

生物除磷理论及实践新突破——从主流 EBPR 到侧流 EBPR

刘智晓

(北京首创股份有限公司, 北京 100028)

摘 要: 基于传统生物除磷理论的带有前置厌氧区的主流生物除磷脱氮工艺,在过去近半个世纪的水体富营养化控制过程中一直发挥着主导作用。但是近些年全球范围内侧流活性污泥水解发酵项目(简称 S2EBPR 或 SSH)得到了快速发展及应用,研究发现,这些采用侧流活性污泥发酵的污水厂出现了高效且更加稳定的生物除磷现象,但这种侧流 EBPR 却无法利用传统经典理论进行对照解释。这种情况下,一种可以直接利用葡萄糖及氨基酸进行发酵并释磷的新 PAO 菌属 *Tetrasphaera* spp. 被发现并分离, *Tetrasphaera* spp. 在很多侧流活性污泥水解污水厂的菌群结构中相对传统 *Accumulibacter* 菌属占有更高的丰度,“*Accumulibacter* - *Tetrasphaera*”共生的“双 PAOs 协同共生除磷理论”及模型建立是对传统生物除磷理论的重大拓展与突破。基于污水处理生物除磷脱氮技术发展史的视角,从主流污水脱氮除磷工艺技术发展史梳理开始,对侧流 EBPR 现象发现及侧流发酵机理、*Tetrasphaera* spp. 发现、生化代谢模型及其生态位、双 PAOs 模型的建立等方面进行了系统性梳理和总结,并结合国内外研究成果及实际案例,总结了侧流活性污泥水解发酵技术工艺构型新发展及工程化应用现状,在此基础上分析了未来侧流 EBPR 技术发展前景,以期为我国污水厂未来深度脱氮除磷提标改造尤其是低 C/N 比污水的处理提供借鉴。

关键词: 侧流活性污泥水解发酵; 双除磷菌模型; 强化生物除磷; 氧化还原电位

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)24-0019-07

A New Breakthrough in the Theory and Practice of Biological Phosphorus Removal: From Mainstream EBPR to Side-stream EBPR

LIU Zhi-xiao

(Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In the past half century, the process with pre-anaerobic zone, which based on the traditional theory of nitrogen and phosphorus removal, has played a leading role on water eutrophication control. However, in recent years, the side-stream activated sludge hydrolysis and fermentation (S2EBPR or SSH) process has been rapidly developed and applied worldwide. It has been found that these plants with side-stream activated sludge fermentation were highly efficient and stable for biological phosphorus removal. While, the mechanism of the side-stream EBPR could not be explained with classical theory. A new PAO genus called *Tetrasphaera* spp. was discovered and isolated, which has higher abundance of *Tetrasphaera* spp. than traditional *Accumulibacter* species existed in many side-stream activated sludge plants. The discovery of coexistence and synergy between *Accumulibacter* and *Tetrasphaera* in phosphorus removal and corresponding model building were important extension and

breakthrough to the traditional biological phosphorus removal theory. Based on the development of biological nitrogen and phosphorus removal technologies, these aspects were systematically summarized and reported which included the phenomena and fermentation mechanism of side-stream EBPR, the discovery of *Tetrasphaera* spp. and biochemical metabolism model and its ecological niche, and the establishment of "Two-phosphate Accumulating Organisms Model". Combined with domestic and foreign studies and cases, the development and application status of side-stream activated sludge hydrolysis fermentation technology were summarized. And the future trend of side-stream activated sludge fermentation process was presented in order to provide reference for the future upgrading and reconstruction of the advanced phosphorus and nitrogen removal in Chinese wastewater treatment plants.

