

旁路多级人工湿地对巢湖流域南淝河水的净化效果*

马书占^{1,2}, 潘继征^{3**}, 吴晓东^{3,4}, 王青^{3,4}, 尚丽霞^{3,4}, 何延召^{3,4}, 李勇^{1,2}

(1: 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

(2: 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215011)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(4: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了削减南淝河输入巢湖的污染物, 建成南淝河旁路多级人工湿地水质净化示范工程, 包括预处理系统、垂直潜流湿地系统和水平潜流湿地系统 3 个工艺单元。2014 年 3 月至 2015 年 2 月对人工湿地各净化单元出水进行周年监测, 分析各净化单元对污染物的去除效果, 并探讨季节变化对去除效果的影响。结果显示, 旁路多级人工湿地体现较高的去除效果。对高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和总磷(TP)的总去除率分别为 70.9%、43.7%、43.5% 和 76.6%。COD_{Mn}和 TP 的平均出水浓度均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅳ类水标准, 而 NH₄⁺-N 的平均出水浓度优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 类标准。各净化单元对污染物的去除差异显著, COD_{Mn}的去除主要发生在预处理单元, 其对 COD_{Mn}削减的净化率为 65.1%; TN、NH₄⁺-N 和 TP 的去除主要发生在垂直潜流湿地单元, 其对 TN、NH₄⁺-N 和 TP 削减的净化率分别为 23.2%、27.1% 和 51.1%。不同季节, 旁路多级人工湿地对污染物去除具有一定差异, 对 COD_{Mn}和 TP 的去除率均表现为夏季>秋季>春季>冬季, 对 TN 的去除率表现为秋季>春季>夏季>冬季, 对 NH₄⁺-N 的去除率表现为秋季>夏季>春季>冬季。最后, 建议通过增加碳源和增大水力停留时间来进一步优化该工艺, 以有效提高脱氮效果。

关键词: 南淝河; 巢湖; 旁路多级人工湿地; 净化效果; 去除率

Purification efficiencies of a multi-stage bypass constructed wetland for treating polluted water from Nanfei River, Chaohu Catchment

MA Shuzhan^{1,2}, PAN Jizheng^{3**}, WU Xiaodong^{3,4}, WANG Qing^{3,4}, SHANG Lixia^{3,4}, HE Yanzhao^{3,4} & LI Yong^{1,2}

(1: School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, P.R. China)

(2: Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, P.R.China)

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

(4: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: The water purification demonstration project of a multi-stage bypass constructed wetland beside Nanfei River, including a pretreatment unit, vertical flow constructed wetland unit and horizontal flow constructed wetland unit, was built to reduce pollutants from Nanfei River into Lake Chaohu. From March 2014 to February 2015, the concentrations of the pollutants were detected from each purification unit and removal efficiencies of each constructed wetland unit were examined. The results showed that a multi-

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-003)、国家自然科学基金项目(41001324)和江苏高校水处理技术与材料协同创新中心项目联合资助。2015-05-22 收稿;2015-07-14 收修改稿。马书占(1989~),男,硕士研究生;E-mail: 18913190459@163.com.

** 通信作者;E-mail: jzhpan@niglas.ac.cn.

stage bypass constructed wetland reflected a higher removal efficiency. The total removal rates of COD_{Mn} , total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and total phosphorus (TP) reached 70.9%, 43.7%, 43.5% and 76.6%, respectively. COD_{Mn} and TP of the effluent attained the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838—2002) IV, while $\text{NH}_4^+\text{-N}$ of the effluent meet the needs of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant Pollutant (GB 18918—2002) class 1 A. There were significant differences on the pollutant removal efficiency among different purification units, the pretreatment unit played a leading role in removing COD_{Mn} , with a 65.1% reduction for COD_{Mn} ; while TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP were degraded mainly in the vertical flow constructed wetland unit, which contributed 23.2%, 27.1% and 51.1% respectively to the total removal of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP. The removal efficiencies of the studied pollutants varied with the seasons. The removal rate of COD_{Mn} and TP decreased in sequence of summer > autumn > spring > winter, while the removal rate of TN decreased in sequence of autumn > spring > summer > winter and the removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was in the order of autumn > summer > spring > winter. Finally, in order to improve the denitrification efficiency recommended by adding carbon source and increasing the hydraulic retention time to further optimize the process.

Keywords: Nanfei River; Lake Chaohu; constructed wetland; purification efficiencies; removal rate

