第 28卷第 10期 环 境 科 学 学 报 Vol 28, No. 10
2008年 10月 Acta Scientiae Circumstantiae Oct , 2008

付融冰,朱宜平,杨海真,等. 2008. 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, 28(10): 2036 - 2041
Fu R B, Zhu Y P, Yang H Z, *et al* 2008. DO and ORP conditions and their correlation with plant root distribution in a continuous-flow constructed wetland treating eutrophic water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 28(10): 2036 - 2041

连续流湿地中 DO、ORP状况及与植物根系分布的关系

付融冰[1,*],朱宜平[2],杨海真[2],顾国维[2]

1. 上海市环境科学研究院,上海 200233
2. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092

收稿日期: 2007-11-09 **修回日期**: 2008-04-03 **录用日期**: 2008-07-25

摘要:构建了水平潜流芦苇人工湿地以处理富营养化河水. 在连续运行的近 2a时间中,对湿地芦苇根系分布、湿地水体溶解氧 (DO)、氧化还原电位 (ORP)的时空变化及水力负荷 (HLR)对 DO、ORP的影响等进行了研究. 结果表明,当年生芦苇 95%的根系生物量分布在 0～20 cm的基质层中,第 2个生长年中 97%的根系生物量分布在 0～35 cm的基质层中,第 2年植物根系在深度方向上有了更大的扩展. 湿地中上层水体 DO和 ORP在沿程方向上是逐渐升高的,底层的变化很小,在水深方向上上层大于中底层. 受芦苇根系主要分布在基质上层的影响,距地表 20 cm的范围内基本属于中等还原环境,中底层水体为强还原环境,水平潜流湿地内部总体上是厌氧状态的. 受植物光合作用及大气复氧作用的影响,湿地水体 DO在 1d之内先升高后降低. 水体 DO及 ORP随着 HLR的增大而降低. 考察了植物根区 ORP状况及根系分布对水体氧化还原状态的影响,结果表明,根系表面的 ORP高达 (260. 6 ±54. 3) mV,远高于水体的 ORP(- 220. 3 ±21. 5) mV. 植物根系的释氧作用提高了根区的氧化能力. 根区的好氧微环境不足以改变湿地内部的整体厌氧状态;但湿地上层大量根系分布仍然起到了改善湿地上层环境氧化状态的作用.

关键词:富营养化河水;水平潜流人工湿地;连续流; DO; ORP;根系分布

文章编号: 0253-2468(2008)10-2036-06 **中图分类号**: X703 **文献标识码**: A

DO and ORP conditions and their correlation with plant root distribution in a continuous-flow constructed wetland treating eutrophic water

FU Rongbing[1,*], ZHU Yiping[2], YANG Haizhen[2], GU Guowei[2]

1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233
2. School of Environmental Science and Engineering, State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092

Received 9 November 2007; **received** in revised form 3 April 2008; **accepted** 25 July 2008

Abstract: A subsurface horizontal-flow constructed wetland planted with *Phragmites australis* was developed and used to treat eutrophic water for nearly two years. The plant root distribution, spatial and temporal changes of dissolved oxygen (DO) and oxidation reduction potential (ORP) in wetland water and their correlation with hydraulic loading rate (HLR) were investigated. The influence of plant root distribution on the redox condition of constructed wetlands (CWs) was further analyzed. In the first year, 95% of the root biomass was distributed in the top 0～20 cm and in the second year, 97% of root biomass was distributed in the top 0～35 cm. In the second year of growth, the plant roots significantly extended through a larger proportion of the wetland substrate. DO and ORP of the upper and middle layers of water increased horizontally with the water flow, but the DO and ORP of the bottom water remained nearly constant. DO and ORP decreased with depth. Because of the influence of root biomass distribution in the upper water layer, the environment from the surface to 15 cm deep was moderately reducing, while deeper layers were strongly reducing. As a whole, subsurface horizontal-flow constructed wetlands with continuous flow are anaerobic environments. Due to plant photosynthesis and atmospheric reaeration, water DO initially increased and then decreased over a day. DO and ORP of wetland water decreased as HLR increased. Measurement of the rhizosphere redox potential showed that the microenvironment of the rhizosphere was more oxidising (ORP (260. 6 ±54. 3) mV) than bulk water (ORP(- 220. 3 ±21. 5) mV). Oxygen transportation of plant to roots enhances oxidation ability of rhizosphere which cannot change the total anaerobic environment but effectively contributes to improve the aerobic condition of upper water layers in the constructed wetland.

