

含氮污染物检测的研究进展

董怡君

山东寿光检测集团有限公司检测室, 山东 寿光

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月23日

摘要

含氮污染物的过度排放是一个日益严重的问题, 影响着环境、公共健康和生态系统的功能。含氮污染物的检测和管理是保护环境和人类健康的重要措施, 也是当今社会面临的重要任务。为了系统地研究含氮污染物检测, 本文综述了含氮污染物的种类、来源、影响、监测与检测方法, 并对其未来的发展趋势进行了合理的展望。随着科技的进步和管理措施的改善, 采用先进的检测技术和方法, 结合有效的管理与政策, 可以有效降低氮污染物对环境和人类健康的影响。相信在未来, 我们有望更好地控制氮污染的发生, 从而维护生态平衡和可持续发展。

关键词

污染物检测, 分析检测方法, 含氮化合物检测, 环境检测

Research Progress in the Detection of Nitrogen-Containing Pollutants

Yijun Dong

Detection Laboratory, Shandong Shouguang Testing Group Co., Ltd., Shouguang Shandong

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

Excessive emissions of nitrogen-containing pollutants are a growing problem affecting the environment, public health and ecosystem functioning. The detection and management of nitrogen-containing pollutants is an important measure for the protection of the environment and human health, as well as an important task facing society today. In order to systematically study the detection of nitrogen-containing pollutants, this review summarizes the types, sources, effects, monitoring and detection methods of nitrogen-containing pollutants, and provides a reasonable outlook on their future development trends. With the advancement of science and technology and the improvement

of management measures, the use of advanced detection technologies and methods, combined with effective management and policies, can effectively reduce the impact of nitrogen pollutants on the environment and human health. It is believed that in the future, we are expected to better control the occurrence of nitrogen pollution, thereby maintaining ecological balance and sustainable development.

Keywords

Pollutant Detection, Analytical Detection Methods, Detection of Nitrogen Compounds, Environmental Detection

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

随着科学技术水平的大幅提升,我国正走在经济高速发展的快车道。同时,经济和科技高速发展的背后,也存在着诸多环境问题。在此背景下,我国深入贯彻可持续发展理念,注重生态环境保护,追求人与自然和谐相处。在众多的污染源中,氮含量污染物的来源广泛,包括工业排放、化石燃料燃烧、汽车尾气排放、农业活动等,且它们的存在形式多样,能够通过空气、水和土壤等多种途径进入环境中,对生态系统和人类健康产生不利影响。因此,含氮污染物的分析和检测是环境科学领域的重要研究课题。在此背景下,本文围绕含氮污染物的检测,系统总结了目前含氮污染物的来源、分类、分析检测方法和存在的问题与挑战等,希望对后续的相关研究起到一定的积极作用。

2. 含氮污染物的种类、来源及影响

2.1. 含氮污染物的种类

含氮污染物广义是指在自然环境中存在的、以氮元素为主要成分的污染物,主要以化合物的形式存在。含氮污染物在自然界的存在形式多样,广泛分布于大气、土壤和是水体中[1]。生态系统的氮循环涉及多个渠道,具体见图1所示。

从化学组成的角度,含氮污染物主要包括氮氧化物、氨、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、氮化合物的硫酸盐和碳化物等。氮氧化物主要为气体污染物,以一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO₂)为主,NO在大气中容易被氧化生成NO₂。氮氧化物可通过呼吸、皮肤和消化道进入人体,能够损害人体的免疫系统和神经中枢[3]。氨的存在形式包括气态和液态,由于其水溶性和挥发性较好且气味刺鼻,很容易被察觉。低浓度氨对人体的组织黏膜有刺激作用,高浓度氨会导致人体的组织发生病变[4]。同时,氨分子(NH₃)在大气中能够与其他污染物反应,形成细颗粒物,进而造成环境空气质量下降。硝酸盐和亚硝酸盐都是氮的氧化态化合物,在水溶液中具有良好的溶解度,常见于土壤和水体中。地表水中的硝酸盐的过量积累会导致水体富营养化,造成藻类的腐烂和鱼类死亡,损害水生生态系统[5]。亚硝酸盐是一种致癌物,会毒害人体的血红蛋白,对胎儿有致畸作用。水体中的亚硝酸盐和蛋白质结合会形成强致癌物亚硝胺,严重危害人体健康[6]。铵盐是氮的还原态化合物,它的过量存在会造成水体中溶解氧浓度降低,导致水体发黑发臭,威胁水生动植物的生存。氮化合物的硫酸盐和碳化物是氮污染物的伴生物质,常常与氮污染物共存,对生态系统造成了诸多不利影响。

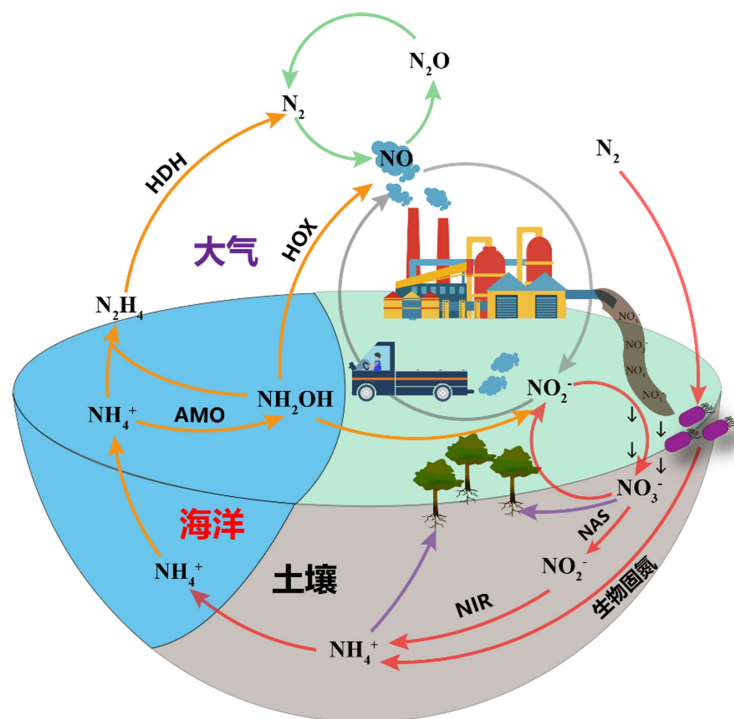


Figure 1. Schematic diagram of the nitrogen cycle system [2]

