

人工湿地的磷去除机理

卢少勇^{1,2}, 金相灿¹, 余 刚²

1. 中国环境科学研究院湖泊环境研究中心//国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012;

2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084

摘要:人类生产和生活所产生的磷负荷导致了全中国范围湖泊的富营养化, 控制此磷负荷的廉价而有效的具有非常广阔的应用前景技术是人工湿地技术。人工湿地中的磷的存在形态主要有有机磷(生物态和非生物态的)、磷酸、可溶性磷酸盐和不溶性磷酸盐。文章总结了人工湿地中的磷去除机理, 在防渗人工湿地系统中, 主要的磷去除机理包括化学作用(如沉淀作用和吸附作用); 生物作用(如植物吸收作用和微生物吸收与积累作用)和物理作用(如沉积作用)。在未防渗的人工湿地系统中, 湿地系统和周围水体(如地下水)的交换量对湿地的磷去除有重要的影响。通常情况下, 物理作用和化学作用是人工湿地中最主要的磷去除途径。人工湿地中微生物对磷的去除作用的大小和其所处环境中的氧状态密切相关, 植物吸收对磷的去除作用的大小和收割频率与时期、进水负荷、植物物种和气候条件等有关。

关键词:人工湿地; 磷; 去除机理

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1672-2175 (2006) 02-0391-06

人类生产和生活所产生的磷负荷导致了全中国范围湖泊的富营养化, 控制此磷负荷的廉价而有效的具有非常广阔的应用前景技术是人工湿地技术。人工湿地是20世纪70年代开始发展起来的污水处理工艺^[1], 自1974年在西德首次建立人工湿地工程(处理城市污水)以来, 人工湿地在污水处理领域和水资源保护中得到了大量的应用。人工湿地是独特的土壤-植物-微生物生态系统。人工湿地处理系统人为地将污水投配到常处于浸没状态且生长有水生植物(如芦苇、香蒲和茭草等)的土地上, 沿一定方向流动的污水在耐水植物、土壤和微生物等的协同作用下得到净化^{[2]4-5}。由于人工湿地具有氮和磷去除效果好、投资低、运行费用省、耐冲击负荷能力强、维护管理简便和生态景观性能好等一系列优点, 因此在资金不富裕但有富余可用地的村镇以及城市污水二级处理厂的深度处理中具有广阔的应用前景^{[2]179-183, [3,4]}。磷是湖泊等水体富营养化的重要因素乃至限制因素, 探明用于去除污水中磷的人工湿地系统中的磷去除机理具有重要的意义。

1 人工湿地的磷去除机理

湿地系统去除来水中磷的机理主要为物理、化学和生物作用^[5-12], 详见表1。

磷在污水中常以磷酸盐(PO_4^{3-} 、 HPO_4^{3-} 、 H_2PO_4^-)、聚磷酸盐和有机磷存在。磷是植物生长所必需的元素, 污水中的无机磷被植物的吸收和同化而合成ATP等, 通过收割而被带出系统。生物氧化

表1 湿地中的磷去除机理

Table 1 Phosphorus removal mechanisms in wetland

机理		备注
物理	沉积	固体重力沉淀
化学	沉淀	不溶物的形成或共沉淀
	吸附	吸附在基质或植物表面
生物	植物吸收	适宜条件下植物摄取量较显著
	微生物吸收与积累	微生物吸收量取决于其生长所需, 积累量和环境中的氧状态有关

将绝大多数磷转化为磷酸盐。生物同化无机磷或微生物分解有机磷时, 磷的价态不变。低氧化态磷热力学不稳定(即使在高还原性的湿地土壤中也易被氧化为 PO_4^{3-}), 土壤磷以+5价(氧化态)为主。土壤中磷化氢(气态磷)极少^[5,13]。湿地土柱(soil column)中的磷几乎都是结合态磷(bound P)、无机磷和有机磷^[14]。

