

固相磷提取剂对钼锑抗法测磷的影响及校正

邵薇, 谢世伟*, 童灿, 廖武斌, 邓丹妮, 邱傲雪

武汉科技大学, 城市建设学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年8月31日; 录用日期: 2023年9月28日; 发布日期: 2023年10月13日

摘要

固相磷作为磷循环过程中的重要组成部分, 对其含量和形态的分析在生态环境和地球化学领域具有广泛的需求。研究中常用一定浓度的HCl、NaOH、MgCl₂溶液作为固相磷提取剂, 并采用钼锑抗分光光度法测定溶液中磷含量。而本研究发现酸、碱、镁离子提取剂投加量过高时均会对磷测定结果产生影响, 造成测定结果准确度低。本实验通过定量控制每毫升溶液中加入酸提取剂的最大摩尔量为0.15 mmol, 氢氧化钠提取剂为0.3 mmol、以及绘制不同Mg²⁺浓度下的工作曲线对该方法进行优化, 从而提高磷测定结果的准确度, 为进一步完善固相中磷形态提取和分析的方法提供可靠的依据。

关键词

固相磷, SMT, 提取剂, 钼锑抗分光光度法

Impact and Correction of Solid Phase Phosphorus Extractants on Determination of Phosphorus by Molybdenum-Antimony-Ascorbic Spectrophotometry

Wei Shao, Shiwei Xie*, Can Tong, Wubin Liao, Danni Deng, Aoxue Qiu

School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Aug. 31st, 2023; accepted: Sep. 28th, 2023; published: Oct. 13th, 2023

Abstract

Solid-phase phosphorus, as an important component in the phosphorus cycling process, has a broad demand for its analysis of content and forms in the fields of ecological environment and

*通讯作者。

geochemistry. In these studies, certain concentrations of HCl, NaOH, and MgCl₂ solutions are commonly used as solid phase phosphorus extractants, and the phosphorus content in the solution is determined using the molybdenum-antimony-ascorbic spectrophotometry method. However, this study has found that excessive addition of acid, alkali, and magnesium ion extractants can all have an impact on the phosphorus determination results, resulting in low accuracy. In this experiment, the method was optimized by quantitatively controlling the maximum mole amount of acid extractant added per milliliter of solution to be 0.15 mmol, sodium hydroxide extractant to be 0.3 mmol, and by constructing a working curve under different Mg²⁺ concentrations. These optimizations aimed to improve the accuracy of phosphorus determination results, providing a reliable basis for further enhancement of methods for extraction and analysis of phosphorus forms in solid-phase samples.

Keywords

Solid Phase Phosphorus, SMT, Extractant, Molybdenum-Antimony-Ascorbic Spectrophotometry

Copyright © 2023 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

固相磷作为磷循环过程中的重要组成部分, 对其含量和形态的分析在生态环境和地球化学领域具有广泛的需求。例如在浅水湖泊的磷总量平衡中, 构成整个内负荷的 60%~80% 的底泥磷[1] [2]。底泥磷会影响湖泊的营养程度和生产[3] [4], 以及其会延滞湖泊水质的恢复过程。因此准确了解其含量, 能为河湖内源磷管理提供数据支撑[5] [6], 对水体富营养化和湖泊水质的治理的研究具有重要意义[7] [8] [9] [10]。目前针对固相磷形态分析的测定方法有多种[6] [11] [12] [13], 其中应用最广泛的是 20 世纪 90 年代在欧洲标准测试计划框架下发展的沉积物磷形态分析方法, 简称为 SMT 法[5] [12]。SMT 法采用一定浓度的 HCl、NaOH、MgCl₂ 溶液提取获得 5 种磷形态: 无机磷(IP)、有机磷(OP)、可交换态磷(Ex-P)、铁铝结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(HCl-P)。该方法操作简便、试剂易得、各磷形态分析之间干扰小[14] [15]。另外, 文献中常采用加酸溶解法对固体样品中总磷进行提取固相提取[16] [17] [18]。而提取后磷的测定方法使用最广泛的是钼锑抗分光光度法[19] [20] [21]。而酸度对磷钼蓝的显色有较大影响[22]。研究发现 SMT 中盐酸提取磷提取剂呈强酸性, 在采用钼锑抗分光光度法时加显色剂无法显色, 而加碱调节 pH 使得结果偏高[14]。然而大部分采用固相磷提取剂的文献, 并未说明其在采用分光光度法测磷前对提取液采取预处理措施, 以消除提取剂对磷检测的干扰。《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》(GB 11893-1989) [23]及水和废水检测分析方法(第四版)中[24], 只说明了砷、硫化物、六价铬、亚硝酸盐、以及铁对检测的影响和消除方法, 但并未说明酸、碱及镁离子的测定影响。

