

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.008

含氮有机物对预氯化下无机氯胺生成的影响

黄雪丽¹, 贾旭¹, 高宝玉², 张跃军¹

(1. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 山东大学 环境科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要: 为研究含氮有机物对微污染原水在预氯化条件下生成无机氯胺过程的影响,参照典型地域地表水水质模型和预氯化工艺条件,采用静态加氯模拟实验方法,首先选择7种典型含氮有机物,探究各种含氮有机物独立存在时,其浓度变化对氨氮与氯反应生成无机氯胺的影响;然后,探究在实际微污染原水水质条件下,含氮有机物总体对氨氮与氯反应生成无机氯胺的影响。结果表明:在设定的相同实验条件下,对于氨氮与氯的反应,7种典型含氮有机物独立存在时,对无机氯胺的生成均有一定的抑制作用;含氮有机物浓度越大,生成的一氯胺量越少;模拟实际微污染原水水质条件下,7种含氮有机物同时存在则使无机氯胺生成量大大降低。

关键词: 微污染原水; 氨氮; 含氮有机物; 预氯化; 无机氯胺

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0047-06

Effects of Nitrogen-containing Organic Compounds on Formation of Inorganic Chloramines under Prechlorination

HUANG Xue-li¹, JIA Xu¹, GAO Bao-yu², ZHANG Yue-jun¹

(1. School of Chemistry Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to explore the effect of nitrogen-containing organic compounds on formation of inorganic chloramines under prechlorination conditions for micro-polluted raw water, seven typical nitrogen-containing organic compounds were firstly selected, typical regional surface water quality models and prechlorination process conditions were referred, and a static chlorination simulation test method was adopted, and effect of each individual compound concentration on formation of inorganic chloramines generated by reaction of ammonia nitrogen and chlorine was investigated. Then, effects of total nitrogen-containing organic compounds on the reaction of ammonia nitrogen and chlorine were investigated under the conditions of actual micro-polluted raw water. Under the same designed experimental conditions, for the reaction of ammonia nitrogen and chlorine, there was a certain inhibition effect on the formation of inorganic chloramines when one of the seven compounds existed. The greater the concentration of the nitrogen-containing organic compounds, the less monochloramine was formed. Under the simulated conditions of actual micro-polluted raw water, the production of inorganic chloramines was greatly reduced

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21377054)

通信作者: 张跃军 E-mail: zhyuejun@njut.edu.cn

when seven kinds of nitrogen-containing organic compounds were present.

Key words: micro-polluted raw water; ammonia nitrogen; nitrogen-containing organic compound; prechlorination; inorganic chloramine

通常,把自然水体按其受污染程度分为多类,其中水体受到有机物污染,部分水质指标超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准的水体为微污染原水^[1]。对微污染原水,常规的水处理工艺(混凝/沉淀/过滤/消毒)去除水中污染物的能力明显不足。因此,在常规处理工艺前增加预氧化的强化处理工艺逐渐发展起来,其中预氯化是目前采用较为普遍的方法。氯胺是一种有效的杀生消毒剂,在美国和加拿大等发达国家被当作主要的消毒剂种类而广泛使用^[2]。但是,研究发现^[2-3],氯胺易与水体中存在的或者外加的含二甲胺基化合物反应,生成一种名叫N,N-二甲基亚硝胺(NDMA)的消毒副产物。在我国,一般不用氯胺,而是用氯作为消毒剂。然而,当原水水体中存在氨氮时,在预氯化阶段,氯就可能会与水中的离子态氮发生反应,生成包括一氯胺、二氯胺和三氯胺等3种无机氯胺,这3种氯胺的分布主要受pH值及氯氮比的影响^[3-4]。微污染原水水体中的氨氮是以无机氨氮和含氮有机物的共存体系形式存在,已有在较高浓度条件下的研究表明^[5-8],绝大多数含氮有机物与氯反应的产物为有机氯胺(R—NH₂—Cl),很少或基本不生成无机氯胺,同时含氮有机物的存在会对无机氯胺的生成产生影响。由于消毒副产物NDMA是一种新型的具有强致癌性的含氮消毒副产物,而无机氯胺中的一氯胺和二氯胺是NDMA生成的重要前质,其在水体中的存在浓度与NDMA的生成直接相关^[9]。

