

间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响

汤显强¹, 李金中², 李学菊², 刘学功², 黄岁樑^{1*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 天津市水利科学研究所, 天津 300061)

摘要: 采用页岩和香蒲(*Typha latifolia*)构建人工垂直潜流湿地处理津河富营养化水体, 研究间歇曝气对潜流湿地氮磷去除效果的影响. 设计水力负荷 800 mm/d, 气水比 5:1. 试验期间(2006-06~2006-11), 氮磷月平均去除率在 8 月份达到最大值. 与无曝气系统相比, 中部曝气使氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)、可溶性活性磷(SRP)和总磷(TP)月平均去除率分别提高 10.1%、4.7%、10.2% 和 8.8%, 底部曝气则为 25.1%、10.0%、7.7% 和 7.4%, 间歇曝气能够有效提高人工潜流湿地氮磷去除效率. 曝气产生的有氧环境不利于硝酸盐氮(NO_3^--N)去除, 试验期间底部曝气和中部曝气 NO_3^--N 月平均去除率一直低于无曝气系统. 试验结束后收割香蒲地上组织(茎和叶), 测定地上组织生物量及茎、叶中的氮磷含量, 结果表明, 间歇曝气虽然抑制香蒲地上组织生物量的增加, 但却能够有效提高茎、叶中氮磷含量. 与无曝气系统相比, 通过收割香蒲地上组织可使 TN 去除分别增加 11.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (中部曝气)和 12.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (底部曝气).

关键词: 间歇曝气; 香蒲; 人工潜流湿地; 氮; 磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-0896-06

Effect of Intermittent Artificial Aeration on Nitrogen and Phosphorus Removal in Subsurface Vertical-flow Constructed Wetlands

TANG Xian-qiang¹, LI Jin-zhong², LI Xue-ju², LIU Xue-gong², HUANG Sui-liang¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Hydraulic Science Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Shale and *T. latifolia* were used as subsurface vertical-flow constructed wetland substrate and vegetation for eutrophic Jin River water treatment, and investigate the effect of intermittent aeration on nitrogen and phosphorus removal. In this study, hydraulic loading rate was equal to 800 mm/d, and ratio of air and water was 5:1. During the entire running period, maximal monthly mean ammonia-nitrogen (NH_4^+-N), total nitrogen (TN), soluble reactive phosphorus (SRP) and total phosphorus (TP) removal rates were observed in August 2006. In contrast to the non-aerated wetland, aeration enhanced ammonia-nitrogen, total nitrogen, soluble reactive phosphorus and total phosphorus removal: 10.1%, 4.7%, 10.2% and 8.8% for aeration in the middle, and 25.1%, 10.0%, 7.7% and 7.4% for aeration at the bottom of the substrate, respectively. However, aeration failed to improve the nitrate-nitrogen removal. During the whole experimental period, monthly mean NO_3^--N removal rates were much lower for aerated constructed wetlands (regarding aeration in the middle and at the bottom) than those for non-aerated system. After finishing the experiment, aboveground plant biomass (stems and leaves) of *T. latifolia* was harvested, and its weight and nutrient content (total nitrogen and total phosphorus) were measured. Analysis of aboveground plant biomass indicated that intermittent aeration restrained the increase in biomass but stimulated assimilation of nitrogen and phosphorus into stems and leaves. Additional total nitrogen removal of 11.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ and 12.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ by aboveground *T. latifolia* biomass for intermittent artificial aeration in the middle and at the bottom of the wetland substrate, respectively, was observed.

Key words: intermittent aeration; *T. latifolia*; subsurface vertical-flow constructed wetland; nitrogen; phosphorus

人工垂直潜流湿地具有占地面积小、卫生条件好等优点, 近年来被广泛用于去除有机污染物和氮磷等营养盐污染物^[1~4]. 国外大多数研究表明人工垂直潜流湿地去除有机污染物通常可达到 80%~99%^[3,4], 但无机氮、磷去除率相对较低. 在欧洲, 大多数垂直潜流湿地去除氨氮和可溶性活性磷通常低于 50%^[5,6]. 在处理以氨氮为主的富营养化水体时, 氮的去除效果更差^[4].