本文系统地研究了固相磷分析中常用的提取剂(如 NaOH, HCl, 和 Mg²⁺等)对钼锑抗分光光度法测磷的影响。本文首先设计了单因素变量实验, 系统定量的分析了随着酸, 氢氧化钠, Mg²⁺提取剂浓度增大时对钼锑抗分光光度法测定值的影响。其次, 针对需要投加大量酸提取剂的实验水样, 定量分析了加碱溶液调节的合适浓度。最后, 对于 Mg²⁺提取剂, 采用绘制不同 Mg²⁺提取剂浓度下的工作曲线的方式以提高实验测定结果的准确性。本文的研究结果将为进一步完善固相中磷形态提取和分析的方法提供可靠的依据。

2. 材料与方法

2.1. 试剂与仪器

2.1.1. 试剂准备抗坏血酸溶液 10%

溶解 10 g 抗坏血酸于水中，并稀释至 100 mL，试剂在棕色瓶中，冷箱中 4℃ 时贮存。钼酸盐溶液：溶解 13 g 钼酸铵于 100 mL 水中，溶解 0.35 g 酒石酸锑钾于 100 mL 水中，在不断搅拌下，将钼酸铵溶液徐徐加到 300 mL (1 + 1) 硫酸中，加酒石酸锑钾溶液并混合均匀，试剂在棕色瓶中，冷箱中 4℃ 时贮存。磷酸盐贮备液：将磷酸二氢钾于 110℃ 干燥 2 h，在干燥器中放冷，称取 0.217 g 溶于水，移入 1000 mL 容量瓶中，加 (1 + 1) 硫酸 5 mL，用水稀释至标线，此溶液每 mL 含 50.0 μg 磷 (以 P 计)。盐酸提取剂：3 mol/L 盐酸溶液。硝酸提取剂：3 mol/L 硝酸溶液。硫酸提取剂：3 mol/L 硫酸溶液。氢氧化钠提取剂：3 mol/L 氢氧化钠溶液。氯化镁提取剂：1 mol/L MgCl₂ 溶液。硫酸镁提取剂：1 mol/L MgSO₄ 溶液。

2.1.2. 仪器设备与实验材料电子天平

AL204, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。紫外可见分光光度计: A580, 翰艺仪器(上海)有限公司。所有实验均采用去离子水，其电阻率为 18.2 MΩcm⁻¹。

2.2. 实验方法

取 1 mL 磷酸盐标准液(4 mg/L)加入液于 5 mL 的离心管中，再分别向其中加入不同体积的盐酸、硝酸、硫酸、氢氧化钠、镁离子提取剂。然后向其中加入 0.1 mL 抗坏血酸溶液，30 s 后加入 0.2 mL 钼酸盐溶液，最后加入超纯水至 4 mL，混匀。按照国标法，测量吸光度。每组实验至少重复三次，采用平均值绘制曲线。