然而,迄今为止,针对我国微污染原水水质及其处理工艺,尚缺乏结合我国典型地域微污染原水水质模型,在预氯化条件下探究氨氮和含氮有机物共存体系下无机氯胺的生成可能性、规律和机理。因此,依据微污染原水水质模型选出典型含氮有机物,并参照预氯化工艺开展含氮有机物的存在对氨氮与氯反应生成无机氯胺可能性、生成规律和机理的研究,具有一定的实践指导价值。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

主要实验仪器:安捷伦1200型高效液相色谱仪、WFZ UV-2000可见分光光度计、HP-1404电

子天平、PHS-25型pH计。

实验试剂:次氯酸钠、氯化铵、乙二胺四乙酸二钠、氢氧化钠、碘化钾、硫酸、N,N-二乙基对苯二胺、硫代硫酸钠、水杨酸、酒石酸钾钠、亚硝基铁氰化钠、2-巯基苯并噻唑、甘氨酸、谷氨酸、腐殖酸和尿素,均为分析纯;苯丙氨酸、组氨酸和半胱氨酸,均为生化试剂;高锰酸钾为优级纯;配制溶液所用去离子水,实验室自制。

1.2 定量分析方法

由于实验模拟水样的来源和共存组分的不同,无机氯胺的测定分为以下3种情况:

① 当水样中不存在有机氯胺且水样呈无色时,采用DPD分光光度法即可测定无机氯胺(包括一氯胺、二氯胺和三氯胺)的含量。

② 当水样中存在有机氯胺且水样呈无色时,采用能有效区分有机氯胺和无机氯胺且操作较简单的水杨酸分光光度法^[10]测定无机氯胺。

③ 当水样中存在有色物质如腐殖酸时,由于有色物质的干扰,分光光度法无法准确测定无机一氯胺,采用液相色谱柱前衍生法^[11]来进行检测。

1.3 实验条件及方法

1.3.1 实验条件的设定

① 典型含氮有机物种类的选择

本研究参照已建立的我国典型地域微污染原水水质模型^[12],选择具有流域范围广、氨氮含量相对较高、含氮有机物种类较多等特征的长江原水为对象,确定典型含氮有机物为尿素、腐殖酸和几种有特定结构的氨基酸。进一步,参照相关文献^[13-14]归纳对比常见的16种氨基酸、尿素和腐殖酸这3大类含氮有机物的分子结构特点及其在长江地表水中的阈值范围(以含氮有机物总质量计,下同),拟选定甘氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸、组氨酸、半胱氨酸、尿素和腐殖酸作为本次研究对象,在长江流域中的阈值范围分别为0~53.5、2.9~21.0、0~36.5、0~27.3、0~10.2、100~330、860~2 050 μg/L。

② 实验基本条件的设定

依据已有文献^[12]建立的我国典型地域水质模型中长江原水水质参数氨氮的阈值范围、已有研

究^[15-16]中微污染原水预氯化条件下氯的投加剂量范围和参照水厂常规工艺条件及预氯化工艺条件(氯的投加剂量为0~5 mg/L、时长为0.5~1 h),确定实验基本条件如下:氨氮为3 mg/L、反应时间为30 min(0~90 min)、温度为25℃、pH值为7、加氯量为5 mg/L(2~6 mg/L)。

1.3.2 实验方法

采用静态加氯模拟实验方法^[1,8],以1.3.1节所设定的各实验基本条件为基础,通过单因素法考察以下几种因素对氨氮与氯反应生成无机氯胺规律的影响:①反应时间和氯投加量对生成无机氯胺的影响;②每种含氮有机物独立存在的影响;③含氮有机物浓度变化的影响;④模拟实际微污染原水水质条件下含氮有机物总体存在的影响。

2 结果与讨论

2.1 反应时间和氯投加量对生成无机氯胺的影响

2.1.1 反应时间的影响

按照1.3.1节实验基本条件的设定,在250 mL烧杯内,放置由去离子水配制的3 mg/L氨氮溶液,加入有效氯含量为5 mg/L的次氯酸钠溶液,用磷酸缓冲溶液调节pH值为 7 ± 0.1 ,控制一氯胺为主要产物^[3-4],并同时计时;反应液在25℃(室温)下反应0、10、20、30、40、60和90 min后,分别取样5 mL,采用DPD分光光度法测定各种无机氯胺的含量,考察时间对氨氮与氯生成无机氯胺的影响规律。结果表明,当氨氮浓度为3 mg/L、氯投加量为5 mg/L、pH值为 7 ± 0.1 、温度为25℃时,在0~90 min范围内改变反应时间,氨氮在加氯条件下由于反应过程中pH值的控制,生成的无机氯胺仅无机一氯胺一种存在形式,且生成量受时间的影响较小,即无机一氯胺能在物料混合后随即快速生成,并在生成后保持其浓度基本不变。

