农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

**风车草对低污染水体氮磷的净化效能**

张云潇， 徐佳敏， 卢少勇， 李锋民， 张亚茹， 王永强， 刘晓晖

引用本文:
张云潇, 徐佳敏, 卢少勇, 等. 风车草对低污染水体氮磷的净化效能[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 735-745.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0074

---

张云潇，徐佳敏，卢少勇，等. 风车草对低污染水体氮磷的净化效能[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 735-745.
ZHANG Y X, XU J M, LU S Y, et al. Purification effect of *Cyperus alternifolius* L. on low-polluted water[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 735-745.

开放科学 OSID

# 风车草对低污染水体氮磷的净化效能

张云潇[1,2]，徐佳敏[2]，卢少勇[2*]，李锋民[1]，张亚茹[2]，王永强[2,3]，刘晓晖[2,4]

(1.中国海洋大学环境科学与工程学院，近海环境污染控制研究所，山东 青岛 266100；2.湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室，国家环境保护洞庭湖科学观测研究站，国家环境保护湖泊污染控制重点实验室，湖泊生态环境研究所，中国环境科学研究院，北京 100012；3.哈尔滨工业大学环境学院，哈尔滨 150090；4.清华大学环境学院，北京 100084)

**摘 要：**为探讨湿地水生植物对低污染水体中氮磷的去除效果，以挺水植物风车草为研究对象，研究其对低污染水中氮、磷削减的日变化规律，及温度对净化效果的影响，并探究了系统中溶解性有机物的变化。结果表明：风车草对低污染水的氮、磷去除过程符合一级动力学方程，常温下(24~30 ℃)对TN、TP去除的一阶反应速率常数分别为0.449 3、0.502 8，70 h后对TN、TP的去除率高达82.87%、72.40%，日变化率分别为48.52%、40.31%，而低温(4~8 ℃)下风车草对氮、磷的去除效果明显受到抑制且根系活力显著降低；系统中溶解性有机物组分(紫外类腐植酸和类色氨酸)含量随时间延长而增加，相关性分析表明二者均利于水中氮磷的去除。研究表明，风车草对低污染水体中氮磷具有较好的净化效果，且其净化效能受温度的影响。

**关键词：**低污染水；风车草；温度；降解动力学；日变化率

**中图分类号：**X52；X173 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-6819(2021)05-0735-11 **doi:** 10.13254/j.jare.2021.0074

## Purification effect of *Cyperus alternifolius* L. on low-polluted water

ZHANG Yunxiao[1,2], XU Jiamin[2], LU Shaoyong[2*], LI Fengmin[1], ZHANG Yaru[2], WANG Yongqiang[2,3], LIU Xiaohui[2,4]

(1. Institute of Coastal Environmental Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu, Key Laboratory of Environmental Protection Agency for Lake Pollution Control, Institute of Lake Ecological Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This study aimed to explore the removal effect of wetland aquatic plants on nitrogen and phosphorus in low-polluted water, effect of temperature, and changes of dissolved organic matter. The first-order reaction rate constants for TN and TP were 0.449 3 and 0.502 8, respectively at room temperature (24~30 ℃), and the removal rates of TN and TP were as high as 82.87% and 72.40%, respectively after 70 h. Low temperatures (4~8 ℃) significantly inhibited the removal of nitrogen and phosphorus and significantly reduced the root vigor of plants. The dissolved organic matter, including UV humic acids and tryptophan, increased with time, and correlation analysis showed that both were beneficial for the removal of nitrogen and phosphorus from water. The results showed that *Cyperus alternifolius* L. had a good purification effect on nitrogen and phosphorus in low-polluted water, and its purification efficiency was affected by temperature.

**Keywords:** low-polluted water; *Cyperus alternifolius* L.; temperature; degradation kinetics; diurnal variation

近年来，水体污染已经成为我国主要环境问题之一，外源(工业废水、生活污水、低污染水)是主要贡献者。低污染水是指水中氮磷和COD(化学需氧量)浓度达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级B排

**收稿日期：**2021-02-12 **录用日期：**2021-04-06
**作者简介：**张云潇(1996—)，女，硕士研究生，研究方向为水污染控制工程。E-mail：xyz7018@163.com
***通信作者：**卢少勇 E-mail：lushy2000@163.com
**基金项目：**国家重点研发计划项目(2018YFC0406304)；科技基础性工作专项(2015FY110900)
**Project supported:** The National Key R&D Program of China(2018YFC0406304); Ministry of Science and Technology of China(2015FY110900)

放标准，但不符合《地表水环境质量标准》V类标准的水体，主要包括城镇污水厂出水、污染河水、雨水径流、农业径流等。工业废水、生活污水等得到了相对有效管控，而农业径流、污水处理厂达标排放出水等低污染水量大面广，尚未得到有效控制，其直排会加重河湖水体污染，因此为了降低进入河湖的氮磷负荷，需对低污染水进行净化。

湿地水生植物可通过直接吸收来去除水体中的污染物。XIA等[1]发现凤眼莲吸收马拉硫磷后转移至茎叶，并在体内降解，马拉硫磷去除率提高了1.6倍。宋英伟等[2]的研究结果表明湿地中植物对污染物去除发挥了重要作用，种植植物后湿地TN（总氮）、TP（总磷）去除率分别提高了13.6%和19.5%。植物在生长中分泌的有机物是湿地中主要内在碳源，利于反硝化作用[3]，对湿地净化低污染水非常重要。此外，温度、光照强度等环境因素对湿地植物的影响不容忽视[4-5]，一天内不同时段的植物与微生物生理活性不同，这种情况下，污染物去除效果的动态变化值得探究，但实际上此方面研究较少。

风车草（*Cyperus alternifolius* L.）是湿地中常见的挺水植物，其根系发达，叶片蒸腾作用强，具有很强的污染物吸收富集能力，能促进微生物对污染物的生物降解，在污水处理方面具良好应用前景，被广泛用于垃圾渗滤液、市政污水处理。孙磊等[6]研究了4组复合湿地对低TN浓度污水的净化效果，结果表明，TN、TP去除率最高的湿地是种植风车草的潜流湿地，去除率分别为62.78%、41.89%，而种植梭鱼草的湿地对TN、TP的去除率为44.31%、30.89%，该研究通过分析微生物群落关系，发现风车草的种植改善了微生物多样性和丰度，增加了系统中不动杆菌属、假单胞菌属、芽孢杆菌属的丰度，利于脱氮除磷。而植物的去污能力常受多种环境因素影响，其中温度是一项重要因素，其不仅影响植物生长发育，且低温环境还降低了植物根系泌氧速率，从而抑制植物对污染物的去除[7]。同时，植物在去除污染物时会分泌不同种类的溶解性有机质（DOM），影响微生物种群结构和生命活动，指示植物去污能力变化。有研究表明，腐植酸作为碳源可促进同步硝化反硝化过程，进而促进总氮的去除[8]，然而色氨酸则会加剧水体总氮的积累。目前对湿地植物短期净化低污染水过程中DOM变化规律的研究较少，DOM对低污染水中氮磷去除的影响也有待研究。