图 1. 氮循环系统示意图[2]

从物理性质的角度, 含氮污染物主要包括气体污染物、固体颗粒物和可溶性污染物。气体污染物主要是以气体形式存在大气中, 包括 NO 、 NO_2 、 NH_3 和其他氮氧化物等。固体颗粒物是由氮化合物在大气中发生化学反应形成的, 其主要是细颗粒物(以 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 为主)。这些固体颗粒物对人体健康和环境质量产生了严重威胁[7]。可溶性污染物以硝酸盐和铵盐为主, 主要存在于自然界的水体中, 其过量存在会对水生生态系统造成负面影响, 进而影响生态平衡。

2.2. 含氮污染物的来源

含氮污染物的来源涉及农业、工业、交通运输、人类活动以及自然过程等多个方面, 与人类日常的生活和生产密不可分。如图 2 所示, 其主要来源可分为自然来源和人为来源两大类。

自然来源是指生态系统运行过程中, 自然界自发产生的氮污染, 其中主要包括生物降解过程、火山喷发、自然的氮循环过程[8]。自然界中微生物和植物能够将大气中的氮固定为氮化合物。但在某些情况下会导致氮过剩, 从而形成氮污染[9]。自然降水过程中的氮沉降能够让大气中的氮氧化物沉降到土壤和水体中, 在空气质量较差的情况下会造成水体和土壤的氮污染。火山喷发和闪电等剧烈过程会形成有毒的氮氧化物进入大气层, 频繁的剧烈反应会破坏生态系统平衡[10]。

人为来源是含氮污染物的最主要来源。人为来源可具体分为农业活动、工业排放、交通运输、家庭和商业活动等。1) 农业活动是氮污染的主要来源之一。农民过量施用含氮化肥会导致氮的流失, 进入水体造成水体富营养化和其他生态问题。同时, 动物粪便中的氮在降雨或灌溉后被冲刷到周围的土壤和水体中, 能够形成氮污染[11]。2) 工业排放是含氮污染物产生的重要源头之一。传统化石燃烧过程会不可避免释放出有毒的氮氧化物, 并且这些气体在大气中可转化为其他氮污染物, 对大气环境造成危害。发电、化学制造、石化行业和其他工业设施, 也会排放含有氮氧化物的废气, 对周围环境造成影响[12]。3) 交通运输业在消耗化石能源过程中会释放氮氧化物。航空和船舶在运营过程中排放氮污染物, 尤其是在

靠近海岸和经济发达的区域,影响更为显著[13]。4) 家庭和商业活动,包括家庭取暖和废弃物管理,会释放氮氧化物,尤其是在缺乏有效处理措施的情况下[14]。

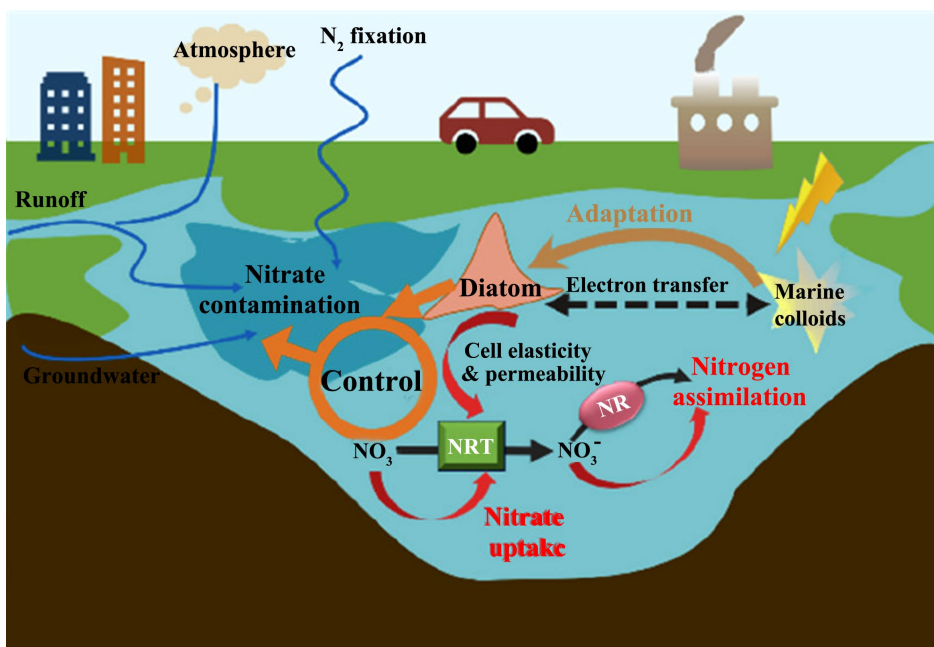


Figure 2. Schematic of the nitrogenous pollutant sources [15]

图 2. 含氮污染物来源示意图[15]

2.3. 含氮污染物的影响

含氮污染物的大量产生和排放会对生态系统、人类健康和环境经济产生不良影响。

含氮污染物对生态系统的影响:主要体现在植物生长、土壤环境受损、水体富营养化和生物多样性减弱等[16]。1) 对植物生长影响:氮氧化物在短期内对植物的毒性较强,可导致植物生长抑制。2) 土壤环境受损:过量的氮源进入土壤中会造成土壤酸碱平衡失调,进而导致土壤营养流失。3) 水体富营养化:氮的过量释放会导致水体富营养化,引发藻类爆发式繁殖。4) 生物多样性:含氮污染物的过量输入会导致某些氮喜好植物的过度生长,而抑制其他植物的生长,从而减少生物多样性。

含氮污染物对人类健康的影响:含氮污染物主要通过空气和水源来进入人体,影响人类的健康[17]。

1) 空气污染影响:氮氧化物的积累会致空气质量下降,可能引发许多呼吸系统疾病,例如哮喘、慢性支气管炎等。2) 饮用水安全影响:氮污染物的过量排放会在生态系统循环过程中,造成水源的污染,严重威胁人类健康。

