

人工湿地系统除磷影响因素研究进展

仇付国, 徐艳秋, 许俊挺, 付昆明

北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 磷是导致水体富营养化的主要因素之一, 人工湿地能够经济有效地去除水体中的磷。本文论述了人工湿地除磷的机理, 对人工湿地中植物、微生物和基质去除污水中磷的物理、化学及生物作用机制进行了综述。讨论了温度、溶解氧、水力停留时间和水力负荷等因素对人工湿地净化磷的影响。探讨了无基质人工湿地代替传统人工湿地去除水体中污染物的发展和应用情况。

关键词 磷; 人工湿地; 基质; 微生物; 植物

近年来, 随着社会的不断发展, 工业、农业和生活污水大量排放, 造成中国湖泊富营养化日益严重。据资料统计^[1], 中国 24800 多个大小湖泊中, 处于富营养的湖泊占总量的 65%, 处于中营养转化为富营养的湖泊占总量的 20%, 中国湖泊富营养化问题已十分严峻。“2015 年中国环境质量状况公报”^[2]指出: 长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河等 7 大流域和浙闽片河流、西北诸河、西南诸河的国控断面中, I 类水质断面占 2.7%, 同比下降 0.1 个百分点; II 类占 38.1%, 同比上升 1.2 个百分点; III 类占 31.3%, 同比下降 0.2 个百分点; IV 类占 14.3%, 同比下降 0.7 个百分点; V 类占 4.7%, 劣 V 类占 8.9%, 同比下降 0.1 个百分点。主要污染指标包括化学需氧量(COD)、5 日生化需氧量(BOD)和总磷。全国 62 个重点湖泊(水库)中, 5 个湖泊(水库)水质为 I 类, 13 个为 II 类, 25 个为 III 类, 10 个为 IV 类, 4 个为 V 类, 5 个为劣 V 类。主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。开展营养状态监测的 61 个湖泊(水库)中, 贫营养的 6 个, 中营养的 41 个, 轻度富营养的 12 个, 中度富营养的 2 个。国际与开发组织对水质富营养化的研究表明^[3]: 氮、磷等营养物质的输入和富集是水体发生富营养化的最主要原因。根据对藻类化学成分进行分析研究, 提出了藻类的“经验分子式”为 $C_{106}H_{236}O_{110}N_{16}P$, 利贝格最小值定律指出, 植物生长取决于外界提供给它的所需养料中数量最小的一种。由此可见, 藻类分子式中所占的重量百分比最小的 2 种元素氮和磷, 特别是磷是控制水体藻类生长的主要因素。因此污水除磷对控制水体的富营养化有着重要的意义。研究表明^[4-5], 有机磷在水体富营养化过程中起着重要作用。Vaalgamaa^[6]研究认为, 有机磷主要来源于陆源输入和食物链等生物过程, 其含量大小会直接影响初级生产

力对溶解性磷的可利用水平。人们认为有机磷农药对生态环境并不构成危害, 有机磷农药有很多品种都是属于高毒的, 而且在农业生产中有机磷农药又被大量广泛地应用, 却并未得到重视。现今利用人工湿地去除水体中的磷是比较普遍的方法^[7-11]。人工湿地技术处理污水具有经济、高效等特点, 在水环境修复中扮演了重要角色, 可以完成对污水中污染物的高效去除^[12], 通常被认为是一种廉价有效的废水处理技术^[13-15], 可作为传统污水除磷技术的一种有效替代方案。然而 Kadlec 和 Knight 的研究表明, 在美国, 多数湿地除磷填料在运行初期去除率达 90% 以上, 但是运行 4~5 年后, 由于系统内磷的大量累积, 会使磷的去除率急剧下降, 甚至会发生磷的解吸。也就是说, 填料对磷的吸附容量是有限的, 当填料达到吸附饱和点后, 系统的除磷效果较差, 需要更换填料或再生^[16-18]。因此提出了使用无基质人工湿地去除污水中的有机磷, 王骥^[19]对无基质人工湿地和传统湿地进行了对比, 讨论了利用无基质人工湿地对磷去除的可行性。为了提高人工湿地除磷的效果和明确除磷的机理, 本文对人工湿地除磷的机制进行了总结, 对无基质人工湿地等新型的湿地发展进行了讨论。

1 人工湿地除磷原理

1.1 人工湿地中磷的存在形式

湿地中的磷化合物可分为有机态和无机态两种, 湿地为各种形态的磷相互转化提供了合适的环境, 人工湿地中的有机磷占总磷的大部分, 有机磷主要以磷脂类(1%~5%)、植素类(10%~50%)、核酸类(0.2%~2.5%)、磷蛋白(痕量)等形态存在。目前普遍认为酯磷是湿地中有机磷的主要存在形

收稿日期: 2016-11-16; 修回日期: 2017-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278024); 住房和城乡建设部科学技术计划项目(K42016090); 北京建筑大学科学研究基金资助项目(00331616055)

作者简介: 仇付国, 教授, 研究方向为水处理理论与技术, 电子信箱: qiufuguo@bucea.edu.cn

引用格式: 仇付国, 徐艳秋, 许俊挺, 等. 人工湿地系统除磷影响因素研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 23-29; doi: 10.3981/j.issn.1000-

