



紫外分光光度法测定 NO_3^- -N 过程中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰与消除

付昆明, 黄少伟, 杨帆

(北京建筑大学雨水系统与水环境教育部重点实验室, 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

[摘要] 利用紫外分光光度法测定水中的 NO_3^- -N 时, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的存在会使测定结果出现很大的正偏差, 且 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 浓度越高干扰程度越大。为了保证含有 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 水样中 NO_3^- -N 测定结果的准确性并提出消除干扰的方法作为参考, 先测定了不同浓度 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N 测定结果的干扰程度, 而后在 NO_3^- -N 初始质量浓度为 10 mg/L, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度为 100 mg/L 的条件下, 以加入盐酸、加入 Ba^{2+} 、臭氧吹脱和加入过硫酸钾 4 种方法对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 进行掩蔽排除。实验发现, 加入盐酸对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰有一定的排除能力, 排除干扰的比例为 30.599%, 效果较差; 加入 Ba^{2+} 排除干扰的效果最差, 排除比例仅有 17.409%; 利用臭氧吹脱方法取得了较好的排除效果, 干扰的排除比例达到了 54.752%, 相较于前 2 种方法有了较大的提高, 但仍不能够将干扰完全排除; 加入过硫酸钾的效果最好, 干扰的排除比例可达 91.248%, 基本不影响 NO_3^- -N 的测定。

[关键词] NO_3^- -N; 硫代硫酸根; 干扰排除; 过硫酸钾; 紫外分光光度法

[中图分类号] X832 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0168-05

Interference and elimination of thiosulfate ion in the measurement of nitrate nitrogen by ultraviolet spectrophotometry

FU Kunming, HUANG Shaowei, YANG Fan

(Sino-Dutch R&D Center for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: When NO_3^- -N in water is measured by UV spectrophotometry, thiosulfate ions will cause great positive deviation to the measurement results. Higher thiosulfate ions concentration leads to the greater interference degree. In order to ensure the accuracy of NO_3^- -N measurement results in water samples containing $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ and put forward the method of eliminating interference as a reference, the interference degree of different concentrations of thiosulfate ions on the measurement error of NO_3^- -N was firstly determined. Then, under the condition that the initial mass concentration of NO_3^- -N and thiosulfate ions were 10 mg/L and 100 mg/L, respectively, hydrochloric acid, Ba^{2+} , ozone stripping and potassium persulfate were introduced to eliminate the measurement error. It was found that the addition of hydrochloric acid could eliminate the interference of thiosulfate ions in some degree, and the proportion of eliminating interference was inefficient only 30.599%. The effect of adding Ba^{2+} to eliminate interference was the worst, and the proportion of eliminating interference was only 17.409%. While the approach of ozone stripping achieved better elimination effect, and the elimination proportion reached 54.752%. It was greatly improved compared with the first two methods, but it was still unable to eliminate the interference thoroughly. The highest proportion of eliminating interference of 91.248% was realized when potassium persulfate was added. Basically, it had no effect on NO_3^- -N determination.

Key words: NO_3^- -N; thiosulfate; interference elimination; potassium persulfate; ultraviolet spectrophotometry

近年来我国水体富营养化程度不断加剧, 水安全问题日益突出。 NO_3^- -N 是水中各种氮元素分解氧化的最终产物, 并且由于其具有稳定性可以在水

体中长时间存在, 成为了水体富营养化的主要诱因之一^[1-2]。水体中的 NO_3^- -N 主要来自于污水处理厂的排放, 以传统的 AAO 工艺为例, 系统回流比一般

以200%为限,因此好氧池出水有一部分未经过硝化反硝化作用脱氮,这就导致二级出水中难以避免地存在相当一部分硝酸盐,而二级出水的硝酸盐泄露问题是一个世界性难题。目前,硝酸盐污染问题在我国许多地区的地表水与地下水都存在^[3]。硝酸盐污染会导致水体的使用价值大幅下降,使水体在作为饮用水水源或是作为景观用水时对人体和环境造成一定危害^[4]。硫自养反硝化技术可以将泄露的 NO_3^- -N去除,有效避免出水的二次污染问题^[5]。在硫自养反硝化技术的常用硫源中,硫代硫酸钠具有溶解度高、传质好、成本低和抗高水力负荷能力良好的优点^[6],将其作为硫源进行硫自养脱氮的研究有很大意义^[7-8]。试验过程中,研究人员通常采用紫外分光光度法对系统中 NO_3^- -N进行测定。