Key words: side-stream activated sludge hydrolysis and fermentation; two-phosphate accumulating organisms model; EBPR; ORP

控制水体或湖泊富营养化的关键性生态因子是减少氮、磷的输入并控制合适的 N/P 比,对于缓流水体和湖泊,控制水体磷的浓度又是防控富营养化的首要控制因子,利用强化生物脱氮除磷(EBNR)工艺通过生化途径去除营养盐被认为是最经济有效的方式,因此,半个多世纪以来,强化脱氮除磷甚至实现深度脱氮除磷(如达到技术极限型出水标准)、探索各种革新的工艺实现对 N、P 的高效稳定去除,一直是污水处理研究者及工程设计和运营工程师们痴迷和追求的极致方向。

科学研究和技术的开发始于对特殊试验现象的发现,技术发展得益于现象背后的机理和规律被逐渐揭示,百年活性污泥发展史也概莫如此。早在 1955 年,Greenburg 提出活性污泥法中磷的去除,印度 Srinath 研究小组和美国 Alarcon 研究小组分别在 1959 年和 1961 年报道了污水厂的生物除磷现象,Levin 和 Shapiro(1965 年)试验中发现活性污泥好氧过程磷的摄取和厌氧条件下磷的释放现象,在此基础上正式提出了 Phostrip 工艺,1967 年 Vacker 和 Connell 在美国一座市政污水厂也发现生物超量除磷现象,1975 年 Fuhs 和 Chen 正式系统性提出聚磷菌 PAO 的厌氧释磷-好氧过度摄取磷酸盐生物机制,也是在同一年,James Barnard 提出 Bardenpho 工艺,美国 Specter 获得 A/O 及 AAO 工艺发明专利,1976 年 James Barnard 正式推出 Phoredox 工艺的不同工艺类型组合,1980 年 UCT 工艺构型被提出,这一系列的生物除磷事件成为污水处理技术发展史上的里程碑。在过去近半个世纪中,上述活性污泥生物脱氮除磷及其变形或改进工艺在世界范围内被广泛应用,在有效削减污水中的有机污染物及营养盐、

控制和减轻水体富营养化方面发挥了重要作用。

1 侧流活性污泥发酵强化生物除磷的发现

传统主流强化生物除磷(EBPR)工艺中,除磷机理模型是建立在厌氧条件下 *Accumulibacter* 类 PAO 对进水中可快速降解有机物[主要是挥发性脂肪酸(VFAs)]的摄取而释磷的基础上,运行实践也表明,在进水 VFAs 充足的情况下,通过良好的设计和可靠的运行,传统 EBPR 工艺出水 TP 可以达到 0.5~1.0 mg/L。但是最近 10~20 年以来,欧美一些污水厂未设前置厌氧的活性污泥工艺获得高效且较为稳定的除磷效果(仅依靠生物除磷出水 TP 可以达到 0.1 mg/L),经典理论模型已经无法解释这种“非主流”除磷现象^[1]。与此同时,随着对污水厂排放标准要求的日益提高,常规主流的强化生物脱氮除磷工艺面临越来越多的技术挑战,如进水水质特性尤其是低 C/N 比污水对脱氮除磷工艺运行的可靠性、稳定性与可持续性的影响,外回流携带的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进入厌氧区破坏厌氧环境而影响厌氧释磷过程。此外,传统主流脱氮除磷工艺(如 A/O、 A^2O 、Bardenpho 工艺)中通过生物絮凝作用捕获和吸附的胶体、颗粒性有机物,在生化厌氧、缺氧过程中由于水解作用不充分并没有作为有效碳源被脱氮除磷过程充分利用。

1972 年被誉为“脱氮除磷之父”的 James Barnard 进行规模为 100 m^3/d 的“A/O-A/O”构型的脱氮中试时,在装置上设置了一个用于调节池容分配的可移动式隔板,无意中创造了一个“死区”而形成了一个“发酵区”,试验发现这个带有“发酵死区”的“A/O-A/O”脱氮系统获得了高效的生物除磷效率,在进水 TP 为 9 mg/L 情况下,出水 TP 可以

低于 0.2 mg/L,在第二段缺氧区,混合液 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 达到 30 mg/L;取消“死区”后,装置出水 TP 达到 2 mg/L。试验分析,显然是“死区”的厌氧过程发生了污泥和混合液的水解作用而产生了 VFAs,大量的 VFAs 通过 25 mm 连接管涌入到第二段缺氧区,促进厌氧环境形成进而发生了磷释放。显然,这次著名的四级反应器的脱氮试验中,可以来回移动的可调节“好氧-缺氧池容”的隔板及上面 25 mm 的 2 个孔洞,为日后侧流活性污泥水解发酵强化生物除磷(S2EBPR)技术的发现和进一步发展,打开了一扇窗。

