

反硝化聚磷菌 NG4 干粉菌剂制备条件优化

李 微¹, 刘 宁¹, 朱心雨¹, 孙慧智²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 中国市政工程东北设计研究总院有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要 目的 获得反硝化聚磷菌干粉菌剂优化制备条件并分析其稳定性。方法 以反硝化聚磷菌 NG4 为菌种来源, 麦麸、玉米粉混合物作为载体, 牛肉膏蛋白胨培养基为发酵液进行干粉菌剂制备。将 1 g 干粉菌剂投至 100 mL 人工模拟配水中经过 2 h 厌氧 12 h 缺氧处理, 并通过单因素实验确定反硝化聚磷菌菌剂的载体、投菌量、发酵液投加量及 pH 值的最佳配比。结果 在麦麸、玉米干粉质量比为 85:15, 投菌液量为 20 mL, 发酵液用量为 20 mL, PAM 培养液为 2 mL, pH 值为 6.5 的条件下制得干粉菌剂, 硝酸盐氮和总磷的去除率可达 87.92% 和 90.29%, 在 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下可保存 40d 左右, 且菌剂的除磷脱氮性能不产生明显变化。结论 在最佳配比下制得 NG4 干粉菌剂, 污染物去除率高且稳定性强。

关键词 反硝化聚磷菌; 脱氮除磷; 干粉菌剂; 污水处理

中图分类号 TU99; X703.1

文献标志码 A

Preparation Conditions Optimization of Denitrifying Phosphorus Accumulating Bacteria NG4 Dry Powder

LI Wei¹, LIU Ning¹, ZHU Xinyu¹, SUN Huizhi²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute, Jilin, China, 130021)

Abstract: In order to obtain dry powder of denitrifying phosphorus accumulating bacteria, its preparation conditions were optimized and its stability was analyzed. Denitrifying phosphorus accumulating bacteria NG4 used as the source, wheat bran and corn flour mixture as the carrier, beef extract peptone medium as fermentation broth, the dry powder bacteria preparation was carried out. 1g dry powder bacteria were put into 100ml artificial simulated water for 2h anaerobic and 12 h anoxic treatment, and the optimal ratio of carrier, bacterial dosage, fermentation broth dosage and pH value was determined by single factor experiment. Under the condition for ratio of wheat bran and corn powder carrier 85:15, microbial liquid dosage 20 mL, fermented liquid dosage of 20 mL,

收稿日期:2020-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51776131);辽宁省科技厅自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0671)

作者简介:李微(1982—),女,副教授,博士,主要从事污水处理方面研究。

PAM culture for 2 mL, pH value of 6.5 dry powder was made by the bacterium agent. Nitrate nitrogen and total phosphorus removal rate of bacterium agent can reach 87.92% and 90.29%. Under the condition of $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bacterium agent can be saved about 40 d, and its biological nitrogen removal performance does not have obvious change. So the dry powder fungus agent was prepared at the optimum ratio which has high removal rate and high stability.

Key words: denitrifying poly-phosphate accumulating microorganisms; denitrification and dephosphorization; bacterial powder; sewage treatment

氮和磷的超标排放是造成水体污染和富营养化的主要原因之一^[1]。因此,对水体富营养化进行控制,探求高效率低能耗的生物脱氮除磷技术已然是我国处理水环境问题的重中之重^[2]。反硝化聚磷菌(Denitrifying Poly-phosphorus Accumulating Organism, DPAO)在厌氧条件下利用聚磷菌分解体内的多聚磷酸盐(poly-P)产生能量,吸收可挥发性脂肪酸(VFA)并合成PHB贮存于体内;在缺氧条件下可以同时完成过量摄入磷及反硝化反应过程,从而实现同步脱氮除磷^[3-6]。反硝化脱氮除磷工艺具有运行周期短、吸磷速率快的优势,与传统的除磷脱氮技术相较,耗氧量更少,能量消耗更低,缩短了反应时间^[7-8],并解决了聚磷菌和反硝化菌碳源竞争的矛盾以及聚磷菌和硝化菌泥龄差异的矛盾,实现了“一碳两用”。郑喜春^[9]采用自制水族箱的方式确定了菌株TGR30、LG1-6、YB1按1:1:1比例混合制备的菌剂其脱氮除磷率最佳,总接菌量为1%时总氮去除率达到95%,磷去除率为17.70%。张文艺等^[10]得出反硝化聚磷菌菌剂种子液适宜的培养条件为:温度30~32℃,溶解氧相当于70%~88%饱和溶解氧,培养时间15~20h。吴晓娜等^[11]通过研究不同接种比对反硝化聚磷菌菌剂脱氮除磷效应的影响,确定菌种初始接种比为2%体系的脱氮除磷效果最好。目前有关反硝化聚磷菌菌剂的研究还停留在实验室研究阶段^[11],大部分局限于液态菌剂,且液态菌剂存在不便于运输、保质期短和施用工艺复杂、人工成本较高等不足,同时考虑其稳定性及贮藏时间的研究较少,鉴