紫外分光光度法测定 NO_3^- -N具有仪器简单、操作简便、准确度高的优点^[9-11]。其原理是利用 NO_3^- -N在紫外波长220 nm处有特征吸收进行定量测定,同时,在波长275 nm作另一次测定,以校正水中溶解的有机物对测定结果的干扰^[12]。但研究人员发现,在对进水中的 NO_3^- -N进行测定时,如水中含有 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$,测定结果总是与预期存在着很大的偏差,即 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 会对 NO_3^- -N的测定产生很大的干扰,但是目前并没有相关排除干扰方法的文献可以参考。因此本研究探究了 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对采用紫外分光光度法测定硝酸根离子过程中的干扰原理、干扰程度以及排除方法,以期为研究硫自养反硝化技术过程中的硝酸盐氮测定提供参考。

1 材料与方法

1.1 所需仪器与试剂

仪器:UV2400紫外分光光度计、便携式臭氧消毒机(2 000 mg/h)、电炉、50 mL比色管、10 mm比色皿。

试剂: NO_3^- -N标准溶液(0.1 g/L)、硫代硫酸钠标准溶液(1 g/L,以 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 计)、 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 标准溶液(10 g/L,以 Ba^{2+} 计)、过硫酸钾(分析纯)、(1+9)盐酸、氨基磺酸(8.0 g/L)。

1.2 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 干扰紫外分光光度法测定 NO_3^- -N的原理

紫外分光光度法测定 NO_3^- -N的特征吸收波长为220 nm,而刘晓健等^[13]发现 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的特征吸收波长为(215±2) nm,同时熊建华^[14]得出 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 在217 nm波长处有最大吸收峰,这表明 NO_3^- -N与 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 二者

吸收峰过于接近,吸收图谱有较大的重合,因此 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 会对 NO_3^- -N的测定产生较大的干扰。

1.3 实验方法

1.3.1 不同质量浓度的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N测定的影响

各取10支50 mL比色管设为A、B两组,向两组比色管分别加入5、10 mL NO_3^- -N标准溶液,再向各组内10支比色管分别加入不同体积的硫代硫酸钠标准溶液,定容至刻度线。最终,A、B两组比色管内溶液的 NO_3^- -N质量浓度分别为10、20 mg/L,每组10支比色管内溶液的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度分别为0、5、10、20、30、40、50、100、150、200 mg/L。之后再向各比色管加入1 mL的氨基磺酸和1 mL的(1+9)盐酸,摇匀,静置,测定 NO_3^- -N,比较不同质量浓度的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N测定的影响。

1.3.2 以盐酸为掩蔽剂消除测定 NO_3^- -N过程中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰

取10支50 mL比色管,均加入5 mL NO_3^- -N标准溶液和5 mL硫代硫酸钠标准溶液,之后分别额外加入不同体积的(1+9)盐酸调节其酸碱度,定容后折合比色管内溶液 NO_3^- -N、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度分别为10、100 mg/L。再加入1 mL的氨基磺酸与1 mL的(1+9)盐酸,摇匀,静置,测定其各自的 NO_3^- -N,比较盐酸加入量对 NO_3^- -N测定结果的影响。

1.3.3 以 Ba^{2+} 为掩蔽剂消除测定 NO_3^- -N过程中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰

取7支50 mL比色管,均加入5 mL的 NO_3^- -N标准溶液和5 mL的硫代硫酸钠标准溶液,再分别加入不同量的 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 标准溶液,定容后折合比色管内溶液 NO_3^- -N、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度分别为10、100 mg/L,各比色管内 Ba^{2+} 质量浓度分别为0、1、2、3、4、5、6 g/L。之后加入1 mL的氨基磺酸与1 mL的(1+9)盐酸,摇匀,静置,测定其各自的 NO_3^- -N,比较 Ba^{2+} 加入量对 NO_3^- -N测定结果的影响。

1.3.4 臭氧吹脱消除测定 NO_3^- -N过程中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰

取200 mL锥形瓶若干,均加入20 mL的 NO_3^- -N标准溶液和20 mL的硫代硫酸钠标准溶液,定容后折合溶液 NO_3^- -N、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度分别为10、100 mg/L。之后使用便携式臭氧发生器对各锥形瓶内溶液进行不同时间的吹脱,吹脱完毕立即取样50 mL加入50 mL比色管中,再加入1 mL的氨基磺酸与1 mL的(1+9)盐酸,摇匀,静置,测定其各自的 NO_3^- -N,比较不同臭氧吹脱时长对 NO_3^- -N测定结果的影响。

1.3.5 以过硫酸钾为掩蔽剂消除测定 NO_3^- -N 过程中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰

取 200 mL 锥形瓶若干, 分别加入不同量的 NO_3^- -N 标准溶液(A)、硫代硫酸钠标准溶液(B)和过硫酸钾(C), 定容至刻度线, 加热, 待混合溶液冷却至室温后, 取样 50 mL 加入 50 mL 比色管中, 再加入 1 mL 的氨基磺酸与 1 mL 的 (1+9) 盐酸, 摇匀, 静置, 测定其 NO_3^- -N, 比较过硫酸钾加入量对 NO_3^- -N 测定结果的影响。

2 结果与讨论

2.1 不同质量浓度的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N 测定结果的影响

不同质量浓度 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 存在下, 对溶液中 NO_3^- -N 进行 3 次平行测定, 其结果见表 1。

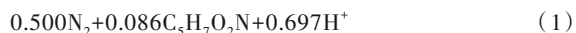
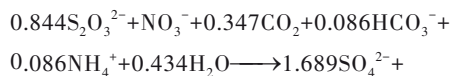
表 1 不同 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 投加量对 NO_3^- -N 测定的影响

Table 1 Effect of different dosages of thiosulfate on NO_3^- -N measurement

$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	A 组			B 组		
	实测 NO_3^- -N/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			实测 NO_3^- -N/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
0	10.939	10.151	9.829	21.083	19.255	19.620
5	11.091	10.208	10.233	21.235	19.618	20.124
10	11.242	10.820	10.536	22.446	20.192	21.689
20	11.595	11.490	11.141	24.667	20.919	23.657
30	11.898	12.255	12.504	26.635	21.588	24.969
40	13.059	13.421	12.985	28.553	22.755	25.676
50	13.816	14.588	13.816	29.360	23.730	25.979
100	18.459	18.203	17.450	31.278	27.938	29.209
150	23.304	22.927	21.840	35.021	31.189	31.429
200	27.442	27.287	26.584	38.999	34.268	36.678

由表 1 可见, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对水中 NO_3^- -N 的测定结果有着很大的正影响, 且 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度越高, 对 NO_3^- -N 测定的影响越大。

当以硫代硫酸钠为硫源进行硫自养反硝化反应时, 反应过程遵循式 (1)^[15]:

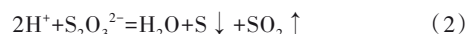


由式 (1) 可以看出, 反应中 1 mol 的 NO_3^- -N 会消耗 0.844 mol 的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, 即 1 mg 的 NO_3^- -N 需要 6.752 mg 的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 才能将之去除, 同时, 在实际中为了保证 NO_3^- -N 的去除效果一般都需要添加过量的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, 这就导致了反应的进水中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 相较于 NO_3^- -N 来说会有一个很高的浓度, 在测定时就会对 NO_3^- -N 造成很大的影响。因此, 想要准确地测定含有 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 水样中 NO_3^- -N 的质量浓度, 就必须对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 进行掩蔽或

者去除。

2.2 以盐酸为掩蔽剂

$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 是一种还原性较强的弱酸根离子, 其在碱性条件下相对较为稳定, 但在酸性条件下会因主要发生式 (2) 的反应而快速分解^[16]:



根据这一性质, 可以通过调节混合溶液的酸碱度来将水中的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 去除, 进而排除其对 NO_3^- -N 测定的干扰, 得到正确的测定结果。以盐酸为掩蔽剂对溶液中 NO_3^- -N 进行 3 次平行测定, 实验结果见表 2。