3. 结果与分析

3.1. 标准曲线与工作曲线

校准曲线包括标准曲线和工作曲线，校准曲线的选用需经过实验确定。由于工作曲线的绘制过程与样品测定过程相近，故常采用工作曲线。由图 1 可知，在每毫升溶液需要加入 0.45 mmol 碱液和 0.3 mmol

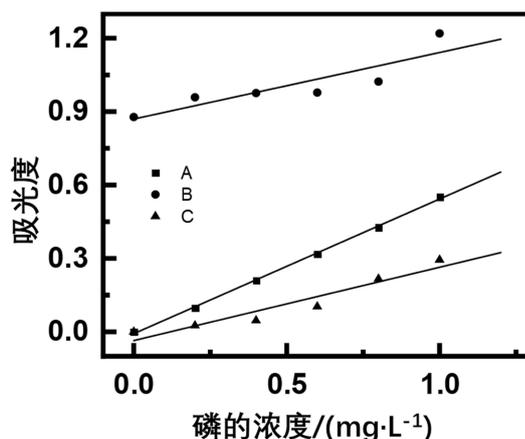


Figure 1. Comparison between the working curve after adding acid and alkali and the standard curve (adding A 0, B 0.3 mmol NaOH, C 0.3 mmol HCl into per mL phosphate solution)

图 1. 加入酸碱后的工作曲线与标准曲线的对比(每毫升磷溶液加入 A 0、B 0.3 mmol NaOH 溶液、C 0.3 mmol HCl 溶液)

Table 1. Functional and linear relationship between working curve and standard curve after adding acid and alkali
表 1. 加入酸碱后的工作曲线与标准曲线的函数关系和线性关系

图例	实验条件	函数关系	线性关系
A	标准曲线	$y = 0.5506x - 0.0076$	$R^2 = 0.999$
B	标准曲线 + 0.3 mmol/mL NaOH 溶液	$y = 0.272x + 0.8697$	$R^2 = 0.7804$
C	标准曲线 + 0.3 mmol/mL HCl 溶液	$y = 0.3x - 0.036$	$R^2 = 0.9202$

酸液的实验中得到工作曲线与标准曲线差别较大, 且与标准曲线相比($R^2 = 0.999$), 工作曲线线性关系较差($R^2 = 0.7804, 0.9202$)。标准曲线与工作曲线的拟合函数及线性关系 R^2 详见表 1, 标准曲线的斜率($k = 0.5506$)与工作曲线的斜率($k = 0.3, 0.272$)差异也较大。因此, 酸、碱等提取剂对磷的检测具有较大的干扰, 为保证实验过程中所测数据的准确性, 需对固相提取过程中磷的测定方法进行优化。

3.2. 酸提取剂的影响

本实验通过加入不同体积的盐酸、硫酸、硝酸提取剂, 研究了其对测定结果的影响。并通过加入一定体积的碱溶液对实验进行进一步分析。实验结果如图 2 所示, 随着加入酸提取剂体积的增加, 吸光度持续偏低。对于酸提取剂, 当每毫升水样中 H^+ 的摩尔量在 0.15 mmol 内, 对测定结果无较大影响; 当每毫升水样中 H^+ 的摩尔量达到 0.3 mmol 时, 吸光度有一个明显降低; 而当每毫升水样中 H^+ 的摩尔量超过 0.45 mmol 时, 吸光度接近 0。因此, 当水样测定过程需要加入酸提取剂时, 每毫升水样中 H^+ 的摩尔量应在 0.15 mmol 内, 此时不会对实验结果造成较大影响。其原因是钼锑抗分光光度法是利用酸性条件下, 正磷酸盐与钼酸铵、酒石酸锑氧钾反应, 生成磷钼杂多酸, 被还原剂抗坏血酸还原, 形成蓝色络合物[23], 故而酸度对磷钼蓝的显色有较大影响[22]。酸度会影响磷钼络合物的形成, 当酸度过高时, 会破坏磷钼蓝的结构, 导致显色不完全或完全不显色, 结果偏低[25] [26]。

