DOI:10.11921/j.issn.2095-8382.20220411

# 四环素和铜离子对生物除磷中微生物胞外聚合物 的影响

李梦云<sup>1,2</sup>,张 华<sup>1,2</sup>,刘亚丽<sup>1,2</sup>,张 慧<sup>1,2</sup>,庄雪晴<sup>1,2</sup>

(1.安徽建筑大学 环境与能源工程学院,安徽 合肥 230601;2.环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室,安徽 合肥 230601)

摘 要: 微生物胞外聚合物是保护细胞抵御外界有毒有害物质的"天然保护膜",而胞外聚合物会受到各种 污染物质的影响。选取四环素和铜离子作为污染物,研究其对污水生物除磷中微生物胞外聚合物中蛋白质和 多糖的影响。结果表明,四环素作用 36 h 时,蛋白质和多糖含量最大分别为 78.39 mg/gVSS 和 15.48 mg/gVSS; 铜离子作用 48 h 时,蛋白质和多糖含量最大分别为 75.93 mg/gVSS 和 14.12 mg/gVSS。三种混合物浓度配比分 别为 0.297、0.894 和 2.676 时,36 h 时蛋白质含量最大分别为 75.60 mg/gVSS、68.81 mg/gVSS 和 70.02 mg/gVSS, 多糖含量最大分别为 12.77 mg/gVSS、12.10 mg/gVSS 和 13.49 mg/gVSS。作用时间增长,胞外聚合物出现先增加 后减小的现象,主要因为污染物投加初期微生物分泌更多聚合物抵抗不利环境,而后期由于微生物失活最终 导致微生物胞外聚合物减少。混合物浓度增加,微生物胞外聚合物中蛋白质三维荧光强度逐渐减弱。该研究 对揭示污染物对生物除磷微生物的影响具有一定的意义。

 关键词:四环素;铜离子;胞外聚合物;生物除磷

 中图分类号:X703.1

 文献标识码:A

文章编号:2095-8382(2022)04-066-06

## Effects of Tetracycline and Copper Ion on Extracellular Polymeric Substances During Biological Phosphorus Removal

LI Mengyun<sup>1, 2</sup>, ZHANG Hua<sup>1, 2</sup>, LIU Yali<sup>1, 2</sup>, ZHANG Hui<sup>1, 2</sup>, ZHUANG Xueqing<sup>1, 2</sup>

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;2. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Extracellular polymers of microorganisms are natural protective membranes that protect cells against external toxic and harmful substances, but can be affected by various contaminants. Tetracycline and copper ions were selected as contaminants to study their effects on protein and polysaccharides in microbial extracellular polymers during biological phosphorus removal. The results showed that the maximum contents of protein and polysaccharide were 78.39 mg/gVSS and 15.48 mg/gVSS, respectively, at 36 h with tetracycline, and 75.93 mg/gVSS and 14. 12 mg/gVSS, respectively, at 48 h with copper ions. Three concentration ratios (0.297, 0.894 and 2.676) were formulated using a mixture of tetracycline and copper ions, and at 36 h, the maximum protein content was 75.60 mg/gVSS, 68.81 mg/gVSS and 70.02 mg/gVSS, respectively, while the maximum polysaccharide content was 12.77 mg/gVSS, 12.10

收稿日期: 2021-10-14

基金项目:安徽省高校省级自然科学研究项目(KJ2019ZD52, KJ2020A0466);安徽省自然科学基金面上项目(1908085ME142, 1808085MB34);安徽建筑大学引进人才及博士启动基金项目(2019QDZ64, 2019QDZ60);国家重点研发计划专项项目(2019YFC0408504)

作者简介:李梦云(1995-),女,硕士研究生,研究方向:水处理理论与技术。

mg/gVSS and 13.49 mg/gVSS, respectively. The extracellular polymer increases and then decreases as the time of action increases, mainly because the microorganisms secrete more polymers to resist contaminants at the beginning, while microbial deactivation later led to a decrease in microbial extracellular polymers. The three–dimensional fluorescence intensity of proteins in the microbial extracellular polymer gradually decreased as the concentration of the mixture increasing. This study has implications for studying impacts of pollutants on biological phosphorus removal microorganisms.

