

鸟粪石除磷工艺研究进展

佟 娟, 陈银广, 顾国维

(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)

摘 要: 介绍了国内外鸟粪石除磷工艺的研究现状、工艺控制因素及经济实用性, 表明了该工艺可以在高效去除污水中磷的同时生成鸟粪石(磷酸氨镁, MAP)——一种优质肥料, 同时对今后该工艺的发展前景与研究的方向提出展望。

关键词: 鸟粪石(磷酸氨镁, MAP); 除磷; 回收磷

中图分类号: X 703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6613(2007)04-0526-05

Recent advances in phosphorus removal with struvite formation

TONG Juan, CHEN Yinguang, GU Guowei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The phosphorus removal from wastewater can be achieved by chemical and biological methods. Recently, more attentions have been paid to the phosphorous removal with struvite formation due to its simultaneous formation of struvite (magnesium ammonium phosphate, MAP), a fertilizer. In this paper the technique, influence factors and economic practicability with the struvite method for phosphorus removal from wastewater are reviewed and the prospect and the research key points are proposed.

Key words: struvite (magnesium ammonium phosphate, MAP); phosphorus removal; phosphorus recovery

磷是造成水体富营养化的重要因素, 当环境水体中总磷浓度达到 0.02 mg/L, 水环境的生态平衡即被破坏。我国水体富营养化污染的情况已经非常严重: 2004 年我国监测的 27 个重点湖库中, 一类水质湖库占 22.2%; 劣一类水质湖库占 37.0%。太湖、巢湖、滇池富营养的面积占 77%。对 238 座水库的营养状态进行评价, 2/3 的水库处于中营养状态, 1/3 的水库处于富营养状态^[1]。可见, 严格控制排放污水中的磷浓度已经刻不容缓。

磷在生物圈中大部分是单向流动。而磷矿石的储量十分有限, 据估计全世界磷矿储量只能维持 100 年左右, 磷将成为人类和陆地生命活动的限制因素。我国磷矿储量中杂质含量低、品位高的磷矿预计在未来的 10~15 年将被开采完, 因此国土资源部已将磷矿资源列为 2010 年后不能满足国民经济发展要求的 20 种矿石之一。

随着对营养物质排放标准的不断提高以及资源

利用的可持续发展, 污水污泥处理技术已经开始向除磷同时能够回收磷的方向发展。污水中流失的磷量非常巨大, 现在许多国家都非常重视从污水中回收磷。瑞典政府已经明确规定自 2010 年起, 国内消费磷的 75%将来自于污水处理厂^[2]。

通过形成鸟粪石可以同时去除污水中的氮和磷, 并可将其回收利用。国内外对鸟粪石回收磷工艺进行较早, 国内则较晚^[3]。

1 鸟粪石除磷工艺

鸟粪石($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 即 MAP)是一种难溶于水的白色晶体, 正菱形晶体结构。0℃时溶

收稿日期 2006-08-22; 修改稿日期 2006-12-20。

基金项目 国家 863 基金项目(2004AA649330)及霍英东基金资助项目(No. 101080)。

第一作者简介 佟娟(1977—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污水处理理论与技术。E-mail: hitti@163.com。

解度仅为 0.023 g/L。常温下, 在水中的溶度积为 2.5×10^{-13} 。其 P_2O_5 含量约为 58%, 是一种极好的缓释肥, 自然界中的储量极少。污水中形成的鸟粪石晶体见图 1^[4]。当溶液中含有 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 以及 PO_4^{3-} , 且离子浓度积大于溶度积常数时, 会自发沉淀生成鸟粪石, 反应式如式 (1)。

