

立体生态模块处理杭州市玉皇山南基金小镇水体氮的效果

裴建川^{1,2}, 张书廷¹, 杨金艳², 张 进²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 杭州市玉皇山南基金小镇水体存在总氮超标问题, 对小镇内景观环境造成不利影响。构建以挺水植物(香蒲 *Typha orientalis*, 美人蕉 *Canna indica* 和千屈菜 *Lythrum salicaria*), 沉水植物(狐尾藻 *Myriophyllum verticillatum*, 竹叶眼子菜 *Potamogeton malaianus* 和伊乐藻 *Elodea nuttallii*)与生物填料(碳纤维草和立体超细纤维草)复合成的立体生态模块, 分析其在景观水系中的除氮能力和机制, 植物种类、生物填料类型对除氮的影响及立体生态模块最佳长度。结果表明: 复合立体生态模块具有较好的除氮效果, 总氮平均去除率为 73.58%~97.61%, 均高于空白 (30.87%), 除狐尾藻、竹叶眼子菜外的不同植物和生物填料类型复合成的立体生态模块对氮去除效果影响显著 ($P<0.05$)。平均总氮出水质量浓度, 18 个立体生态模块均达 GB3838-2002《地表水环境质量标准》Ⅳ类水水质标准 ($1.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。在总氮去除率为 85.00%时, 不同立体生态模块最佳长度不同, 对氮去除最好的 3 个模块为香蒲-伊乐藻-碳纤维草(1.34 m), 美人蕉-伊乐藻-碳纤维草(1.44 m)和香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草(1.64 m)。图 4 表 3 参 27

关键词: 生态学; 景观水体; 氮; 生态修复; 模块化技术; 模块最佳长度

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)06-0987-10

Nitrogen removal in landscape water bodies using a vertical ecological module in Yuhuang Shannan Fund Town

PEI Jianchuan^{1,2}, ZHANG Shuting¹, YANG Jinyan², ZHANG Jin²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Increased loading of nitrogen (N) from surface erosion and some sanitary drainage has led to degradation of landscape water bodies in Yuhuang Shannan Fund Town resulting in a negative impact on its landscape environment. This study explored total nitrogen (TN) removal prospects by addressing three research questions: (1) the amount of N the module could remove, (2) the N removal mechanisms in the process, and (3) the optimal length of the vertical ecological module. A vertical ecological module composed of an emergent plant module, a submerged plant module, and a biological stuffing module was used. Emergent plant modules ($1.75\text{ m} \times 1.00\text{ m} \times 0.20\text{ m}$) were planted with *Typha orientalis*, *Canna indica*, and *Lythrum salicaria*; submerged plant modules ($1.75\text{ m} \times 1.00\text{ m} \times 0.50\text{ m}$) were planted with *Myriophyllum verticillatum*, *Potamogeton malaianus*, and *Elodea nuttallii*; and biological stuffing modules ($1.75\text{ m} \times 1.00\text{ m} \times 0.50\text{ m}$) were planted with carbon fiber artificial plants and superfine fiber artificial plants, which combined into eighteen vertical ecological modules ($1.85\text{ m} \times 1.10\text{ m} \times 1.40\text{ m}$) in the order of Emergent plant modules, submerged plant modules and biological stuffing modules from water surface to underwater by orthogonal design. Results showed that the vertical ecological modules had favorable TN removal rates distributed between 73.58% and 97.61% with all being higher than the control group (30.87%). Except for *M. verticillatum* and *P. malaianus*, vegetation and

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-04-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2014ZX07203-009)

作者简介: 裴建川, 教授, 国家“千人计划”专家, 从事废水、废气及固废等污染控制与治理技术研究。

E-mail: jcp2012@zafu.edu.cn. 通信作者: 张书廷, 教授, 从事污染控制与治理技术研究。

E-mail: stzhang@tju.edu.cn

biological stuffing selection significantly ($P < 0.05$) influenced N removal efficiency. Average TN concentrations at the outlet of the restoration modules, excluding the control, reached Level IV ($1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of the National Standard of Environmental Quality in China (GB 3838-2002). When the average TN removal rate was 85.00%, the top three TN removal rate modules had optimal lengths of 1.34 m (*T. orientalis*-*E. nuttallii*-carbon fiber artificial plants module), 1.44 m (*C. indica*-*E. nuttallii*-carbon fiber artificial plants module), and 1.64 m (*T. orientalis*-*E. nuttallii*-uperfine fiber artificial plants module). The study could provide scientific basis of technical design and engineering application to improve the water quality of landscape water. [Ch, 4 fig. 3 tab. 27 ref.]

Key words: ecology; landscape water; nitrogen; module technique; ecological restoration; module optimal length

玉皇山南基金小镇位于杭州市, 小镇内自然景观优美, 景观层次丰富。设计中水系水源来自于白渠, 但由于白渠周边施工, 水系补水源头暂时中断, 导致水体缺乏活力。目前, 水系主要来自于玉皇山雨水, 因落差较大, 水体下流过程中冲刷地表而携带大量污染物, 导致氮过高, 加上小镇内部极个别生活污水间断性排放至水体, 水体氮进一步升高。氮是引起水华的重要驱动因子^[1], 小镇景观水系多处水体出现绿藻水华现象。这对小镇整体环境非常不利, 急需治理。目前水体氮治理主要有物理-化学法^[2]、生物法^[3-4]、生物-生态复合法^[5-6]等, 以复合法最为常用。该法将微生物净化与植物净化相结合, 在除氮的同时兼具景观美化作用, 尤其适用于城市景观水体修复, 但一般表现形式为人工湿地、人工生态浮岛等, 占地面积较大^[7], 施工周期较长, 在大型办公娱乐休闲地区的景观水体应用受限。模块化技术^[8-9]可简化生产环节、降低成本, 在第三次产业革命后逐渐成为主导技术。为此开发高效、价格低廉、易施工的模块化治理技术, 对城市景观水体修复治理意义重大。本研究根据玉皇山南基金小镇综合环境及水系实际情况, 在污染较为严重的副景观区采用了挺水植物模块、微生物填料模块、沉水植物模块, 复合组成的立体生态模块, 对水体进行修复。开展立体生态模块去除该水系氮的性能研究, 旨在探索立体生态模块除氮能力和机制, 植物及生物填料类型对氮去除效果影响及模块最佳长度, 为城市大型复杂景观污水的研究与应用提供技术参考。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