Keywords: tetracycline; copper ion; extracellular polymeric substances; biological phosphorus removal

胞外聚合物普遍存在于活性污泥絮体内部和 表面,附着于微生物的表面,对微生物生命活动具 有一定的保护功能,可以抵御对微生物细胞有毒害 作用的杀菌剂和有毒物质<sup>[1]</sup>。同时,胞外聚合物具 有富集环境中营养物质的功能,在胞外各种酶的催 化下,将营养物质降解为微生物可吸收利用的小 分子物质<sup>[1]</sup>。而在污水生物处理过程中,胞外聚合 物会受到污水中各种环境因素的干扰,如抗生素、 重金属及农药等,破坏胞外聚合物结构和功能,从 而威胁微生物的生命安全,影响到污水处理的效 果<sup>[2]</sup>。因此,研究环境因素对胞外聚合物的影响具 有重要意义。

胞外聚合物中蛋白质和多糖为主要成分,两者 占胞外聚合物总量的70%~80%。四环素类抗生素 是目前医疗和养殖业用量最大的抗生素之一,通过 人类及动物排泄物等途径进入城市污水管网,在全 球多地区的污水处理厂中均有此类抗生素检出<sup>[3]</sup>。 在污水处理过程中,四环素通过氢键和范德华力与 胞外聚合物中的蛋白质结合,从而改变蛋白质的结 构,使胞外聚合物丧失功能,影响污水处理效果<sup>[4]</sup>。 铜离子在畜禽养殖中被大量使用,促进动物生长同 时增强动物的抗病能力,进入动物体内的铜离子部 分随排泄物排出进入污水处理设施。胞外聚合物 表面含有大量带负电荷的基团,在污水处理过程 中,铜离子可以与带负电的基团发生络合沉淀和离 子交换,从而改变或破坏胞外聚合物内部结构,对 污水处理产生不利影响<sup>[5]</sup>。然而,污水中的污染物 往往不是单独存在,研究表明混合物会形成更复杂 的作用<sup>[6]</sup>。污水生物除磷是污水生物处理极其重 要的部分,而污水中四环素和铜离子往往以混合的 形式存在。因此,研究四环素和铜离子对污水生物 除磷微生物胞外聚合物的影响具有重要意义。然 而,四环素和铜离子形成的混合污染物对生物除磷 过程中微生物胞外聚合物联合作用的研究却极其 缺乏。

该实验选用四环素和铜离子作为典型污染物, 研究四环素、铜离子及其混合污染物对生物除磷微 生物胞外聚合物的影响。首先测定单独四环素和 铜离子作用下,胞外聚合物中蛋白质和多糖含量的 变化;再利用直接均分射线法<sup>[7]</sup>设计3种不同浓 度配比的四环素和铜离子的混合污染物,测定不同 浓度配比下混合污染物对微生物胞外蛋白质和多 糖的含量,并结合三维荧光研究蛋白质的变化,为 科学评价四环素和铜离子对微生物胞外聚合物的 作用风险提供依据和数据参考。

## 1 材料与方法

#### 1.1 实验装置及运行

该实验选用序批试活性污泥反应器,通过厌 氧-好氧交替运行的方式实现生物除磷。实验用 水为人工配制的模拟污水厂进水,配药成分如表1 所示。通过微电脑时控装置自动控制反应器运行, 运行周期为 360 min,其中包括进水 20 min、厌氧 75 min、好氧 180 min、沉淀 60 min、出水 5 min 和闲 置 20 min。

表1 实验用水配方

主要成分	g/L	微量元素	mg/L
烯丙基硫脲	0.004	硼酸	0.150
蛋白胨	0.005	乙二胺四乙酸	10.000
磷酸二氢钾	0.037	钼酸钠	0.060
三水合乙酸钠	0.454	碘化钾	0.180
氯化铵	0.070	六水合氯化钴	0.150
酵母膏	0.005	三氯化铁	1.500
二水合氯化钙	0.095	硫酸锌	0.120
硫酸镁	0.095	氯化锰	0.120

#### 1.2 投加污染物及样品采集测定方法

各反应器投加四环素浓度依次为0 mg/L、0.01 mg/L、0.1 mg/L、0.1 mg/L、0.5 mg/L、1 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L;铜离子浓度依次为0 mg/L、0.1 mg/L、0.5 mg/L、 1 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、40 mg/L;反应器

编号分别为1\*、2\*、3\*、4\*、5\*、6\*、7\*、8\*。该实验 每隔12h取样取至96h,包括各阶段水样和污泥 混合样。胞外聚合物中的蛋白质和多糖分别采用 BCA法测定和蒽酮法测定;MLSS采用重量法测定; 正磷酸盐采用钼锑抗分光光度法测定。