2 侧流活性污泥发酵强化 EBPR 技术的发展

1972 年 James Barnard 采用的“A/O - A/O”脱氮工艺实际上就是其 1975 年提出的“四段式 Bardenpho”工艺的前身,根据此试验结果,后来进一步提出了带有厌氧区的 Bardenpho 工艺,也就是目前常用的“五段式 Bardenpho”工艺。然而,James Barnard 那次试验发现“死区”促进了生物除磷(BPR),但当时其并没有在这个试验研究基础上,进一步提出侧流污泥发酵或者混合液发酵的概念。那次试验的前后几年,也是活性污泥工艺前端设置一个厌氧区作为实现生物除磷的基本工艺控制条件刚刚被认知的年代,也是在 1975 年—1976 年,James Barnard 在 Bardenpho 工艺基础上正式提出发展带有前置厌氧段的 Phoredox 系列同步脱氮除磷工艺,这些工艺构型至今仍然在污水处理领域中扮演重要角色。

继续梳理侧流活性污泥发酵的技术发展史会发现,真正提出活性污泥侧流发酵理念和工程应用是 1990 年以后的事情了。较早介绍并将侧流活性污泥水解技术应用于工程实践的是丹麦克鲁格公司(Kruger A/S)及 Envidan 公司,Brinch P 于 1994 年报道了利用“回流活性污泥水解”补充 SCOD 强化脱氮除磷的理念和做法,2006 年 Vollertsen J 等人利用丹麦 Aalbog 东、西两座污水厂进行了侧流活性污泥水解的前期开创性工作,并对污泥水解动力学参数进行了系统研究。实际上,最初的实践是对初沉污泥进行水解,工程案例主要集中在丹麦、瑞典和北美,主要工艺控制参数 SRT 为 2~5 d。由于初沉污泥水解需控制水解和产酸过程而不进入产甲烷化,水解产物需要进行“泥-液”二次分离,因此存在 SCOD 及 VFAs 从泥水混合液中分离、“洗出”效率的问题,同时初沉污泥水解易受进水水质、水量波

动及初沉池排泥影响。相对于初沉污泥水解,活性污泥水解产物 SCOD 产率虽然较低,但是活性污泥水解无需进行发酵液的二次分离,泥水混合液可全部引入到厌氧池,同时回流的活性污泥流量及浓度可控,因此,活性污泥水解工艺稳定性更高,近些年受到越来越多的研究和工程化应用。

3 活性污泥发酵强化 EBPR 机理新发展

笔者曾对侧流活性污泥发酵技术工艺构型做过总结^[2],在早期的侧流活性污泥水解案例中,设置侧流污泥发酵单元的初衷就是对部分回流活性污泥(RAS)进行厌氧水解发酵,将产生的 SCOD 和 VFAs 提供给主流厌氧区的 PAOs 释磷过程,因此,2010 年前的关于侧流活性污泥发酵的文献,都是关于水解产率、影响因素及动力学等方面的研究和论述。

3.1 *Tetrasphaera* 菌属的发现与分离

很久以来,*Candidatus Accumulibacter* 一直被视为 EBPR 最主要的 PAOs。2010 年前后,丹麦和美国一些研究者发现一些未设传统前置厌氧区的侧流 EBPR 项目实现了高效生物除磷,而按照传统 PAOs 生化代谢模型已经不能解释和拟合这些“非主流”工艺实际的运行状况和出水水质^[3]。但是,当时的研究关注点尚未对水解发酵过程微观领域如菌群结构特性等进一步解析,只是停留在宏观水解反应动力学参数及影响因子的定量化研究等方面,对侧流活性污泥技术的认知也不够深入。后来分子生物学技术手段的快速发展为揭开动力学参数背后隐藏的“秘密”提供了通道,实际上,2000 年前后 Maszenan 等^[4]、Hanada 等^[5]从活性污泥中分离出了具有聚磷能力的 *Tetrasphaera* 菌属,并确认为是一种新型的 PAOs,这一发现拓展了对 PAOs 菌属种类的认知及定义。但这个时期的研究仅仅是确认了 *Tetrasphaera* 的形态、生理生化及分类特性,*Tetrasphaera* 菌属的生态位及其与深度厌氧环境、侧流 RAS 发酵之间的本质联系并没有被揭示。丹麦奥尔堡大学的研究团队通过对丹麦实际污水厂 EBPR 菌群结构的定量化解析^[6],发现 *Tetrasphaera* 的丰度超过了 *Accumulibacter*,且 *Tetrasphaera* 类 PAOs 具有发酵特性并能直接利用葡萄糖和氨基酸进行厌氧释磷,并在后续工作中进一步建立了 *Tetrasphaera* 生化代谢模型^[7](见图 1)。美国东北大学 April G 团队通过传统主流 EBPR 和侧流 EBPR 系统的对比也发现了类似规律,即 S2EBPR 工艺的活性污泥中 *Tetrasphaera* 具有