本研究以风车草为试验材料，通过不同温度下风车草净化低污染水中氮磷的短期动力学试验，分析风车草对水中氮磷净化的日动态变化及温度对净化过程的影响，探讨了短期内系统中DOM的变化，以期探明植物对低污染水中氮磷的短期去除能力及变化规律，为利用湿地植物净化低污染水的实践应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 模拟污水

试验用水采用人工配水，参考文献[9]中对低污染水的界定，本研究中水质指标浓度设置见表1。

**表1 进水水质指标浓度**

Table 1 Concentration of pollutants in the inlet water

| 指标 Indicators | 浓度 Concentrations/（mg·L$^{-1}$） | 药品（纯度） Drugs（Purity） | 实测进水浓度 Measured influent concentrations/（mg·L$^{-1}$） |
|---|---|---|---|
| COD | 60.0 | 葡萄糖（AR，99.5%） | 62.63 |
| TP | 1.5 | 磷酸二氢钾（AR，99.5%） | 1.81 |
| $NH_3$-N | 8.0 | 氯化铵（AR，99.5%） | 9.73 |
| $NO_3^-$-N | 10.0 | 硝酸钾（AR，99%） | 10.69 |

### 1.2 试验植物

试验所选植物为风车草，莎草科、莎草属，多年生草本植物，广布于湖、河边缘的沼泽中，其根系发达，具有很强的污染物吸收能力，以及较强的抗寒能力和较好的景观作用。本试验选择生长良好、植株完整、性状统一、株高约20~30 cm的风车草，在室温、模拟低污染水环境下培养至株高50 cm后使用，后续试验低温组和常温组所用植物鲜质量分别为（249.1±1.02）g和（250.6±0.89）g。

### 1.3 试验设计及方法

试验于2020年7月在中国环境科学研究院湖泊生态环境研究所开展，常温组置于实验室开放环境中，受到正常日光照射，低温组置于低温人工气候室内，12 h光照、12 h黑暗，常温组与低温组均放置在独立空间内，减少人为活动的干扰。试验共设四组（图1）：①常温下（24~30 ℃）风车草组（N组）；②常温下不添加植物的空白组（CKN组）；③低温（4~8 ℃）下风车草组（L组）；④低温下不添加植物的空白组（CKL组）。将预培养的风车草根系泥土冲洗干净后，未对根系做其他处理，按照试验分组放置于试验烧杯中。试验重复3次，开始时分别将配好的模拟污水（5 L）同时加入4组烧杯，全过程中不补水，风车草密度为50株·m$^{-2}$。

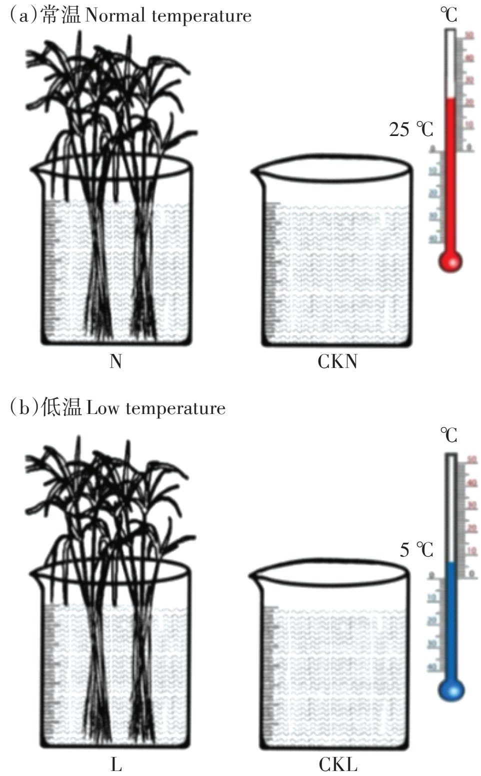



**图1 实验设计示意图**

Figure 1 The experiment design

取样时间选择0、2、4、8、16、24、30、44、48、52、70 h，水样的TN、TP、$NH_3$-N（氨氮）、$NO_3^-$-N（硝态氮）、$NO_2^-$-N（亚硝态氮）及理化指标的测定方法参考《水和废水监测分析方法（第四版）》[10]，水中DOM含量通过三维荧光光谱仪（Hitachi F-7000）测定，植物的根系活力通过氯化三苯基四氮唑（TTC）法[11]测定。

### 1.4 统计与分析

用一级反应动力学方程模拟氮、磷去除规律，即：

$$C=C_0e^{-Kt} \tag{1}$$

式中：$t$为反应时间，d；$K$为一阶反应速率常数，$d^{-1}$；$C$为$t$时刻测定的浓度，$mg\cdot L^{-1}$；$C_0$为初始浓度，$mg\cdot L^{-1}$。根据公式（1），将所测指标浓度与初始浓度比值的自然对数与反应时间进行线性回归，得到的降解方程的斜率的负值即为$K$值（一阶反应速率常数）。

采用日变化率描述一天内污染物浓度变化：

$$X=\Delta C/C_{max} \tag{2}$$

式中：$X$表示日变化率；$\Delta C$为一天内浓度极差，$mg\cdot L^{-1}$；$C_{max}$为一天内浓度最大值，$mg\cdot L^{-1}$。

用Origin 9.1分析数据和绘图，SPSS 22.0对数据进行单因素方差分析及Pearson相关性分析，Matlab 2018a的DOMFluor工具箱中PARAFAC模型分析DOM三维荧光光谱，通过残差分析和裂半分析确定DOM组分，根据其最大荧光强度$F_{max}$确定每个组分的相对含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮磷降解动力学

研究发现，模拟湿地中对氮、磷的去除满足一级反应动力学方程，张岩等[12]以7种植物床分别构建潜流湿地，出水中氮、磷浓度与水力停留时间相关性显著，氮、磷去除过程满足一级动力学方程。本研究中，通过一级动力学方程，计算出一阶反应速率常数$K$值（表2）以衡量不同温度下风车草系统中污染物去除率，$K$值越大，去除率越高。由表2可知，N组对污染物的去除率均明显高于L组，表明温度对低污染水体氮、磷的去除具有显著影响（$P$<0.01）。常温下$NO_3^-$-N的$K$值是低温组的25倍，常温组TP的$K$值是低温组的9倍。

### 2.2 氮磷去除效果

#### 2.2.1 总氮去除效果

TN去除率结果见图2。由图2可见，风车草对水中TN的去除效果较好，N组的平均去除率比CKN组

**表2 一阶反应速率常数$K$值（$d^{-1}$）**

Table 2 First order reaction rate constant $K$($d^{-1}$)

| 指标 Indicators | 低温组 L groups | 常温组 N groups |
|---|---|---|
| TN | 0.158 1B | 0.449 3A |
| TP | 0.051 1B | 0.502 8A |
| $NH_3$-N | 0.294 4B | 0.730 0A |
| $NO_3^-$-N | 0.024 3B | 0.620 4A |

注：同行不同大写字母表示处理间差异显著（$P$<0.01）。

Note: Different uppercase letters in a line indicate significant difference at $P$<0.01 level.

