

环境中不同形态氮素的检测方法

王语嫣¹, 陈 焰¹, 朱园园^{2*}

¹武汉工程大学化工与制药学院, 湖北 武汉

²武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年1月12日; 录用日期: 2025年2月5日; 发布日期: 2025年2月14日

摘要

氮元素广泛存在于自然界中, 对人类生产生活和生态系统平衡至关重要。文章主要介绍了硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、氮氧化物、总氮和总凯氏氮等含氮化合物的国家标准及行业标准中主要的检测方法。根据各类检测方法的特性, 分析了它们的优劣势, 并据此提出了部分方法的应用建议, 以提升检测准确性和效率。同时, 为了响应化工、医药、农业和环境保护等领域对氮元素分析的需求, 提出了研发全自动分析仪的构想。文章旨在为同行业的工作者、分析者提供参考和分析, 从而使环境检测与保护、人类生产生活等领域的氮元素检测更加高效。

关键词

氮元素, 检测方法, 环境保护

Detection Methods for Different Forms of Nitrogen in the Environment

Yuyan Wang¹, Jiong Chen¹, Yuanyuan Zhu^{2*}

¹School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

²School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Jan. 12th, 2025; accepted: Feb. 5th, 2025; published: Feb. 14th, 2025

Abstract

Nitrogen is widely present in nature and plays an important role in industrial production, human life, and ecosystem balance. This paper reviews the detection methods in the national standards and industry standards for nitrogen-containing compounds, such as nitrate, nitrite, ammonia nitrogen, nitrogen oxides, total nitrogen, and total Kjeldahl nitrogen. Based on the characteristics of different

*通讯作者。

detection methods, this paper discusses their advantages and defects and gives some suggestions to improve the accuracy and efficiency of the detection for different types of nitrogen. Meanwhile, in order to meet the requirements of nitrogen analysis in the fields of chemical industry, medicine, agriculture, and environmental protection, the conceiving of developing an automatic analyzer was proposed. This review aims to provide a reference for analysts in the field of nitrogen detection so as to make the nitrogen analysis more precise and efficient in various environments.

Keywords

Nitrogen, Detection Method, Environmental Protection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氮元素作为生命体必需的基本元素，不仅是蛋白质的必要组成部分，还构成了核酸、脂质和多糖等重要生命物质。在自然界中，氮主要以氮气(N_2)的形式存在。除氮气外，氮还以硝酸盐、亚硝酸盐、氨、铵离子和氮氧化物等无机氮化合物的形式存在。这些无机氮化合物在土壤、水体和大气之间转化，参与动植物的生长代谢以及微生物的活动，对生态系统的氮循环和能量流动有着重要意义。因此，维持这些无机氮化合物的平衡对于生态系统的健康和稳定至关重要。

氮的检测是维持无机氮化合物平衡的关键步骤。在水环境方面，过量施用化肥、不当处理畜禽养殖的排泄废物以及排放未达标的工业废水和生活污水等不当行为，可能导致水源中含氮化合物含量超标，提高了受污染水的处理成本，甚至增加了人类患癌的风险；同时，过量的氮输入水体，超出了水体的自净能力，破坏了水体生态系统的平衡，导致富营养化和水华暴发等问题[1][2]。在农业领域，过度依赖含氮的无机化肥会导致土壤酸化板结、土壤肥力下降等土壤退化的问题；然而，氮元素的缺乏会限制植物的生长，进而间接影响动物对氮的摄入，还会导致土壤微生物群落结构失衡，降低土壤肥力和生物多样性[3][4]。在石油、化工等领域，监测作业场所中一氧化氮、二氧化氮等氮氧化物的浓度对保障作业场所的人身安全及生产安全至关重要[5]。在大气环境中，微量的氮氧化物不仅是光化学烟雾的重要来源，还是常见的温室气体，对环境和气候产生重要影响[6]。此外，精确检测食品中的有害氮化合物(如亚硝酸盐)可以有效避免其过量积累，从而保障食品安全。

鉴于氮元素检测的必要性，本文综述了氮元素检测的方法，分析了它们的优势与局限性，为同行业分析人员提供参考。此外，介绍了若干已研发的全自动检测装置，为我们设计全自动氮化合物分析仪提供了参考和启示，不仅有助于提高环境监测的准确度和农业生产效率，而且能推动全自动分析领域的进步。