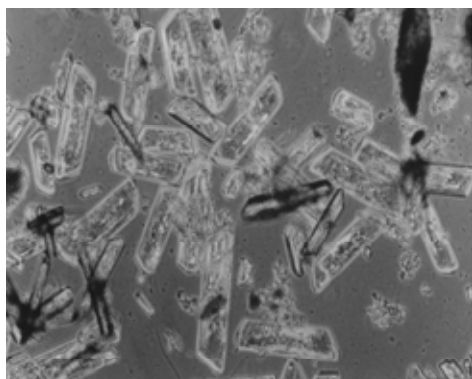
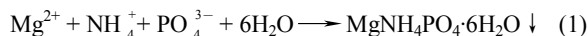


图1 鸟粪石反应器内液体的照片(100倍)

1939年, Rawn 在消化污泥上清液管道发现积累的鸟粪石晶体^[5]。1963年, 人们在 Hyperion 污水厂消化污泥池的滤网下部发现鸟粪石晶体沉积物。通过稀释消化污泥可以缓解晶体物质积累。但5年后, 消化污泥管路上鸟粪石晶体沉积物使得管径从 12 in 减小到 6 in (1 in=2.54 cm), 使得原本重力自流的污泥输送工艺不得不改用泵输送^[6]。虽然关于鸟粪石堵塞管路的报道不少, 但人们也发现, 污水中生成鸟粪石的同时可以降低氮和磷的含量, 从而减少污泥回流时带给污水处理工艺的氮、磷, 提高出水水质。因此人们对利用污水中的氮和磷生成鸟粪石做了大量试验研究, 已有许多国家在实际污水厂运行鸟粪石工艺回收磷, 并取得好的效果(见表1)。

表1 运行鸟粪石工艺的污水厂

使用地点	磷的去除率
意大利 Triviso 污水处理厂 ^[7]	58%~72%
日本岛根 (Shimane) 县污水处理厂 ^[8]	90%
日本北九州 Hiagari 污水处理厂 ^[9]	70%
日本大板市 Minami AEC 污水处理厂 ^[10]	50%
英国 Slough 污水处理厂 ^[11]	97%
澳大利亚布里斯班 Oxley Creek 污水处理厂 ^[4]	94%

1.1 工艺概述

通常鸟粪石除氮磷工艺分为沉淀法和结晶法。沉淀法多通过曝气、搅拌产生沉淀; 结晶法主要采

用流化床工艺。Hirasawa 等^[12]认为鸟粪石晶体形成过程中, 过饱和度在 0.001 5 mol/L 以下时, 晶体增长速度与过饱和度成线性增长关系; 过饱和度大于 0.001 5 mol/L 时, 晶体表面变得粗糙, 并出现细颗粒, 会增加后面的过滤工艺的负荷, 因此实际运行过程中要控制过饱和度。Münch 等^[4]采用 1mm 左右的压碎过筛的鸟粪石颗粒作为晶种启动处理设备, 结晶效果良好。Battistoni 等^[13]处理低磷浓度污水厂厌氧上清液[30~50 mg(PO_4 -P)/L], 不需投加晶核, 鸟粪石晶体在流化床内成核效果良好。流化床底部排放颗粒直径不超过 0.5 mm, 除磷率 75%。当聚电解质从污泥脱水工艺流到流化床时, 流化床底部逐渐变为固定床, 除磷效果有所降低, 但仍含有 45%~55%, 固定床底部排放颗粒直径可达 1.4 mm。

1.2 鸟粪石工艺适用的场合

污水处理过程中, 有 20%~50%^[4,11,14]的磷通过回流污泥回到处理工艺始端, 增加了处理设备的磷负荷, 降低了整体工艺的磷去除率。回流污水污泥含有大量的氮、磷和镁, 有利于形成鸟粪石。此外对某些含磷较高的废水也可以采用鸟粪石工艺。部分研究实例见表2。