溶解氧利用率较低是导致垂直潜流湿地氮去除效果较差的主要因素^[6,7], 充足的溶解氧供给是保证氨氮硝化过程顺利进行的關鍵(湿地生物除氮的限

速步骤)^[1,8]. 潜流湿地磷去除也受溶解氧影响, 当湿地内部溶解氧浓度下降时, Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} , 其结合的磷以 PO_4^{3-} 的形式释放, 导致湿地磷去除效率下降^[9]. 除化学除磷外, 较高的溶解氧利用率可促进人工湿地生物除磷^[10], Behrends 等^[11]研究发现采用“潮汐流”操作提高溶解氧供给后, 湿地磷去除效率提高 10%~12%.

收稿日期: 2007-04-28; 修订日期: 2007-07-08

基金项目: 天津市科委重大基金项目; 现代水利科技创新项目(XDS2007-05); 天津市科技攻关项目(005YFSZSF02100)

作者简介: 汤显强(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: ambition@mail.nankai.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: slhuang@nankai.edu.cn

潜流湿地植物可通过根系释放部分溶解氧,但由于释放量较小,很难满足有机污染物降解、氨氮硝化等过程对溶解氧的需求^[1,12~14],因此有必要采取措施提高垂直潜流人工湿地溶解氧的可利用性^[1,15,16].人工曝气常用于增加富营养化景观水体中的溶解氧浓度和去除异味^[3,9],因此当采用人工垂直潜流湿地处理富营养化景观水体时,引入人工曝气增加溶解氧供给是便利可行的.本研究采取间歇曝气的方式改善垂直潜流湿地内部溶解氧可利用水平,探讨间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响.

1 材料与方法

1.1 试验设计

采用室外试验研究间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除的影响.垂直潜流湿地系统包括一个下行潜流湿地单元和一个上行潜流湿地单元(图 1),2个湿地单元尺寸相同,具体为内径 0.5 m,高 1.3 m.

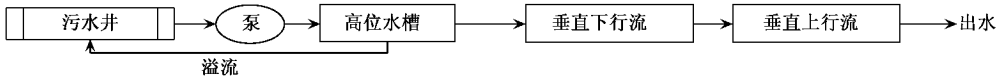


图 1 人工垂直潜流湿地流程示意

Fig.1 Schematic diagram of subsurface vertical-flow constructed wetland

1.2 植物种植及驯化

2006-05-01,在 A、B、C 的每个潜流湿地单元内种植 8 株生物量相似的天津本地香蒲(*T. latifolia*)作为湿地植物.此时下行潜流湿地和上行潜流湿地单元内香蒲的平均株高分别为(40±2) cm 和(38±3) cm(A)、(40±3) cm 和(39±3) cm(B)、(35±3) cm 和(40±2) cm(C).植物种植后的第 1 周,环境条件的改变导致香蒲大部分地上植物组织(茎和叶)枯萎.为防止死亡的地上组织(茎、叶)脱落入潜流湿地,将所有地上植物组织清除.经过约 2 周的维护,新的幼株高度达到约 0.3 m.此后每天向 A、B、C 供给 30 L 富营养化津河河水驯化植物,在 5 月底,香蒲开始分蘖发新芽,基本适应津河河水.