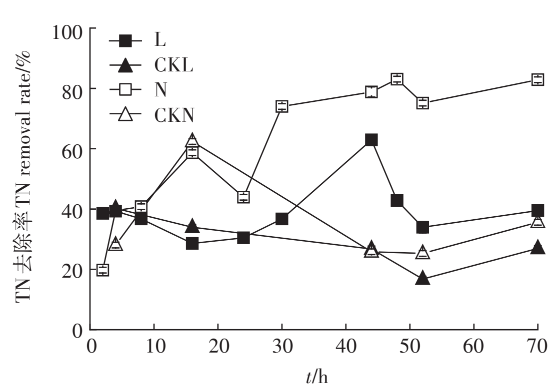



**图2 TN去除率变化**

Figure 2 Variations of TN removal rates

高25%，L组的平均去除率比CKL组高10%。而且温度对TN的去除效果影响显著，N组的TN去除率随时间渐增，70 h后去除率为82.87%，而L组TN去除率低于N组，去除率最高为62.9%，根据一级动力学方程算出N组风车草对TN的$K$值为0.449 3，而L组的$K$值仅为0.158 1，说明低温时TN去除率受到抑制。

### 2.2.2 总磷去除效果

TP去除率结果见图3。由图3可见，N组TP去除效果显著，4 h后风车草对水中TP去除率随时间推移渐增，由一级动力学方程求得$K$值为0.502 8，70 h时去除率72.40%，此时系统中TP浓度为0.5 mg·L$^{-1}$，达一级A排放标准。而低温环境下，风车草未能有效去除水中TP，可能是由于温度抑制了根际微生物磷的矿化吸收。

风车草根系活力变化见图4，试验初期风车草根系活力为12.89 mg·g·h$^{-1}$（以鲜质量计，下同），常温下N组根系活力于72 h后升高到13.76 mg·g·h$^{-1}$，而低温下L组根系活力随时间推移显著降低（$P$<0.05），在72 h时降至5.33 mg·g·h$^{-1}$。植物根系是微生物活动的重要场所，同时根系分泌物会影响污染物的去除效果，根系活力、根部生长状况的不同会导致污染物去除率的差异。有研究表明植物根部对低温的反应比叶片敏感，在8 ℃下水稻根系活力随处理时间延长而降低[13]。

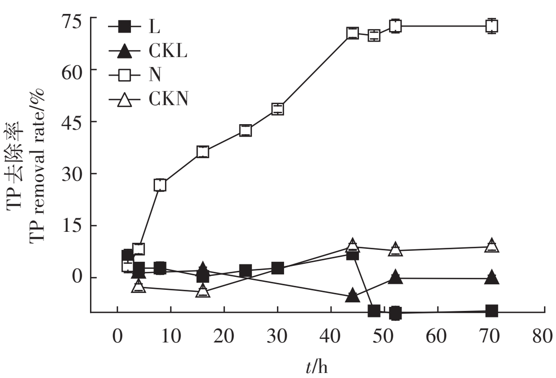
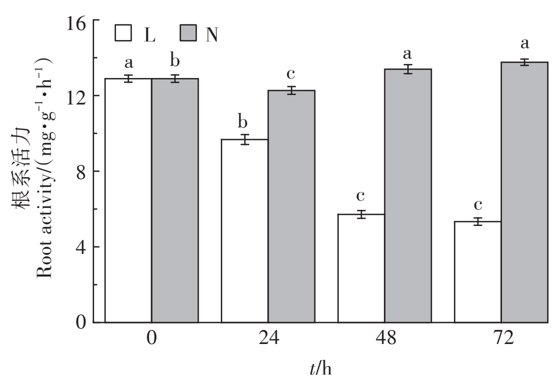



**图3 TP去除率变化**

Figure 3 Variations of TP removal rates




不同小写字母表示处理间差异显著（$P$<0.05）。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments（$P$<0.05）. The same below

**图4 风车草根系活力的变化**

Figure 4 Variations of root activity of *Cyperus alternifolius* L.

### 2.2.3 氨氮去除效果

氨氮去除率结果见图5，N组的氨氮去除集中在前16 h，氨氮浓度最低为0.5 mg·L$^{-1}$，去除率94.85%。水体中氨氮主要通过植物吸收、硝化反应等过程去除，风车草自身的中空组织可以输送氧气至根系，根系释放氧气形成氧化层，利于硝化反应的进行[14]。而L组氨氮最大去除率为39.73%，可能是因为硝化菌对温度较敏感，低温下活性受到抑制。

### 2.2.4 硝态氮去除效果

硝态氮去除率结果见图6，N组硝态氮去除率随时间推移渐增，计算得出$K$值为0.620 4，在70 h时N组硝态氮去除率达85.99%。硝态氮主要在反硝化菌作用下被去除，研究表明，植物根系通过泌氧使根际

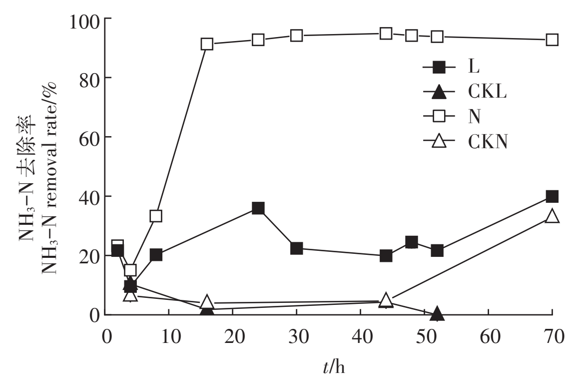



**图5 氨氮去除率变化**

Figure 5 Variations of $NH_3$-N removal rates

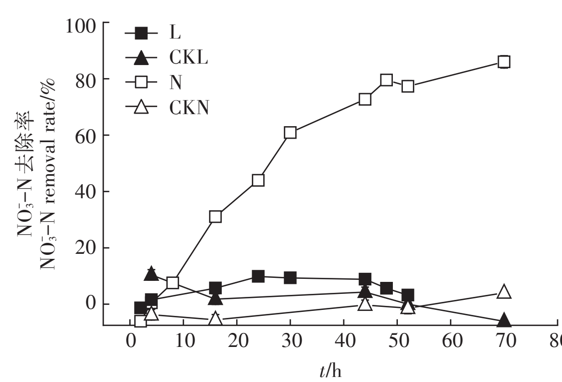



**图6 硝态氮去除率变化**

Figure 6 Variations of $NO_3^-$-N removal rates

出现好氧、缺氧、厌氧区，利于硝化反硝化作用进行[15]。好氧区存在于植物根部附近小区域，其余环境为缺氧甚至厌氧区[16]，因此系统中非根际区域的缺氧利于硝态氮还原。

2.2.5 亚硝态氮去除效果

亚硝态氮是氮循环的中间产物，来自硝化过程中氨氮氧化，之后在反硝化菌作用下被还原为氮气。亚硝态氮浓度变化见图7，0~16 h，常温下风车草系统中出现亚硝态氮短暂累积，随后浓度逐渐下降。结合N组氨氮浓度变化情况（前16 h氨氮浓度降低较快，随后氨氮浓度逐渐稳定）可知，前16 h系统中以硝化反应为主，氨氮被氧化为亚硝态氮，亚硝态氮在系统中出现短暂积累，之后一段时间内硝化反硝化逐渐达到平衡，亚硝态氮浓度降低。

