

王俊力, 陈桂发, 刘福兴, 等. 臭氧氧化-苦草深度处理猪场废水对无机营养盐的去除效果初探[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2195-2201.
WANG Jun-li, CHEN Gui-fa, LIU Fu-xing, et al. The efficiency of combined treatment of ozonation and *Vallisneria spiralis* in removing inorganic nutrients in piggery wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2195-2201.

臭氧氧化-苦草深度处理猪场废水 对无机营养盐的去除效果初探

王俊力, 陈桂发, 刘福兴, 宋祥甫, 邹国燕*

(上海市农业科学院, 上海 201403)

摘要:进行了经氧化塘和人工湿地处理的猪场废水的臭氧氧化-苦草深度处理研究,考察了不同浓度臭氧氧化处理无机营养盐(N、P)含量的变化,和臭氧氧化-苦草处理对去除无机营养盐的作用。结果表明,三个臭氧投加浓度(10、30、50 mg·L⁻¹)分别使 NO₂⁻含量降低 7.7%、17.6%和 21.4%,使 NO₃⁻增加 5.7、4.2 和 2.4 倍,使 PO₄³⁻增加 40.1%、26.0%和 0.7%;臭氧氧化-苦草处理使 TN、NH₄⁺、NO₂⁻、TP 含量分别降低 11.4%~15.7%、29.9%~34.2%、22.6%~40.7%和 36.0%~38.0%,使 NO₃⁻含量增加 0.4~1.0 倍。结果表明,臭氧氧化可以使 N、P 的形态发生变化,且低浓度的臭氧投加就能达到显著效果,苦草显著促进臭氧氧化后猪场处理尾水中无机营养盐的去除。

关键词:臭氧氧化;猪场废水;深度处理;苦草;氮;磷

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2195-07 doi:10.11654/jaes.2016-0560

The efficiency of combined treatment of ozonation and *Vallisneria spiralis* in removing inorganic nutrients in piggery wastewater

WANG Jun-li, CHEN Gui-fa, LIU Fu-xing, SONG Xiang-fu, ZOU Guo-yan*

(Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201403, China)

Abstract: Piggery wastewater contains a high concentration of inorganic nutrients, and piggery effluent from conventional biological treatment processes still contain nutrient-rich matters, which poses a significant threat to surface and groundwater and requires subsequent treatment. In this research, piggery wastewater pretreated from oxidation pond followed by the constructed wetland was further treated by ozonation and *Vallisneria spiralis*. We measured the changes of inorganic nutrients (N and P) content in the piggery wastewater after exposed to different concentrations of ozone (AO1 10 mg·L⁻¹, AO2 30 mg·L⁻¹, AO3 50 mg·L⁻¹) for 30 min followed by growing *Vallisneria spiralis* for 4 weeks. We found that three levels of ozonation treatment decreased NO₂⁻ by 7.7%, 17.6% and 21.4%, respectively, and increased NO₃⁻ by 5.7, 4.2 and 2.4 times, and PO₄³⁻ by 40.1%, 26.0% and 0.7%, respectively. After the treatment of *Vallisneria spiralis*, TN, NH₄⁺, NO₂⁻ and TP were decreased by 11.4%~15.7%, 29.9%~34.2%, 22.6%~40.7% and 36.0%~38.0%, respectively, while NO₃⁻ was increased by 0.4~1.0 times. Our results indicated that ozonation could lead to dramatic changes of the chemical forms of inorganic nutrients even at a low ozone concentration, and culture of *Vallisneria spiralis* could obviously reduce the concentration of inorganic nutrients in the ozone-treated piggery wastewater.

Keywords: ozonation; piggery wastewater; advanced treatment; *Vallisneria spiralis*; nitrogen; phosphorus

收稿日期:2016-04-21

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-004)

作者简介:王俊力(1985—),女,辽宁丹东人,助理研究员,从事水环境治理及水生态修复研究。E-mail:jlwang2014@yeah.net

*通信作者:邹国燕 E-mail:zouguoyan@263.net

近年来,人们对畜禽产品消费需求高速增长,畜禽养殖业向着规模化、集约化发展,随之产生的废物量快速增加^[1]。畜禽养殖废水中含有大量的氮、磷等无机营养盐,是造成水体富营养化的主要物质。虽然传统生化方法处理的养殖废水可以达到我国现行畜禽养殖业污染物排放标准,但与地表水环境质量标准中的劣V类水还有较大差距。2013年中国环境状况公报显示,我国有27.8%的淡水湖泊呈富营养化状态,包括三大湖(太湖、滇池、巢湖)^[2]。富含氮、磷的养殖废水长期排放,严重影响人畜健康及畜禽养殖业的可持续性发展。随着我国环境质量要求的提高,养殖废水排放限制将有大幅度调整,迫切需要进行养殖废水深度处理技术研究。

