

食品和饮用水中的亚硝胺研究进展

李 晓¹, 贝 尔², 汪 隽^{2,3}, 徐志祥¹, 陈 超^{2,3}

(1. 山东农业大学 食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 3. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215163)

摘 要: 亚硝胺类化合物是国际上公认的一类强致癌物质。国内外检测和研究表明,亚硝胺在食品和饮用水中广泛存在,特别是在腌制蔬菜、肉类、水产、乳制品、啤酒以及霉变食品中浓度较高,局部区域的饮用水中亚硝胺风险也较高,对人体健康构成较大威胁。综述了亚硝胺类化合物的性质、来源和生成条件,对食品和水中亚硝胺的检测方法进行了归纳,介绍了控制食品和水中亚硝胺产生的方法和措施,并对相关食品和饮用水安全问题进行了展望。

关键词: 亚硝胺; 食品; 饮用水; 致癌物; 安全

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)22-0013-06

Research Progress of N-nitrosamine in Food and Drinking Water

LI Xiao¹, BEI Er², WANG Jun^{2,3}, XU Zhi-xiang¹, CHEN Chao^{2,3}

(1. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Research Institute for Environmental Innovation < Suzhou > Tsinghua, Suzhou 215163, China)

Abstract: N-nitrosamines are well-known strong carcinogens in the world. The related surveys and researches in China and overseas indicated the wide existence of nitrosamines in food and drinking water, which led to great threat to public health. Their concentrations were extraordinarily high in the pickled vegetables, meat products, seafood products, milk products, beer, moldy food and drinking water in some local areas. In this paper, the basic properties, source and formation conditions of nitrosamines were introduced. Their detection reports in food and drinking water were summarized. The methods and measures to prevent nitrosamine from forming in food and drinking water were also concluded. Some prospectives were given to improve the safety of food and drinking water to protect the public health.

Key words: N-nitrosamine; food; drinking water; carcinogen; safety

亚硝胺类化合物是N-亚硝基化合物中最重要的一类,共有200多种,是国内外公认的最重要的化学致癌物之一。1987年,国际癌症研究机构

(IARC)将亚硝胺归类为具有强致癌性的物质;其中,N-亚硝基二甲胺(NDMA)和N-亚硝基二乙胺(NDEA)被列为2A类致癌物(有充分的动物试验

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21477059); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07402-002); 清华大学自主科研项目(20173080012); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放基金资助项目(16Y01ESPCT)

通信作者: 陈超 E-mail: chen_water@tsinghua.edu.cn

证据证明其具有潜在致癌性),其他亚硝胺列为2B级致癌物。同年,美国环保署(US EPA)将NDMA列为B2类致癌物(有充分动物试验证据证明其具有潜在致癌性)。

饮用水中的亚硝胺研究始于北美。20世纪80年代,美国某些地下水中检出了NDMA,主要来自火箭推进剂等工业污染。1989年,加拿大安大略省的自来水中首次检出NDMA,并被鉴别为一种消毒副产物^[1]。随后,亚硝胺类消毒副产物在全世界很多国家的饮用水中被检出,包括美国、加拿大、澳大利亚、英国、德国和日本。中国的亚硝胺研究始于21世纪初,现有研究表明其浓度水平高于欧美国家^[2]。由于食品和饮用水中的亚硝胺在健康影响、检测方法、控制技术方面有很多相似性和相关性,因此对这两个领域中的亚硝胺问题一起进行讨论。

1 食品中的亚硝胺

国内外很多研究都证实腌鱼、腌肉、火腿等食品中含有较高浓度的亚硝胺,浓度一般在0.1~10 μg/kg范围内^[3,4],主要是NDMA和吡咯烷亚硝胺(NPYR),也有检出NDEA和二丙基亚硝胺(NDPA)等亚硝胺的报道。