#### 1.3 污染物抑制效应分析

每周期的比吸磷率即该周期厌氧阶段末期与 好氧阶段末期的正磷酸盐含量之差与MLSS的比值。 利用比吸磷率的抑制率表示生物除磷微生物受抑 制程度,污染物作用时比吸磷率的抑制率 M,其计 算如公式(1)所示:

$$M = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100\%$$
 (1)

式中 *M*——污染物作用时比吸磷率的抑制 率.%;

I——污染物作用时比吸磷率;

I0——空白对照组的比吸磷率。

采用 Logistics 函数<sup>[8]</sup> 拟合污染物浓度和比吸 磷率抑制率值,获得浓度效应曲线。Logistics 函数 如公式(2)所示。

$$R = \frac{W_0 - W_{\text{max}}}{1 + \left(\frac{C}{C_0}\right)^{\alpha}} + W_{\text{max}}$$
(2)

式中 R——抑制效应,%;

- W<sub>max</sub>——污染物作用时比吸磷率的最大抑制效应,%;
- Wo——污染物作用时比吸磷率的最小抑制 效应,%;

α——污染物潜在抑制效应常数;



(a)不同浓度四环素作用下蛋白质的变化情况

C——污染物浓度,mg/L;

Co——污染物半数效应浓度即 EC50, mg/L。

利用 Logistics 函数拟合四环素和铜离子的浓度和比吸磷率抑制率值获得浓度 – 效应曲线,得到四环素和铜离子的半数效应浓度分别为7.455 mg/L和 8.464 mg/L。

#### 1.4 不同配比的混合物实验设计

利用直接均分射线法(EquRay)设计3种不同 配比的四环素和铜离子混合物,分别为L1、L2和 L3,其配比值分别为0.297、0.894和2.676。根据稀 释因子法<sup>[9]</sup>在每个浓度配比下设计9组(含空白 对照组)四环素和铜离子混合物,混合物浓度依次 为0mg/L、0.339mg/L、0.692mg/L、1.412mg/L、2.882 mg/L、5.882mg/L、12.005mg/L、24.500mg/L、50.000 mg/L,对应9个反应器,反应器编号分别为1\*、2\*、 3\*、4\*、5\*、6\*、7\*、8\*、9\*。

## 2 结果与讨论

## 2.1 四环素对生物除磷中微生物胞外聚合物中蛋 白质和多糖的影响

在生物除磷反应器中投加不同浓度四环素后 微生物胞外聚合物中蛋白质和多糖的变化情况如 图 1 所示。由图 1 可知,投加四环素后,在 0~36 h 各反应器的蛋白质和多糖均出现增加趋势,并在 36 h 达到最大值,此时各反应器的蛋白质浓度最大 达到 78.39 mg/gVSS;多糖浓度最大达到 15.48 mg/ gVSS。而在 36~96 h 时,蛋白质和多糖含量均出现 逐渐减少的趋势。当四环素作用时间为 96 h 时, 各反应器的蛋白质浓度最低降至 13.83 mg/gVSS; 多糖浓度最低降至 4.62 mg/gVSS。



<sup>(</sup>b)不同浓度四环素作用下多糖的变化情况

图 1 不同浓度四环素作用下胞外聚合物组成成分变化

根据微生物胞外聚合物中蛋白质和多糖含量 变化可知,蛋白质和多糖均出现先增加后减少的趋 势。前期含量增加可能是由于投加四环素初期,活 性污泥中的微生物受外来污染物刺激,分泌更多聚 合物在微生物表面形成更严固的网状结构保护层, 用于抵抗不利的外界环境<sup>[10]</sup>。随后含量减少可能 是由于随着四环素的持续输入,胞外聚合物中更多 的蛋白质与四环素以氢键和范德华力结合,胞外聚 合物蛋白质中更多结合位点被四环素占据,导致胞 外聚合物肽链结构被严重破坏<sup>[11]</sup>;同时四环素能 够特异性地结合到微生物体内核糖体 30S 亚基中 A 的位置,有效阻止了胺基酰 -tRNA 与核糖体上 此位置的联结,进而抑制肽链的进一步增长,最终 导致蛋白质的合成受阻,进而使微生物丧失功能, 蛋白质和多糖含量均下降<sup>[12]</sup>。