2.2.6 氮磷浓度与去除率的日变化

试验进水第一天各水质指标浓度及去除率的日变化见图8，因低温试验L组在人工气候室内进行，环境较稳定，不会受光照强度等外界环境影响，氮磷去除率变幅较小。而常温下N组受光照强度影响，风车草对外界环境的生理响应会发生变化，进而影响风车草对污染物的吸收、去除。

日变化率的计算结果表明，N组TN、TP、$NH_3$-N及$NO_3^-$-N浓度日变化率分别为48.52%、40.31%、91.41%、47.15%，均高于L组。10:00—14:00风车草对氮磷的去除率增幅最大，原因是随着光强的增大，风车草光合作用增强，会吸收水中更多的N、P等营养

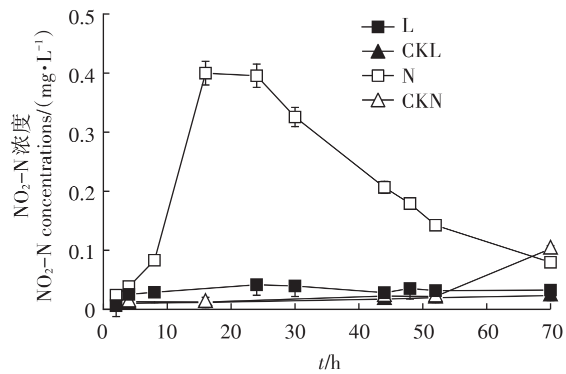



**图7 亚硝态氮浓度变化**

Figure 7 Variations of $NO_2^-$-N concentrations

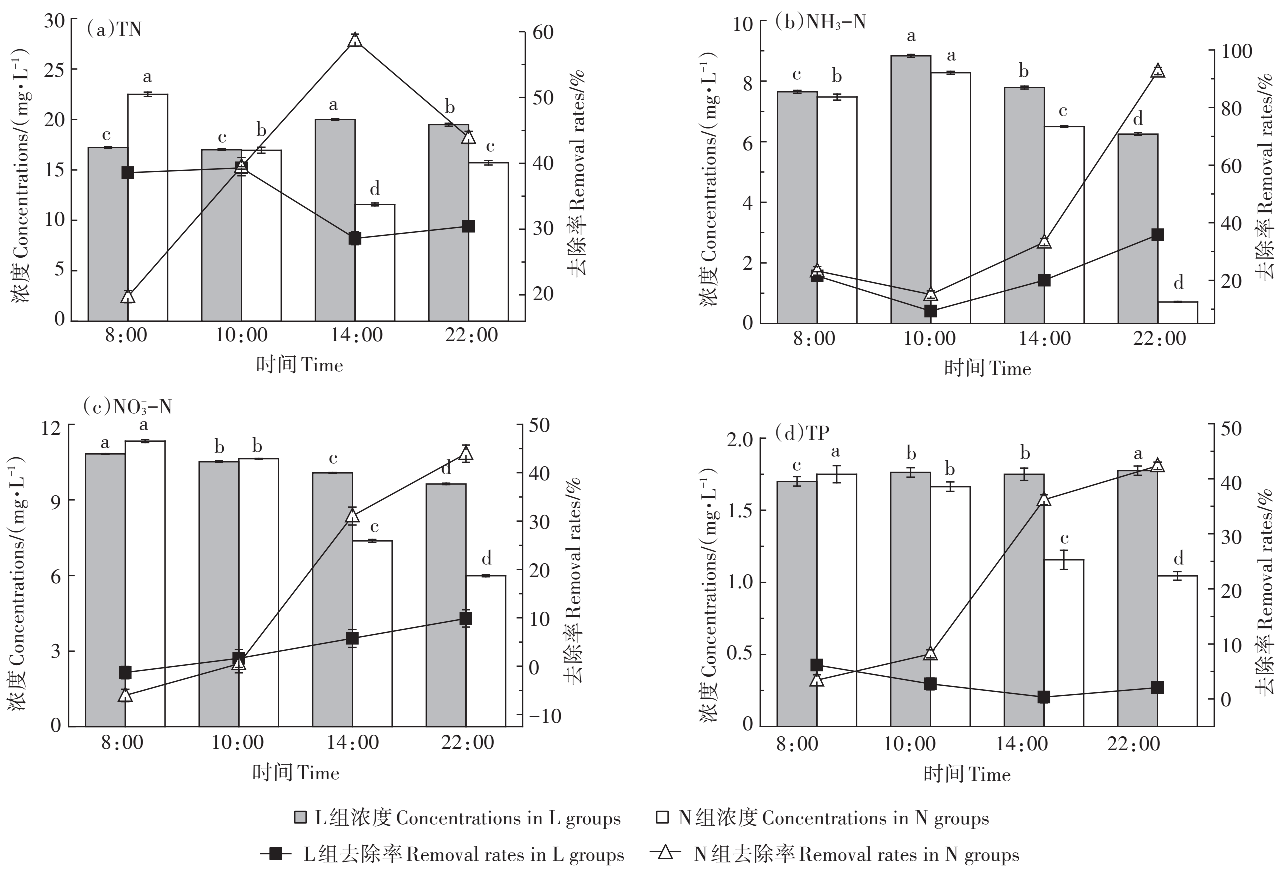



**图8 TN、$NH_3$-N、$NO_3^-$-N、TP浓度及去除率日变化**

Figure 8 Diurnal variation of concentrations and removal rates of TN，$NH_3$-N，$NO_3^-$-N and TP

元素用于合成光合代谢产物。

### 2.3 污染物去除与理化指标的相关性分析

试验中各组温度、pH、氧化还原电位（ORP）、电导率（EC）的变化见图9。经检验以上理化指标及TN、TP去除率均具正态分布特性，本研究采用Pearson相关系数分析以上理化指标和TN、TP去除率的相关性（表3）。TN去除率与电导率的相关系数为-0.773，TP去除率与电导率的相关系数为-0.990，TN、TP去除率与电导率均呈极显著负相关（$P<0.01$）。有学者用长苞香蒲净化工业废水时也发现，植物降解污染物的同时可有效降低污水电导率[17]。

### 2.4 溶解性有机质组分分析

用PARAFAC分析DOM三维荧光光谱得到4个荧光组分（图10），参考已有文献中A峰等常见荧光峰的激发和发射波长位置（表4），确定4个组分的荧光峰种类。

组分C1（激发波长为265、395 nm，发射波长为450 nm）包含2个激发峰和1个发射峰，指示紫外类腐植酸[18]，对应传统意义上的A峰和D峰；同时组分C4（激发波长为240、280 nm，发射波长为400 nm）也指