含氮污染物对环境经济的影响:含氮污染物不仅影响生态和人类健康,还间接对经济产生负面影响[18]。氮污染导致的土壤质量下降和水体富营养化会影响农作物的产量,从而影响农业经济收益。此外,由于氮污染导致的健康问题增加,社会整体医疗费用也随之上升,带来了额外的经济负担。

3. 含氮污染物的分析检测方法

在环境监测和污染物分析中,氮含污染物的检测是一个重要的研究领域。为了有效地监测和控制这些污染物,科学家们采用了多种检测方法。目前主流的检测方法主要分为传统检测方法和现代检测技术,以下是对这两类方法的详细介绍。

1) 传统检测方法中最常见的主要包括比色法和气相色谱法

a) 比色法是一种基于光的吸收特性来测定物质浓度的分析方法。该方法广泛应用于含氮污染物的检测,特别是氨含量的测定[19]。比色法通常采用贝尔-朗伯定律,其基本原理是利用待测物质与某些试剂反应生成有色化合物,通过测量光的吸收度来计算其浓度[20]。在进行溶液中氨含量的分析中,张等人利用比色法进行了定量分析。具体而言,将1 mL待测溶液加入1 mL的1.0 M氢氧化钠溶液,其中含有水杨酸(5wt%),柠檬酸钠(5wt%),随后加入0.5 mL的0.05 M次氯酸钠溶液和0.1 mL亚硝基铁氰化钠。静置两小时后,待测溶液会发生明显颜色反应,随后利用紫外分光光度仪来进行测试。待测溶液在波长为655 nm处产生明显吸收峰,证明待测溶液中有氨的存在。由于光的吸收度和浓度成正比,通过标线测定,可计算出待测溶液的氨浓度[21]。上述方法也被其他研究者们借鉴,用于相关氨含量分析[22]-[24]。除了氨的测定外,尿素测定也可采取比色法。具体而言,将10 mL浓磷酸与30 mL浓硫酸和60 mL蒸馏水混合,随后将10 mg FeCl_3 溶解于上述溶液中,得到混合溶液1。然后,将0.5 g 二乙酰一元肟和10 mg 硫代氨基脲溶解于蒸馏水中,稀释至100 mL,得到混合溶液2。在1 mL待测溶液中加入2 mL的混合溶液1和1 mL的混合溶液2。然后,将混合溶液加热至100℃,并在此温度下保持15 min。当溶液冷却至25℃时,收集波长为525 nm处的紫外-可见吸收光谱。利用吸收峰强度即可测算出尿素含量[25]。上述尿素测定方法也被应用于其他研究中[26][27]。相关氨和尿素的测定标线和紫外吸收曲线见图3。比色法的优点非常明显,其操作简单、成本低,适合大规模样品的快速筛查。同时该方法对设备要求低,只需比色计即可完成检测。但此方法也存在明显缺点,例如对复杂基质可能会出现干扰,导致测定结果不准确。并且高浓度样品中需要稀释处理,增加了操作的复杂性并降低了结果准确性。

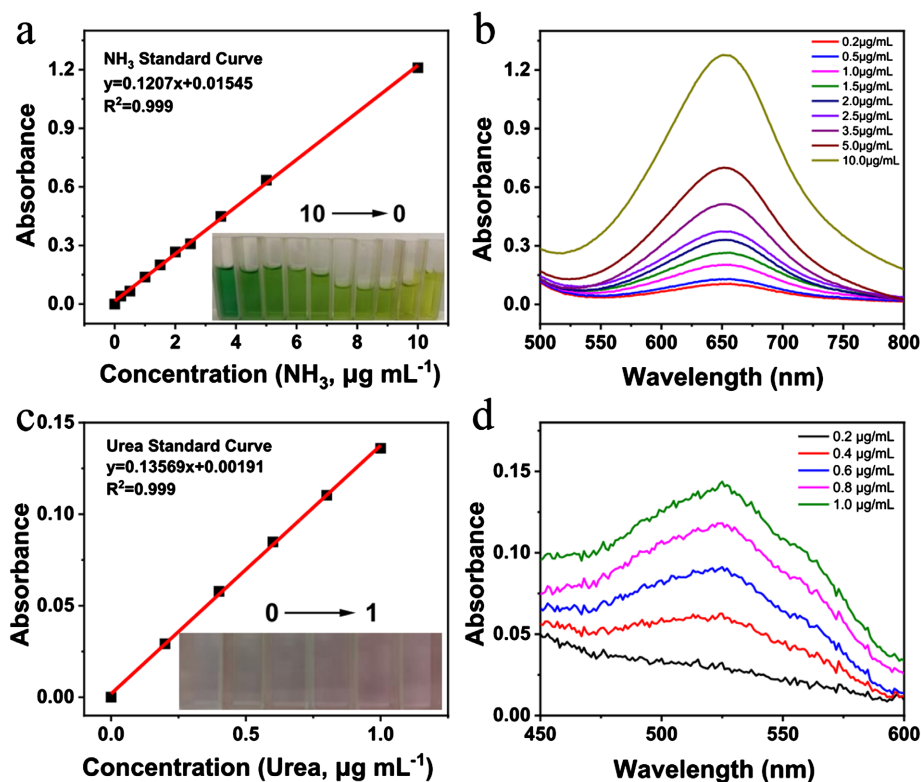


Figure 3. The lines (a) and (b) correspond to the ultraviolet absorption spectra for the colorimetric determination of ammonia; the lines (c) and (d) correspond to the ultraviolet absorption spectra for the colorimetric determination of urea [25]