7857.2017.09.002

态^[20-21]。在湿地环境中,无机磷存在很多种类型。在不同的湿地环境下,不同的阳离子可与磷酸盐反应,最终生成磷酸盐化合物。在酸性环境下,磷可与铁或铝反应生成沉淀,在碱性环境下,磷与钙和镁反应沉淀。磷在水溶态时的存在形式与pH值和氢离子的离解程度有关^[22]。水溶态的磷具有数量少、可快速吸收等特点,是可供植物利用的主要形态。水中的磷酸盐又可分为正磷酸盐和缩合磷酸盐,其中正磷酸盐指以 PO_4^{3-} 、 $H_2PO_4^-$ 、 HPO_4^{2-} 等形式存在,而缩合磷酸盐包括焦磷酸盐、偏磷酸盐和聚合磷酸盐等。微生物(真菌、细菌等)组织中也含有磷,有些微生物体内的磷含量比植物体中的磷含量要高。随着微生物的死亡,其体内的磷也被分解释放出来,表1是微生物组织中各种含磷物质的含量表^[23]。

表1 微生物组织中各种含磷物质的含量

Table 1 Contents of various phosphorus substances in microorganism

| 含磷有机物 | 占微生物中磷的比例/% |
|---------|-------------|
| 核糖核酸 | 30~50 |
| 脱氧核糖核酸 | 5~10 |
| 多聚磷脂(酯) | 15~20 |
| 磷脂 | <10 |
| 质酸盐 | 痕量 |

1.2 人工湿地除磷机理

人工湿地中,污水中的含磷化合物主要以颗粒磷(PP)、可溶性反应磷(SRP)、溶解有机磷(DOP)等形式存在。人工湿地对磷的去除主要由3条途径共同完成:植物吸收、微生物同化及基质吸附。

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。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腺苷三磷酸(ATP)等,通过收割而被带出系统。生物氧化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,土壤磷以+5价(氧化态)为主。土壤中磷化氢(气态磷)极少^[24-25],湿地基质中磷几乎都是结合态磷、无机磷和有机磷^[26]。

1.2.1 湿地植物除磷的作用机制

植物是人工湿地系统中重要的组成部分,可分为直接净化作用和间接净化作用,不仅可以为微生物生长附着提供巨大表面积,还能够吸收部分污染物质。有大量研究表明种植植物的湿地系统对污染物质的去除率明显高于未种植植物的湿地^[27]。而且植物在生长过程中能够吸收营养物质,运行一段时间后,对植物进行收割来转移湿地系统中的污染物质,若不及时收割,在植物死亡之后磷会释放返回系统中,一般应在植物衰老期到来之前及时收割,防止衰老植物留在湿地中进一步释放磷回到系统内。

植物对磷吸收的潜在速度受植物组织中磷的质量分数和净生长量的限制,选取的植物应具有快速生长、高组织磷

含量的特点,从而达到对磷的最大吸收去除效果。目前,国内外人工湿地常见植物有挺水植物、沉水植物和浮水植物,其对磷的摄入量范围分别为8.5~150、<120、350 kg/(hm²·a)。因此在选择植物时应该根据入水水质和植物的摄入量进行对比选择,而且应该首要选择当地植物以尽快适应环境,同时要合理选择种植密度、水力负荷和水力停留时间。张冉等^[28]利用垂直流人工湿地研究3个试验块在不同水力负荷、不同植物、干湿交替运行等条件下除磷的效率,证明植物在人工湿地除磷效率中占有10%~15%的贡献,其中湿地水力负荷从0.1升到0.25 m³/(m²·d)时,种植植物的系统对总磷的去除率从92%下降到80%,未种植植物的空白区域对总磷去除率从89%下降到63%。梁武^[29]选择了6种不同植物,以潜流、表流2种模拟人工湿地的方法进行分析研究,研究表明这6种植物对污水中磷的去除率存在差异,依次排序为水葫芦、水葱、美人蕉、菖蒲、芦苇和水芹菜。而且随着水力负荷的逐渐增加,植物对磷的去除率开始下降,而且下降趋势越来越明显,相对于潜流湿地6种植物在表流湿地中去除率较高。文科军等^[30]利用柳树、湿地填料构建潜流型园林人工湿地并考察除磷效果,为优化滤池结构和应用推广确定最佳运行条件,其中对总磷去除率影响程度排序为:填料>填料铺装方式>水力停留时间>植物,最佳总磷去除率的条件为:陶粒和页岩异垂直分层方式填装,植物为旱柳,全磷(TP)去除率预测值为78.2%。统计显示,应用在人工湿地的植物已经超过70多种^[31]。梁彩霞^[32]利用正交试验对比不同条件下人工湿地除磷效果,结果证明种植再力花、基质为沸石且水力负荷为0.125 m/d的下行垂直潜流人工湿地系统具有最佳的总磷去除效果,污水经过该系统后,总磷质量浓度从5.15 mg/L下降到1.32 mg/L,去除率为74.17%。刘洋^[33]研究表明垂直流人工湿地系统对TP的去除率比水平流人工湿地系统要高10%左右。

植物和微生物对湿地中污染物的去除是相互的,植物的根系为微生物提供生长场所,因此可以根据植物的根系以及根际分泌物与微生物的关系选择植物,不过目前对根际微环境在湿地中的作用研究尚不清楚,需要进一步探索。