第4期

## 2.2 铜离子对生物除磷中微生物胞外聚合物中蛋 白质和多糖的影响

生物除磷反应器中投加不同浓度铜离子后微 生物胞外聚合物中蛋白质和多糖的变化情况如图 2 所示。由图 2 可知,投加铜离子后,在 0~12 h 各 反应器的蛋白质出现小幅度的下降;在 12~48 h 各 反应器的蛋白质出现增加趋势,并在 48 h 达到最 大值,此时各反应器的蛋白质浓度最大达到 75.93 mg/gVSS。在 0~48 h 各反应器的多糖出现增加趋势, 并在 48 h 达到最大值,此时各反应器多糖浓度最 大达到 14.12 mg/gVSS。而在 48~96 h 时,蛋白质和 多糖含量均出现逐渐减少的趋势。当铜离子作用 时间为 96 h 时,各反应器的蛋白质浓度最低降至 15.22 mg/gVSS;多糖浓度最低降至 4.98 mg/gVSS。

根据微生物胞外聚合物中蛋白质和多糖含量

变化可知,初期蛋白质含量小幅度减低,可能是反 应器进水中铜离子迅速与蛋白质结合,导致蛋白质 结构改变失活形成聚沉<sup>[13]</sup>。随后蛋白质和多糖均 出现先增加后减少的趋势。前期增加可能是因为 铜离子的加入产生了不利的环境条件,刺激微生物 分泌更多的胞外聚合物,保护微生物细胞减少污染 物对微生物的不利影响<sup>[10]</sup>。随后蛋白质和多糖含 量减少,可能是由于铜离子的持续投加,胞外聚合 物表面的大量带负电的基团与铜离子发生离子交 换、络合沉淀,改变或破坏胞外聚合物内部结构<sup>[14]</sup>; 同时,蛋白质是铜离子的强配体,蛋白质的氨基酸 侧链与铜离子通过静电作用相结合,破坏蛋白质结 构使蛋白质失活,进而使微生物丧失功能,蛋白质 和多糖含量下降<sup>[15]</sup>。

## 2.3 三种浓度配比混合物对微生物胞外聚合物蛋 白质和多糖的影响

2.3.1 不同浓度配比下微生物胞外聚合物蛋白质和多糖含量变化

三种浓度配比四环素和铜离子的混合物对生物除磷中微生物胞外聚合物中蛋白质和多糖的影响如图 3 所示。由图 3 可知,三种配比下蛋白质和 多糖均出现先增大后减小的现象。混合物投加初 期对微生物产生刺激作用,微生物为了保护细胞不 受污染物的毒害作用分泌更多的胞外聚合物,形成 保护屏障,从而蛋白质和多糖均出现不同程度的增 加。随反应时间增加,微生物胞外聚合物遭到破坏, 蛋白质和多糖呈现不同程度的下降趋势。因此,投 加三种配比混合物,微生物胞外聚合物中蛋白质和 多糖均出现了先增加后逐渐减小的现象。



(a)不同浓度铜离子作用下蛋白质的变化情况



<sup>(</sup>b)不同浓度铜离子作用下多糖的变化情况

图 2 不同浓度铜离子作用下胞外聚合物组成成分变化



三种配比下混合物投加初期,蛋白质和多糖浓 度逐渐增加。其中,配比为 L1 时最大分别为 74.60 mg/gVSS 和 12.77 mg/gVSS; 配比为 L2 时最大浓度 分别 68.81 mg/gVSS 和 12.53 mg/gVSS; 配比为 L3 时最大浓度分别 70.02 mg/gVSS 和 13.49 mg/gVSS。 由此可见,当混合物配比为L1时,蛋白质和多糖 增加量最大,可能是由于铜离子占比高,四环素与 铜离子发生络合作用后,铜离子占主导作用,胞外 聚合物表面大量带负电荷的基团与铜离子结合,且 蛋白质是铜离子的强配体,为了保护细胞不受污染 物的毒害作用,从而初期刺激微生物分泌更多的胞 外聚合物<sup>[10]</sup>。当混合物配比为L2时,四环素和铜 离子所占比例比较接近,四环素分子中含有酚羟 基和二甲基酰胺等基团与铜离子结合发生络合反 应<sup>[15]</sup>,导致投加混合污染物初期刺激微生物分泌 的胞外聚合物量较配比 L1 和 L3 少。当混合物配 比为L2时,四环素占比高,四环素与铜离子发生络 合作用后,四环素占主导作用,研究发现胞外聚合 物中主要成分蛋白质与四环素发生反应,而胞外聚 合物表面含有多种官能团与金属离子有更强的结 合能力,因此,反应初期刺激微生物分泌胞外聚合 物相对 L1 少<sup>[16]</sup>。

