



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202009208

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

张长平, 白珺, 王晓欧, 等. 风速对自然通风型人工湿地氧传质速率及污染物去除效果的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1299-1310.

ZHANG Changping, BAI Jun, WANG Xiaou, et al. Effects of wind speed on the oxygen transfer and pollutants removal in naturally ventilated constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1299-1310.

风速对自然通风型人工湿地氧传质速率及污染物去除效果的影响

张长平, 白珺, 王晓欧*, 张晓烁, 唐驹, YABO Abel Chat, 周晓璇

河北工业大学能源与环境工程学院, 天津市清洁能源利用与污染物控制重点实验室, 天津 300401

第一作者: 张长平(1972—), 女, 博士, 副教授。研究方向: 环境污染与控制。E-mail: zhchp@hebut.edu.cn

*通信作者: 王晓欧(1989—), 女, 博士, 讲师。研究方向: 水体污染生态修复技术等。E-mail: wangxiaou@hebut.edu.cn

摘要 系统地研究了拔风管式自然通风型人工湿地 (naturally-ventilated constructed wetland, CW_{NV}) 在不同风速 ($u \leq 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 条件下的氧传质速率 (oxygen transfer rate, OTR) 以及对有机物、氮、磷的去除效果。结果表明, 外部空气可通过拔风管上的孔口有效地扩散并溶解到湿地内部。与无通风 CW 系统 (CW₀) 相比, CW_{NV} 内部 OTR ($61.38 \sim 78.30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$) 较 CW₀ 高出 19.3%~33.5%, 从而强化了 CW_{NV} 中氨化、硝化和有机物好氧降解等过程。CW_{NV} 内 NH₃-N 和 COD 的去除负荷分别为 $2.84 \sim 4.57 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $45.0 \sim 56.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 较 CW₀ 分别提高了 90.5%~119.6% 和 11.9%~23.2%。CW_{NV} 出水中硝酸盐浓度为 $1.10 \sim 10.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 CW₀ 出水中硝酸盐浓度仅为 $0.41 \sim 0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在适宜的风速条件下, 湿地中可同时存在好氧与缺氧/厌氧环境, 这既利于硝化作用又利于反硝化作用, 从而可使湿地获得较好的 TN 去除效果。当风速 $u \leq 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, CW_{NV} 系统中 TN 去除负荷 $6.70 \sim 6.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 较 CW₀ 系统高出 17.2%~23.1%。但是, 自然通风对于 TP 去除效果的提高十分有限, 仅能提高 2.4%~4.8% 的 TP 去除率。此外, CW_{NV} 系统中风速与 OTR、COD、NH₃-N 和 TN 的去除负荷及其降解速率常数之间的关系符合二次方程。

关键词 人工湿地; 自然通风; 氮; 氧传质; 有机物; 磷

人工湿地 (constructed wetland, CWs) 被认为是一种环境友好、操作灵活且具有成本效益的污水处理技术, 其适用于多种类型的污废水处理, 尤其是在中小型社区^[1-4]。CWs 利用系统中植物、填料和微生物之间的物理、化学、生物三重协同作用对污水进行高效净化^[5-6]。传统 CWs 对有机物和悬浮物的去除效果较好, 但对总氮 (TN) 的去除率较低, 仅约 30%~55%^[7-9]。CWs 中的氮可通过植物吸收、填料吸附、氨 (NH₃-N) 挥发以及微生物转化等作用去除, 其中, 超过 50% (60%~95%) 的氮去除是通过微生物硝化-反硝化作用实现的^[6,10-11]。但传统 CWs 复氧能力较差, 导致硝化作用不充分, 使得硝化成为湿地脱氮的限制步骤^[9,12]。湿地内部溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 主要来源于污水中的 DO、大气表面复氧和植物根系泌氧作用, 但由于湿地长期处于淹水状态, 湿地填料表层的好氧区深度一般小于 1 cm ^[7], 植物根系泌氧所形成的好氧微环境只存在于根系周围约 1 mm 范围内^[13],

收稿日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 河北省教育厅资助科研项目 (QN2020274)

通常污水中 DO 浓度也较低,因此,传统人工湿地的复氧能力较差。

为强化人工湿地的硝化作用,可采取人工曝气(连续曝气或间歇曝气)、组合人工湿地系统、间歇进水、多点进水、出水回流、折流流动、虹吸补氧、太阳能曝气、跌水曝气或者自然通风曝气等措施。上述方式在一定程度上均可提高湿地系统内部 DO 含量进而强化其硝化作用,其中,相较于人工曝气或控制 CW 内水流流动方式,自然通风曝气其操作管理更为简单方便且几乎无需外加能耗,经济效益更为显著,也更适于农村以及偏远地区生活污水处理。LEE 等^[14]构建了垂直-水平流组合 CW 系统,前置垂直流 CW 系统内部埋设有通风管,太阳能和风能作为能量来源驱动电动风扇通过通风管为前置垂直流 CW 通风曝气,后置垂直流 CW 系统无通风曝气,结果显示,前置垂直流 CW 系统出水 DO 高达 $(6.97 \pm 1.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、后置水平流 CW 系统出水 DO 为 $(1.61 \pm 0.23) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、组合 CW 系统的 TN 去除率平均提高了 16.6%。朱国平等^[15]提出了一种人工湿地无动力充氧装置,在实施中将其用于处理农村生活污水,其中,好氧湿地槽内设置有拔风管,通过湿地内外的温度差、主要管道端口的高度差和烟囱效应的共同作用,实现空气自下而上的自由流通,而空气流通过过程中通过装置上的空气扩散孔结合空气在湿地内部的扩散势能实现空气在湿地内部的流通、扩散,利用该无动力充氧装置可使好氧湿地槽中始终保持 DO 浓度为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,充氧效果明显;好氧湿地槽出水再流经厌氧湿地槽,厌氧湿地槽中不设置拔风管,整体维持兼氧、厌氧条件,污水经上述系统处理后,出水指标优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。POZO-MORALES 等^[16]在水平潜流人工湿地系统内部设置了由通风井和通风烟囱构成的推流式强制自然通风回路,依靠水流推流式流动和对外部空气的抽吸作用,可实现系统内部良好的通风效果,该系统的进水有机负荷是传统 CW 系统的 4 倍,有机物去除效果良好。

综上所述,采用自然通风可有效提高 CW 系统内部 DO 浓度,进而强化其污染物去除效果。但是,目前关于自然通风型 CW 系统的研究较为初步,主要集中在系统出水 DO 浓度值及对污染物的最终去除效果方面,系统内部溶解氧输移扩散变化规律尚不清楚,且还未有关于风速与 CWs 中氧传质速率以及污染物(有机物、氮、磷)的去除效果之间关系的定量研究。而研究自然通风条件对 CW 系统内部 DO 输移扩散变化的影响规律,可通过控制通风条件改善基质内部不同深度上的氧化还原状态,从而调节微生物种群的分布,进而控制污染物的形态转化与去除,这对于进一步提高 CW 系统的污染物去除效果意义重大。