表2 鸟粪石回收磷研究的实例

原水	工艺	Mg 源	磷去除率	文献
污水厂厌氧污泥上清液	流化床	$MgCl_2$	58%~72%	[7]
污水厂污泥消化液	流化床	$Mg(OH)_2$	90%	[8]
污水厂污泥脱水上清液	流化床	海水	70%	[9]
污水厂污泥离心液	曝气	$MgCl_2$	97%	[11]
污水厂消化污泥离心液	曝气	$Mg(OH)_2$	94%	[4]
污水厂厌氧上清液	搅拌	MgO	92%	[15]
养猪场污泥处理产生废水	搅拌	海水	81%	[16]
养猪场厌氧氧化塘废水	搅拌	$MgCl_2$	85%	[17]
养猪场废水	曝气	无外加	65%	[18]
胭脂虫提取废水	搅拌	MgO	99%	[19]

1.3 鸟粪石工艺中所需 Mg 的来源

大多数研究中投加的 Mg 源为 $MgCl_2$, 也有采用 $Mg(OH)_2$ 、 $MgSO_4$ 、海水和盐卤水(见表2)。 $Mg(OH)_2$ 不但可提供 Mg 离子, 还可以提高溶液 pH 值, 但其溶解性能较差(仅为 0.001 2 g/100 g); $MgCl_2$ 和 $MgSO_4$ 的溶解性较好, 具有较高的利用价值。Lee 等^[16]利用盐卤水作为 Mg 源处理养猪场厌氧氧化塘废水, 除磷效果与采用 $MgCl_2$ 、海水相差不多, 分别为 76%、75%、81%; 除氮效果与之相比则略差, 分别为 39%、

53%、54%。Chimenos 等^[19]用低纯度 MgO 作为 Mg 源处理高氮磷浓度的废水，去除效果比高纯度 MgO 更好，而且价格低廉。Quintana 等^[20]利用菱镁矿煅烧生产氧化镁的副产物 BMP 作为镁源处理自配污水，也取得很好的除磷效果。

2 鸟粪石工艺主要影响因素

2.1 反应时间

由于形成鸟粪石是一个化学反应过程，与大多数化学反应类似，鸟粪石的形成一般在较短的时间内就能完成。Stratful 等^[21]用自配水样进行实验，研究显示，反应从 1 min 到 180 min，正磷的去除率仅提高了 4%，但是鸟粪石晶体粒径从 0.1 mm 增长到 3 mm。Lee 等^[16]在用鸟粪石方法去除养猪场废水中的磷时发现，氮和磷的去除主要在反应开始的 1 min 内，反应 10 min 后，磷的去除率变化不大。Münch 等^[4]处理消化污泥离心液时发现，水力停留时间 1~8 h 均不影响除磷效果。Booker 等^[22]也认为氮磷的去除在反应开始的几分钟内完成。由此可见，反应时间对磷去除率的影响不大，但鸟粪石晶体粒径会随反应时间延长而增长。

2.2 氨氮浓度

根据反应式(1)，要生成鸟粪石，镁、氨氮、磷的理论物质的量比为 1:1:1。但研究表明，磷的去除率随氨离子浓度的增长而提高^[23]，而且剩余氨离子可提高鸟粪石纯度^[4, 24-25]。Stratful 等^[21]在 pH 值为 10、初始磷酸盐 318 mg/L、镁离子 80 mg/L、氨离子 60~150 mg/L 的情况下，做了剩余氨氮对鸟粪石纯度的影响试验，剩余氨在 30~80 mg/L 时，鸟粪石纯度高；剩余氨过低或过高，鸟粪石纯度都有所降低（见图 2）。剩余氨可以提高鸟粪石的纯度可能是因为过剩的氨离子缓冲了反应器内的 pH 值。