巢湖污染问题由来已久. 调查显示巢湖外源污染占 98%, 且绝大部分的外源污染来自入湖河流^[1]. 南淝河是巢湖入湖河流中污染量最大的河流, 水质状况为劣 V 类, 属重度污染, 因此削减南淝河入湖污染物是改善巢湖水质的必要措施^[2]. 由于人工湿地技术具有运行费用低、维护管理简单和对周边环境影响小等优点^[3-5], 因此被广泛用于处理受污染的水体^[6-8]. 采用人工湿地技术净化污染河水的研究也已经成为国内外研究的热点^[9-10]. 如 Jing 等^[11]采用人工湿地净化污染河水时, 发现氨氮的去除效果受季节影响显著; Zheng 等^[12]的研究发现, 在低水力负荷条件下, 水平潜流湿地对重污染河水的去除效果更好, 且秋季是污染物去除的最佳季节; 潘继征等^[13]的研究还发现垂直流湿地单元对污染物的去除效果明显高于水平流湿地单元. 近年来对人工湿地的研究更趋向于复合人工湿地工艺^[14-17], 通过不同类型湿地的组合弥补单一湿地类型的局限, 提高湿地系统的去除效果及其稳定性. 研究表明^[18-19], 复合人工湿地对污染河水的去除有更好的效果. 此外, 人工湿地的净化效果也会因其所建地的不同而表现出差异^[20-22]. 因此, 针对污染河水水质状况易波动和沿岸地理环境相对复杂等特点, 采用复合人工湿地能更有效地达到净化污染河水水质的目的.

综上所述, 为了有效的削减南淝河入湖污染物, 于 2013 年建成“南淝河旁路多级人工湿地水质净化示范工程”. 旁路多级人工湿地 (multi-stage bypass constructed wetland) 是复合人工湿地的一种新形式, 指在河道堤岸带现有洼地、沟渠或池塘等天然地形的基础上构建的具有多级净化单元的人工湿地生态系统. 本文以南淝河旁路多级人工湿地为研究对象, 通过现场实验对人工湿地各净化单元的污染物去除效果进行分析, 并着重探讨季节变化对去除效果的影响, 以期为人造湿地工艺进一步优化提供参考.

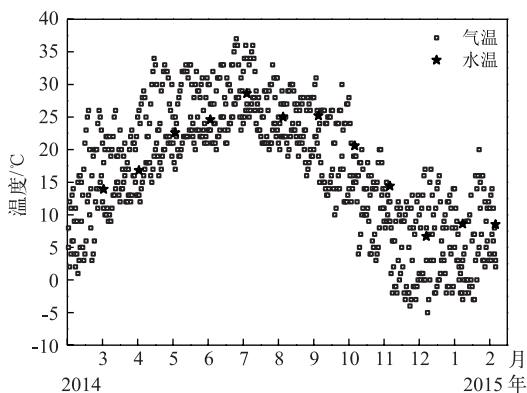


图 1 2014 年 3 月至 2015 年 2 月
人工湿地气温和水温变化

Fig. 1 Variations of air and water temperatures in the constructed wetlands from March 2014 to February 2015

1 材料与方法

1.1 工程背景

南淝河 (31°42'55"~31°43'19"N, 117°23'21"~117°23'38"E) 旁路多级人工湿地位于南淝河西侧的合肥市滨湖湿地森林公园东南, 该工程利用森林公园中已有的沟渠、池塘系统构建多级人工湿地生态系统.

于 2014 年 3 月至 2015 年 2 月, 对人工湿地的水温和气温进行观测 (图 1). 人工湿地平均气温为 23.1°C, 最低气温为 6.0°C, 最高气温为 29.0°C; 平均水温为 23.1°C, 最低水温为 6.7°C, 最高水温为 28.6°C.

旁路多级人工湿地主要包括预处理系统 (沉砂池+混凝沉淀池+氧化塘)、垂直潜流湿地系统、水平

潜流湿地系统 3 个部分(图 2). 本研究将沉砂池、混凝沉淀池和氧化塘合并作为预处理系统, 设计处理水量为 $20000 \text{ m}^3/\text{d}$. 预处理系统占地面积 3800 m^2 , 其中沉砂池占地面积 1200 m^2 , 混凝沉淀池占地面积 200 m^2 , 氧化塘占地面积 2400 m^2 . 垂直潜流湿地系统和水平潜流湿地系统设计处理水量为 $600 \sim 1200 \text{ m}^3/\text{d}$, 占地面积 1750 m^2 . 其中, 垂直潜流湿地系统占地面积 600 m^2 , 水平潜流湿地系统占地面积 1150 m^2 .

垂直潜流湿地系统和水平潜流湿地系统均采用孔隙率为 37%、粒径为 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 的钙质公分石填料. 由于钙质公分石填料具有价格便宜、来源广泛、能维持中性环境及为反硝化反应提供碳源等优点, 因此在人工湿地系统中被广泛应用^[23-24].

1.2 系统设计与工艺流程

1.2.1 预处理系统 预处理系统包括沉砂池、混凝沉淀池和氧化塘 3 个单元, 理论水力停留时间分别为 2.30、1.20 和 7.24 h.

1.2.2 垂直潜流湿地系统 垂直潜流湿地系统分为 2 个单元, 尺寸为 $20 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 水力负荷为 $1.00 \sim 2.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 理论水力停留时间为 10.26 h. 垂直潜流湿地种植芦苇(*Phragmites communis* Trin)、菖蒲(*Acorus calamas*) 和西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*).

1.2.3 水平潜流湿地系统 水平潜流湿地系统分为 2 个单元, 尺寸为 $25 \text{ m} \times 23 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$, 水力负荷为 $0.52 \sim 1.04 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 理论水力停留时间为 11.10 h. 水平潜流湿地种植芦苇、香蒲(*Typha orientalis*) 和西伯利亚鸢尾.

