

植物生理生态特性对人工湿地脱氮效果的影响

黄娟, 王世和, 钟秋爽, 鄢璐, 刘洋, 王峰
东南大学市政工程系, 江苏 南京 210096

摘要: 人工湿地污水处理系统中, 植物对脱氮效果起着非常重要的作用。为了明确人工湿地植物生理生态特性对脱氮效果的影响, 藉此优选高效耐寒的湿地植物, 进而提出可行的强化脱氮措施, 在大量试验的基础上, 详细测定了芦苇、美人蕉等典型湿地植物在不同生长条件下对湿地脱氮效果、溶解氧分布状态的影响, 以及植物光合、蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响。结果表明: 在本试验范围内, 芦苇、美人蕉湿地脱氮效果最佳; 茶花湿地低温条件下运行稳定。植物净光合速率与溶解氧分布、总氮和氨氮去除率显著正相关, 而植物蒸腾速率与湿地氨氮去除率显著相关。适当增加植物种植密度有利于提高人工湿地脱氮效果, 但种植过密对提高溶解氧水平和总氮去除率反而不利。植物生长周期对湿地脱氮影响显著, 植物收割方式对脱氮效果影响较大, 清除植物地上茎叶既不破坏植物根区微环境, 可有效防止茎叶腐烂向系统重新释氮。此外, 由于湿地前端溶解氧水平急剧下降, 故建议适当增加前端植物种植密度。

关键词: 人工湿地; 植物; 脱氮; 溶解氧

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5906 (2009) 02-0471-05

人工湿地在污水处理、污染物控制和改善环境方面已经得到各国的普遍重视和应用^[1-2]。与传统污水生化处理技术相比, 具有建设成本与运行成本低、处理效果好、兼有生态修复功能与营造生态景观等特点^[3]。作为人工湿地重要组成部分, 植物在污染物净化中起着不可替代的作用^[4-5]。一方面植物根系为微生物提供介质环境^[6-7], 另一方面植物对污水中可利用态的营养物质还起着吸收、利用和转化作用^[8], 同时改善水力条件^[9], 促进悬浮物在基质中的沉降与过滤; 此外还具有一定的美观可欣赏性^[10]。目前, 国内外对植物根系输氧能力的大小及对湿地污染物去除效果的影响程度仍存在一定争议, 成为目前研究的热点和难点问题^[11-15]。多数植物会经历春、夏旺盛, 秋、冬枯败的生长周期, 如何减小植物生长周期对湿地污染物净化效果的影响, 充分发挥湿地植物的净化作用, 维持人工湿地高效净化能力是具有实用价值的研究方向。

本研究以大量试验为基础, 测定了芦苇、美人蕉等典型湿地植物在不同生长条件下对湿地脱氮效果、溶解氧分布状态的影响, 以及植物光合、蒸腾等特性对湿地脱氮效果的影响。

1 试验装置与方法

1.1 试验湿地模型

试验系统为建于南京锁金村污水处理厂的 6 组推流式潜流人工湿地, 如图 1 所示。各系统长、宽、高为 3 m×1 m×0.85 m, 底坡 1%。床体 0.6 m 以下按粒径大小分层填充砾石, 上铺 0.2 m 厚表层土,

进、出水区采用穿孔板均匀布水。于湿地深 20 cm 及 60 cm 处沿程均匀设置 10 处采样点。S0、S11 分别为湿地进、出水。系统进水为该厂初沉池出水, 水质条件见表 1。系统均采用连续进水方式, 出水水位为 0.65 m 高, HRT 为 5~6 d。