图1(下页)为湿地系统中的磷形态转化图。防渗湿地系统中, 进水磷的分配途径有出水、植物吸收、微生物的吸收和积累以及沉积吸附沉淀。未防渗湿地系统中, 还要考虑湿地与周围水体交换的磷量, 如图1中所示的过程, 下文中所提及的湿地均指防渗湿地。降水带入的磷的质量浓度一般很低。通常情况下, 沉积、吸附、沉淀和微生物的吸收和积累是湿地中最主要的磷去向。另外, 在湿地系统中, 由于植物土壤蒸发蒸腾作用导致湿地中部分水分损失, 而降水导致湿地水量增加, 湿地与周围水体存在水量交换, 因此进水量可能与出水量差别较

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412302); 国家重大科技专项(K99-05-35-02)

作者简介: 卢少勇(1976-), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为水污染治理与生态修复。Tel: +86-10-13621168562; E-mail: lusy@craes.org.cn

收稿日期: 2005-11-06

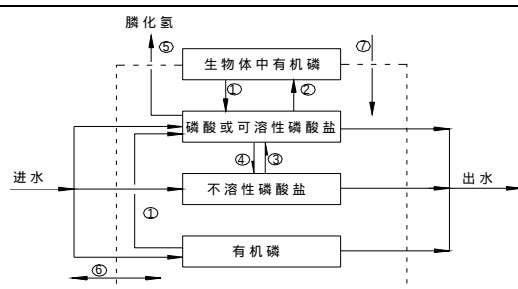


图1 湿地系统中的磷形态转化

Fig. 1 Phosphorus forms transformation diagram in constructed wetland

-矿化；-植物和微生物吸收；-脱附和溶解；-沉积、吸附和沉淀；-产生磷化氢气体；-与周围水体（如地下水）交换；-降水降尘中带来的磷。图中的不溶性磷酸盐包括磷-粘土/金属含水氧化物复合体和离散相的磷酸盐矿物

大，在分析湿地的磷去除时要考虑水量平衡^[15]。

1.1 沉积

湿地的磷沉积作用是指进水中的可溶性磷酸盐通过物理作用导致磷存储于湿地内部的过程。诸多研究表明沉积物/泥煤层是湿地中磷的主要的长期汇，与陆地生态系统相比，湿地并非磷的长期有效汇。沉积物-枯枝落叶是天然湿地的主要（95%以上）储磷场所^[5]。湿地系统通常具有较好的静止沉积条件，在湿地表层具有较松散的枯枝落叶层和沉积物层（湿地拦截的悬浮物、腐熟的植物残体）。但是在来水水量剧增（如暴雨期）、采样与进行植物收割时的人为行走、湿地中动物的活动以及收割后的湿地受强度较高的气流等的影响下湿地中的沉积物可能会再悬浮，导致沉积物中磷的释放。天然湿地中的积累是泥炭地（peatlands）的起源，积累速度是每年几毫米^[14]。

1.2 吸附和沉淀

湿地土壤的磷吸附和保持受氧化还原电位（ORP）、pH 值、Fe、Al、Ca 矿物、有机质和土壤中磷本底值等因素的影响^[3, 5, 7, 16, 17]。

ORP 低于 250mV 时 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ，释放吸附的磷。此外，淹水引起的 ORP 的降低能引起晶体 Al 和 Fe 矿物转化为无定形形式。而无定形 Al 和 Fe 水合氧化物比晶体氧化物更能吸附磷，因为它们有更大数目的单齿配位表面羟基离子。多数重要的保持机理是配位交换反应，磷酸根替换 Fe 和 Al 水合氧化物表面的水或羟基，而在水合氧化物的配位球内形成单齿和双核络合物^[5]。

在酸性土壤（pH<6.5）中，无机 P 被吸附在 Fe 和 Al 的水合氧化物上，生成不溶性 Fe(III)-磷酸盐（Fe-P）和 Al-P 沉淀。好氧条件下铁以三价存在，厌氧时 Fe(III)还原成 Fe(II)；铝的作用在好氧和厌氧条件下均发生。在中性和碱性土壤中（pH>6.5），无

论好氧还是厌氧，均以不溶性 Ca-P 沉淀为主^[5,7]。

无机土壤 P 吸附与 Al、Fe 和 Ca 水平有关，湿地土壤的 P 吸附容量可由土壤的草酸盐可萃取铝量来预测。土壤的磷储存能力随有机质含量的增加而增加。矿物的 P 吸附量大于有机土壤的 P 吸附量^[5,16]。Dierberg 等^[18]的研究中发现直接的植物吸收和共沉淀能快速和几乎完全去除农业径流中的 SRP。