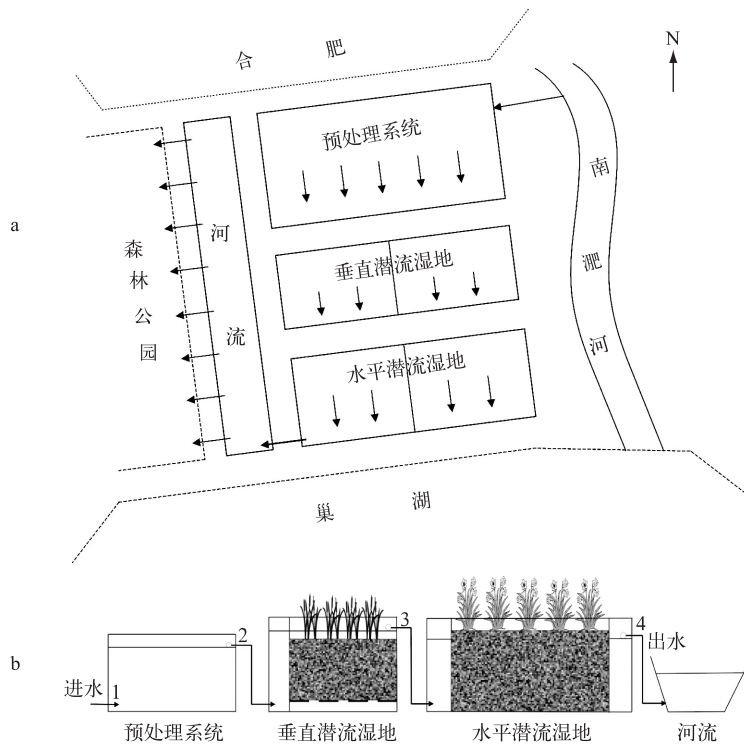


图 2 人工湿地示意图(a: 平面示意图;b: 工艺流程图)

Fig.2 Schematic diagram of the constructed wetland (a: sketch map; b: flow diagram)

1.3 运行管理方式

旁路多级人工湿地于 2013 年 4 月建成, 运行及监测管理时间自 2014 年 3 月至 2015 年 2 月, 为期 1 年. 运行期间逐月取样, 其中春季为 2014 年 3—5 月, 夏季为 2014 年 6—8 月, 秋季为 2014 年 9—11 月, 冬季为 2014 年 12 月至 2015 年 2 月. 采样点设置: 1-南淝河进水, 2-预处理系统出水, 3-垂直潜流湿地出水, 4-水平潜流湿地出水(图 2).

1.4 水质分析方法

主要监测指标包括高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)和溶解氧(DO)浓度等,指标参照《水和废水监测分析方法》^[25]进行监测。

1.5 统计方法

本文采用 Excel 2013 软件对数据进行平均值和标准偏差的计算;采用 SPSS 20.0 软件中的 LSD 法进行不同参数之间的方差分析。

表 1 进水水质状况

Tab.1 The inflow water quality

水质指标	范围	均值
COD _{Mn} /(mg/L)	9.64 ~ 28.14	18.84 ± 7.03
TP/(mg/L)	0.38 ~ 0.73	0.54 ± 0.13
TN/(mg/L)	5.76 ~ 15.82	10.64 ± 3.23
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	2.96 ~ 8.59	5.35 ± 1.94
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.37 ~ 8.85	4.81 ± 4.12
NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.04 ~ 0.33	0.20 ± 0.15

1.6 进水水质

旁路多级人工湿地进水水质如表 1 所示. 进出水的水质分析数据采用平均值±标准偏差等进行统计。

2 结果与讨论

2.1 旁路多级人工湿地对 COD_{Mn}的削减效果

旁路多级人工湿地对 COD_{Mn}具有良好的去除效果,春季、夏季、秋季和冬季平均去除率分别达到 67.2%、70.9%、68.4%和 25.9%,COD_{Mn}平均出水浓度分别为 7.30±2.07、7.61±2.23、5.83±1.03 和 7.22±0.23 mg/L(图 3)。从 COD_{Mn}平均去除率来看,不同季节之间存在一定差异,其中冬季与其他季节之间差异极显著(P<0.01),春季与夏季之间差异显著(P<0.05),而秋季与春、夏季之间没有显著差异(P>0.05)。从总体趋势来看,不同季节对 COD_{Mn}的去除能力表现为夏季>秋季>春季>冬季,冬季去除率下降尤为明显,这是因为冬季温度较低(图 1),影响湿地微生物的活性,加上植物枯萎被收割等原因导致处理效果下降,这与聂志丹等^[26]的研究结果一致。