1.3 试验运行及取样

潜流湿地单元填充不同深度的页岩和粗砾石作为湿地填料(理化性质见文献[17]),下行潜流湿地单元填充 30 cm 粗砾石作为底料,起收水和支撑作用,粗砾石上充填 60 cm 页岩作为主填料层,最后为防止进水管堵塞,在页岩表面填充 15 cm 粗砾石.上行潜流湿地单元填充 50 cm 页岩为主填料,其余填料设置情况与下行潜流湿地单元相同.下行潜流湿地进水管高度为 1.0 m,上行潜流湿地出水管高度为 0.9 m,设计 0.1 m 的高度差保证污水自重力流动.试验装置共 3 套(A:中部曝气、B:底部曝气、C:无曝气对照),每套潜流湿地装置内填料设置情况完全相同.在 A 的下行流和上行流单元的中部(距页岩填料上表面 30cm)和 B 的下行流和上行流单元的底部(距装置底部 10cm)均匀设置 3 个曝气头(同一水平面上)研究间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除的影响.采用小型空气压缩机(ACQ-007 型,最大供气量 100 L·min⁻¹)向 A、B 间歇曝气(每天 08:30~16:30 曝气 8 h,其余时间不曝气).

采用富营养化的津河河水作为垂直潜流湿地进水.试验正常运行期间(2006-06~2006-11)津河水质情况如表 1 所示.设计水力负荷 800 mm/d,水力停留时间约 12 h,试验运行期间气水比为 5:1.从 2006 年 6 月~2006 年 11 月,在 A、B 和 C 下行潜流单元的进水口和上行潜流单元的出水口分别采集进水和出水分析 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、SRP 和 TP 浓度变化,研究间歇曝气对垂直潜流湿地氮磷去除的影响,取样频率每周 1 次.此外还在下行潜流湿地单元距离进水口为 0 cm(进水)、30 cm、70 cm 处和上行潜流湿地单元距离出水口为 30 cm、60 cm 处采集水样测定溶解氧(DO)浓度,采样频率每周 1 次.DO 采用美国 YSI 52 溶解氧测定仪分析,其它指标测定参照文献[18].

表 1 人工湿地试验期间主要进水水质参数(N=6×4)

参数	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	SRP /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	DO /mg·L ⁻¹	pH	t/℃
平均值	106.02	5.74	1.19	7.34	0.398	0.516	3.42	7.73	24.56
标准偏差	13.7	3.03	0.23	3.61	0.251	0.282	1.69	0.39	3.69

1.4 植物收割与分析

试验期间,2006-08 的月平均气温最高(31.5℃),此时香蒲的株高达到最大值,分别为 24 cm(A)、238 cm(B)和 250 cm(C).随着气温下降,香蒲地上组织逐渐枯黄,为防止茎、叶中的氮、磷向根系转移,在 2006-11(月平均气温最低,仅为 7.8℃)对香蒲地上植物组织进行收割.收割后的植物组织在 80℃烘至恒重(至少需要 48 h)并根据 Huett^[19]提供的方法分析测定香蒲茎、叶中的 TN 和 TP 含量.

2 结果与讨论

2.1 氮的去除

2.1.1 NH₄⁺-N 的去除

从图 2(a)可看出,整个试验运行期间(2006-06~2006-11),A(中部曝气)和 B(底部曝气)的 NH₄⁺-N 月平均去除率均高于 C(无曝气).在 2006-08,香蒲地上植株高度达到最大值,此时 A、B 和 C 的 NH₄⁺-N 月平均去除率也达到最大,分别为 77.97%、92.21% 和 67.07%.与无曝气的 C 相比,间歇曝气使 A(中部曝气)和 B(底部曝气)NH₄⁺-N 月平均去除率分别增加 10.09% 和 25.04%.随着气温下降,A 和 B 的 NH₄⁺-N 月平均去除率呈逐渐降低趋势,在 11 月份达到最低,分别为 73.83% 和 86.92%.

从表 2 可看出,间歇曝气可有效增加垂直潜流湿地内溶解氧的可利用性.A(中部曝气)和 B(底部曝气)内 DO 浓度在各溶解氧采样口处均高于 C(无曝气).湿地植物根际通常寄居大量的微生物,比如氨硝化细菌等^[9].人工曝气提高了湿地内部溶解氧的可利用性,有利于这些微生物生长繁殖和活性增强^[20].尽管挥发、植物吸收、填料吸附等过程影响潜流湿地氨氮去除效果,但这些并非 NH₄⁺-N 去除的主要贡献因素,硝化才是 NH₄⁺-N 去除的主要途径^[4].采用间歇曝气的方式增加了垂直潜流湿地溶解氧浓度,有利于氨氮硝化过程顺利进行,进而提高垂直潜流湿地 NH₄⁺-N 去除效率.此外微生物的活性增强可强化 NH₄⁺-N 的生物吸收^[21],改善 NH₄⁺-N 去除效果.间歇曝气导致潜流湿地内部硝化细菌数量、活性的增加可能是导致 A(中部曝气)和 B(底部曝气) NH₄⁺-N 去除效率高于 C 的主要原因.