有人误认为湿地仅通过现有土壤的吸附过程去除磷，众所周知土壤具有磷吸附的能力，但是此种储存能力很快在磷负荷增加的情况下被饱和^[14]。

袁东海等^[19]的研究表明，磷素饱和吸附量从大到小排序依次为矿渣>粉煤灰>蛭石>黄褐土>下蜀黄土>沸石>砂子。从吸附的磷的形态转化来看，黄褐土、下蜀黄土和蛭石吸附的磷主要转化为 Fe-P，砂子、沸石、粉煤灰和矿渣主要转化为 Ca-P。基质中的游离氧化铁、胶体氧化铁和铝的含量越高，其固定形式的磷酸铁盐和磷酸铝盐数量越多，基质净化磷的能力就越强。试验条件下，这些填料吸附饱和后释放的磷素低于饱和量的 11%。李旭东等^[20]的研究表明，三种填料磷等温吸附试验表明，沸石、砾石和土壤对 PO_4^{3-} 的最大吸附量分别为 0.03、0.107 和 1.11 mg/g。

化学作用（吸附和沉淀）是人工湿地的主要除磷机理之一。但是化学作用中最主要的机理是配位交换的定位吸附还是沉淀反应，目前仍无统一看法。一些研究表明吸附导致了溶液中磷的快速去除，但此快速去除过程后的慢速反应过程，不像离子交换，而被假设为不溶性磷的沉淀或单齿转变为双核络合物，或两种过程均存在。

1.3 微生物吸收与过量积累

所有的微生物均含有一定数量的磷，一般占灰分总量的 30%~50%（以 P_2O_5 计）。磷在微生物细胞中主要存在于核酸、核苷酸、磷脂和其它含磷化合物中，壁酸和聚磷酸盐为主要的磷化合物。在细菌、酵母菌、真菌和藻类细胞中均有聚磷酸盐^{[21], [22]209-210}。

微生物对磷的作用包括正常吸收和过量积累。

在湿地中，微生物对磷的同化作用主要发生在填料（如土壤）中；光合微生物的同化作用需要较高的水温 and 充足的阳光；异养生物的同化作用需要适量的有机碳源；自养生物与异养生物的同化均需有效的无机氮源，w(N):w(P)<10:1 时，磷的同化作用会终止^[24]。

过量积累和微生物所处环境中的氧状态密切相关，在有氧环境下某些除磷能力明显的细菌，称作高效除磷菌，如不动杆菌（*Acinetobacter*），气单胞菌属（*Aeromonas*），假单胞菌属

(*Pseudomonas*), 放线菌属 (*Microthrix*) 和诺卡氏菌属 (*Norcadia*) 等^{[22]212-213}, 能超量摄取磷。依据细菌的分子式($C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$)估算, 微生物细胞中磷占 2%, 而高效除磷菌可以摄取数倍于此含量的磷。系统末端的氧的质量浓度宜大于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 来水中的碳源应比较充足, 活性污泥法的研究表明在 $\text{BOD}_5/\text{总磷}$ 大于 20 或者溶解性 $\text{BOD}_5/\text{可溶性磷}$ 为 12: 1~15: 1 时利于高效除磷, 湿地中植物通过光合作用可提供充足的氧。厌氧状态时细菌则释放磷。通常在增殖过程中, 细菌在好氧环境中吸收的磷多于其在厌氧环境中释放的磷。

处理低质量浓度污水 ($\text{COD}_{\text{Cr}}\ 22.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{BOD}_5\ 4.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TSS(总悬浮物) $1.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KN (凯氏氮) $4.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷 $0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (均为平均值) 的垂直流人工湿地(主体植物为菰(*Zizania latifolia*) 和石菖蒲(*Acorus calamus*)) 中, 根区磷酸酶活性与总磷的去除率相关性不显著。