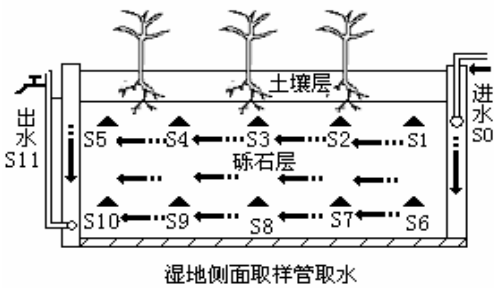


图 1 人工湿地结构示意图
Fig. 1 The construction of constructed wetlands

表 1 人工湿地原水水质
Table 1 The quality of inlet water to constructed wetlands

ρ_{DO} /(mg·L ⁻¹)	ρ_{COD} /(mg·L ⁻¹)	$\rho(NH_4^+-N)$ /(mg·L ⁻¹)	$\rho(NO_3^--N)$ /(mg·L ⁻¹)	ρ_{TN} /(mg·L ⁻¹)	ρ_{TP} /(mg·L ⁻¹)
0.2~1.0	150~300	30~68	5~12	45~90	2.5~8.2

1.2 植物栽培

为了筛选适合湿地生境、脱氮效果好的植物, 以选择根系发达、生物量大、易栽培的当地典型多年生水生或湿生植物为原则, 各湿地分别栽培空心菜 *Ipomoea aquatica forsk*、芦苇 *Phragmites communis trin*、茶花 *Camellia japonica*、美人蕉 *Canna*

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278016)
作者简介: 黄娟(1980 年生), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为水污染控制及水处理技术。E-mail: seu070703@163.com
收稿日期: 2009-02-11

generalis 和富贵竹 *Dracaena sanderiana*, 并与空白湿地相对照, 各植物自栽种以来均生长良好。试验考察了各植物完整生长周期。在此基础上, 选用美人蕉、芦苇作为栽培植物, 进一步考察了种植密度等因素对湿地脱氮效果的影响。

1.3 分析检测方法

COD、TN、氨氮等指标均采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版) 中标准方法测定。光合及蒸腾作用采用 LI-6400 型便携式光合作用测定仪测定, 开放式气路, 光强、温度、 CO_2 浓度与室外同步, 在野外非离子条件下直接测定植物净光合速率 P_n , 蒸腾速率 T_r 等生理指标。测定过程中, 分别选取不同叶龄叶片测定后取均值。

2 结果与分析

2.1 植物类型对脱氮效果的影响

试验考察了各湿地于 2004 年每月平均脱氮效果, 如图 2 所示。

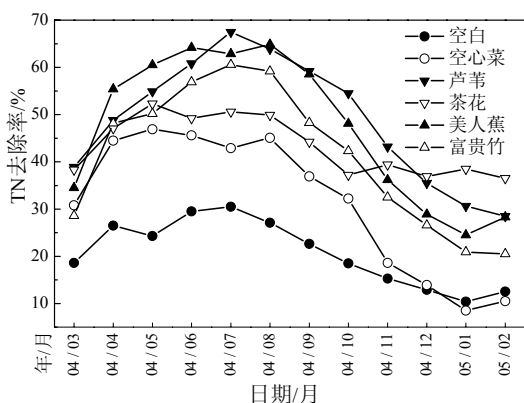


图 2 不同植物湿地的 TN 去除效果

Fig. 2 TN removal efficiency in wetlands with different plants

各植物湿地 TN 去除率均明显高于空白湿地, 可见植物在湿地脱氮中发挥了重要作用。分析认为, 植物本身会吸收利用各种形态的氮, 尤其是无机氮, 作为营养源; 另外, 植物庞大的根系表面附着大量微生物, 并因根系输氧作用, 创造了利于好氧反应的微环境, 促进硝化作用顺利进行。

比较各植物湿地的 TN 去除效果发现, 芦苇和美人蕉湿地 TN 去除率略高于其它各湿地; 富贵竹湿地在春、夏季节具有较高的脱氮水平, 但入秋后迅速枯败, 去除率下降, 植物不能越冬; 茶花湿地虽然在夏季的 TN 去除率低于芦苇、美人蕉和富贵竹湿地, 但在冬季低温域运行稳定, TN 去除率最低仍达 36.5%; 作为水生蔬菜类的空心菜在春、夏季节 TN 去除较稳定, 但秋冬明显下降, 甚至低于空白湿地, 可能是部分残留根系腐烂, 向水体释放腐殖质的缘故。由此优选出芦苇、美人蕉作为以脱