表 2 不同盐酸投加量下 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N 测定的影响

Table 2 Effect of thiosulfate on NO_3^- -N measurement under different dosages of hydrochloric acid

盐酸投加量/mL	NO_3^- -N/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次
0	19.216	18.881	19.175
0.05	19.074	18.713	19.327
0.1	18.963	18.809	18.893
0.2	17.924	18.928	18.802
0.5	16.511	19.024	17.712
1	17.308	18.331	17.348
2	14.815	18.379	15.794
3	16.602	17.159	15.582
4	16.329	17.470	16.591
5	15.844	17.088	15.996

由表 2 可见, 加入盐酸对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 有着一定的掩蔽作用, 且加入量越多这种作用越明显。但是, 其掩蔽效果仍然欠佳, 额外加入 5 mL 盐酸之后的测定结果平均值为 16.309 mg/L, 与 10 mg/L 的理论值差异仍较大, 干扰去除率为 30.599%, 因此加入盐酸来掩蔽 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 并不可行。

2.3 以 Ba^{2+} 为掩蔽剂

$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 与 Ba^{2+} 因反应产生沉淀而不能共存, 因此可以尝试在水中添加 BaCl_2 对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 进行掩蔽, 各组实验的 3 次平行测定结果见表 3。

表 3 不同 Ba^{2+} 投加量下 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N 测定的影响

Table 3 Effect of thiosulfate on NO_3^- -N measurement under different dosages of Ba^{2+}

$\text{Ba}^{2+}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	NO_3^- -N/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次
0	18.186	18.291	17.631
1	16.753	17.966	16.763
2	17.530	18.100	17.712
3	15.077	17.880	14.351
4	15.602	17.230	15.885
5	17.318	17.258	15.663
6	16.844	17.364	15.703

由表3可见,加入 Ba^{2+} 对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 也有一定的掩蔽效果,随着 Ba^{2+} 质量浓度的升高,这种掩蔽效果也越来越明显。但是加入 Ba^{2+} 与加入盐酸掩蔽有着同样的问题,那就是掩蔽效果并不理想,在加入了6 g/L的较高质量浓度的 Ba^{2+} 掩蔽后平均 NO_3^- -N测出量还有16.637 mg/L,干扰去除率仅有17.409%。因此,加入 Ba^{2+} 也不是较好的掩蔽方法。

2.4 臭氧吹脱

$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 中的S元素的价态为+2价,具有较强的还原性,能够被强氧化剂氧化为 SO_4^{2-} ,而 NO_3^- -N并不会被氧化,因此理论上使用氧化法消除混合溶液中的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的影响也是可行的。以前有过用 H_2O_2 消除 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 干扰的方法报道,但结果并不理想^[17]。出于操作简便的考虑,本研究选择用小型臭氧消毒机对混合溶液进行吹脱实验,各实验的3次平行测定结果见表4。

表4 不同臭氧吹脱时长下 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N测定的影响

Table 4 Effect of thiosulfate on NO_3^- -N measurement under different ozone stripping times

吹脱时长/min	NO_3^- -N/(mg·L ⁻¹)		
	第1次	第2次	第3次
0	18.207	18.636	18.610
1	19.317	17.966	18.812
2	19.771	17.966	18.257
3	18.661	17.775	17.652
4	18.964	16.914	17.803
5	19.418	16.723	16.894
7.5	17.904	15.862	15.885
10	16.440	14.428	15.431
15	14.876	12.898	14.371
20	14.371	13.376	14.270
25	13.206	13.328	13.614
30	14.068	13.280	14.169

由表4可见,相较于加入盐酸和 Ba^{2+} 而言,利用便携式臭氧消毒机对混合溶液进行吹脱的方法有着更好的效果。随着吹脱时间的加长, NO_3^- -N的测定平均值也由开始的18.484 mg/L降至13.280 mg/L,对比加入盐酸的16.309 mg/L和加入 Ba^{2+} 的16.637 mg/L都有了较大的效果提升,干扰去除率也达到了54.752%,显然此方法是排除 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 干扰的更好选择。但是,臭氧吹脱30 min后的13.839 mg/L的测定值相对于10 mg/L理论值来说仍然有些偏大,并且30 min的预处理时间较长,因此这种方法并不是最优的选择。