1.4 植物吸收

可溶性磷酸盐(HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^-) 被植物根吸收并同化为植物的有机成分(如 ATP, 磷脂、辅酶、RNA 和 DNA 等); 大型植物的磷摄入量低于氮摄入量, 因为植物组织中磷的质量分数远低于氮的质量分数。植物摄取磷的潜在速度受其净生长量和植物组织中磷的质量分数的限制。磷储存取决于植物组织磷的质量分数和最终生物量积累潜力, 即最大直立产量(单位面积生物量)。因此希望作为磷同化和储存的植物应具有快速生长、高组织磷含量和达到高直立产量的能力^[5, 25]。

许多文献报道了人工湿地植物群落中的植物组织的磷的质量分数和储存量, 这二者和植物种类、组织种类、季节以及培养液的质量浓度等因素有关^[3, 26-33, 35, 36]。不同植物的摄入量(即植物收获所能去除的量)见表 2^[3, 5, 33]。

表 2 不同植物的摄入量

Table 2 Assimilation amount of various helophytes

植物类型	磷(P)摄入量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
浮水植物 (如水葫芦)	350
挺水植物	8.5~150
沉水植物	<120

Knight 等^[34]的研究表明在北美佛罗里达州 13 个河湖的沉水植物占主导的湿地系统, 能长期的去除水中的磷, 去除能力为 $\text{P}\ 120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

收获大型植物有助于从湿地中除磷。若不收获, 植物死亡后, 磷释放回系统。湿地和塘中常用植物芦苇、茭草和水葫芦的溶出释放试验表明, 在停留时间为 5 d, 水力负荷为 8.7 cm/d , TN、TP 和 COD 负荷为 1.52、0.11、 $13.7\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 条件下, 植物

组织释放 N、P、COD 的量分别占去除负荷的 29%、20% 和 38%^[37]。植物地上部分的磷含量高于地下部分, 因为在植物衰亡期营养物会从地上部分转移到地下部分, 因此在植物衰亡期到来之前 (如 10 月和 11 月) 收割比在 1 月收割能增加因植物收割而带出系统的磷量, 在夏季初期 (如 6 月) 收割植物可能会导致以后几年里该植物的长期活力^[38]。处理农场污水的湿地(面积 19 m^2 , 进水水质为 TN, $10\sim 110\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; NH_4^+-N , $5\sim 70\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$; TP, $8\sim 18\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) 研究表明, 在监测的第一年, 有植物湿地的磷去除率比无植物湿地高 3%~60%^[38]。在中等进水负荷($\text{P}\ 335\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时)条件下的垂直流湿地, 植物收割一次除磷量占进水磷量的 10%^[38]。盆栽试验处理人工配水, 进水磷负荷为 $\text{P}\ 1.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{周}^{-1}$, 进水磷的质量浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 植物收割的除磷量低于系统中总磷的 5%^[29]。在处理轻度富营养化水的人工湿地中, 植物吸收对磷的去除起主要作用——贡献率为 51.0%。植物的磷积累量与来水的质量浓度及生物量之间均存在显著相关^[39]。因此植物收割除磷量与湿地总除磷量之比取决于植物收割频率和时期、进水负荷、湿地出水水质要求、植物物种(生物量和植物营养物含量)和气候条件等因素。

2 人工湿地磷去除机理实例分析

结合处理生活污水的中试系统^[40]和笔者在昆明滇池东岸的两处处理农田排灌水的人工湿地 (南湿地和北湿地) 以及中的氮和磷的去向分析如表 3 (下页)。

南湿地进水磷的主要去除途径为吸附沉淀络合, 北湿地植物床进水磷的主要去除途径为植物收割和吸附沉淀络合。南北湿地的差别主要因为北湿地进水负荷低, 面积大 (植物生物量大), 因此植物收割带出的磷的比例增加。而中试湿地 1 和湿地 2 的主要去除机理均为吸附沉淀络合作用。

就表 3 中的中试 1、中试 2、南湿地和北湿地这 4 处湿地而言, 在相同的植物物种、气候条件下, 在一定程度上, 进水负荷越高, 植物收割去除的磷的负荷量占进水的量负荷量的比例越低。