臭氧具有强氧化性,可通过直接氧化或间接形成羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的机制减少有机与无机污染物含量^[3],这种化学氧化方法在工业污水处理中有广泛应用。臭氧氧化深度处理不仅应用于工业废水,也被逐渐用于地表水、地下水以及畜禽养殖废水处理^[4-5]。研究表明,臭氧氧化持续时间对猪场废水中TN、 NH_4^+ 和TP含量的变化没有影响,但用于蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)培养1d后,猪场废水中的TN、 NH_4^+ 和TP含量可大幅降低^[6],说明生物对臭氧氧化后猪场废水中无机营养盐的去除具有重要作用。由于水生植物在生态系统中广泛存在,不用额外增加经济成本,臭氧氧化-水生植物处理应用于畜禽养殖污染治理对环境可持续发展具有重要意义。

苦草是一种多年生沉水植物,广泛分布于我国各种淡水栖息地,如水沟、河流、池沼、湖泊之中^[7],能够吸收过量的营养盐^[8],在水生生态系统中发挥重要的生态功能,维持水体生态平衡。本研究以经氧化塘和人工湿地处理的猪场废水为试验材料,进行臭氧氧化-苦草深度处理研究,考察了不同浓度臭氧氧化处理中TN、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、TP和 PO_4^{3-} 含量的变化,以及臭氧氧化-苦草处理对猪场处理尾水中上述N、P指标的作用效果,以期猪场废水深度处理提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 试验地点与材料

本试验在上海市农业科学院庄行综合试验基地(121°23'E, 30°53'N)进行。水样采集于上海市农业科学院畜牧试验场猪场的处理尾水。该场以养殖生猪为主,占地面积3.33 hm²,年出栏数3千余头。猪场废水主要包括尿、粪和猪舍冲洗水。日产废水量约5 t,排

放间隔时间为7 d。猪场废水经处理后排放,主要工艺为兼性氧化塘(面积约150 m²,深2 m)、潜流人工湿地(砾石和沸石+芦苇,面积约25 m²,深1 m)和表流人工湿地(面积约2000 m²),处理后尾水水质情况见表1。试验于2015年9—10月进行,每隔7 d采水样1次,共采集4次,采样后尽快进行臭氧氧化处理。

1.2 臭氧氧化处理

臭氧氧化装置如图2所示。由臭氧发生器(WG-S10,上海威固)、臭氧浓度检测仪(IDEAL-2000,美国)、不锈钢增压泵(JETB-0.37)、文丘里射流器(A25152)和气流反应器(自制,不锈钢材质,直径50 cm,高90 cm)组成。通过臭氧发生器制备臭氧,臭氧流量调节为2.5 L·min⁻¹,由臭氧检测仪在线检测臭氧浓度,每次处理的水量固定,设置3个臭氧投加浓度,分别约为10、30、50 mg·L⁻¹,反应时间为30 min,处理时的废水温度约为20℃。处理后的水在通风环境中放置24 h,保证无剩余臭氧,然后用于苦草处理,同时采集水样测定水质指标。

1.3 苦草处理

苦草(*Vallisneria spiralis*,常绿品种,购自上海海洋大学)的培育过程在普通池塘中完成,采集长势和生长量相对一致的幼苗[长度约(40±5)cm]在圆锥形

表1 猪场处理尾水水质
Table 1 The quality of piggery tail water

指标	Parameter	范围(4次采样) Range	平均值(4次采样) Mean
pH		7.99-8.78	8.34
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$		541-953	773.8
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		1.92-4.1	3.04
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		135-219	177
TN/ $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$		8.63-13.68	10.80
NH_4^+ / $\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$		2.50-8.88	5.29
TP/ $\text{mg P}\cdot\text{L}^{-1}$		0.97-1.78	1.27