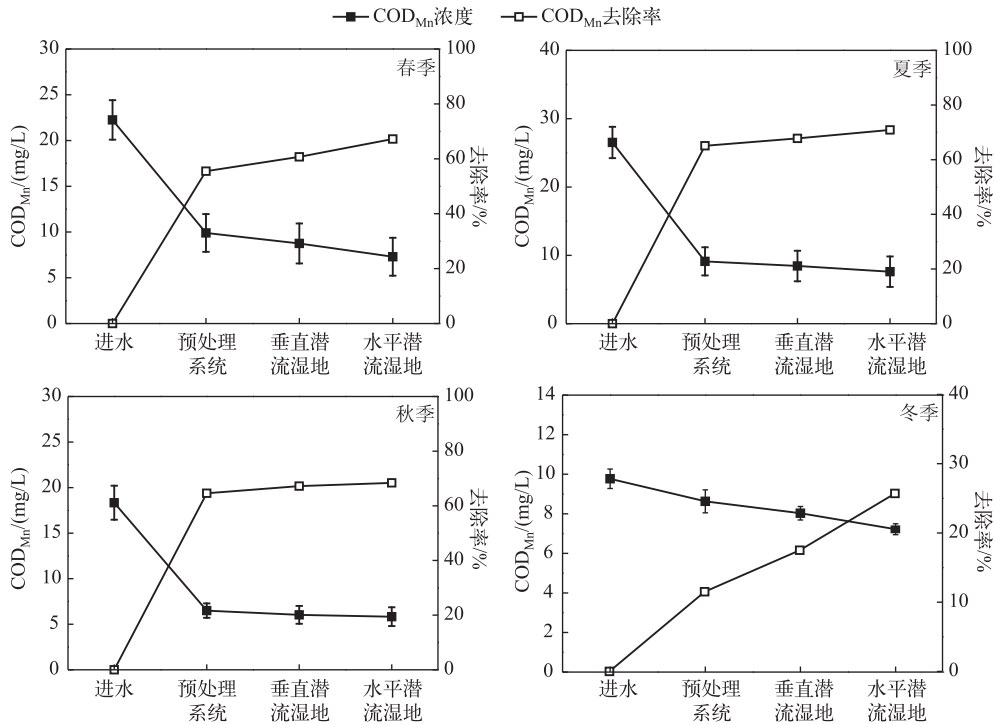


图 3 不同季节工艺流程各单元对 COD_{Mn}去除的贡献

Fig.3 Contributions of various elements of the technical process to the COD_{Mn} removal rate in different seasons

旁路多级人工湿地各净化单元对 COD_{Mn} 的去除率差异显著 ($P < 0.05$), 且去除主要发生在预处理单元. 春、夏、秋和冬季预处理单元对 COD_{Mn} 削减的净化率分别为 55.5%、65.1%、64.6% 和 11.5%, 而垂直潜流湿地单元和水平潜流湿地单元的贡献率则不足 10%, 说明大部分有机物是通过预处理单元的沉淀作用而去除, 这也反映出预处理单元存在以沉淀为主的净化机制, 从预处理系统各单元的理论水力停留时间同样说明这一点, 这与潘继征等^[13]的研究结果相似. 从周年运行情况来看, 系统 COD_{Mn} 平均出水浓度低于 7 mg/L, 优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水标准(10 mg/L).

2.2 旁路多级人工湿地对氮的削减效果

2.2.1 旁路多级人工湿地对 TN 的削减效果 人工湿地对 TN 的去除主要通过硝化作用、反硝化作用、植物摄取和介质吸附等方面^[27-28], 其中, 反硝化作用才最终将氮从污水中去除^[29].

旁路多级人工湿地对 TN 的去除效果较好(图 4), 春、夏、秋和冬季 TN 平均去除率分别达到 30.1%、27.0%、43.7% 和 15.9%, TN 平均出水浓度分别为 6.33 ± 1.12 、 5.52 ± 2.27 、 6.01 ± 0.59 和 12.81 ± 1.78 mg/L. 从 TN 平均去除率来看, 秋季与冬季差异显著 ($P < 0.05$), 而春、夏季与冬季没有显著差异 ($P > 0.05$). 处理系统在冬季对 TN 的去除率比其他 3 个季节低 10%~20% (图 4). 有研究表明^[17,30], 温度变化会直接影响氨化、硝化和反硝化微生物的活性, 从而影响 TN 的去除, 春季、夏季和秋季处理系统平均水温在 20℃ 以上, 冬季平均水温低于 10℃ (图 1), 显然, 温度的变化直接影响系统对 TN 的去除率, 这与钟成华等^[31]的研究结果相似.