而荷兰湿地中的吸附沉淀络合的磷量和植物收割带出的磷量占来水负荷量的比例低, 这是因为该湿地渗漏严重, 大部分的磷通过渗漏而被带出湿地系统。

湿地可用来去除污水中的磷, 但有时 (如来水中的磷的质量浓度高) 必须经预处理后才进入湿地系统, 以利于湿地系统的磷去除能力的长效发挥。

3 人工湿地中磷去除的研究展望

湿地系统中, 沉积、吸附、沉淀、植物吸收和微生物吸收与积累等机理对磷去除的贡献率的规

表 3 湿地概况与磷的主要去向¹⁾
Table 3 Wetland general situation and major phosphorus pathways

参数	荷兰湿地	中试 1	中试 2	南湿地	北湿地
面积/m ²	10 000	6	6	2 800	4 200
植物类型	芦苇 (<i>Phragmites communis</i> Trin.)	芦苇 (<i>Phragmites communis</i> Trin.), 茭白 (<i>Zizania latifolia</i> Trin.)	芦苇 (<i>Phragmites communis</i> Trin.), 浮萍 (<i>Lemna minor</i>)	茭草 (<i>Zizania latifolia</i>), 芦苇 (<i>Phragmites communis</i> Trin.)	茭草 (<i>Zizania latifolia</i>), 芦苇 (<i>Phragmites communis</i> Trin.)
是否防渗	否	是	是	否	否
湿地类型	潜流	潜流	表面流	表面流	表面流
污水类型	娱乐设施的排水	农村生活污水	农村生活污水	农田排灌水	农田排灌水
进水负荷(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	0.92	3	3	0.68	0.37
年度	1991.02-1992.01	2001.03 - 2001.07		2003.01 - 2003.12	
收割	12 月	第 120 天收割	第 120 天收割	7 月收割茭草, 12 月收割芦苇和茭草	
植物收割带出	10	16.3	24.6	20	35
出水排放	2	34.0	39.8	48	31
吸附沉淀络合	14	49.7	35.6	32	34
参考文献	[38]	[40]77-80		[2]167-168	

1) 表中的吸附沉淀络合项均包括了植物残体含量和湿地系统与地下水的交换量

律性,有待从更多的研究中加以概况。与湿地长效去磷有关的植物收割应在何种条件下进行)气候、进水负荷和收割频率)需要进一步的研究。

吸附作用(吸附位主要由基质和植物提供)是湿地除磷的主要机理之一,而吸附位会随累积进水量的增加而减少;尚缺乏对从水柱或土壤孔隙水中去除可利用态磷的最有效途径的了解,难以预测环境中不可用态磷的脱附或释放为溶解性磷的过程的发生。因此湿地长期有效地除磷是亟待解决的问题。

污水和填料的接触机会是湿地除磷的重要因素。在潜流湿地中可选择合适的填料(如富含铁和铝的填料)来强化除磷性能。开发和选用除磷能力强的生产废料,既有效除磷又有明显的经济性。

干湿交替能促进微生物周围环境中氧化还原电位和氧的质量浓度的变化。需根据进水负荷、湿地结构和气候条件等确定有助于湿地长期有效除磷的合理的干湿交替周期。

参考文献:

[1] Office of Water, US EPA. Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment[R]. 1993, 832-R-93-008 (4204).

[2] 卢少勇. 农田排灌水的人工湿地处理技术及工程示范研究[D]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2004.

LU S Y. Technological and Engineering Demonstration Research on Constructed Wetland for Agricultural Irrigation and Drainage Wastewater Treatment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

[3] 高拯民, 李宪法, 王绍堂, 等. 城市污水土地处理利用设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 458.

Gao Z M, Li X F, Wang S T, et al. Design and Utilization Manual of Land Treatment for Municipal Wastewater Treatment[M]. Beijing: Standard Press of China, 1990: 458.

[4] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.

Wu X L. Mechanism of Wastewater Treatment in Constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1995, 16(3): 83-86.

[5] Vymazal J, Brix H, Cooper P F, et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands[C]//Vymazal J, Brix H, Cooper P F, et al., Eds. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Leiden: Backhuys Publishers, 1998: 17-66.

[6] US EPA. Design Manual of Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment[M]. EPA, 625/1-88/022: 23-25. 1988.

[7] Verhoeven Jos T A, Meuleman Arthur F M. Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations[J]. Ecological Engineering, 1999, 12(1-2): 5-12.