图 3. 比色法测定氨的(a)标线和(b)对应紫外吸收光谱图; 比色法测定尿素的(c)标线和(d)对应紫外吸收光谱图[25]

b) 气相色谱法是一种高效的分离和分析气体或挥发性液体的技术。该方法在检测氮含污染物方面具有很高的灵敏度和选择性，可以用于测定空气和水中氮氧化物、氨等污染物的浓度。其原理是通过将样品气体与惰性载气(氢气或氮气)混合，经过色谱柱进行分离[28]-[30]。不同成分在色谱柱中的保留时间不同，最终通过相关的检测器进行定性和定量分析[31]。有机胺类化合物是重要的含氮污染物之一，主要来源于工业废水排放，对人类健康有严重的威胁，被国家列入环境污染的重点监测对象。利用气相色谱可对有机胺进行准确检测。对环境水样进行采样后，利用抽滤过滤出水体中的不可溶组分，随后对其进行气相色谱检测。具体来说，取 500 mL 待测液，用氢氧化钠溶液将其 pH 值调至 11~12，随后加入 5 g 氯化钠，用 50 mL 二氯甲烷萃取至少两次，之后用无水硫酸钠过滤脱水。于 35℃氮吹 0.2 mL 左右，用甲醇定容至 1 mL，进行气相色谱分析[32]。气相色谱进样温度为 200℃，载气速度为 1 mL/min，氮磷检测器温度为 260℃，氢气速度为 4 mL/min，空气速度为 85 mL/min，尾吹气 25 mL/min。苯胺类化合物具有较强的极性，可选择通用型色谱柱 DB-5 (非极性，其固定相为 5%二苯基-95%二甲基聚硅氧烷)。工业废水中的有机氮污染物主要包括环己胺和苯胺，其保留时间分别为 3.67 和 4.66 min [33]。除环境水样外，一些农作物食品中的有机氮农药残留检测也可用气相色谱分析。以面粉和大米为例，利用丙酮/二氯甲烷混合液对其表面有机氮进行萃取，随后利用旋转蒸发将萃取液浓缩，再用氮气流吹至近干，用筒型漏斗过无水硫酸钠，随后用丙酮定容至 5 mL，待测。色谱柱为装有 DB-5 石英弹性毛细管柱。采用程序升温：初始 100℃，保持 2 min，20℃/min 升至 170℃，保持 1 min，10℃/min 升至 260℃，保持 15.5 min。进样口温度 260℃，检测器温度为 280℃。载气为氮气(4.8 mL/min)，补偿流为氮气(5.0 mL/min)，氢气(2.5 mL/min)，空气(60 mL/min)，并保持恒压状态[34]。相关有机氮的保留时间见表 1。该方法的优点非常明显，其分离效率高，能够处理复杂样品，检测灵敏度高，适合低浓度污染物的分析[35]-[38]。但是其对设备要求高，成本相对较大，维护复杂。并且对样品前处理工序繁琐，需要查阅相关专业知识。

传统检测方法在氮含污染物的分析中发挥了重要作用。比色法以其操作简单和快速反应的特点，适合于现场快速检测和大规模筛查，而气相色谱法则凭借其高效的分离能力和高灵敏度，适合于实验室精确分析。虽然每种方法都有其优势和局限性，但它们的结合使用可以为环境监测提供更全面的解决方案。

Table 1. Retention times and minimum detection limits for nitrogen-containing pesticides
表 1. 含氮农药保留时间和最小检出限

含氮农药名称	保留时间(min)	最小检出浓度(mg/kg)
甲胺磷	8.67	0.01
乙酰甲胺磷	7.45	0.02
水胺硫磷	18.32	0.005
呋喃丹	14.95	0.02
乐果	15.12	0.001
氧化乐果	13.55	0.004

2) 随着对环境科学领域研究的逐渐深入，含氮污染物的检测技术迅速发展，研究者在传统检测方法的基础上又发展了许多新兴技术，被称为现代检测方法。其中，使用广泛的技术主要包括质谱和高效液相色谱法，这些现代检测技术为氮污染物的定量分析提供了强有力的工具。

a) 质谱法是一种基于质荷比的分析技术，能够对化合物进行定性和定量分析[39]。其工作原理主要包括样品的电离、离子的分离以及离子的检测[40]。样品在质谱仪中被电离，常用的电离方式包括电子轰

击、化学电离和电喷雾电离等[41]。电喷雾电离尤其适用于分析极性较强的氮含量污染物，如氨、胺类化合物等[42]。电离后的离子会根据其质荷比在质量分析器中进行分离。常用的质量分析器有四极杆、飞行时间和离子阱等[43]。分离后的离子通过检测器进行检测，生成质谱图，分析其峰的强度和位置，从而确定样品中的成分及其浓度[44]。质谱技术的优势在于其高灵敏度和高分辨率，能够检测到非常低浓度的氮污染物。但是由于其精密度较高，其对检测物的纯度要求比较苛刻，对于复杂组分的分析难度较大，因此大多采用联用技术进行分析[45]-[48]。

b) 高效液相色谱法是一种用于分离和分析混合物中各组分的技术。其原理是基于不同化合物在固定相和流动相中的分配行为[49]。在高效液相色谱分析过程中，样品通过流动相(通常是液体)流经填充有固定相的色谱柱。不同的氮污染物在固定相中的亲和力不同，从而导致它们在柱中的滞留时间不同。样品中的各成分在流动相的推动下，通过色谱柱时，因其与固定相的相互作用强弱不同，导致分离[50]。通常，极性较强的化合物滞留时间长，非极性化合物滞留时间短[51]。分离后的化合物通过检测器(如紫外检测器、荧光检测器等)进行检测。在对生物样品进行有机胺的测定时，高效液相色谱可展现出优异的灵敏度。例如，在对液态奶及奶粉中双氰胺、三聚氰胺、尿素和缩二脲进行检测时，可选择乙腈与水作流动相，二极管阵列检测器检测。在该体系下，上述组分保留时间适中，分离完全，线性良好[52]。该技术的优点在于其操作简单、适用范围广、分离效率高，非常适合用于复杂样品中氮污染物的分析[53]。