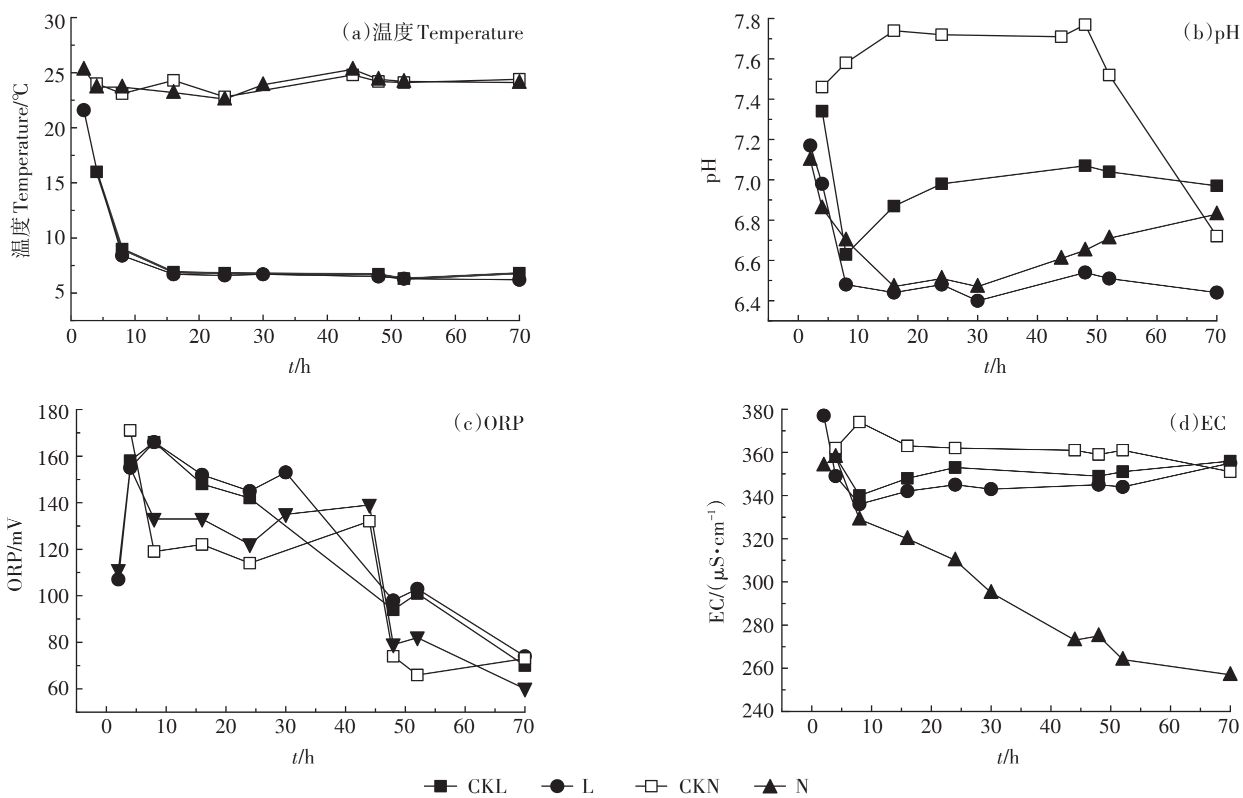



**图9 温度、pH、氧化还原电位（ORP）、电导率（EC）的变化**

Figure 9 Change of temperature, pH, oxidation reduction potential (ORP), and electrical conductivity (EC)

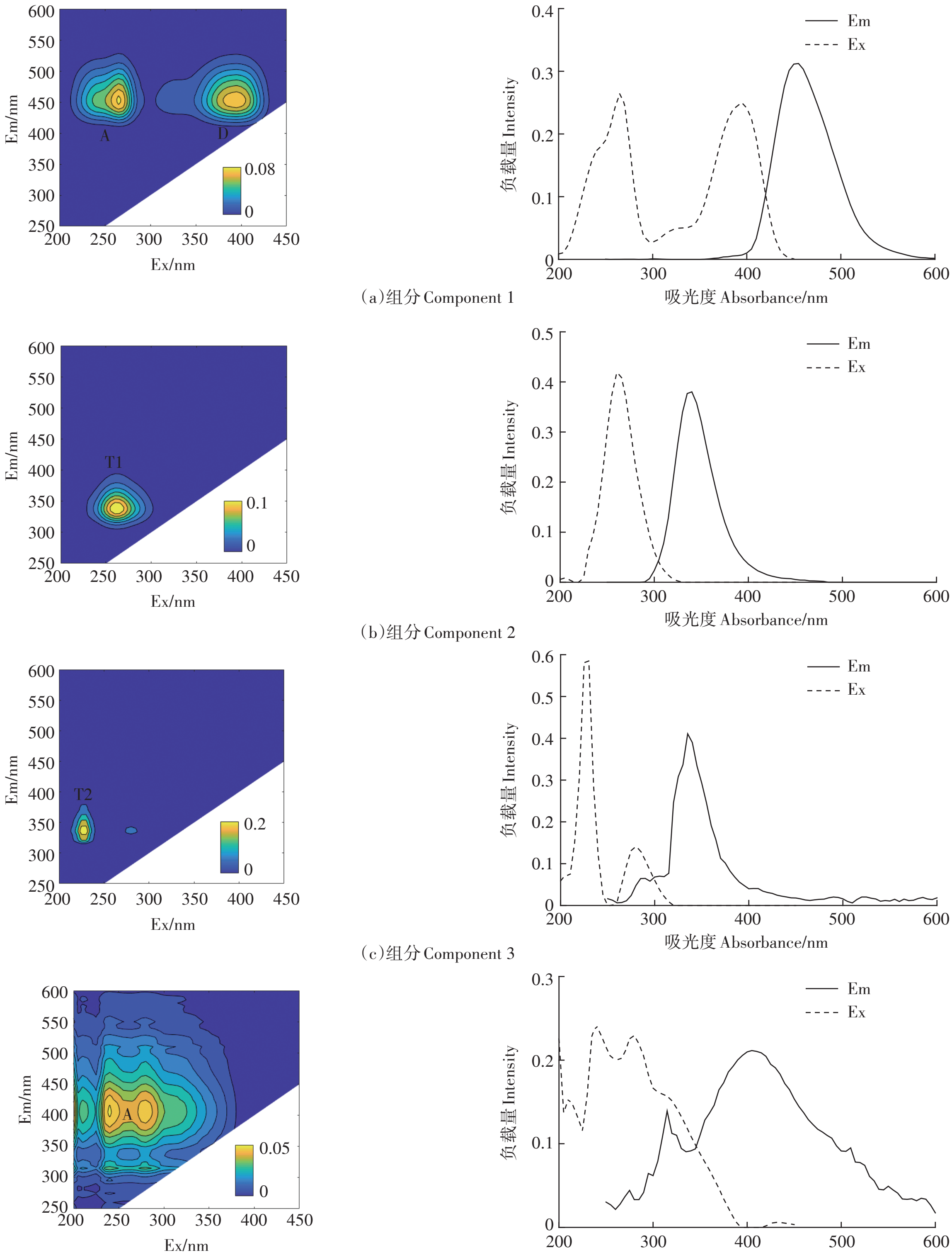
**表3 理化指标与TP、TN去除率的Pearson相关系数（$r$）**

Table 3 Pearson correlation coefficient between physicochemical index and TP, TN removal rates ($r$)

| 项目 Item | TN去除率 Removal rate of TN | TP去除率 Removal rate of TP | pH | 温度 Temperature | 氧化还原电位 Oxidation reduction potential (ORP) | 电导率 Electrical conductivity (EC) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TN去除率 | 1 | | | | | |
| TP去除率 | 0.751* | 1 | | | | |
| pH | −0.371 | −0.434 | 1 | | | |
| 温度 | 0.151 | 0.120 | 0.550 | 1 | | |
| ORP | −0.262 | −0.600 | −0.236 | −0.187 | 1 | |
| EC | −0.773** | −0.990** | 0.361 | −0.157 | 0.661* | 1 |

注：* $P<0.05$，** $P<0.01$。下同。

Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$. The same below.