啤酒中含有微量的二甲基亚硝胺,主要来源于啤酒酿造中使用的麦芽。冯新昌^[5]检测发现,61份啤酒样品中有49份检测出了0.1~6.0 μg/kg的NDMA。段发森等^[6]检测了31份啤酒样品,发现NDMA的检出率为83.9%,均值为0.5 μg/kg。虽然啤酒中亚硝胺含量较鱼和肉中低,但由于啤酒的一次性饮用量大,因此啤酒中的亚硝胺对人体健康的影响可能更大。Fan等^[7]在对饮用水和啤酒中N-亚硝胺的检测与风险评估中指出,饮用水中亚硝胺的平均致癌风险为 6.4×10^{-6} ,啤酒中NDMA、NDEA、NDPA、哌啶烷亚硝胺(NPIP)等亚硝胺的致癌风险为 $(1.5 \sim 46) \times 10^{-5}$ 。

部分蔬菜瓜果中含有胺类、硝酸盐、亚硝酸盐,在运输、贮藏、加工处理时,尤其是存在微生物时,其中的胺类和亚硝酸盐等亚硝化剂反应生成微量的亚硝胺。特别是在腌制处理时,由于添加了较多的亚硝酸盐,会产生大量的亚硝胺。杨宁^[8]检测了蔬菜类腌制品、肉类腌制品、水产类三类食品,发现雪里蕻腌菜中所检测出亚硝胺种类最多,多达7种,浓度最高的是N-亚硝基吗啉(NMOR,62.66 μg/mL);炸鱼中则检出了7.57 μg/mL的NPIP,鱿鱼中检出

了1.19 μg/mL的NMOR,三种食品中NDEA的检出率达到50%。

研究证明,黑曲霉、扩张青霉等9种霉菌在使玉米面霉变时,玉米面中的硝酸盐和仲胺含量都增高了25~100倍,在适宜条件下可形成亚硝胺。河南林县是我国传统的消化道癌症高发区,研究人员发现当地居民使用的玉米常有霉变,其中也检出了较高浓度的亚硝胺,该区域的饮用水中也检出了亚硝胺。因此食品和饮用水都可能对该地区的癌症发生率有贡献。

2 饮用水中的亚硝胺

2.1 国外检出情况

研究表明,很多国家的供水系统在消毒时会生成烷基亚硝胺,其中主要是NDMA^[9]。1989年,加拿大安大略省的自来水中首次检出NDMA,并被鉴定为一种消毒副产物^[10]。最近,根据美国非受控污染物检测条例(UCMR2)中的数据,NDMA被发现是一种遍布全美各地供水系统中的消毒副产物^[11]。其他发达国家的研究人员也开展了亚硝胺调查^[9]。在英国、德国、日本的供水系统中,亚硝胺的检出率和浓度都较低;但是在澳大利亚,由于较为普遍的氯胺消毒、污水回用和原水高氨氮浓度所导致的氯胺化,使得NDMA的检出率和浓度都比较高。

北美的多项研究发现,NDMA的生成与氯胺消毒的关联度远大于游离氯^[9]。在美国第二阶段非受控污染物监控条例数据中,出厂水中NDMA浓度>50 ng/L的供水系统都是典型的使用氯胺作为主要消毒剂而不是辅助消毒剂^[11],这反映出氯胺消毒比游离氯消毒更容易生成亚硝胺。由于在氯化处理含氨氮的水时也会导致氯胺的形成,所以游离氯处理生成NDMA的原因也许是水源水中存在较高浓度的氨氮^[9]。

2.2 国内检测情况

与其他国家相比,我国的自来水中不仅检出了NDMA,还检出了其他亚硝胺(例如NDEA、NPYR、NMOR、NPIP)^[12~14]。上海的供水系统中曾经被报道检出过79 ng/L的NDMA^[13]。Wang等^[14]在2010年3月—5月间开展过一次全国范围的亚硝胺调查,水样来自全国30个大城市的54座大型水厂,NDMA浓度大约在十几ng/L。