2.1.2 氯投加量的影响

参照以上操作,但改变次氯酸钠投加量,即分别将有效氯含量为2、3、4、5、6 mg/L的次氯酸钠溶液加入到3 mg/L氨氮溶液中,同样用磷酸缓冲溶液调节pH值为 7 ± 0.1 ,在室温下反应30 min后采用DPD分光光度法测定各种无机氯胺的含量,考察氯投加量对氨氮与氯生成无机氯胺的影响规律。结果表明,在实验条件相同的情况下,仅在2~6 mg/L范围内改变氯投加量,只检测到 NH_2Cl 的存在,并且其含量随氯投加量的增大而增大(见图1)。这可能

是由于,实验在pH值为 7 ± 0.1 的中性环境下进行,且氯氮比 < 2 ,不足以提供生成二氯胺和三氯胺的条件,故未检测到二氯胺和三氯胺。 NH_2Cl 含量随氯投加量的增大而增大,符合氨与氯的折点反应规律,而生成的一氯胺含量与加氯量存在一定差异,这可能是游离性余氯的存在导致的。

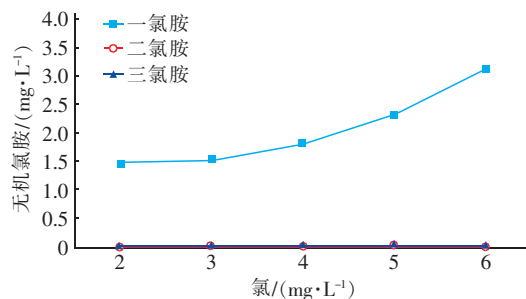


图1 氯投加量对氨氮与氯生成无机氯胺的影响

Fig. 1 Effect of chlorine dosage on formation of inorganic chloramine from ammonia nitrogen and chlorine

2.2 含氮有机物对氨氮与氯生成无机氯胺的影响

2.2.1 各种含氮有机物独立存在的影响

① 几种氨基酸存在的影响

分别将有效氯含量为2、3、4、5、6 mg/L的次氯酸钠溶液加入到氨氮(浓度为3 mg/L)和一种氨基酸(设计浓度为0.1 mg/L)共存的体系中,同样用磷酸缓冲溶液调节pH值为 7 ± 0.1 ,在室温下反应30 min后,用水杨酸分光光度法测定无机一氯胺的含量。结合图1,得到氨氮与几种氨基酸共存体系在加氯条件下生成无机一氯胺的规律,如图2所示。

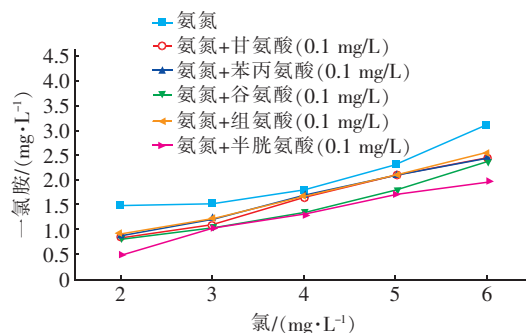


图2 氨氮与几种氨基酸共存体系在加氯条件下生成无机一氯胺的规律

Fig. 2 Formation of inorganic monochloramine under different chlorination conditions in coexistence system of ammonia nitrogen and several amino acids

图2表明,氨氮与不同氨基酸共存体系在加氯条件下,一氯胺的生成量均随氯投加量(2~6 mg/L)

L)的增加而增加,但是含氮有机物的存在均会减少氯胺的生成量。这是因为,在一定的氯投加量下,共存体系中含氮有机物会和氨氮竞争与氯的反应,而且氨氮和含氮有机物同时与氯接触时,含氮有机物会优先与氯作用^[5],消耗一定量的氯,导致氨氮与氯生成的无机氯胺量减少。不同种类的含氮有机物由于具有不同的结构特点,消耗氯的能力不同,因此对无机氯胺的生成有不同程度的影响。