氮为目标的湿地植物。

此外, 由图 2 还可看出, 春、夏季节植物旺盛生长, 湿地 TN 去除率普遍较高; 秋、冬季节植物枯败, TN 去除率普遍降低, 尤其冬季湿地脱氮效果得不到保障。以美人蕉和茶花湿地为例, 美人蕉在春季大量繁殖, 生物量成倍增长, 对各种形态氮的需求量较大, 因此系统总氮去除率较高; 而茶花属多年生草本植物, 耐寒, 冬季打蕾, 一月正值花期, 故冬季仍能保持较高的 TN 去除率。可见植物的生长周期对湿地脱氮效果影响显著。

2.2 植物种植对脱氮效果的影响

以富贵竹湿地为例, 考察了植物种植初期系统 NH_4^+-N 去除率的变化情况, 如图 3 所示。

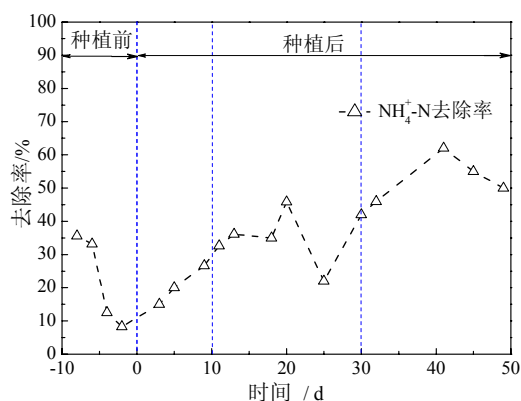


图 3 植物种植前后 NH_4^+-N 去除率变化曲线

Fig. 3 NH_4^+-N removal efficiency fore-and-aft plant cultivating

由图可看出, 富贵竹种植前, 湿地 NH_4^+-N 去除率大幅降低, 这是由于前期试验中枯败的富贵竹未及时移除, 重新向土壤中释放氮素所造成。种植后, NH_4^+-N 去除率迅速提高, 这是由于刚移植的植物会大量吸收介质中无机氮盐等营养物质。20 d 后, NH_4^+-N 去除率略有下降, 随之又出现第 2 次升高, 这是因为随着植物根系的深入和硝化细菌的大量繁殖, 微生物同化、降解作用增强, NH_4^+-N 去除率出现了第 2 次高峰, 最后趋于稳定。

分析可知, 植物种植后, 湿地脱氮经历了种植初期的不稳定阶段、植物生长稳定和根系微生物 (主要为硝化细菌) 大量繁殖阶段。

2.3 植物收割对脱氮效果的影响

11 月芦苇湿地 TN 去除率开始低于 40%, 对两组芦苇床湿地进行植物收割, 其中一组仅收割地上茎叶 (1 号), 另一组彻底清除根系 (2 号), 还有一组芦苇湿地维持原状 (3 号), 在这 3 种情况下对系统总氮去除率跟踪测定, 结果如图 4 所示。