场址位于杭州市玉皇山南基金小镇(30.21°N , 120.15°E)的副景观区(图 1)。该区属于亚热带季风气候, 光照充足, 雨水充沛。2015 年, 全年平均气温为 17.3°C , 年总降水量为 $1\,947.6 \text{ mm}$, 年总日照时数为 $1\,358.5 \text{ h}$ 。



图 1 实验区地理位置示意图

Figure 1 Geographical location of the experiment

1.2 实验水样

以玉皇山南基金小镇水系中污染较为严重的副景观区水体作为治理对象, 如图 1。该水体通过主景观区利用泵水房补给水, 水流极缓, 水深为 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$, 进水污染物质量浓度变化较大, 统计结果见表

1。根据 GB3838-2002《地表水环境质量标准》可知：水质处于五类水以下(劣Ⅴ类水)。

表 1 治理前玉皇山南基金小镇水系水质

Table 1 Water quality of Yuhuang Shannan Fund Town before treatment

指标	$\rho_{\text{范围}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{平均}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{GB 3838-2002}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	等级
化学需氧量(COD _{Cr})	45.20~75.80	65.80	40	劣Ⅴ类
五日生化需氧量(BOD ₅)	20.20~35.50	30.20	10	劣Ⅴ类
总氮(TN)	3.00~10.00	5.60	2	劣Ⅴ类
铵态氮(NH ₄ ⁺ -N)	3.00~5.40	3.04	2	劣Ⅴ类
硝态氮(NO ₃ ⁻ -N)	1.01~3.79	1.22		
溶解氧(DO)	0.80~1.20	1.00	2	劣Ⅴ类
固体悬浮物(SS)	95.00~80.00	85.00		
酸碱度(pH 值)	7.40		6~9	

1.3 模块技术设计

立体生态模块由挺水植物模块、沉水植物模块及微生物填料模块组成，各模块设计如下：①挺水植物模块。选取香蒲 *Typha orientalis*，美人蕉 *Canna indica*，千屈菜 *Lythrum salicaria*，构建 3 种挺水植物模块。模块大小：长×宽×高为 1.75 m × 1.00 m × 0.20 m，以竹竿(内径 $D=6\sim8$ cm)为支撑边，上面放置聚乙烯塑料浮板(长 0.33 m × 宽 0.33 m × 高 0.06 m)，浮板内套软花盆(上口径 0.15 m，下口径 0.11 m，高 0.13 m)，花盆内铺设 0.10 m 厚的陶粒，陶粒平均粒径为 2.2 cm。植物种植于花盆内，栽植密度为 16 株·m⁻²。②沉水植物模块。选取狐尾藻 *Myriophyllum verticillatum*，竹叶眼子菜 *Potamogeton malaianus*，伊乐藻 *Elodea nuttallii*，构建 3 种沉水植物模块。模块尺度：长×宽×高为 1.75 m × 1.00 m × 0.50 m，以竹竿(内径 $D=4\sim6$ cm)为支撑边，上面布设纱网袋(100 目)，网袋内铺设 0.15 m 厚的陶粒，陶粒平均粒径为 2.2 cm。沉水植物栽植于网内，栽植密度为 25 株·m⁻²。③微生物填料模块。选取碳纤维草(比表面积=1 000 m²·g⁻¹)，立体超细纤维草(比表面积=8 000 m²·m⁻³)，构建 2 个微生物填料模块。生物填料模块为长方体(长 1.75 m × 宽 1.00 m × 高 0.50 m)，框架用竹竿(内径 $D=4\sim6$ cm)搭建，人工水草铺设设体积率为 5%。

将上述 3 种模块按照微生物填料模块→沉水植物模块→挺水植物模块的顺序从下至上固定，复合成 18 个立体生态模块。

1.4 实验方法

18 个立体生态模块建成后，放置于透明的有机玻璃(厚度 $T=2$ mm)反应器(长 1.85 m × 宽 1.10 m × 高 1.40 m)内，与周围水体隔离，安装于玉皇山基金小镇副景观区水系。其中进水口位于反应器一侧顶端直通入下部，在距离立体生态模块进水口端 0.30，0.70 和 1.85 m 处，距离立体生态模块底部 0.25，0.75 和 1.10 m 处，设采水管(直径 $d=2.0$ cm)，共计 9 个，采水管不采样时处于闭管状态，出水口为 9 号采样口，如图 2 所示。另设 1 个空白组。

先试运行 1.5 个月，2016 年 5 月 13 日起向模块进水，系统运行 2 个月，至 2016 年 7 月 12 日结束。进水方式：用流量泵将副景观区水抽至立体生态模块，通过模块进水口均匀持续进水，每个模块进水量均为 15.00 m³·d⁻¹，水力负荷为 7.37 m³·d⁻¹。运行期内每周采集 1 次水样，5 月 13 日 14:00 第 1 次采样，以后隔 6 d 在 14:00 采样 1 次，共采集 9 次水样。实验期间现场测定模块内 pH 值和水温。采集后的水样放置于采集瓶，其中入水口处水样为进水水质，9 号采集管出水样为出水水质，1~3 号采集管抽取 10.00 mL 混匀为 0.30 m 处水样，4~6 号采集管抽取 10.00 mL 混匀为 0.70 m 处水样，7~9 号采集管抽取 10.00 mL 混匀为 1.85 m 处水样。做好标记放于冰盒内运至分析室存于 0 ℃冰箱内。24 h 内完成分析。