2. 氮元素形态及检测手段

2.1. 硝酸盐

硝酸盐是世界各地水体中最常见的污染物[7]。长期饮用硝酸盐超标的饮用水，可能会增加癌症的风险和引起健康问题[8]。水体中高浓度的硝酸盐可能导致水体富营养化，影响水体生态系统的平衡。因此，对大气、土壤和地下水等领域的硝酸盐含量的精确检测，不仅是人类健康生活的保障，也是保护生态环境的必要措施。

目前,用于硝酸盐检测的方法主要有:酚二磺酸分光光度法[9]、紫外分光光度法[10]、镉柱还原法[11]等。

酚二磺酸分光光度法可用于测定饮用水、地下水、清洁地面水中的硝酸盐含量[9]。该方法检测范围广泛,显色稳定,灵敏度较高,是目前测定硝酸盐含量最常用的方法[12]。然而,该方法对酸度的精确度要求较高,检测时效性较差(需在取样后的24小时内完成检测),样品储存条件严格(必要时需置于4℃及以下的环境中储存)[13]。因此,酚二磺酸分光光度法适用于硝酸盐含量不稳定的小批量的样本检测。在设计全自动分析仪以检测硝酸盐含量时,该原理的应用相对较少。

紫外分光光度法的适用范围包括未受污染的天然水体、经净化处理的生活饮用水[10]。该方法具有良好的精密度和准确度,高灵敏度,加标回收率接近100%,且操作快捷,试剂用量少,因此适宜推广应用[14]。由于有机物在220 nm波长下有显著的吸收干扰,故该方法适用于有机物含量低的样品检测[15]。

汞柱还原法适用于检测居住区大气、地下水和土壤中的硝酸盐含量[11]。对于硝酸盐含量低的样品,该方法具有有效去除高盐度干扰、高精确度和低检出下限的优点,且试样前处理简单,仪器投入及维护费用较低。然而,该方法操作复杂,检测结果受汞柱还原能力的影响,并且对仪器校准要求较高[13][16]。使用自动化流动注射分析仪进行检测可以有效避免人为误差,且操作更为自动化。总体而言,汞柱还原法主要适用于硝酸盐含量低的样品检测。肖靖泽[17]等设计了五参数全自动营养盐分析仪,其中硝酸盐的检测基于该方法。

对于硝酸盐的检测,综合考虑精确度、检测范围及环境保护等因素,优选紫外分光光度法。鉴于不同样品的特性及检测精确度的需求,应初步对样品中硝酸盐的含量范围、干扰物的种类以及样品数量进行综合评估,进而选择恰当的检测方法和手段,以提高检测效率。

2.2. 亚硝酸盐

亚硝酸盐是评估水体富营养化程度和毒理性的主要指标之一。此外,亚硝酸盐属于2A类致癌物,长期摄入可能增加罹患胃癌和食管癌的风险[1]。为了保障人们的生命安全及环境可持续发展,应采用精确的检测手段对食品和水体中的亚硝酸盐进行检测。

根据国家标准及行业标准,亚硝酸盐的检测方法主要包括盐酸萘乙二胺法[18][19]和离子色谱法[20][21]。盐酸萘乙二胺法广泛应用于工业循环冷却水、食品、制盐、饲料中的亚硝酸盐的检测[18][19]。该方法在检测过程中具有较大的优势,其中包括准确度高、重复性良好和操作简便等,适用于大规模样品检测。根据行业标准的指引,作为显色剂的盐酸萘乙二胺和对氨基苯磺酸属于危险品,需谨慎使用[22]。该方法对实验条件如室内压强和温度的稳定性要求较高,显色效果受时间、样品pH值以及反应转化率的影响[23]。在全自动化的技术发展过程中,尽管研究人员融合了微流控芯片系统、液芯波导技术、固相萃取等多元方法以拓展其应用领域,但盐酸萘乙二胺法与流动注射分析技术的联合应用,仍然被认为是进行亚硝酸盐含量测定的主流及公认方法[24]-[27]。

离子色谱法适用于检测多种离子,其中包括亚硝酸盐[20][21]。该方法具有普适性、高分离度、高灵敏度,高精确度,低毒性危害等优势[28]。相较于分光光度法,离子色谱法采用峰面积定量,有效克服了分光光度法在精确度上的局限性,但其检测结果仍会受到水样性质和测定条件的影响[29]。此外,离子色谱法相较于其他检测方法价格较为昂贵。Chiesaa等[30]已成功将该方法应用于鱼类、甲壳类和双壳类海鲜中亚硝酸盐与硝酸盐的含量测定。

