

垂直流人工湿地中污染物昼夜及沿程变化规律

高 敏¹, 朱 伟^{1,2}, 董 婵¹, 赵联芳¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要 利用垂直潜流人工湿地单元模型探讨 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在一昼夜之中随时间及深度的变化规律。结果表明:垂直潜流人工湿地中污染物去除率的变化呈一定的周期性,昼夜差距较大。COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率在 15 00 达到最大,夜间最小。COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在表层(距湿地底部 60~90 cm 段)迅速降低,底部变化幅度较小。TN 浓度沿程的降低趋势很明显。湿地中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 质量浓度的变化趋势与 DO 显著相关,DO 质量浓度越高,越有利于有机物和氮的去除。

关键词 垂直流人工湿地;日变化;沿程变化;有机物;氮;DO

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2010)02-0049-04

Diurnal and spatial variations of pollutants in vertical flow constructed wetland

GAO Min¹, ZHU Wei^{1,2}, DONG Chan¹, ZHAO Lian-fang¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The patterns of variations of COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations with time and space during one day and night were studied in a laboratory-scale vertical flow constructed wetland. The results showed that the removal rate of pollutants had a certain periodicity, and that there was a large difference between day and night. The highest removal rate of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN appeared at 15 00, and the lowest appeared at night. COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ decreased rapidly in the upper part of the wetland (60~90 cm above the bottom), and varied slightly in the middle and lower part. TN decreased significantly along the course of the wetland. The changing trend of COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations was significantly correlated with DO: the higher the DO concentration was in the wetland, the more beneficial DO was to the removal rates of organics and nitrogen.

Key words: vertical flow constructed wetland; diurnal variation; space variation; organics; nitrogen; dissolved oxygen

人工湿地因具有独特的土壤-植物-微生物复合生态系统^[1],污水处理效果好,并具有生态景观美学价值等优点,近年来在国内外已获得广泛应用^[2]。其中,植物在污染物净化过程中起着重要作用^[3],而光合及蒸腾特性是其生长和净化污水的主要能量^[4]和动力来源^[5]。光合作用影响植物根部泌氧,从而间接影响湿地中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化反应^[6-7];蒸腾作用使根系周围的水分蒸发释放到大气中,促进污染物在根围的迁移^[8]。由于受到光强和温度的影响,植物光合作用和蒸腾作用具有明显的昼夜变化规律,进而

导致湿地对污染物的去除率也具有一定的日变化规律。可见,人工湿地在一定的运行工况下,污染物的去除率不是一个定值。因此,了解污染物去除率的日变化规律可以为人工湿地的运行提供理论依据。

人工湿地中有机物、氮的去除都离不开氧的供应^[9]。湿地不同位置 DO 质量浓度差距较大,致使污染物的去除也具有空间差异。鄢璐等^[10]通过试验分析了潜流型芦苇湿地中 DO 和各类污染物的沿程净化效果,发现湿地前部 DO 质量浓度下降趋势明显,中部略有回升,有机物降解主要发生在湿地前

部 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果在湿地中部较明显。可见湿地中污染物会随时间及湿地沿程变化。笔者利用垂直潜流人工湿地单元模型探讨 COD、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度昼夜变化规律及随深度的变化规律。

1 材料与方法

1.1 试验装置

笔者采用下行流人工湿地,小试试验装置如图 1 所示。有机玻璃柱柱体尺寸为 $\varnothing 0.15\text{ m} \times 1.00\text{ m}$, 填料为粒径 $2 \sim 5\text{ mm}$ 的火山渣,处理区总容积为 0.0176 m^3 ,孔隙率为 0.46。采用连续流的运行方式,由恒流泵控制进水,进水流量为 2.88 L/d ,水力负荷为 $0.16\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。湿地植物选用香蒲。