于此,笔者以高效反硝化聚磷菌NG4为研究对象,优化干粉菌剂制备条件,同时对其稳定性进行研究,旨在为反硝化聚磷菌在废水生物处理实际工程实践中的应用提供理论依据和技术支持。

1 试验

1.1 菌种来源

分离用泥采用稳定运行的SBR反应器^[12-13]中某缺氧段的活性污泥混合液。采用稀释涂布法和平板划线分离法进行分离纯化,并辅以生理生化及染色试验,最终筛选出具有同步脱氮除磷作用的反硝化聚磷菌6株,选择其中一株N4进行紫外诱变得8株纯菌株,经吸磷释磷试验发现NG4反硝化除磷效率最高,16S rDNA测定其为戈登氏菌属。试验以NG4作为研究对象,优化反硝化聚磷菌菌剂的制备条件。

1.2 培养基

反硝化培养基:琼脂为15 g/L, KNO_3 为1 g/L, KH_2PO_4 为1 g/L,柠檬酸钠为5 g/L, K_2HPO_4 1 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为0.2 g/L, pH 值为7.2~7.4。

PAM培养液:酸氢磷二钠为3.06 g/L,硫酸铵为2.75 g/L,磷酸二氢钾为3 g/L,氯化钙为0.25 g/L,柠檬酸钠为4.0 g/L,七水硫酸镁为0.20 g/L,氯化钠为2.5 g/L,蔗糖为0.01 g/L^[14]。

牛肉膏蛋白胨培养基:蛋白胨为10 g/L,牛肉膏为3 g/L,氯化钠为5 g/L, pH 值为7.2~7.4^[15]。

酵母浸出汁:酵母膏为5 g/L。

灭菌条件:压强为 1.03×10^5 Pa,温度为 121°C ,时间为 20 min。

1.3 试验用水水质

以人工合成的生活污水作为试验用水,以 NH_4Cl 作为氮源, KH_2PO_4 为磷源,无水乙酸钠作为外加碳源,并添加无水氯化钙, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 及微量元素。水温调节为 25°C ,并通过 NaHCO_3 调节进水的 pH 值为 7.5~7.8。试验配水水质如表 1 所示。每次试验前配置人工模拟废水,并对其进行高压湿热灭菌,冷却后备用。

表 1 试验配水水质

Table 1 Quality of experimental water mg/L

| $\rho(\text{COD})$ | $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ | $\rho(\text{TP})$ | $\rho(\text{微量元素})$ |
|--------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------|
| 70~220 | 5~10 | 7~12 | 1 |

1.4 NG4 干粉菌剂制备方法

以种子液为对象制备干粉菌剂。在转速为 120 r/min、温度为 30°C 、初始 pH 为 6.5 的条件下培养 20 h 得到 Poly-P 颗粒的 NG4 种子液,取适量种子液在 4 000 r/min 的低速离心机中离心 10 min,去除上清液用无菌水重悬,洗涂离心,反复冲洗 2~3 次。加入 PAM 培养液和相应体积的牛肉膏蛋白胨培养液,使菌体重悬;并将其倒入进行灭菌处理、过筛后的载体中,在温度为 35°C 、转速为 120 r/min 条件下发酵 8 h。将其放置于培养皿内,在温度为 30°C 的条件下进行干燥制成菌剂成品。