采集水样主要测试指标有总氮、铵态氮、硝态氮、pH 值(酸碱度)、温度，分析方法采用文献[10]所述方法，其中总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，铵态氮采用靛酚蓝比色法，硝态氮采用酚二磺酸分光光度法，pH 值采用电极法，温度采用温度计法。平均质量浓度 $\rho_{\text{平均}}=(\rho_1+\rho_2+\rho_3+\cdots+\rho_n)/n$ ，其中： ρ 表示质量浓度， ρ_1 为第 1 次采集水样所测的质量浓度， ρ_2 为第 2 次采集水样所测得质量浓度，其他以此类推。去除率= $(\rho_{\text{进水}}-\rho_{\text{出水}})/\rho_{\text{进水}}\times 100\%$ 。

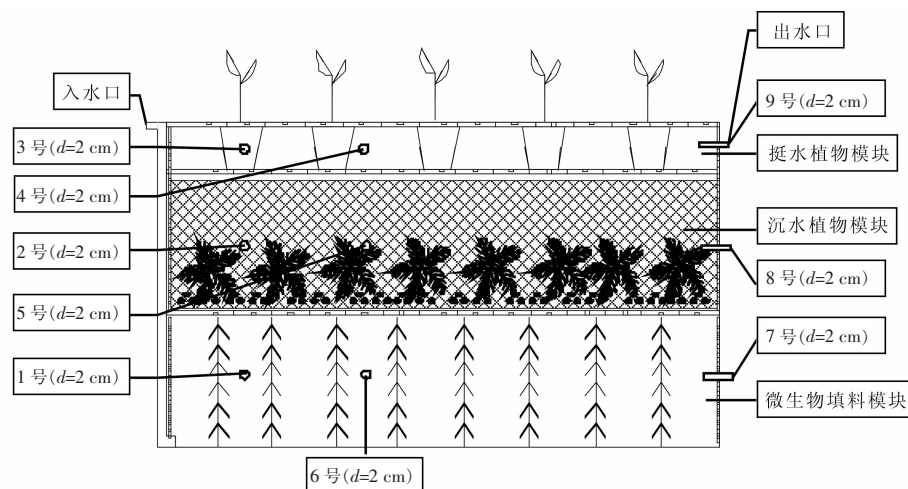


图 2 立体生态模块示意图

Figure 2 Diagram of vertical ecological modules

2 结果与分析

2.1 对去除污水总氮及耐冲击负荷分析

由表 2 可知：实验周期内，进水总氮质量浓度平均为 $5.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经立体生态模块后，香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块总氮质量浓度平均为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，低于其他立体生态模块 ($0.22 \sim 1.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及空白组 ($3.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块总氮平均去除率为 97.61%，高于其他立体生态模块 (73.58%~96.10%) 及空白组 (30.87%)。对于铵态氮而言，香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块出水总氮质量浓度平均为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，低于其他立体生态模块 ($0.08 \sim 0.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及空白组 ($1.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块的铵态氮平均去除率为 98.68%，高于其他立体生态模块 (71.05%~97.37%) 及空白 (35.53%)。而对硝态氮，去除效果仍以香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块最好，去除率为 96.97%，高于其他立体生态模块 (63.93%~93.11%) 及空白 (20.50%)。

显著性分析 (表 2) 发现：立体生态模块与空白组相比较，对总氮、铵态氮、硝态氮去除率呈极显著差异，而且植物和生物填料类型对去除率有一定影响。空白的总氮质量浓度平均去除率极显著低于立体生态模块 ($P < 0.01$)。在 18 个复合立体生态模块中，香蒲-伊乐藻-碳纤维草 (97.64%)，美人蕉-伊乐藻-碳纤维草 (96.02%)，香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草 (93.05%) 3 种复合立体生态模块对总氮去除效果最好，其中去除率最高的香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块总氮平均去除率比空白组高 70.61%。18 个立体生态模块中，除香蒲-狐尾藻-碳纤维草、香蒲-竹叶眼子菜-碳纤维草、香蒲-狐尾藻-立体超细纤维草、美人蕉-狐尾藻-碳纤维草、美人蕉-竹叶眼子菜-碳纤维草、千屈菜-狐尾藻-碳纤维草、千屈菜-伊乐藻-立体超细纤维草 7 个复合立体生态模块外，其他复合立体生态模块均呈显著差异 ($P < 0.05$)，这说明所选植物及生物填料不但能促进总氮去除，而且种类对总氮去除率也有一定影响。通过比较可知，由伊乐藻构建的沉水植物模块在所有模块中对总氮的去除率提高效果最显著；挺水植物模块中香蒲模块对总氮的去除率最高，其次是美人蕉，千屈菜降解率最低；碳纤维草模块对总氮的去除率高于立体超细纤维草模块。对于铵态氮质量浓度，空白组和 18 个立体生态模块组两者差异达显著水平 ($P < 0.01$)，其中香蒲-伊乐藻-碳纤维草等 14 个立体生态模块又与立体生态模块整体呈显著差异。这说明不同植物及生物填料对铵态氮去除率影响比对总氮去除率显著。空白组硝态氮去除率和立体生态模块同样呈极显著差别。在 18 个立体生态模块中，去除率与模块整体呈显著差异达 72.00%，同样说明植物和生物填料类型对硝态氮去除率有一定影响。

副景观区水体总氮质量浓度波动较大，分别为 $3.02 \sim 10.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，表明不同立体生态模块的抗冲击负荷能力差异显著。最高总氮进水质量浓度发生在 2016 年 5 月 13 日 ($10.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，空白组的总氮去除率为 19.96%，立体生态模块的总氮去除率为 66.51%~95.22%。最低总氮进水质量浓度发生在 2016 年 5 月 20 日 ($3.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，而空白的总氮去除率为 29.80%，立体生态模块的总氮去除率为 62.58%~