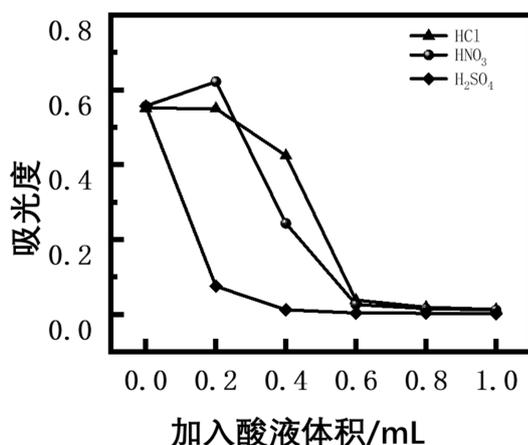


Figure 2. Influence of adding amount of hydrochloric acid, nitric acid and sulfuric acid solutions on absorbance of phosphate standard solution

图 2. 盐酸、硝酸和硫酸溶液加入量对磷酸盐标准液吸光度的影响

当水样中存在大量固相磷形态, 需投入大量体积的酸提取剂以达到减少固相磷溶解时间的目的。此时可在待固相磷形态溶解后加入适量体积的碱溶液, 以消除酸提取剂对钼锑抗分光光度法的影响。有论文提到采用 2,4-二硝基苯酚作为指示剂调节检测水样酸度, 在溶液刚呈微黄色时即认为溶液 pH 值为 4.4

[25], 但微黄色、浅黄色于肉眼直接辨认存在视觉误差且该方法仅适用于无色水样中。而实际情况下的实验水样通常有色, 故无法采用该方法指示水样酸度。因而本文对加入的碱溶液的量进行了定量分析, 实验结果如图 3 所示, 分别在每毫升水样中含有 0.3 mmol 酸提取剂的 1 mg/L 的磷酸盐标准液中加入不同体积的碱溶液时。对于盐酸, 硝酸和硫酸提取剂, 当每毫升水样中碱液摩尔量为 0.15 mmol 时, 吸光度最接近标准曲线对应值, 此时可达到最佳校正效果; 当每毫升水样中碱液摩尔量超过 0.6 mmol 时, 吸光度有明显增加, 偏离准确值。因此在每毫升加入硝酸, 盐酸和硫酸提取剂摩尔量在 0.3 mmol 的水样中, 可向每毫升水样中加入 0.15 mmol 摩尔量的碱液, 以提高测量结果的准确度。

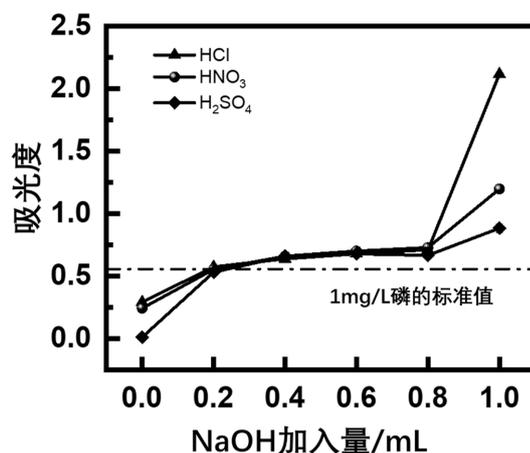


Figure 3. Influence of the volume of NaOH on the absorbance of phosphoric acid solution containing acid extractant

图 3. 加入 NaOH 溶液体积对含有酸提取剂的磷酸溶液吸光度的影响

3.3. 氢氧化钠提取剂的影响

在提取铁铝结合态磷时, 需向水样中加入氢氧化钠提取剂。因此碱溶液作为重要的测定因素, 对测定结果的准确性有直接影响。研究在加入不同体积的碱液对相同浓度的磷酸盐标准液测定结果的影响,