1.2.2 湿地微生物除磷的作用机制

微生物自身均含有一定量的磷,主要存在于核酸、磷脂、核苷酸和其他含磷化合物中,磷参与了微生物的正常生理活动。在人工湿地系统中,由于受光合作用、根毛输氧的影响,系统中好氧、厌氧区域交替出现,在好氧状态下聚磷菌吸附过量的磷;在厌氧状态下,聚磷菌进一步将过量的磷释放出来。在增值过程中,细菌在好氧状态下吸收的磷大于其在厌氧状态下释放到环境中的磷^[34],由此可知聚磷菌的聚磷作用在磷的去除方面起到了一定的作用。但是这部分磷在微生物死亡后经过分解释放,再一次回到水中。总体而言,有机磷和溶解性较差的磷经微生物代谢转化为无机磷化合物,从而有利于植物的吸收。无机磷的氧化、还原、有机磷化合物的分解矿化等都需要微生物的生物化学反应以及酶催化实现。

梁威等^[35]研究认为细菌的数量与磷的去除呈正相关关

系,而张鸿等^[36]研究发现植物根系分泌物可以促进嗜磷菌的生长以及磷的释放和转化,间接地增加了对湿地系统中磷的净化率。

1.2.3 湿地基质除磷作用机制

1) 有基质人工湿地。湿地基质往往被认为是磷的最终沉淀池,基质的筛选原则一般应考虑基质水力传导性、磷吸附效率及价格等方面因素。基质一般通过物理和化学途径净化污水中的磷,如吸附、离子交换、吸收等,主要是体现在吸附作用。基质为人工湿地系统中的植物和微生物提供了良好的生长环境,并通过截留污水中的悬浮颗粒物及沉淀、过滤、吸附、离子交换等物化作用直接去除污染物,Reddy^[37]研究发现人工湿地中磷可通过吸附反应和沉淀降解 7%~87%,由此可知选择合适的基质对去除磷的影响很大,每种基质对某一物质都有一定的吸附能力,当吸附饱和后,为了恢复湿地对污染物的去除能力需要更换饱和填料。富含 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 等离子的基质对磷的吸附能力最强,水体中的可溶性无机磷化合物易与基质中的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 等发生吸附和沉淀反应^[38],选择合适的基质可以显著提高人工湿地的净化能力和使用寿命。王万宾等^[39]通过在人工湿地实验数据的基础上进行单因素方差分析,筛选出粉煤灰和工业废弃矿渣为对总磷吸附性能较好基质,由逐步多元回归分析和偏相关分析结果显示, Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 含量及 SiO_2 含量与 Al_2O_3 含量比是影响粉煤灰吸附总磷能力的主要因子;pH 值及 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 含量和是影响工业废气矿渣对总磷吸附能力的主要因素。张翔凌等^[40]在模拟垂直流人工湿地系统中,利用 3 种不同类型的 Zn-LDHs (FeZn-LDHs 、 CoZn-LDHs 和 AlZn-LDHs) 覆膜于常用人工湿地沸石基质表面及原始沸石进行动力学吸附试验、等温吸附—解吸试验和除磷净化试验,其中 FeZn-LDHs 改性沸石基质性能最好,对 TP、TDP、SRP 的平均去除率均超过 75%,相对于原始沸石对 TP 的去除率增幅达到 41.61%。潘长森等^[7]利用废砖作为人工湿地基质对校园生活污水进行处理,污水中磷去除效率出现先下降后上升,最后再下降至稳定的趋势,总磷平均出水质量浓度 2.21 mg/L,平均去除率为 73.09%。

不同基质的使用寿命和净化能力不同,魏成等^[27]研究了不同基质对人工湿地净化效率的影响,发现小粒径的沙土混合基质比卵石基质能够为微生物提供更大的表面积,净化效率更高,但运行过程中系统容易出现堵塞,影响运行效率。曹飞华等^[16]选择碎石、沸石、火山石等 3 种填料和风车草构建了 4 个垂直流人工湿地处理单元并研究其对污水中磷的去除效果,结果显示,对污水中总磷的去除效果从高到低依次为火山石、碎石、沸石,而栽种有风车草的碎石单元对磷的去除效果有所提高。Gray 等^[41]利用钙化海藻为基质进行试验,与过去已有试验数据比较,发现钙化海藻除磷能力和页岩、钢渣等相似。Yuan 等^[42]、Tan 等^[43]选择多种基质对磷进行吸附试验,结果表明吸附效果最好的是钢渣,而砂子的吸附效果最差,最大吸附磷量分别为 50490、302 mg/kg。即使钢渣是磷

的高效吸附基质^[44],但是钢渣本身碱性强,不适合生长植物,因此不适合在实际湿地中进行应用。但是考虑到其高磷吸附能力,可以考虑与其他常用填料进行联合应用^[45],或者采用多个湿地单元串联运行,Drizo 等^[46]分别利用 2 个种植植物的湿地单元放在前后,而中间湿地单元基质利用钢渣,保证了湿地除磷的可行性和稳定性。

2) 无基质人工湿地。目前虽然人工湿地技术广泛应用于富营养化水体治理,但大部分人工湿地依然存在内部短路、填料堵塞、氧气不足及使用年限低等问题,如何在不增加经济负担情况下,解决湿地堵塞、溶解氧匮乏等问题至关重要。

无基质人工湿地包括生态浮床和生物湿地床,又称无土栽培浮床、人工生物浮床,无基质人工湿地利用支撑体将植物种植在需净化的水体中,把植物和附着在上面的微生物体系结合起来构成新的湿地模型。