清华大学课题组从全国23个省44个城市和城镇采集了164个水样,包括出厂水、用户龙头水和水

源水,分别测试了亚硝胺及其前体物^[2]。相比而言,亚硝胺在我国出厂水和龙头水中的检出率比美国高得多。研究中测试了 9 种亚硝胺,其中 NDMA 的浓度最高,其在自来水厂出厂水中的检出率为 33%,用户龙头水中的检出率为 41%,出厂水和龙头水中的平均浓度分别为 11 ng/L 和 13 ng/L。自来水中的亚硝胺主要是其前体物与消毒剂反应生成的。该研究发现我国水源水中的 NDMA 生成潜能平均为 66 ng/L。亚硝胺的检出情况在全国不同区域和不同季节有很大的变化。长江三角洲地区的供水系统中检出了最高的亚硝胺浓度,出厂水和龙头水中 NDMA 平均浓度分别为 27 ng/L 和 28.5 ng/L,水源水中的 NDMA 生成潜能为 204 ng/L。

除了作为消毒副产物生成之外,工业废水和生活污水中存在的亚硝胺也会污染水源。有研究称江苏省多处城市水源水中发现严重的亚硝胺污染,特别是 NPIP 和 NMOR 的浓度高达数百 ng/L^[15]。

3 亚硝胺的检测

食品和水中的亚硝胺对人体健康影响很大。因此,建立一种高效、准确、简便的亚硝胺的标准检测检验方法,是开展研究、评估风险的第一步。

3.1 食品中亚硝胺的检测方法

目前列入国标的食品中亚硝胺检测方法有气相色谱-质谱法、气相色谱-热能分析法^[16],检测限分别为 0.3、0.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$,定量限分别为 1.0、0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。随着检测技术的不断发展,许多新的方法应运而生,包括超高效液相色谱-串联质谱法(UP-LC-MS-MS)、气相色谱-串联质谱法(GC-MS-MS)、气相色谱-化学荧光法(GC-NCD)、毛细管胶束电动色谱法、极谱法等。

亚硝胺的检测程序一般包括前处理、色谱分离、检测三个环节。其中,前处理又可包括消解和浓缩富集两部分。前者主要是把食品中的亚硝胺较为彻底地或者定量地转移到液相中,便于后续的浓缩富集,主要包括蒸馏法、消煮法等。后者主要是将痕量的亚硝胺进行浓缩,达到仪器分析能够检出的浓度,也是提高食品中亚硝胺检出限的一个关键环节,主要包括吸附法、固相萃取、固相微萃取、超临界流体萃取等。

对于分离环节而言,气相色谱法因高效能、高灵敏度和高选择性的特点,能与多种检测器联合,被广泛用于食品污染物的分析,成为挥发性亚硝胺类物

质主要的检测方法。与之相比,液相色谱不仅灵敏度高、重现性好,还对样品要求低、前处理过程简单,不仅可以检测挥发性亚硝胺,还可以检测一些非挥发性、热不稳定或分子质量较高的亚硝胺类,适用范围比气相色谱广。

对于检测环节而言,常用的检测器包括热能分析仪和质谱分析仪。热能分析仪在 20 世纪末较为常用,设备价格较为便宜,但是检出限、精密度相对不足。质谱分析法通过检测被测样品的离子质荷比对样品进行定性、定量分析,具有高灵敏度、结果可靠、对样品要求较低、适用范围广的优点,适合检测痕量化合物。

使用气相色谱-质谱联用检测食品中亚硝胺的报道很多。金璐等^[17]用该方法检测四川泡菜中的 7 种亚硝胺,结果表明采用气相色谱-质谱联用方法检测食品中的挥发性亚硝胺具有良好的准确性、重现性和灵敏性。

液相色谱-质谱联用法现已成为更受重视的食品中亚硝胺检测方法。气相色谱-质谱法检测一个样品通常需要用时 1 h,而高效液相色谱-质谱法则只需要十几分钟。朱翔等^[18]采用 UPLC-MS-MS 检测 9 种亚硝胺,该方法检出限低、定性能力强、线性关系良好。

3.2 饮用水中亚硝胺的检测

与食品中亚硝胺的检测相比,饮用水中的亚硝胺浓度更低,一般为 1~100 ng/L,因此对检测方法的检出限、精密度要求更高。为了达到这样的检测精度,往往需要更高的富集浓缩倍数、更大的水样体积,在富集、洗脱、定容等环节均可能会带来较大的检测误差,所以在前处理环节中要求更高一些。