Keywords: eutrophic water; subsurface horizontal-flow constructed wetland; continuous flow; DO; ORP; root distribution

基金项目: 江苏省交通厅资助项目 (No. 02Y031)
Supported by the Jiangsu Provincial Communications Department (No. 02Y031)

作者简介: 付融冰 (1973—),男,博士; *通讯作者 (责任作者), E-mail: rongenmmfu@163. com
Biography: FU Rongbing (1973—), male, Ph. D.; * **Corresponding author**, E-mail: rongenmmfu@163. com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　引言 (Introduction)

DO和 ORP是反映人工湿地中氧化还原状态的重要指标,是微生物活动以及有机物质降解和营养盐转化的重要影响因素. 湿地系统中的氧化还原状态由许多因素共同决定,如湿地类型、微生物活动、植物种类及生长状况、污染负荷等;一旦湿地构建完成,运行条件确定,湿地植物对湿地水体氧化还原状态及溶解氧浓度的影响将会变得明显. 由于植物根区的存在以及微生物活动的影响,湿地中不同区域会存在不同的氧化还原状况 (Kuschk *et al*, 1999; Hammer *et al*, 1994). 植物主要通过基于浓度梯度的分子扩散和空气对流运动将大气中的氧气通过植物组织输送到根区,再通过根系向外释放供给微生物活动 (Armstrong *et al*, 1990; Jackson *et al*, 1999; WieXner *et al*, 2002; Colmer, 2003). 据研究,湿地植物根区具有更高的 ORP,根区的氧化能力比较强 (Marschner *et al*, 1987; Steinberg *et al*, 1994),有植物的湿地中 ORP会比无植物湿地高 (Burgoon et *al*, 1995; Dunbabin *et al*, 1998; Tanner *et al*, 1999). 因此,植物的生理活动及根系在基质中的分布对湿地水体溶解氧及氧化还原状况具有重要影响,了解湿地植物生长及系统中 DO和 ORP情况具有重要意义. 由于植物生长状况年际间差异很大 (金卫红等, 2007),而且湿地中影响因素较多,测定数据不稳定,需要从长期的运行研究中获得湿地内部真实的氧化还原状况;然而,目前对湿地水体溶解氧状况的研究时间都较短,缺乏长期的统计研究结果.

本研究中构建水平潜流人工湿地以处理富营养化河水,湿地连续运行 20个月. 在 2个生长年中对湿地水体 DO、ORP的时空变化、受水力负荷的影响以及植物根区 ORP的变化等进行了测定,并对芦苇的根系分布状况进行了考察,分析植物根系分布对湿地水体氧化还原状态的影响,旨在为潜流湿地的研究及应用提供理论支持.

2　材料与方法 (Materials and methods)

2.1　人工湿地构建与运行

在上海地区的自然环境中构建了 3组水平潜流人工湿地. 装置由 PVC板材制成,长 ×宽 ×深为 1.5 m ×0.4 m ×0.6 m,如图 1所示. 在湿地中央沿水流方向垂直设置了 4根穿孔管 (内径 5 cm),位置分别在湿地起始端、距起始端 1/3处和 2/3处以及湿地末端. 湿地 W3用穿孔板隔成等体积的 4个单元,其中第一个单元不栽种植物,作为无植物对照. 床体内部填充粒径约 10 mm的砾石和土壤 (质量比为 4∶1),填充深度为 55 cm. 在第 1年的 5月份将芦苇 (*Phragmites australis*)根系培植在湿地表面下 5 cm处的基质中,初始种植密度为 24株 ·m^{-2}. 湿地运行水深为 50 cm,污水在基质表面以下流动.