1.5 制备菌剂条件优化

通过单因素试验分析载体配比、投菌量、发酵液用量、发酵液 pH 值对 NG4 干粉菌剂的磷和硝酸盐氮去除效果。在 100 mL 人工模拟生活污水中投入 1 g 微生物菌剂,进行 2 h 厌氧 12 h 缺氧处理,待投菌运行处理后将水样离心分别测定上清液中 TP 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,确定菌剂各组分最佳配比。

1.5.1 载体配比

制备 NG4 种子液且离心获得菌种,灭菌

后麦麸与玉米粉的质量比分别为 75:25、80:20、85:15、90:10、95:5、100:0,投菌量为 20 mL,加入 2 mL PAM 培养液,20 mL 牛肉膏蛋白胨培养液,调节 pH 为 6.5,并按制备方法制成菌剂成品。

1.5.2 投菌量

制备 NG4 种子液且离心获得菌种,试验设置 0、10、20、30、40、50 mL 共 6 种不同梯度的投菌量,加 2 mL 的 PAM 培养液,20 mL 牛肉膏蛋白胨培养液,灭菌后的载体配比 $m(\text{麦麸}):m(\text{玉米粉}) = 85:15$,调节 pH 为 6.5,并按制备方法制成菌剂成品。

1.5.3 发酵液用量

制备 NG4 种子液且离心获得菌种,发酵液用量分别为 5、10、15、20、25、30 mL,投菌量为 20 mL,PAM 培养液为 2 mL,灭菌后的载体配比 $m(\text{麦麸}):m(\text{玉米粉}) = 85:15$,调节 pH 为 6.5,按制备方法制成菌剂成品。

1.5.4 发酵液 pH 值

制备 NG4 种子液且离心获得菌种,投菌量为 20 mL,PAM 培养液为 2 mL,发酵液用量为 20 mL,灭菌后的载体配比 $m(\text{麦麸}):m(\text{玉米粉}) = 85:15$,调节培养基的 pH 分别为 5.5、6.5、7.0、7.5、8.0,按制备方法制成菌剂成品。

1.6 分析测定方法

根据国家环保总局《水和废水检测方法》^[16]。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法;pH 采用 pHS-25 型 pH 计进行测定;TP 采用过钼锑抗分光光度法。

2 结果与分析

2.1 NG4 干粉菌剂制备条件及优化效果

2.1.1 载体质量比对菌剂脱氮除磷效率的影响

图 1 为载体质量比对 NG4 干粉菌剂脱氮除磷效果的影响。随麦麸在载体中所占质量分数的增多,TP 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率呈先上升后下降的趋势。麦麸和玉米粉作为微生

物载体其质量比会影响到菌剂成品的疏松程度以及微生物能够繁殖生长的空间进而影响到干粉菌剂的脱氮除磷效率。当麦麸与玉米粉的质量比为 75:25 时,菌剂的 TP 去除率仅为 61.74%, NO_3^- -N 去除率仅为 66.19%,随着载体质量比的增加,在麦麸与玉米粉的质量比为 85:15 时,氮磷去除率达到最大值,分别达到 90.35% 和 87.62%,此时生长繁殖空间较大,物料疏松度适宜,菌株成活率较高,载体可容纳的活菌数达到最大,使得菌剂具有较高的脱氮除磷效果,这与陈晶^[17]研究结论相一致。而当麦麸在载体所占质量分数继续增加时,TP 和 NO_3^- -N 的去除率都会有不同程度的降低,在载体配比为 100:0 时,除磷率和脱氮率仅为 48.16% 和 52.58%。因此制备 NG4 干粉菌剂其最佳载体配比为 m (麦麸): m (玉米粉) = 85:15。

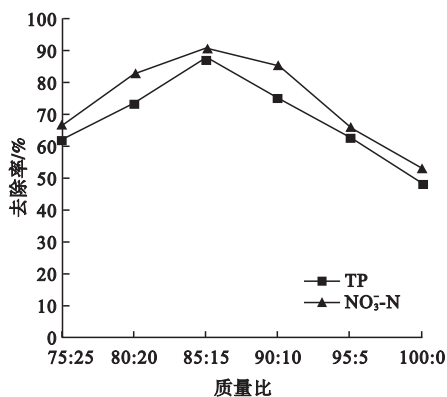


图1 载体质量比对菌剂脱氮除磷效率的影响

Fig. 1 Effects of carrier mass ratio on nitrogen and phosphorus removal efficiency