综合来看,盐酸萘乙二胺法成本较低,对设备要求不高,适合大多数实验室使用;而离子色谱法设备成本较高、需要有专业的仪器和操作技术,但在多种离子检测方面具有明显优势。因此,如果实验室需要长期进行多种离子的检测,离子色谱法更为经济高效。

2.3. 氨氮

氨氮在水体中主要以游离氨和铵离子的形态存在。其中，游离氨因更易透过生物膜，对水生物的毒害作用极大，其毒性是铵离子的几十倍[31]。鱼类对水体中氨氮含量敏感，当水体中氨氮含量过高时，可能会导致鱼类中毒，从而引发组织损伤甚至死亡。

根据国家标准及行业标准，氨氮的检测方法主要包括纳氏试剂分光光度法[32][33]及水杨酸分光光度法[34]。

纳氏试剂分光光度法适用于地表水、地下水、生活污水和工业废水中氨氮的测定[32][33]，是目前广泛应用的水质氨氮测定方法。该方法操作简捷、分析速度快且灵敏度高[35]。然而，该方法在显色过程中容易受到金属离子、悬浮物、余氯和有机物等的干扰。同时，环境温度、显色时间和样品的 pH 值等因素有可能导致显色不充分[36]。此外，由于纳氏试剂本身具有毒性，大量使用会对实验人员的安全构成威胁。该方法更适用于小批量样品的快速检测。陆佩莉[37]等提出了全自动间断化学分析仪应用于测定地表水中氨氮的方法，该方法在国外水质检测领域应用较多[38]。杭州谱育科技[39]基于该方法设计出 SUPEC 5000 全自动氨氮分析仪，可实现水质氨氮的全自动、高通量检测。

水杨酸分光光度法可用于生活污水、工业废水和地表水中的氨氮测定[34]。该方法准确度较高，精密度良好，较为灵敏，检出限优于环境标准，具有较好的安全环保性[40]。但该方法容易受到水中干扰物的影响，且溶液稳定性不高，保存时限较短。德国 Cleverchem 公司研发的全自动间断化学分析仪已被众多检测机构广泛采用，其采用水杨酸分光光度法对样品中的氨氮含量进行定量分析[41][42]。

总体而言，在上述两种检测方法中水杨酸分光光度法在安全性和环保性方面更具优势。研究人员[40][43]对这两种方法都提出了改进方案，以期获得更精确的数据并提高效率。在实际的水质检测应用中，纳氏试剂分光光度法仍然是主流方法，但随着试剂管制和废液处置管理日趋严格，水杨酸法在某些场合已经开始替代纳氏试剂法。

2.4. 氮氧化合物

氮氧化物(NO_x)主要包括一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)，其来源可分为自然源和人为源。对人类健康的影响主要表现为呼吸系统疾病与心血管疾病；对环境的破坏则尤为显著，会导致酸雨、臭氧层的破坏以及土壤肥力下降[5][44]。

由于氮氧化物对人类以及环境的威胁，国家出台了一系列检测标准，包括盐酸萘乙二胺分光光度法[45][46]和 Saltzman 法[47][48]。

盐酸萘乙二胺分光光度法适用于测定固定污染源及环境空气中氮氧化物[46]。该方法操作简便，具有良好的准确性和稳定性，检测灵敏，线性拟合效果较好，对同一地区大气质量测量结果较为稳定[49][50]。然而，该方法存在一定的局限性：测定范围较窄(仅能检测稳态工艺废气排放中的二氧化氮含量)；样品保存时间较短；操作时试剂和样品需遮光保存。

Saltzman 法主要用于测定环境空气中的二氧化氮[47][48]。该方法在采样体积(4~24 L)较小时，检出限低(0.015 mg/m^3)，具有较高的灵敏度和选择性[51]。然而，该方法也存在一定的局限性：样品在高温下的热稳定性较差，温度过高会导致样品分解，从而影响测量结果的准确性[52]。

盐酸萘乙二胺分光光度法适用于固定污染源排放和环境空气中氮氧化物的测定；Saltzman 法主要适用于测定二氧化氮含量较低的环境空气。

2.5. 总氮

总氮包括有机氮、氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐，是衡量水体富营养化程度的重要参数。过量的总氮会