目前我国还没有饮用水中亚硝胺的检测标准方法,国际上测试饮用水中亚硝胺的方法主要有两类:固相萃取-气相色谱-串联质谱法(SPE-GC-MS/MS)、固相萃取-液相色谱-串联质谱法(SPE-LC-MS/MS)。前者以美国环保署(US EPA)在 2004 年发布的 521 方法为主,可以测试 7 种亚硝胺。后者则由加拿大阿尔伯塔大学李杏放教授课题组开发,可以测试全部 9 种亚硝胺消毒副产物;该课题组还利用该方法检测到饮用水中多种浓度更低的烟草类亚硝胺。就 7 种挥发性亚硝胺而言,两种方法基本上具有相同的检测能力,都是得到研究人员充分认可的主流方法。

4 食品和水中亚硝胺的控制及预防措施

前已述及,很多食品和饮用水中含有微量的亚硝胺,对人体健康造成较为严重的威胁。因此,如何减少食品和饮用水中亚硝胺的产生、减轻亚硝胺的危害,是迫切需要解决的技术问题。

4.1 食品工艺措施预防亚硝胺的危害

提升食品加工工艺,合理使用某些食品添加剂,可以在保证食品口感不变、营养物质不流失的基础上,预防亚硝胺的危害。

在生产腌渍蔬菜、鱼肉类食品时,应尽可能不用或慎用强亚硝化剂,控制硝酸盐、亚硝酸盐的使用量,研制开发低盐、低糖工艺。在加工过程中,充分利用抗氧化剂,如维生素C、维生素A、山梨酸、植物多酚对NDMA的阻断作用。另外,腌渍好的蔬菜类、熟制的鱼肉类食品,可用紫外照射分解亚硝胺。

在乳制品、啤酒等食品生产过程中,采取一系列灭菌杀菌技术,防止食品发生霉变,可抑制亚硝胺的生成。在啤酒酿造的麦芽烤制阶段,应避免较高的温度,可采用低温干燥减少麦芽中NDMA的含量;在啤酒生产过程中已确认采取硫化或含硫的燃料也可降低NDMA的生成。对乳制品,除传统的巴氏消毒外,采用紫外照射也可将亚硝胺的含量大大降低。

对于富含维生素的食材,加工时应尽可能保存其维生素含量,可加大人体对维生素的摄取量。许多流行病学调查发现,在一些食管癌高发区,维生素C的摄取量都很低,所以提高维生素C的摄取量能够预防或减轻亚硝胺对人体的危害。对于维生素含量较少的食物,可通过添加维生素来减轻亚硝胺的危害。

4.2 从农产品生产入手抑制亚硝胺的生成

在农业生产方面,有机肥的合理使用,也会从源头上控制食物中的亚硝胺。施用钼肥可以降低种植的蔬菜水果中硝酸盐、亚硝酸盐含量,减少亚硝胺的生成。其原因在于,钼是植物体内硝酸盐还原酶的重要组成部分,植物体内钼含量偏低,就会引起硝酸盐的累积。在传统癌症高发区河南林县,施用钼酸铵肥料确实使粮食中硝酸盐含量大幅度下降。食品中硝酸盐含量的降低,使得亚硝胺类的前体物减少,亚硝胺合成受阻。

4.3 抑制饮用水中亚硝胺的生成

控制饮用水中的亚硝胺浓度首先要保护好水源地,减少水源水中的亚硝胺前体物含量,是最为有效

和彻底的控制措施。如果暂时没有其他水源来替代受污染水源或者水源地水质提升较为缓慢时,亚硝胺的有效控制还可以通过优化水处理工艺来实现^[2,19],如通过实施严格的折点氯化,或者在消毒前增加臭氧活性炭深度处理去除前体物来实现。笔者所在课题组的调研结果表明^[2],当以河水为水源时,采用传统工艺且投加游离氯的水厂出厂水和龙头水中NDMA浓度分别为28 ng/L和42 ng/L,而采用臭氧活性炭深度处理工艺且投加游离氯的水厂则分别为0和18 ng/L。当以湖库水为水源时,采用传统工艺且投加游离氯的水厂出厂水和龙头水中的NDMA平均浓度分别为5 ng/L和1 ng/L;而采用深度处理工艺且投加游离氯的水厂则未检出NDMA。