② 尿素和腐殖酸存在的影响

分别将有效氯含量为2、3、4、5、6 mg/L的次氯酸钠溶液加入到氨氮(浓度为3 mg/L)和尿素(选用浓度为0.1 mg/L)或氨氮(浓度为3 mg/L)和腐殖酸(选用浓度为0.1或1 mg/L)共存的体系中,同样用磷酸缓冲溶液调节pH值为 7 ± 0.1 ,在室温下反应30 min后,氨氮和尿素共存体系所生成的无机一氯胺含量用水杨酸分光光度法测定,氨氮和腐殖酸共存体系所生成的一氯胺含量用液相柱前衍生法测定。结合图1,得到不同氨氮与腐殖酸或尿素共存体系在加氯条件下生成一氯胺的规律,见图3。

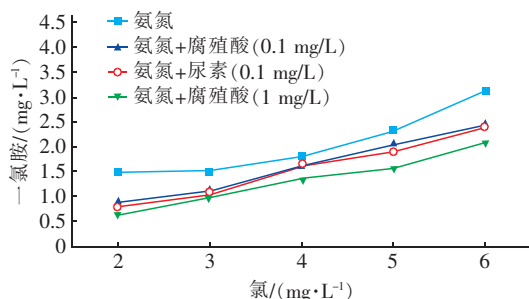


图3 不同氨氮与腐殖酸或尿素共存体系在加氯条件下生成无机一氯胺的规律

Fig.3 Formation of inorganic monochloramine under different chlorination conditions in different ammonia nitrogen and humic acid or urea coexisting systems

由图3可以看出,氨氮和腐殖酸共存体系或者氨氮和尿素共存体系在加氯条件下,一氯胺的生成量均随氯投加量(2~6 mg/L)的增加而增加,但是尿素或腐殖酸的存在均会减少氯胺的生成量,并且等浓度(0.1 mg/L)的尿素较腐殖酸对一氯胺的生成产生更大的抑制作用。然而,结合长江流域腐殖酸的阈值范围,实际条件下腐殖酸(1 mg/L)的添加相对于尿素(0.1 mg/L)的添加使一氯胺的生成量有较大的降低。由此,腐殖酸虽然在等浓度下相对于尿素对氨氮与氯的反应产生较小的抑制作用,但结合其在长江流域中的阈值范围可知,腐殖酸可发

挥消耗氯的重要作用。

2.2.2 含氮有机物浓度的影响

参照长江流域中含氮有机物的阈值范围,改变含氮有机物浓度,即氨基酸和尿素浓度分别为0.1、0.2和0.3 mg/L,腐殖酸浓度分别为0.5、1和2 mg/L,并将有效氯含量为5 mg/L的次氯酸钠溶液加入到氨氮(3 mg/L)和上述3种浓度的含氮有机物共存体系中,调节pH值为 7 ± 0.1 ,在室温下反应30 min后,氨氮和氨基酸或氨氮和尿素共存体系所生成的一氯胺含量用水杨酸分光光度法测定,氨氮和腐殖酸共存体系所生成的一氯胺含量用液相柱前衍生法测定。在氨氮与含氮有机物共存体系中,含氮有机物浓度对一氯胺生成规律的影响见图4。可知,不仅氨基酸、尿素和腐殖酸的存在对氨氮和氯反应生成一氯胺有影响,而且其浓度越高,在加氯条件下与氨氮的共存体系生成的一氯胺越少。

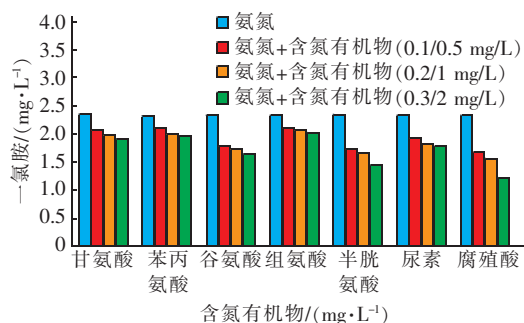


图4 氨氮与含氮有机物共存体系中含氮有机物浓度对无机一氯胺生成规律的影响

Fig.4 Effect of concentration of nitrogen-containing organic compounds on formation of inorganic monochloramine in coexistence system of ammonia nitrogen and nitrogen-containing organic compound

2.2.3 实际水质条件下含氮有机物总体的影响

参照1.3.2节设计思路和已建立的我国典型地域微污染原水水质模型,设计以下3种模型中有代表性的氨氮与含氮有机物的阈值组合,代表原水受污染的程度(较重、中等和较轻的情况),用于考察含氮有机物总体对生成无机氯胺的影响。其中总氨基酸浓度以5种相同浓度的氨基酸(甘氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸、组氨酸和半胱氨酸)的总浓度计。