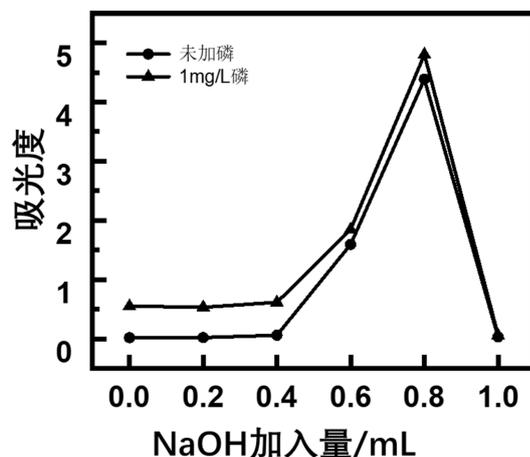


Figure 4. Influence of adding volumes of NaOH solutions on phosphorus measurement

图 4. NaOH 溶液加入体积对测磷的影响

实验结果见图 4。

以 1 mg/L 的磷酸盐标准液的值作为参考,当每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量在 0.15 mmol 内,对测定结果无较大影响,当每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量超过 0.15 mmol 时,吸光度随每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量增大而增大,当每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量为 0.6 mmol 时,吸光度达到最大值,继续增大每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂的摩尔量,吸光度则会降低,当每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量为 0.75 mmol 时,吸光度接近于 0,严重影响了测试结果的准确性。其可能的原因是:氢氧化钠提取剂能与抗坏血酸与钼酸盐溶液显蓝色,干扰测定结果,使测定值偏大。

为了进一步验证这一猜想,本文向等浓度的氢氧化钠溶液中加入等量的抗坏血酸和钼酸铵溶液,发现溶液显蓝色,进一步验证了氢氧化钠提取剂会直接与抗坏血酸与钼酸铵溶液显蓝色,且吸光度变化规律与向 1 mg/L 的磷酸盐标准液中加入等浓度的氢氧化钠提取剂的变化规律一致。当酸度过低时,磷钼杂多酸和过量钼酸铵同时被还原,且影响显色体系稳定性[25] [26]。因此加入过量体积氢氧化钠提取剂会导致水样测定结果不准确,为保证实验结果的准确性,每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量应控制在 0.15 mmol 内。

3.4. 镁离子浓度的影响

当测定交换态磷,需加入 MgCl_2 提取剂震荡提取,再经离心等操作后用钼锑钒分光光度法测定提取液中磷的浓度。该环节会引入镁离子,镁离子作为测定因素与测定结果的准确度有着密切关系。通过改变每毫升水样中加入 MgCl_2 提取剂的摩尔量研究 MgCl_2 提取剂对钼锑钒分光光度法的影响。实验结果如图 5 所示,随着每毫升水样中加入 MgCl_2 提取剂摩尔量的增加,水样测定的吸光度一直增高,测定结果偏大。以 SMT 方法中每毫升水样中加入 MgCl_2 提取剂摩尔量为 0.5 mmol 分析,吸光度相对于 1 mg/L 的磷酸盐对应的标准值增大了 50%,该结果准确度低。为排除阴离子干扰,故使用 MgSO_4 提取剂在同等试验条件下进行实验,实验结果如图 5 所示,其吸光度随每毫升水样中加入 MgSO_4 提取剂的摩尔量的变化规律与 MgCl_2 提取剂一致。故认为是该方法下提取剂中的 Mg^{2+} 对水样测定结果产生影响,使水样测定结果偏大。

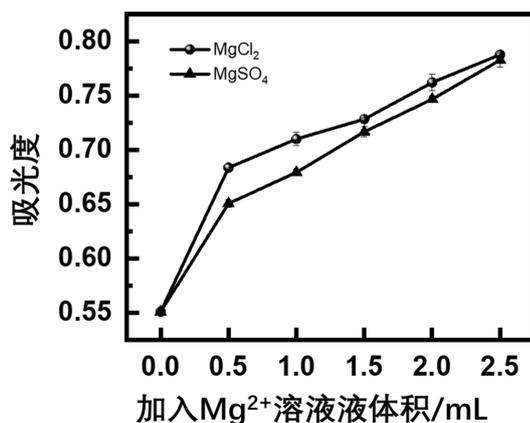


Figure 5. Influence of adding volumes of Mg^{2+} solutions on phosphorus measurement

