, Mujeriego R. Analysis of key variables controlling phosphorus removal in high rate oxidation ponds provided with clarifiers. *South Africa Water Research Commission*, 2002, 28(1):55-62.
- [14] 蔡景波,丁学锋,彭红云等.环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究.水土保持学报,2007,21(2):151-154.
- [15] Song KY, Zoh KD, Kang H. Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime. *Science of the Total Environment*, 2007, 380:13-18.
- [16] 伏彩中,肖瑜,高士祥.模拟水生生态系统中沉水植物对水体营养盐物质消减的影响.环境污染与防治,2006,28(10):753-756.
- [17] 雷泽湘,谢贻发,徐德兰等.大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究.安徽农业科学,2006,34(3):553-554.
- [18] 王丽卿,李燕,张瑞雷.6种沉水植物氧化塘对淀山湖水水质净化效果的研究.农业环境科学学报,2008,27(3):1134-1139.
- [19] Shilton A. Pond treatment technology. London: IWA publishing, 2005.
- [20] Angelstein S, Schubert H. Elodea nuttallii: uptake, translocation and release of phosphorus. *Aquatic Biology*, 2008, 3:209-216.
- [21] van der Steen P, Brenner A, Oron G. An integrated duckweed and algae pond system for nitrogen removal and renovation. *Water Science and Technology*, 1998, 38(1):335-343.
- [22] 王晓蓉.环境化学.南京:南京大学出版社,2001.
- [23] Camargo Valero MA, Mara DD. Nitrogen removal via ammonia volatilization in maturation ponds. *Water Science and Technology*, 2007, 55(11):87-92.
- [24] Zhou Q, He SL, He XJ *et al.* Nutrient removal mechanism in high rate algal pond treating rural domestic sewage in East China. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2006, 6(6):43-50.
- [25] James FR. Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge. *Ecological Engineering*, 2000, 14:33-47.
- [26] Camargo Valero MA, Read LF, Mara DD *et al.* Nitrification-denitrification in WSP: A mechanism for permanent nitrogen removal in maturation ponds. In: 8th IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilization Ponds, 26-29 April 2009, Belo Horizonte/MG Brazil.
- [27] Picot B, Moersidik S, Casellas C *et al.* Using diurnal variation in a high rate algal pond for management pattern. *Water Science and Technology*, 1993, 28(10):169-175.