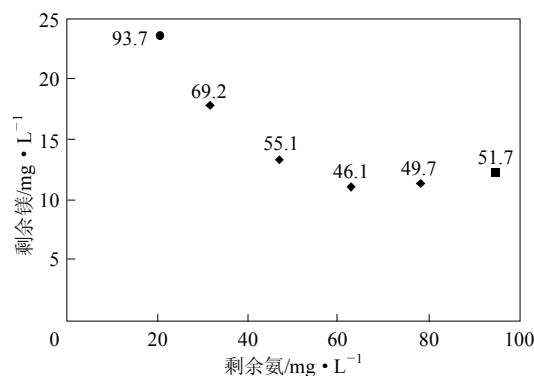


图 2 剩余镁离子和氨离子浓度与生成鸟粪石纯度的关系^[21]

● 沉淀中镁或磷相对氨剩余 10%~30%；◆ 纯鸟粪石；■ 沉淀中镁或磷相对氨少 10%~30%。符号上面数字为剩余磷浓度

2.3 镁磷物质的量比

镁磷物质的量比大于 1 时，鸟粪石形成迅速，磷的去除率随物质的量比增长而增长。但投加的镁达到一定浓度后，磷的去除率不再变化（见图 3）。大多研究中，镁磷物质的量比为 1.1~1.6^[15-16]。镁磷物质的量比与反应的 pH 值有一定关系。Katsuura^[23]认为 pH 值为 9.0 时，磷的去除率在镁磷物质的量比大于 1.3 时不再增长。而根据 Nelson 等^[17]报道，当 pH 值大于 9.0 时，提高 Mg^{2+} 浓度对除磷效果并无显著影响。Jaffer 等^[11]的小试试验中，镁磷物质的量比至少为 1.05，但也建议在实际水厂处理时，为避免钙离子对磷酸盐的竞争作用，镁磷物质的量比应为 1.3。

2.4 pH 值

pH 值是控制鸟粪石形成的重要参数，不仅影响鸟粪石的生成量，也影响鸟粪石的成分。通过模型预测，若反应平衡 pH 值为 7.5~10，会有大量鸟粪石生成；pH 值高于 10，沉淀的主要成分为更难溶的 $Mg_3(PO_4)_2$ ($K_{sp} = 9.8 \times 10^{-25}$)；pH 值高于 11，沉淀的主要成分为 $Mg(OH)_2$ ^[16]，见图 4。大多数文献在研究鸟粪石方法除磷时，采用的 pH 值范围为 8.0~10.7^[11, 18, 21, 26]，最佳 pH 值因污水水质和处理工艺而异。常用的 pH 值调节方法有投碱法和吹脱 CO_2 法。

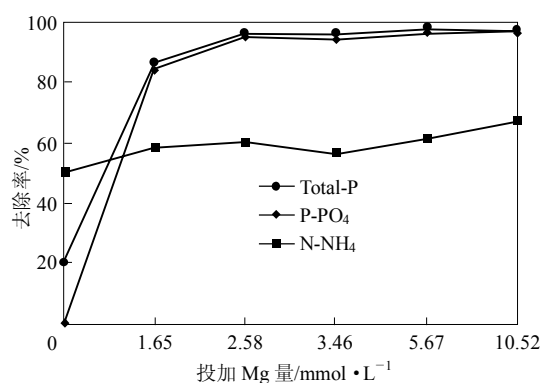


图 3 投加的镁量与去除率的关系^[11]

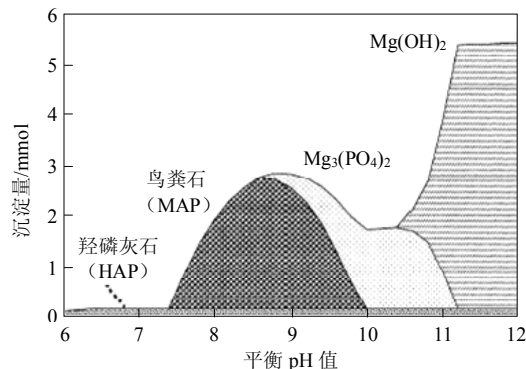


图 4 模型预测 pH 值对沉淀成分的影响^[16]