表 2 不同立体生态模块进水氮质量浓度及去除率(平均值)
Table 2 Concentration and removal rate of nitrogen in various vertical ecological modules

立体生态模块	总氮(TN)				铵态氮(NH ₄ ⁺ -N)				硝态氮(NO ₃ ⁻ -N)			
	$\rho_{\text{进水}}/$ (mg· L ⁻¹)	$\rho_{\text{出水}}/$ (mg· L ⁻¹)	去除 率/%	<i>P</i>	$\rho_{\text{进水}}/$ (mg· L ⁻¹)	$\rho_{\text{出水}}/$ (mg· L ⁻¹)	去除 率/%	<i>P</i>	$\rho_{\text{进水}}/$ (mg· L ⁻¹)	$\rho_{\text{出水}}/$ (mg· L ⁻¹)	去除 率/%	<i>P</i>
空白	5.60	4.12	27.03	<0.01	3.04	1.96	35.53	<0.01	1.22	0.97	20.49	<0.01
香蒲-狐尾藻-碳纤维草	5.60	0.75	86.67	>0.05	3.04	0.50	83.55	>0.05	1.22	0.25	79.51	>0.05
香蒲-竹叶眼子菜-碳纤维草	5.60	0.93	83.52	>0.05	3.04	0.88	71.05	<0.01	1.22	0.27	77.87	>0.05
香蒲-伊乐藻-碳纤维草	5.60	0.13	97.64	<0.01	3.04	0.04	98.68	<0.01	1.22	0.04	96.97	<0.01
香蒲-狐尾藻-立体超细纤维草	5.60	1.01	82.12	>0.05	3.04	0.85	72.04	<0.05	1.22	0.35	71.31	<0.05
香蒲-竹叶眼子菜-立体超细纤维草	5.60	1.19	78.99	<0.01	3.04	0.85	72.04	<0.05	1.22	0.33	72.95	<0.05
香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草	5.60	0.39	93.05	<0.01	3.04	0.15	95.07	<0.01	1.22	0.10	91.89	<0.01
美人蕉-狐尾藻-碳纤维草	5.60	0.80	85.82	>0.05	3.04	0.54	82.24	>0.05	1.22	0.22	81.97	>0.05
美人蕉-竹叶眼子菜-碳纤维草	5.60	1.01	82.02	>0.05	3.04	0.84	72.37	<0.01	1.22	0.37	69.67	<0.01
美人蕉-伊乐藻-碳纤维草	5.60	0.22	96.02	<0.01	3.04	0.08	97.37	<0.01	1.22	0.08	93.11	<0.01
美人蕉-狐尾藻-立体超细纤维草	5.60	1.09	80.70	<0.05	3.04	0.75	75.33	<0.05	1.22	0.34	72.13	<0.05
美人蕉-竹叶眼子菜-立体超细纤维草	5.60	1.27	77.46	<0.01	3.04	0.86	71.71	<0.01	1.22	0.40	67.21	<0.01
美人蕉-伊乐藻-立体超细纤维草	5.60	0.48	91.44	<0.01	3.04	0.44	85.53	<0.05	1.22	0.19	84.43	<0.01
千屈菜-狐尾藻-碳纤维草	5.60	1.04	81.53	>0.05	3.04	0.69	77.30	>0.05	1.22	0.30	75.41	>0.05
千屈菜-竹叶眼子菜-碳纤维草	5.60	1.22	78.42	<0.01	3.04	0.80	73.68	<0.01	1.22	0.35	71.31	<0.05
千屈菜-伊乐藻-碳纤维草	5.60	0.42	92.54	<0.01	3.04	0.35	88.49	<0.01	1.22	0.17	86.07	<0.01
千屈菜-狐尾藻-立体超细纤维草	5.60	1.30	77.04	<0.01	3.04	0.77	74.67	<0.05	1.22	0.44	63.93	<0.01
千屈菜-竹叶眼子菜-立体超细纤维草	5.60	1.48	73.81	<0.01	3.04	0.84	72.37	<0.01	1.22	0.40	67.21	<0.01
千屈菜-伊乐藻-立体超细纤维草	5.60	0.68	87.97	>0.05	3.04	0.56	81.58	>0.05	1.22	0.29	76.23	>0.05

94.70%。对比可见：总氮去除率，除空白组相差较大外，进水负荷对立体生态模块影响不大。说明立体生态模块具有较强的抗冲击负荷能力，对质量浓度波动较大的水体保持较高的去除率。

可见，副景观区污水通过立体生态模块净化后总氮降低，18 个立体生态模块的平均出水质量浓度参照 GB3838-2002《地表水环境质量标准》，总氮已达Ⅳ类水水质标准(1.5 mg·L⁻¹)。但其出水水质总氮尚未达到Ⅲ类地表水水质标准，一般不能直接作为接触性娱乐性景观用水。故对于副景观区，可以采取曝气充氧+立体生态模块工艺，再加上后续副景观区塘边缓冲带，以保障副景观区的水质。

2.2 各形态氮的质量浓度沿长度变化趋势分析

选取对总氮降解率最高的 3 组(香蒲-伊乐藻-碳纤维草、香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草、美人蕉-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块)，考察各形态氮质量浓度的沿长度变化。由图 3A 和图 3B 可见：立体生态模块中总氮、铵态氮质量浓度均呈沿长度降低之势，且距出水口越近去除效果越好。由图 3C 可知：虽各立体生态模块硝态氮质量浓度均低于进水，但立体生态模块在 0.70 m 后质量浓度下降更明显，而空白组硝态氮质量浓度稳定下降，变化曲线形状与总氮和铵态氮相似。立体生态模块全程无硝态氮积累，这与仅采用植物净化的效果不同^[11-14]。这可能和立体生态模块位于最低端的微生物填料模块的反硝化作用更强，促进了硝态氮的还原有关。香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块在 0.30，0.70 和 1.85 m 处所取水样的总氮、铵态氮、硝态氮质量浓度低于空白组，香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草和美人蕉-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块，在 3 个立体生态模块中最低。