由图 4 可见, 3 组芦苇湿地收割前脱氮效果相差不多。收割初期, 3 号脱氮效果最佳, 其次为 1

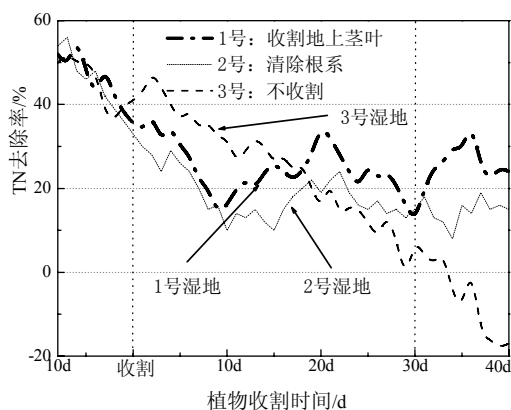


图4 植物收割对TN去除率的影响

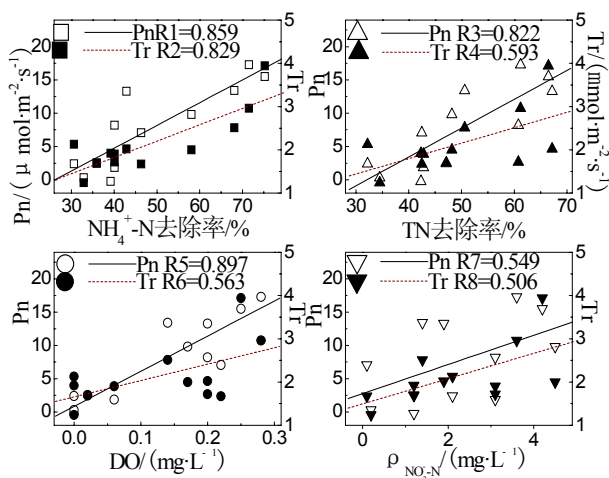
Fig. 4 TN removal efficiency fore-and-aft plant harvesting

号, 2号最差。这是由于茎叶收割后, 植物光合产氧和蒸腾作用受到破坏, 根系氧环境改变, 故TN去除率有所下降; 2号湿地植物根系受到破坏, 除了破坏氧环境外, 根系表面附着的大量硝化菌生长环境遭到破坏, 致使TN去除率迅速下降; 3号湿地则由于温度原因而略有下降。收割20~30d后1号湿地脱氮效果出现回升, 分析认为, 虽然地上茎叶受到破坏, 但对根系附着微生物影响不大, 根系附近形成新的微环境; 2号稳定后相当于空白湿地, 而3号总氮去除率急剧下降, 由于植物茎叶大量腐烂, 重新向系统释放腐殖质, 甚至使出水总氮去除率出现负值。

2.4 植物光合、蒸腾特性对脱氮效果的影响

考察了7—9月间芦苇净光合速率 P_n ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率 Tr ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)与系统TN、 NH_4^+-N 去除率、出水 NO_3^--N 含量及系统溶解氧最高点S3处的DO之间的相关性, 如图5所示。

微生物降解是人工湿地脱氮的主要途径, 由于

图5 P_n 、 Tr 与脱氮效果及DO的回归分析Fig. 5 Regression of P_n , Tr with DO and nitrogen removal efficiency

系统内部处于厌氧状态, 硝化作用受到抑制, 反硝化速率远远大于硝化速率, 硝态氮处于较低水平, 与 P_n 相关性不明显; DO水平是湿地脱氮的关键性因素, P_n 与DO显著正相关($R_5 = 0.897$), 说明植物光合产氧, 部分通过根系释放至根区, 有利于改善根区氧环境, 从而推动亚硝化、硝化过程, 因此与氨氮、总氮去除率也呈显著相关关系($R_1 = 0.859$, $R_3 = 0.822$)。这一结论证实了湿地植物向系统供氧能力的存在。此外, 植物光合速率越大, 说明其同化能力越强, 往往导致更高的氮生产能力。故植物净光合速率对湿地脱氮效果影响显著。

如图5所示, 芦苇蒸腾速率 Tr 与湿地出水总氮去除率、硝态氮含量和S3处DO相关性不明显, 但与氨氮去除率呈显著正相关, $R_2 = 0.829$ 。笔者认为, 这主要由于夏季植物蒸腾作用强, 一方面促进了氨氮的挥发作用, 另一方面, 随水流向植物输送的无机氮源丰富, 植物对氮的吸收作用旺盛, 有利于氨氮的去除。

2.5 植物种植密度对脱氮效果的影响

试验考察了空白湿地及美人蕉湿地在不同种植密度下DO分布状态及氮净化效果, 如表2所示。

由表可见, 湿地DO分布呈现一定的规律性: 上层明显高于中下层, 空白湿地和各美人蕉湿地下层DO呈沿程下降趋势, 但湿地上层由于植物输氧累积, DO在中部有所回升, 一般在S3取样点附近达到最高。比较各湿地发现, 美人蕉湿地DO普遍高于空白湿地, 尤其在植物根系密集的上层区域, 可见湿地植物的存在有利于改善系统溶氧水平。理论上讲, 植物输氧量与植物种植密度应呈正比关系, 美人蕉种植密度为 $49\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$ 的M2湿地中, DO最高达 $0.75\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水达 $0.16\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均高于 $25\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$ 的M1湿地。但 $64\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$ 的M3湿地中DO分布却普遍低于M2湿地, 可见种植过密对植物生长和根系供氧反而不利。笔者认为, 一定光照辐射强度下, 植物叶片生长过密, 光合产氧量存在饱和值, 且植物自身消耗量增加, 因此种植过密系统DO水平不升反降。