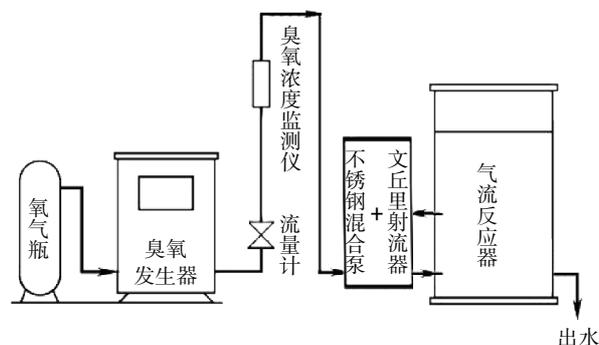


图1 臭氧氧化处理装置图

Figure 1 The equipment of ozonation treatment

塑料桶(上口直径 40 cm,下口直径 32 cm,高 56 cm)中进行前培育,桶中底泥高约 15 cm,每个塑料桶中种植 7 簇,每簇 2 株,并放入池塘水至淹没叶片止,每个塑料桶下方 20 cm 处装有排水口。待幼苗进入正常生长阶段并有外扩能力后,分别加入未处理和不同臭氧浓度氧化处理的水样,之后每 7 d 换一次水,连续 4 次,在换水之前进行水样的采集。

本实验设 4 个处理,3 个不同浓度臭氧氧化处理和 1 个对照,即:BO(对照,猪场处理尾水)、AO1(臭氧投加浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、AO2(臭氧投加浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、AO3(臭氧投加浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。各臭氧氧化后的苦草处理方法相同,每个处理重复 3 次。

1.4 测定指标与方法

总氮(TN)、总磷(TP)测定:TN 采用过硫酸钾氧化法,TP 采用钼锑抗分光光度法^[9]。

阴离子(NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-})、阳离子(NH_4^+)测定:用离子色谱仪(ICS930, Metrohm, 瑞士)进行测定。阴离子流动相为 $3.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$ 和 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 的混合溶液,流速 $0.7 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;辅助流动相为 3%~5% H_2SO_4 。阳离子流动相为 $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$,流速 $0.9 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.5 数据统计分析

用 SPSS 13.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)软件进行统计分析,用 Sigmaplot 12.0 软件完成制图工作。

2 结果与分析

2.1 臭氧氧化-苦草深度处理对猪场废水中氮的去除效果

图 2 为不同浓度臭氧氧化和臭氧氧化-苦草处理对猪场处理尾水中不同形态氮含量的影响。可以看出,臭氧投加浓度对 TN 和 NH_4^+ 的影响差异不显著($P>0.05$,图 2A、图 2C、表 2)。臭氧氧化-苦草处理后, TN 和 NH_4^+ 与对照相比显著下降($P<0.05$,图 2B、图 2D、表 2),AO1、AO2、AO3 的 TN 下降比例分别为 14.4%、11.4%和 15.7%, NH_4^+ 下降比例分别为 29.9%、29.9%和 34.2%(表 3)。苦草对 TN 和 NH_4^+ 具有较好的作用效果,使对照的 TN 和 NH_4^+ 分别下降 24.1%和 55.6%;苦草对臭氧氧化后水样的作用效果更加显著,与苦草处理前比,三个臭氧投加处理的 TN 去除率都为 30%以上, NH_4^+ 都为 66%以上(表 4)。

臭氧氧化和臭氧氧化-苦草处理对猪场处理尾水中 NO_2^- 和 NO_3^- 都有极显著影响($P<0.001$,表 2)。增加臭氧投加浓度有降低水样中 NO_2^- 含量的趋势(图 2E),平均降低百分比分别为 AO1 7.7%、AO2 17.6%、AO3

21.4%(表 3)。臭氧氧化-苦草处理对水样中 NO_2^- 也有降低趋势(图 2F),AO1、AO2、AO3 分别降低了 22.6%、28.8%和 40.7%(表 3)。但苦草处理后,水样中 NO_2^- 整体呈上升趋势,BO 比之前增加 0.6 倍,AO1、AO2、AO3 的 NO_2^- 增加倍数相对较小,分别为 0.3、0.4 倍和 0.2 倍(表 4)。