2.3 pH 值及植物、生物填料对去除氮效果分析

选取去除率最高的 3 组(香蒲-伊乐藻-碳纤维草、香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草、美人蕉-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块)，考察 pH 值变化趋势及各子模块对增强氮去除效果。由图 3D 可见：实验期各模块酸碱度为 pH 7.15~7.40。空白组沿长度 pH 值均大于或等于 pH 7.39 且曲线变化幅度相对较小，尾端 pH 值有一定升幅，而香蒲-伊乐藻-碳纤维草、香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草、美人蕉-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块 pH 值均小于空白，pH 值随长度增加均小幅度下降，其原因可能为立体生态模

块中的挺水植物和沉水植物泌氧功能,通过立体生态模块中植物根系输氧能力和沉水植物光合作用使模块内挺水植物模块和沉水植物模块水体氧含量增加,硝化作用增强,释放了大量的质子,导致 pH 值沿长度下降,且低于空白组的 pH 值,这种变化趋势与黄季超等^[11]研究结果相似。因反应系统 pH 值均小于 pH 7.50,故实验过程氨挥发可以忽略^[12]。以此推断,实验过程立体生态模块中氮的去除可能主要靠硝化/反硝化、厌氧氨氧化和植物光合作用,通常在有氧条件下,水体氮一部分经过铵盐→亚硝酸盐→硝酸盐的过程转化为水溶盐,含氮盐在缺氧条件下经过硝酸盐→亚硝酸盐→一氧化氮→一氧化二氮→氮气转化为气态氮;一部分氮在缺氧条件下经过铵盐→氮气直接经过厌氧氨氧化作用转化为气体^[15]。硝化菌最佳酸碱度为 pH 7.0~8.6,反硝化菌和厌氧氨氧化菌酸碱度为 pH 7.0~8.0^[14-15]。pH 值监测结果表明:立体生态模块中 pH 值在此范围内,适合氮降解细菌的生长繁殖。在后期,为了深入探究反应过程 pH 值呈现这种变化的原因,可增设溶解氧(DO),微生物种类及数量等指标监测,来论证现在的推断。

种植了植物和生物填料的立体生态模块的脱氮效果优于空白组。主要原因:①立体生态模块的水流受植物生长和生物填料影响,水流受到阻滞,延长停留时间;②植物生长吸收硝态氮和铵态氮;③挺水植物根系、沉水植物和生物填料为模块中微生物生长提供了繁殖场所^[16-18],根系和生物填料会创造有利于多种微生物生长的小环境,在沉水植物及挺水植物根茎附近会形成有氧小环境,形成硝化好氧区,在远离沉水植物和挺水植物根茎、模块最底部的生物填料模块形成反硝化、氨氧化缺氧区。

本研究植物初始平均株高为香蒲 1.56 m,美人蕉 2.02 m,伊乐藻 1.45 m,实验结束时植物平均株高为香蒲 1.75 m,美人蕉 1.32 m,而伊乐藻已覆盖整个沉水植物模块(长 1.75 m×宽 1.00 m×高 0.50 m)纱网袋,并且分别于 2016 年 5 月 27 日和 6 月 17 日进行收割,水体氮盐可通过光合作用作为营养物质暂时储存于植物^[19]。长势最好的香蒲和伊乐藻对氮的去除效果最好。挺水植物和沉水植物组合成水生植物群落,比单一水生植物氮磷去除率更好。刘足根等^[20]研究表明:乡土种穗花狐尾藻 *Myriophyllum spicatum*+狭叶香蒲 *Typha angustifolia* 的镶嵌组合对总氮、硝态氮的去除率分别达 52.96%和 61.74%,比单一生活型水生植物氮磷去除率更高,且净化效果更为稳定。所以,可选这些植物生长到一定季节,适时收割植物部分茎和叶,以达到对氮良好的去除效果。

挺水植物和沉水植物的泌氧功能在立体生态模块净化污水过程中发挥着重要作用。通过模块内植物根系和沉水植物茎叶的输氧,使其周围形成一个有氧区,而距离较远的区域形成缺氧、厌氧区,为好氧、厌氧微生物提供生存条件^[21]。水中铵态氮去除发生的硝化反应,与水中溶解氧有很大关系。硝化过程所需的氧主要为水中溶解氧,泌氧能力较强的植物可向模块水体输送更多氧气,有利于硝化作用增强,促进除氮能力。香蒲、伊乐藻、美人蕉 3 种植物都有很强的泌氧能力^[22-24],且存活率和生长情况与本研究的其他 3 种(千屈菜、竹叶眼子菜、狐尾藻)相比较,表现出更好的长势,这可能是这 3 种复合立体生态模块去除氮效率较高的原因之一。

生物填料比表面积大、空隙率高,能让微生物在固体表面附着生长形成生物膜,从而实现对污水的生物处理^[25]。生物膜中的微生物可以利用污水中溶解氧和有机物促进自身生长繁殖,同时生物膜逐渐增厚,形成厌氧区^[26]。水中硝态氮的去除主要在厌氧区进行,香蒲-伊乐藻-碳纤维草、香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草、美人蕉-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块脱氮过程中均未出现硝酸根积累的现象,这与仅单纯用植物净化相比,关键因素可能因为处于底层的生物填料模块处于缺氧环境,又对反硝化菌有较好的吸附作用,促使反硝化菌在其表面形成生物膜。有研究表明^[27]:在较低负荷下硝化功能菌属 *Dechloromonas* 相对丰度的增加可能是引起填料生物膜反硝化脱氮能力提高的重要原因。为了深入了解生物填料对除氮的影响,可增设监测生物填料模块总氮、有机溶解氮、铵态氮、硝态氮等各类氮质量浓度变化。