基于此,本研究主要解析了自然通风型 CWs 系统内部溶解氧输移扩散变化规律以及污染物浓度和去除率在系统内部的沿程变化;考察了风速与氧传质速率以及有机物、氮、磷去除负荷之间的定量关系,以期自然通风型 CWs 系统的设计和运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本研究中升流式潜流 CW 装置结构如图 1 所示(即自然通风型人工湿地 CW_{NV} 和传统人工湿地 CW_0)。该装置由有机玻璃加工而成,高为 0.5 m、内径为 0.19 m。湿地内填料整体高度为 0.45 m,自下而上依次为石灰石(高为 0.05 m,粒径为 10~20 mm)、轻质多孔陶粒(高 0.10 m,粒径 9~13 mm)、火山岩(高 0.20 m,粒径 5~8 mm)、河沙(高 0.10 m,粒径 2~4 mm),填料层平均空隙率为 0.40。在不同的填料层均设置有取水口(SP1~SP5),分别位于距填料底部 0.05、0.15、0.25、0.35 和 0.45 m 处。2 套装置共用 1 个进水箱,进水箱为 $0.7 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ (长×宽×高)的 PVC 塑料箱。

CW_{NV} 装置内部安装有拔风管。如图 1(b) 所示,拔风管(内径 15 mm)由一个横管(长 0.16 m)和连接于其上的 2 个竖管(长 0.80 m)构成;在 CW 内部的竖管(高 0.45 m)管壁上布满通风孔(直径为 3 mm), 1 m^3 填料的通风面积约为 1.08 m^2 ;竖管上方 5~10 cm 处安装有扇叶片,扇叶片由风能和太

太阳能驱动旋转, 可直接将风输送进入拔风管, 从而为湿地内部通风供氧。CW₀装置作为对照组, 其内部未安装拔风管, 但其填料表面上方相同位置处仍安装有扇叶片, 以对比相同风速条件下 CW₀与 CW_{NV}系统内部的 DO 分布情况。参考天津市年平均风速, 本研究中风速取值为 0~4.0 m·s⁻¹。

本研究中湿地植物选用美人蕉, 种植密度为 25 株·m⁻²。幼苗栽种完成后, 向装置内充注自来水至填料表面。为满足植物生长发育的需求, 在上述自来水中加入 15 mg·L⁻¹ NH₄Cl、15 mg·L⁻¹ KH₂PO₄、15 mg·L⁻¹ CaCl₂·2H₂O 和 15 mg·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O。上述化合物均为分析纯。在美人蕉幼苗生长阶段, 视装置内水位高度情况随时补充水源, 以促进植物和微生物群落的生长。考虑到装置位于室内, 利用全光谱植物灯模拟太阳光, 其每天开关各 12 h。30 d 后, 将合成生活污水经由蠕动泵连续注入装置内以启动实验。装置内污水的有效水力停留时间为 1 d。系统运行稳定后 (实验启动约 14 d 后), 开始采集水样并进行测定分析。实验周期为 2019 年 10 月—2020 年 3 月, 期间日平均气温为 18.5~21.2 °C、装置日平均蒸散量为 1.65~2.52 mm·d⁻¹。

1.2 进水

生活污水采用蛋白胨、葡萄糖、尿素、NH₄Cl、KH₂PO₄、Na₅P₃O₁₀、MgSO₄·7H₂O 和 CaCl₂·2H₂O (除蛋白胨外均为分析纯) 配置。实验进水水质为: pH=6.91~7.11、化学需氧量 (以 COD 计) 为 188.8~203.5 mg·L⁻¹、总氮 (TN) 为 38.68~41.00 mg·L⁻¹、氨氮 (NH₃-N) 为 23.50~25.24 mg·L⁻¹、有机氮为 12.97~16.51 mg·L⁻¹、总磷 (TP) 为 4.86~5.07 mg·L⁻¹、正磷酸盐 (PO₄³⁻-P) 为 3.84~4.09 mg·L⁻¹、聚磷酸盐 (P₃O₁₀⁵⁻-P) 为 0.80~1.20 mg·L⁻¹。

1.3 监测分析方法

每 2 d 采集 1 次水样并进行检测, 水质检测指标及分析方法为: 使用便携式多参数测定仪 (型号 DZB-712F, 上海仪电科学仪器股份有限公司) 测定 pH 和 DO; 使用数字式风速仪 (型号 Thinrad TA-2, 星瑞达科技有限公司) 测定风速; 采用快速消解分光光度法测定 COD; 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定 TP; 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定 TN; 采用纳氏试剂分光光度法测定 NH₃-N; 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定亚硝态氮 (NO₂-N); 采用紫外分光光度法测定硝态氮 (NO₃-N); 有机氮浓度为 TN 与无机氮 (NH₃-N、NO₂-N、NO₃-N) 浓度之差, COD 及 N、P 的检测使用多参数水质测定仪 (型号 MI-200H, 天津众创创谱科技有限公司)。每份水样的每个指标均读数 3 次, 取其平均值。

1.4 数据处理与分析

采用污染物去除率和去除负荷表征 CW 系统中污染物去除效果, 分别根据式 (1) 和式 (2) 进行计算。

$$R_c = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_c 表示污染物去除率; C_i 表示平均进水浓度, mg·L⁻¹; C_e 表示平均出水浓度, mg·L⁻¹。

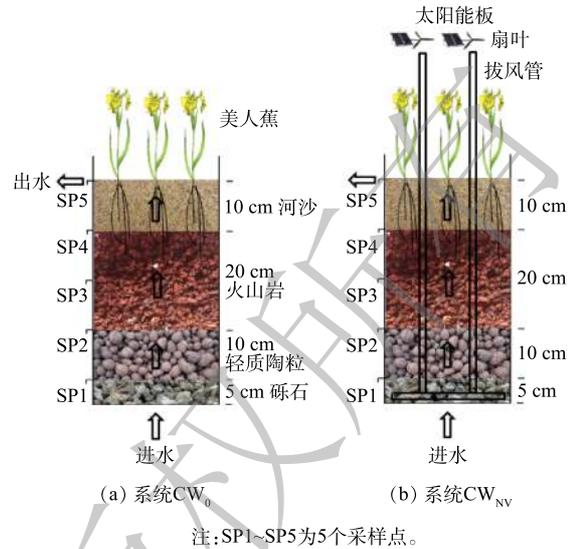


图 1 人工湿地系统实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the lab-scale CW systems

$$R_L = \frac{(q_i C_i - q_e C_e)}{V} \quad (2)$$

式中： R_L 表示污染物去除负荷， $g \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$ ； q_i 表示平均进水流量， $m^3 \cdot d^{-1}$ ； q_e 表示平均出水流量， $m^3 \cdot d^{-1}$ ； V 表示湿地填料总体积，本研究中为 $0.013 m^3$ 。