大多研究都采用投加 NaOH 调节 pH 值,也有人采用 $Mg(OH)_2$ [4]。Battistoni 等 [27] 以流化床工艺处理厌氧上清液,采用吹脱 CO_2 法提高 pH 值时,发现 pH 值 <8.0 时,鸟粪石形成十分缓慢。而持续曝气 (150 min) 不但可以提高 pH 值,还可以减少晶体形成所需时间。

3 鸟粪石工艺发展前景

当今主要的磷肥是三过磷酸钙 (TSP), 含 47% 的 P_2O_5 ; 磷酸氢二铵 (DAP), 含 18% 的氮, 46% 的 P_2O_5 ; 磷酸氨镁 (MAP), 含 12% 的氮和 52% P_2O_5 。这 3 种化肥磷的主要组分可溶于水, 且经常与其他物质如钾和硫等结合以能够供应充足的养分。其中鸟粪石是一种品质极好的磷肥。100m³ 污水中可以结晶出 1 kg 的鸟粪石。如果各国都进行污水鸟粪石回收, 则每年可得 63 kt 磷 (以 P_2O_5 计), 从而节约开采 1.6% 的磷矿 [28]。而每 1m³ 养猪场废水最多可以回收 171 g 鸟粪石, 回收的鸟粪石不需洗涤只需经过空气干化即可得到约 95% 纯度的鸟粪石 [29]。更有研究表明, 污泥回收 75% 的磷可减少 3%~3.8% 的污泥干固体质量。回收磷后, 污泥焚烧后灰分的产量也将显著下降, 可减少 12%~48% [30]。而且鸟粪石除磷工艺产生的污泥体积很小, 仅是化学除磷产生的污泥体积的 49% [31]。因此, 目前国外鸟粪石工艺回收磷酸盐工艺有很好的市场前景 (见表 3)。

表 3 鸟粪石生产成本与售价 [32]

国家	内容	费用/美元
澳大利亚	每吨鸟粪石的生产成本	140
澳大利亚	鸟粪石作为小店化肥的保守估计价	261
澳大利亚	鸟粪石建议市场价	198~330
日本	每吨鸟粪石的生产成本	460
日本	鸟粪石市场价	276
日本	鸟粪石成品的价格	500
英国	鸟粪石作为配料的价格	9
英国	磷矿石的价格	40~50
英国	鸟粪石市场建议价	283

我国对磷回收的研究只处于起步阶段。目前回收的磷酸盐产品的销售价格还不可能成为磷回收的主要推动力, 而诸如减少污泥产生量、改进污泥管理、可持续发展 (磷危机) 的压力、改进生物磷去除性能等因素才是磷回收的主要推动力 [33]。采用鸟

粪石工艺回收磷酸盐, 可以提高处理工艺的除磷效率、减少污泥生成量, 而且回收利用的磷酸盐产品还能带来经济效益, 因此该工艺必定有更大的发展空间。我国目前已有许多鸟粪石处理高浓度氨氮废水的研究 [34~36], 但回收磷工艺的研究相对较少, 且多集中在小试阶段, 研究的内容尚缺乏深度与广度。鸟粪石工艺产业化的主要问题是运行成本高、回收鸟粪石纯度低, 对鸟粪石在农业实用性的研究少。鸟粪石工艺的运行成本高主要在于需要投加镁源。若能在我国污水厂实际运行中将海水、盐卤水或镁矿工业副产品作为镁源, 必将大大降低运行成本。针对鸟粪石工艺发展所面临的问题, 今后研究重点将是降低生产运行成本、提高鸟粪石产量和纯度、简化回收鸟粪石程序及其作为肥料在农业生产中的实用性等。