对水生物的生存产生直接影响，进而间接影响人类健康。因此，应该采用合适的方式测定不同环境中总氮的浓度，并对超标的区域进行有效治理。

根据国家标准与环境保护标准，总氮的检测方法包括杜马斯燃烧法[53]、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[54]、气相分子吸收光谱法[55]。

杜马斯燃烧法可用于测定肥料中的总氮含量[53]。其优势在于：无需复杂的前处理，高效快捷；使用热导检测器检测，无需消耗试剂；不产生对人体以及环境有害的废气、废液，环境友好。然而，该方法也存在一定的局限性：前处理复杂；样品数量较少时，检测成本和时间成本较高；在燃烧时需达到约900℃，存在一定的安全风险。若采用全自动杜马斯定氮仪，则可实现全自动化，更加高效便捷[56] [57]。

碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法可用于测定水中的总氮含量，包括地表水、地下水、工业废水和生活污水[54]。其优势在于操作简单、便于分析且成本较低，更适宜测试高总氮量的样品[58]。然而，该方法也存在一定的局限性：消化剂($K_2S_2O_8$)若消煮不当，总量仅1%就会对测定结果产生严重干扰；实验空白值对结果影响较大；消解时间、体系压力以及消解温度对测定结果有显著影响[59]。莫怡玉[60]等采用碱性过硫酸钾氧化，气相分子吸收光谱法测定联用的方法，并采取了用螺纹盖聚四氟乙烯消化管代替比色管等手段优化。

气相分子吸收光谱法可用于测定地表水、地下水、生活污水、工业废水和海水中的总氮含量[55]。该方法表现出较高的准确度和精密度，具有较宽的线性范围、变异系数小(曲线相关系数可达0.9997)、操作简便、快速测定的优势[61] [62]。然而，该方法的仪器成本和维护成本较高、同时要求检测人员严格按照仪器使用规程操作、维护和清洗，不适宜检测有较多悬浮物的样品。

上述三种检测方法各有优劣。杜马斯燃烧法和气相分子吸收光谱法均能快速测定总氮含量；气相分子吸收光谱法在准确度和精密度上表现较好，适用于对检测精度要求较高的实验；杜马斯燃烧法无需消耗试剂，对环境友好，而其他两种方法均需考虑废液的处理。杜马斯定氮仪和气相分子吸收光谱仪均可实现较高程度的自动化。特别是气相分子吸收光谱法，通过提高自动化程度和标准化操作流程，减少了人为操作带来的误差。

2.6. 凯氏氮

凯氏氮(TKN)包括了氨氮和在特定条件下能被转化为铵盐的有机氮化合物，可用于评估水体中有机物含量的指标。根据国家标准，凯氏氮主要采用凯氏定氮法进行测定[63]。

凯氏定氮法广泛应用于食品、饲料、土壤和肥料等领域的凯氏氮测定[63]。其优势主要在于准确性高，对设备要求不高，操作较为简单，并且能够快速检测大批量土壤样品[64]。但该方法也存在一些局限性：检测前需要根据不同形态的氮选择不同的前处理方法，过程较为繁琐；在碱性蒸馏时，汞盐会消解形成汞铵络合物，故须加入适量硫代硫酸钠以分解络合物[65]。此外，检测过程中需使用大量的高浓度酸碱，会产生较多废液，对环境造成危害。

3. 氮化合物检测方法及全自动分析仪

以上综述的各种氮形态的检测方法、检测范围、使用场景等如表1所示。

如上所述，各种氮元素的监测方法均有适用对象和使用场景的局限性，在高通量、多元素、自动化快速检测的需求指引下，具有普适性的全自动氮化合物分析仪的研发迫在眉睫。该设备需要具备高效检测硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、总氮及凯氏氮等多种含氮化合物的功能，能够快速准确检测水体、大气中不同氮元素的含量。该设备的研发将有助于更好地评估土壤的固氮效率，为农业生产提供更科学的指导。此外，普适性的全自动分析设备还将应用于检测食品中硝酸盐、亚硝酸盐等的含量，为食品安全保驾护航。