2.1.2 NO₃⁻-N 的去除

NO₃⁻-N 去除如图 2(b)所示.整个试验运行期间,A(中部曝气)和 B(底部曝气)NO₃⁻-N 月平均去除率均低于 C(无曝气),间歇曝气不利于 NO₃⁻-N 去除.

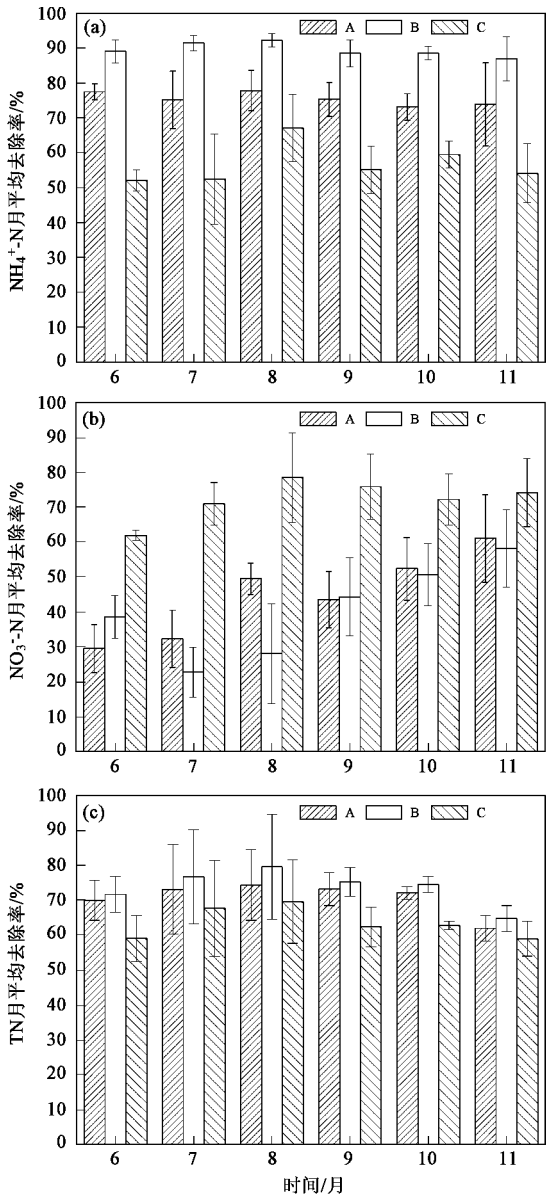


图 2 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TN 月平均去除率与时间的关系
Fig.2 Relationships between monthly mean removal rates of NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TN and time

C 的 NO₃⁻-N 月平均去除率高于 70%,并在 2006-08 达到最大(78.55%).潜流湿地植物根际生物吸收和反硝化过程是 NO₃⁻-N 去除的主要途径^[8,20].研究发现微生物吸收去除 NH₄⁺-N 优先于 NO₃⁻-N, NH₄⁺-N 的存在严重抑制微生物吸收去除 NO₃⁻-N^[21].进水中 TN 的主要组成部分是 NH₄⁺-N(表 1),对生物吸收去除 NO₃⁻-N 不利,反硝化可能是 NO₃⁻-N 去除的主要途径.采用间歇曝气后,A 和 B 内溶解氧水平高于 C(表 2),较高的溶解氧供给无法提供硝态氮反硝化所需的厌氧环境,NO₃⁻-N 反硝化进程受阻导致 A 和 B 的