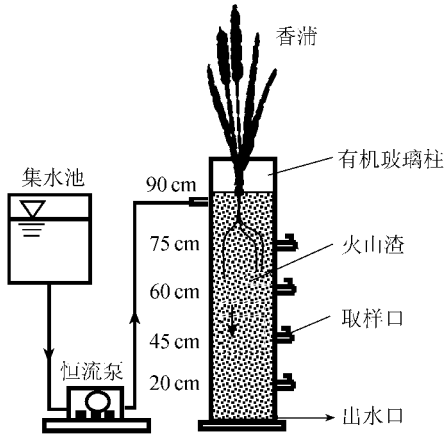


图 1 下行流人工湿地试验装置示意图

1.2 进水水质及分析方法

考虑到人工湿地常用于污水处理厂尾水深度处理,本试验原水以污水处理厂二级处理后的出水进行配制。水质如下:有机物(以 COD 计)用葡萄糖配水,质量浓度为 50 mg/L ;氮(以 TN 计)用氯化铵配水,质量浓度为 15 mg/L ;磷(以 TP 计)用磷酸二氢钾配水,质量浓度为 0.5 mg/L 。

一个昼夜(24 h)为一个周期,每隔 2 h 取进水、出水 and 沿程(距湿地底部 20 cm 、 45 cm 、 60 cm 、 75 cm 处)的水样,监测指标为:DO、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN,各指标测定方法均按照文献[11]进行。

2 结果与讨论

2.1 污染物的昼夜变化规律

试验在 2009 年春天进行,在湿地运行了一个阶段且趋于稳定后,于 4 月 22 日、25 日和 26 日进行了昼夜连续监测。图 2(a)为 4 月 25 日和 26 日湿地进出水 COD 质量浓度及其去除率 2 昼夜的变化曲线。从图 2(a)中看出,COD 出水质量浓度及去除率随时间而变化,且有 2 个峰值出现。白天出水 COD 质量浓度明显降低,到 $15:00$ 出现最低值,分别为 6.95

mg/L 和 7.00 mg/L ,去除效果在此时最好,去除率达到 87.6% 和 87.3% 。随后出水 COD 质量浓度逐渐升高,且无明显波动,凌晨 $3:00$ 去除效果较差,出水 COD 质量浓度分别为 15.04 mg/L 和 14.05 mg/L ,去除率分别为 72.5% 和 75.3% 。上午 $9:00$,COD 的去除效果在 1 d 之中呈平均状态,可分别去除 78.0% 和 76.7% 的 COD。故 $9:00$ 、 $15:00$ 和 $3:00$ 可作为湿地有机物降解的特征时间点。

图 2(b)为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进出水质量浓度及其去除率随时间变化情况,与 COD 相同,也出现明显的波动和峰值。白天出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度显著降低,到 $15:00$ 出现最低值,分别为 3.18 mg/L 和 1.2 mg/L ,并达到最佳的去除效果,去除率分别为 76.5% 和 90.7% 。随后出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度逐渐升高,变化幅度明显,在 $23:00$ 去除效果较差,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度分别为 7.20 mg/L 和 4.51 mg/L ,相应的去除