生态浮床最早在 1979 年由德国开发,由于其既可以治理水环境又可以进行水生态修复,同时具有美观效果,所以该技术到目前为止已经被广泛推广应用,已有很多工程实例。贺漫媚等^[47]利用生态浮床技术修复广州亚运城河涌,在修复河流发臭水体的同时,两岸植物和浮床植物也起到了美化作用,形成了一道独特的风景线。葛铜岗等^[48]利用串联式菖蒲浮床去除污染河水中的氮磷,其对水体 TN、TP 的平均去除率分别为 45%、55%,研究表明,该浮床系统可作为污染河水治理的备选技术。秦伯强等^[49]基于生物净化技术结合工程措施思想,选取漂浮植物和浮叶植物为主要的生物恢复手段,并结合工程上的控藻、消浪和挡藻技术使得水质达到净化的目的。

生物湿地床概念是 2009 年 Valipour 等^[50]首次引入,系统用生物框架(PVC 管)代替了传统的填料,在系统内种植大量植物,为微生物提供附着环境,连续 15 个月的研究结果发现,生物湿地床系统中溶解氧有显著提高,而且能有效去除市政污水中的污染物,COD、BOD、氨氮和磷酸盐的去除率分别为 75.15%、86.59%、70.22%和 31.71%。王骥等^[51]利用再力花/菖蒲生物湿地床去除河水中的氮磷,经过 6 个月的连续试验研究表明,湿地床可以有效去除水体中 TN、TP,再力花对其月平均去除率分别为 48.22%~78.53%和 77.62%~85.67%,而菖蒲为 43.23%~72.42%和 58.07%~80.77%,其中去除 N 的主要途径是硝化反硝化和植物吸收,而去除 P 的主要手段是植物吸收。王骥对生物湿地床与传统人工湿地床除污效果进行了对比(表 2),除 COD_{Mn} 之外,生物湿地床对污染物质去除的效果优于传统人工湿地,对 COD_{Mn} 去除较差的原因是植物在一定程度上会释放有机质。

表 2 两种湿地对污染物质去除率的对比

Table 2 Comparison of the removal rates of pollutants for two kinds of wetland

| 湿地类型 | 去除率/% | | | |
|-------|-------|------------------------|-------|--------------------------|
| | TN | $\text{NH}_3\text{-N}$ | TP | COD_{Mn} |
| 传统湿地 | 42.07 | 40.28 | 70.24 | 36.19 |
| 生物湿地床 | 47.00 | 46.30 | 72.62 | 15.82 |

2 人工湿地系统净化效率影响因素

人工湿地对磷净化效率不仅受基质、微生物和植物的影响,还受到温度、溶解氧、水力停留时间等因素的影响^[52-53]。

2.1 温度

已经有研究表明,人工湿地的运行净化效率会受到温度变化的影响^[54-55]。温度对人工湿地净化效果影响的研究大多集中在冬季,温度主要影响植物和微生物作用,有研究表明潜流式人工湿地在冬季运行时污水的最低温度有3种:1.47℃、1.2℃和0.9℃^[56]。李志元等^[57]对表面积为1.5 hm²的表面流人工湿地处理微污染水进行中试研究,试验结果表明当水温低于15℃时TP的去除率随水温的增加成对数增加,当水温高于15℃时水温对TP的去除率没有显著影响。潘长森等^[7]研究证明温度与总磷面积负荷去除率均在一定范围内存在显著线性关系。

在较低温度下,微生物酶活性将受到抑制,使酶促反应速度变慢从而使湿地对磷的去除效果变差。低温同时也会导致系统设备和水结冰,不利于正常运行,因此在实际湿地中需要增加保温措施,保持植物根部周围环境的热量不向外部散失。较低温度对碳、氮迁移转化以及有机物分解有显著影响,对除磷的影响效果偏小,为了达到最佳去除效果应做好保温措施,如利用泥土、塑料板、稻草等作为隔温层。

2.2 溶解氧

溶解氧直接与微生物作用相关,决定湿地内氧化还原条件,好氧条件下聚磷菌吸收系统内的磷,厌氧条件聚磷菌会释放吸收的过量磷。人工湿地内部,植物根系会通过植物的光合作用输送氧,当氧量超过植物生长代谢所需,富余的氧量将会在根部邻近区域游离。Drizo等^[58]观察到生长植物根系表面有显橙色的氧化铁,证明在植物根茎周围有好氧条件存在。湿地中如果进水磷的浓度偏高,需要对进水进行预处理以降低水中有机物对溶解氧的需求以利于湿地系统除磷能力的长效发挥^[59]。

2.3 水力停留时间

水力停留时间对人工湿地除磷也有很大影响。停留时间过短,会导致反应不充分,适当延长停留时间可提高磷的去除效果,但停留时间过长会发生逆反应使污染物再次被释放出来^[60-62]。因此选择合适水力停留时间对人工湿地去除污染物很重要。熊国祥^[63]研究表明当水力停留时间从17.2 h增加到21.6 h时,植物湿地床除磷效率从70%升高到82%。也有研究发现人工湿地实践中的水力停留时间2 d为最佳^[64]。

2.4 水力负荷

进水水力负荷对湿地中磷的吸附和沉淀过程都有影响,研究表明,在达到吸附/沉淀平衡之前,高浓度的含磷废水能导致磷的去除,而低浓度的进水则导致土壤中磷的释放^[56,65]。张俊辉等^[66]利用垂直流人工湿地去除城镇污水厂尾水中磷,系统在添加外源污染物和常规运行情况下,TP的平均去除率分别为92.3%和83.8%,系统中采用预处理生态池+垂直流人工湿地系统,除磷效率在90%以上。李志元等^[57]研