表2 垂直潜流湿地 A、B 和 C 内不同采样点溶解氧浓度 ($N=6\times4$)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Dissolved oxygen concentrations at different distances from the inlet in systems A, B and C ($N=6\times4$)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

距离/m	6月			7月			8月		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.0	2.97±1.23	2.97±1.23	2.97±1.23	3.10±0.42	3.10±0.42	3.10±0.42	2.37±0.51	2.37±0.51	2.37±0.51
0.3 ¹⁾	3.33±2.47	3.33±1.26	2.27±1.04	4.10±2.12	3.20±0.14	1.80±0.42	2.97±1.00	3.63±1.55	1.50±0.53
0.7 ¹⁾	1.67±1.31	4.00±1.40	2.30±0.95	2.45±0.21	4.35±0.35	2.00±0.57	1.93±0.15	4.53±1.91	1.60±0.46
0.3 ²⁾	3.80±1.77	4.37±0.80	2.33±1.00	4.30±1.70	4.35±0.35	1.65±0.49	2.17±0.32	4.53±1.52	1.63±0.42
0.6 ²⁾	1.87±0.97	3.50±0.78	2.27±1.06	3.35±0.21	3.15±0.07	2.60±0.57	1.87±0.12	3.87±1.93	2.37±0.47
距离/m	9月			10月			11月		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0.0	2.45±1.06	2.45±1.06	2.45±1.06	2.65±0.86	2.65±0.86	2.65±0.86	2.37±0.76	2.37±0.76	2.37±0.76
0.3 ¹⁾	2.80±0.85	3.10±0.97	1.20±0.28	2.80±0.87	3.17±1.01	1.18±0.24	3.17±1.09	2.60±1.13	1.00±0.33
0.7 ¹⁾	2.15±0.21	3.75±0.81	1.45±0.49	2.15±0.31	3.70±0.33	1.32±0.42	2.20±0.35	2.75±1.20	1.27±0.41
0.3 ²⁾	3.55±1.20	3.35±1.02	1.51±0.28	3.15±1.12	3.87±0.57	1.41±0.32	2.87±0.52	2.85±1.06	1.33±0.52
0.6 ²⁾	2.60±0.42	3.30±0.72	1.90±0.57	2.30±0.52	3.70±0.15	1.70±0.47	1.70±0.13	2.35±1.20	1.57±0.37

1) 采样点距离下行潜流湿地进水口距离; 2) 采样点距离上行潜流湿地进水口距离

NO_3^- -N月平均去除率低于 C. C 无曝气, 依靠湿地植物自身释放的氧气进行氨氮硝化, 并在根际周围形成好氧、缺氧和厌氧区域促进 NO_3^- -N 的反硝化去除^[1,19], NO_3^- -N 去除效果相对较好.

2.1.3 TN 的去除

TN 去除是 NH_4^+ -N 去除和 NO_3^- -N 去除的综合体现. 根据表 1, 试验运行期间, TN 平均浓度为 7.34 mg/L , NH_4^+ -N 平均浓度为 5.74 mg/L (TN 的 78.34%), TN 去除主要取决于 NH_4^+ -N 去除. 从图 2 (c) 可看出, 整个试验运行期间, A (中部曝气) 和 B (底部曝气) TN 月平均去除率高于 C (无曝气), 间歇曝气有利于提高垂直潜流湿地 TN 去除效率. 在 2006-08, TN 月平均去除率达到最大值, 分别为 74.32 (A)、79.63 (B) 和 69.59% (C), 间歇曝气使 TN 月平均去除率分别增加 4.73% (A) 和 10.04% (B). 人工潜流湿地去除 TN 主要通过硝化-反硝化、水生植物和湿地微生物吸收^[20]. 间歇曝气导致 A 和 B 溶解氧水平较高 (表 2), 不利于硝化-反硝化过程进行, 湿地植物及其根际微生物吸收 (微生物对 NH_4^+ -N 的吸收^[21]) 可能是间歇曝气提高 TN 的重要原因.