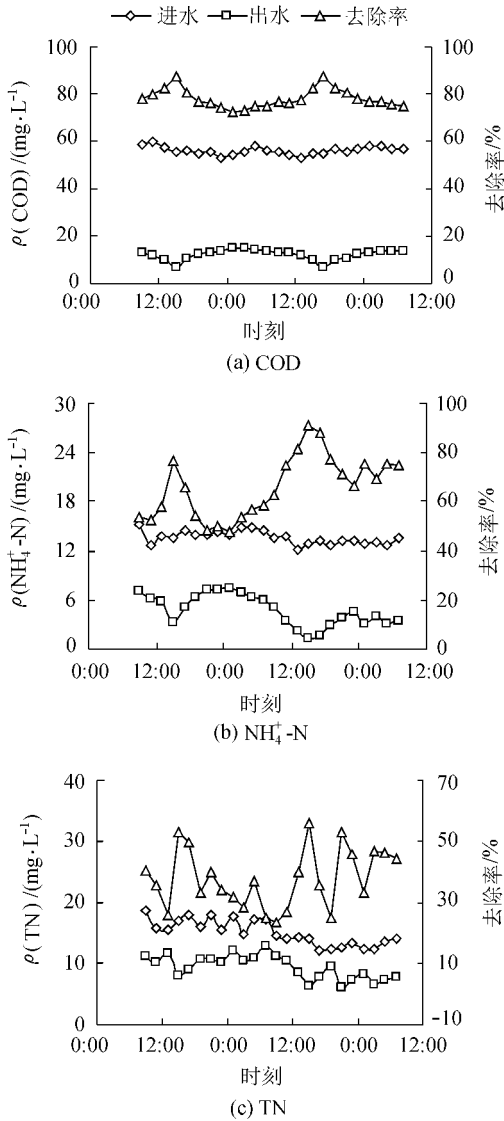


图 2 进出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 质量浓度及其去除率随时间变化曲线

率仅为 49.8% 和 66.0%。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在 1 d 内达到平均去除效果的时间点为 9:00,去除率分别为 53.4% 和 74.9%。故 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的特征时间点为 9:00、15:00 和 23:00。

图 2(c) 为湿地进出水 TN 质量浓度及其去除率随时间的变化情况。由于进水中 TN 质量浓度未能被很好地控制,所以数据表现出较大的离散性。由此得到的 TN 在昼夜间的变化规律没有 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 那么明显,但白天去除率高、夜间去除率低 的趋势仍然能够看到。从去除效果看,在 15:00 湿地对 TN 的去除效果最好,相应的去除率分别为 52.8% 和 55.8%。

在昼夜试验中 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 所体现出的波动变化与植物光合作用及泌氧规律有直接关系。在 1 d 之内湿地 DO 质量浓度呈先升高再降低的变化趋势,且在 11:00 ~ 15:00 之间达到最大值^[12],故湿地中相应时段内 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均随时间延长而增大,且在 15:00 达到最佳去除效果后,随 DO 质量浓度的降低去除率减小。从图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水质量浓度及去除率的波动幅度比 COD 大,这是因为有机物的降解除了好氧微生物发挥作用外,在厌氧环境下,兼性厌氧微生物也积极参与反应^[3],因此降解 COD 对 DO 的依赖程度小于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。图 2(b) 中第 2 个昼夜 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果比前 1 个昼夜好,可能是因为第 2 天光照强度较第 1 天大,植物光合作用更强,可通过根系向湿地中释放更多的氧^[13],满足硝化菌进行硝化作用的需氧量,有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。在硝化反硝化过程中产生的中间产物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 需要在兼氧和厌氧的环境中转化,故 TN 的去除对湿地 DO 质量浓度的依赖性小于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,其昼夜变化特性不如 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 明显。COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 各自的特征时间点也有差异, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果最差的时间点早于 TN 和 COD,这可能是因为到 21:00 以后,光照强度几乎为零,植物光合作用很微弱,难以通过根系向湿地释氧,硝化反应迅速受到抑制,而 TN 的去除包含了硝化和反硝化两个过程,有机物的降解也有兼性厌氧微生物的积极参与,故 3 种污染物去除效果最差的时间点为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 早于 TN, TN 早于 COD。

2.2 污染物的沿程变化规律

在特征时间点处 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在湿地中垂向沿程变化如图 3 所示。由图 3(a) 和图 3(b) 可见进水 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度迅速消耗,在湿地表层(距底部 60 ~ 90 cm 段),大约 70% 的 COD 得以去除,60% ~ 70% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被去除,之后两者的沿程质量浓度变化均很小。可以认为,微生物的活动在湿地

表层以及植物泌氧部非常活跃,白昼之间去除率的差异基本上出现在这些部位。在本次试验的下行流情况下,表层 30 cm 以下的白昼差异并不明显。

图 3(c) 为 TN 质量浓度在特征时间点时湿地中垂向沿程变化。湿地沿程 TN 质量浓度的降低趋势均很明显,在湿地表层(距底部 60 ~ 90 cm 段),TN 的去除率只达到了 40% 左右,湿地中、下部仍然可去除 15% 左右,这种全剖面都表现出下降的趋势,与 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的有所差异。

