

# Research Progress of Phosphorus Removal and Resource Utilization of the Rural Domestic Sewage

Qian Liu

Shanghai Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Shanghai  
Email: 13681626104@163.com

Received: Feb. 1<sup>st</sup>, 2019; accepted: Feb. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

There is large quantity of phosphorus in the rural domestic sewage, which can be transformed into resource by recovery and be helpful to water environment protection. Both phosphorus removal and recovery techniques are presented in this paper. Methods of phosphorus removal include chemical precipitation, biological method, constructed wetland method and adsorption method; the predominance and the deficiency of each method are analyzed. Ion exchange resin method and struvite precipitation technique were introduced in detail. Struvite deposition technique is regarded as one of the most promising means of the phosphorus recovery. While, in China, the study of this area is still at the beginning stage and further research needs to be done.

## Keywords

Rural Domestic Sewage, Phosphorus Removal, Phosphorus Recovery, Struvite

---

# 农村生活污水中磷去除与资源化研究进展

刘倩

上海市机电设计研究院有限公司, 上海  
Email: 13681626104@163.com

收稿日期: 2019年2月1日; 录用日期: 2019年2月20日; 发布日期: 2019年2月27日

---

## 摘要

农村生活污水中含有大量的磷, 经过处理回收可以转变为磷资源, 又可以保护水环境。对除磷技术和回

收磷作了阐述。所涉及的除磷方法中,有化学沉淀法、生物法、人工湿地法及吸附法,分析并比较每种方法的优势与不足。重点介绍了离子交换树脂和鸟粪石沉淀两种磷回收技术。其中,鸟粪石沉淀技术被认为是最有前景的磷回收途径之一,而我国在这方面的研究还处于起始阶段,需要进一步开发研究。

## 关键词

农村生活污水, 除磷, 磷回收, 鸟粪石

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国民经济的快速发展和城乡一体化进程的加快,我国广大农民群众日常生活水平不断改善,生活方式与城市也越来越接近,农民用水量和农村生活污水的排放量日益增加。农村的污染排放已占全国总污染排放的“半壁江山”,其中,农业面源污染、农村生活污水和垃圾等污染、乡镇企业所带来的工业污染成为目前农村地区水环境状况恶化的主要来源[1]。

由于农村生活污染源比较分散,不容易集中,农村建设初期污水收集管道等基础设施的建设很不完善[2],加之村镇居民的环保意识较差[3],使得农村生活污水不能较好的得到处理,未经处理的生活污水直接就近排入河流、水塘等,使得大量氮、磷进入水体,造成水体富营养化、河道污染,极大程度的影响了农村水环境质量。在污水进入水体前,磷的去除是必要的,但是许多情况下还未能实现,以致造成面源性污染。与此同时,人类还面临着磷资源短缺的问题,据悉,2010年磷矿已成为一种濒危矿产,因此,在废水处理过程中进行磷回收,符合可持续发展的要求[4]。

在中国,城市生活污水处理的主要途径是经市政管网收集后输送到污水处理厂进行集中处理的,如果建立传统集中式污水处理系统,需要巨大的资金投入和长期的规划,而分散式就地处理不仅能够有效节省大量的管道铺设,吨水投资低,而且运行费用很少,同时可以保持农村周围环境的相对生态平衡,是一种经济有效的处理方法。

目前城镇化污水处理厂磷含量较易达标,而农村污水氮磷含量普遍偏高,依靠传统的生物除磷很难达标,因此,开发经济高效、无二次污染的除磷技术和磷回收技术成为目前水处理技术的研究重点。

## 2. 除磷方法

### 2.1. 化学沉淀法

化学法除磷是将可溶性金属盐如钙盐、铁盐、铝盐、镁盐、石灰等化学药剂投加到污水中与磷酸盐反应生成难溶性磷酸盐,形成絮凝体后与水分离,从而去除污水中的磷[5]。常用的金属盐主要包括氯化钙、硫酸铝、铝酸钠、三氯化铁、二氯化铁、硫酸亚铁、氢氧化镁等。金属盐的投加量取决于进水中各种磷化合物的浓度、废水排放要求等。

化学法除磷的去除率可达到80%~90% [6],其效率高于生物除磷,而且运行比较稳定。在一些发达国家和地区的污水处理厂已广泛采用化学法除磷,如美国的South Shore和Jones Island污水处理厂、上海的竹园第一污水厂等。但废水中含较多杂质离子,化学法需投加药剂,使污泥体积增加且成分复杂,容易造成二次污染;投加药剂需要贮药、溶药、加药设备;药剂消耗增加了投资和运行成本,这些在一