较高的丰度,侧流 EBPR 系统能够实现更高的除磷效率,此外,与传统主流除磷工艺相比,S2EBPR 中较低含量的聚糖菌(GAOs)使其出水水质更为稳定^[8]。上述两个团队的研究确立了深度厌氧环境下 EBPR 菌群结构的多样性,尤其是侧流 EBPR 工艺与 *Tetrasphaera* 菌属之间的内在本质联系。可以说,*Tetrasphaera* 在生物除磷过程中的发现和分离,以及后续对代谢生化模型的建立大大推进了对传统 EBPR 理论的拓展及完善,这也促使一些具有远见的科学家不得不重新反思目前常规的主流脱氮除磷机理及工艺流程的技术缺陷和改进的机会^[9]。

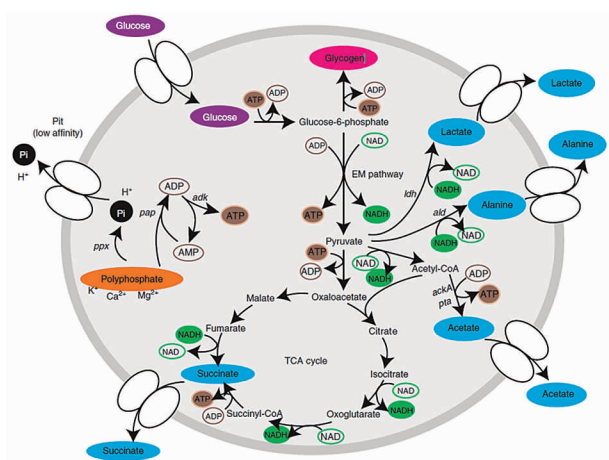


图1 *Tetrasphaera* 的厌氧生化代谢模型

Fig. 1 Anaerobic metabolic model for *Tetrasphaera*-related PAOs

3.2 “双PAOs”共生协同作用及模型建立

生化过程机理一旦被解析,工艺控制条件随之被认识和优化,后续工艺控制条件的深入研究进一步揭示了深度厌氧环境(ORP为-300 mV)独特的工艺特性。传统厌氧区的ORP为-250~-150 mV,实际项目往往存在过度混合,且SRT往往较短(≤ 1.5 h),难以培育更加丰富的厌氧生物菌群结构,PAOs以 *Accumulibacter* 为主;深度厌氧环境下,ORP可以稳定保持在-300 mV以下,且污泥在侧流池内停留时间长,使得EBPR菌群结构更加丰富,尤其是PAOs多样性发生很大变化,Mielczarek等^[10]利用FISH技术对丹麦具有EBPR功能的污水厂活性污泥种群进行了分析,发现两种不同的PAOs协同共生,其中*Tetrasphaera*占据活菌总量的27%,而传统的*Accumulibacter*仅占3.7%。美国东北大学的April Z. Gu团队研究也发现,S2EBPR系统的生物除磷性能显著高于常规AAO系统,且S2EBPR释磷比

($P_{\text{释放}}/HAC_{\text{摄取}}$)是AAO的3倍^[11],进一步的菌群结构定量分析表明,相对传统主流EBPR,S2EBPR污泥中的*Tetrasphaera*在聚磷菌群中占据主体地位(见表1)^[8],且GAOs数量显著低于常规AAO系统,在侧流活性污泥工艺中,同时发现对EBPR有负面作用的Competibacter类的GAOs生长受到明显抑制。