Table 1. Detection methods of nitrogen compounds
表 1. 氮化合物检测方法

氮化合物类型	检测方法名称	检测范围	操作复杂度	环境影响	推荐使用场合	国家标准/行业标准
硝酸盐	酚二磺酸分光光度法	0.02~2 mg/L	中	低	硝酸盐含量不稳定的小批量样本检测	GB/T 7480-1987
	紫外分光光度法 镉柱还原法	0.20~20.0 mg/L 0.5~5.0 μg/硝酸盐	低 高	低 中	有机物含量低的样品检测 硝酸盐含量低的样品检测	DZ/T 0064.59-2021 GB/T 12374-1990
亚硝酸盐	盐酸萘乙二胺法	0.062~0.25 mg/L	低	中	大规模样品检测	HG/T 3516-2011
	离子色谱法	-	高	低	需要长期进行多种离子检测的实验室	DZ/T 0064.51-2021
氨氮	纳氏试剂分光光度法	0.04~2.4 mg/L	低	高	小批量样品的快速检测	DZ/T 0064.57-2021
	水杨酸分光光度法	0.002~0.10 mg/L	中	低	安全性和环保性要求高的场合	GB/T 34500.5-2017
氮氧化物	盐酸萘乙二胺分光光度法	0.020~2.5 mg/m ³	低	低	固定污染源排放和环境空气中氮氧化物的测定	HJ 479-2009
	Saltzman 法	0.015~2.0 mg/m ³	中	低	测定二氧化氮含量较低的环境空气	GB/T15435-1995
总氮	杜马斯燃烧法	-	高	低	自动化程度高的场合	GB/T 42955-2023
	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	0.20~7.00 mg/L	中	中	测试高总氮量的样品	HJ 636-2012
	气相分子吸收光谱法	-	高	低	检测精度要求高的实验	HJ/T 199-2005
凯氏氮	凯氏定氮法	-	中	高	土壤和肥料检测	GB/T 11891-1989

护航。另外，若该分析仪配备分光光度计，将进一步扩大其应用范围，在能够检测多种氮元素含量的基础上，还可以对磷酸盐、硅酸盐和氯离子等多种成分进行测定。针对不同行业和用户的需求，全自动分析仪将向便携化方向发展，并将提供个性化定制服务，如全自动工业分析仪、全自动锅炉水分析仪、全自动营养盐分析仪等。该项仪器的研发具有广阔的应用市场前景，且有望参与制定行业标准和国家标准。

4. 结论与展望

氮元素与人类社会和生态系统平衡息息相关，氮元素的检测关系着人类社会可持续发展。本文综合评述了硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、氮氧化物、总氮和凯氏氮等氮元素的现行国家标准和行业标准中的检测方法，分析了这些检测方法的优势与局限性。通过比较、分析不同的检测技术以及样品特性和检测需求，针对不同情况提出了推荐采用的检测方法，以确保检测的准确性和高效性。本文旨在为同行业及相关领域的研究工作者、分析人员提供参考和分析，从而提升环境检测、社会生产的效率。基于各种氮元素检测方法的优缺点，提出了针对各种无机氮和各种检测场景的普适性全自动氮化合分析仪的研发方向，该项分析设备的研发和推广将大大提高氮元素检测效率，推动氮检测行业的进步。

参考文献

- [1] Fraser, P., Chilvers, C., Beral, V. and Hill, M.J. (1980) Nitrata and Human Cancer: A Review of the Evidence. *International Journal of Epidemiology*, **9**, 3-12. <https://doi.org/10.1093/ije/9.1.3>