图 5. Mg^{2+} 溶液加入体积对测磷的影响

消除镁离子干扰的方法:在每毫升水样中不同摩尔量的镁离子提取剂的水样中,由于随着 Mg^{2+} 浓度的增加,会使水样测定结果偏大,因而针对每毫升水样中镁离子提取剂摩尔量不同的情况,采取绘制出

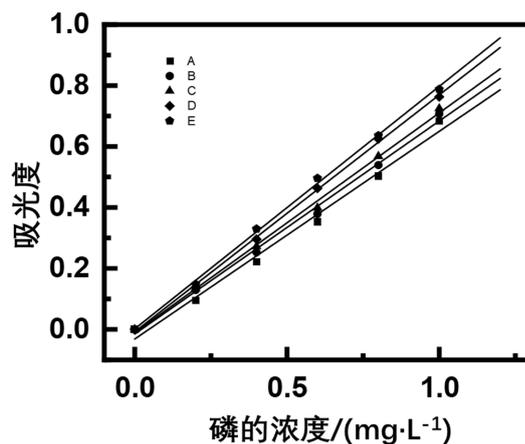


Figure 6. Phosphate working curves under different Mg^{2+} dosages (per mL add A 0.125 mmol, B 0.25 mmol, C 0.375 mmol, D 0.5 mmol, E 0.625 mmol Mg^{2+})

图 6. 不同 MgCl_2 加入量条件下的磷酸盐工作曲线 (每毫升加入 A 0.125 mmol、B 0.25 mmol、C 0.375 mmol、D 0.5 mmol、E 0.625 mmol Mg^{2+})

Table 2. Functional and linear relationships of phosphate working curves under different Mg^{2+} dosages

表 2. 加入不同体积的 MgCl_2 溶液的磷酸盐工作曲线的函数关系和线性关系

图例	实验条件	函数关系	线性关系
A	标准曲线 + 0.125 mmol/mL MgCl_2 溶液	$y = 0.6814x - 0.0314$	$R^2 = 0.9901$
B	标准曲线 + 0.25 mmol/mL MgCl_2 溶液	$y = 0.6987x - 0.0149$	$R^2 = 0.9954$
C	标准曲线 + 0.375 mmol/mL MgCl_2 溶液	$y = 0.7216x - 0.011$	$R^2 = 0.9976$
D	标准曲线 + 0.5 mmol/mL MgCl_2 溶液	$y = 0.7776x - 0.008$	$R^2 = 0.9991$
E	标准曲线 + 0.625 mmol/mL MgCl_2 溶液	$y = 0.7957x + 0.0018$	$R^2 = 0.9985$

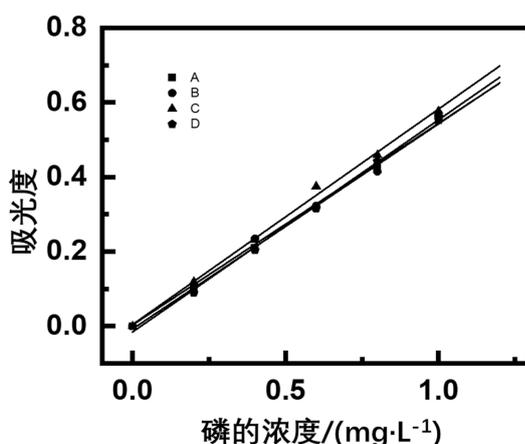


Figure 7. Comparison between phosphate working curve and standard curve after adding different amounts of acid and base (adding A 0, B 0.15 mmol HCl, C 0.15 mmol NaOH, D 0.3 mmol HCl and 0.15 mmol NaOH into per mL phosphate solutions)