表1 侧流活性污泥水解工艺PAOs、GAOs组成情况

Tab. 1 Summary of PAOs and GAOs observations at S2EBPR facilities studied

项目	<i>Accumulibacter</i> (FISH)/%	<i>Tetrasphaera</i> (FISH)/%	GAOs (FISH)/%	$P_{\text{释放}}/HAC_{\text{摄取}}$
South Cary (SSR)	6.4	15.3	0.7	0.39
Westside Regional (SSRC)	7.6	18.1	0.5	0.38
Cedar Creek (SSM)	6.2	20.2	0.3	0.54
Henderson1 (UMIF)	5.6	19.7	3.8	0.16
Henderson2 (UMIF)	4.6	18.7	4.5	0.14

过去传统生物除磷理论认为PAOs(主要是指*Accumulibacter*菌属)利用进水中VFAs进行厌氧释磷,因此进水中的VFAs含量直接决定了厌氧释磷的效果,在*Tetrasphaera*与*Accumulibacter*共生协同机制被揭示后,美国Black & Veatch公司开发了基于“双PAOs”侧流EBPR模型(见图2)^[1]。不同种类的PAOs在EBPR过程中可有选择地实现不同的生化代谢途径,*Tetrasphaera*菌属可以直接利用大分子的葡萄糖、氨基酸等进行发酵释磷^[12],而糖酵解途径比TCA循环更有优势^[13],这就意味着*Tetrasphaera*菌属的发酵作用减少了对进水VFAs的依赖,这也是为何没有前置厌氧区的“非主流”工艺能取得高效生物除磷效果的原因所在。进一步讲,在侧流反应器内,*Tetrasphaera*与*Accumulibacter*存在共生协同促进作用,*Tetrasphaera*在深度厌氧环境下通过水解发酵作用将污水中的可慢速降解有机物进行水解产生VFAs并释放磷酸盐,水解过程产生的VFAs被*Accumulibacter*吸收储存并同时释磷,显然,对于碳源不足或者进水VFAs匮乏的污水处理,通过引进侧流污泥发酵、利用“双PAOs”协同作用可有效强化生物除磷。

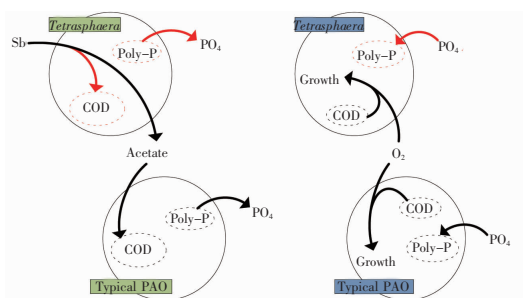
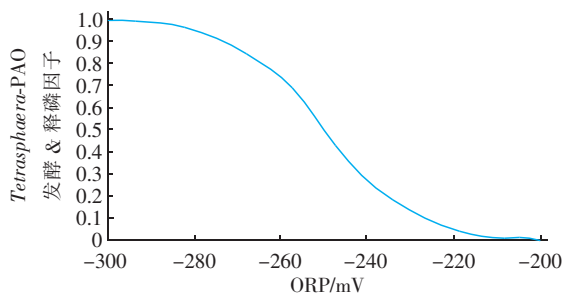
图 2 *Tetrasphaera* 与传统 PAO 共生协同促进代谢机制

Fig. 2 Coexistence and synergy mechanism of two-PAOs

在“双 PAO 模型”基础上,Black & Veatch 公司进一步建立了基于 ORP 抑制的 *Tetrasphaera* 厌氧发酵因子函数,发现厌氧 ORP 对 *Tetrasphaera* 厌氧活性具有直接影响,随着 ORP 值的升高,其发酵及释磷活性大幅降低(见图 3),显然,这进一步证实了 *Tetrasphaera* 与 *Accumulibacter* 具有完全不同的生态位^[12]。

图 3 ORP 对 *Tetrasphaera* 类聚磷菌厌氧发酵及释磷效率的影响Fig. 3 Effect of ORP on anaerobic fermentation and phosphorus release efficiency of *Tetrasphaera*-PAO

综上所述,*Tetrasphaera* 的发现及其代谢模型的建立,是对传统生物除磷理论的重大拓展和突破,必将更新对传统生物除磷的技术认知,并促进设计及运营两个层面从不同的维度,思考如何优化现有 EBPR 系统、如何重新构建新型的高效 EBPR 系统。