2.5 以过硫酸钾为掩蔽剂

对比前几种排除干扰的方法发现,采用氧化法

是比较有效的,但臭氧吹脱的方法依旧不能将 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰很好地排除,因此考虑尝试用强氧化剂过硫酸钾来氧化 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$,各实验的3次平行测定结果见表5。

表5 过硫酸钾掩蔽下 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 对 NO_3^- -N测定的影响

Table 5 Effect of thiosulfate on NO_3^- -N measurement under potassium persulfate masking

A/(mg·L ⁻¹)	B/(mg·L ⁻¹)	C/g	NO_3^- -N/(mg·L ⁻¹)		
			第1次	第2次	第3次
10	100	0	17.450	17.029	18.762
10	100	0.07	14.321	15.289	13.816
10	100	0.14	11.141	10.459	10.435
10	100	0.28	10.788	10.125	10.889
10	200	0	26.534	26.573	25.928
10	200	0.14	15.633	15.336	15.481
10	200	0.28	10.990	10.842	10.939

由表5可见,加入过硫酸钾氧化去除 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的效果十分明显。在溶液中存在100 mg/L的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 时,加入0.14 g的过硫酸钾就能将其干扰基本完全消除,处理过后的混合溶液 NO_3^- -N的平均测定值为10.459 mg/L,与理论值10 mg/L相当接近,干扰去除率达到了91.248%;将溶液中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度提高至200 mg/L后,加入0.14 g的过硫酸钾并不能将干扰完全排除,平均的测定值仍有15.483 mg/L,将过硫酸钾加入量提高至0.28 g后,平均测定值降低至10.923 mg/L,干扰基本被排除。在本实验的2组浓度下,每20 mg $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 存在下加入0.14 g过硫酸钾可以基本完全消除干扰,但考虑到实验样本数量的不足,更加准确的消除比例还有待进一步探究。

2.6 不同消除方法效果对比

对不同消除干扰方法的效果进行了对比,结果见图1。

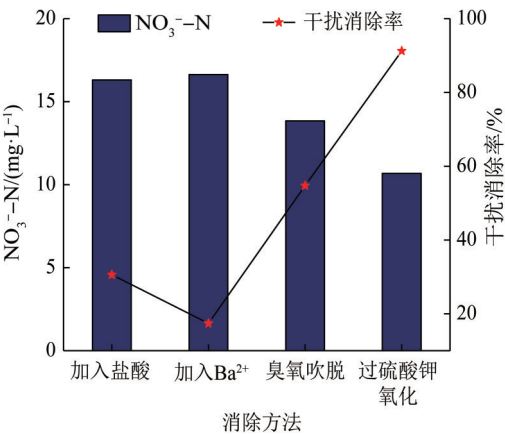


图1 不同消除方法效果对比

Fig. 1 Comparison of effects of different exclusion methods

如图1所示,对比加入盐酸、加入 Ba^{2+} 、臭氧吹脱和加入过硫酸钾4种方法发现,前2种方法并没有较好地排除 NO_3^- -N溶液中 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的干扰。相较而言,臭氧吹脱和加入过硫酸钾是较好的排除干扰的方法,其中加入过硫酸钾氧化的方法能够将干扰几乎完全排除,是最佳的选择。

3 结论

用紫外分光光度法测定水中的 NO_3^- -N时,水中的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 会对 NO_3^- -N的测定造成正干扰,每100 mg/L的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 会造成约8 mg/L左右的 NO_3^- -N测定误差, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 含量越高,干扰越大。在水中 NO_3^- -N为10 mg/L, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 质量浓度为100 mg/L的条件下,加入过硫酸钾氧化能够将17.747 mg/L的初始平均 NO_3^- -N测定值降低至10.923 mg/L,基本能够将干扰完全消除,是最佳的干扰排除方法。