[8] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明. 垂直流人工湿地对污水磷的净化效果[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(7): 13-17.

Cui L H, Zhu X Z, Luo S M. The purification efficiency of phosphorus by means of vertical flow constructed wetlands treatment system[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(7): 13-17.

[9] 李科德, 胡正嘉. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. 中国环境科学, 1995, 15(2): 140-144.

Li K D, Hu Z J. Mechanisms of sewage purification by reed system[J]. China Environmental Science, 1995, 15(2): 140-144.

[10] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷去除机制研究进展[J]. 环境科学研究动态, 2000(3): 32-37.

Liang W, Wu Z B. Review of removal mechanism in constructed wetland treating nitrogen and phosphorus from wastewater[J]. Environmental Science Trends, 2000 (3): 32-37.

[11] 吴振斌, 陈辉蓉, 贺锋, 等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报, 2001, 25(1): 28-35.

Wu Z B, Chen H R, He F, et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system[J]. Acta Hydrobiologic Asinica, 2001, 25(1): 28-35.

[12] 沈耀良, 王宝贞. 人工湿地系统的除污机理[J]. 江苏环境科技, 1997(3): 1-6.

- Shen Y L, Wang B Z. Contaminant removal mechanisms in constructed wetland[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 1997(3): 1-6.
- [13] Devai I, Delaune R D. Evidence for phosphine production and emission from Louisiana and Florida marsh soils[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(3): 277-279.
- [14] Kadlec R H. Overview: Surface flow constructed wetlands [J]. Water Science Technology, 1995, 32(3): 1-12.
- [15] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 农田排灌水的稳定塘-植物床复合系统处理[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 605-609.
- Lu S Y, Zhang P Y, Yu G, et al. Stabilization pond-plant bed composite system treatment of farmland irrigation and drainage water[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 605-609.
- [16] 潘继花, 何岩, 邓伟, 等. 湿地对水中磷素净化作用的研究进展[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 102-104.
- Pan J H, He Y, Deng W, et al. Progress in the study on the function of wetland in removal phosphorus in water[J]. Ecology and Environment. 2004, 13(1): 102-104.
- [17] Johnston C A. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality [J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1991, 21: 491-565.
- [18] Dierberg F E, DeBusk T A, Jackson S D, et al. Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading[J]. Water Research, 2002, 36(6): 1409-1422.
- [19] 袁东海, 景丽洁, 张孟群, 等. 几种人工湿地基质净化磷素的机理[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 614-617.
- Yuan D H, Jin L H, Zhang M Q, et al. Mechanism of phosphorus purification in some kinds of substrates constructed wetland systems[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 614-617.
- [20] 李旭东, 周琪, 张荣社, 等. 三种人工湿地脱氮除磷效果比较研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(特刊): 73-76.
- Li X D, Zhou Q, Zhang R S. A comparative study on nitrogen and phosphorus removal performance for three types of constructed wetlands[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(Suppl): 73-76.
- [21] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- Zheng X C, Li YX. Technology of phosphorus and nitrogen removal from wastewater [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [22] 顾夏声. 污水生物处理数学模式[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 1993: 212-213.
- Gu X S. Wastewater treatment mathematical model. (Secondary edition) [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1993: 212-213.
- [23] 梁威, 吴振斌, 周巧红, 等. 复合垂直流构建湿地植物根区磷酸酶及脲酶活性与污水净化的关系[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(6): 545-548.
- Liang W, Wu Z B, Zhou Q H. Relationship Between the Phosphatase and Urease Activities in Plant Root-Zone and Purification of Wastewater in the Integrated Vertical Constructed Wetland[J]. Plant Physiology Communications, 2002, 38(6): 545-548.
- [24] 翁酥颖, 戚蓓静, 史家樑, 等. 环境微生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 66-69.
- Wen S Y, Qi P J, Shi J L, et al. Environmental microbiology [M]. Beijing: Science Press, 1985: 66-69.
- [25] 周云龙. 植物生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 155-164.
- Zhou Yunlong. Botanic Biology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 155-164.
- [26] 林鹏, 林光辉. 九龙江口红树林研究: IV. 秋茄群落的氮、磷的积累和循环[J]. 植物生态学与植物学丛刊, 1985, 9(1): 21-32.
- Lin P, Lin G H. Accumulation and circulation of *Kandelia candel* (L.) community, Mangrove study of Jiulong River Estuary IV [J]. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1985, 9(1): 21-32.
- [27] 谭凤仪, 黄玉山, 陈桂珠, 等. 人工湿地中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 236-241.
- Tan F Y, Huang Y S, Chen G Z, et al. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within simulated mangrove wetland system [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 236-241.
- [28] Reddy, Debusk. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes[J]. Journal of Environmental Quality, 1985, 14(4): 459-462.
- [29] Kim S Y, Geary P M. The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants[J]. Water Science & Technology, 2001, 44(11-12): 61-68.
- [30] Tanner C C. Plant for constructed wetland treatment systems: A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. Ecological Engineering, 1996, 7(1): 56-83.
- [31] 廖新佛, 骆世明, 吴银宝, 等. 风车草和香根草在人工湿地中迁移养分能力的比较研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 56-160.
- Liao X D, Luo S M, Wu G B, et al. Treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 113-117.
- [32] 许航, 陈焕壮, 熊启权, 等. 水生植物塘脱氮除磷的效能及机理研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(4): 69-73.
- Xu H, Chen H Z, Xiong Q Q, et al. Studies on the effective and mechanisms of N and P removal in macrophyte[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering & Architecture, 1999, 32(4): 69-73.
- [33] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 11-17.
- [34] Knight R L, Gu B, Clarke R A, et al. Long-term phosphorus removal in Florida aquatic systems dominated by submerged aquatic vegetation[J]. Ecological Engineering, 2003, 20: 45-63.
- [35] 乔建荣, 任久长, 陈艳卿, 等. 常见沉水植物对草海水体总磷去除速率的研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1996, 32(6): 785-789.
- Qiao J R, Ren J C, Chen Y Q, et al. Study on the Removal Rate to TP in Lake Caohai by Common Submerged Macrophytes[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1996, 32(6): 785-789.
- [36] Tanner C C, Clayton J S, Upsdell M P. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands-II. Removal of nitrogen and phosphorus[J]. Water Research, 1995, 29(1): 27-34.
- [37] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 茭草、芦苇与水葫芦的污染物释放规律[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 554-557.
- Lu S Y, Zhang P Y, Yu G, et al. The contaminants release rule of *Zizania caduciflora*, *Phragmites australis* and *Eichhornia crassipes*[J]. China Environmental Science, 2005, 25(5): 554-557.
- [38] Meuleman Arthur F M, van Logtestijn Richard, Rijs Gerard B J, et al. Water and mass budgets of a vertical-flow constructed wetland used