参 考 文 献

- [1] 2004 年中国环境状况公报.
- [2] 汪慧贞, 王绍贵. pH 值对污水处理厂磷回收的影响[J]. 北京建筑工程学院学报, 2004, 20(4): 5-8.
- [3] 陈瑶, 李小明, 曾光明, 等. 污水磷回收中磷酸盐沉淀法的影响因素及应用[J]. 工业水处理, 2006, 26(7): 10-14.
- [4] Münch E V, Barr K. Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams[J]. *Water Res.*, 2001, 35(1): 151-159.
- [5] Rawn A M, Perry B A, Pomeroy R. Multiple stage sewage digestion[J]. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1939, 105: 93-132.
- [6] Borgerding J. Phosphate deposits in digestion systems[J]. *J. Water Pollut Control Fed.*, 1972, 44: 813-819.
- [7] Battistoni P, Paci B, Fatone F, et al. Phosphorus removal from anaerobic supernatants: start-up and steady-state conditions of a fluidized bed reactor full-scale plant [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, 45 (2): 663-669.
- [8] Ueno Y. Three years operating experience selling recovered struvite from full - scale plants. CD papers of the second international conference on the recovery of phosphorus from sewage and animal wastes, 2001, Scope 39: 14.
- [9] Nawamura Y. Pilot plant using seawater as a magnesium source for struvite precipitation. CD papers of the second international conference on the recovery of phosphorus from sewage and animal wastes, 2001, Scope39.
- [10] Mishina F. Struvite recovery from waster having low phosphate concentration. CD papers of the second international conference on the recovery of phosphorus from sewage and animal wastes, 2001, Scope 39: 16.
- [11] Jaffer Y, Clark T A, Pearce P, et al. Potential phosphorus recovery by struvite formation[J]. *Water Res.*, 2002, 36: 1834-1842.
- [12] Hirasawa I, Kaneko S, Kanai Y, et al. Crystallization phenomena of magnesium ammonium phosphate (MAP) in a fluidized-bed-type crystallizer[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2002, 237-239: 2183-2187.
- [13] Battistoni P, Paci B, Fatone F, et al. Phosphorus Removal from