2. 1. 2 投菌量对菌剂脱氮除磷效率的影响

图2为NG4干粉菌剂在不同投菌量条件下的除磷脱氮效率。当投菌量为0时,干粉菌剂对 NO_3^- -N和TP去除率分别为15.76%和12.41%,即便功能性菌株投加量为0,但由于载体比表面积较大且具有一定的吸附性能,所以会吸附部分的 NO_3^- -N和TP。随着投菌量的不断增加,在投菌量为20 mL时,干粉菌剂的脱氮除磷效率达到最

大值, NO_3^- -N和TP去除率分别为90.25%和86.08%。但当投菌量继续增加时,脱氮除磷效果均会有小幅度下降,当投菌量达到50 mL时, NO_3^- -N和TP去除率已分别下降至68.99%和76.41%。当投菌量过小时,由于菌体浓度过低,微生物的调整期延长,很难快速适应新环境,生长较为缓慢,导致发酵液中的初生菌体减少,从而影响去除效果;投菌量过多时,由于载体和发酵液有限,菌株生长所需的营养供给不足,导致菌体代谢缓慢,对菌体生长和降解作用产生不利影响,部分菌株死亡,脱氮除磷率下降,同时也会造成不必要的浪费。并且投菌量过多时,菌体与体系内所含氮磷的相对比例升高,减少菌体与N、P相结合的几率,菌体之间相互竞争争夺氮磷产生抑制作用,降低其脱氮除磷效率^[18]。因此,制备NG4干粉菌剂其最佳投菌量为20 mL。

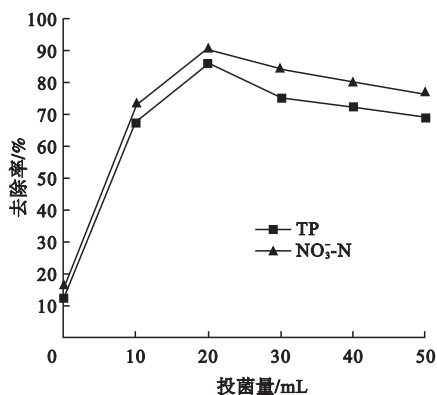


图2 投菌量对菌剂脱氮除磷效率的影响

Fig. 2 Effects of bacterial dosage on nitrogen and phosphorus removal efficiency

2. 1. 3 发酵液用量对菌剂脱氮除磷效率的影响

图3为不同发酵液用量对NG4干粉菌剂脱氮除磷率的影响。发酵液用量在15~25 mL条件下,NG4干粉菌剂有较好的污水处理效果,并且NG4干粉菌剂的最适发酵液用量为20 mL。当发酵液用量为5 mL时,TP和 NO_3^- -N去除率仅为46.73%和51.66%。在发酵液较少的情况下,营养物质

供给不足,菌株死亡率大大提升,进而降低菌剂对污染物的降解效果。当发酵液用量增加到 20 mL 时,吸附于载体上的活菌数达到峰值,营养物质较为充足,此时 NG4 干粉菌剂的脱氮除磷率达到最大值,分别为 91.26% 和 88.41%。继续增加发酵液用量到 30 mL, TP 和 NO_3^- -N 去除率降低,分别降为 67.56% 和 71.08%,说明此时吸附于载体上的活菌数会有所降低,进而影响其脱氮除磷的菌效发挥;而且随着发酵液用量的增加其生产成本也随之升高,不利于干粉菌剂在废水生物处理工程实践中的应用。因此,制备 NG4 干粉菌剂其最佳发酵液用量为 20 mL。

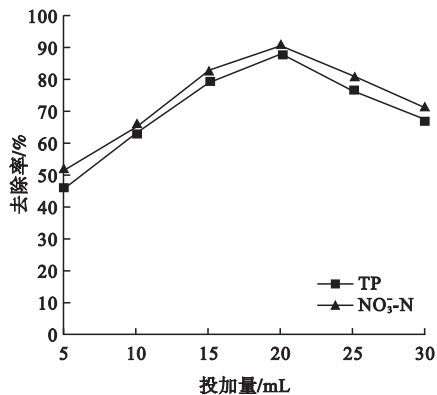


图3 发酵液用量对菌剂脱氮除磷率的影响

Fig. 3 Effects of fermentation broth dosage on nitrogen and phosphorus removal rate