消毒剂类型是亚硝胺生成的另一个关键因素^[2]。氯胺有利于生成NDMA和其他亚硝胺,而游离氯可以氧化一些亚硝胺前体物。一些水厂在进水中使用折点氯化来强化混凝,有助于氧化去除亚硝胺前体物。需要注意的是,投加高剂量的游离氯也会带来水中三卤甲烷、卤乙酸和其他受控消毒副产物增加的隐患,应该进行工艺优化以实现控制亚硝胺和受控消毒副产物之间的平衡^[20]。

4.4 制定标准,加强监管

鉴于亚硝胺的毒性和分布情况,世界上不同国家和地区已经在推动建立食品和饮用水中亚硝胺的标准和指导值。其中,俄罗斯、乌克兰对食品中亚硝胺的标准最严,冰岛较为宽松,其他国家尚未制定食品中的亚硝胺限量标准。我国曾经在已废止的《肉制品中N-二甲基亚硝胺限量卫生标准》(GB 9677—88)、《食品中N-亚硝胺限量卫生标准》(GB 9677—1998)、《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2005)中对肉制品、海产品中的NDEA分别设立了5 μg/kg和7 μg/kg的限值;已废止的GB 2762—2012和现行GB 2762—2017取消了对NDEA的要求,只保留了对肉制品、海产品中的NDMA不超过3 μg/kg和4 μg/kg的限值要求。

制定啤酒中亚硝胺标准的国家更多。其中,西欧国家大多制定了0.5 μg/kg的含量限值,美国、日本的标准则最为宽松,为5 μg/kg。我国曾经在已废止的《发酵酒卫生标准》(GB 2758—81)对啤酒中NDMA设立了3 μg/kg的含量限值;已废止的《发酵酒卫生标准》(GB 2758—2005)和现行《食品安全国家标准 发酵酒及其配制酒》(GB 2758—2012)取消

了对啤酒中 NDMA 的要求。

与食品和啤酒相比,饮用水中亚硝胺的浓度标准要严得多。这是因为饮用水摄入量,而且作为最重要的基础公众产品,需要考虑对婴幼儿、孕妇、病人、免疫缺陷人群的影响。据报道,NDMA 终生饮用的百万分之一致癌风险浓度是 0.7 ng/L^[10]。美国加州、加拿大安大略、WHO 分别制定了饮用水亚硝胺标准。据悉,美国环保署正力图将亚硝胺纳入

国家标准,可能会提出一个处理技术 (Treatment Technique) 的标准要求。我国目前尚未制定饮用水中亚硝胺的国家标准。上海市于 2018 年 6 月发布了我国第一部饮用水地方标准《生活饮用水水质标准》(DB 31/T 1091—2018),将 NDMA 列入其中,限量标准是 0.1 μg/L。

不同国家对食品和饮料中亚硝胺的限量标准或含量水平见表 1。

表 1 不同国家对食品和饮料中亚硝胺的限量标准或含量水平

Tab. 1 The standards of N - nitrosamine for food and beverage in different countries