臭氧氧化使猪场处理尾水中 NO_3^- 含量增加(图 2G),AO1、AO2 和 AO3 与 BO 相比的增加倍数分别为 5.7、4.2 倍和 2.4 倍。水样 NO_3^- 含量经臭氧氧化-苦草处理后也有增加趋势(图 2H),三个臭氧氧化处理分别增加 1.0、0.4 倍和 0.5 倍。苦草处理后,水样 NO_3^- 含量与之前相比显著增加,对照增加 17.6 倍,而 AO1、AO2、AO3 与 BO 相比增幅较小,分别增加 5.4、4.3 倍和 6.8 倍(表 4)。

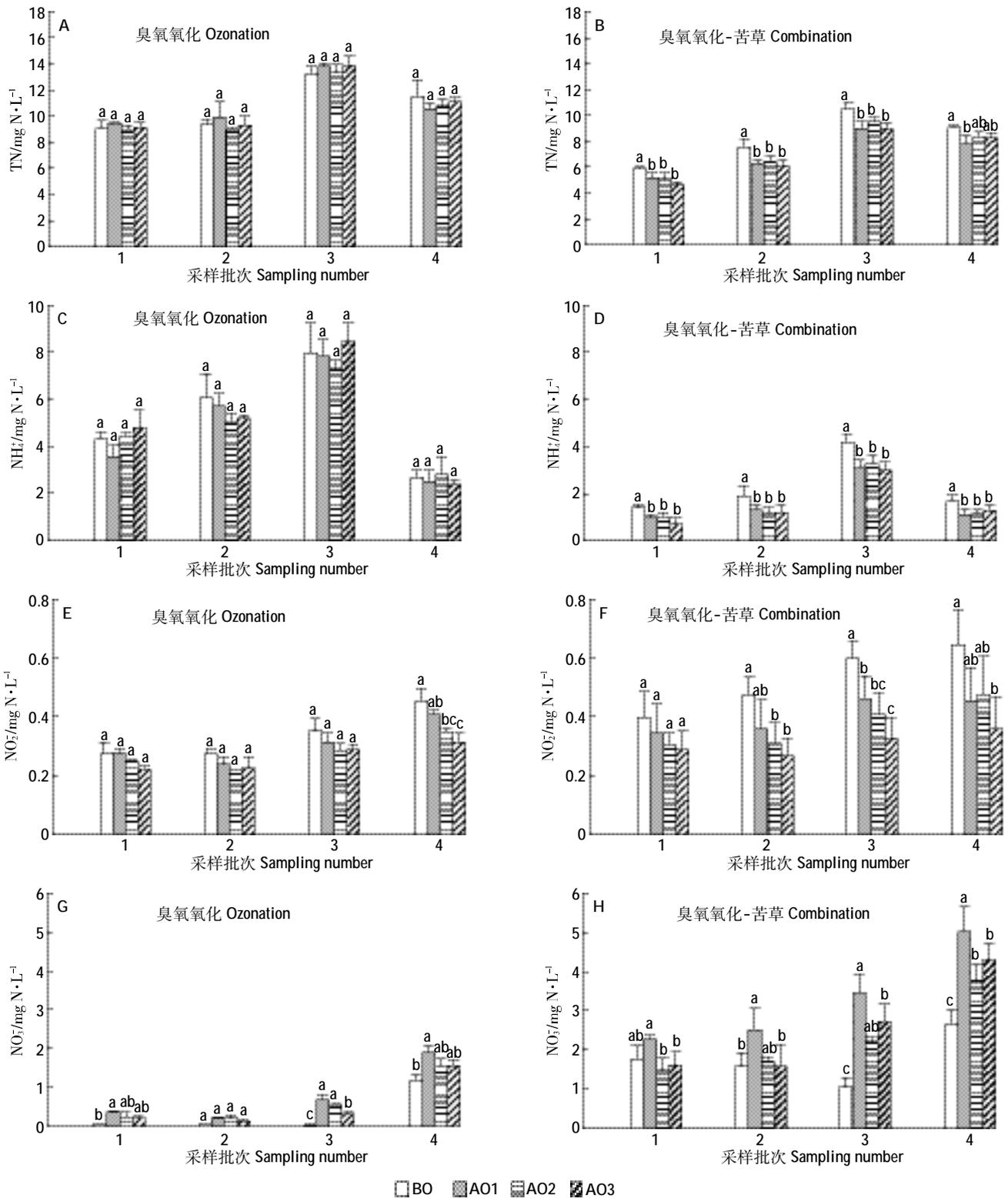
2.2 臭氧氧化-苦草深度处理对猪场废水中磷的去除效果

不同浓度臭氧氧化和臭氧氧化-苦草处理对猪场处理尾水 TP 和 PO_4^{3-} 的影响如图 3 和图 4 所示。臭氧投加浓度对 TP 影响差异不显著($P>0.05$,图 3A、表 2)。臭氧氧化-苦草处理使 TP 含量显著下降($P<0.05$,图 3B、表 2),AO1、AO2、AO3 的 TP 下降比例分别为 36.0%、36.4%和 38.4%(表 3)。苦草处理后,TP 含量整体显著下降,对照比处理前下降 68.4%,AO1、AO2、AO3 的下降更显著,分别为 79.5%、80.4%和 77.2%(表 4)。

不同浓度臭氧氧化对 PO_4^{3-} 含量的影响差异显著($P=0.002$,表 2),臭氧氧化有增加水样 PO_4^{3-} 含量的趋势(图 4),AO1、AO2、AO3 分别平均增加 40.1%、26.0%和 0.7%。臭氧氧化-苦草处理后,各处理中都没有检测到 PO_4^{3-} 含量,说明增加苦草处理对 PO_4^{3-} 的作用效果达到 100%(表 4)。

3 讨论

Gan 等^[6]和 Kim 等^[10]的研究都发现,臭氧氧化处理对猪场处理尾水中 TN、 NH_4^+ 和 TP 含量的影响不显著($P>0.05$),与本试验结果一致(图 2A、图 2C、图 3A)。在本试验中,臭氧氧化处理使水样中 NO_2^- 含量降低, NO_3^- 含量增加(图 2E、图 2G),表明臭氧可以将 NO_2^- 氧化为 NO_3^- ,促进带负电荷氮离子的亲电攻击^[11];由于 NO_3^- 增加量比 NO_2^- 减少量更为明显,说明臭氧氧化可能使水中的有机氮转化为无机形式,且可以进一步氧化为 NO_3^- ^[10]。本试验中,臭氧氧化也增加了 PO_4^{3-} 含量(图 4),说明臭氧氧化使有机磷向利于植物吸收的无机磷形态转化。臭氧投加浓度效应不明显,可能是由于高浓度的臭氧加速了自身分解^[12]。