由于装置蒸散量较小 ($1.65 \sim 2.52 mm \cdot d^{-1}$)，故可认为 q_i 与 q_e 相等。

采用一级动力学反应模型 (式 (3)) 计算 COD、 NH_3-N 、TN 和 TP 的降解速率。

$$C_e = C_i \exp(-kt) \quad (3)$$

式中： k 表示污染物降解速率常数， d^{-1} ； t 表示水力停留时间， d 。

氧传质速率 (oxygen transfer rate, OTR) 根据式 (4) 计算^[7]。

$$O = q_i [0.7(C_{COD_{in}} - C_{COD_{out}}) + 4.3(C_{TKN_{in}} - C_{TKN_{out}})] / V \quad (4)$$

式中： O 表示氧传质速率 OTR， $g \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$ ； $C_{COD_{in}}$ 表示进水 COD 平均值， $mg \cdot L^{-1}$ ； $C_{COD_{out}}$ 表示出水 COD 平均值， $mg \cdot L^{-1}$ ； $C_{TKN_{in}}$ 表示进水凯氏氮平均浓度， $mg \cdot L^{-1}$ ； $C_{TKN_{out}}$ 表示出水凯氏氮平均浓度， $mg \cdot L^{-1}$ 。

本实验中所有数据均使用 Microsoft Excel 进行整理、使用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行分析、使用 OriginPro 8.5 软件进行制图。通过方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 表征所研究因素对 CW-MFC 系统性能影响的统计学显著性 ($P < 0.05$)，对于 3 组及 3 组以上的数据，进行 Duncan 事后检验 ($P < 0.05$) 以分析多组样本间的差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 风速对系统氧传质速率与 pH 沿程变化的影响

在不同风速条件下 CW_0 和 CW_{NV} 系统中 DO 浓度分布如图 2(a) 和图 2(c) 所示。进水 DO 浓度为 $0.78 \sim 0.80 mg \cdot L^{-1}$ 。对于无自然通风的 CW_0 系统，只有填料表面 (SP5) DO 浓度 ($0.69 \sim 0.95 mg \cdot L^{-1}$) 随着风速的增加而增加，而其内部 (SP1~SP4) 的 DO 浓度 ($< 0.5 mg \cdot L^{-1}$) 沿着水流方向不断下降，并且与风速无关。这主要是由于内部填料颗粒传质阻力较大，使得空气在 CW_0 系统中的扩散范围十分有限，仅能在表面填料颗粒的空隙中扩散，从而使得 CW_0 系统内部基本处于缺氧/厌氧状态。对于自然通风型 CW_{NV} 系统，即使在无风 ($u=0 m \cdot s^{-1}$) 情况下，其内部 (SP1~SP4) DO 浓度 ($0.53 \sim 0.72 mg \cdot L^{-1}$) 也较 CW_0 显著 ($P < 0.05$) 高出 $0.27 \sim 0.60 mg \cdot L^{-1}$ ，而其填料表面 (SP5) DO 浓度 ($1.14 mg \cdot L^{-1}$) 也较 CW_0 显著 ($P < 0.05$) 高出 $0.45 mg \cdot L^{-1}$ ，这表明拔风管可有效连接湿地内部与外部大气，且随着风速增大， CW_{NV} 系统内部 DO 浓度沿水流方向不断增加：当风速为 $1.0 m \cdot s^{-1}$ 时， CW_{NV} 系统内部 0~25 cm 处 (SP1~SP3) DO 为 $0.75 \sim 0.90 mg \cdot L^{-1}$ 、35~45 cm 处 (SP4~SP5) DO 为 $1.24 \sim 1.70 mg \cdot L^{-1}$ ，同时存在缺氧/厌氧与好氧环境；当风速超过 $2.0 m \cdot s^{-1}$ 时，整个 CW_{NV} 系统处于好氧状态，平均 DO 浓度为 $1.08 \sim 3.03 mg \cdot L^{-1}$ 。当风速由 $1.0 m \cdot s^{-1}$ 增大到 $4.0 m \cdot s^{-1}$ 时， CW_{NV} 与 CW_0 内部的平均 DO 浓度之差由 $0.50 \sim 1.12 mg \cdot L^{-1}$ 增大到 $1.12 \sim 2.30 mg \cdot L^{-1}$ ，这表明外部空气可通过拔风管上的孔口有效地扩散和溶解到湿地内部。此外， CW_{NV} 内部 DO 浓度随着与填料表面距离的增加而降低，这种氧气扩散随距离的衰减主要源于填料、生物膜和悬浮物颗粒的阻力以及污染物降解的消耗^[18]。此外，本研究中自然通风型 CW_{NV} 系统平均出水 DO 浓度 ($1.14 \sim 3.03 mg \cdot L^{-1}$) 高于 POZO-MORALES 等^[16] 研究中推流式强制自然通风型 CW 系统的出水 DO 浓度 ($0.55 mg \cdot L^{-1}$)，且与朱国平等^[15] 研究中无动力充氧 CW 的出水 DO 浓度 ($1.5 \sim 2.0 mg \cdot L^{-1}$) 相近，但低于 LEE 等^[14] 研究中前置通风型垂直流 CW 系统出水 DO 浓度 ($(6.97 \pm 1.3) mg \cdot L^{-1}$)。

CW_0 和 CW_{NV} 系统内部 pH 沿程变化如图 2(b) 和图 2(d) 所示。结合图 2(a) 和图 2(c) 分析可知，系统内部 pH 随 DO 浓度的增加而降低。 CW_{NV} 系统内部 pH ($6.35 \sim 7.21$) 较 CW_0 ($7.13 \sim 7.35$) 低 $0.14 \sim$