- [2] Cohen, Y., Johnke, J., Abed-Rabbo, A., Pasternak, Z., Chatzinotas, A. and Jurkovich, E. (2024) Unbalanced Predatory Communities and a Lack of Microbial Degraders Characterize the Microbiota of a Highly Sewage-Polluted Eastern-Mediterranean Stream. *FEMS Microbiology Ecology*, **100**, fiae069. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiae069>
- [3] Raza, S., Miao, N., Wang, P., Ju, X., Chen, Z., Zhou, J., et al. (2020) Dramatic Loss of Inorganic Carbon by Nitrogen-Induced Soil Acidification in Chinese Croplands. *Global Change Biology*, **26**, 3738-3751. <https://doi.org/10.1111/gcb.15101>
- [4] Coskun, D., Britto, D.T., Shi, W. and Kronzucker, H.J. (2017) Nitrogen Transformations in Modern Agriculture and the Role of Biological Nitrification Inhibition. *Nature Plants*, **3**, Article No. 17074. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.74>
- [5] Boningari, T. and Smirniotis, P.G. (2016) Impact of Nitrogen Oxides on the Environment and Human Health: Mn-Based Materials for the NO_x Abatement. *Current Opinion in Chemical Engineering*, **13**, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.09.004>
- [6] Chen, R., Zhang, T., Guo, Y., Wang, J., Wei, J. and Yu, Q. (2021) Recent Advances in Simultaneous Removal of SO₂ and NO_x from Exhaust Gases: Removal Process, Mechanism and Kinetics. *Chemical Engineering Journal*, **420**, Article ID: 127588. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127588>
- [7] Stayner, L.T. (2017) Nitrate in Drinking Water and the Risk of Adverse Birth Outcomes. NIH RePORTER.
- [8] Rezvani, F., Sarrafzadeh, M., Ebrahimi, S. and Oh, H. (2017) Nitrate Removal from Drinking Water with a Focus on Biological Methods: A Review. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 1124-1141. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9185-0>
- [9] 杭州市环境保护监测站. GB/T 7480-1987 水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法[S]. 北京: 国家环境保护局, 1987.
- [10] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. DZ/T 0064.59-2021 地下水质分析方法第 59 部分: 硝酸盐的测定紫外分光光度法[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
- [11] 大连市卫生防疫站, 沈阳市卫生防疫站, 哈尔滨市卫生防疫站. GB/T 12374-1990 居住区大气中硝酸盐检验标准方法 镉柱还原-盐酸萘乙二胺分光光度法[S]. 北京: 国家技术监督局, 1990.
- [12] 周聪, 范云, 高丽花. 酚二磺酸标准加入分光光度法分析水样中 NO-3 的研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 1999(3): 234-237.
- [13] 雷赛芬, 郭永斌, 黄八路, 包南艳, 王妙鑫. 分光法测定饮用水中硝酸盐氮的方法比较[J]. 云南化工, 2022, 49(7): 58-61.
- [14] 李颖. 酚二磺酸分光光度法测定硝态氮影响因素研究[J]. 广东化工, 2015, 42(7): 176-178.
- [15] Singh, P., Singh, M.K., Beg, Y.R. and Nishad, G.R. (2019) A Review on Spectroscopic Methods for Determination of Nitrite and Nitrate in Environmental Samples. *Talanta*, **191**, 364-381. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.08.028>
- [16] 陈晨, 韩少强, 赵志强, 祝艳君. 两种测定水中硝酸盐氮分析方法的比较[J]. 天津科技, 2020, 47(8): 16-18.
- [17] 肖靖泽, 赵萍, 魏月仙, 顾爱平, 成耀祖. 五参数全自动营养盐分析仪的研制与应用[J]. 现代科学仪器, 2011(1): 63-65, 68.
- [18] 中海油天津化工研究设计院, 广州市特种承压设备检测研究院, 河南清水源科技股份有限公司, 天津正达科技有限责任公司. HG/T 3516-2011 工业循环冷却水中亚硝酸盐的测定 分子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.33-2016 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 中国环境监测总站. GB/T 13580.5-1992 大气降水中氟、氯、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐的测定 离子色谱法[S]. 北京: 国家环境保护局, 国家技术监督局, 1992.
- [21] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. DZ/T 0064.51-2021 地下水质分析方法第 51 部分: 氯化物、氟化物、溴化物、硝酸盐和硫酸盐的测定离子色谱法[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
- [22] 天津化工研究设计院. HG/T 3526-2003 工业循环冷却水中亚硝酸盐的测定 分光光度法[S]. 北京: 化工出版社, 2004.
- [23] 刘辉, 田亚红, 劳旺梅, 马淑兰, 阚欣荣. 盐酸萘乙二胺比色法测定腌制食品中亚硝酸盐的含量[J]. 中国酿造, 2010(6): 157-160.
- [24] Liu, B., Su, H., Wang, S., Zhang, Z., Liang, Y., Yuan, D., et al. (2016) Automated Determination of Nitrite in Aqueous Samples with an Improved Integrated Flow Loop Analyzer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **237**, 710-714. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.002>
- [25] Ahn, J., Jo, K.H. and Hahn, J.H. (2015) Standard Addition/Absorption Detection Microfluidic System for Salt Error-