| 项 目 | 肉类/(μg · kg ⁻¹) | | 海产品/(μg · kg ⁻¹) | | 啤酒/(μg · L ⁻¹) | 饮用水/(μg · L ⁻¹) | | |
|--|-----------------------------|---------------------|------------------------------|------|----------------------------|-----------------------------|------|------|
| | NDMA | NDEA | NDMA | NDEA | NDMA | NDMA | NDEA | NDPA |
| 世界卫生组织 | | | | | | 0.1 | | |
| 奥地利 | | | | | 0.5 | | | |
| 澳大利亚 | | | | | | 0.1 | | |
| 比利时 | | | | | 0.5 | | | |
| 加拿大 | 5 ~ 80 ^a | 6 ~ 25 ^a | 35 ~ 50 ^a | | 1.5 | 0.04 (安大略省为 0.09) | | |
| 中国 | 3 | * | 4 | * | ** | 上海为 0.1 | | |
| 捷克 | | | | | 0.5 | | | |
| 德国 | 1 ~ 8 ^a | | | | 0.5 | 0.01 | | |
| 荷兰 | 0.3 ~ 7.3 ^a | | 0.6 ~ 7.9 ^a | | 0.5 | | | |
| 冰岛 | 10(总亚硝胺) | | 7(总亚硝胺) | | | | | |
| 日本 | 10 ~ 25 | 8 ~ 300 | | | 5 | | | |
| 俄罗斯 | 2(总亚硝胺) | | 3(总亚硝胺) | | 3 | | | |
| 瑞士 | | | | | 0.5 | | | |
| 土耳其 | | | | | 0.5 | | | |
| 乌克兰 | 2(总亚硝胺) | | 3(总亚硝胺) | | 3 | | | |
| 英国 | | | | | 0.5 | | | |
| 美国 | | | | | 5 | | | |
| 美国加州 | | | | | | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 美国麻省 | | | | | | 0.01 | | |
| 注: ^a 表示文献报道的亚硝胺含量水平,其他数据均为限量标准,* 指曾经对海产品、肉制品中的 NDEA 分别设立了 5 μg/kg 和 7 μg/kg 的含量限值,现行标准中取消了对 NDEA 的要求。** 指我国曾经对啤酒中 NDMA 设立了 3 μg/kg 的含量限值,现行标准中取消了对啤酒中 NDMA 的要求。 | | | | | | | | |

5 结语

近年来,随着公众对食品和饮用水安全与健康问题的愈发重视,亚硝胺的研究成为该领域的前沿热点话题之一。建议把食品和水中亚硝胺的生成机理、前体物来源、控制技术作为研究重点,加大研究投入,加强能力建设,科学合理制定相关标准,使研究成果尽早应用到生产生活中,减少亚硝胺对人体的危害,保障公众健康。

参考文献:

[1] Hrudehy S E, Charrois J W A. Disinfection By-products and Human Health [M]. London: IWA Publishing,

2012.

[2] Bei E, Shu Y Y, Li S, et al. Occurrence of nitrosamines and their precursors in drinking water systems around mainland China[J]. Water Res, 2016, 98: 168 - 175.

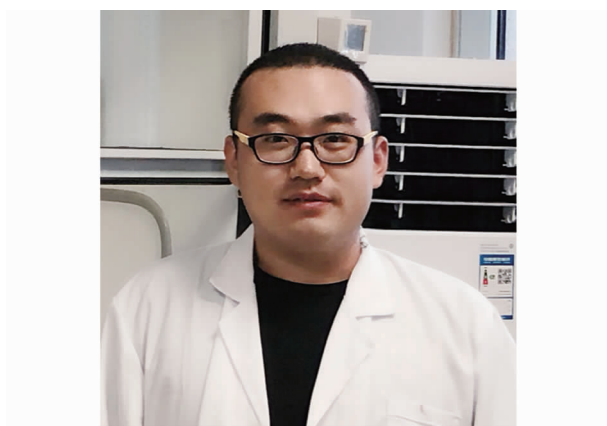
[3] GB 2762—2005, 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

GB 2762 - 2005, Limit of Contaminants in Food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).

[4] Yurchenko S, Mölder U. Volatile N - nitrosamines in various fish products[J]. Food Chem, 2006, 96(2): 325 - 333.