4 S2EBPR 技术的主要工艺构型及发展

4.1 基本构型

实际上,工艺的最初提出和发展并不是始于特殊功能微生物的发现,而是始于运营中的特殊现象、效果被发现而逐渐优化改进处理工艺,侧流污泥水解工艺就是如此,最初的侧流活性污泥工艺构型由丹麦研究团队提出,即侧流活性污泥水解概念(Side-stream activated sludge hydrolysis);美国东北大学及 Black & Veatch 公司提出了“S2EBPR”概念

及构型,虽然归属不同的名词,但本质上都是“侧流(side-stream)活性污泥发酵”范畴,即旨在创造一个深度厌氧环境($ORP \leq -300$ mV)以提高 PAO 种群多样性,促进 *Tetrasphaera* 的繁殖。

侧流反应器在结构和功能上独立于主生物池之外,通过独立的反应器设置独立的生境,进行污泥或者混合液的发酵和特殊功能微生物的培育,进而为主生物池进行接种。侧流反应器可以与生物池合建,也可以单独另行新建;对于改造项目,也可以从主生物池首端划分出一个区段作为侧流池。活性污泥发酵工艺常用的设计流程如图 4 所示,其中:AX 为缺氧池、AE 为好氧池、AN 为厌氧池、Ferm 为发酵池。

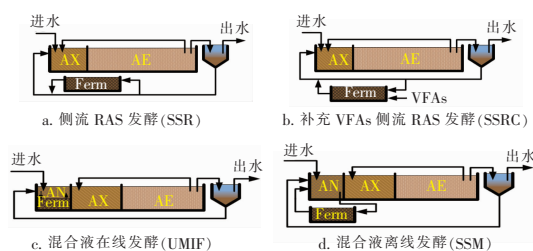


图 4 不同的活性污泥水解工艺构型

Fig. 4 Various forms of side-stream fermentation

其中图 4(a) 是活性污泥的侧流水解经典流程,将回流污泥 RAS 一部分引入到一个独立的侧流反应器进行水解产酸;图 4(b) 与图 4(a) 类似,只不过是图 4(b) 在采用 RAS 发酵的同时还进一步补充 VFA,这部分 VFA 可以是来自初沉污泥的发酵液,亦可以单独投加商业碳源,投加 VFA 的目的是缩短侧流水解池的 SRT。图 4(c) 为混合液在线发酵,通过厌缺氧区搅拌器的关闭实现了活性污泥混合液的水解发酵;图 4(d) 是混合液的侧流离线发酵模式,将混合液引入一个独立的侧流反应器进行水解。

4.2 工程化应用及构型新发展

随着机理的解析,工艺技术发展及应用方式也愈加灵活多样。侧流污泥水解除了上述经典的构型,实际中还有很多与不同工艺相结合的灵活运用方式,可将 S2EBPR 理念嫁接到不同的主流处理工艺中。

侧流活性污泥发酵工艺在欧美发展快速,近些年我国也开展了针对低 C/P、C/N 比污水的相关工程化应用,截至目前,国内设计、建设及运行中的侧流项目大概有 10 座,如淮南第一污水厂、白银市污

水厂等项目。我国和丹麦主要采用的侧流活性污泥水解工艺构型见图5,将10%~30%的RAS引至侧流SSH池,已运行的案例证明侧流RAS水解发酵技术可实现低C/N比污水的强化生物除磷,大大降低了外加碳源及化学除磷药剂的投加量。

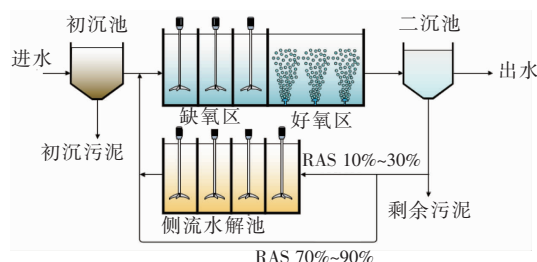


图5 我国和丹麦采用的侧流活性污泥水解发酵流程

Fig.5 Flow chart of side-stream activated sludge hydrolysis for EBPR in China and Denmark