□BO ▨AO1 ▩AO2 ▪AO3

不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著, 下同

Significant differences within the same sampling number are illustrated with different lowercases (P<0.05). The same as below

图 2 不同浓度臭氧氧化(A, C, E, G)和臭氧氧化-苦草(B, D, F, H)对猪场处理尾水中总氮(TN)、氨态氮(NH₄⁺)、亚硝态氮(NO₂⁻)、硝态氮(NO₃⁻)含量的影响

Figure 2 Total nitrogen(TN), ammonia nitrogen(NH₄⁺), nitrite nitrogen(NO₂⁻) and nitrate(NO₃⁻) concentration of piggy tail water after ozonation(A, C, E, G) and combined ozonation with(B, D, F, H) Vallisneria spiralis

植物依靠截滤作用能去除大部分悬浮物,从而去除水中的氮素^[13]。本试验结果显示,臭氧氧化-苦草处理使水样中的 TN、NH₄⁺和 NO₂⁻营养盐含量显著降低(图 2B、图 2D、图 2F),AO3 的降低更大,分别为 15.7%、34.2%和 40.7%(表 3);NO₃⁻含量则有增加趋势(图 2H),AO1 的增幅最大(1.0 倍)。这说明臭氧氧化-苦草处理可促进氨挥发和氮的硝化、反硝化作用,从而有效去除水体中的氮。沉水植物能够通过吸收、吸附作用吸收水体中的营养物质,有效降低无机营养物质含量水平^[14]。在本试验中,苦草处理使水样中 TN 和 NH₄⁺分别下降 24.1%和 55.6%(表 4),而水样经臭氧氧化-苦草处理后, TN 和 NH₄⁺的去除效率更高,分别达 30%和 66%以上。研究表明,臭氧氧化能增加水体中的溶解氧^[15],上述现象的发生可能与 NH₄⁺在好氧条件下更易发生硝化作用有关,进而通过反硝化作用