2.4 模块最佳长度分析

模块长度受多因素影响,比如降水量、植物品种、生物填料类型等。本研究以玉皇山南基金小镇景观水水质净化为目的,以不同挺水植物、沉水植物、生物填料模块为控制变量,根据污水污染物降解和沿长度去除率变化确定生态立体模块最佳长度。用 Origin 2017 分析软件,根据立体生态模块对景观污水中氮的实际去除效果,分别拟合香蒲-伊乐藻-碳纤维草、香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草、美人蕉-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块总氮、铵氮、硝态氮的去除率和沿长度距离,表明总氮、铵氮、硝态氮

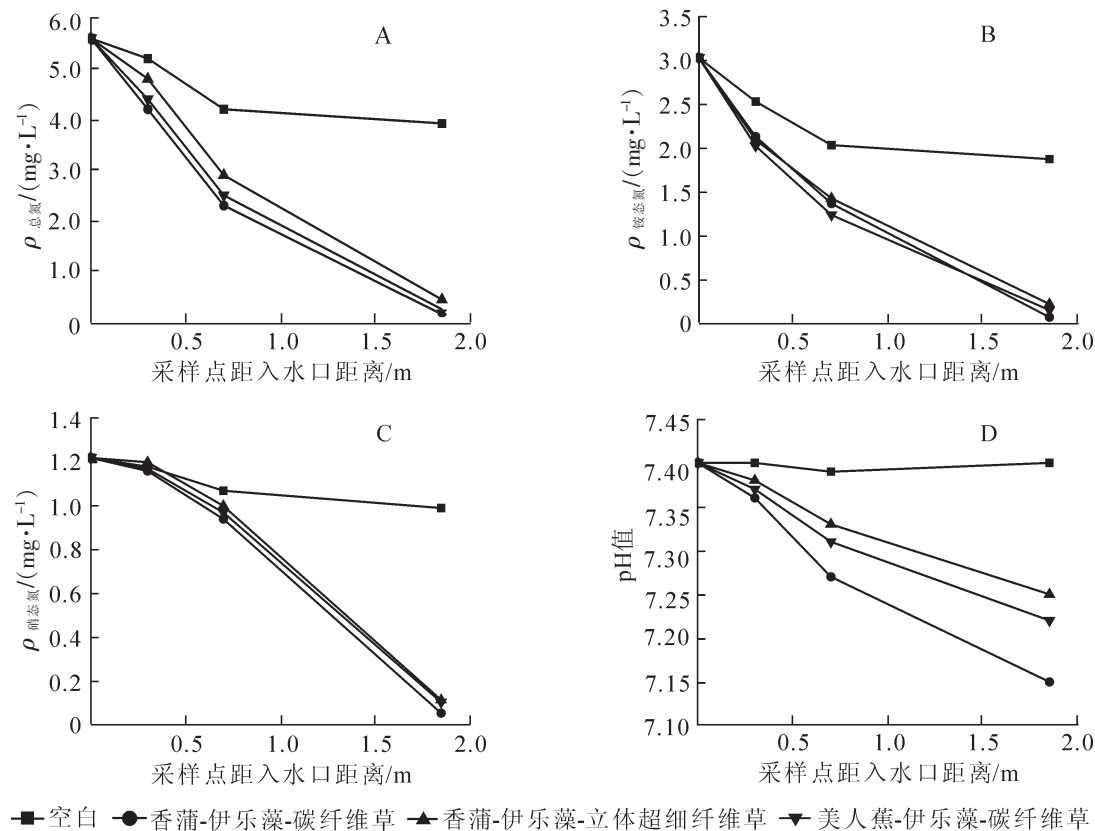


图 3 立体生态模块下总氮、铵态氮、硝态氮和 pH 值沿长度的变化

Figure 3 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration and pH change along flow direction in vertical ecological modules

和沿长度距离呈显著的指数关系(图 4 和表 3)，所得拟合公式如表 3。

拟合结果(表 3)显示：立体生态模块长度与污染物去除效果呈正相关，但受水体功能限制，不能将水体表面全部覆盖。玉皇山南基金小镇景观水水域区总面积仅 6 700 m²。为此，在有限的水域面，达到用立体生态模块控制副景观区污水的最佳效果，确定立体生态模块最佳长度。根据表 3 拟合公式，计算出去除率为 85.00%时的值，为不同模块复合条件下的最佳长度。结果表明：在本实验条件及周期内，总氮去除率为 85.00%时，最佳立体生态模块长度为香蒲-伊乐藻-碳纤维草 1.34 m，美人蕉-伊乐藻-碳纤维 1.44 m，香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草 1.64 m，空白+∞。香蒲-伊乐藻-碳纤维草、美人蕉-伊乐藻-碳纤维、香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草相比空白，让总氮去除率提升至 85.00%成为可能。可见立体生态模块能显著提高水系除氮效果，合理的长度设计可有效减少水域面积覆盖度，增加水系景观的亲水性。