美国在S2EBPR方面探索了较为灵活多样的技术构型,科罗拉多州的Pinery WRF中试项目关闭混合器后,采用UMIF运行模式,出水TP可以稳定在0.5 mg/L以下而无需化学除磷;Henderson WRF项目采用UMIF运行模式后,出水TP可以稳定在0.1 mg/L以下,采用UMIF运行反应器内实际的SRT可达3 d,这样可为活性污泥发酵提供充分的“深度厌氧”环境及充足的SRT。

South Cary污水厂主流工艺在四段式Bardenpho工艺构型中嵌入S2EBPR,二沉池回流污泥RAS不像传统回流模式直接进入主生物池,而是全部顺序经过串联的侧流“缺氧/厌氧”池,其中再抽取厌氧池一部分污泥进入活性污泥发酵池进行发酵,发酵后的污泥再回流到厌氧池。该厂出水TN可稳定达到3~4 mg/L,出水TP达到0.5 mg/L,可见,回流污泥的侧流发酵大大提高了生化工艺脱氮除磷效率。

美国Westside污水厂采用全部回流污泥侧流发酵构型,为了减小侧流发酵池的SRT,将初沉污泥发酵产生的VFAs引入侧流RAS池,初沉池出水不进入厌氧池而直接进入第一个缺氧区进行反硝化,这样在侧流RAS池HRT只有1.3 h的情况下,出水TP≤0.1 mg/L,根据对氮的物料平衡分析,缺氧区发生了明显的反硝化除磷作用,对TN的去除贡献了20%~40%。这种工艺构型对于低C/N比污水具有显著的技术优势,可以充分挖掘和使用污水内碳源,减少或取消外部碳源的投加。

实际上,有些污水厂其实“无意中”已经在探索

内碳源开发模式下的污泥水解模式运行,有污水厂运行人员摸索发现,储泥池按照污泥水解理念调整并改变运行方式后也能发生部分污泥水解,上清液回收引入厌(缺)氧池后提高了脱氮除磷效果。例如,我国嵊州市嵊新污水处理厂将储泥池上清液引入缺氧池后,TN去除量提高了3 mg/L;有污水厂厌(缺)氧区搅拌器发生故障或停运后,可导致污泥沉淀进而发生沉积层深度厌氧条件下的水解发酵,提高了脱氮除磷效率,因此将推流器或搅拌器改为“ON/OFF”实现UMIF模式运行,取得了意想不到的脱氮除磷效果。

5 结语

污水处理技术的突破与发展起初往往是始于特殊现象的发现与效果的确认,很多情况是实践先于“理论”解释,从最初的现象描述到新机理的揭示再到动力学和生化代谢模型的建立,进而逐渐形成比较完整的技术理论体系;新的理论体系完善后又进一步促进了对原有技术的变革,通过在科学研究及工程实践中不断完善和优化前续成果,实现技术发展的反复迭代过程。侧流活性污泥发酵技术的发现与发展轨迹也恰恰演绎了这种从“现象到理论”的技术发展逻辑。侧流EBPR并不是对主流EBPR的技术颠覆,而是进一步拓展和丰富了传统生物除磷技术理论,阐述了深度厌氧环境(-300 mV)下可利用葡萄糖、氨基酸进行发酵并除磷的*Tetrasphaera*菌属与传统*Accumulibacter*菌属存在共生协同、促进EBPR过程效率的机理,“双PAOs”模型除磷理论体系的建立为未来可持续、更加高效稳定的生物脱氮除磷技术开辟了一条崭新的技术选择路线,尤其是对于我国很多地区低C/N比(碳源匮乏)污水的处理提供了一个崭新可持续的工艺解决方案。

近几年,出现非常有趣的现象是,对于生物脱氮,专家们的眼光从“侧流”转向了“主流”;然而,对于生物除磷,关注点却是从“主流”转向了“侧流”,脱氮与除磷这对孪生的“矛盾兄弟”,通过这次空间顺序的轮换,是否能为未来的污水处理工艺发展缔造一个新的里程碑?这不是意外,也不是巧合,亦无人导演,但此过程却不以你我的意志为转移,魅力无穷,这一切都依赖于科学家们对未知领域新探索新发现的逐步打开。