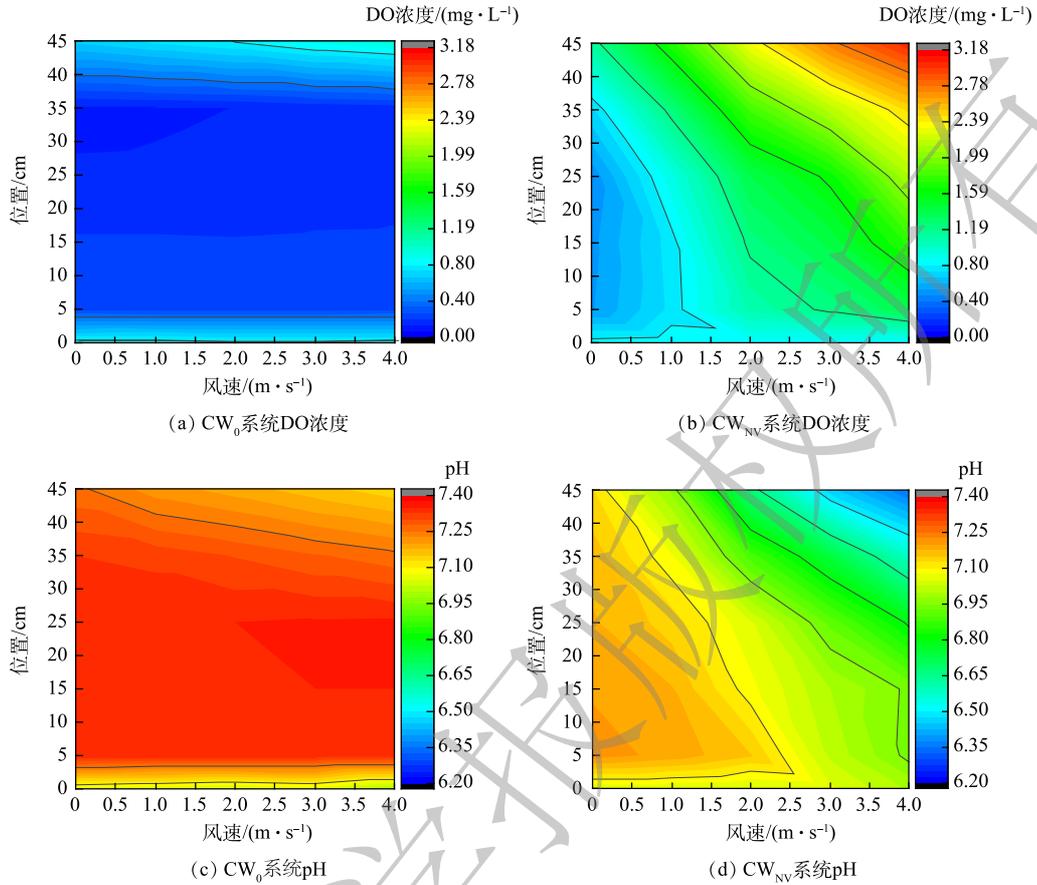


图 2 在不同风速条件下 CW_0 和 CW_{NV} 系统中 DO 浓度和 pH 的分布

Fig. 2 Distribution of DO concentration and pH across CW_0 and CW_{NV} at different wind speed

0.79 个单位，且 CW_{NV} 表面 (SP5) DO 浓度最高 ($3.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、pH 最低 (6.35)，但是， CW_0 和 CW_{NV} 系统内部 pH 变化有限，最高仅相差 0.86 个单位 (CW_{NV} 内)。这种 pH 随 DO 浓度增加而降低的变化趋势可归因于硝化作用。

表 1 列出了 CW_0 和 CW_{NV} 系统在不同风速条件下的平均 OTR 值。由表 1 可知， CW_0 和 CW_{NV} 系统的 OTR 均随着风速的增大而增大，但 CW_{NV} 的增幅显著高于 CW_0 。即使在无风条件下，与 CW_0 相比， CW_{NV} 系统内部拔风管也可显著 ($P < 0.05$) 将其 OTR 提高约 19.3%。当风速增大到 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时， CW_{NV} 的 OTR 较 CW_0 高出 25.7%；当风速为 $2.0 \sim 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时， CW_{NV} 的 OTR 较 CW_0 高出 30.4%~33.5%，但其增幅有所减缓，这进一步证明了自然通风系统可有效提高湿地内部复氧能力。

如图 3 所示，采用一元二次回归方程描述 CW_{NV} 出水 DO 浓度、系统 OTR、污染物 (COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN) 去除效果与风速之间的关系，并通过对比系统在风速为 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下的实测值和预测值，对回归模型进行验证，结果如表 2 所示。由表 2 可知，在所选定的 2 种风速条

表 1 在不同风速条件下 CW_0 和 CW_{NV} 系统中氧传质速率

Table 1 Oxygen transfer rate in CW_0 and CW_{NV} at different wind speed

湿地系统	不同风速下的氧传质速率/ $(\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1})$				
	$0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
CW_0 系统	51.44 ± 0.60	53.60 ± 0.99	55.78 ± 0.76	56.45 ± 0.91	59.14 ± 0.82
CW_{NV} 系统	61.38 ± 1.15	67.39 ± 0.88	72.75 ± 0.92	75.35 ± 0.42	78.30 ± 0.71

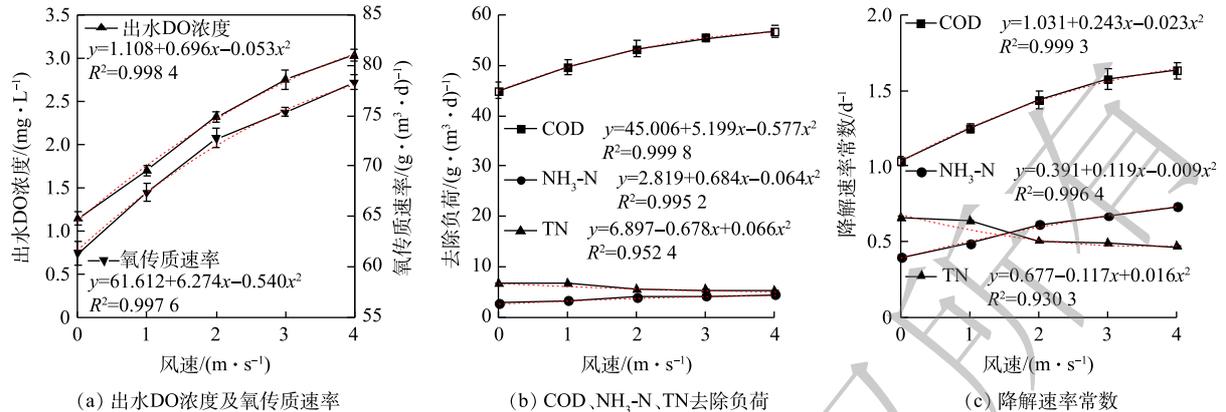


图3 风速与CW_{NV}中氧传质速率、污染物(COD、NH₃-N、TN)去除效果之间的关系

Fig. 3 Relationship between wind speed and oxygen transfer rate, removal of COD, NH₃-N and TN in CW_{NV}

表2 风速与CW_{NV}中氧传质速率、污染物(COD、NH₃-N、TN)去除效果关系模型验证(n=3)

Table 2 Model verification of the relationship between wind speed and oxygen transfer rate, removal of COD, NH₃-N and TN in CW_{NV} (n=3)