- for wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 2003, 20(1): 31-44.
- [39] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1720-1725.
- Jiang Y P, Ge Y, Yue C L, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sight seeing water [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1718-1723.
- [40] 刘超翔. 提高人工湿地处理生活污水效能的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- Liu C X. Study on the Measures for Improving Constructed Wetlands' Performance in Treating Domestic Wastewater[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.

Phosphorus removal mechanism of constructed wetland

LU Shaoyong^{1,2}, JIN Xiangcan¹, YU Gang²

1. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control//Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China, 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Anthropogenic phosphorus (P) loads have been implicated in eutrophication of lakes throughout China. One technology that holds considerable promise for controlling these loads in a cost-effective manner is the use of constructed wetlands. Phosphorus (P) in constructed wetland including biotic organophosphorus, abiotic organophosphorus, phosphorus acid, soluble phosphate and insoluble phosphate. The P removal mechanism in the constructed wetland with a leak-proof layer consists of chemical function (such as precipitation and adsorption), biological function (such as plant assimilation, microbe assimilation and accumulation) and physical function (such as sedimentation), is reviewed in this paper. In a constructed wetland without a leak-proof layer, the P exchange with the surrounding environments has significant effects on the P removal rate. Generally, physical and chemical functions are the major P removal mechanism in constructed wetland. Microbe function for P removal in constructed wetland is significantly correlated with the surrounding oxygen situation. Plant assimilation function for P removal in constructed wetland is correlated with harvest frequency and period, influent load, plant species and climate condition.

Key words: constructed wetland; phosphorus; removal mechanism.