美人蕉湿地M3氨氮去除率最高, 达53%。分析认为, 湿地脱氮主要靠微生物硝化反硝化作用去除, 而DO是制约性因素, 因此TN去除率与DO分布水平密切相关; 对氨氮去除而言, 植物的吸收利用不可忽视, 美人蕉生长繁殖迅速, 种植越密, 无机盐同化利用越大, 氨氮去除效果越佳。

3 结论与建议

(1) 各系统中, 芦苇、美人蕉湿地脱氮效果最佳。茶花湿地低温运行稳定, 为了解决湿地越冬问题, 建议采取茶花与美人蕉(或芦苇)间种。

表 2 不同种植密度下各参数的比较
Table 2 The comparison of parameters in wetlands with different cultivating density

种植密度 (株·m ⁻²)	$\rho_{DO}/(mg\cdot L^{-1})$											TN 去除率		氨氮去除率	
	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	/%	/%	/%
空白: 0		0.26	0.25	0.22	0.18	0.15	0.13	0.10	0.08	0.04	0.02	0.02	31		36
M ₁ : 25	1.12	0.64	0.52	0.60	0.42	0.34	0.18	0.20	0.17	0.14	0.06	0.12	52		42
M ₂ : 49		0.68	0.70	0.75	0.65	0.42	0.21	0.20	0.23	0.20	0.18	0.16	58		52
M ₃ : 64		0.72	0.62	0.68	0.54	0.39	0.20	0.17	0.19	0.14	0.07	0.13	54		53

(2) 植物生长周期对湿地脱氮效果影响显著。植物收割方式对脱氮效果影响较大。秋、冬季节清除植物地上茎叶既不破坏根系表面微生态环境,又可防止茎叶腐烂向系统重新释氮。

(3) 植物净光合速率与 DO 分布、TN 和氨氮去除率显著正相关,可作为湿地植物筛选的重要指标之一,证实了植物根系释氧能力的存在;蒸腾速率与氨氮去除率显著相关。

(4) 适当增加植物种植密度,有利于提高湿地脱氮效果。但种植过密反而不利于提高溶解氧水平和 TN 去除率。此外,由于湿地前端 DO 急剧下降,故建议适当增加前端植物种植密度。

参考文献:

[1] 王全金,李丽,刘江,等.潜流人工湿地基质除氮磷效果研究[J].华东交通大学学报.2006,23(5):1-3.
WANG Quanjin, LI Li, LIU Jiang, et al. Study on nitrogen and phosphorus removal effect of substrate in subsurface constructed wetland[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(5): 1-3.

[2] 孙光,马永胜,赵冉.不同植物人工湿地对污水的净化效果[J].生态环境,2008,17(6):2192-2194.
SUN Guang, MA Yongsheng, ZHAO Ran. Purification efficiency of sewage in constructed wetlands with different plants[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2192-2194.

[3] WILLAMS J B, ZAMBRANO D, FORD M G, et al. Constructed wetlands for waste water treatment in Colombia[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 217-223.

[4] 徐光来,袁新田.人工湿地植物的作用与影响因素[J].河北农业科学,2008,12(12):63-65.
XU Guanglai, YUAN Xintian. Functions and influencing factors of macrophytes in constructed wetland[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(12): 63-65.

[5] 傅伟军,唐亚.植物在人工湿地中的作用及物种选择[J].四川环境,2005,24(6):45-49.
FU WeiJun, TANG Ya. The roles of plants in constructed wetlands and species selection[J]. Sichuan Environment, 2005, 24(6): 45-49.

[6] 梁威,吴振斌,詹发萃,等.人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J].湖泊科学,2004,16(4):312-317.
LIANG Wei, WU Zhenbin, ZHAN Facui, et al. Seasonal variation of macrophytes root-zone microorganisms and purification effect in the constructed wetland system[J]. Journal of Lake Science, 2004, 16(4):

312-317.