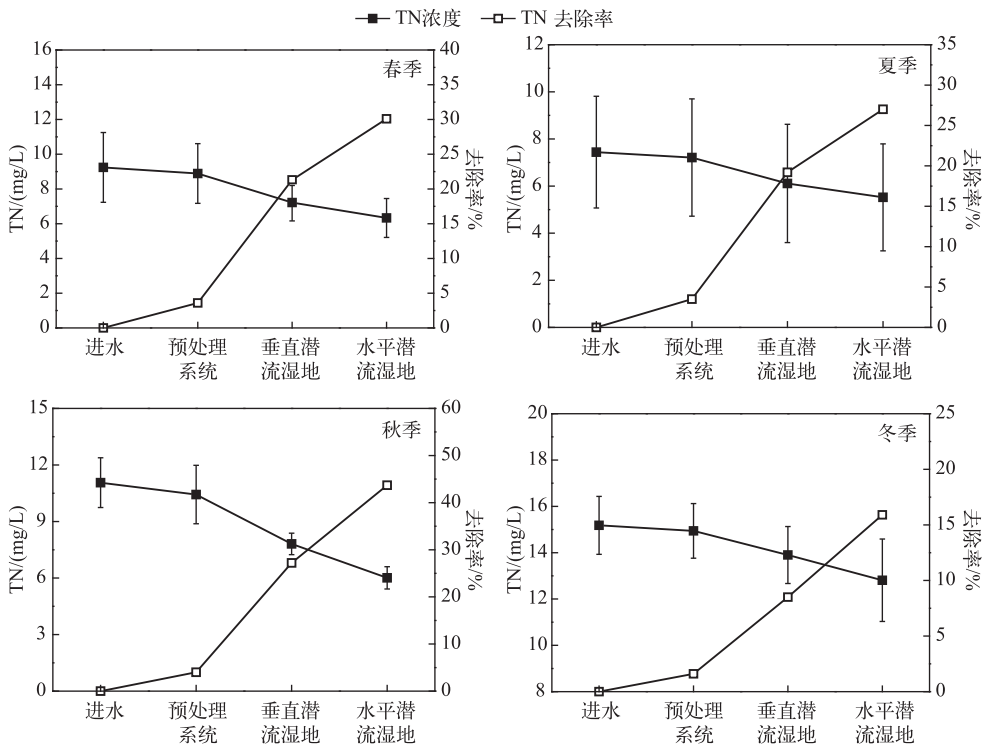


图 4 不同季节工艺流程各单元对 TN 去除的贡献

Fig.4 Contributions of various elements of the technical process to the TN removal rate in different seasons

旁路多级人工湿地各净化单元对 TN 的去除率不高且差异显著 ($P < 0.05$) (图 4). 通过分析处理系统中的碳氮比 (C/N) 发现, 碳源不足 (图 5) 是造成 TN 去除率不高的主要原因之一, 虽然在运行期间已对水平潜流湿地进行人工补充碳源 (秸秆) 和在秋、冬季植物凋落后补充一定的碳源, 有研究表明^[32], 增加碳源能有效提高湿地对 TN 的去除效果; 通过对处理系统中的 DO 浓度分析发现, 系统内 DO 浓度过高 (图 6), 难以形成反硝化进行的缺氧或厌氧状态, 氧的存在抑制反硝化作用^[28], 这是造成 TN 去除率不高的另一原因; 此

外,由前文可知,本处理系统理论水力停留时间均过短,导致生化反应不够充分,这也是造成 TN 去除率不高的原因之一,周志强等^[17]的研究发现,合理增加水力停留时间可提高 TN 的去除效果. TN 主要在垂直潜流湿地单元中去除,春季、夏季、秋季和冬季对 TN 削减的净化率分别为 17.7%、15.7%、23.2%和 6.9% (图 4).

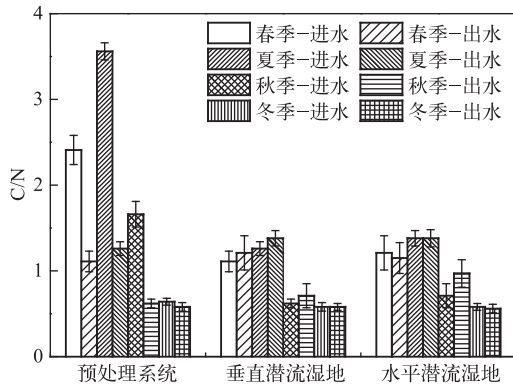


图 5 不同季节工艺流程各单元进出水 C/N 值变化

Fig.5 Variations of C/N in inflow and outflow from various elements of the technical process in different seasons

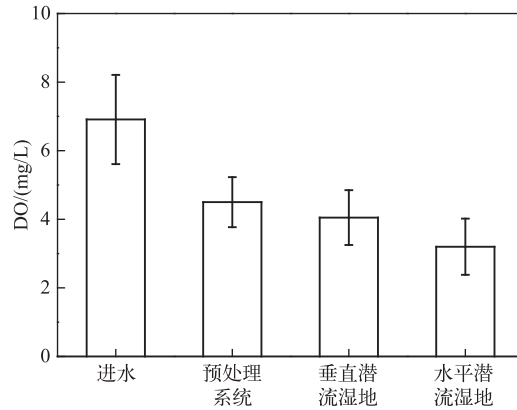


图 6 工艺流程各单元出水 DO 浓度变化

Fig.6 Variations of DO concentration in outflow from various elements of the technical process

2.2.2 旁路多级人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的削减效果 人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除由氨化作用和硝化作用共同决定,其影响因素较为复杂,这是人工湿地研究的热点^[33-35].