究表明表流人工湿地出水中TP的质量浓度与TP的表面负荷线性正相关。

3 人工湿地除磷的数学模型应用

随着人工湿地的广泛应用,关于人工湿地去除过程的模型必不可少,在数学模型与经验结合的基础上可以优化人工湿地设计与运行,并且能够在提高系统有效性的同时降低成本^[67-68]。有研究证明^[69-70],人工湿地数学建模方法可以被分成两大类:“黑箱模型”和“基于过程的模型”。黑箱模型是通过应用基础知识推理的过程探索I/O之间的关系,湿地中的物理、化学和生物过程被认为是一个黑箱,这个模型种类包括回归、一级动力学模型、莫诺方程和人工智能模型等。对于氮去除的预测最普遍利用的模型是一级动力学模型,回归模型和莫诺方程很少应用,在过去的几年内,也已经开始应用人工智能模型,如人工神经网络等。

另一方面,基于过程的模型提供了关于处理过程中发生在模拟人工湿地中的信息,Langergraber等^[71]证明二维模拟模型CWM1已经由一些研究者在进行氮的建模尝试之后被证明为最完整的理论动力学模型。Giraldi等^[72]通过标准活性污泥模型发展了一维生物模型FITOVERT,并模拟了垂直流人工湿地的水力行为。Samsó等^[73]建立了最新的生物膜应用模型BIO PORE。Wang等^[74-75]利用一级动力学方程模拟磷的矿化作用。Wang等^[76]基于理查兹和对流-扩散反应方程,建立了磷去除的模拟方程。其中Kotti等^[77]基于模糊逻辑理论建立数学模型对表流人工湿地中磷的去除进行预测,在这个模糊系统中每一个规则都有一系列前期命题组成的属性名称,在建立模型过程中包括定义隶属模型、运算模糊集和原则推理,模型最终显示的TP数据与实验数据相对吻合,适合于人工湿地的数据预测。对人工湿地进行数学模型的研究是今后人工湿地发展的一个主要理论支持,也能够起到主要指导作用,需要研究者们继续改进和完善。

4 结论与展望

人工湿地对污水中磷的去除主要依靠湿地植物、基质及微生物之间复杂的物理、化学及生物作用实现。植物与微生物对磷的去除是相互的,植物在生长过程可以吸收水体中的磷,同时其根系能够为微生物提供附着点,通过植物光合作用,根毛输送氧气,出现好氧、厌氧区域交替,为微生物提供吸收磷和释放磷的环境条件,达到去除磷的目的。基质作为磷的最终沉淀池,在水流流经时吸附磷,不同基质的吸附效果有异,可在系统中放置一种或多种基质,钢渣对磷有很好的吸附效果,应考虑合适的使用方法。

目前传统人工湿地存在的填料堵塞、污染物解吸、溶解氧不足、使用寿命短等问题,还没有得到很好的解决;新型无基质人工湿地可以不填充基质、直接利用植物和微生物耦合作用、定时收割湿地中的植物即可去除水体中的磷,因而备受关注。然而现在对无基质人工湿地研究还不透彻,植物和

微生物的耦合作用以及湿地对磷的净化机理还不清晰,需要进一步研究与实践。

人工湿地对磷的净化与温度、溶解氧、水力停留时间和水力负荷等因素有一定相关性。湿地系统宜选择合适的水力停留时间,并保证系统中的溶解氧量,在冬季运行要有相应的保温措施。而与此同时关于人工湿地的数学模型建立是人工湿地设计和运行的重要指导,需要进一步完善和明确各种数学模型的理论及使用条件。

参考文献 (References)