2.1.4 发酵液 pH 值对菌剂脱氮除磷效率的影响

图4为 NG4 干粉菌剂在不同的 pH 条件下的除磷脱氮效率。可以看出,NG4 干粉菌剂对碱性环境比较敏感,而对酸性环境耐受性较强。当 $\text{pH} < 6.5$ 时,随 pH 值的增加,NG4 干粉菌剂的除磷脱氮率有小幅度的提高,当 $\text{pH} = 6.5$ 时,除磷脱氮效率达到最佳,TP 和 NO_3^- -N 去除率分别为 87.94% 和 90.17%。当 $\text{pH} > 6.5$ 时,随 pH 值的持续增加,氮磷的降解效率开始出现下滑,在 $\text{pH} = 8.0$ 时,NG4 干粉菌剂对氮磷的降解效率下降至最低值,与 $\text{pH} = 6.5$ 时比较, NO_3^- -N 和

TP 去除率分别下降了 27.96% 和 22.88%,降至 62.21% 和 65.76%。偏酸与偏碱都会对菌株的繁殖和体内多聚磷酸盐颗粒的合成产生不利影响^[19],pH 增加颗粒合成减弱,脱氮除磷效率降低。当环境条件过酸时,微生物的代谢能力、蛋白质及核酸的活性都将受到抑制^[20-22],此外酸性条件也会对细胞表面电位产生破坏,导致营养物质的吸收过程受到阻碍,干粉菌剂对氮磷的去除率降低。在过碱的环境条件中,酶的带电状态和酶的稳定性的稳定性受到影响,从而抑制酶和作用底物的结合,降低干粉菌剂对氮磷的降解率。因此当环境条件趋向中性或弱酸性时,更有助于干粉菌剂脱氮除磷的菌效发挥以及微生物自身的生长活动、繁殖代谢。因此制备 NG4 干粉菌剂最佳 pH 值为 6.5。

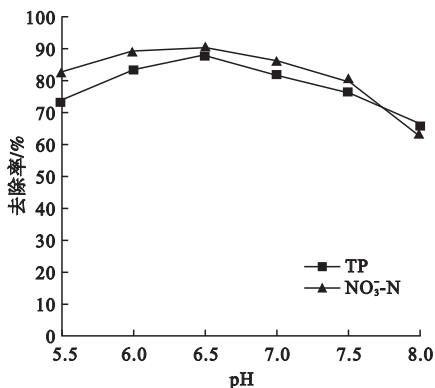


图4 发酵液 pH 值对菌剂脱氮除磷率的影响

Fig. 4 Effects of pH value of fermentation broth on nitrogen and phosphorus removal rate

2.2 NG4 干粉菌剂稳定性分析

2.2.1 NG4 干粉菌剂基本特性

NG4 干粉菌剂具有良好的沉降性能和抗冲击负荷的能力。相比于常见絮状污泥,有一定强度,结构紧凑,微生物相多样,可缩短运行时间,降低处理成本,剩余污泥的产量也大大降低,为生活污水的生物脱氮除磷提供了新的路径和方法。采用平板计数法对 NG4 干粉菌剂的活菌数进行测定,有效活菌数为 108 CFU/g 左右。菌剂宜在常温避光条件下保存。NG4 干粉菌剂如图 5 所示。



图5 NG4 干粉菌剂

Fig. 5 Bacterial powder of NG4

2.2.2 NG4 干粉菌剂稳定性试验

相比于常见絮状污泥,NG4 干粉菌剂的优势之一是保存时间较长。在温度为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下,探究制备成功的干粉菌剂的保存时长,并进行菌剂稳定性试验。图6为NG4 干粉菌剂在不同贮存时间下的除磷脱氮效率。