将氮去除^[16]。尽管 NH₄⁺可以通过直接挥发等途径从水体中去除,但硝化和反硝化作用才是 TN 去除的主要途径^[17]。本研究结果显示,低浓度的臭氧氧化处理就可以促进这一过程的进行。

表 2 臭氧氧化和臭氧氧化-苦草对猪场处理尾水无机营养盐影响的显著性分析

Table 2 P-values for the effects of ozonation and combined ozonation with Vallisneria spiralis on inorganic nutrients in piggery tail water

指标 Parameters	臭氧氧化 Ozonation	臭氧氧化-苦草 Combination
TN	ns	<0.001
NH ₄ ⁺	ns	<0.001
NO ₂ ⁻	<0.001	<0.001
NO ₃ ⁻	<0.001	<0.001
TP	ns	<0.001
PO ₄ ³⁻	0.002	nd

注: P>0.05 以 ns 表示,无检出以 nd 表示。

Note: Values of P>0.05 are marked non-significant (ns); no detections are marked no detected (nd).

表 3 不同浓度臭氧氧化和臭氧氧化-苦草对猪场处理尾水无机营养盐的去除效果(4次平均值,%)

Table 3 Reduction of inorganic nutrients in piggery tail water after ozonation and combined ozonation with Vallisneria spiralis (Average of four sampling numbers, %)

指标 Parameters	臭氧氧化 Ozonation			臭氧氧化-苦草 Combination		
	AO1	AO2	AO3	AO1	AO2	AO3
TN	ne	2.4	ne	14.4	11.4	15.7
NH ₄ ⁺	8.0	4.8	2.6	29.9	29.9	34.2
NO ₂ ⁻	7.7	17.6	21.4	22.6	28.8	40.7
NO ₃ ⁻	ne	ne	ne	ne	ne	ne
TP	ne	ne	6.7	36.0	36.4	38.0
PO ₄ ³⁻	ne	ne	ne	nd	nd	nd

注: 负值以 ne 表示,无检出以 nd 表示。

Note: Negative values are marked no effect (ne); no detections are marked no detected (nd).

表 4 苦草对猪场处理尾水中无机营养盐的作用效果(4次平均值)

Table 4 Effects of Vallisneria spiralis treatment on inorganic nutrients in piggery tail water (Average of four sampling numbers)

指标 Parameters	BO	AO1	AO2	AO3
TN 去除率/%	24.1	35.8	30.9	36.1
NH ₄ ⁺ 去除率/%	55.6	66.5	67.8	68.1
NO ₂ ⁻ 增加倍数	0.6	0.3	0.4	0.2
NO ₃ ⁻ 增加倍数	17.6	5.4	4.3	6.8
TP 去除率/%	68.4	79.5	80.4	77.2
PO ₄ ³⁻ 去除率/%	100	100	100	100

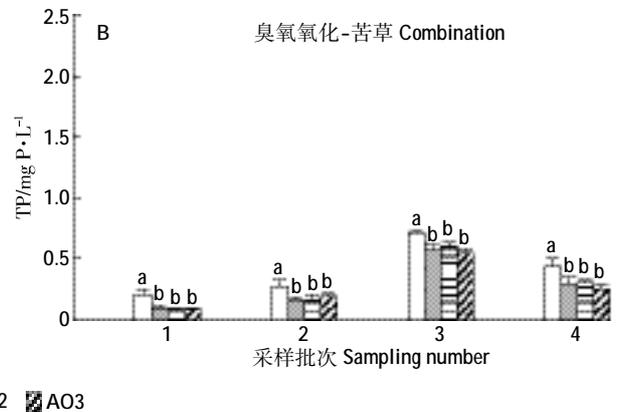
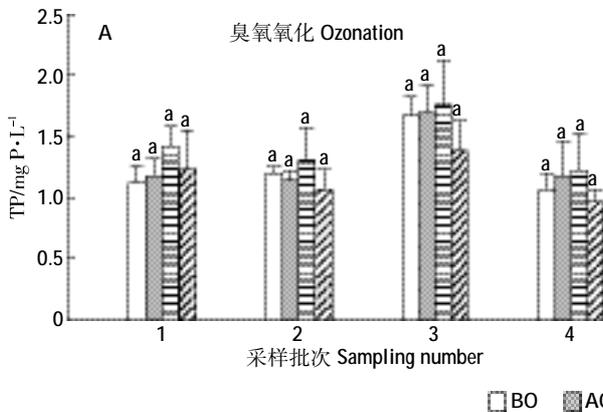