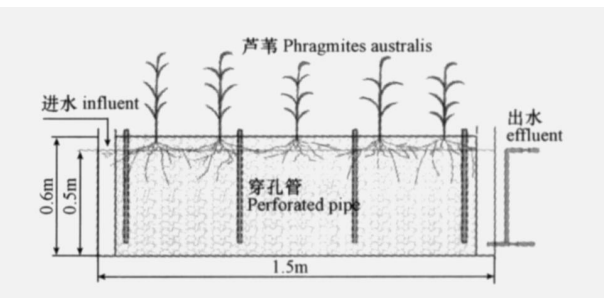

图 1　潜流水平人工湿地结构图

Fig. 1　Schematic of the subsurface horizontal flow wetland

处理的富营养化河水 COD_{Cr}为 44.5～103.3 mg·L^{-1},氨氮为 1.5～10.3 mg·L^{-1}, TN为 4.6～15 mg·L^{-1}, TP为 0.57～1.72 mg·L^{-1}. 采用连续流的运行方式,用恒流泵控制进水,自然溢流出水. 在每个季节 W1的 HLR分别按 29 mm·d^{-1}、38 mm·d^{-1}、57 mm·d^{-1}和 114 mm·d^{-1}运行,相应运行时间分别约为 15 d、20 d、25 d和 30 d,湿地 W2和 W3的 HLR为 71 mm·d^{-1}. 湿地运行时间为当年的 5月份到第 3年的 1月份.

2.2　DO和 ORP的测定

为真实地反映湿地内部情况,测定湿地水体 DO和 ORP时,直接将溶氧仪或 ORP仪探头伸入到湿地中的穿孔管中进行. ORP采用 pH/ION 340i(WTW)测定, DO采用 YSI 550A溶解氧测定仪测定.

芦苇根系表面 ORP的测定在进水池中进行. 在生长过程中,芦苇的许多根系通过穿孔板伸展到进水池和出水池中,比较便于直接进行测定,文中测定的是根与污水界面处的值.

2.3　植物根系生物量测定

分别在第 1个生长年的 12月底和第 2个生长年的 12月初收割湿地地上部分植物,并在 W3中测定地下根系生物量. 选取种植芦苇的单元 (30 cm × 40 cm),按照每 10cm的深度将根系挖出,轻轻抖动根系,将镶嵌和附着在根系中的基质分离,然后用水将根部冲洗干净,风干,在 80℃下烘至恒重,取出

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

后迅速称量.

3 结果 (Results)

3.1 植物根系生物量分布

如图 2所示,第 1年芦苇 95%的根系生物量分布在 0～20 cm的基质层中,须根长者可达湿地底部.第 2年 90%的芦苇根系生物量分布在 30 cm的基质层中,97%的生物量分布在 35 cm的基质层中.当年生芦苇主根系长大多在 15～30 cm,直径一般为 0.5～1.2 cm,第 2年生主根系长大多为 20～50 cm,直径一般在 0.8～1.8 cm.第 2年植物根系在深度方向上有了更大的扩展,主根系生长得也更为茁壮.

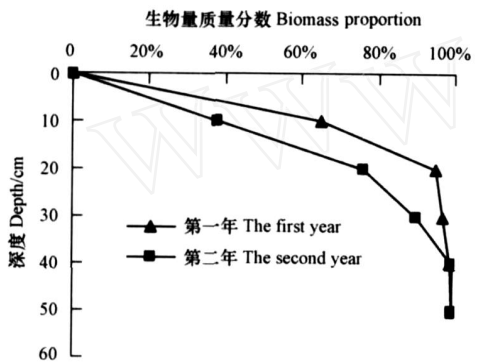

图 2 两个生长年内芦苇地下生物量沿深度变化

Fig 2 Underground biomass proportion vs depth of CW in the first and second growth years

3.2 湿地水体 DO变化

3.2.1 湿地水体 DO沿程及垂向变化 图 3为潜流水平湿地 W2中溶解氧的沿程及垂向变化.由图可知,在湿地沿程方向上溶解氧从前往后是逐次升高的,湿地的后部升高的较大,后部上层 DO比前部上层升高了 63.1%.湿地中层从前往后也是略有升高的,下层 DO前后差别不大,基本维持在 0.09 mg·L^{-1}左右.因此,潜流湿地水体 DO的变化主要发生在上层和中层,上部 DO最高.