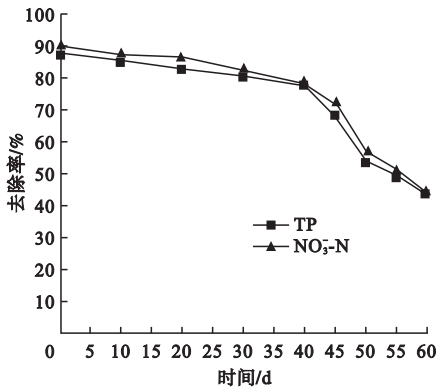


图6 贮存时间对菌剂脱氮除磷率的影响

Fig. 6 Effect of storage days of microbial agentst on nitrogen and phosphorus removal rate

从图6可以看出,第0天时,TP和NO₃⁻-N去除率最高,分别为87.92%和90.29%。在前40d内,菌剂对氮磷的降解率只有小幅度的下降,在第40天时,干粉菌剂的磷氮去除率分别为78.04%和77.85%,相较于第0天仅仅下降了9%和12%。在40d后,菌剂的脱氮除磷率均出现明显下滑趋势。在第60天时,菌剂对磷氮的降解率已下降至43.69%和44.15%。与第40天相比,TP和NO₃⁻-N的去除率均下降了34%。在40d

内,NG4 干粉菌剂对污染物仍可以维持较高的降解率,贮存时间长稳定性高,在工业化应用中具有较高的使用价值。

3 结 论

(1)NG4 干粉菌剂的最佳工艺制备条件为:PAM 培养液为2 mL,载体配比为 m (麦麸): m (玉米粉)=85:15,投菌量、发酵液投加量为20 mL,pH值为6.5。按照最佳工艺制备的NG4 干粉菌剂除磷率为87.92%,脱氮率为90.29%。

(2)制备完成的NG4 干粉菌剂有效活菌数为108 CFU/g左右。在温度为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下可保存40d左右。

(3)在最佳配比下制得NG4 干粉菌剂,污染物去除率高且稳定性强。

参考文献

- [1] 吴晓娜,王助贫,谢恩,等.一株反硝化聚磷菌筛选及其接种量对脱氮除磷效应的影响[J].环境工程学报,2018(2):544-551. (WU Xiaona, WANG Zhupin, XIE En, et al. Screening of one strain of denitrifying phosphorus accumulation bacteria (DPAB) and inhibitions effects of nitrogen-phosphorus removal [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2018(2):544-551.)
- [2] WANG Z, MENG Y, FAN T. Phosphorus removal and N₂O production in anaerobic/anoxic denitrifying phosphorus removal process: long-term impact of influent phosphorus concentration [J]. Bioresource technology, 2015, 179:585-594.
- [3] 李慧,刘丹丹,陈文清.反硝化聚磷菌的筛选及脱氮除磷特性[J].环境工程,2016,34(4):25-28. (LI Hui, LIU Dandan, CHEN Wenqing. Screening of denitrifying phosphate accumulating organisms and its characteristics of nitrogen and phosphorus removal [J]. Environmental engineering, 2016, 34(4):25-28.)
- [4] LIU Y, MAITE P J, YUAN Z G. The effect of free nitrous acid on key anaerobic processes in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. Bioresource technology, 2013, 130:382-389.
- [5] KAPAGIANNIDIS A G, ZAFIRIADIS I, AIVASIDIS A. Comparison between aerobic and anoxic metabolism of denitrifying EBPR sludge: Effect of biomass poly hydroxy alkanoates content [J]. New biotechnology,