- [1] 刘光钊. 水体富营养及其藻害[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
Liu Guangzhao. Water eutrophication and algal damage[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [2] 2015 中国环境状况公报[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
2015 report on the state of China's environment[M]. Beijing: China Environmental Sustainability Press, 2015.
- [3] Stroganova M, Myagkova A, Prokofieva T, et al. Soil of moscow and urban environment[M]. Moscow: Russian Federation Press, 1998: 1-171.
- [4] Ahlgren J, Tranvik L, Gogoll A, et al. Depth attenuation of biogenic phosphorus compounds in lake sediment measured by ^{31}P NMR[J]. Environment Science and Technology, 2005, 39: 867-872.
- [5] Ahlgren J, Reitzel K, Tranvik L, et al. Degradation of organic phosphorus compounds in anoxic Baltic Sea sediments: A ^{31}P nuclear magnetic resonance study[J]. Limnology & Oceanography, 2006, 51(5): 2341-2348.
- [6] Vaalgamaa S. The effect of urbanisation on Laajalahti Bay, Helsinki City, as reflected by sediment geochemistry[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48(7/8): 650-662.
- [7] 潘长森, 王小娇. 模拟人工湿地脱氮除磷效果及其影响因素研究[J]. 安徽农业科学, 2015(10): 234-238.
Pan Changsen, Wang Xiaojiao. Researches on the denitrification-dephosphorization rate and its effect elements in simulated constructed wetland[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015 (10): 234-238.
- [8] 吴晓乾. 人工湿地组合基质除磷效果试验研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
Wu Xiaojian. Experimental study on phosphorus removal in layered substrates constructed wetland system[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [9] Xu X Y, Cao X D, Zhao L, et al. Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013(1): 358-368.
- [10] Kumari M, Tripathi B D. Effect of *Phragmites australis*, and *Typha latifolia*, on biofiltration of heavy metals from secondary treated effluent[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(3): 1029-1038.
- [11] 万正芬, 张学庆, 卢少勇. 19 种人工湿地填料对磷吸附解吸效果研究[J]. 水处理技术, 2015(4): 35-39.
Wan Zhengfen, Zhang Xueqing, Lu Shaoyong. The adsorption and desorption of phosphorus by nineteen constructed wetland substrates [J]. Water Treatment Technology, 2015(4): 35-39.
- [12] 张虎成, 田卫, 俞穆清, 等. 人工湿地生态系统污水净化研究进展 [J]. 环境工程学报, 2004, 5(2): 11-15.
Zhang Hucheng, Tian Wei, Yu Muqing, et al. Research progress of wastewater purification in constructed wetland ecosystem[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2004, 5(2): 11-15.
- [13] Jamshidi S, Akbarzadeh A, Woo K S, et al. Wastewater treatment using integrated anaerobic baffled reactor and Bio-rack wetland planted with *Phragmites* sp. and *Typha* sp.[J]. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2014, 12(1): 131-143.
- [14] 郭露, 张翔凌, 陈巧珍, 等. 人工湿地常用生物陶粒基质 LDHs 覆膜改性及其除磷效果研究[J]. 环境科学学报, 2015(9): 2840-2849.
Guo Lu, Zhang Xiangling, Chen Qiaozhen, et al. Removal of phosphorus by the modified biological ceramicsite coated with different layered double hydroxides in constructed wetlands[J]. Journal of Environmental Science, 2015(9): 2840-2849.
- [15] 滕良慧, 张延羽, 何春光, 等. 火山渣作为人工湿地基质除磷效果的比较研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2015(3): 132-136.
Teng Lianghui, Zhang Yanyu, He Chunguang, et al. Study of scoria as an constructed wetland substrate for phosphorus removal[J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 2015(3): 132-136.
- [16] 曹飞华, 何琴. 三种人工湿地填料的除磷效果研究[J]. 绿色科技, 2015(3): 217-219.
Cao Feihua, He Qin. The research on phosphorus removal effect of three kinds of constructed wetland padding[J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(3): 217-219.
- [17] Valipour A, Hammabard N, Woo K S, et al. Performance of high-rate constructed phytoremediation process with attached growth for domestic wastewater treatment: Effect of high TDS and Cu[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 145(12): 1-8.
- [18] 周楠楠, 高芮, 张择瑞. 浮床植物系统对富营养化水体的净化效果 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41(3): 337-339.
Zhou Nannan, Gao Rui, Zhang Zerui. Purification of eutrophic water by floating bed plant system[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2013, 41 (3): 337-339.
- [19] 王骥. 生物湿地床处理富营养化水体的试验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
Wang Ji. Experimental study on treatment of eutrophic water by biological wetland bed[D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [20] Stevenson F J. Cycle of soil, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients[M]. New York: Lewis Publishers, 1985.
- [21] Dalal R C. Soil organic phosphorus[J]. Advances in Agronomy, 1977, 29: 83-117.
- [22] 袁可能. 植物营养素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 113-121.
Yuan Keneng. The soil chemistry of plant nutrients[M]. Beijing: Science Press, 1983: 113-121.
- [23] Hedley M J, Steward W B. Method to measure microbial phosphate in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982(4): 377-385.
- [24] Vymazal J, Brix H, Cooper P F, et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands[J]. 1998: 17-66.
- [25] 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.
- [26] Kadlec R H. Overview: Surface flow constructed wetlands[J]. Water Science Technology, 1995, 32(3): 1-12.
- [27] 魏成, 刘平, 秦晶. 不同基质和不同植物对人工湿地净化效率的影响[J]. 生态学报, 2008(8): 3691-3697.
Wei Cheng, Liu Ping, Qin Jing. Effects of substrates and plants on purification efficiency of constructed wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(8): 3691-3697.
- [28] 张冉, 徐红新. 垂直流人工湿地系统中植物对除磷效果的影响研究 [J]. 环境工程, 2016(增刊 1): 308-311.
Zhang Ran, Xu Hongxin. Effect of Plants on the removal of phosphorus in vertical flow constructed wetland system[J].