[5] 冯新昌. 气相色谱 - 热能分析仪联用技术测定啤酒、肉制品、酱油中挥发性亚硝胺[J]. 卫生职业教育,

- 2001,19(7):92-93.
- Feng Xinchang. Determination of volatile nitrosamines in beer, meat products and soy sauce by GC-TEA [J]. Health Vocational Education, 2001, 19(7):92-93 (in Chinese).
- [6] 段发森,陈恺玲,骆和东. 啤酒、酱油、香肠中N-亚硝基化合物含量的调查分析[J]. 现代预防医学, 2001,28(1):27-28.
- Duan Famiao, Chen Kailing, Luo Hedong. Study on the content of N-nitroso compound in beer, soy sauce and sausage [J]. Modern Preventive Medicine, 2001, 28(1):27-28 (in Chinese).
- [7] Fan C, Lin T. N-nitrosamines in drinking water and beer: Detection and risk assessment [J]. Chemosphere, 2018, 200: 48-56.
- [8] 杨宁. 腌制食品中9种N-亚硝胺同步检测的分析方法研究[D]. 武汉:武汉轻工大学, 2013.
- Yang Ning. Study on the Analytical Method for Simultaneous Determination of Nine N-nitrosamines in Pickled Food [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Technology, 2013 (in Chinese).
- [9] Krasner S W, Mitch W A, McCurry D L, et al. Formation, precursors, control, and occurrence of nitrosamines in drinking water: A review [J]. Water Res, 2013, 47(13):4433-4450.
- [10] Charrois J W A, Boyd J M, Froese K L, et al. Occurrence of N-nitrosamines in Alberta public drinking-water distribution systems [J]. J Environ Eng Sci, 2007, 6(1):103-114.
- [11] US EPA. UCMR2 data considerations definitions summary [EB/OL]. <http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/ucmr/data.cfm#ucmr2013>, 2012-01-01.
- [12] Luo Q, Wang D, Wang Z. Occurrences of nitrosamines in chlorinated and chloraminated drinking water in three representative cities, China [J]. Sci Total Environ, 2012, 437:219-225.
- [13] 梁闯,徐斌,夏圣骥,等. SPE/LC/MS/MS检测水中痕量二甲基亚硝胺[J]. 中国给水排水, 2009, 25(14):82-85, 92.
- Liang Chuang, Xu Bin, Xia Shengji, et al. Detection of trace NDMA in water by SPE/LC/MS/MS [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(14):82-85, 92 (in Chinese).
- [14] Wang W, Yu J, An W, et al. Occurrence and profiling of multiple nitrosamines in source water and drinking water of China [J]. Sci Total Environ, 2016, 551/552: 489-495.
- [15] Li T, Yu D, Xian Q, et al. Variation of levels and distribution of N-nitrosamines in different seasons in drinking waters of east China [J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(15):11792-11800.
- [16] GB 5009.26-2016, 食品安全国家标准 食品中N-亚硝胺类化合物的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- GB 5009.26-2016, National Standard for Food Safety, Determination of N-nitrosamines in Foods [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [17] 金璐,姚开,张凤,等. 采用气相色谱-串联质谱联用法检测四川泡菜中7种挥发性亚硝胺[J]. 食品科技, 2017, 42(7):305-308.
- Jin Lu, Yao Kai, Zhang Feng, et al. Determination of seven volatile nitrosamines in Sichuan pickles by GC-MS [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(7):305-308 (in Chinese).
- [18] 朱翔,李伟,刘玉灿,等. 超高效液相色谱-三重四极杆质谱联用仪同时检测水中9种亚硝胺[J]. 分析测试学报, 2014, 33(8):866-872.
- Zhu Xiang, Li Wei, Liu Yucan, et al. Determination of nine N-nitrosamines in water using ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2014, 33(8):866-872 (in Chinese).
- [19] Liao X B, Wang C K, Wang J, et al. Nitrosamine precursor and DOM control in effluent-affected drinking water [J]. J AWWA, 2014, 106(7):E307-E318.
- [20] Liao X B, Chen C, Yuan B L, et al. Control of nitrosamines, THMs, and HAAs in heavily impacted water with O₃-BAC [J]. J AWWA, 2017, 109(6):E3-E13.



作者简介:李晓(1994-),男,山东平阴人,硕士研究生,主要研究方向为农产品加工工程和食品质量与安全。

E-mail:605781651@qq.com

收稿日期:2018-06-27