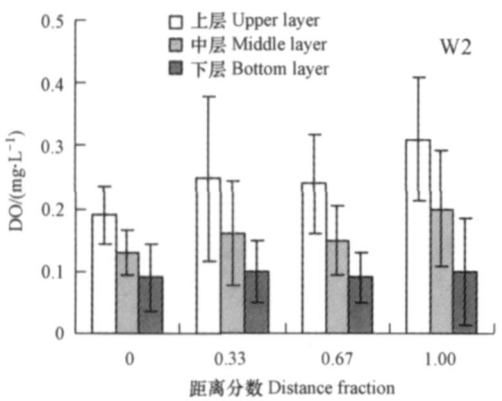

图 3 湿地水体溶解氧沿程变化 (n = 18;距离分数为测点到湿地前端的距离与湿地总长的比例;上、中、下层分别指离水面 5、25、50 cm处,下同)

Fig 3 DO in the CW along the bed (n = 18; distance fraction means ratio of length between sample site and wetland inlet to total length of wetland; upper, middle and bottom layers are 5 cm, 25 cm and 50 cm below the surface water level)

3.2.2 湿地水体 DO日变化 在 1个月的时间内选取了天气正常的 8d进行测定气温、光强和湿度.气温为 28～35℃,光强和湿度如图 4所示.测定上述参数时同时测定湿地中 DO,如图 5所示 (湿地 W2

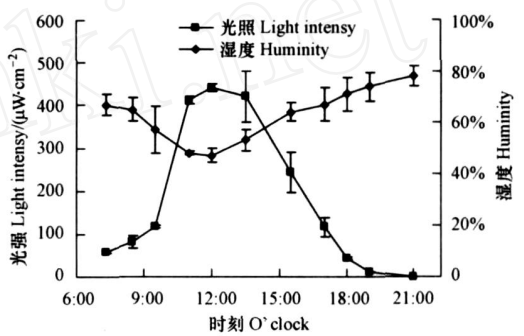

图 4 光照和湿度日变化 (n = 8)

Fig. 4 Daily variation of light intensity and relative humidity (n = 8)

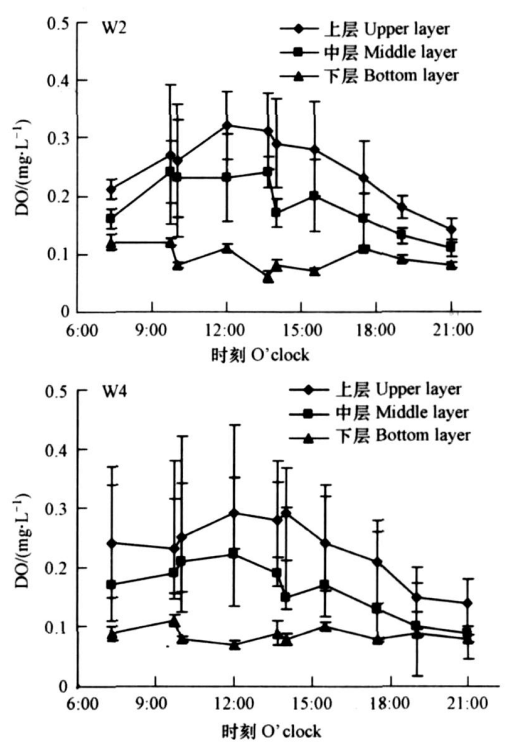

图 5 湿地内部水体溶解氧日变化 (n = 8)

Fig. 5 Daily variation of water DO in the CW (n = 8)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

每一时刻对应的数值为一层上 4个测定值的平均值,W4的数值为湿地前端无植物部分的 1个测定值).芦苇湿地和无植物湿地水体 DO在 1天之内按照先升高后降低的规律变化,变化最大的是湿地的上层,其次是中层,底层 DO基本维持不变.湿地水体 DO在中午 11:00到下午 15:00之间达到最大值.比较湿地 W4无植物部分水体的 DO与 W2相应部位水体 DO发现,有植物湿地水体 DO比无植物的提高了 6.3%～13.5%.