2.3.2 三种浓度配比下微生物胞外聚合物的三维 荧光光谱

三种配比混合物作用下,3\*、5\*、7\*和9\*反

应器微生物胞外聚合物的三维荧光光谱如图 4 所示。由图4可知,三维荧光光谱主要有两个区 域。其中区域 I 为酪氨酸峰(Ex 为 200~250 nm, Em 为 300~380 nm),区域 II 为类色氨酸峰(Ex 为 250~300 nm, Em 为 300~380 nm), 这两种均为芳 香类蛋白质荧光峰。三种配比混合物作用下,随混 合物浓度的增加,酪氨酸峰和类色氨酸峰荧光强度 均逐渐减弱。其中,配比L2中酪氨酸峰和类色氨 酸峰荧光强度比配比 L1 和配比 L3 的峰度减弱程 度更明显。三种配比混合物作用下,随混合物浓度 增加,微生物胞外聚合物中酪氨酸和类色氨酸荧光 强度逐渐减弱,说明四环素和铜离子混合物对酪氨 酸和类色氨酸的荧光产生了猝灭作用,且随着混合 物浓度的增加猝灭现象越显著。研究表明,四环素 或铜离子均可与酪氨酸、类色氨酸发生络合作用, 所生成的络合物不再发出荧光,因此酪氨酸峰和类 色氨酸峰荧光强度逐渐减弱[16-17]。

## 3 结论

不同浓度四环素和铜离子分别单独作用下,微 生物胞外聚合物中蛋白质和多糖含量均出现先增 加后减少的趋势。三种配比的混合物作用下微生 物胞外聚合物中蛋白质和多糖含量也出现了先增 加后减少的趋势。其中,四环素和铜离子配比为 0.297时,铜离子占比较大,混合物投加初期胞外聚



图 4 三种浓度配比混合物作用下生物除磷中微生物胞外聚合物的三维荧光光谱图

合物中蛋白质和多糖增加量三种配比下相对最高; 四环素和铜离子配比为 0.894 时,四环素与铜离子 浓度相当,混合物投加初期胞外聚合物中蛋白质和 多糖增加量三种配比下相对最低。三种配比混合 物作用下,随混合物浓度增加,微生物胞外聚合物 中蛋白质三维荧光强度逐渐减弱。

#### 参考文献:

- [1] 李金璞,张雯雯,杨新萍.活性污泥污水处理系统中胞 外多聚物的作用及提取方法[J].生态学杂志,2018, 37(9):2825-2833.
- [2] Mohite B V, Koli S H, Patil S V. Heavy metal stress and its consequences on exopolysaccharide (EPS) – producing pantoea agglomerans[J].Applied Biochemistry and Biotechnology, 2018, 186 (1):199–216.
- [3] Grabert R, Boopathy R, Nathaniel R, et al. Effect of tetracycline on ammonia and carbon removal by the facultative bacteria in the anaerobic digester of a sewage treatment plant[J].Bioresource Technology, 2018, 267: 265-270.
- [4] Li J Y, Du Q P, Peng H Q, et al. Spectroscopic investigation of the interaction between extracellular polymeric substances and tetracycline during sorption onto anaerobic

ammonium–oxidising sludge[J].Environmental Technology, 2021,42(11):1787–1797.

- [5] Li W W, Yu H Q. Insight into the roles of microbial extracellular polymer substances in metal biosorption[J]. Bioresource Technology, 2014, 160:15–23.
- [6] Li C X, Xie S Y, Wang Y, et al. Simultaneous heavy metal immobilization and antibiotics removal during synergetic treatment of sewage sludge and pig manure[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (24):30323-30332.
- [7] Zhang Y H, Liu S S, Liu H L, et al. Evaluation of the combined toxicity of 15 pesticides by uniform design[J].
   Pest Management Science, 2010, 66 (8): 879–887.
- [8] Abbondanzi F, Cachada A, Campisi T, et al. Optimisation of a microbial bioassay for contaminated soil monitoring: bacterial inoculum standardisation and comparison with Microtox® assay[J].Chemosphere, 2003, 53 (8): 889-897.
- [9] 陶梦婷,张瑾,姜慧,等.3种农药对青海弧菌Q67的联合毒性作用特征[J].环境科学与技术,2019,42(6): 12-20.
- [10] Sutherland I W. Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework[J].Microbiology, 2001, 147 (1): 3–9.