一定程度上影响了化学除磷技术在农村生活污水处理领域的推广和应用。

## 2.2. 生物法

污水生物除磷是通过聚磷菌(PAOs)过量摄取废水中的磷,以聚磷酸盐的形式积累于细胞内,然后作为剩余污泥排出。目前,广泛用于工程实践的为污水厌氧/好氧除磷技术,其基本原理是:在厌氧/好氧循环系统中,聚磷菌在厌氧条件下分解体内储存的聚磷并以正磷酸盐的形式释放;在好氧条件下以高于释放的量吸收磷,并产生富磷污泥,最后以剩余污泥的形式排放从而达到除磷的目的[7]。

目前广泛应用于工程实践的厌氧/好氧工艺有:A<sup>2</sup>/O 工艺、氧化沟工艺、序批式活性污泥法(SBR)、PhoStrip 工艺[8]及改良的 UTC 工艺等。影响厌氧/好氧除磷工艺的主要因素有:有机物及其可生物降解性、污水的 pH 值、溶解氧浓度、厌氧区的硝酸盐氮、污泥停留时间以及温度等。

生物法具有良好的除磷效果,且不需投加沉淀剂,一种被广泛应用的除磷技术。其缺点是富含磷的剩余污泥在处置过程中会释放出大量的磷,因此在污泥处理过程中会产生含磷量较高的污水,增加后续污水处理的负担,影响污水处理的整体效果[9]。

## 2.3. 人工湿地法

人工湿地[10]是人工建立起来的便于控制和工程化的一种生态处理系统,其组成为基质-微生物-植物混合体系。人工湿地除磷技术是一种成本低、技术含量低的废水生态过程处理技术,利用湿地中的各种生物(包括大型植物和各种微生物),将废水中的磷加以净化。人工湿地具有复杂而独特的除磷机理,充分利用了基质的过滤、吸附、沉淀,植物吸收和微生物分解等多个途径进行治理,除磷过程中综合了化学法、吸附法和生物法等三种方法的优点。人工湿地净化废水的主要作用者是微生物,它们把有机质作为丰富的能源转化为营养物质和能量。

按照形态的不同,人工湿地分为表面流人工湿地、潜流人工湿地和垂直流人工湿地,聂志丹等[11]对三种类型的人工湿地除磷效果进行了比较,结果表明,垂直流人工湿地与潜流人工湿地之间存在较小的差异,表面流人工湿地去除效果最差,不同湿地系统串联可以提高除磷效果。

湿地系统对所有类型污水的处理都普遍适用。其优点是:充分利用地形,工程简单,建设投资省;能够实现污水资源化,使污水处理与利用相结合;污水处理能耗少,运营方便,成本低廉。但人工湿地除磷也有其局限性,比如:占地面积大,没有空闲的土地是不宜采用的;污水的净化效果,在很大程度上受季节、气温、光照等自然因素的控制;防渗处理不当,地下水很可能受到污染;容易散发臭气和滋生蚊蝇等[12]。

## 2.4. 吸附法

吸附法除磷[13]是利用某些多孔或大比表面积的固体物质对水中磷酸根离子的亲和力,来实现的污水除磷工艺。吸附剂在吸附法中起着重要作用,磷通过吸附剂表面的物理吸附、离子交换或共沉淀过程,实现磷从污水中的分离。对于天然吸附剂,吸附作用主要依靠其巨大的比表面积,该类吸附以物理吸附为主,天然吸附剂经改性后可明显提高其孔隙率及表面积,从而提高吸附性能和离子交换性能,其中化学吸附占主导地位。

用于磷的去除的吸附剂一般要满足以下特征[14]:选择性很高;吸附容量大,吸附能力强;机械强度高;吸附速度快,抗干扰的能力强;吸附平衡浓度低,出水效果好;吸附剂性能稳定可以再生;原料来源广、容易获得并且造价低等。因此,在吸附法研究中,寻找新型高效环境友好的吸附剂是除磷关键所在。

吸附法与生物法等其他方法相比,不仅仅吸附速度快,除磷效率高,并且吸附质还可以被回收利用,不会对环境产生二次污染等。其缺点是吸附剂的抗干扰性低、溶解损失较大以及在再生的方面仍然存在一些问题。因此,寻求一种吸附容量及性能优异的高效吸附剂,或者利用废渣改性提高除磷效果是吸附法除磷的未来发展趋势。

## 2.5. 其他除磷方法

以上几种方法是比较常见的除磷方法,此外,根据农村生活污水的特殊性,综合考虑水体中其他指标的达标情况,还因地制宜地开发出实用的组合处理工艺,如厌氧滤池+人工湿地、组合生物滤池、一体化处理装置等。现对几种常见的农村生活污水处理技术进行比较,见表1:

**Table 1.** Comparison of common domestic sewage treatment technologies in rural areas

**表 1.** 常见的农村生活污水处理技术比较

序号	技术名称	适用范围	水质达标能力	基建投资	运行成本	占地面积	自动化程度	施工周期	环境友好性	备注
1	化粪池+土地渗滤	单户或联户生活污水处理,住户污水难以集中收集	二级排放标准(不稳定)	低	低	大	低	短	中	可根据情况灵活使用但处理效果难以保证,运行管理不方便
2	厌氧滤池+人工湿地	村庄生活污水集中处理,人数一般少于500人	二级排放标准	中	低	大	低	中	中	运行费用低,维护管理方便,土地占用大
3	厌氧滤池+生物滴滤池+人工湿地	村庄生活污水集中处理,人数一般500~1000人	一级B排放标准(季节影响磷达标)	中	中	大	低	长	差	运行费用比只有人工湿地工艺高,维护管理方便,占用一定土地,存在臭气及蚊蝇滋生问题,距离住户要有一定卫生防护距离
4	组合生物滤池	村庄生活污水集中处理,人数一般1000~2000人	一级B排放标准(季节影响磷达标)	高	中	中	中	长	中	自然处理和人工强化处理相结合,运行灵活,管理方便,运行费用稍高
5	一体化处理装置	村庄生活污水集中、分散处理均可	一级A排放标准以上	高	中	小	高	短	好	采用A/O、SBR、MBBR、MBR及A <sup>2</sup> O等工艺及其改进型,占地面积小,运行费用及维护管理视工程规模而定

## 3. 磷回收

在自然界中,磷循环是单向流动、难以再生的,是一种不可更新、难以替代的资源。在现有技术、经济水平下,世界上已探明的磷储备量仅够人类使用100年左右[15],开辟新的磷资源迫在眉睫。按照传统的思维,提到磷,首先想到的是如何从废水中处理掉,现在应该将思维转变到现代的“回收”思维上来,不仅要去除磷而且要回收磷,以进行再循环利用,符合资源循环利用的理念。目前,比较有前景的回收磷的方法主要为吸附法和结晶法。吸附法回收磷常用的吸附材料为离子交换树脂,结晶法回收磷常用的材料为鸟粪石。

### 3.1. 离子交换树脂回收磷

吸附法是利用吸附材料对废水中磷酸盐的吸附亲和作用,首先将磷吸附在材料的表面,当对磷的吸附达到饱和时,再利用解析剂回收吸附的磷,这些磷可以作为磷肥使用。

混合离子交换树脂(HAIX)是一种含水的氧化铁,因为它对废水中磷的沉淀具有很高的选择性,常用

于离子交换器中的填充材料[16]。SENGUPTA S 等[17]采用吸附法以固相肥料的形式回收废水中的磷,该方法采用混合离子交换器,该交换器中充满纳米级的氧化铁,以此实现磷的选择性去除。实验研究了3种合成材料 HAIX (混合离子交换树脂)、DOW-HFO (含水氧化铁)和 DOW-HFO-Cu (加铜的含水氧化铁)对磷的吸附作用。

化学沉淀法和生物法等在处理含磷的农村生物污水时,都会产生大量污泥,而含磷的污泥处理难度很大。采用离子交换树脂作为吸附材料的吸附法处理含磷废水,可以解决这一问题。并且,吸附法适用于不同浓度的含磷废水,而吸附达到饱和的离子交换树脂可以通过解吸进行磷资源的回收再利用,因此,研究开发解吸剂和适宜的解吸方式成为吸附法回收磷的关键。

### 3.2. 鸟粪石沉淀技术

结晶法回收磷是在结晶反应器中,通过控制 pH 和离子物质的量之比等条件,当溶液中反应物各离子的溶度积大于生成物的标准溶度积时,磷以晶体的形式从废水中结晶析出来。结晶法用于水体磷的去除具有除磷率高,出水水质好;操作简单,运行费用低;使用普适性高等优点,是一种处理高浓度含磷废水的有效处理方法。

鸟粪石(MAP,  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ )结晶成粒技术,不仅可以有效地去除污水中的氮磷,而且回收的 MAP 纯度高、颗粒大(mm 级)、便于收集和运输,同时克服了鸟粪石沉淀法收获的鸟粪石晶体细小、难以从水中分离且易堵塞管道的缺点,具有较高的环境和经济效益,因此得到了广泛的关注[17]。

从废水中以 MAP 的形式回收磷,一般是先用强化生物除磷法得到富磷污泥,然后将富磷污泥置于厌氧消化池中,经脱水后得到富磷液流,再将液流引入到 MAP 结晶器中,通过引入氨氮和镁源,控制适宜的 pH 和饱和度得到 MAP 晶体。氮源一般为  $NH_4Cl$  和  $(NH_4)_2SO_4$  等,镁源为  $MgCl_2$  或  $Mg(OH)_2$ ,为了降低药剂成本,也可以利用海水中的镁作为镁源[18]。其反应式为:



影响 MAP 生成的主要因素有: pH 值、温度、(N:P:Mg)的摩尔比、水力停留时间(HRT)、共存离子的影响等。反应条件的不同所产生的鸟粪石晶体的粒径和纯度均有所差异。为了得到较高的磷回收率,研究者们开发出各种类型的结晶反应器。RAHMAN M M 等[19]设计了一个简单的连续进料反应器,该反应器由树脂玻璃制成,体积为 12.3 L,通过泵加入废水和  $MgCl_2$  原料,空气进气流速为 0.73 L/min,得到了白色的不规则形状的 MAP 产品,磷的回收率达到了 93%,氨氮的回收率达到了 31%。

## 4. 结语

1) 污水中磷的去除可以有效防止水体富营养化,提高出水水质。实际应用中,选择恰当适用的除磷方法并综合考虑自然、经济社会等因素显得尤为重要。

2) 吸附法除磷具有投资省、处理效率高、污染小和可循环等优势,在实际应用中应根据实际废水水质及经济性要求选择合适的吸附剂,并应注重吸附磷后的后续处理,避免二次污染,考虑把废料开发为植物肥或土壤改良剂等,进行二次利用。

3) 以鸟粪石结晶沉淀的方式,从污水中回收磷,需要研究开发更加经济有效的工艺或设备,降低回收磷的成本,可结合农村生活污水示范工程长期连续运行稳定性开展相关研究,以推动磷的回收,进而促进农村生活污水处理技术与设备的开发和集成。

## 参考文献

- [1] 肖勤. 农村水环境污染现状及其治理对策[J]. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(1): 123-125.

- [2] 马琳, 贺锋. 我国农村生活污水组合处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2014, 40(10): 1-5.
- [3] 刘晓璐, 牛宏斌, 闫海, 等. 农村生活污水生态处理工艺研究与应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 184-191.
- [4] De-Bashan, L.E. and Bashan, Y. (2004) Recent Advances in Removing Phosphorus from Wastewater and Its Future Use as Fertilizer (1997-2003) [J]. *Water Research*, **38**, 4222-4246. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.014>
- [5] Caravelli, A.H., De Gregorio, C. and Zaritzky, N.E. (2012) Effect of Operating Conditions on the Chemical Phosphorus Removal Using Ferric Chloride by Evaluating Orthophosphate Precipitation and Sedimentation of Formed Precipitates in Batch and Continuous Systems. *Chemical Engineering Journal*, **209**, 469-477. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.039>
- [6] 赵由才. 环境工程化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] 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.
- [8] 赵庆良, 任南琪. 水污染控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [9] 刘堃, 汪莘, 徐鹏飞. 废水生物法除磷技术的新发展[J]. 绿色科技, 2013(11): 183-187.
- [10] 乔子涵. 人工湿地除磷性能的强化及其稳定性——基于两种强化手段的比较[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [11] 聂志丹, 年跃刚, 金相灿, 等. 3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1675-1680.
- [12] 刘舒巍, 张从轩, 杨兴桐, 等. SBBR 与人工湿地组合工艺脱氮除磷[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4527-4534.
- [13] An, B., Nam, J., Choi, J.W., et al. (2013) Enhanced Phosphate Selectivity from Wastewater Using Copper-Loaded Chelating Resin Functionalized with Polyethylenimine. *Journal of Colloid and Interface Science*, **409**, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.07.038>
- [14] 平兆艳, 文桂林, 潘向萍, 等. 粉煤灰漂珠处理含磷生活废水[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 45-49.
- [15] Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V., et al. (2006) An Economic Evaluation of Phosphorus Recovery as Struvite from Digester Supernatant. *Bioresource Technology*, **97**, 2211-2216. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.005>
- [16] O'Neal, J.A. and Boyer, T.H. (2013) Phosphate Recovery Using Hybrid Anion Exchange: Applications to Source-Separated Urine and Combined Wastewater Streams. *Water Research*, **47**, 5003-5017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.037>
- [17] Sengupta, S. and Pandit, A.B. (2011) Selective Removal of Phosphorus from Wastewater Combined with Its Recovery as a Solid-Phase Fertilizer. *Water Research*, **45**, 3318-3330.
- [18] 吴健, 平倩, 李咏梅. 鸟粪石结晶成粒技术回收污泥液中磷的中试研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 941-947.
- [19] Rahman, M.M. and Liu, Y.H. (2011) Recovery of Struvite from Animal Wastewater and Its Nutrient Leaching Loss in Soil. *Journal of Hazardous Materials*, **186**, 2026-2030. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.103>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)