风速/ (m·s ⁻¹)	出水DO浓度/(mg·L ⁻¹)		氧传质速率/(g·(m ³ ·d) ⁻¹)		COD去除负荷/(g·(m ³ ·d) ⁻¹)		COD降解速率常数/d ⁻¹	
	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值
3.5	2.92	2.90	76.63	76.95	55.43	56.14	1.592	1.603
4.5	3.20	3.17	79.98	78.90	57.03	56.72	1.668	1.663
风速/ (m·s ⁻¹)	NH ₃ -N去除负荷/(g·(m ³ ·d) ⁻¹)		NH ₃ -N降解速率常数/d ⁻¹		TN去除负荷/(g·(m ³ ·d) ⁻¹)		TN降解速率常数/d ⁻¹	
	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值
3.5	4.38	4.43	0.695	0.701	5.39	5.34	0.477	0.486
4.5	4.68	4.60	0.766	0.751	5.33	5.19	0.471	0.482

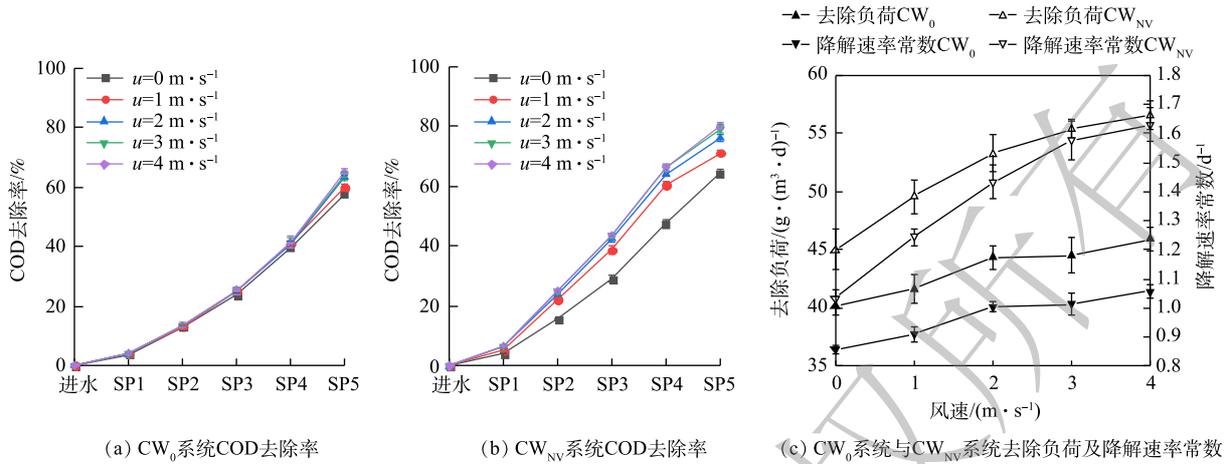
件下,出水DO浓度与OTR值的预测值较实测值的绝对偏差分别为-0.94%~-0.68%和0.42%~-1.35%,偏差值均较小。由此可见,基于实验结果,所得一元二次回归方程对CW_{NV}系统在不同风速条件下的出水DO浓度和OTR值具有较好的预测效果。

总之,自然通风可有效强化湿地内部氧气传递扩散,从而显著提高其复氧能力,且其成本低廉、维护简便。在本研究中,当风速 $u \leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,CW_{NV}系统内部可同时存在缺氧/厌氧与好氧环境;而当风速 $\geq 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,整个CW_{NV}系统内部处于好氧状态。

2.2 风速对系统有机物去除效果的影响

不同风速条件下CW₀和CW_{NV}系统中有机物的去除效果如图4所示。由图4(a)和图4(b)可知,在CW₀系统中,其内部COD沿程去除率随风速的变化十分有限,只有上层填料(SP4~SP5)部分其COD去除率随风速的增大而小幅度提高,这是由于在SP4~SP5处DO浓度(0.69~0.95 mg·L⁻¹,图2(a))相对较高,有机物好氧降解速率较快;在CW_{NV}系统中,内部COD沿程去除率随风速的增大而显著提高($P < 0.05$),当风速为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,CW_{NV}中COD去除率比CW₀平均高出6.8%;当风速为 $1.0 \sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,CW_{NV}中COD去除率比CW₀平均高出11.4%~15.2%;当风速为 $2.0 \sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,CW_{NV}中COD去除率的增幅很小,仅为1.2%~4.2%。

如图4(c)所示,在无风时,CW_{NV}系统中耗氧有机物(以COD计)去除负荷和降解速率常数(k)分别为 $42.5 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 1.034 d^{-1} ,较CW₀系统分别显著($P < 0.05$)高出11.9%和20.5%。当风速从

图4 在不同风速条件下CW₀和CW_{NV}系统中的有机物去除Fig. 4 Organics removal across CW₀ and CW_{NV} at different wind speed

1.0 m·s⁻¹ 提高到 4.0 m·s⁻¹ 时, CW_{NV} 系统中耗氧有机物 (以 COD 计) 去除负荷和降解速率常数 (k) 随之有所增大 (49.6~56.6 g·(m³·d)⁻¹ 和 1.245~1.631 d⁻¹), 分别比 CW₀ 系统平均高出 19.1%~23.2% 和 36.6%~54.3%。由图 3 和表 2 可知, 所建一元二次方程可以较为准确地预测不同风速条件下 ($u < 5$ m·s⁻¹) CW_{NV} 系统中耗氧有机物 (以 COD 计) 去除负荷和降解速率常数 k , 实测值与预测值之间的误差均在 ±1.5% 以内。

CW_s 系统主要通过生物降解来去除有机物^[19]。由于有机物好氧生物降解速率远高于厌氧生物降解^[20-21], 故许多研究提出采用曝气来提高 CW_s 中的有机物去除率^[9,22-24]。本研究中, CW_{NV} 系统中 COD 的去除率显著高于 CW₀。当风速 ≥ 2.0 m·s⁻¹ 时, CW_{NV} 内部均处于好氧状态 (DO > 1.0 mg·L⁻¹), 同时, 风速进一步增大对于 COD 去除的促进作用相对有限, 这表明在本研究范围内 (进水 COD 为 67.3~72.5 g·(m³·d)⁻¹), 风速 ≥ 2 m·s⁻¹ 可满足有机物生物降解的需氧量。总之, 自然通风可通过强化氧气传质而显著提高 CW_s 中有有机物的去除。

2.3 风速对系统氮素转化与去除的影响

CW₀ 和 CW_{NV} 系统中氮素转化及其去除效果如图 5 所示。随着风速的增大, CW_{NV} 中有机氮去除率 (79.2%~86.6%) 持续小幅度增长, 且比 CW₀ 系统高出 3.5%~8.6%。湿地主要通过生物氨化-硝化-反硝化作用进行脱氮^[6,10-11]。氨化是微生物将有机氮转化为 NH₃-N 的过程, 虽然好氧环境更有利于氨化作用, 但其在缺氧/厌氧条件下亦能快速反应^[7,25], 因此, CW₀ 和 CW_{NV} 系统在有机氮去除方面差异较小。