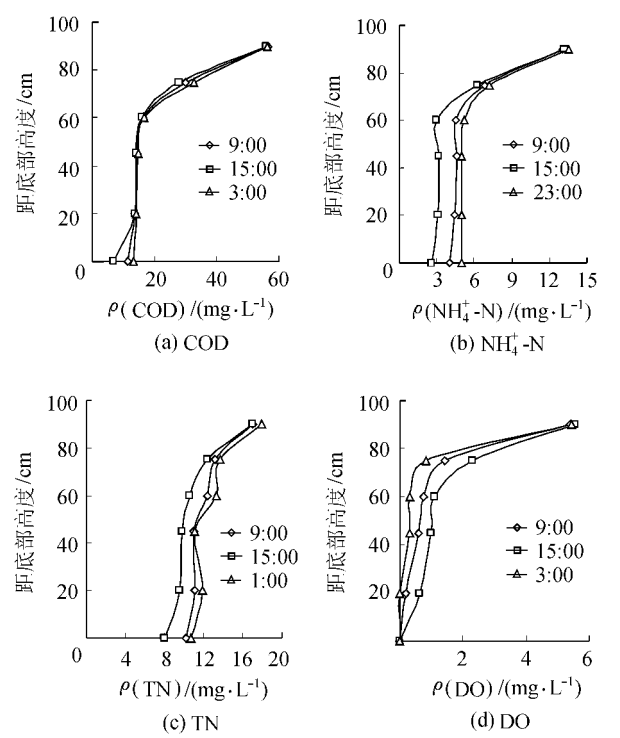


图 3 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、DO 质量浓度垂向沿程变化规律

下行流人工湿地中,DO 的来源主要是污水中原来带有的部分、表面复氧的部分和植物泌氧的部分。这些 DO 都集中于湿地床的表层,因此,床层自上而下依次呈现好氧、兼氧、厌氧的微环境。这些 DO 质量浓度不同的区域,分别有利于污水中不同污染物的降解、转化和去除^[14]。在湿地表层(距底部 60 ~ 90 cm 段),发达的香蒲根系可以将光合作用产生的氧传递释放到湿地基质中,加之进水携带少量 DO,有利于好氧微生物的生长繁殖,故 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度迅速降低。由于 COD 降解和硝化作用消耗了湿地中大量的 DO,在湿地中、下部,兼性菌和厌氧菌占优势,COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在这一部位不能被大量去除,但却利于反硝化的进行,故 TN 在中、下部的降低趋势明显。

鉴于这些昼夜变化与植物的泌氧有很大的关系,因此对湿地 DO 质量浓度各特征点的沿程变化规律进行考察,如图 3(d) 所示。可以看出不同时间 DO 在剖面上存在明显的差异。COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除

率高的 15 m,所有的深度上 DO 的质量浓度明显偏高,而 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率低的 3 m,所有的深度上 DO 的质量浓度明显偏低。证实 DO 是造成昼夜水质变化的主要因素。而 DO 在剖面上的变化,无论是白天还是夜间,80% ~ 90% 的 DO 迅速消耗在表层 30 cm 区间。残余的 10% ~ 20% 在中、下部被逐渐消耗。根据 DO 的这一变化,可以把湿地床分为上部 30 cm 的好氧段和中下部 30 ~ 90 cm 的缺氧、厌氧段,这种分区在昼夜间都存在,但白天的好氧段和缺氧、厌氧段之间的差距更为明显。