2.2 磷的去除

试验运行期间, SRP 和 TP 的去除如图 3 所示. 从图 3(a) 可看出, A (中部曝气) 和 B (底部曝气) 的 SRP 月平均去除率高于 C (无曝气), 间歇曝气有利增强垂直潜流湿地 SRP 去除效率. 进水中 SRP 和 TP 的平均浓度分别为 0.398 和 0.516 mg/L , SRP 是 TP 的主要组成部分, 因此 TP 去除 [图 3(b)] 呈现出与 SRP 去除类似的趋势.

SRP 和 TP 的月平均去除率在 2006-08 达到最

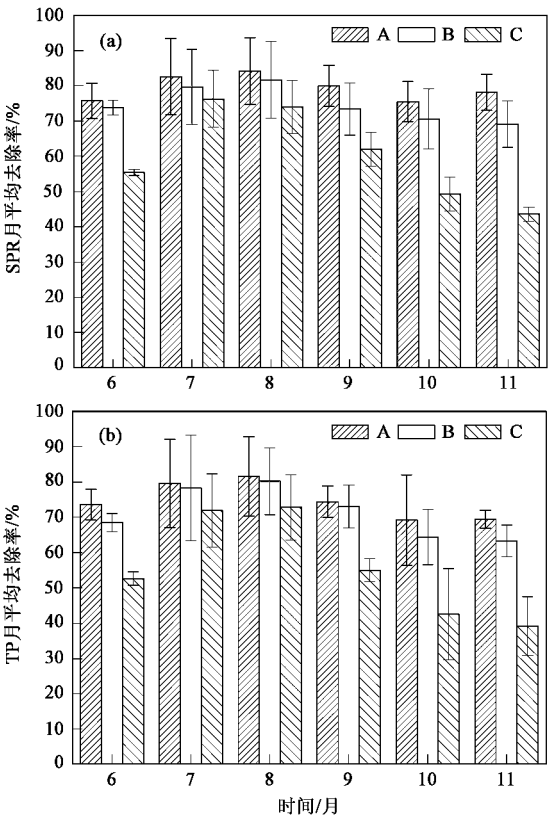


图3 SRP 和 TP 月平均去除率与时间的关系

Fig.3 Relationships between monthly mean removal rates of SRP, TP and time

大, 分别为 84.21% 和 81.54% (A)、81.71% 和 80.18% (B)、74.03% 和 72.76% (C). 与 C 相比, 间歇曝气使 SRP 和 TP 去除率分别增加 10.18% 和 7.68% (A) 和 8.78% 和 7.42% (B). 人工潜流湿地内, 磷主要通过吸附沉降、水生植物和微生物吸收等过程被去除^[8,20]. 磷在潜流湿地内直接与填料接触,

吸附滞留成为湿地除磷的主要途径^[9]. 湿地内部间歇曝气的方式强化了磷与湿地填料的接触, 有利于增强填料磷吸附去除效果, 进而提高潜流湿地磷去除效率. 湿地生物除磷是一个好氧吸收-厌氧释放的交替过程^[10], 采用间歇曝气后, A 的溶解氧浓度波动幅度(DO 浓度高低交替变化)强于 B(表 2), 较高的溶解氧可利用性有利于生物除磷顺利进行. 此外, 间歇曝气增加了湿地溶解氧供给, 有利于湿地微生物的生长繁殖和活性增强^[20], 受微生物活动影响, 页岩的磷吸附效果不断改善可能是导致 A 的 SRP 和 TP 的月平均去除率在 2006-08 高于 B 的 SRP 和 TP 的月平均去除率的另一原因.