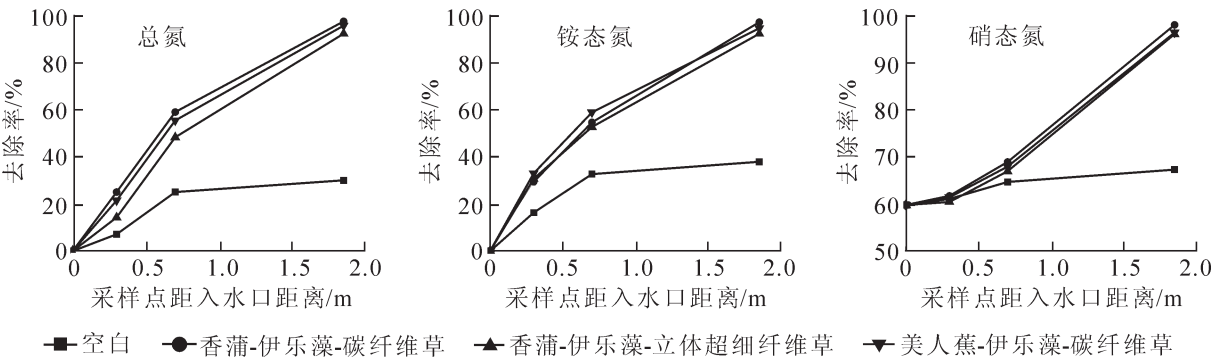


图 4 立体生态模块下总氮、铵态氮和硝态氮沿长度的去除率变化

Figure 4 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ removal rate change along flow direction in vertical ecological modules

表 3 不同立体生态模块的除氮最佳长度

Table 3 Fitted optimal length of vertical ecological modules for nitrogen removal

模块类型	氮形态	去除率(y)与沿长度距离(x)拟合公式	R^2	最佳长度/m
空白	总氮	$y=32.99-34.39 \times 0.22^x$	0.944	$+\infty$
	铵态氮	$y=39.71-40.30 \times 0.12^x$	0.989	$+\infty$
	硝态氮	$y=69.24-9.67 \times 0.39^x$	0.972	$+\infty$
香蒲-伊乐藻-碳纤维草	总氮	$y=119.15-120.39 \times 0.39^x$	0.997	1.34
	铵态氮	$y=121.73-121.24 \times 0.42^x$	0.999	1.38
	硝态氮	$y=46\ 530.24-46\ 473.43 \times 0.999^x$	0.977	0.61
香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草	总氮	$y=151.67-154.05 \times 0.60^x$	0.990	1.64
	铵态氮	$y=111.11-110.16 \times 0.38^x$	0.998	1.49
	硝态氮	$y=55\ 200.37-55\ 144.28 \times 0.999^x$	0.963	0.52
美人蕉-伊乐藻-碳纤维草	总氮	$y=124.99-126.57 \times 0.45^x$	0.995	1.44
	铵态氮	$y=107.02-106.59 \times 0.31^x$	0.999	1.35
	硝态氮	$y=49\ 575.11-49\ 518.42 \times 0.999^x$	0.972	0.57

3 结论

立体生态模块能有效净化景观水体中的氮且具有一定的抗冲击负荷能力。实验运营期内, 立体生态模块对总氮、铵态氮、硝态氮去除率均明显高于空白组, 且呈极显著差异($P<0.01$)。立体生态模块中当进水总氮平均质量浓度为 $5.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水总氮最低质量浓度平均值为香蒲-伊乐藻-碳纤维草复合立体生态模块的 $0.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 该模块平均去除率为 97.61%。其余模块出水氮质量浓度为 $0.22\sim 1.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 空白组出水氮质量浓度为 $3.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均高于该模块。

植物种类和生物填料类型对氮的净化效果有一定影响。18 个 1.85 m 长立体生态模块, 总氮平均去除率为 73.58%~97.61%, 铵态氮平均去除率为 71.05%~98.68%, 硝态氮平均去除率为 63.93%~96.97%, 且分别有 11 个(总氮)、14 个(铵态氮)、13 个(硝态氮)模块与立体生态模块组呈显著差异($P<0.05$)。其中 3 种挺水植物模块中香蒲模块对总氮去除率最高, 沉水植物模块中伊乐藻模块对总氮去除率最高, 生物填料模块中碳纤维模块对总氮去除率高于立体超细纤维模块。对总氮去除率前 3 种复合模块类型为香蒲-伊乐藻-碳纤维草 97.61%, 美人蕉-伊乐藻-碳纤维 96.10%, 香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草 92.61%, 去除率均与整体均呈极显著差异($P<0.01$)。

立体生态模块 pH 值在模块运行过程中呈现不同程度的降低, 但均处在硝化/反硝化、厌氧氨氧化的最佳 pH 值范围内, 这可能为氮的生化作用提供了较好的外在条件。后续可通过溶解氧、微生物种类及数量等的检测来证实。

植物和生物填料种类对确定立体生态模块最佳长度有一定影响。不同植物和生物填料复合成的立体生态模块最佳长度不同, 对总氮去除率越高的植物模块和生物填料模块复合成的立体生态模块最佳长度越短, 反之增长。在总氮去除率达 85.00% 时, 在除氮效果前 3 的模块中, 香蒲-伊乐藻-碳纤维草最佳长度为 1.34 m, 美人蕉-伊乐藻-碳纤维为 1.44 m, 香蒲-伊乐藻-立体超细纤维草为 1.64 m。这不但提高了水体净化能力, 而且有效减少水体覆盖度。最佳长度可为立体生态模块技术在景观水系修复工程应用提供参考。

4 参考文献

- [1] ZHAI Shuijing, YANG Longyuan, HU Weiping. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in northern Lake Taihu, China [J]. *Environ Manage*, 2009, **44**(3): 542 – 551.
- [2] 安中德二, 京才俊則. 栄養塩類の除去技術: 生物処理法と物理化学処理法の比較[J]. 土木研究センター, 1979, **21**(7): 363 – 368.
ANNAKA T, KYOSAI S. Nutrient removal technologies: comparison of biological and physico-chemical treatment [J]. *Civ Eng J*, 1979, **21**(7): 363 – 368.