3.2.3　HLR对湿地水体 DO的影响　图 6为湿地 W1水体在不同的 HLR下 DO浓度,图中上、中、下层的值分别为湿地每一层前后 4个测定值的平均值.由图可知,在 HLR分别为 252 mm·d^{-1}、87 mm·d^{-1}和 36 mm·d^{-1}时,床体底层的 DO相差不大,中层的 DO有一定差别,上层差别最大.HLR为 36 mm·d^{-1}时的上层水体 DO浓度是 HLR为 87 mm·d^{-1}和 252 mm·d^{-1}时的 1.7倍和 2.5倍,HLR对湿地床体中上层 DO影响较大

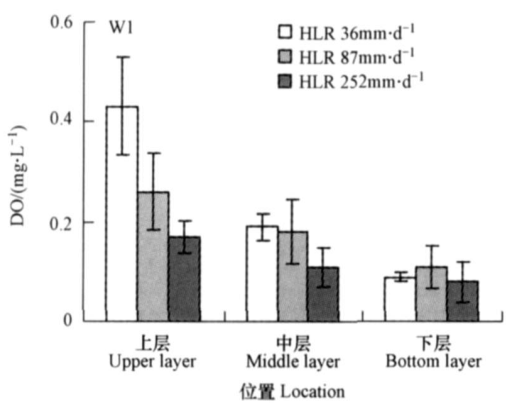

图 6　水力负荷对湿地水体 DO的影响 (n = 5)

Fig 6　The influence of HLR on DO in CW (n = 5)

3.3　湿地水体 ORP变化

3.3.1　湿地中水体 ORP沿程及垂向变化　在 2个生长年之内,湿地内部水体的 ORP情况见图 7.固定负荷湿地 W2的水体 ORP为(-260.9 ±45.2)～(-146.7 ±34) mV,潜流湿地水体为中等和较强的还原状态.水体 ORP沿水流方向是逐渐升高的,升高的幅度以水体上层 10 cm范围内较为显著,水体中部和底部 ORP升高缓慢,特别是底部水体 ORP浮动最小.根据 Kadlec和 Knight(Kadlec *et al*, 1996)的划分,湿地 W2底层、中层的前 3/4段以及上层前 1/4段水体 E_h < -200 mV,属于强还原环境,其余部分 E_h > -200 mV,属于中等还原环境,特别是湿地后部 ORP升高程度较大.

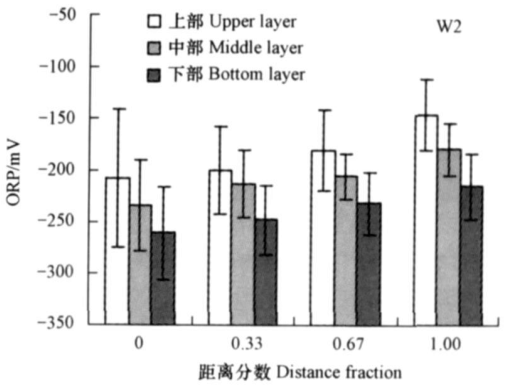

图 7　人工湿地水体 ORP沿程变化 (n = 25)

Fig 7　Change of water ORP along the CW (n = 25)

湿地 W2和 W3前端水体沿深度方向的 ORP变化见图 8.由图可见,芦苇湿地和无植物湿地从水面到底部水体 ORP均依次降低,在距离水面 15cm之内基本属于中等还原环境;超过该范围后水体为强还原环境,越靠近底部水的还原性越强.W2和 W3底部水体 ORP基本相同,但是 W2中上部 ORP比 W4最大可提高 12%,主要是因为床体上部水体受植物根系影响较大,而且 90%以上的芦苇根系主要集中在湿地上部 30 cm的基质层中,根系的输氧作