- Environmental Engineering, 2016(Suppl 1): 308-311.
- [29] 梁武. 试分析不同植物与水力负荷对人工湿地脱氮除磷的影响[J]. 科学中国人, 2016, 29: 188.
Liang Wu. Effects analysis of different plant and hydraulic loads on nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands[J]. Scientific Chinese, 2016, 29: 188.
- [30] 文科军, 张玉瑶, 吴丽萍, 等. 潜流园林人工湿地脱氮除磷效果正交试验[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(9): 113-118.
Wen Kejun, Zhang Yuyao, Wu Liping, et al. Efficiency of nitrogen and phosphorus removal in subsurface flow garden constructed wetland based on orthogonal design[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(9): 113-118.
- [31] Pezeshki S R, Delaune R D. Effects of soil oxidation-reduction conditions on internal oxygen transport, root aeration, and growth of wetland plants[C]//Proceedings of A Conference on Sustainability of Wetlands and Water Resources. USA: University of Mississippi, 2000: 139-145.
- [32] 梁彩霞. 正交试验对比不同条件的人工湿地除磷效果[J]. 山西化工, 2016, 36(3): 92-94.
Liang Caixia. Comparison of phosphorus removal effect in constructed wetlands with various conditions by orthogonal experiment[J]. Shanxi Chemical Industry, 2016, 36(3): 92-94.
- [33] 刘洋. 不同运行方式对人工湿地强化除磷的影响研究[J]. 环境工程, 2012, 30(3): 15-18.
Liu Yang. Research on the influence of constructed wetlands for intensifying phosphorus removal under various operation conditions[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(3): 15-18.
- [34] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. 生态环境, 2006(2): 391-396.
Lu Shaoyong, Jin Xiangcan, Yu Gang. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland [J]. Ecology and Environment, 2006(2): 391-396.
- [35] 梁威, 吴振斌, 周巧红, 等. 构建湿地基质微生物与净化效果及相关分析[J]. 中国环境科学, 2002, 22(3): 282-285.
Liang Wei, Wu Zhenbin, Zhou Qiaohong, et al. Analysis of substrate microorganisms in the constructed wetland and their correlation with wastewater purification effects[J]. China Environmental Science, 2002, 22(3): 282-285.
- [36] 张鸿, 陈光荣, 吴振斌, 等. 两种人工湿地中氮磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J]. 华中师范大学学报, 1999, 33(12): 575-578.
Zhang Hong, Chen Guangrong, Wu Zhenbin, et al. The study on the relationship between N, P removing rates and the distribution of bacteria in two artificial wetlands[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 1999, 33(12): 575-578.
- [37] Reddy K R. Fate of nitrogen and phosphorus in a wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes[J]. Environmental Quality, 1983, 12(1): 137-141.
- [38] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands[M]. 2nd ed. New York, U S A: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [39] 王万宾, 胡飞, 孔令瑜, 等. 人工湿地脱氮除磷基质的吸附能力及其影响因素[J]. 湿地科学, 2016(1): 122-128.
Wang Wanbin, Hu Fei, Kong Lingyu, et al. Adsorption capacity of substrates of denitrification and dephosphorization in constructed wetlands and their influencing factors[J]. Wetland Science, 2016(1): 122-128.
- [40] 张翔凌, 黄华玲, 郭露, 等. Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 3058-3066.
Zhang Xiangling, Huang Hualing, Guo Lu, et al. Mechanisms of phosphorus removal by modified zeolites substrates coated with Zn-LDHs in laboratory-scale vertical-flow constructed wetlands[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 3058-3066.
- [41] Gray S, Kinross J, Read P, et al. The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waste treatment[J]. Water Research, 2000, 34(8): 2183-2190.
- [42] Yuan D H, Jing L J, Gao S X, et al. Analysis on the removal efficiency of phosphorus in some substrates used in constructed wetland systems[J]. Environmental Science, 2005, 26(26): 51-55.
- [43] Tan H X, Zhou Q. Characterization of adsorption on phosphorus in stuffings and its removal in substratum in wetland[J]. Journal of Agro-environmental Science, 2005, 24(2): 353-356.
- [44] Shilton A, Pratt S, Drizo A, et al. 'Active' filters for upgrading phosphorus removal from pond systems[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2005, 51(12): 111-116.
- [45] Yuan D H, Jing L J, 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.
- [46] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. Water Research, 1999, 33(17): 3595-3602.
- [47] 贺漫媚, 朱纯, 何仲坚. 生态浮床在广州亚运城河涌的应用及景观效果[J]. 广东园林, 2010, 32(6): 10-13.
He Manmei, Zhu Chun, He Zhongjian. Application and landscape effects of eco-floating bed in the Guangzhou Asian Games City's River[J]. Guangdong Landscape Architecture, 2010, 32(6): 10-13.
- [48] 葛铜岗, 罗固源, 许晓毅, 等. 串联式菖蒲浮床去除污染河水氮磷的试验研究[J]. 重庆环境科学, 2010, 3(1): 5-7.
Ge Tonggang, Luo Guyuan, Xu Xiaoyi, et al. Study on N and P removal in polluted water by acorus calamus cultivated in the series of floating-beds system[J]. Chongqing Environmental Science, 2010, 3(1): 5-7.
- [49] 秦伯强, 胡维平, 刘正文, 等. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 5-12.
Qin Boqiang, Hu Weiping, Liu Zhengwen, et al. Ecological engineering experiment on water purification in drinking water source in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(1): 5-12.
- [50] Valipour A, Raman V K, Ghole V S. A new approach in wetland systems for domestic wastewater treatment using *Phragmites* sp[J]. Ecological Engineering, 2009, 35: 1797-1803.
- [51] 王骥, 张兰英, 卢少勇, 等. 再力花/菖蒲生物湿地床去除河水中氮磷的试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012(增刊1): 408-414.
Wang Ji, Zhang Lanying, Lu Shaoyong, et al. Removal of N and P from river water treated by the bio-rack wetland planted with *Thalia dealbata* and *Acorus calamus* Linn[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012(Suppl 1): 408-414.
- [52] Jia L Y, Zhang B, He Y L, et al. Comparison of quartz sand, anthracite, shale and biological ceramics for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(2): 466-477.
- [53] Barca C, Troesch S, Meyer D, et al. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in constructed wetlands: Two years of field experiments[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(1): 549-56.
- [54] Wang Z, Dong J, Liu L, et al. Study of oyster shell as a potential substrate for constructed wetlands[J]. Water Science & Technology, 2013, 67(10): 2265-2272.
- [55] Klimeski A, Uusitalo R, Turtola E. Screening of Ca- and Fe-rich ma-