近年来，质谱与液相色谱的联用技术可以充分发挥两者的优势，尤其在氮污染物的检测中，表现出极高的灵敏度和选择性[54]-[56]。质谱与液相色谱联用技术使得样品前处理和分析过程更加高效。样品首先经过高效液相色谱进行前处理分离，减少了基质干扰，有助于提高后续质谱分析的准确性。随后通过质谱的高分辨率，可以对复杂的氮污染物进行详细的结构分析，帮助研究人员更好地理解其化学性质和环境影响。该联用技术能够实现在线分析，使得整个过程快速高效，适合于环境监测和食品安全等领域[57]-[60]。对于常见的氮污染物氨的检测，传统比色法灵敏度较低。液质联用技术能够实现对水体中氨浓度的快速检测，灵敏度可达到纳克级别[61]。在食品安全检测中，液质联用技术能够在复杂基质中快速检测氮含量，确保食品的安全性。在药物和环境样品中，氮杂环化合物的检测也得益于液质联用技术[62]。通过优化色谱条件和质谱参数，研究人员能够高效分离并定量这些污染物。例如，利用液质联用技术测定生咖啡中草甘膦和氨甲基膦酸残留。具体而言，将生咖啡粉末样品室温下经水超声提取，二氯甲烷萃取部分脂溶性组分，上清液通过萃取和净化后，发生衍生化反应，随后利用液相色谱-串联质谱仪在正离子模式下扫描分析草甘膦和氨甲基膦酸衍生产物，并内标法定量[63]。现代检测技术为氮含量污染物的检测提供了强有力的支持，不同检测技术的优势和不足见表2。这些技术的结合，不仅提高了检测的灵敏度和准确性，也为环境保护和食品安全提供了可靠的数据支持。

Table 2. Summary of advantages and disadvantages of various detection methods
表 2. 各种检测方法优势和不足总结

方法	优势	不足
比色法	操作简单、成本低、适合大规模快速筛查	准确度有限、易受杂质影响、高浓度定量不准确
气相色谱法	分离效率高、适用复杂样品，灵敏度高	工艺繁琐、对设备要求高、对理论知识要求高
液相色谱法	操作简单、适用范围广、分离效率高	过程复杂、对设备要求高、对理论知识要求高
质谱法	高灵敏度、高分辨率	对样品纯度要求高、不适用复杂组分分析
气质/液质联用技术	结合两者共同优势	/

4. 含氮污染物的实时监测方法

4.1. 传感器技术

在环境的实时监测中，主要依赖于传感器技术，特别是在监测氮含量污染物方面。传感器是能够感知特定环境信息并将其转化为可处理信号的设备，在环境监测中发挥着重要作用[64]-[68]。他们能够实时检测气体、颗粒物和其他污染物的浓度。特别是针对氮氧化物和氨等常见的含氮污染物，传感器技术为其实时检测提供了有效的解决方案。

4.2. 常用传感器简介

1)氮氧化物传感器能够在极低浓度(如 ppb 级别)下检测氮氧化物，可用于城市空气质量监测和健康影响评估。该传感器能够实时监测交通和工业活动对城市空气质量的影响，也可以用于评估氮氧化物对公众健康的潜在危害，尤其是对呼吸系统的影响。并且，氮氧化物传感器通常使用金属氧化物半导体技术，这种技术在室温下也能高效工作，适合长期环境监测[69]-[71]。目前，氮氧化物传感器发展正处于扩展阶段传感器种类繁多，原理与方法的研究较为成熟，新兴的材料和技术层出不穷。相对成熟的气敏材料通过掺杂、结构调控和表面功能化等策略，增强了材料稳定性，优化了选择性与灵敏度[72]-[74]。相关氮氧化物传感器的类型见表 3 [75]-[82]。

Table 3. Summary of nitrogen oxide sensors
表 3. 氮氧化物传感器总结

类型	传感机制	实例
半导体氧化物阻抗型	当金属氧化物薄膜在空气中加热时，氧气被吸附在金属氧化物表面并形成离子物质，从导带获得电子。	In ₂ O ₃ 、TiO ₂ 、ZnO、SnO ₂ 、WO ₃ 、MoS ₂
固体电解质型传感器	据气体监测所产生的响应信号差异，具体分为电流型、混合位型和阻抗型。	MoO ₃ -In ₂ O ₃ 、CoTa ₂ O ₆ 、NiFe ₂ O ₄ 、In ₂ O ₃ 、LaFeO ₃ 、Ag/石墨烯

2) 氨氮传感器专门设计用于实时监测环境样本中氨的浓度。该传感器可应用于空气质量监测、农业和工业领域。具体而言，氨氮传感器能够监测空气中的氨浓度，评估空气质量和污染水平；能够监测在施肥过程中氨的释放，以优化施肥策略，减少环境影响；还可以用于确保工业排放符合环保标准，减少氨的排放[83]-[85]。氨氮传感器的工作原理通常基于电化学分析或金属氧化物传感器技术，这些技术能够提供高灵敏度和实时监测能力[86]。现阶段，被作为氨氮敏感材料的纳米材料主要包括贵金属、导电聚合物、金属氧化物和碳材料等[87]-[90]。不同的敏感材料的研究进展和特点见表 4。

Table 4. Summary of ammonia sensitive materials
表 4. 氨氮敏感材料总结

类型	传感机制	实例
贵金属	利用贵金属对氨的电催化氧化过程进行氨氮检测。	SiO ₂ @rGO/Ir
导电聚合物	NH ₃ 可以夺走导电聚合物上 H ⁺ ，形成 NH ₄ ⁺ ，造成其导电能力变化。	聚苯胺、聚吡咯
金属氧化物	溶液中的 NH ₄ OH 可作为给电子体，使因氧的吸附而失去电子的金属氧化物得到电子而减小电阻，最终通过电流的增大检测出氨氮的浓度。	CuO/ZnO
碳材料	多与上述三种材料复合进行氨氮检测。	碳纳米管、石墨烯基材料

4.3. 传感器技术的优势

在环境的实时监测中，传感器技术展现出了独特的优势，包括实时监测、高灵敏度和选择性、便携性和易用性等[91]-[95]。1) 实时监测：传感器能够提供实时数据，帮助快速响应环境变化。2) 高灵敏度和选择性：现代传感器能够在复杂的环境中精确检测特定的氮含量污染物。3) 便携性和易用性：许多传感器设计为便携式，便于现场使用和数据采集。

5. 含氮污染物的监测技术未来发展趋势

随着科学技术的不断发展，未来在氮污染物检测领域将会不断涌现新的检测技术。未来的研究将更加注重提高检测的准确性和效率，同时降低成本，以应对日益严峻的环境污染问题。同时，未来的发展趋势可以归结成几方面，具体见图4。



Figure 4. Future trends in detection technologies for nitrogen-containing pollutants
图 4. 含氮污染物监测技术未来发展趋势