参考文献

- [1] 王东,袁军成. 水中硝酸盐测定方法研究进展[J]. 广东化工, 2018, 45(9): 167.
WANG Dong, YUAN Juncheng. Research advances in determination methods of nitrate in water[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(9): 167.
- [2] SCHINDLER D W, HECKY R E. Eutrophication: More nitrogen data needed[J]. Science, 2009, 324(5928): 721-722.
- [3] WANG Tuo, GUO Jianbo, SONG Yuanyuan, et al. Efficient nitrogen removal in separate coupled-system of anammox and sulfur autotrophic denitrification with a nitrification side-branch under substrate fluctuation[J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 133929.
- [4] 张立辉,曹国民,盛梅,等. 地下水硝酸盐去除技术进展[J]. 净水技术, 2010, 29(5): 4-10.
ZHANG Lihui, CAO Guomin, SHENG Mei, et al. Progress of the technological processes for nitrate removal in groundwater[J]. Water Purification Technology, 2010, 29(5): 4-10.
- [5] YUAN Ying, ZHOU Weili, WANG Hui, et al. Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors[J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1835-1844.
- [6] ZHOU Weili, LIU Xu, DONG Xiaojing, et al. Sulfur-based autotrophic denitrification from the micro-polluted water[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 44: 180-188.
- [7] 袁莹,周伟丽,王晖,等. 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1835-1844.
YUAN Ying, ZHOU Weili, WANG Hui, et al. Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors[J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1835-1844.
- [8] DI CAPUA F, AHORANTA S H, PAPIRIO S, et al. Impacts of sulfur source and temperature on sulfur-driven denitrification by pure and mixed cultures of Thiobacillus[J]. Process Biochemistry, 2016, 51(10): 1576-1584.
- [9] 董志浩,张娇. 紫外分光光度法测定硝酸盐氮铁离子的干扰及快速去除[J]. 化学分析计量, 2021, 30(2): 17-20.
DONG Zhihao, ZHANG Jiao. Interference and rapid elimination of ferric iron in determination of nitrate nitrogen by Ultraviolet Spectrophotometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2021, 30(2): 17-20.
- [10] 李博. 对紫外分光光度法检测水中硝酸盐氮方法的探讨[J]. 清洗世界, 2021, 37(6): 41-42.
LI Bo. Discussion on the method of detecting nitrate nitrogen in water by Ultraviolet Spectrophotometry[J]. Cleaning World, 2021, 37(6): 41-42.
- [11] 梁洪儒,吴艳玲. 水中硝酸盐氮两种检测方法的比对分析[J]. 山东水利, 2021(6): 71-73.
LIANG Hongru, WU Yanling. Comparative analysis of two detection methods of nitrate nitrogen in water[J]. Shandong Water Resources, 2021(6): 71-73.
- [12] 陈晨,韩少强,赵志强,等. 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.
CHEN Chen, HAN Shaoqiang, ZHAO Zhiqiang, et al. Comparison of two methods for determination of nitrate nitrogen in water[J]. Tianjin Science & Technology, 2020, 47(8): 16-18.
- [13] 刘晓健,朱兴年. 紫外分光光度法测定硫代硫酸钠溶液的含量[J]. 中南药学, 2009, 7(7): 559-560.
LIU Xiaojian, ZHU Xingnian. Determination of sodium thiosulfate solution by UV Spectrophotometry[J]. Central South Pharmacy, 2009, 7(7): 559-560.
- [14] 熊建华. 紫外分光光度法测定溶液中硫代硫酸钠含量[J]. 医药导报, 2004, 23(11): 866.
XIONG Jianhua. Determination of sodium thiosulfate in solution by UV Spectrophotometry[J]. Herald of Medicine, 2004, 23(11): 866.
- [15] 汪海双. 以香蕉皮为碳源异养反硝化处理地下水中硝酸盐的研究[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
WANG Haishuang. Study on the treatment of nitrate in groundwater by banana peel as external carbon source[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [16] HOLLEMAN A F, WIBERG E. Inorganic chemistry[M]. Academic Press: San Diego, 2001: 132-133.
- [17] 沈志发,李明芳. 水中氯离子测定时干扰物的消除[J]. 油气田环境保护, 1994, 4(2): 27-30.
SHEN Zhifa, LI Mingfang. Elimination of interfering substance in determining chlorine in water[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 1994, 4(2): 27-30.

[作者简介] 付昆明(1981—), 博士,副教授。E-mail: fukunming@163.com。

[收稿日期] 2022-03-08(修改稿)