旁路多级人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果稍好于 TN (图 7),春季、夏季、秋季和冬季对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别达到 36.0%、36.9%、43.7%和 31.6%;平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 3.31 ± 0.42 、 3.53 ± 2.17 、 3.84 ± 2.57 和 3.07 ± 0.27 mg/L. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TN 去除率变化规律相似,夏季最高、冬季最低,秋季与冬季差异显著 ($P < 0.05$).

旁路多级人工湿地各净化单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率差异显著 ($P < 0.05$),但预处理单元与水平潜流湿地单元差异不显著 ($P > 0.05$). 夏、秋季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率稍高于春、冬季,通过分析处理系统中水温发现,温度是限制春、冬季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率不高的原因之一(图 7),有研究表明^[36],温度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率呈显著正相关. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要在垂直潜流湿地单元,该单元春季、夏季、秋季和冬季对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 削减的净化率分别为 20.7%、27.1%、25.3%和 17.0%. 从周年运行情况来看,系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水平均浓度在 4 mg/L 以下,优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 类标准(5 mg/L).

2.3 旁路多级人工湿地对 TP 的削减效果

人工湿地对 TP 的去除主要通过吸附和沉淀、微生物吸收和过量积累及植物吸收等几方面共同作用^[37-39],其中介质之间的非生物作用^[40]是主要作用.

旁路多级人工湿地对 TP 具有较好的去除效果(图 8),春季、夏季、秋季和冬季对 TP 的平均去除率分别达到 45.6%、76.6%、65.8%和 36.6%,平均出水 TP 浓度分别为 0.29 ± 0.01 、 0.11 ± 0.01 、 0.13 ± 0.01 和 0.36 ± 0.10 mg/L. 对 TP 平均去除率而言,不同季节差异显著 ($P < 0.05$),说明 TP 的去除受季节性变化影响较大,这与周志强等^[17]对皂河的研究结果相矛盾.

旁路多级人工湿地各净化单元对 TP 的去除率较高且差异显著 ($P < 0.05$),但预处理单元与水平潜流湿地单元没有显著差异 ($P > 0.05$). TP 去除率相对较高可能与所选用的基质(钙质公分石)有关,有研究表明^[41],选择合适的基质能有效提高 TP 的去除率. TP 去除主要在垂直潜流湿地单元,该单元春季、夏季、秋季和冬季对 TP 削减的净化率分别为 28.7%、51.1%、28.9%和 12.8%(图 8). 从周年运行情况来看,系统 TP 平均出水浓度小于 0.3 mg/L,优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 IV 类水标准(0.3 mg/L).

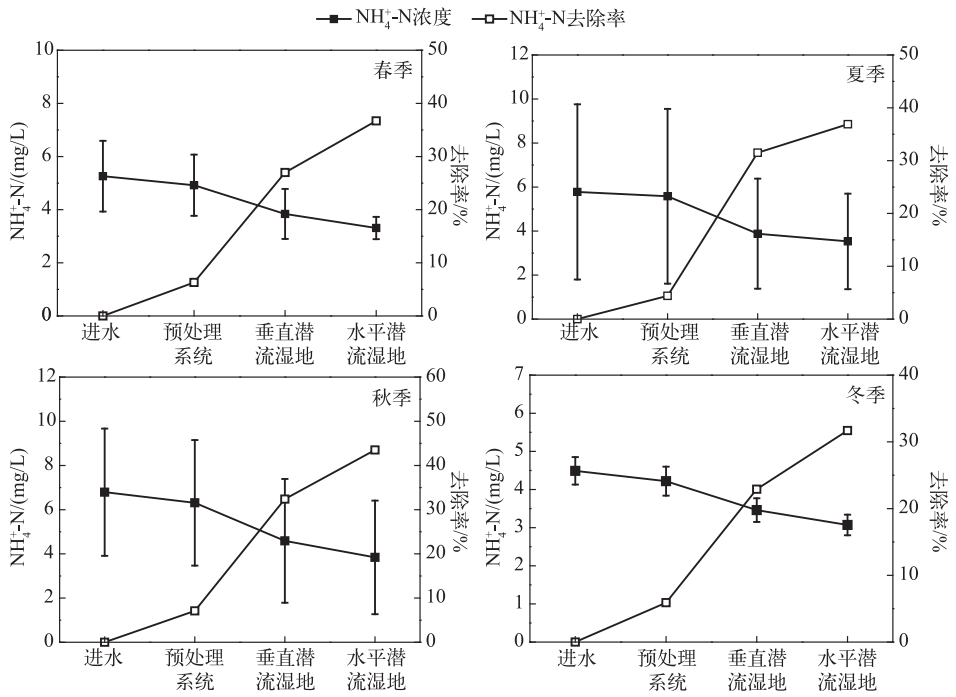


图7 不同季节工艺流程各单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的贡献

Fig.7 Contributions of various elements of the technical process to the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal rate in different seasons