(下转第91页)

## 5 结论

针对遥感图像配准中如何快速有效去除错误 匹配的问题,提出一种基于面积比不变量的遥感图 像配准算法,该算法不需要迭代即可得到较为精确 的特征匹配,大大提升了遥感图像配准的效率。实 验结果证明,本文算法在均方根误差、准确率、召回 率、BPP(1.0)和运行时间等方面均表现出良好的 性能,是一种快速、有效的遥感图像配准算法。

#### 参考文献:

- Chang H H, Wu G L, Chiang M H. Remote sensing image registration based on modified SIFT and feature slope grouping[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16 (9):1363–1367.
- [2] Wu Y, Ma W P, Gong M G, et al. A novel point-matching algorithm based on fast sample consensus for image registration[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12 (1):43-47.
- [3] 余蕊,陈玮扬,杨扬,等.内点最大化与冗余点控制的无人机遥感图像配准[J].遥感学报,2020,24(11):1325-1341.
- [4] 保文星,桑斯尔,沈象飞.基于信息熵约束和 KAZE 特 征提取的遥感图像配准算法研究 [J]. 光学 精密工程, 2020,28(8):1810–1819.
- [5] Etezadifar P, Farsi H. A new sample consensus based on sparse coding for improved matching of SIFT features on remote sensing images[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58 (8): 5254–5263.
- [6] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image

### analysis and automated cartography[J].Communications of the ACM - CACM, 1981, 24 (6):381-395

- [7] Aguilar W, Frauel Y, Escolano F, et al. A robust Graph Transformation Matching for non-rigid registration[J]. Image and Vision Computing, 2009, 27 (7):897–910.
- [8] Zhao J, Ma J Y, Tian J W, et al. A robust method for vector field learning with application to mismatch removing[C]// CVPR 2011.June 20-25,2011,Colorado Springs,CO, USA.IEEE,2011:2977-2984.
- [9] Ma J Y, Zhao J, Zhou Y, et al. Mismatch removal via coherent spatial mapping[C]//2012 19th IEEE International Conference on Image Processing.September 30 – October 3,2012, Orlando, FL, USA.IEEE, 2012; 1–4.
- [10] 周微硕,安博文,赵明,等.基于几何不变性和局部相 似特征的异源遥感图像配准算法 [J]. 红外技术,2019, 41(6):561-571.
- [11] 邢昌元,熊忠阳,李月涵,等.基于区域面积比的几何 不变量构造算法[J].计算机应用研究,2017,34(6): 1900-1904,1908.
- [12] 雷思文,朱福珍.基于 ORB 和改进 RANSAC 的无人 机遥感图像配准算法 [J].黑龙江大学自然科学学报, 2020,37(5):623-630.
- [13] Zheng Y F, Doermann D. Robust point matching for nonrigid shapes by preserving local neighborhood structures[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28 (4):643-649.
- [14] Ma J Y, Jiang J J, Zhou H B, et al. Guided locality preserving feature matching for remote sensing image registration[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56 (8):4435-4447.
- [15] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27 (10):1615–1630.

## (上接第71页)

- [11] Zhuang Y, Yu F, Ma J, et al. Enhanced adsorption removal of antibiotics from aqueous solutions by modified alginate/ graphene double network porous hydrogel[J].Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 507:250–259.
- [12] 邓万燕,谢建平.细菌核糖体靶向抗生素及耐药机制[J].国外医药(抗生素分册),2017,38(6):20-30.
- [13] 马军冠,张旭,陈培宇,等.壳聚糖微球对四环素-铜 离子复合污染水体的吸附性能[J].沈阳大学学报(自 然科学版),2020,32(4):305-311.
- [14] Sheng G P, Yu H Q, Yue Z B. Production of extracellular polymeric substances from Rhodopseudomonas acidophila

in the presence of toxic substances[J].Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, 69 (2):216-222.

- [15] Wang Y Y, Qin J, Zhou S, et al. Identification of the function of extracellular polymeric substances (EPS) in denitrifying phosphorus removal sludge in the presence of copper ion[J].Water Research, 2015, 73:252-264.
- [16] 徐娟.微生物胞外聚合物与废水中有毒污染物相互作用及对生物反应器性能影响[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [17] 刘延利,潘响亮.三维荧光光谱法研究四环素与活性污 泥 EPS 的相互作用 [J]. 环境科学与技术,2012,35(6): 51-54,70.