5.1. 自动化和智能化

自动化样品处理和智能数据分析将成为未来检测技术的重要趋势，提高工作效率和准确性。随着物联网技术的快速发展，未来的多组分检测设备将更加智能化和自动化。这种智能传感器能够实时监测环境变化，并自动调整检测参数，提高检测的灵活性和适应性。通过与云计算和大数据平台的结合，能够实现数据的远程监控和分析，为环境保护提供实时数据支持。

5.2. 现场检测

随着科技的进步，现场即时检测将是含氮污染物检测追逐的方向。现场取样后，利用便携式仪器进行快速分析，当场出检测结果，以便快速采取应对措施。未来便携式质谱仪和液相色谱仪的开发将使得现场快速检测成为可能，尤其是在环境监测和应急响应中。

5.3. 多组分检测

未来技术将能够同时检测多种氮污染物，提高检测的综合性和效率。多组分检测技术的应用领域不

断扩展,除了传统的环境监测外,还逐渐向农业、食品安全、工业过程监控等领域渗透。集成化传感器平台的研究正在蓬勃发展,这些平台可以在同一设备上集成多个传感器,进行氮污染物的实时监测。这种集成化设计能够有效减少设备体积,提高便携性和应用灵活性。此外,集成化传感器平台还具有更高的稳定性和耐用性,能够在恶劣的环境条件下正常工作。

5.4. 跨学科合作

多组分检测技术的发展需要化学、材料科学、环境科学和数据科学等多个学科的共同合作。通过跨学科的研究,可以推动新材料的开发和新技术的应用。这种合作不仅能够加速技术的进步,还能够促进不同领域之间的知识交流,推动整体科学技术的发展。

5.5. 标准化与规范化

为了提高多组分检测技术的可靠性,未来需要建立更加完善的标准化和规范化体系。这将有助于确保不同检测设备之间的数据一致性,并提升检测结果的可比性。制定相关行业标准,将推动多组分检测技术的广泛应用和市场化进程。

氮污染物的多组分检测技术正朝着智能化、集成化和自动化的方向发展,随着传感器技术、数据处理方法和应用领域的不断扩展,未来的环境监测将更加高效和全面。通过跨学科的合作和标准化的推进,这一领域有望实现更大的突破,为环境保护和可持续发展作出贡献。

6. 总结与展望

氮污染是一个日益严重的环境问题,其治理需要政策的引导和公众意识的提升。含氮污染物的检测和监测技术正在快速发展,新的传感器和综合监测技术的出现将会为改善环境质量提供有力的支持。随着科学研究的深入和技术的不断创新,未来含氮污染物的监测将更加精确和高效。

参考文献

- [1] 陶英. 太阳能驱动含氮污染物资源化研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [2] 刘立明, 许雪晨, 郭亮. 微生物利用无机氮生产有机氮[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 33-43.
- [3] 窦妍. 大气臭氧和二氧化氮长期暴露与中国人群众冠心病发病及死亡风险的前瞻性队列研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京协和医学院, 2024.
- [4] 王蓉. 漏氨对循环水系统的危害及应对措施[J]. 化工管理, 2015(29): 104-105.
- [5] 覃昆飞. 生活饮用水中“三氮”(氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮)的来源、危害及控制[N]. 山西科技报, 2024-04-02(A05).
- [6] 路庆鹏, 金雪霞, 卢萍. 养殖水体中亚硝酸盐的来源、危害和控制[J]. 科学养鱼, 2020(8): 87.
- [7] 杨培刚. 大气中氮氧化物的危害因素及其防治措施[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(15): 38-39.
- [8] 许邴. 氮循环微生物相对平衡状态对环境变化的响应模式和机制[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- [9] 杨玉婷. 水体氮浓度对浮萍及其附生固氮菌相互作用的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2022.
- [10] 鞠晓雨. 中国地区闪电活动与对流层 NO_2 的相关性研究及 LNO_x 的估算[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [11] 王慧勇. 典型农业小流域氮污染时空分布特征及其削减[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- [12] 韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江. 我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 755-767.
- [13] 王国强, 黄国栋, 王波. 城市交通干线附近二氧化氮污染研究[J]. 资源节约与环保, 2018(11): 98+100.
- [14] 孙婷婷, 涂耀仁, 罗鹏程, 等. 城市水体氮污染类型及同位素溯源研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),