- 2013,30(2):227-237.
- [6] WANG Y, ZHOU S, WANG H, et al. Comparison of endogenous metabolism during long term anaerobic starvation of nitrite/nitrate cultivate denitrifying phosphorus removal sludge [J]. *Water research*, 2015, 68: 374-386.
- [7] ZHENG X L, SUN P, JING Y, et al. Inhibitory factors affecting the process of enhanced biological phosphorus removal (EBPR): a minireview [J]. *Process biochemistry*, 2014, 49(12):2207-2213.
- [8] WANG Z, MENG Y, FAN T, et al. Phosphorus removal and N₂O production in anaerobic/anoxic denitrifying phosphorus removal process; long-term impact of influent phosphorus concentration [J]. *Bioresource technology*, 2015, 179:585-594.
- [9] 郑喜春. 脱氮除磷芽孢杆菌菌株的筛选及其应用效果[D]. 保定:河北农业大学,2012. (ZHENG Xichun. Screening and application of bacillus strains with the effect of removing nitrogen and phosphorus [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012.)
- [10] 张文艺,陈晶,邓文,等. 反硝化聚磷菌剂种子液制备条件及除磷机理[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(6):99-105. (ZHANG Wenyi, CHEN Jing, DENG Wen, et al. Preparation of denitrifying phosphorus accumulating bacterial seed liquid and analysis of phosphorus removal mechanism [J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2014, 36(6):99-105.)
- [11] 刘静,李微,傅金祥,等. 短程反硝化聚磷菌快速驯化对比研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(6):598-603. (LIU Jing, LI Wei, FU Jinxiang, et al. Comparative study on the acclimation of short-cut denitrifying phosphorus-accumulating bacteria [J]. *Environmental pollution & control*, 2017, 39(6):598-603.)
- [12] LU Q, QIAN W, LIU W, et al. A fluorescence in situ hybridization method for the measurement of denitrifying phosphorus accumulation organisms and study on the metabolisms of activated sludge [J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 152:28-37.
- [13] 聂毅磊,贾伟,曾艳兵,等. 两株好氧反硝化聚磷菌的筛选、鉴定及水质净化研究[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(3):116-121. (NIE Yilei, JIA Wei, ZENG Yanbing, et al. Screening and identification of two aerobic denitrifying phosphorus-accumulating strains, and denitrifying biological phosphorus removal [J]. *Biotechnology bulletin*, 2017, 33(3):116-121.)
- [14] CHAUDH R Y V, NAUTIYAL C S. A high throughput method and culture medium for rapid screening of phosphate accumulating microorganisms [J]. *Bioresource technology*, 2011, 102(17):8057-8062.
- [15] 张文艺,罗鑫,韩有法,等. 下向流曝气生物滤池工艺处理藻浆压滤液特性及微生物种属分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(5):55-61. (ZHANG Wenyi, LUO Xin, HAN Youfa, et al. Biological aerated filter for algae pulp filtrate treatment and the analysis of microbial species [J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2013, 35(5):55-61.)
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. *水和废水监测分析方法* [M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002. (State Environmental Protection Administration. *The monitoring and analysis method on water and wastewater* [M]. 4th ed. Beijing: China environmental Science Press, 2002.)
- [17] 陈晶,陈萍,邓文,等. 反硝化聚磷菌 B8 干粉菌剂的制备及应用[J]. *环境化学*, 2017, 36(5):1148-1155. (CHEN Jing, CHEN Ping, DENG Wen, et al. Preparation and application of denitrifying polyphosphate accumulating microorganisms B8 powders [J]. *Environmental chemistry*, 2017, 36(5):1148-1155.)
- [18] 蔡瀚,尹华,叶锦韶,等. 1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性[J]. *环境科学*, 2013, 34(5):1937-1944. (CAI Han, YIN Hua, YE Jinshao, et al. Isolation of an effective benzo[a]pyrene degrading strain and its degradation characteristics. [J]. *Environmental science*, 2013, 34(5):1937-1944.)
- [19] ZHANG P, CHEN Y P, GUO J S, et al. Adsorption behavior of tightly bound extracellular polymeric substances on model organic surfaces under different pH and cations with surface plasmon resonance [J]. *Water research*, 2014, 57:31-39.
- [20] 李微,曾飞,由昆,等. SBR 工艺处理大蒜废水及污泥菌群结构研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(2):370-377. (LI Wei, ZENG Fei, YOU Kun, et al. The treatment of garlic wastewater and sludge structure in SBR process [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2021, 37(2):370-377.)
- [21] RENTZ J A, ALVAREZ P J J, SCHNOOR J L. Benzo[a]pyrene degradation by sphingomonas yanoikuyae JAR02 [J]. *Environmental pollution*, 2008, 151(3):669-677.
- [22] SILVA I S, GROSSMAN M, DURRANT L R. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (2-7 rings) under microaerobic and very low-oxygen conditions by soil fungi [J]. *International biodeterioration & biodegradation*, 2009, 63(2):224-229. (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)