(a)组分 Component 1

(b)组分 Component 2

(c)组分 Component 3

(d)组分 Component 4

Em:发射波长 Emission wavelength；Ex:激发波长 Excitation wavelength

**图10 基于平行因子分析法的荧光组分**

Figure 10 Fluorescence components based on parallel factor analysis

示紫外类腐植酸，是天然水体中较常见的有色溶解有机物组分[21]，其主要为大分子量富里酸；组分C2（激发波长为260 nm，发射波长为340 nm）指示长波类色氨酸[22]；组分C3（激发波长为230、280 nm，发射波长为335 nm）指示类色氨酸类物质，其主要游离或结合在蛋白质中，可指示完整蛋白质[23]。综上，系统中

表4 常见荧光峰范围及对应物质

Table 4 Range of common fluorescence peaks and corresponding substances

| 荧光峰 Fluorescence peak | 激发波长 Excitation wavelength/nm | 发射波长 Emission wavelength/nm | 代表物质 Substances |
|---|---|---|---|
| A | 260 | 380~460 | 紫外类腐植酸[18] |
| B | 275 | 210 | 类酪氨酸[19] |
| C | 320~360 | 420~480 | 可见腐植酸[19] |
| D | 390 | 509 | 短波土壤富里酸[18] |
| E | 455 | 521 | 长波土壤富里酸[18] |
| M | 290~310 | 370~420 | 海洋腐植酸[18] |
| N | 280 | 370 | 浮游植物类相关[18] |
| T1 | 275 | 340 | 长波类色氨酸[20] |
| T2 | 225~237 | 340~381 | 短波类色氨酸[20] |

DOM主要包含类腐植酸和类色氨酸两大类。

由各水样4个组分的荧光强度百分比（图11）可见，随时间推移，N组中组分C3占比逐渐增加；L组中组分C2占比最大，且逐渐降低；N、L组的4个组分总量均大于CKN、CKL组，主要是因为植物作用引起系统中DOM增加。研究表明当植物被移植到污水或培养液中，植物面临的养分胁迫会造成根系分泌物含量变化以适应新的环境[24]。

N组中组分C3占比较大，且70 h时与进水相比组分C3剧增，组分C3指示类色氨酸物质，而色氨酸可指示微生物生命活动，包括外源污水携带的微生物和水体或土壤中原有微生物[25]，L组的组分C3占比均小于N组是由于低温下微生物生命活动受抑制。组分C3含量与TN去除率的Pearson相关性分析结果（表5）表明二者呈极显著正相关。研究表明植物根系分泌物是反硝化的重要有机碳源，为反硝化提供电子供体[26]，因此植物根系分泌的类色氨酸增强了根系微生物生命活动，利于TN的去除。随时间推移，N组中组分C1类腐殖质占比逐渐增大。通过Pearson相关性分析（表5）可知，组分C4含量与TN、TP去除率均呈显著正相关，表明组分C4紫外类腐植酸的增加也利于TN、TP的去除。

表5 荧光组分与TN、TP去除率的Pearson相关系数（$r$）

Table 5 Pearson correlation coefficient between fluorescence component and TN, TP removal rates（$r$）

| 组分 Component | TN去除率 Removal rate of TN | TP去除率 Removal rate of TP |
|---|---|---|
| C1 | 0.573 | 0.475 |
| C2 | −0.380 | −0.554 |
| C3 | 0.794** | 0.630 |
| C4 | 0.701* | 0.714* |

综上，常温下风车草在去除低污染水中氮磷时，系统中DOM主要包括类腐植酸和类色氨酸，其含量随处理时间延长而增加。类腐植酸主要来自水生植物和浮游植物的分解，其含量与TN、TP去除率呈显著正相关，而类色氨酸来自植物根系分泌物，与TN去除率呈极显著正相关，常温下系统中类色氨酸和类腐植酸含量大于低温条件下，利于水中氮磷的去除。

## 3 讨论

本研究结果表明风车草对低污染水体中氮磷具有较好的净化效能，且其净化效果受温度的影响显著。朱文婷[27]根据一级反应动力学方程，统计了不同植物在不同季节对污染物去除的速率常数$K$值，夏季风车草对TN去除过程的$K$值中位数为0.22，TP为0.32，$NH_3$−N为0.33，美人蕉、菖蒲、芦苇、再力花等植

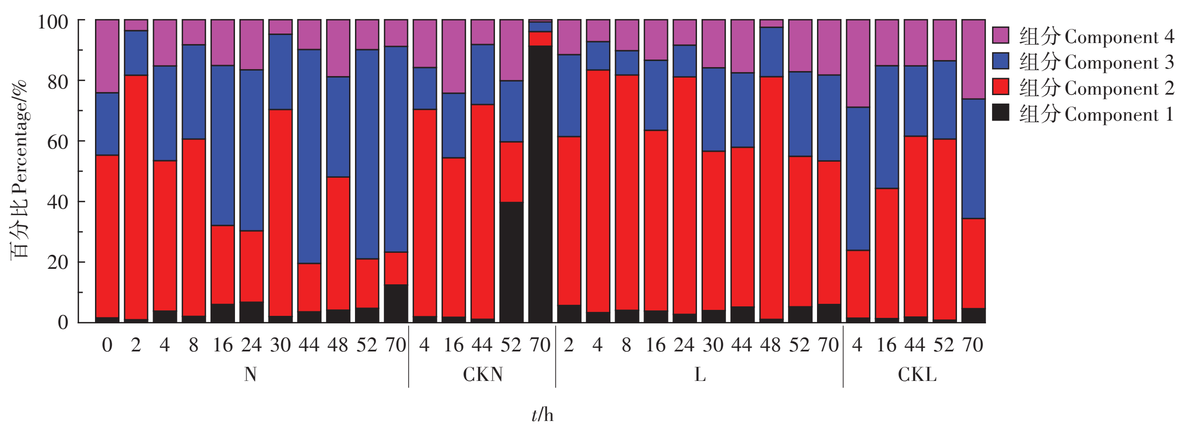



图11 DOM荧光强度百分比

Figure 11 The percentage of four components of DOM

物对TN和TP的净化能力均较高($K$>0.3)，其研究发现夏季TP净化的$K$值普遍高于TN，且冬季挺水植物$K$值较低，为高温季节的1/3~1/2。本研究中风车草常温下对TN的去除率超过80%；章涟漪等[28]在夏季利用水培植物木耳菜净化富营养化水，TN去除率为81.80%；刘建伟等[29]的研究发现美人蕉、黄菖蒲、水葱系统在30~35 ℃条件下对TN的去除率分别为48.8%、70.0%、30.0%；黄德锋等[30]对风车草和美人蕉湿地系统的研究表明，在温度较高的10月(>25 ℃)TN的去除率分别在75%和60%以上。上述研究表明水生植物可以有效去除水体中TN。根据本研究的试验结果，水生植物对TN的去除率受温度的影响显著($P$<0.05)。