CW_{NV} 系统中 NH₃-N 去除率随着风速的提高而大幅度增加。当风速为 0 m·s⁻¹ 时, CW_{NV} 中 NH₃-N 去除率较 CW₀ 高出 15.6%; 当风速为 1.0~4.0 m·s⁻¹ 时, CW_{NV} 中 NH₃-N 去除率较 CW₀ 高出 19.4%~25.9%; 当风速 > 2.0 m·s⁻¹ 时, CW_{NV} 中 NH₃-N 去除率随风速进一步提高的增幅减缓。这表明在本研究范围内 (进水 NH₃-N 负荷为 8.37~8.99 g·(m³·d)⁻¹), 风速 ≥ 2 m·s⁻¹ 可满足硝化过程的需氧量。但是, 本研究中 CW₀ 和 CW_{NV} 系统的 NH₃-N 去除率 (分别为 17.2%~25.9% 和 32.8%~51.9%) 均较低。究其原因, 主要是由于以下 2 点: 进水中 NH₃-N 和有机氮浓度均相对较高, 分别为 23.5~25.4 mg·L⁻¹ 和 12.97~16.51 mg·L⁻¹, 且有机氮很容易转化为 NH₃-N; 对于 CW₀ 系统来说, 其内部整体处于缺氧/厌氧状态 (DO < 0.50 mg·L⁻¹), 氨化反应可正常进行, 但硝化反应几乎无法进行, 从而导致 NH₃-N 积累。

CW₀ 装置整体处于缺氧/厌氧环境, 其内部 NO₂-N (0.01~0.05 mg·L⁻¹) 和 NO₃-N (0.13~0.58 mg·L⁻¹) 浓度沿程不断降低, 只有在填料表面处 (SP5), 出水 NO₂-N (0.05~0.19 mg·L⁻¹) 和 NO₃-N (0.41~0.91

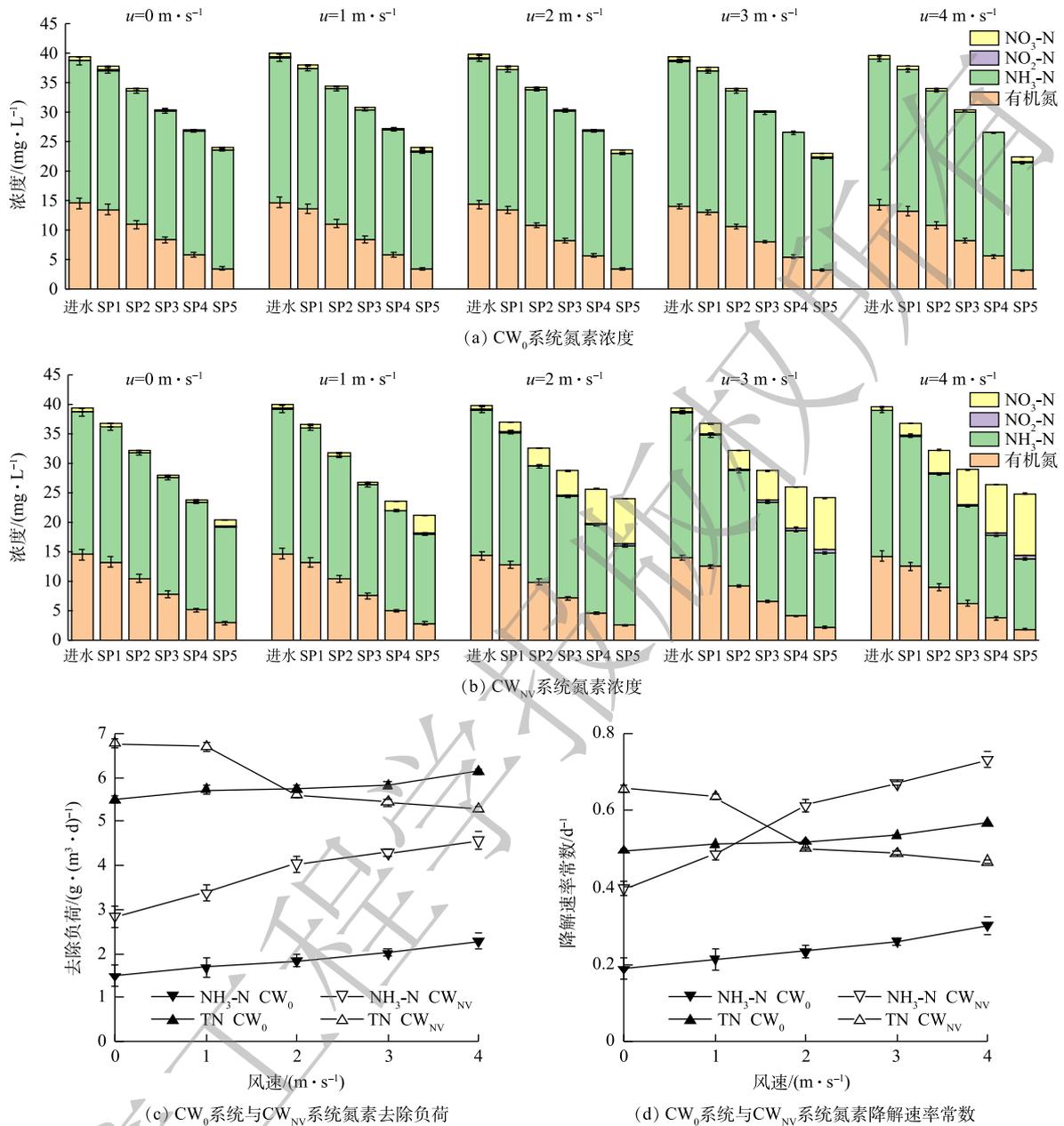


图5 在不同风速条件下 CW_0 和 CW_{NV} 系统中的氮素转化与去除

Fig. 5 Nitrogen transformation and removal across CW_0 and CW_{NV} at different wind speed

$mg \cdot L^{-1}$) 浓度有小幅升高, 这是由于 SP5 处 DO 平均浓度 ($0.69 \sim 0.95 \text{ mg} \cdot L^{-1}$, 图 2(a)) 相对较高。当风速 $\geq 2.0 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 时, CW_{NV} 内部 $NO_2\text{-N}$ 和 $NO_3\text{-N}$ 浓度随着风速的进一步提高而随沿程不断增加, 其出水 $NO_2\text{-N}$ 和 $NO_3\text{-N}$ 浓度较 CW_0 分别高出 $0.30 \sim 0.52 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 和 $7.08 \sim 9.84 \text{ mg} \cdot L^{-1}$, 这也解释了为何 CW_{NV} 中 pH 较低 (图 2(d))。总之, 2 个湿地装置中 $NO_2\text{-N}$ 均无明显积累, 而 $NO_3\text{-N}$ 浓度随着 DO 浓度的增加而增加, 尤其是当 $DO > 1.0 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 时。