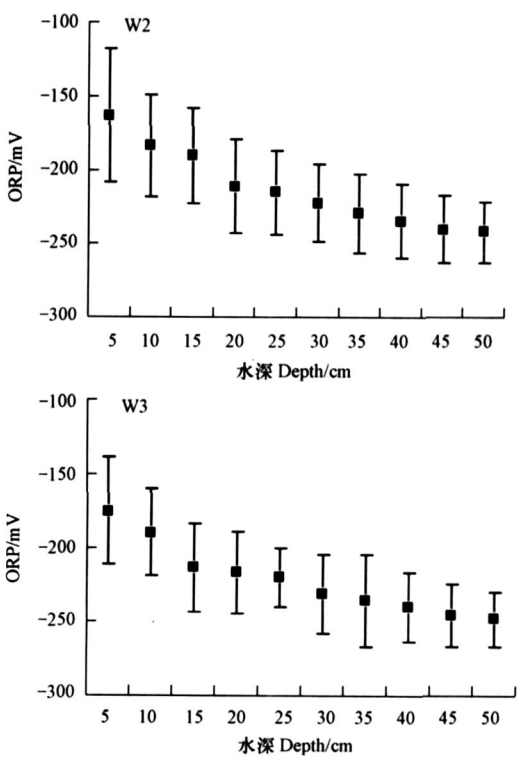

图 8　湿地水体 ORP随水深的变化 (n = 5)

Fig 8　Change of water ORP vs depth (n = 5)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用改善了根区的还原环境.

3.3.2 HLR对湿地水体 ORP的影响 在 2006年 7～8月份,植物生长、进水水质及 DO相对稳定的时期考察了 W1湿地内部水体 ORP在不同 HLR下的变化情况,见图 9.人工湿地沿程方向上有 4个测点,每个测定分上、中、下 3个位置,因此,每一个层面上有 4个测定值,取平均作为该层上 ORP值,5次这样的平均值的平均作为图中各部位的 ORP值.由图可见,湿地中各部位水体 ORP随 HLR增大而降低,HLR为 252 mm·d^{-1}时,E_h < - 250 mV,属于强还原状态;当 HLR为 36 mm·d^{-1}时,湿地水体 ORP除了底部之外已经大于 - 200 mV,属于中等还原水平.

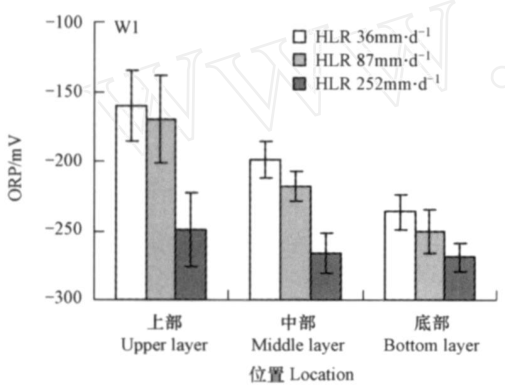

图 9 水力负荷对湿地水体 ORP的影响 (n = 5)

Fig 9 The influence of HLR on water ORP in CW (n = 5)

3.4 植物根区 ORP变化

在气温 33℃、相对湿度 48.4%、光强 397.8 ～ 441.7 μW·cm^{-2}的条件下,对芦苇根系表面 ORP测定了 7次.结果表明,芦苇根系表面的 ORP为 (260.6 ±54.3) mV,远远高于水体主体的 ORP ((-220.3 ±21.5) mV).随着距根面距离的增大,水体 ORP迅速降低,这种氧化状态仅限在根区很小的范围内.植物根际这种好氧条件为好氧微生物提供了生存环境,提高了根区的氧化能力,这对改善整个床体的还原状况和污染物的降解有积极作用.

4 讨论 (Discussion)

4.1 根系生物量在基质中的分布

在 2个生长年中,芦苇根系生物量在基质中的分布发生了较大的变化.受当年芦苇移植的影响,根系大部分生物量基本限于 20 cm深的基质层中,第 2年湿地生态系统更加稳定和完善,根系向深层有了较大扩展.砾石水平潜流湿地中植物根系主要分布在上部较浅的基质层中,这与 Tanner的研究结论相似 (Tanner 1996; 2001).根系生物量分布较大的区域对于改善水体的还原环境有一定作用.