- Supernatants at Low Concentration Using Packed and Fluidized-Bed Reactors[J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, 44: 6701–6707.
- [14] Jardin N, Popel J. Phosphate release of sludges from enhanced biological P-removal during digestion[J]. *Water Sci. Technol.*, 1994, 30: 281–292.
- [15] Yoshino M, Yao M, Tsuno H, et al. Removal and recovery of phosphate and ammonium as struvite from supernatant in anaerobic digestion[J]. *Water Sci. Technol.*, 2003, 48: 171–178.
- [16] Lee S I, Weon S Y, Lee C W, et al. Removal of nitrogen and phosphate from wastewater by addition of bittern[J]. *Chemosphere*, 2003, 51: 265–271.
- [17] Nelson N O, Mikkelsen R L, Hesterberg D L. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg: P ratio and determination of rate constant[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89: 229–236.
- [18] Suzuki K, Tanaka Y, Osada T, et al. Removal of phosphate, magnesium and calcium from swine wastewater through crystallization enhanced by aeration[J]. *Water Res.*, 2002, 36: 2991–2998.
- [19] Chimenos J M, Fernández A I, Villalba G, et al. Removal of ammonium and phosphates from wastewater resulting from the process of cochineal extraction using MgO-containing by-product[J]. *Water Res.*, 2003, 37: 1601–1607.
- [20] Quintana M, Sánchez E, Colmenarejo M F, et al. Kinetics of phosphorus removal and struvite formation by the utilization of by-product of magnesium oxide production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 111: 45–52.
- [21] Stratful I, Scrimshaw M D, Lester J N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate[J]. *Water Res.*, 2001, 35(17): 4191–4199.
- [22] Booker N A, Priestley A J, Fraser I H. Struvite formation in wastewater treatment plants: opportunities for nutrient recovery[J]. *Environ. Tech.*, 1999, 20 (7): 777–782.
- [23] Katsuura H. Phosphate recovery from sewage by granule forming process (full scale struvite recovery from a sewage works at Shimane Prefecture, Japan)[C]. In International conference on phosphorus recovery from sewage and animal waste, Warwick University, UK, 1998.
- [24] Katsuura H. Phosphorus from wastewater[J]. *Phosphorus Potassium*, 1992, 182: 33–34.
- [25] Salutsky M L, Dunseth M G, Ries K M, et al. Ultimate disposal of phosphate from wastewater by recovery as fertilizer[J]. *Effluent Water Treat. J.*, 1972: 509–519.
- [26] Battistoni P, Angelis A D, Pavan P, et al. Phosphorus removal from a real anaerobic supernatant by struvite crystallization[J]. *Water Res.*, 2001, 35(9): 2167–2178.
- [27] Battistoni P, Fava G, Pavan P, et al. Phosphate removal in anaerobic liquors by struvite crystallisation without addition of chemicals: preliminary results[J]. *Water Res.*, 1997, 31: 2925–2929.
- [28] Shu L, Schneider P, Jegatheesan V, et al. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97: 2211–2216.
- [29] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device[J]. *Bioresource Technology*, 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2006.06.008.
- [30] Jeanmaire N, Evaqns T. Refixation of phosphates released during bio-P sludge handling as struvite or aluminum phosphate[J]. *Environ Tech.*, 2001, 22(11): 1355–1361.
- [31] Woods N C, Sock S M, Daigger G T. Phosphorus recovery technology modeling and feasibility evaluation for municipal wastewater treatment plants[J]. *Environ Tech.*, 1999, 20: 653–680.
- [32] Doyle J D, Parsons S A. Struvite formation, control and recovery[J]. *Water Res.*, 2002, 36: 3925–3940.
- [33] 郝晓地, 甘一萍. 排水研究新热点——从污水处理过程中回收磷[J]. *给水排水*, 2003, 29(1): 20–24.
- [34] 李芙蓉, 徐君. MAP法处理高浓度氨氮废水的试验研究[J]. *工业安全与环保*, 2006, 32(2): 34–36.
- [35] 李晓萍, 刘小波, 金向军, 等. 化肥厂高浓度氨氮废水的处理和回用[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2006, 44(2): 295–298.
- [36] 郝瑞刚, 谭燕妮, 陈春燕. MAP法去除焦化废水氨氮[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(2): 144–146.

• 图书资讯 •

化工出版社重点书推荐

实验室溶液制备手册

李云巧 编著 129.00 元

本书是全面介绍实验室所用溶液与其配制方法的工具书。全书分为 4 个部分：基础知识、标准溶液、非标准溶液和附录。第一部分是溶液配制基础知识，介绍了：溶液配制的通用方法、分析实验室用水、溶液配制用标准物质、试剂与原料的相关知识；常用的称量、玻璃量器校准等操作；以及常用量、单位以及有效数字等与溶液浓度相关的表示及计算等内容。第二部分介绍 1525 种标准溶液的制备，其中包括：无机成分分析用标准溶液 117 种、有机生化成分分析用标准溶液 1164 种、酸碱滴定分析用标准溶液 24 种、络合滴

定分析用标准溶液 51 种、氧化还原滴定分析用标准溶液 51 种、沉淀滴定分析用标准溶液 17 种、非水滴定分析用标准溶液 22 种、pH 值标准缓冲溶液 8 种、其他标准溶液 71 种。第三部分介绍了 1327 种非标准溶液的制备，其中包括：常用酸碱溶液 33 种、常用盐溶液 279 种、有机溶液 256 种、生化溶液 246 种、缓冲溶液 60 种、指示剂溶液 382 种、纯化或特定要求的溶剂 9 种、常用吸收液 31 种、显色剂溶液 66 种，常用洗涤液 19 种。第四部分附录，列出了在实验室配制溶液中常要用到的相关知识、数据、标准与规范等。本书是各行业各类分析化验室与实验室工作人员的必备工具书。