- Free Nitrite Determination. *Analytica Chimica Acta*, **886**, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.009>
- [26] Feng, S., Zhang, M., Huang, Y., Yuan, D. and Zhu, Y. (2013) Simultaneous Determination of Nanomolar Nitrite and Nitrate in Seawater Using Reverse Flow Injection Analysis Coupled with a Long Path Length Liquid Waveguide Capillary Cell. *Talanta*, **117**, 456-462. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.09.042>
- [27] Zhang, M., Yuan, D., Huang, Y., Chen, G. and Zhang, Z. (2010) Sequential Injection Spectrophotometric Determination of Nanomolar Nitrite in Seawater by On-Line Preconcentration with HLB Cartridge. *Acta Oceanologica Sinica*, **29**, 100-107. <https://doi.org/10.1007/s13131-010-0012-4>
- [28] Cheng, C., Kuo, Y., Chen, J., Wei, G. and Lin, Y. (2021) Probabilistic Risk and Benefit Assessment of Nitrates and Nitrites by Integrating Total Diet Study-Based Exogenous Dietary Exposure with Endogenous Nitrite Formation Using Toxicokinetic Modeling. *Environment International*, **157**, Article ID: 106807. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106807>
- [29] Siu, D.C. and Henshall, A. (1998) Ion Chromatographic Determination of Nitrate and Nitrite in Meat Products. *Journal of Chromatography A*, **804**, 157-160. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(97\)01245-4](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(97)01245-4)
- [30] Chiesa, L., Arioli, F., Pavlovic, R., Villa, R. and Panseri, S. (2019) Detection of Nitrate and Nitrite in Different Seafood. *Food Chemistry*, **288**, 361-367. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.125>
- [31] Chen, Z., Qiu, S., Li, M., Zhou, D. and Ge, S. (2022) Instant Inhibition and Subsequent Self-Adaptation of *Chlorella* sp. toward Free Ammonia Shock in Wastewater: Physiological and Genetic Responses. *Environmental Science & Technology*, **56**, 9641-9650. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08001>
- [32] 中国地质科学院水文地质环境地质研究所. DZ/T 0064.57-2021 地下水质分析方法第 57 部分: 氨氮的测定纳氏试剂分光光度法[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
- [33] 沈阳市环境监测中心站. HJ 535-2009 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [34] 包头稀土研究院, 虞东稀土集团股份有限公司, 国标检验认证有限公司, 赣州晨光稀土新材料股份有限公司, 赣州有色冶金研究所, 钢研纳克检测技术有限公司, 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 天津包钢稀土研究院有限责任公司. GB/T 34500.5-2017 稀土废渣、废水化学分析方法 第 5 部分: 氨氮量的测定[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.
- [35] 王文雷. 纳氏试剂比色法测定水体中氨氮影响因素的探讨[J]. 中国环境监测, 2009, 25(1): 29-32.
- [36] 王婷, 曹磊, 薛明霞. 纳氏试剂分光光度法测定氨氮中常见问题与解决办法[J]. 分析试验室, 2008, 27(S2): 346-349.
- [37] 陆佩莉, 吴慧庆. 全自动间断化学分析仪-纳氏试剂比色法测定地表水中氨氮[J]. 理化检验(化学分册), 2013(49): 931-933.
- [38] Bowes, M.J., Smith, J.T. and Neal, C. (2009) The Value of High-Resolution Nutrient Monitoring: A Case Study of the River Frome, Dorset, UK. *Journal of Hydrology*, **378**, 82-96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.015>
- [39] 陈婉, 颜彭莉. 监测有“谱”“育”见未来[J]. 环境经济, 2018(24): 36-39.
- [40] 尹洧. 现代分析技术在水质氨氮监测中的应用[J]. 中国无机分析化学, 2013, 3(2): 1-5.
- [41] Huang, Y., Su, R., Bu, Y. and Ma, B. (2023) A Predictive Model for Determining the Nitrite Concentration in the Effluent of an Anammox Reactor Using Ensemble Regression Tree Algorithm. *Chemosphere*, **339**, Article ID: 139553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139553>
- [42] Chen, Q., Chen, J., Andersen, M.N. and Cheng, X. (2022) Elevational Shifts in Foliar-Soil $\delta^{15}\text{N}$ in the Hengduan Mountains and Different Potential Mechanisms. *Global Change Biology*, **28**, 5480-5491. <https://doi.org/10.1111/gcb.16306>
- [43] 马芮, 刘嘉骥, 刘永. 水杨酸法检测水质氨氮的改进方法[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 160-164.
- [44] Anenberg, S.C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D.K., Lacey, F., et al. (2017) Impacts and Mitigation of Excess Diesel-Related NOx Emissions in 11 Major Vehicle Markets. *Nature*, **545**, 467-471. <https://doi.org/10.1038/nature22086>
- [45] 沈阳市环境监测中心站. HJ 479-2009 环境空气 氮氧化物(一氧化氮和二氧化氮)的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [46] 上海市环境监测中心. HJ/T 43-1999 固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [47] 中华人民共和国卫生部. GB/T 12372-1990 居住区大气中二氧化氮检验标准方法 改进的 Saltzman 法[S]. 北京: 中国预防医学科学院环境卫生监测所, 1990.
- [48] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB/T 15436-1995 环境空气 氮氧化物的测定 Saltzman 法[S]. 沈阳: 沈阳市环境监测中心站, 1995.
- [49] 彭雷. 盐酸萘乙二胺分光光度法测定大气中二氧化氮的浓度[J]. 化学工程师, 2011, 25(4): 31-32.