图 3 不同浓度臭氧氧化(A)和臭氧氧化-苦草(B)对猪场处理尾水总磷(TP)含量的影响

Figure 3 Total phosphorus (TP) concentration of piggery tail water after ozonation (A) and combined ozonation (B) with Vallisneria spiralis

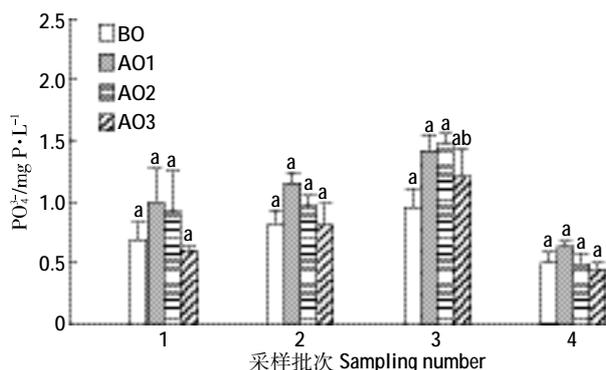


图4 不同浓度臭氧氧化对猪场处理尾水磷酸盐(PO_4^{3-})含量的影响

Figure 4 Phosphate (PO_4^{3-}) concentration of piggery tail water after ozonation

研究表明,TP 的去除与沉淀、粘土颗粒和有机物吸附、阴离子和阳离子交换,以及络合物形成有关^[18];微生物同化作用对 TP 的去除率为 50%~60%,植物吸收为 1%~3%,其余为物理作用、化学吸附和沉淀作用^[19]。在本试验中,臭氧氧化-苦草处理显著降低了水样中 TP 含量(图 3B),去除率达到 36%以上(表 3),可能原因是臭氧氧化水体的强氧化性有利于磷的化学沉淀及沉降吸附^[20];苦草处理后,各处理水中 TP 含量与处理前相比显著下降(表 4),且三个臭氧氧化处理的 TP 去除率都达到 77%以上,表明低浓度臭氧氧化处理就可以促进水中磷的去除。研究表明,沉水植物处理对可溶性磷酸盐的净化效率高于 TP^[21]。在本试验中,经苦草处理后各处理水中都没有检测到 PO_4^{3-} ,则可能与沉水植物生长时直接吸收可溶性磷酸盐有关^[22]。

4 结论

(1) 臭氧氧化处理可以转化氮、磷形态,且低浓度的臭氧投加就能达到显著效果。

(2) 用臭氧氧化方法对猪场尾水作深度处理有促进水中氮的硝化和反硝化作用,并有利于磷的去除。

(3) 低浓度的臭氧处理即可达到显著的无机营养盐去除效果。

(4) 从营养盐去除效果方面看,采用臭氧氧化进行畜禽养殖废水深度处理,对水生生态系统的保护具有积极意义。

参考文献:

[1] Macauley J J, Qiang Z, Adams C D, et al. Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone[J]. Water Research, 2006,

40(10):2017-2026.

[2] 环境保护部. 2013 中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2014:5-15.

State Environmental Protection Administration of China(SEPA). The 2013 annual issue bulletin on environmental situations[R]. Beijing: SEPA, 2014:5-15.

[3] Ratpukdi T, Siripattanukul S, Khan E. Mineralization and biodegradability enhancement of natural organic matter by ozone-VUV in comparison with ozone, VUV, ozone-UV, and UV: Effects of pH and ozone dose[J]. Water Research, 2010, 44(11):3531-3543.

[4] Tay K S, Madehi N. Ozonation of ofloxacin in water: By-products, degradation pathway and ecotoxicity assessment[J]. Science of the Total Environment, 2015, 520:23-31.

[5] Hollender J, Zimmermann S G, Koepke S, et al. Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(20):7862-7869.

[6] Gan K, Mou X Q, Xu Y, et al. Application of ozonated piggery wastewater for cultivation of oil-rich *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Bioresource Technology, 2014, 171:285-290.

[7] Wang C, Zhang S H, Wang P F, et al. Metabolic adaptations to ammonia-induced oxidative stress in leaves of the submerged macrophyte *Valisneria natans* (Lour.) Hara[J]. Aquatic Toxicology, 2008, 87(2):88-98.