3 结 论

a.垂直潜流人工湿地污染物去除率的变化呈一定的周期性,昼夜差距较大。1 个周期内,从凌晨开始,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率随时间逐渐增大,15 m 达到最大值,随后逐渐减少,夜间出现最小值。昼夜间去除率的差距 COD 在 15% 左右, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 25% ~ 30%,TN 仅为 10% 左右。

b.垂直潜流人工湿地污染物质量浓度沿程变化较为明显。在湿地表层(距湿地底部 60 ~ 90 cm)的好氧段,COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度迅速降低,底部变化幅度较小。而湿地中、下部的兼氧和厌氧环境段有利于反硝化作用进行,故 TN 质量浓度仍然会在沿程有一定的降低。

c.湿地中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 质量浓度的变化趋势与 DO 显著相关。下行流湿地中的 DO 在剖面上分为 2 个区,表层 30 cm 为好氧区,中、下层为兼氧和厌氧区。

参考文献：

[1]黄娟,王世和,鄢璐,等.人工湿地污水处理系统脱氮研

(上接第 48 页)

c.地下水“三氮”浓度与包气带厚度成反比,pH 值的变化范围、DO 浓度的高低影响“三氮”的转化方向和速度,另外,高浓度的 Fe^{2+} 是导致局部 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 超标严重的重要因素。

参考文献：

[1]罗泽娇,靳孟贵.地下水“三氮”污染研究进展[J].水文地质工程地质,2002(4):65-69.
[2]乔丛林,史明礼,苏娅,等.淮北平原地区水文特征[J].水文,2000(3):55-58.
[3]吴师.安徽省淮北地区地下水环境质量状况及保护措施[J].水资源保护,2002(2):26-29.

究进展[J].电力环境保护,2006,22(5):33-36.

[2]BRIX H. Function of macrophytes in constructed wetlands[J]. Water Science and Technology,1994,29(4):71-78.
[3]黄娟,王世和,雒维国,等.植物光合特性及其对湿地 DO 分布、净化效果的影响[J].环境科学学报,2006,26(11):1828-1832.
[4]FENNESSY M S,CRONK J K,MITSCH W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. Ecol Eng,1994,2(4):469-484.
[5]黄承才.富营养化水中 14 种野生植物光合和营养吸收的相关性[J].绍兴文理学院学报,2001,21(3):52-56.
[6]POLPRASERT C,KHATTIWADA N R. An integrated kinetic model for water hyacinth ponds used for wastewater treatment[J]. Water Research,1998,32(1):179-185.
[7]王庆安,黄时达,孙铁珩.湿地植物光合作用向水体供氧能力的试验研究[J].生态学杂志,2000,19(5):45-51.
[8]雒维国,王世和,黄娟,等.植物光合及蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响[J].中国环境科学,2006,26(1):30-33.
[9]王宝贞,王琳.水污染治理新技术:新工艺、新概念、新理论[M].北京:科学出版社,2004.
[10]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,2006,27(10):2009-2013.
[11]国家环境保护总局.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.
[12]付融冰,朱宜平,杨海真,等.连续流湿地中 DO、ORP 状况及与植物根系分布的关系[J].环境科学学报,2008,28(10):2036-2041.
[13]BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the rootzone method[J]. Water Science and Technology,1987,19:107-118.
[14]吴晓磊.人工湿地废水处理机理[J].环境科学,1996,16(3):83-86.

(收稿日期:2009-09-10 编辑:徐娟)

[4]阮晓红,王超,朱亮.氮在饱和土壤中迁移转化特征研究[J].河海大学学报:自然科学版,1996,24(2):51-55.
[5]乔光建,张均玲,唐俊智.地下水氮污染机理分析及治理措施[J].水资源保护,2004(3):9-12.
[6]邱汉学,刘贵群,焦超颖.“三氮”循环与地下水污染:以辛店地区为例[J].青岛海洋大学学报,1997,27(4):533-538.
[7]郭建华,彭永臻.异氧硝化、厌氧氨氧化及古菌氨氧化与新的氮循环[J].环境科学学报,2008,28(8):1489-1498.
[8]梁秀娟,肖长来,盛洪勋,等.吉林市地下水中“三氮”迁移转化规律[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(2):335-340.

(收稿日期:2009-03-09 编辑:徐娟)