致谢:感谢新加坡公用事业局(PUB)原首席专家曹业始博士、北京建筑大学郝晓地教授/博士、中

国人民大学环境学院王洪臣教授、中国市政工程华北设计研究总院总工程师郑兴灿博士对本文的审阅与宝贵建议。

参考文献:

- [1] Botero L, Barnard J, Kobylinski E. Sidestream biological phosphorus removal: The new frontier[J]. Florida Water Resour J, 2018, 1:44 - 49.
- [2] 刘智晓, 季民, 郝赞, 等. 利用活性污泥水解发酵补充碳源优化脱氮除磷[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4): 13 - 16.
- Liu Zhixiao, Ji Min, Hao Yun, et al. Application of activated sludge hydrolysis and fermentation to supplement carbon source for optimized nutrient removal[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 13 - 16 (in Chinese).
- [3] Stokholm-Bjerregaard M, McIlroy S J, Nierychlo M, et al. A critical assessment of the microorganisms proposed to be important to enhanced biological phosphorus removal in full-scale wastewater treatment systems [J]. Front Microbiol, 2017, DOI:10.3389/fmicb.2017.00718.
- [4] Maszenan A M, Seviour R J, Patel B K C, et al. Three isolates of novel polyphosphate-accumulating Gram-positive cocci, obtained from activated sludge, belong to a new genus, *Tetrasphaera* gen. nov., and description of two new species, *Tetrasphaera japonica* sp. nov. and *Tetrasphaera australiensis* sp. nov. [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2000, 50(2): 593 - 603.
- [5] Hanada S, Liu W T, Shintani T, et al. *Tetrasphaera elongata* sp. nov., a polyphosphate-accumulating bacterium isolated from activated sludge [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2002, 52(3): 883 - 887.
- [6] Nguyen H T T, Le V Q, Hansen A A, et al. High diversity and abundance of putative polyphosphate-accumulating *Tetrasphaera*-related bacteria in activated sludge systems [J]. FEMS Microbiol Ecol, 2011, 76(2): 256 - 267.
- [7] Kristiansen R, Nguyen H T T, Saunders A M, et al. A metabolic model for members of the genus *Tetrasphaera* involved in enhanced biological phosphorus removal[J]. ISME J, 2013, 7(3): 543 - 554.
- [8] Onnis-Hayden A, Srinivasan V, Tooker N B, et al. Survey of full scale side-stream EBPR facilities and comparison

with conventional EBPR: Process stability, kinetics and microbial ecology[EB/OL]. <http://www.preprints.org/manuscript/201808.0241/v1>, 2018 - 08 - 14.

- [9] Barnard J L, Dunlap P, Steichen M. Rethinking the mechanisms of biological phosphorus removal[J]. Water Environ Res, 2007, 89(11): 2043 - 2054.
- [10] Mielczarek A T, Nguyen H T T, Nielsen J L, et al. Population dynamics of bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal in Danish wastewater treatment plants[J]. Water Res, 2013, 47(4): 1529 - 1544.
- [11] Wang D, Tooker N B, Srinivasan V, et al. A full-scale comparative study of conventional and side-stream enhanced biological phosphorus removal processes [EB/OL]. <https://www.preprints.org/manuscript/201808.0250/v1>, 2018 - 08 - 14.
- [12] Marques R, Santos J, Nguyen H, et al. Metabolism and ecological niche of *Tetrasphaera* and *Ca. Accumulibacter* in enhanced biological phosphorus removal [J]. Water Res, 2017, 122: 159 - 171.
- [13] Lanham A B, Oehmen A, Saunders A M, et al. Metabolic versatility in full-scale wastewater treatment plants performing enhanced biological phosphorus removal[J]. Water Res, 2013, 47(19): 7032 - 7041.



作者简介:刘智晓(1972 -), 男, 山东莒县人, 工学博士, 高级工程师, 中国勘察设计协会水系统分会理事, 中国水工业协会水系统智能化研究会理事, 首创股份高级专家, 主要从事给水与污水处理工艺技术方案及优化、高效、可持续水处理工艺及控制技术研究及产业化等相关方面的工作。

E-mail: liuzhixiao@163.com

收稿日期:2018 - 08 - 14