- [50] 韩国萍, 戴永生. 盐酸萘乙二胺分光光度法测定大气中二氧化氮浓度[J]. 环境与发展, 2018, 30(4): 127-128.
- [51] 王玉平, 陈涛, 杜萍萍, 王娟. NO→NO₂-氧化管氧化效率的研究——改进的 Saltzman 法[J]. 中国环境监测, 1994(2): 20-23.
- [52] 王玉平, 李晶, 杜萍萍, 王娟, 陈涛. Saltzman 法和改进的 Saltzman 法比较[J]. 环境保护科学, 1995(2): 36-38.
- [53] 四川省化工质量安全检测研究院, 上海化工院检测有限公司, 深圳市芭田生态工程股份有限公司, 山东省产品质量检验研究院, 重庆建峰化工股份有限公司. GB/T 42955-2023 肥料中总氮含量的测定 杜马斯燃烧法[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2023.
- [54] 大连市环境监测中心, 天津市环境监测中心, 辽宁省环境监测实验中心, 沈阳市环境监测中心站, 鞍山市环境监测中心站, 锦州市环境监测中心站和营口市环境监测中心站. HJ 636-2012 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2012.
- [55] 上海宝钢工业检测公司环境监测站. HJ/T 199-2005 水质 总氮的测气相分子吸收光谱法[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2005.
- [56] 贾斌, 尚丽君, 潘洁, 孙红梅, 王颖, 原二玎. 杜马斯燃烧法与凯氏定氮法在肥料总氮测定中的比较[J]. 河南农业科学, 2024, 53(2): 85-91.
- [57] 秦琳, 黄世群, 仲伶俐, 周虹, 赵珊, 向冰, 雷绍荣. 杜马斯燃烧法和凯氏定氮法在土壤全氮检测中的比较研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 258-265.
- [58] Liu, W.J., Zeng, F.X. and Jiang, H. (2013) Determination of Total Nitrogen in Solid Samples by Two-Step Digestion-Ultraviolet Spectrophotometry Method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **44**, 1080-1091. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.750330>
- [59] 胡雪峰, 沈铭能, 许世远. 碱性过硫酸钾氧化——紫外分光光度法测水体总氮[J]. 环境污染与防治, 2002(1): 40-41.
- [60] 莫怡玉, 茅丽秋, 吴卓智. 碱性过硫酸钾氧化——气相分子吸收光谱法测定水中总氮[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(4): 47-49.
- [61] 贾岳清, 周昊, 殷惠民, 张烃, 杨勇杰. 水中总氮测定方法的研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(2): 1-5.
- [62] 文秋红, 李丹凤, 田望舒, 李竑铖, 李叶, 刘占. 地表水的氮磷污染及其检测方法研究[J]. 绿色科技, 2015(6): 255-257.
- [63] 杭州市环境保护监测站. GB/T 11891-1989 水质 凯氏氮的测定[S]. 北京: 国家技术监督局, 1989.
- [64] Sáez-Plaza, P., Michałowski, T., Navas, M.J., Asuero, A.G. and Wybraniec, S. (2013) An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part I. Early History, Chemistry of the Procedure, and Titrimetric Finish. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, **43**, 178-223. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751786>
- [65] Marcó, A., Rubio, R., Compano, R. and Casals, I. (2002) Comparison of the Kjeldahl Method and a Combustion Method for Total Nitrogen Determination in Animal Feed. *Talanta*, **57**, 1019-1026. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(02\)00136-4](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(02)00136-4)