4.2 湿地水体 DO时空变化及 HLR对其影响

湿地中水体 DO沿水流方向逐渐升高,这是因为湿地前端承受的污染负荷高,有机物好氧降解速率和硝化速率高,故溶解氧消耗快.有植物和无植物湿地水体 DO上部较下部高,而且在在 1天内都是先升高后降低的,这说明虽然水面在湿地基质以下运行,但是大气复氧仍起到了重要作用.同时,有植物湿地 DO比无植物的高,说明植物向湿地水体中的释氧作用确实存在.植物主要通过光合作用引起氧浓度差导致分子扩散作用加强;光照增强使芦苇茎内外温差增加,由温差诱导的对流作用加大;另外,光照使得植物表面以及周围大气湿度降低,增加了植物茎内外的湿度差,由湿度诱导的对流作用也增强 (Brix, 1993).在以上诸多因素的作用下,芦苇向地下传输氧气的速率加大,而在植物输氧的同时湿地内部有机物的降解和氨氮的转化也同时进行,使得大部分的氧迅速得到消耗,因此,水体中的溶解氧浓度升高有限.

HLR对水体 DO的影响主要是污染负荷的改变引起好氧微生物降解速率改变;即 HLR大,相应污染负荷也增大,好氧微生物降解有机物和氨氮的耗氧速率也加快.

4.3 湿地水体 ORP时空变化及 HLR对其影响

湿地水体 ORP空间变化及受 HLR的影响规律基本与水体 DO相似.氧化还原电位是一个综合湿地内部所有生化反应的氧化还原性的总体指标,受进水 DO、进水水质波动以及植物生长、微生物活动等因素影响.通过对湿地水体 ORP的测定可以看出,连续运行的水平潜流湿地内部主要是厌氧环境的.

HLR增大,微生物降解有机物、氨氮的耗氧速率也增加,还原性物质积累也较多,水体 ORP降低明显.

4.4 芦苇根系分布对湿地水体 DO和 ORP的影响

对芦苇根系表面的 ORP的测定结果表明,根系表面 ORP可达 (260.6 ±54.3) mV,呈氧化状态,这是植物从地上向底下输氧作用的结果.芦苇上部叶片光合作用产生的氧气通过分子扩散和对流的方式输送到地下根系,再通过根系表皮上的输气组织扩散到根区,使得根区附近氧化还原状况发生改

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变.通过比较有植物和无植物湿地系统发现,有植物湿地上部 DO和 ORP比无植物湿地的高,这说明虽然根区好氧微环境不能改变湿地内部整体的厌氧状态,但是,大量根系的分布仍然起到了改善湿地上层氧化环境的作用.

5 结论 (Conclusions)

1) 在 2年中,湿地芦苇根系生物量在基质中的分布发生了较大的变化.第 1年中芦苇 95%的根系生物量分布在 0～20 cm的基质层中,第 2年芦苇根系 90%的生物量分布在 30 cm的基质层中,97%的生物量分布在 35 cm的基质层中.第 2年植物根系在深度方向上有了更大的扩展,主根系生长得也更为茁壮.

2) 对水平潜流湿地内部 DO及 ORP的空间变化测定结果表明,DO和 ORP在湿地中上层的沿程方向上是逐渐升高的,湿地后端升高的幅度较大.在水深方向上层大于中层和底层,底层 ORP和 DO变化很小,特别是 DO,基本维持在 0.09 mg·L^{-1}左右.DO的在水深方向上的变化主要是是由植物释氧及大气复氧双重作用引起的,根系释放的氧主要用于微生物消耗,使水中 DO升高的程度有限.总体来看,水平潜流湿地内部基本上是厌氧环境.

3) 湿地水体 DO在 1天之内按照先升高后降低的规律变化,湿地上层变化最大,其次是中层,底层 DO基本维持不变.湿地水体 DO在中午 11:00～15:00达到最大.植物根系主要分布在湿地基质上层 35cm 基质内,DO 的在这一范围内升高的较明显.