对于 CW_{NV} 系统, 当风速 $\leq 1.0 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 时, 其 TN 去除率最高 (47.0%~48.1%); 而当风速由 $2.0 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 增大到 $4.0 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 时, 其 TN 去除率由 39.5% 下降到 37.3%。对于 CW_0 系统, 当风速由 $0 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 增大到 $4.0 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 时, 其 TN 去除率由 39.1% 缓慢提高到 43.3%。硝化是在好氧条件下 $NH_3\text{-N}$ 转化为 $NO_3\text{-N}$ ($NO_2\text{-N}$ 作为反应中间体) 的生物氧化过程; 反硝化是在缺氧/厌氧条件下且有可利用的有机物存在时,

NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 作为电子受体被转化为气态 N_2 [7,25]。总之, 氨化和硝化作用只是将氮素转化为不同形态的氮, 只有通过反硝化作用才能实现最终脱氮。如前所述, 当风速 $u \leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CW_{NV} 系统内部可同时存在好氧与缺氧/厌氧环境, 这既有利于硝化也有利于反硝化, 因此, 其 TN 去除率最高; 当风速 $\geq 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CW_{NV} 整体处于好氧状态, 即 $\text{DO} > 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这有利于硝化作用, 但会限制反硝化作用, 从而导致 NO_3^- -N 积累, 进而使得 TN 去除率较低。因此, 有研究采用间歇曝气或潮汐流运行方式以便在 CWs 中同时形成好氧区和缺氧/厌氧区, 从而提高其 TN 去除率 [22,25]。

由图 5(c) 和图 5(d) 可知, CW_{NV} 系统的 NH_3 -N 去除负荷和降解速率常数 ($2.84\sim 4.57 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.398\sim 0.731 \text{ d}^{-1}$) 分别比 CW_0 ($1.49\sim 2.29 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.189\sim 0.300 \text{ d}^{-1}$) 高出 $90.5\%\sim 119.6\%$ 和 $110.6\%\sim 162.0\%$ 。当风速 $\leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, CW_{NV} 中 TN 去除负荷和降解速率常数 ($6.70\sim 6.77 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.635\sim 0.656 \text{ d}^{-1}$) 较 CW_0 高出 $17.2\%\sim 23.1\%$ 和 $23.8\%\sim 32.4\%$; 但当风速为 $2.0\sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CW_{NV} 中 TN 去除负荷和降解速率常数较 CW_0 分别降低了 $2.4\%\sim 13.8\%$ 和 $3.1\%\sim 17.6\%$ 。如图 3 和表 2 所示, 所建立的一元二次方程能较为准确地预测不同风速 ($u \leq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 条件下 CW_{NV} 中 NH_3 -N 和 TN 的去除负荷及其降解速率常数 (k), 实测值和预测值之间的误差均在 $\pm 2.5\%$ 以内。

总之, 自然通风通过强化湿地内部氧气传递扩散而有效提高其 NH_3 -N 去除率及出水 NO_3^- -N 浓度。同时, 可采取 2 种方式以提高 CWs 的 TN 去除率: 一是选取适宜的湿地通风管上方风速 (本研究中 $\leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$); 二是将自然通风型 CW 与无通风 CW 串联形成组合 CWs。这 2 种方式均可保证 CWs 系统中既有利于硝化的好氧条件, 又有利于反硝化的缺氧/厌氧条件。此外, 可将进水中的有机物作为反硝化碳源以进一步提高系统的 TN 去除率。针对此问题, 我们将在今后进一步开展相关研究。

2.4 风速对系统除磷效果的影响

如图 6 所示, 当风速从 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加到 $4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CW_{NV} 中 TP 去除率从 66.4% 略提高到 69.6% , 仅比 CW_0 高出 $2.4\%\sim 4.8\%$; 与有机物去除和脱氮相比, CW_{NV} 系统中 TP 去除更加稳定, 受风速影响十分有限。 CW_{NV} 系统在不同风速条件下的 TP 去除负荷 ($1.17\sim 1.23 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$) 也相差无几, 仅比 CW_0 系统略高出 $0.02\sim 0.04 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。 CW_{NV} 中 TP 降解速率常数 ($1.092\sim 1.193 \text{ d}^{-1}$) 仅比 CW_0 ($1.024\sim 1.046 \text{ d}^{-1}$) 高出 $0.068\sim 0.147 \text{ d}^{-1}$ 。

有研究 [7,14] 表明, CWs 系统除磷的主要途径是填料吸附, 而 DO 浓度对 CWs 除磷影响并不显著或影响有限。在本研究中, 虽然方差分析结果显示 CW_{NV} 和 CW_0 在 TP 去除具有统计学意义上的显著差异 ($P < 0.05$), 但自然通风对于 CW_{NV} 中 TP 去除的促进作用十分有限, 这进一步证明了 DO 浓度不是 CWs 除磷的关键影响因素。且 CW_{NV} 与 CW_0 系统中 $82.0\%\sim 85.1\%$ 的磷去除发生在具有较强

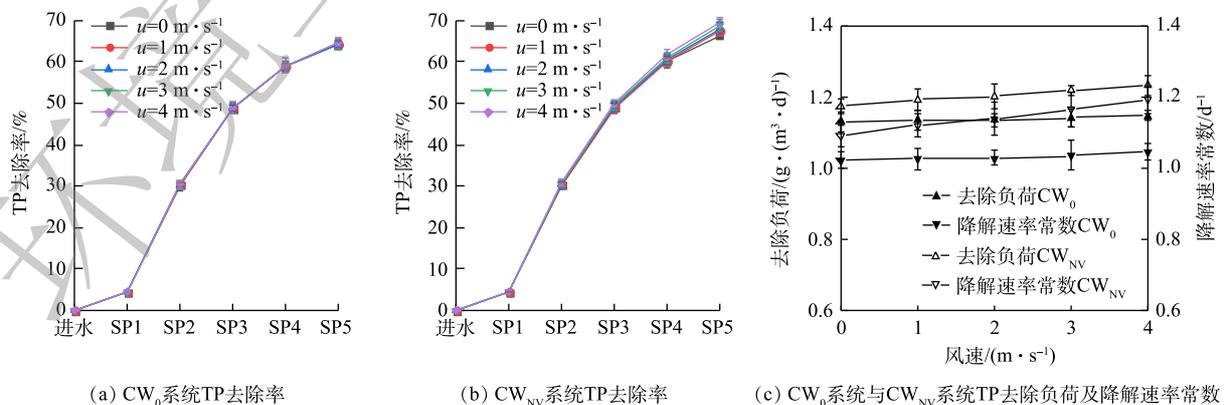


图 6 在不同风速条件下 CW_0 和 CW_{NV} 系统中的磷去除

Fig. 6 Phosphorus removal across CW_0 and CW_{NV} at different wind speed

吸附能力的火山岩和陶粒层 (SP1~SP4 处, 图 6(a) 和图 6(b)), 而仅有 8.1%~11.5% 的磷去除发生在 DO 浓度最高的河沙层 (SP4~SP5 处), 这亦进一步说明填料吸附是 CWs 系统除磷的主要途径。