风车草可以通过根系直接吸收同化水中的无机磷，并将其转化为自身的ATP、DNA及RNA等有机成分。植物根区为微生物的生存和营养物质的降解提供了必要的场所和好氧厌氧条件。研究表明，湿地植物可以吸收污水中的$NH_3$-N和$NO_3^-$-N，以及一些小分子含氮有机物，如尿素、氨基酸等[31]，同时植物可将光合作用吸收的氧输送到根部，为附着在根部的硝化细菌提供能量，从而促进硝化作用的进行[32]，达到水体脱氮的目的。

本研究表明，温度对风车草净化水中氮磷的影响较大，L组氮磷的去除率显著低于N组，这是由于低温抑制了根系活力，从而影响根系微生物的生命活动。另外，张燕等[33]的研究指出当温度低于15 ℃时，氨氧化菌(AOB)活性降低，硝化反应速率迅速下降。研究表明27 ℃时的氨氧化速率是13 ℃时的1.68倍，算得AOB对温度的敏感系数为1.051[34]，表明低温会削弱硝化速率，进而降低氨氮的去除率。反硝化细菌最适生长温度为20~40 ℃，低于15 ℃时，反硝化速率明显降低，10 ℃时反硝化速率仅为20 ℃时的1/3，导致水中硝态氮去除效果不佳[35]。因此，低温抑制硝化反硝化反应，使水中氮去除率降低。

植物在去除污染物时会分泌不同种类的溶解性有机质，从而影响微生物种群结构和生命活动，本研究中水体DOM主要包括紫外类腐植酸和类色氨酸，研究表明类色氨酸是风车草、芦苇、水芹等植物根系分泌物的主要成分[36]，腐植酸类物质主要与水中植物的腐烂程度和降解产物有关[25]，通过Pearson相关性分析可知，组分C4含量与TN、TP去除率均呈显著正相关，组分C3与TN去除率呈极显著正相关，表明类腐植酸的增加有利于TN、TP的去除，而植物分泌的类色氨酸有利于水中TN的去除。

孙伟等[37]研究发现，叶绿素a浓度、溶解性有机碳(DOC)浓度与类腐殖质含量呈显著正相关。刘瑾瑾等[38]的研究表明，腐植酸可以提高亚硝酸盐氧化菌(NOB)的活性，在一定程度上促进硝化反应平衡右移。WANG等[39]研究发现腐植酸和氧化还原能力较强的富里酸可促进Fe(Ⅲ)还原，在污染物去除应用中发挥重要作用。因此，植物分泌DOM与水体中氮磷去除的关系值得重视。

## 4 结论

(1)风车草能有效提高低污染水中TN、TP的去除率，且去除过程符合一级动力学方程。常温下风车草对模拟污水中TN、TP、氨氮、硝态氮的去除率分别为82.87%、72.40%、94.85%、85.99%，但低温环境会显著抑制根系活力，影响植物吸收、降解氮磷，导致氮磷去除率较低。

(2)三维荧光光谱分析结果显示，净化系统中的DOM主要包括紫外类腐植酸和类色氨酸两大类有机物，种植风车草增加了系统中DOM含量。常温组DOM含量随时间推移渐增，类腐植酸含量与TN、TP去除率呈显著正相关，因而可通过类腐植酸含量间接反映水中污染物含量；风车草根系分泌的类色氨酸使水中类色氨酸含量比进水增加了约16倍，增强了根系微生物的生命活动，利于水中氮磷的去除。

(3)本研究仅对风车草短期内净化低污染水效能进行了探究，其对低污染水的长期处理效果，以及净化过程中低污染水对风车草根、茎、叶的生理影响还需要进一步探究。

**参考文献：**

[1] 夏会龙，吴良欢，陶勤南. 凤眼莲加速水溶液中马拉硫磷降解[J]. 中国环境科学，2001，21(6)：553-555. XIA H L, WU L H, TAO Q N. Water hyacinth accelerating the degradation of malathion in aqueous solution[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21：553-555.

[2] 宋英伟，年跃刚，黄民生，等. 人工湿地中基质与植物对污染物去除效率的影响[J]. 环境工程学报，2009，3(7)：1213-1217. SONG Y W, NIAN Y G, HUANG M S, et al. Effects of substrates and plants on pollution removal of constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7)：1213-1217.

[3] 黄永芳，杨秋艳，张太平，等. 水培条件下两种植物根系分泌特征及其与污染物去除的关系[J]. 生态学杂志，2014，33(2)：373-379. HUANG Y F, YANG Q Y, ZHANG T P, et al. Secretion characteristics of two plants under hydroponic culture and its relationships with pollutant removal[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2)：373-379.

[4] 陈建军, 卢晓明, 卢少勇, 等. 梭鱼草净化黑臭河水的日变化试验研究[J]. 环境科学, 2009, 30(12)：3585-3589.　CHEN J J, LU X M, LU S Y, et al. Diurnal variations in purifying-tanks when use *Pontederia cordata* treating the malodorous river water[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12)：3585-3589.

[5] 陈雷, 许达, 卢少勇, 等. 钝化剂投加对重污染湖湾围格中水质日变化的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18)：364-368.　CHEN L, XU D, LU S Y, et al. Effect of inactivation agent addition on diurnal variation of water quality in enclosures of heavy polluted bay[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(18)：364-368.

[6] 孙磊, 向平, 张智, 等. 潜流-表流复合人工湿地处理超低TN含量废水[J]. 水处理技术, 2020, 46(4)：97-101.　SUN L, XIANG P, ZHANG Z, et al. Study on treatment of ultra-low TN-contaminated wastewater by composite constructed wetland with subsurface and surface flow[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(4)：97-101.

[7] 刘志宽. 湿地植物根系泌氧及其对滇池N、P营养物去除的影响研究[D]. 太原：太原理工大学, 2010.　LIU Z K. Research on ROL of wetland plants and its impact on removal of N, P nutrient in Dianchi [D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology, 2010.

[8] 刘晓斐, 杜伊, 胡玮璇, 等. 城市河流中碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(2)：73-78.　LIU X F, DU Y, HU W X, et al. Influence of carbon source on simultaneous nitrification and denitrification(SND) in urban rivers[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(2)：73-78.

[9] 顾丽君, 钱庄, 祝志超, 等. 不同含量低污染水对人工湿地中细菌的影响研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(4)：35-40.　GU L J, QIAN Z, ZHU Z C, et al. Effects of different pollutant content in low polluted water on bacterial in constructed wetland[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(4)：35-40.

[10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 701-705.　State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 701-705.

[11] 张雄. 用"TTC"法(红四氮唑)测定小麦根和花粉的活力及其应用[J]. 植物生理学通讯, 1982(3)：48-50.　ZHANG X. TTC method was used to determine the viability of wheat root and pollen and its application[J]. *Plant Physiology Journal*, 1982(3)：48-50.