[7] CRISTINA S C C, ANOUK F D, ALEXANDRA M, et al. Substrate effect on bacterial communities from constructed wetlands planted with *Typha latifolia* treating industrial wastewater[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 744-753.

[8] 金卫红,付融冰,顾国维.人工湿地中植物生长特性及其对 TN 和 TP 的吸收[J].环境科学研究,2007,20(3):75-80.
JIN Weihong, FU Rongbing, GU Guowei. Plant growth characteristics and nutrient uptake from Entropic Water in constructed wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(3): 75-80.

[9] 王晟,徐祖信,李怀正,等.植物根系对垂直流人工湿地水力条件的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(4):519-524.
WANG Sheng, XU Zuxin, LI Huaizhen, et al. Effect of plant tillering and root development on hydrodynamics and wastewater purification of vertical down flow wetlands[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(4): 519-524.

[10] 李宝宏,曹文平.人工湿地植物在污水处理系统中的作用探讨[J].环境科学与管理,2007,32(9):65-67.
LI Baohong, CAO Wenping. Plants function of constructed wetlands in sewage treatment system[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(9): 65-67.

[11] 鄢璐,王世和,雒维国,等.运行条件下潜流型人工湿地溶氧状态研究[J].环境科学,2006,17(10):2009-2013.
YAN Lu, WANG Shihe, LUO Weiguo, et al. Study on the oxygen condition in subsurface flow wetlands in operation[J]. Environmental science, 2006, 17(10): 2009-2013.

[12] 徐伟伟,章北平,肖波,等.植物在人工湿地净化污水过程中的作用[J].安全与环境工程,2005,12(2):41-44.
XU Weiwei, ZHANG Beiping, XIAO Bo, et al. The functions of plant in constructed wetland for wastewater treatment[J]. Safety and Environmental Engineering, 2005, 12(2): 41-44.

[13] PANTIP K, SUWANCHAI N. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions[J]. Chemosphere, 2005, 58: 585-593.

[14] 徐大勇,徐祖信.人工湿地植物生理生态及其去污机理研究[J].安徽农业科学,2008,36(3):1144-1146.
XU Dayong, XU Xiangxin. Research on the eco-physiology characteristic and the pollutant removal mechanism of artificial wetland macrophytes[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2008, 36(3):1144-1146.

[15] DENNIS K, THAMMARAT K, HANS B. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 248-257.

Influence of plant eco-physiology characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetlands

Huang Juan, Wang Shihe, Zhong Qiushuang, Yan Lu, Liu Yang, Wang Feng

Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: Plants play an important role in nitrogen removal in constructed wetland wastewater treatment system. The research purpose was to clarify the influence of plant eco-physiology characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetland and to select out appropriate high-efficiency cold-resistance wetland plants. Therefore, feasible methods to enhance nitrogen removal effect were proposed. Based on a lot of experiments, the influence of traditional wetland plants, such as *reed* (*Phragmites communis trin.*), *canna* (*Canna generalis.*) et al., on nitrogen removal effect and dissolved oxygen distribution in different growth conditions was investigated. The influence of plant photosynthesis and transpiration characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetland was researched. Results indicated that nitrogen removal efficiency was highest in wetlands with *reed* and *canna*, while wetland with *camellia* (*Camellia japonica.*) operated stably in low temperature area. Plant net photosynthesis rate (Pn) was remarkably related with DO level, removal effect of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and transpiration rate (Tr) was related with removal effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Nitrogen removal effect could be enhanced by increasing appropriately planting density, but DO level and TN removal effect would decreased if planting too close. Nitrogen removal effect was significantly influenced by plant growth period. Besides, plant harvest way had influence too. The micro-environmental characteristics around root-zone would not be destroyed and nitrogen releasing back to system by plant decay was avoided if caudexes and leaves were harvested before winter. Because DO level decreased sharply in front-end of wetland, planting density in front-end was proposed to increase appropriately.

Key words: constructed wetland; plant; nitrogen removal; dissolved oxygen