3 结论

1) 拔风管式自然通风可有效强化湿地内部氧气传递扩散, 显著提高其复氧能力, 从而强化 CWs 中氨化、硝化及有机物好氧生物降解等需氧过程。因此, 自然通风可有效提高 CWs 系统的有机氮、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和有机物去除率及出水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度。

2) 在适宜的风速条件下 ($u \leq 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 湿地中可同时存在好氧与缺氧/厌氧环境, 这既利于硝化作用, 又利于反硝化作用, 从而可使湿地取得较高的 TN 去除效果。

3) 自然通风对于 TP 去除效果的改善十分有限, 仅能提高 2.4%~4.8% 的 TP 去除率。

4) CW_{NV} 中风速与 OTR、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的去除负荷及其降解速率常数之间的关系符合二次方程。

参考文献

- [1] WU H, ZHANG J, NGO H H, et al. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 594-601.
- [2] VYMAZAL J. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 724-751.
- [3] JAN V, TEREZA B. The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: A review[J]. *Environment International*, 2015, 75: 11-20.
- [4] QING Z D, JINADASA K B, GERSBERG R M, et al. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries: A review of recent developments (2000-2013)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141: 116-131.
- [5] 廖雪珂, 严哈璐, 王智源, 等. 低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5509-5517.
- [6] 何兴漾, 刘云根, 李卫东. 不同工艺组合人工湿地系统应用于生活污水除氮效果研究[J]. *环境科学导刊*, 2020, 39(3): 50-54.
- [7] JAN V. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3): 48-65.
- [8] YE F, LI Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1043-1050.
- [9] DONG H, QIANG Z, LI T, et al. Effect of artificial aeration on the performance of vertical-flow constructed wetland treating heavily polluted river water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(4): 596-601.
- [10] ZHUANG L, YANG T, ZHANG J, et al. The configuration, purification effect and mechanism of intensified constructed

- wetland for wastewater treatment from the aspect of nitrogen removal: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122086.
- [11] 林泽群. 人工湿地用于农村生活污水强化脱氮除磷技术及其应用[J]. *农村实用技术*, 2020(6): 161-162.
- [12] JI Z P, HOU H Z, XUE J L, et al. Enhanced nitrogen removal by the integrated constructed wetlands with artificial aeration[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, 14: 100362.
- [13] BEZBARUAH A N, ZHANG T C. pH, redox, and oxygen microprofiles in rhizosphere of bulrush (*scirpus validus*) in a constructed wetland treating municipal wastewater[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, 88(1): 60-70.
- [14] LEE D J, KANG S W, PARK J H, et al. Enhancement of nutrient removal in a hybrid constructed wetland utilizing an electric fan air blower with renewable energy of solar and wind power[J]. *Journal of Chemistry*, 2015: 813827.
- [15] 朱国平, 刘青阳, 韦彦斐, 等. 一种人工湿地无动力充氧装置: CN204625321U[P]. 2015-09-09.
- [16] POZO-MORALES L, FRANCO M, GARVI D, et al. Experimental basis for the design of horizontal subsurface-flow treatment wetlands in naturally aerated channels with an anti-clogging stone layout[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 68-81.
- [17] POUS C. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2005, 51(9): 81-90.
- [18] WANG X, TIAN Y, ZHAO X, et al. Effects of aeration position on organics, nitrogen and phosphorus removal in combined oxidation pond-constructed wetland systems[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 198: 7-15.
- [19] MENG P P, PEI H Y, HU W R, et al. How to increase microbial degradation in constructed wetlands: Influencing factors and improvement measures[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 157: 316-326.
- [20] SAEED T, SUN G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 112: 429-448.
- [21] LIU H, HU Z, ZHANG J, et al. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 214: 797-805.
- [22] FAN J, ZHANG B, ZHANG J, et al. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141: 117-122.
- [23] LIU G, HE T, LIU Y, et al. Study on the purification effect of aeration-enhanced horizontal subsurface-flow constructed wetland on polluted urban river water[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(13): 12867-12880.
- [24] 翟俊, 李岳. 微曝气强化人工湿地处理生活污水试验研究[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 1-7. [2020-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20200629.0904.002.html>.
- [25] ALMUKTAR S A, ABED S N, SCHOLZ M. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent:

A review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(24): 23595-23623.

(责任编辑: 曲娜)

Effects of wind speed on the oxygen transfer and pollutants removal in naturally ventilated constructed wetlands

ZHANG Changping, BAI Jun, WANG Xiaou^{*}, ZHANG Xiaoshuo, TANG Ju, YABO Abel Chat, ZHOU Xiaoxuan

Key Laboratory of Clean Energy Utilization and Pollutant Control in Tianjin, School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

^{*}Corresponding author, E-mail: wangxiaou@hebut.edu.cn

Abstract The oxygen transfer rate (OTR) and removal of organics, nitrogen, phosphorus in a naturally-ventilated constructed wetland (CW_{NV}) installed with an air duct system at different wind speed ($u \leq 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) was systematically investigated. Results showed that the external air could effectively diffuse and dissolve into the wetland interior through the bores on air ducts. Compared to a non-ventilated CW (CW_0), OTR in CW_{NV} ($61.38 \sim 78.30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$) increased by 19.3%~33.5%, and thus the processes of ammonification, nitrification and aerobic degradation of organics in CW_{NV} were enhanced. The removal loads of $\text{NH}_3\text{-N}$ and COD in CW_{NV} were $2.84 \sim 4.57 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and $45.0 \sim 56.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively, they were higher than those in CW_0 by 90.5%~119.6% and 11.9%~23.2%, respectively. The effluent nitrate concentration was $1.10 \sim 10.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in CW_{NV} , while it was only $0.41 \sim 0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in CW_0 . Under moderate wind speed conditions, aerobic and anoxic/anaerobic zones simultaneously existed in CW_{NV} , which was beneficial to both nitrification and denitrification, so that higher TN removal occurred than CW_0 . When the wind speed was $\leq 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the TN removal load in CW_{NV} was $6.70 \sim 6.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ with 17.2%~23.1% higher than that in CW_0 . However, the improvement in TP removal efficiency through natural ventilation was limited with only 2.4%~4.8%. The relationships between wind speed and OTR, removal loads or degradation rate constants of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN in CW_{NV} conformed to quadratic equations.

Keywords constructed wetland; natural ventilation; nitrogen; oxygen transfer; organics; phosphorus