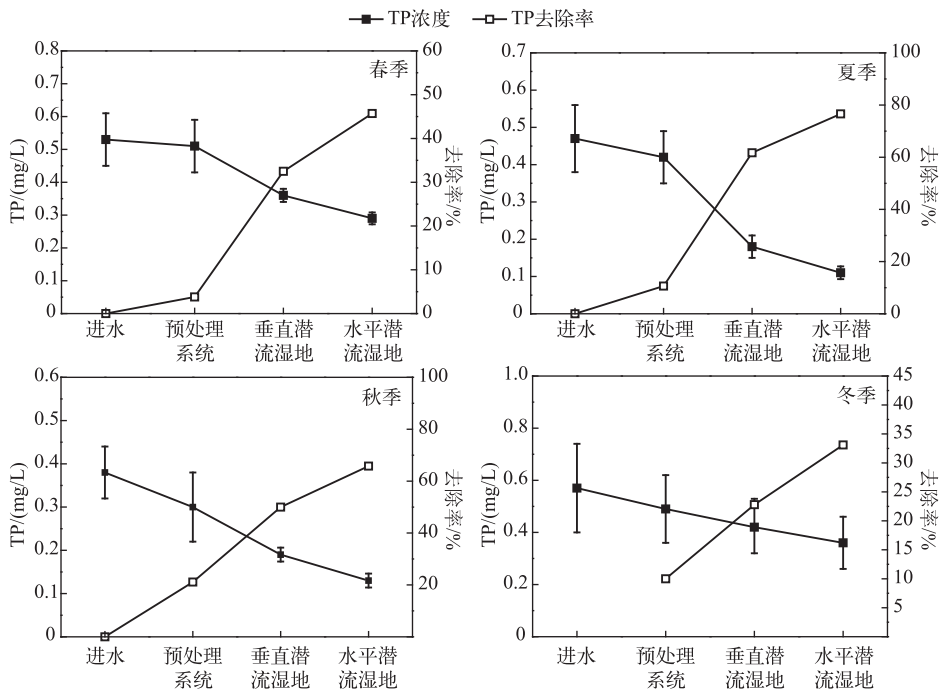


图8 不同季节工艺流程各单元对 TP 去除的贡献

Fig.8 Contributions of various elements of the technical process to the TP removal rate in different seasons

2.4 工艺优化建议

通过对南淝河旁路多级人工湿地周年运行数据分析得知,该人工湿地对 COD_{Mn} 和 TP 的去除效果较好,而脱氮(TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)效果较差. 对于脱氮效果不明显,分析得出的原因主要是碳源不足和水力停留时间过短. 对污染河水而言,针对碳源不足和水力停留时间过短现象,已有研究表明^[17,32,42],合理增加碳源和水力停留时间能有效提高脱氮效果. 因此,本工艺进一步优化可从碳源和水力停留时间两个角度着手,建议通过进一步增加碳源和水力停留时间来优化该处理工艺,以达到有效提高脱氮效果的目的.

3 结论

1) 在进水水量为 $600\sim 1200\text{ m}^3/\text{d}$ 的条件下,旁路多级人工湿地表现出了较强的缓冲调节能力和较高的去除效果,出水稳定. 旁路多级人工湿地对 COD_{Mn} 、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 等污染物的去除率分别为 70.9%、43.7%、43.5% 和 76.6%. COD_{Mn} 和 TP 平均出水浓度均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 IV 类水标准; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均出水浓度优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 类标准.

2) 旁路多级人工湿地各净化单元对污染物的去除效果差异显著, COD_{Mn} 的去除主要在预处理单元,其对 COD_{Mn} 削减的净化率为 65.1%;TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除主要发生在垂直潜流湿地单元,其对 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 削减的净化率分别为 23.2%、27.1% 和 51.1%.

3) 不同季节,旁路多级人工湿地对污染物的去除效果差异显著. 其中,对 COD_{Mn} 和 TP 的去除率均表现为夏季>秋季>春季>冬季,对 TN 的去除率表现为秋季>春季>夏季>冬季,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率表现为秋季>夏季>春季>冬季.

4 参考文献

- [1] 殷福才, 张之源. 巢湖富营养化研究进展. 湖泊科学, 2003, 15(4): 377-384. DOI 10.18307/2003.0413.
- [2] 刘恩生, 王 辉, 欧俊海等. 南淝河旁路人工湿地不同处理单元的浮游植物变化. 水生生态学杂志, 2015, 36(1): 19-24.
- [3] Bhamidimarri R, Shilton A, Armstrong I *et al.* Constructed wetlands for wastewater treatment: the New Zealand experience. *Water Science and Technology*, 1991, 24(5): 247-253.
- [4] Greenway M. Suitability of macrophytes for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia. *Water Science and Technology*, 2003, 48(2): 121-128.
- [5] 朱 彤, 许振成, 胡康萍等. 人工湿地污水处理系统应用研究. 环境科学研究, 1991, 4(5): 17-22.
- [6] Babatunde A, Zhao Y, O'neill M *et al.* Constructed wetlands for environmental pollution control: a review of developments, research and practice in Ireland. *Environment International*, 2008, 34(1): 116-126.
- [7] Cooper P. What can we learn from old wetlands? Lessons that have been learned and some that may have been forgotten over the past 20 years. *Desalination*, 2009, 246(1): 11-26.
- [8] 杨长明, 马 锐, 山城幸等. 组合人工湿地对城镇污水处理厂尾水中有机物的去除特征研究. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1804-1810.
- [9] 赵 建, 朱 伟, 赵联芳. 人工湿地对城市污染河水的净化效果及机理. 湖泊科学, 2007, 19(1): 32-38. DOI 10.18307/2007.0105.
- [10] 郑于聪, 王晓昌, 葛 媛等. 不同复合人工湿地对高污染河流有机污染物的去除. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2577-2581.
- [11] Jing S, Lin Y. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan. *Environmental Pollution*, 2004, 127(2): 291-301.
- [12] Zheng YC, Wang XC, Xiong JQ *et al.* Hybrid constructed wetlands for highly polluted river water treatment and comparison of surface-and subsurface-flow cells. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(4): 749-756.
- [13] 潘继征, 李文朝, 李海英等. 人工增氧型复合湿地污染物净化效果. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 482-486.
- [14] 吴英海, 杨旭楠, 韩 蕊等. 复合人工湿地对氮的深度处理效果及影响因素. 湿地科学, 2014, 12(1): 35-42.
- [15] 熊家晴, 刘华印, 刘永军等. 复合人工湿地处理受污染河水中试研究. 水处理技术, 2012, 12(12): 82-84.