[8] Tripathi S, Tripathi B D. Efficiency of combined process of ozone and bio-filtration in the treatment of secondary effluent[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(13):6850-6856.

[9] 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, 2002:84-524.

Satate Environmental Protection Administration. Methods for the monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:84-524.

[10] Kim H C, Choi W J, Maeng S K, et al. Ozonation of piggery wastewater for enhanced removal of contaminants by *S. quadricauda* and the impact on organic characteristics[J]. Bioresource Technology, 2014, 159(5):128-135.

[11] von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine[J]. Water Research, 2003, 37(7):1469-1487.

[12] Macauley J J, Qiang Z, Adams C D, et al. Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone[J]. Water Research, 2006, 40(10):2017-2026.

[13] 沈根祥, 徐介乐, 胡双庆, 等. 浅水体浮萍污水净化系统的除氮途径[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1):42-47.

SHEN Gen-xiang, XU Jie-le, HU Shuang-qing, et al. Nitrogen removal pathways in shallow-water duckweed-based wastewater treatment systems[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(1):42-47.

[14] Angelstein S, Schubert H. *Elodea nuttallii*: Uptake, translocation and release of phosphorus[J]. Aquatic Biology, 2008, 3(3):209-216.

[15] 于衍真, 谭娟, 冯岩. 臭氧组合工艺在水处理中的应用[J]. 工业

- 用水与废水, 2008, 39(3):8-16.
- YU Yan-zhen, TAN Juan, FENG Yan. Application of ozone-combined process in water treatment[J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2008, 39(3):8-16.
- [16] Arunothai J, Hans B. Effects of NH_4^+ concentration on growth, morphology and NH_4^+ uptake kinetics of *Salvinia natans*[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5):695-702.
- [17] Campbell C G, Borglin S E, Green F B, et al. Biologically directed environmental monitoring, fate, and transport of estrogenic endocrine disrupting compounds in water: A review[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(8):1265-1280.
- [18] Upadhyay A, Mishra V K, Pandey S K, et al. Biofiltration of secondary treated municipal wastewater in a tropical city[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(1):9-15.
- [19] 魏成, 刘平. 人工湿地污水净化效率与根际微生物群落多样性的相关性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2401-2406.
- WEI Cheng, LIU Ping. Relationship between wastewater purification and diversity of rhizosphere microorganism in the constructed wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2401-2406.
- [20] Song K Y, Zoh K D, Kang H. Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3):13-18.
- [21] 李红芳, 刘锋, 肖润林, 等. 水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1):157-163.
- LI Hong-fang, LIU Feng, XIAO Run-lin, et al. Effects of aquatic plants on phosphorus adsorption characteristics by sediments in ecological ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1):157-163.
- [22] Cao T, Xie P, Li Z Q, et al. Physiological stress of high NH_4^+ concentration in water column on the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis*[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(3):296-299.

欢迎订阅 2017 年《农业环境科学学报》

《农业环境科学学报》是由农业部主管、农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中国科学引文数据库核心期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊, 列于被引频次最高的中国科技期刊 100 名之内并入编《中国学术期刊(光盘版)》。本刊还被国外多家著名检索机构收录, 如美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ), 美国《剑桥科学文摘社网站: 水系统、水科学与渔业文摘、环境工程、水资源文摘及环境科学与污染管理》等 7 种国际检索系统列为来源期刊。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果, 包括新理论、新技术和新方法。主要栏目有: 专论与综述, 污染生态、土壤环境、面源污染、水体环境、畜禽环境、水产环境、废弃物处理及资源化利用、碳氮循环、分析方法等。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊, 每月 20 日出版, 大 16 开, 208 页, 每本定价 75.00 元, 全年定价 900.00 元。国内外公开发行, 国际标准连续出版物号: ISSN 1672-2043, 国内统一连续出版物号: CN 12-1347/S, 全国各地邮局征订, 邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订, 可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外, 编辑部存有以前各卷合订本, 欢迎选购。

编辑部地址: 天津市南开区复康路 31 号

邮编: 300191

电话: (022)23674336

传真: (022)23674336

电子信箱: caep@vip.163.com nyhjxxb@vip.163.com

网址: <http://www.aes.org.cn>