- 2023, 52(1): 146-154.
- [15] Kang, W., Yu, F., Wang, S. and Hu, X. (2022) Marine Colloids Promote the Adaptation of Diatoms to Nitrate Contamination by Directional Electron Transfer. *Environmental Science & Technology*, **56**, 5694-5705. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00044>
- [16] 王慧勇, 迺超普, 王良杰, 等. 基于 SWAT 模型的典型农业小流域氮污染时空分布特征及关键源解析[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 517-527.
- [17] 孟令华. 泰安市城区地下水“三氮”污染特征与健康风险评价[J]. 城市地质, 2023, 18(2): 153-159.
- [18] 王辉, 栾维新, 康敏捷, 等. 辽河流域社会经济活动的环境污染压力研究——以氮污染为研究对象[J]. 生态经济, 2012(8): 152-157.
- [19] 剧盼盼, 刘洪泉, 刘斌, 等. 焦化废水含氮污染物分析与控制研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(11): 40-45.
- [20] 贾国珍. 酚二磺酸比色法测定水中硝酸盐氮的研究[J]. 沈阳化工, 1994(1): 37-38+47.
- [21] Zhang, D., Zhao, H., Wu, X., Deng, Y., Wang, Z., Han, Y., *et al.* (2020) Multi-Site Electrocatalysts Boost PH-Universal Nitrogen Reduction by High-Entropy Alloys. *Advanced Functional Materials*, **31**, Article 2006939. <https://doi.org/10.1002/adfm.202006939>
- [22] Gao, Q., Pillai, H.S., Huang, Y., Liu, S., Mu, Q., Han, X., *et al.* (2022) Breaking Adsorption-Energy Scaling Limitations of Electrocatalytic Nitrate Reduction on Intermetallic CuPd Nanocubes by Machine-Learned Insights. *Nature Communications*, **13**, Article No. 2338. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29926-w>
- [23] Chen, Z., Liu, C., Sun, L. and Wang, T. (2022) Progress of Experimental and Computational Catalyst Design for Electrochemical Nitrogen Fixation. *ACS Catalysis*, **12**, 8936-8975. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c02629>
- [24] Lv, X., Liu, X., Suo, Y., Liu, Y. and Yuan, Z. (2021) Identifying the Dominant Role of Pyridinic-N-Mo Bonding in Synergistic Electrocatalysis for Ambient Nitrogen Reduction. *ACS Nano*, **15**, 12109-12118. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c03465>
- [25] Lv, Z., Zhou, S., Zhao, L., Liu, Z., Liu, J., Xu, W., Wang, L. and Lai, J. (2023) Coactivation of multiphase reactants for the electrosynthesis of urea. *Advanced Energy Materials*, **13**, 2300946.
- [26] Yu, Y., Lv, Z., Liu, Z., Sun, Y., Wei, Y., Ji, X., Li, Y., Li, H., Lai, J. and Wang, L. (2024) Activation of Ga liquid catalyst with continuously exposed active sites for electrocatalytic C-N coupling. *Angewandte Chemie International Edition*, **63**, e202402236.
- [27] Yu, Y., Sun, Y., Han, J., Guan, Y., Li, H., Wang, L., *et al.* (2024) Achieving Efficient Urea Electrosynthesis through Improving the Coverage of a Crucial Intermediate across a Broad Range of Nitrate Concentrations. *Energy & Environmental Science*, **17**, 5183-5190. <https://doi.org/10.1039/d4ce01878h>
- [28] 刘易, 陈佳, 朱颖洁, 等. 基于表面增强拉曼光谱和顶空-气相色谱/氮磷检测技术的生氰糖苷类中成药中游离子态氰化物含量测定[J]. 药物分析杂志, 2018, 38(7): 1202-1209.
- [29] 董志远, 王培龙. 气相色谱氮磷检测器测定饲料中呋喃丹的研究[J]. 饲料广角, 2008(23): 35-37.
- [30] 黄凌萍, 徐慧, 蒋爱群, 等. 气相色谱氮磷检测器法测定水中二甲基甲酰胺[J]. 理化检验(化学分册), 2008(3): 286+289.
- [31] 刘易, 陈佳, 朱颖洁, 等. 基于表面增强拉曼光谱和顶空-气相色谱/氮磷检测技术的生氰糖苷类中成药中游离子态氰化物含量测定[J]. 药物分析杂志, 2018, 38(7): 1202-1209.
- [32] 贺小敏, 李爱民, 郭丽, 等. 气相色谱氮磷检测器法测定饮用水中 19 种苯胺类化合物[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2): 124-127.
- [33] 金如琛, 宫向红. 含高浓度氯化钠工业废水中有机氮的气相色谱氮磷检测器分析[C]//中国化学会. 大连国际色谱学术报告会和展览会文集. 2007: 2.
- [34] 龚道新, 杨仁斌, 赵卫星, 等. 气相色谱氮磷检测器法用于大米和面粉中 22 种有机磷和有机氮农药多残留检测[J]. 农业环境科学学报, 2005(6): 1243-1248.
- [35] 刘臣辉, 殷丽荣, 刘文龙. 气相色谱氮磷检测器的使用与维护[J]. 中国环境监测, 2004, 20(2): 45-46.
- [36] 汪庆范, 柳均, 孙逊运. 气相色谱氮磷检测器(NPD)碱金属陶瓷球的研究[J]. 色谱, 1985(S1): 266-269+296.
- [37] 丁蕴铮, 郎佩珍. 毛细管柱气相色谱-氮磷检测器对水中痕量含氮化合物的分析[J]. 东北师大学报(自然科学版), 1984(1): 57-63.
- [38] 姜兆林, 谭家镒, 姚丽娟, 等. 尿和血浆中苯并二氮杂卓类药物及其代谢物的气相色谱氮磷检测分析法[J]. 分析科学学报, 2005(6): 639-642.
- [39] 冯顺卿, 梁淑琦, 刘洪涛. 离子色谱-质谱联用法测定枸橼酸西地那非中 N-甲基哌嗪残留[J]. 分析测试学报,