- [16] 余志敏,袁晓燕,崔理华等.复合人工湿地对城市受污染河水的净化效果.环境工程学报,2010,4(4):741-745.
- [17] 周志强,王晓昌,郑于聪等.复合人工湿地对高污染性河流营养物的去除.环境工程学报,2013,7(11):4161-4166.
- [18] 崔理华,楼倩,周显宏等.两种复合人工湿地系统对东莞运河污水的净化效果.生态环境学报,2009,18(5):1688-1692.
- [19] 阮晓红,吴建强,孙敏.潜流及复合流人工湿地净化污染河水的效能分析.中国给水排水,2007,23(11):17-20.
- [20] 吴建强,黄沈发,阮晓红.江苏新沂河河漫滩表面流人工湿地对污染河水的净化试验.湖泊科学,2006,18(3):238-242. DOI 10.18307/2006.0307.
- [21] 谢伟丹,谢飞,黄磊等.芦竹潜流人工湿地对微污染河水的净化效果.中国给水排水,2012,28(21):69-71.
- [22] 阳小成.成都活水公园人工湿地对锦江河水年度净化效果的研究.成都理工大学学报,2008,35(5):591-596.
- [23] Bezbaruah A, Zhang T. Performance of a constructed wetland with a sulfur/limestone denitrification section for wastewater nitrogen removal. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(8): 1690-1697.
- [24] Vohla C, Kóiv M, Bavor H *et al.* Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecological Engineering*, 2011, 37(1): 70-89.
- [25] 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:第4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [26] 聂志丹,牟跃刚,李林锋等.水力负荷及季节变化对人工湿地处理效率的影响.给水排水,2007,32(11):28-31.
- [27] 付融冰,杨海真,顾国维等.人工湿地基质微生物状况与净化效果相关分析.环境科学研究,2006,18(6):44-49.
- [28] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理.生态学报,2006,26(8):2670-2677.
- [29] 项学敏,杨洪涛,周集体等.人工湿地对城市生活污水的深度净化效果研究:冬季和夏季对比.环境科学,2009,30(3):713-719.
- [30] 张荣社,李广贺,周琪等.潜流人工湿地负荷变化对脱氮效果的影响研究.环境科学,2006,27(2):253-256.
- [31] 钟成华,李杰,邓春光.人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究.重庆建筑大学学报,2008,30(4):141-146.
- [32] 赵联芳,朱伟,赵建.人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理.环境科学学报,2006,26(11):1821-1827.
- [33] Dierberg F, Debusk T, Jackson S *et al.* Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading. *Water Research*, 2002, 36(6): 1409-1422.
- [34] 黄娟,王世和,鄢璐等.潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究.环境科学,2007,28(9):1965-1969.
- [35] 张军,周琪,何蓉.表面流人工湿地中氮磷的去除机理.生态环境,2004,13(1):98-101.
- [36] 谢飞,黄磊,高旭等.潜流人工湿地对微污染河水的净化效果.环境工程学报,2013,7(1):65-71.
- [37] 郭本华,汤华崇,宋志文等.人工湿地的净化机理及对氮磷的去除效果.污染防治技术,2003,16(4):119-121.
- [38] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的磷去除机理.生态环境,2006,15(2):391-396.
- [39] 宋志文,王仁卿,席俊秀等.人工湿地对氮、磷的去除效率与动态特征.生态学杂志,2005,24(6):648-651.
- [40] 刘佳,孙浩诚,李亚峰等.垂直流人工湿地在北方地区的应用.工业用水与废水,2006,37(4):20-22.
- [41] Sakadevan K, Bavor H. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research*, 1998, 32(2): 393-399.
- [42] 余志敏,袁晓燕,刘胜利等.水力条件对复合人工湿地处理城市受污染河水效果的影响.环境工程学报,2011,5(4):757-762.