2.3 间歇曝气对湿地植物的影响

香蒲地上组织生物量及其氮磷含量分析结果如表 3 所示. 香蒲茎、叶的干重分别为 295 和 550 g(A), 390 和 610 g(B), 455 和 680 g(C). A 和 B 的地上植物组织生物量低于 C, 可见间歇曝气不利于香蒲地上组织生物量的增加. 香蒲茎和叶中的 TN 含量分别为: 4.50 mg/g 干茎和 9.37 mg/g 干叶(A), 4.47 mg/g 干茎和 8.08 mg/g 干叶(B)和 2.47 mg/g 干茎和 4.53 mg/g 干叶(C), 间歇曝气可显著提高香蒲茎、叶中的 TN 含量. 香蒲茎、叶中 TP 含量与 TN 类似, 也是 A 和 B 高于 C, 具体为 4.66 mg/g 干茎和 4.83 mg/g 干叶(A), 4.58 mg/g 干茎和 4.66 mg/g 干

叶(B)和 2.55 mg/g 干茎和 2.55 mg/g 干叶(C). 间歇曝气有利于增强湿地微生物活性^[20,22], 并且可有效提高氮磷在根系周围的传质效率, 进而改善植物氮磷吸收能力, 增加香蒲茎、叶中氮磷含量.

尽管 A 和 B 内香蒲茎、叶中磷的含量高于 C, 但相对较低的地上组织生物量导致植物收割除磷并没有因为间歇曝气而增加. TN 不同, 与无曝气系统相比, 通过收割香蒲地上组织可使 TN 去除分别增加 11.6 g·m⁻² (中部曝气)和 12.6 g·m⁻² (底部曝气). 湿地植物贮存的氮磷在春节从根系向茎叶转移, 在秋季从茎叶向根系转移导致茎叶中氮磷含量在春季高于秋季^[23]. 本试验也观测到类似现象, 香蒲茎叶中 TN、TP 含量在种植前高于收割时. 为防止植物吸收的氮磷从茎、叶向根系转移, 应当在秋季及时收割湿地植物, 最大限度移出植物吸收的氮磷^[24,25].

3 结论

(1)本试验采用页岩和天津本地植物香蒲构建人工湿地, 研究间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除的影响. 研究结果表明间歇曝气可有效提高垂直潜流湿地氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、可溶性活性磷(SRP)和总磷(TP)去除效果, 但间歇曝气产生的富氧环境不利于 NO₃⁻-N 去除. 间歇曝气对香蒲生长影响较大, 通过收割和分析地上植物组织生物量及

表 3 香蒲地上组织 TP 和 TN 含量及植物收割去除 TP 和 TN 的量

Table 3 TP and TN content of the aboveground biomass of <i>Typha latifolia</i> , and phosphorus and nitrogen removals by harvesting plants								
湿地系统	茎干重 /g	茎 TP 含量 /mg·g ⁻¹	TP 去除 /g·m ⁻²	叶干重 /g	叶 TP 含量 /mg·g ⁻¹	TP 去除 /g·m ⁻²	总干重 /g	总去除(TP) /g·m ⁻²
A	295	4.66	7.014	550	4.83	13.567	845	20.581
B	390	4.58	9.112	610	4.66	14.503	1 000	23.615
C	455	2.55	5.919	680	2.55	8.847	1 135	21.450
种植前 ¹⁾	—	4.46	—	—	4.83	—	—	—

湿地系统	茎干重 /g	茎 TN 含量 /mg·g ⁻¹	TN 去除 /g·m ⁻²	叶干重/g	叶 TN 含量 /mg·g ⁻¹	TN 去除 /g·m ⁻²	总干重/g	总去除(TN) /g·m ⁻²
A	295	4.50	6.773	550	9.37	26.289	845	33.062
B	390	4.47	8.903	610	8.08	25.157	1 000	34.060
C	455	2.47	5.734	680	4.53	15.716	1 135	21.450
种植前 ¹⁾	—	8.50	—	—	19.37	—	—	—

1)2006 年 5 月初, 香蒲种植后地上组织大部分死亡, 此时将所有地上植物组织清除, 因此种植前香蒲地上组织生物量可忽略不计

氮磷含量发现间歇曝气抑制香蒲生物量的增加, 但可有效提高香蒲茎和叶中的 TN、TP 含量.