- 2025, 44(2): 364-368.
- [40] 叶新玉, 李子樱, 唐淑军, 等. 果蔬中天冬酰胺和谷氨酰胺含量检测方法及其尿素循环障碍患者食用分析[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 212-221.
- [41] 刘永林, 周萍, 王佳, 等. 微波消解-三重串联电感耦合等离子体质谱法同时测定大气颗粒物中重金属和稀土元素[J]. 广州化工, 2024, 52(24): 87-91.
- [42] 李昱霖, 杨乃蒙, 李海霞, 等. 液相色谱-串联质谱法测定彩色化妆品中 15 种水溶性偶氮染料含量[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2024, 25(4): 117-121.
- [43] 刘玲玲, 张宇婧, 郭旭冉, 等. 基于超高效液相色谱-线性离子阱-静电场轨道阱高分辨质谱和生物信息分析的丁氏三阳透解汤成分鉴定及物质基础研究[J]. 世界中医药, 2024, 19(20): 3053-3060, 3066.
- [44] 许恒誉, 刘博, 蔡兴华, 等. 电化学辅助电喷雾电离质谱快速检测卷烟烟气中的多环芳烃[J/OL]. 分析试验室, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2017.TF.20241130.1028.002.html>, 2025-01-17.
- [45] 唐俗, 卓程柳, 朱雨田, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定鸡蛋中 18 种拟除虫菊酯类农药残留[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 157-162.
- [46] 岳诗博, 崔航, 沈琴, 等. 基于液相色谱-质谱代谢组学技术的硒化黑木耳代谢产物及通路分析[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 162-168.
- [47] 石梦醒, 杨妍, 杜利敏. 固相萃取气相色谱质谱法多反应监测模式检测饮用水 17 种邻苯二甲酸酯[J]. 预防医学, 2025, 37(1): 102-106.
- [48] 曾琴, 杨仁明, 杨立开, 等. 气相色谱-质谱法测定柠檬香精中的 8 种小分子醛[J]. 化工技术与开发, 2025, 54(3): 69-73, 81.
- [49] 巩润梓, 吴大刚, 邢小霞, 等. 高效液相色谱法同时测定葵花盘粉提取物中的东莨菪素、芦丁、槲皮素和木樨草素[J]. 化学试剂, 2025, 47(3): 85-90.
- [50] 肖哲丽, 王宁, 王宁霞, 等. 高效液相色谱法测定化妆品中 6 种黄酮类化合物[J]. 分析试验室, 1-6. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2017.TF.20250107.1518.010.html>, 2025-01-17.
- [51] 孙淑萌, 林琳, 张岱州, 等. 基于液相色谱分离技术的核酸类药物生物分析方法研究进展[J]. 中国药房, 2024, 35(23): 2959-2964.
- [52] 周纯洁, 杨彦, 黄思瑜, 等. 高效液相色谱法同时检测乳制品中 4 种非蛋白含氮化合物[J]. 中国乳品工业, 2014, 42(9): 38-40.
- [53] 熊赛霞. 高效液相色谱法的特点及应用[J]. 现代食品, 2020(3): 199-201.
- [54] 任建伟. 生物样品中 354 种常见有机毒物的高效液相色谱-四极杆轨道阱质谱筛查方法的建立及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2021.
- [55] 张玉莹. 高效液相色谱串联 Orbitrap 高分辨质谱分析上海亚微米颗粒物中含氮有机化合物分子组成[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2020.
- [56] 刘建明, 樊杰, 赵瑞花, 等. 液相色谱-质谱联用测定卷烟主流烟气中的吡啶等氮杂芳烃[J]. 分析试验室, 2017, 36(11): 1302-1305.
- [57] 付艳艳. 苯并吡啶酮类双敏感探针制备及其在反相高效液相色谱-质谱中应用[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2010.
- [58] 粟晶. 顶空气相色谱-质谱法及分子吸收光谱法在巴陵石化工业废水污染物分析中的应用[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [59] 杨玉秀. 水产品中三聚氰胺的 HPLC-MS 法检测及残留规律研究[D]: [硕士学位论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
- [60] 江鑫. 食品及环境样品中三聚氰胺的液质联用分析技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.
- [61] 王帅, 欧俊慧, 邹杨. 超高效液相色谱-串联质谱法测定纺织品中羟脯氨酸含量[J]. 纺织标准与质量, 2024(6): 44-48.
- [62] 邹淼, 李延升, 韩晓鸥, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法快速测定蘑菇中 5 种鹅膏肽类毒素[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(24): 18-23.
- [63] 毛静春, 罗发美, 周琴, 等. 固相萃取结合液相色谱串联质谱法测定生咖啡中草甘膦和氨甲基膦酸残留[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1): 151-159.
- [64] 丁永昌. 基于电活性盐单胞菌的自供电氨氮传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2023.

- [65] 赵俊霞, 邢希达, 张新彬, 等. 基于氧化锌骨架的二氧化氮传感器及其敏感特性增强方法[J]. 光电子技术, 2024, 44(3): 235-241.
- [66] 白明佳. 基于氧化锌异质结构的二氧化氮传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2023.
- [67] 王博, 刘继江, 王烜赫, 等. 用于 NO₂ 传感器的 NiO@C 复合材料性能研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(3): 22-26.
- [68] 杨彦. 面向大气环境典型气态污染物检测的自驱动气敏传感器及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
- [69] 曾成. 氮氧传感器控制系统研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [70] 刘宇鹏. 用于火电厂氮氧化物排放检测的氧化铟传感器研制及监测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2023.
- [71] 李城. ZnO 管状多级结构的生物质模板合成及其氮氧化物的敏感性能[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.
- [72] 王佐硕. 氮氧化物传感器输出特性与控制策略的研究[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2022.
- [73] 梁栋. 车用氮氧传感器控制系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [74] 林伟勋. 氮氧传感器控制系统设计与优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [75] 安庆, 陈坤, 段鹏程, 等. 大气氮氧化物传感技术研究综述[J]. 测控技术, 2022, 41(9): 9-17+43.
- [76] 王远西, 王岭, 孟薇薇. 新型固体电解质基氮氧化物传感器的制备与性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 165-171.
- [77] 汤斌. 一种氮氧传感器检测工装介绍[J]. 时代汽车, 2021(24): 9-10.
- [78] 曾俊. 基于光耦合效应总氮氧化合物的传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2021.
- [79] 谢悻, 修吉平, 周诚. 多通道氮氧传感器陶瓷芯片检测系统[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(4): 106-109.
- [80] 韩冬. 氮氧化物检测传感器信号处理装置设计[J]. 电子世界, 2017(15): 121-122.
- [81] 汤斌. 浅谈车载式氮氧传感器工作原理[J]. 电子测试, 2020(22): 50-51+31.
- [82] 王康丽, 严河清, 白延利, 等. 氮氧化物电化学传感器[J]. 郑州轻工业学院学报, 2004, 19(4): 85-87.
- [83] 陈海琪, 姬亚鹏, 罗学科, 等. 多因素补偿智能水质氨氮传感器设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(22): 48-52.
- [84] 盛宇博. 氨氮野外原位在线监测系统关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2021.
- [85] 张良. 铂基敏感电极的制备及氨氮检测性能研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [86] 韩剑, 莫德清, 汪楠. 基于 MPSO-SVM 非线性氨氮传感器的数据补偿[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(1): 225-229.
- [87] 柯永斌. 化工污水氨氮检测系统设计[J]. 电子世界, 2019(19): 165-166.
- [88] 丁兰. 全固态氨氮传感器在环境监测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [89] 丁启胜, 台海江, 王晓燕. 水体氨氮原位快速检测智能传感器的研制[J]. 物联网技术, 2013, 3(3): 35-39.
- [90] 郑伟, 刘文耀, 金月寒, 等. 便携式海水氨氮自动分析仪的研制[J]. 分析仪器, 2002(2): 6-9.
- [91] 杨志民. 面向大气环境气态污染物的高性能传感器研制及其敏感特性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- [92] 黄达. 还原氧化石墨烯气体传感器的结构调控和性能优化[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [93] 柳润琴. 基于气体传感器阵列的有害气体检测系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [94] 钟铁钢. 系列毒害气体传感器的研制及其特性研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [95] 金利通. 电化学传感器在生命科学中的应用研究[J]. 化学传感器, 2001, 21(3): 25-26.