向以上设计的3种氨氮和含氮有机物的共存体系中分别加入有效氯含量为1、5 mg/L的次氯酸钠溶液,代表预氯化的强弱程度。加氯后,同样调节pH值为 7 ± 0.1 ,在室温下反应30 min后用液相柱

前衍生法测定一氯胺的含量,得到模拟实际原水水质条件下含氮有机物总体对无机氯胺生成的影响,如表 1 所示。其中,无机氯胺检测方法的检测限为 0.013 mg/L。不难看出,在本实验所设计的模拟实际微污染原水水质和强弱两种预氯化条件下,无机

氯胺的生成量不仅受水体污染程度的影响,即污染程度高的生成的氯胺量较大,而且还受预氯化程度的影响,即预氯化强度大的生成的无机氯胺量较大。当然,在原水受污染程度较低时,失去了其生成无机氯胺的基本条件,再强的预氯化也起不到明显作用。

表 1 模拟实际原水水质条件下含氮有机物总体对无机氯胺生成的影响

Tab.1 Effect of total nitrogen-containing organic compounds on formation of inorganic chloramines under simulated actual conditions

受污染程度	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	典型含氮有机物浓度/(mg · L ⁻¹)			氯投加量/ (mg · L ⁻¹)	预氯化强度	时间/ h	无机氯胺生成量/ (mg · L ⁻¹)
		总氨基酸	尿素	腐殖酸				
较重	3	0.2	0.5	2.5	1	弱	0.5	0.45
	3	0.2	0.5	2.5	5	强	0.5	0.76
中等	1.5	0.15	0.25	1.5	1	弱	0.5	0.57
	1.5	0.15	0.25	1.5	5	强	0.5	0.91
较轻	0.1	0.1	0.1	1	1	弱	0.5	0.23
	0.1	0.1	0.1	1	5	强	0.5	n. d.

3 结论

依据微污染原水水质模型中的长江水水质参数阈值范围,同时选择 7 种有特定结构的典型含氮有机物,模拟微污染原水预氯化工艺条件,即在氨氮浓度为 3 mg/L、氨基酸和尿素为 0.1 mg/L、腐殖酸为 1 mg/L、pH 值为 7 ± 0.1 的实验条件下,研究含氮有机物对预氯化条件下无机氯胺生成的影响规律,得到以下结论:

① 在设定的实验条件下,当不存在含氮有机物时,氨氮与氯反应生成的无机氯胺仅有无机一氯胺存在,生成的一氯胺含量随氯投加量的增大而增大,符合氨与氯的折点反应规律;且一氯胺生成量受时间的影响较小,两者一经接触即能快速生成一氯胺,且生成后浓度不再变化。

② 氨氮溶液分别与加入的 7 种典型含氮有机物(甘氨酸、苯丙氨酸、谷氨酸、组氨酸、半胱氨酸、尿素和腐殖酸)形成的共存体系进行预氯化反应,相对于氨氮溶液单独与氯的反应,7 种典型含氮有机物独立存在时对无机氯胺的生成均有一定的抑制作用,且含氮有机物浓度越大,这种抑制作用越强,即生成的一氯胺越少。

③ 采用所选的 7 种典型含氮有机物近似模拟实际微污染原水中的含氮有机物,参照预氯化工艺条件,当含氮有机物同时存在时,相对于氨氮溶液单独与氯的反应,无机氯胺的生成量可以从 2.34 mg/L 大大降低到 0.76 mg/L。总体而言,无机氯胺的生成量不仅受水体污染程度的影响,而且还受预氯化强度的影响。但是,在原水受污染程度较低时,再强

的预氯化也难以起到明显作用。

以上研究不仅可以加深对微污染原水在预氯化过程中氯胺生成规律的认识,而且可以为由此产生的以氯胺为前质的消毒副产物,如 N,N - 二甲基亚硝胺的生成可能性、规律和机理等的研究奠定基础。

参考文献:

[1] 左金龙. 微污染水源水水质特点及其处理工艺选择 [J]. 中国给水排水,2012,28(16):15 - 18.
Zuo Jinlong. Characteristics of micro-polluted source water quality and selection of its treatment process [J]. China Water & Wastewater,2012,28(16):15 - 18 (in Chinese).
[2] Meric S, Daekyun K, Tanju K. The effect of pre-oxidation on NDMA formation and the influence of pH [J]. Water Res,2014,66(12):169 - 179.
[3] 代杏满. 原水氯化消毒及混凝条件下氯胺和 NDMA 的生成特性研究 [D]. 南京:南京理工大学,2016.
Dai Xingman. Characteristics and Kinetics Study of Chloramines and NDMA Formation under the Condition of Chlorination and Coagulation for the Raw Water [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016 (in Chinese).
[4] Chen W L, Jensen J N. Effect of chlorine demand on the ammonia breakpoint curve: model development, validation with nitrite, and application to municipal wastewater [J]. Water Environ Res,2001,73(6):721 - 731.
[5] 徐倩,徐斌,覃操,等. 水中典型含氮有机物氯化生成消毒副产物的潜能研究 [J]. 环境科学,2011,32(7):

- 1967 – 1973.
- Xu Qian, Xu Bin, Qin Cao, *et al.* Chlorination byproducts formation potentials of typical nitrogenous organic compounds in water [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1967 – 1973 (in Chinese).
- [6] Bal Krishna K C, Sathasivan A, Kastl G. Effectiveness of breakpoint chlorination to reduce accelerated chemical chloramine decay in severely nitrified bulk waters [J]. *Chemosphere*, 2014, 117C(1): 692 – 700.
- [7] 钱玮玲. 微污染原水强化混凝过程中消毒副产物 N – 亚硝基二甲胺的生成规律研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- Qian Weiling. The N-nitrosodimethylamine Formation as a Disinfection By-product during Enhanced Coagulation Treatment of Micro-polluted Waters [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016 (in Chinese).
- [8] 陶辉, 陈连生, 陈卫, 等. 典型有机氮类化合物存在时的加氯消毒控制方法 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30(7): 39 – 42.
- Tao Hui, Chen Liansheng, Chen Wei, *et al.* Chlorine dosage control method for water disinfection in presence of organic nitrogenous compounds [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(7): 39 – 42 (in Chinese).
- [9] Sang H P, Padhye L P, Wang P, *et al.* N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potential of amine-based water treatment polymers: effects of in situ chloramination, breakpoint chlorination, and pre-oxidation [J]. *J Hazard Mater*, 2015, 282(13): 133 – 140.
- [10] 陶辉, 王玲, 李星, 等. 饮用水氯胺法消毒过程中一氯胺的水杨酸分光光度法测定 [J]. *环境化学*, 2009, 28(1): 126 – 131.
- Tao Hui, Wang Ling, Li Xing, *et al.* Monochloramine testing method in chloramination process—salicylate spectrophotometric method [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(1): 126 – 131 (in Chinese).
- [11] 钱玮玲, 王正萍, 赵晓蕾, 等. 液相色谱柱前衍生法检测水中无机一氯胺研究 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(2): 735 – 739.
- Qian Weiling, Wang Zhengping, Zhao Xiaolei, *et al.* Research of inorganic monochloramine detection by HPLC – pre-column derivatization method [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(2): 735 – 739 (in Chinese).
- [12] 华东理工大学有机化学教研组. 有机化学 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- Teaching and Research Group of Organic Chemistry of East China University of Technology. *Organic Chemistry* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013 (in Chinese).
- [13] 邵颖. 食品生物化学 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.
- Shao Ying. *Food Biochemistry* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2015 (in Chinese).
- [14] 顾继友. 胶黏剂与涂料 [M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- Gu Jiyu. *Adhesives and Coatings* [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012 (in Chinese).
- [15] 孙子为, 高乃云, 王奕岚, 等. 预氯化与高锰酸钾预氧化处理长江芜湖段水源水 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(21): 118 – 123.
- Sun Ziwei, Gao Naiyun, Wang Yilan, *et al.* Comparative study on prechlorination and potassium permanganate preoxidation in treatment of source water from Wuhu section of Yangtze River [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(21): 118 – 123 (in Chinese).
- [16] 李潇潇, 张跃军, 赵晓蕾, 等. 硫酸铝/PDM 复合混凝剂对夏季太湖水的混凝脱浊 [J]. *中国环境科学*, 2008, 28(4): 294 – 298.
- Li Xiaoxiao, Zhang Yuejun, Zhao Xiaolei, *et al.* Coagulation and turbidity of aluminum sulfate/PDM composite coagulant in Taihu Lake in summer [J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(4): 294 – 298 (in Chinese).



作者简介: 黄雪丽 (1993 –), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术。

E-mail: 3281927237@qq.com

收稿日期: 2020 – 01 – 27