4) 潜流水平湿地按不同 HLR运行时,对湿地底层水体 DO和 ORP变化影响不大,对上层 DO和 ORP影响最大.随着 HLR增大,相应污染负荷增大,微生物需要消耗更多的氧来进行有机物的降解和氨氮等的转化.

5) 对芦苇根际 ORP的测定表明,根系表面的 ORP((260.6 ±54.3) mV)远远高于水体的 ORP((-220.3 ±21.5) mV).植物根际这种好氧条件为好氧微生物提供了生存环境,提高了根区的氧化能力.根区好氧微环境不能改变湿地内部整体的厌氧条件,但是,大量根系的分布仍然起到了改善湿地上层氧化环境的作用.

责任作者简介:付融冰 (1973—),男,博士,主要研究方向为水污染控制技术与土壤修复技术,目前发表论文 20余篇.
E-mail: rongemmfu@163.com.

References:

Armstrong J, Armstrong W. 1990. Light-enhanced convective throughflow increases oxygenation in rhizomes and rhizosphere of Phragmites australis Cav. Trin. ex Steud [J]. New Phytologist, 114(1): 121—128

Burgoon P S, Reddy K R, DeBusk T A. 1995. Performance of subsurface flow wetlands with batch-load and continuous-flow conditions [J]. Water Environment Research, 67(5): 855—862

Brix H. 1993. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates [A]. Moshiri G A. Constructed wetlands for water quality improvement [C]. Baca Raton: CRC Press, 391—398

Colmer T D. 2003. Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial loss from roots [J]. Plant, Cell and Environment, 26 (1): 17—36

Dunbabin J S, Pokorny J, Bowmer K H. 1988. Rhizosphere oxygenation by Typha domingensis in miniature artificial wetland filters used for metal removal from wastewaters [J]. Aquatic Botany, 29: 303—317

Hammer D A, Knight R L. 1994. Designing constructed wetlands for nitrogen removal [J]. Water Science and Technology, 29(4): 15—27

Jackson M B, Armstrong W. 1999. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence [J]. Plant Biology, 1 (3): 274—287

Jin W H, Fu R B, Gu G W. 2007. Plant growth characteristics and nutrient uptake from eutrophic water in constructed wetlands [J]. Research of Environmental Sciences, 20(3): 75—80 (in Chinese)

Kadlec R H, Knight R L. 1996. Treatment Wetlands [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 119—126

Kuschk P, Wießner A, Stottmeister U. 1999. Biological processes in wetland systems for wastewater treatment [A]. Rehm H J, Reed J. Biotechnology [C]. Weinheim: VCH-Wiley. 242—252

Marschner H, Römheld V, Cakmak I. 1987. Root-induced changers of nutrient availability in the rhizosphere [J]. Journal of Plant Nutrition, 10: 1175—1184

Steinberg S L, Coonrod H S. 1994. Oxidation of the root zone by aquatic plants growing in gravel-nutrient solution culture [J]. Journal of Environmental Quality, 23(5): 907—913

Tanner C C. 1996. Plants for constructed wetland treatment systems-A comparison of the growth and nutrient uptake characteristics if eight emergent species [J]. Ecological Engineering, 7: 59—83

Tanner C C. 2001. Growth and nutrient dynamics of soft-stem bulrush in constructed wetlands treating nutrient-rich wastewaters [J]. Wetlands Ecology and Management, 9: 49—73

Tanner C C, D'Eugenio J, McBride G B, *et al*. 1999. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms [J]. Ecological Engineering, 12: 67—92

Wießner A, Kuschk P, Kästner M, *et al*. 2002. Abilities of helophyte species to release oxygen into rhizosphere with varying redox conditions in laboratory-scale hydroponic systems [J]. International Journal of Phytoremediation, 4(1): 1—15

中文参考文献:

金卫红,付融冰,顾国维. 2007. 人工湿地中植物生长特性及对氮磷的吸收 [J]. 环境科学研究, 20(3): 75—80

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net