(2)本阶段试验考察间歇曝气对人工潜流湿地氮磷去除性能的影响, 对人工曝气后湿地内微生物种类、浓度及活性变化情况缺乏相关考虑和试验研究, 在间歇曝气改善湿地氮磷去除性能的机理和影

响因素上还需要进一步深入研究.

参考文献:

[1] 汤显强, 黄岁樑. 人工湿地去污机理及国内外应用现状[J]. 水处理技术, 2007, 33(2): 9-13.
[2] McBride G B, Tanner C C. Modelling biofilm nitrogen transformation in constructed wetland mesocosms with fluctuating water levels[J]. Ecol Eng, 2000, 14(1-2): 93-106.

- [3] Scholz M, Lee B H. Constructed wetlands: a review[J]. Int J Environm Stud, 2005, **62**(4): 421-447.
- [4] Sun G Z, Zhao Y Q, Allen S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. J Biotechnol, 2005, **115**(2): 189-197.
- [5] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations[J]. Ecol Eng, 1999, **12**(1-2): 5-12.
- [6] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecol Eng, 2002, **18**(5): 633-646.
- [7] 肖海文, 邓荣森, 翟俊, 等. 溶解氧对人工湿地处理受污染城市河流水体效果的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2426-2431.
- [8] Kusch P, Winßner A, Kappelmeyer U, *et al.* Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate[J]. Wat Res, 2003, **37**(17): 4236-4242.
- [9] Scholz M. Wetland systems to control urban runoff[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2006.
- [10] De-Bashan L E, Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003)[J]. Wat Res, 2004, **38**(19): 4222-4246.
- [11] Behrends L, Houke L, Bailey E, *et al.* Recirculating constructed wetlands for treating industrial, municipal and agricultural wastewater[J]. Wat Sci Tech, 2001, **44**(11-12): 399-405.
- [12] Ouellet-Plamondon C, Chazarenc F, Comeau Y, *et al.* Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. Ecol Eng, 2006, **27**(3): 258-264.
- [13] 鄢璐, 王世和, 钟秋爽, 等. 强化供氧条件下潜流型人工湿地运行特性[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 736-741.
- [14] Armstrong W, Cousins D, Armstrong J, *et al.* Oxygen distribution in wetland plant roots and permeability barriers to gas-exchange with the rhizosphere: a microelectrode and modelling study with *Phragmites australis*[J]. Ann Bot, 2000, **86**(3): 687-703.
- [15] Wießer A, Kusch P, Stotmeister U. Oxygen release by roots of *Typha latifolia* and *Juncus effusus* in laboratory hydroponic systems[J]. Acta Biotechnol, 2002, **22**(1-2): 209-216.
- [16] Leonard K M, Key S P, Srikanthan R. A comparison of nitrification performance in gravity-flow and reciprocating constructed wetlands[A]. In: Brebbia C A, Almorza D, Sales D (Eds.). Water Pollution. VII. Modeling, Measuring and Prediction [C]. Southampton, UK: WIT Press, 2003. 293-301.
- [17] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 人工湿地室内小试不同填料去污性能比较[J]. 水处理技术, 2007, **33**(5): 45-49.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 89-283.
- [19] Huett D O. Diagnostic leaf nutrient standards for low chill peaches in subtropical Australia. Aust [J]. J Exp Agric, 1997, **37**(1): 119-126.
- [20] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. Wat Sci Tech, 1997, **35**(5): 11-17.
- [21] Metcalf and Eddy Inc. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse[M]. New Delhi: McGraw-Hill Companies, Inc, 2003. 940-982.
- [22] Stottmeister U, Wießer A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnol Adv, 2003, **22**(1-2): 93-117.
- [23] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Sci Total Environ, 2007, **380**(1-3): 48-65.
- [24] Hadada H R, Maine A M A, Bonetto C A. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment[J]. Chemosphere, 2006, **63**(10): 1744-1753.
- [25] Kadlec R H, Tanner C C, Hally V M, *et al.* Nitrogen spiraling in subsurface-flow constructed wetlands: implications for treatment response[J]. Ecol Eng, 2005, **25**(4): 365-381.