- materials for their applicability as phosphate-retaining filters[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 68(7): 143-154.
- [56] Calder N J. Field studies of enhanced phosphorus removal from constructed wetland effluents[J]. *Masters Abstracts International*, 2002, 40(3): 0744.
- [57] 李志元, 张丽云, 张永祥. 水温与表面负荷对表流人工湿地脱氮除磷效果的影响[J]. *市政技术*, 2015, 33(4): 109-111.
Li Zhiyuan, Zhang Liyun, Zhang Yongxiang. The effect of water temperature and surface loading on nitrogen and phosphorus removal of surface flow constructed wetlands[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2015, 33(4): 109-111.
- [58] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. *Water Research*, 1999, 33(17): 3595-3602.
- [59] Zhang T, Xu D, He F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47(5): 189-197.
- [60] Valipour A, Raman V K, Ahn Y H. Effectiveness of domestic wastewater treatment using a bio-hedge water hyacinth wetland system[J]. *Water*, 2015, 7(1): 329-347.
- [61] Yang X, Zhang X, Wang J, et al. Performance of the subsurface flow constructed wetlands for pretreatment of slightly polluted source water [J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23(4): 699-706.
- [62] Wang H, Wang X, Wang S M, et al. Purification efficiency of compound aquatic plants for the eutrophic water body[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 675-677: 430-433.
- [63] 熊国祥. 人工湿地中磷的行为与去除机理的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
Xiong Guoxiang. Research on the behavior and removal mechanism of phosphorus in wetland[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007.
- [64] 吴建强, 周训华, 王敏, 等. 水力停留时间变化对2种人工湿地净化效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(10): 3537-3542.
Wu Jianqiang, Zhou Xunhua, Wang Min, et al. Influence of hydraulic retention time variation on purification effects of two different constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(10): 3537-3542.
- [65] Kadlec R H, Knight R L. *Treatment wetlands*[M]. New York: Lewis Publishers, 1996.
- [66] 张俊辉, 吴红斌, 张冉. 垂直流人工湿地在城镇污水厂尾水深度脱氮除磷中的应用[J]. *工程建设*, 2016, 48(2): 70-74.
Zhang Junhui, Wu Hongbin, Zhang Ran. Application of vertical flow artificial wetland in deep removal of nitrogen and phosphorus from tail water of city sewerage plant[J]. *Engineering construction*, 2016, 48(2): 70-74.
- [67] Liolios K A, Moutsopoulos K N, Tsihrintzis V A. Modeling of flow and BOD fate in horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012(200/202): 681-693.
- [68] Liolios K A, Moutsopoulos K N, Tsihrintzis V A. Comparative modeling of HSF constructed wetland performance with and without evapotranspiration and rainfall[J]. *Environmental Processes*, 2014, 1(2): 171-186.
- [69] Langergraber G, Giraldo D, Mena J, et al. Recent developments in numerical modelling of subsurface flow constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3931-3943.
- [70] Kumar J L, Zhao Y Q. A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 400-406.
- [71] Langergraber G, Rousseau D P, García J, et al. CWM1: A general model to describe biokinetic processes in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 59(9): 1687-1697.
- [72] Giraldo D, Vitturi M D M, Iannelli R. FITOVERT: A dynamic numerical model of subsurface vertical flow constructed wetlands[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(5): 633-640.
- [73] Samsó R, Garcia J. BIO_PORE, a mathematical model to simulate biofilm growth and water quality improvement in porous media: Application and calibration for constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54(54): 116-127.
- [74] Wang Y C, Lin Y P, Huang C W, et al. A system dynamic model and sensitivity analysis for simulating domestic pollution removal in a free-water surface constructed wetland[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(5): 2719-2742.
- [75] Wang H, Meselhe E A, Waldon M G, et al. Compartment-based hydrodynamics and water quality modeling of a Northern Everglades Wetland, Florida, USA[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 247(4): 273-285.
- [76] Wang J, Huang S L, He Chengda, et al. Numerical analysis of the performance of horizontal and wavy subsurface flow constructed wetlands [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(3): 339-347.
- [77] Kotti I P, Sylaios G K, Tsihrintzis V A. Fuzzy modeling for nitrogen and phosphorus removal estimation in free-water surface constructed wetlands[J]. *Environmental Processes*, 2016, 3(1): 65-79.

Research progress in influence factors of phosphorus removal in constructed wetland systems

QIU Fuguo, XU Yanqiu, XU Junting, FU Kunming

Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education; Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

Abstract Phosphorus is one of the main causes of eutrophication of water bodies. Constructed wetland can remove phosphorus effectively and economically. This paper discusses the mechanism of phosphorus removal in constructed wetland, and reviews the physical/chemical/biological reactions for phosphorus removal by wetland plants, microorganisms and media in the constructed wetland. The effects of temperature, dissolved oxygen, hydraulic retention time and hydraulic load on the phosphorus purification in constructed wetland are discussed. The development and application of non-media constructed wetland for pollutants removal in water are also discussed.

Keywords phosphorus; constructed wetland; media; microorganism; plants

(责任编辑 王媛媛)