[12] 张岩, 李秀艳, 徐亚同, 等. 8种植物床人工湿地脱氮除磷的研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(8)：49-52.　ZHANG Y, LI X Y, XU Y T, et al. Removal of nitrogen and phosphorus by eight plants of float bed constructed wetland[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(8)：49-52.

[13] 宋广树, 孙蕾, 杨春刚, 等. 吉林省水稻幼苗期低温处理对根系活力的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3)：33-37.　SONG G S, SUN L, YANG C G, et al. The effect of low temperature treatment on root activity in rice seedling period in Jilin Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(3)：33-37.

[14] 尹连庆, 谷瑞华. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J]. 环境工程, 2008, 26(S1)：151-155.　YI L Q, GU R H. Ammonia nitrogen removal mechanism and affecting factors of constructed wetland[J]. *Environmental Engineering*, 2008, 26(S1)：151-155.

[15] 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 7种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007(2)：8-14.　TANG X Q, LI J Z, LI X J, et al. Research on seven hydrophytes′ removal effect on nitrogen and phosphorus in eutrophic water[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007(2)：8-14.

[16] VYMAZAL J. Is removal of organics and suspended solids in horizontal sub-surface flow constructed wetlands sustainable for twenty and more years?[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 378：122117.

[17] MAINE M A, SUÑE N, HADAD H, et al. Removal efficiency of a constructed wetland for wastewater treatment according to vegetation dominance[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(6)：1105-1113.

[18] STEDMON C A, MARKAGER S, BRO R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2003, 82(3)：239-254.

[19] COBLE P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 51(4)：325-346.

[20] 王士峰. 三维荧光技术在水质监测方面的应用与发展[J]. 山东工业技术, 2015(7)：166.　WANG S F. Application and development of three-dimensional fluorescence technology in water quality monitoring[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2015(7)：166.

[21] WANG X, ZHANG F, KUNG H, et al. Evaluation and estimation of surface water quality in an arid region based on EEM-PARAFAC and 3D fluorescence spectral index：A case study of the Ebinur Lake watershed, China[J]. *Catena*, 2017, 155：62-74.

[22] 汪之睿, 于静洁, 王少坡, 等. 三维荧光技术在水环境监测中的应用研究进展[J]. 化工环保, 2020, 40(2)：125-130.　WANG Z R, YU J J, WANG S P, et al. Research progresseson application of three-dimensional fluorescence technology inwater environment monitoring [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2020, 40(2)：125-130.

[23] 程庆霖, 郑丙辉, 王圣瑞, 等. 滇池水体有色溶解性有机质(CDOM)三维荧光光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3)：698-703.　CHENG Q L, ZHENG B H, WANG S R, et al. Three-dimensional fluorescence spectrum characteristics of colored dissolved organic matter(CDOM) in Dianchi Lake water[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3)：698-703.

[24] 涂书新, 孙锦荷, 郭智芬, 等. 植物根系分泌物与根际营养关系评述[J]. 土壤与环境, 2000(1)：64-67.　TU S X, SUN J H, GUO Z F, et al. On relationship between root exudates and plant nutrition in rhizosphere[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2000(1)：64-67.

[25] 訾园园, 孔范龙, 郗敏, 等. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机质的三维荧光特性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12)：3871-3881.　ZI Y Y, KONG F L, XI M, et al. Three dimensional fluorescent characteristics of soil dissolved organic matter(DOM) in Jiaozhou Bay coastal wetlands, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12)：3871-3881.

[26] 杨忠臣. 人工湿地植物根系泌氧和分泌物影响污染物去除的机制研究[D]. 济南：山东大学, 2016.　YANG Z C. Study on the mechanism of radial oxygenloss and root exudates affected pollutant removal

in constructed wetlands[D]. Jinan:Shandong University, 2016.

[27] 朱文婷. 低污染水生态净化技术方案研究与效果评估[D]. 南京:南京大学, 2016. ZHU W T. Study and effect evaluation of ecological purification technology of low polluted water[D]. Nanjing:Nanjing University, 2016.

[28] 章涟漪, 姜丹, 葛燕燕, 等. 3种水培植物对青山湖富营养化水体氮磷的去除研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2015, 14(5):493-497. ZHANG L Y, JIANG D, GE Y Y, et al. Removal effect of three aqua-cultured plants on phosphorus and nitrogen in eutrophic water from Qingshan Lake[J]. *Journal of Hangzhou Normal University* (*Natural Science Edition*), 2015, 14(5):493-497.

[29] 刘建伟, 夏雪峰, 吕臣, 等. 富营养化景观水体高效修复水生植物的筛选[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8):354-357. LIU J W, XIA X F, LÜ C, et al. Selection of aquatic plants for efficient restoration of eutrophic landscape water[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(8):354-357.

[30] 黄德锋, 李田. 景观植物潜流湿地对富营养化景观水的净化[J]. 工业用水与废水, 2007(6):49-53. HUANG D F, LI T. Effects of subsurface-flow constructed wetlands planted with macrophytes on purification of eutrophicated scenic water[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2007(6):49-53.

[31] HEALY M G, RODGERS M, MULQUEEN J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(12):2268-2281.

[32] 刘文杰, 许兴原, 何欢, 等. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11):6313-6319. LIU W J, XU X Y, HE H, et al. Comparison of treatment performances of simulated urban sewage in constructed wetlands planted with four types of wetland plant[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(11):6313-6319.

[33] 张燕, 周小红, 陈洪斌, 等. 温度对强化混凝-悬浮填料床生物氧化工艺运行的影响[J]. 给水排水, 2006(S1):27-31. ZHANG Y, ZHOU X H, CHEN H B, et al. The running performances of combined process of CEPT-MBBR in different temperatures[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006(S1):27-31.

[34] 郑雅楠, 滝川哲夫, 郭建华, 等. SBR法常、低温下生活污水短程硝化的实现及特性[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9):935-940. ZHENG Y N, AKIO T, GUO J H, et al. Partial nitrification via nitrite at ordinary and low temperatures in an SBR treating domestic wastewater[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9):935-940.

[35] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及pH值变化规律[J]. 中国环境科学, 2008(11):1004-1008. MA J, PENG Y Z, WANG L, et al. Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process[J]. *China Environmental Science*, 2008(11):1004-1008.

[36] 张希丽. 湿地植物在水培条件下的根系分泌特征研究[D]. 青岛:青岛大学, 2019. ZHANG X L. Study on root secretion characteristics of wetland plants under hydroponics[D]. Qingdao:Qingdao University, 2019.

[37] 孙伟, 胡泓, 赵茜, 等. 达里诺尔湖水体DOM荧光特征及其来源解析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(9):2084-2093. SUN W, HU H, ZHAO Q, et al. Fluorescence characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Dali-Nor Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(9):2084-2093.

[38] 刘瑾瑾, 袁悦, 李夕耀, 等. 腐植酸预处理对活性污泥中硝化菌活性的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8):15-19. LIU J J, YUAN Y, LI X Y, et al. Effect of pre-treatment with humic acids on the activity of nitrifying bacteria in activated sludge[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(8):15-19.

[39] WANG S, WU Y, AN J K, et al. Geobacter autogenically secretes fulvic acid to facilitate the dissimilated iron reduction and vivianite recovery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(17):10850-10858.