- [3] LIU Wei, YANG Dianhai, XU Li. Effect of return sludge pre-concentration on biological phosphorus removal in a novel oxidation ditch [J]. *Energy Resour Environ Technol*, 2012, **20**(4): 747 – 753.
- [4] 褚淑祎, 陈小敏, 潘国武, 等. 上庄河污染河水原位生物修复试验[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(1): 105 – 110.
- CHU Shuyi, CHEN Xiaomin, PAN Guowu, *et al.* An in situ remediation test for polluted water in the Shangzhuang River [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2014, **31**(1): 105 – 110.
- [5] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, **24**(8): 1718 – 1723.
- JIANG Yueping, GE Ying, YUE Chunlei, *et al.* Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(8): 1718 – 1723.
- [6] 刘伸伸, 张震, 何金铃, 等. 水生植物对氮磷及重金属污染水体的净化作用[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(5): 910 – 919.
- LIU Shenshen, ZHANG Zhen, HE Jinling, *et al.* Purification effect of aquatic plants on nitrogen, phosphorus and heavy metal polluted water [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(5): 910 – 919.
- [7] KIVAISI A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review [J]. *Ecol Eng*, 2001, **16**(4): 545 – 560.
- [8] 侯亮, 唐任仲, 徐燕申. 产品模块化设计理论、技术与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2004, **40**(1): 56 – 61.
- HOU Liang, TANG Renzhong, XU Yanshen. Review of theory, key technologies and its application of modular product design [J]. *Chin J Mech Eng*, 2004, **40**(1): 56 – 61.
- [9] MARTIN M V, ISHII K. Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures [J]. *Res Eng Des*, 2002, **13**(4): 213 – 235.
- [10] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 黄季超, 许仕荣, 卢少勇, 等. 生态透水带去除洱海流域生活污水氮的效果[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(10): 5409 – 5416.
- HUANG Jichao, XU Shirong, LU Shaoyong, *et al.* Effect of nitrogen removal by ecological permeable belts treating domestic wastewater of Erhai Lake basin [J]. *Chin J Environ Eng*, 2017, **11**(10): 5409 – 5416.
- [12] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, **26**(8): 2670 – 2677.
- LU Shaoyong, JIN Xiangcan, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(8): 2670 – 2677.
- [13] FRANCIS C A, BEMAN J M, KUYPERS M M. New processes and players in the nitrogen cycle: the microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation [J]. *ISME J*, 2007, **1**(1): 19.
- [14] 徐亚同. pH 值、温度对反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 1994, **14**(4): 308 – 313.
- XU Yatong. The influence of pH values and temperature on denitrification [J]. *China Environ Sci*, 1994, **14**(4): 308 – 313.
- [15] 郑平, 胡宝兰. 厌氧氨氧化菌混培物生长及代谢动力学研究[J]. 生物工程学报, 2001, **17**(2): 193 – 198.
- ZHENG Ping, HU Baolan. Kinetics of anaerobic ammonia oxidation [J]. *Chin J Biotechnol*, 2001, **17**(2): 193 – 198.
- [16] TANAKA Y, TAMAKI H, MATSUZAWA H, *et al.* Microbial community analysis in the roots of aquatic plants and isolation of novel microbes including an organism of the candidate phylum OP10 [J]. *Microb Environ*, 2012, **27**(2): 149.
- [17] WU Weizhong, YANG Feifei, YANG Luhua. Biological denitrification with a novel biodegradable polymer as carbon source and biofilm carrier [J]. *Bioresour Technol*, 2012, **118**(4): 136 – 140.
- [18] LI Shuying, ZHOU Yuanqing, HU Cheng, *et al.* Water purification of rhizosphere microorganism in mosaic community of macrophytes [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, **33**(3): 148 – 153.
- [19] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境工程学报, 2003, **4**(2): 36 – 40.
- ZHONG Yunxiao, HU Hongying, QIAN Yi. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control [J].

- Tech Equip Environ Pollut Control*, 2003, **4**(2): 36 – 40.
- [20] 刘足根, 张萌, 李雄清, 等. 沉水-挺水植物镶嵌组合的水体氮磷去除效果研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(增刊 1): 171 – 181.
- LIU Zugen, ZHANG Meng, LI Xiongqing, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal of eutrophic water by the mosaic system of submerged-emerged plants [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2015, **24**(suppl 1): 171 – 181.
- [21] COLMER T D. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots [J]. *Plant Cell Environ*, 2003, **26**(1): 17 – 36.
- [22] LAI Wenling, ZHANG Yang, CHEN Zhanghe. Radial oxygen loss, photosynthesis, and nutrient removal of 35 wetland plants [J]. *Ecol Eng*, 2012, **39**(7): 24 – 30.
- [23] JAMES C, EATON J W, HARDWICK K, *et al.* Competition between three submerged macrophytes, *Elodea canadensis*, *Elodea nuttallii* and *Lagarosiphon major* [C]// MONTEIRO A, VASCONCELOS T, CATARINO L. *Management and Ecology of Aquatic Plants. Proceedings of 10th Ewrs International Symposium on Aquatic Weeds*. Netherlands: European Weed Research Society, 1998.
- [24] LIN Jianhua, YANG Yang, LI Li, *et al.* Characteristics of growth and radial oxygen loss of eight wetland plants [J]. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1042 – 1048.
- [25] 张凡, 程江, 杨卓如, 等. 废水处理用生物填料的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(4): 8 – 12.
- ZHANG Fan, CHENG Jiang, YANG Zhuoru, *et al.* Research progress in biofilm carrier for wastewater treatment [J]. *Thech Equip Environ Pollut Control*, 2004, **5**(4): 8 – 12.
- [26] 施云芬, 魏冬雪. 悬浮填料同时生物脱氮除磷研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2013, **32**(11): 2286 – 2291.
- SHI Yunfen, WEI Dongxue. Research progress of simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal by suspension pachking [J]. *Bull Chin Ceram Soc*, 2013, **32**(11): 2286 – 2291.
- [27] 谭阳, 李激, 徐巧, 等. 反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2486 – 2495.
- TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, *et al.* Applicability and microbial community structure of denitrification suspended carriers [J]. *Environ Sci*, 2017, **38**(6): 2486 – 2495.