图 7. 加入不同量酸、碱后的磷酸盐工作曲线与标准曲线的对比 (每毫升磷酸溶液加入 A 0; B 0.15 mmol HCl、C 0.15 mmol NaOH、D 0.3 mmol HCl 和 0.15 mmol NaOH)

Table 3. Functional and linear relationship between phosphate working curve and standard curve after adding different concentrations of acid and base**表 3.** 加入不同浓度酸、碱后的磷酸盐工作曲线与标准曲线的函数关系和线性关系

图例	实验条件	函数关系	线性关系
A	标准曲线	$y = 0.5506x - 0.0076$	$R^2 = 0.999$
B	标准曲线 + 0.15 mmol/mL 盐酸溶液	$y = 0.541x + 0.0033$	$R^2 = 0.9956$
C	标准曲线 + 0.15 mmol/mL 氢氧化钠溶液	$y = 0.5784x + 0.0043$	$R^2 = 0.997$
D	标准曲线 + 0.3 mmol/mL 盐酸溶液 + 0.15 mmol/mL 氢氧化钠溶液	$y = 0.5694x - 0.0154$	$R^2 = 0.9975$

不同的工作曲线的方式。实验结果如图 6 所示，其线性关系均能达到 0.99 以上，满足实验需求。各条工作曲线的具体参数详见表 2。即针对不同摩尔量镁离子提取剂的水样，通过绘制不同的工作曲线消除镁离子干扰。

3.5. 检验

以磷酸盐标准液作为测定对象，标准曲线为参考，在实验过程中，按照上述控制酸，碱溶液影响的方法，绘制工作曲线，结果如图 7 所示，三条工作曲线均具有较好的线性关系， R^2 均大于 0.99，且与标准曲线接近。详细的函数关系和线性关系见表 3，三条不同条件下的工作曲线的斜率($k = 0.541, 0.5784, 0.5694$)均与标准曲线($k = 0.5506$)接近。能达到满足校正效果的要求。

4. 结论

1) 酸提取剂会对钼锑抗分光光度法的结果产生影响，使测定结果偏低，故在实际应用中应控制好酸提取剂的加入量。应控制每毫升水样中 H^+ 的摩尔量应在 0.15 mmol 内，在加入过量酸提取剂的情况下可采取加入适量体积的碱液调节。以每毫升水样中加入硝酸，盐酸和硫酸提取剂摩尔量在 0.3 mmol 为例，可向每毫升水样中加入 0.15 mmol 摩尔量的碱液，以提高测量结果的准确度。

2) 氢氧化钠提取剂会对钼锑抗分光光度法的结果产生影响，故在实际应用中应控制好氢氧化钠提取剂的加入量，每毫升水样中加入每毫升水样中加入氢氧化钠提取剂摩尔量应在 0.15 mmol 内。

3) 镁离子会对钼锑抗分光光度法的结果产生影响，使测定结果偏高，故在实际应用中应根据实际情况选取合适浓度的 Mg^{2+} 溶液，保证同一组水样中每毫升水样中加入的 Mg^{2+} 提取剂的摩尔量一致，并绘制相对应的工作曲线。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51808415)。

参考文献

- [1] 徐骏. 杭州西湖底泥磷分级分布[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 247-254.
- [2] Penn, M.R., Auer, T., Van Orman, E.L. and Korienek, J.J. (1995) Phosphorus Diagenesis in Lake Sediments: Investigations Using Fractionation Techniques. *Marine and Freshwater Research*, **46**, 89-99. <https://doi.org/10.1071/MF9950089>
- [3] 李君. 杭州市运河水系氮磷污染及底泥磷释放水动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 龚春生. 城市小型浅水湖泊内源污染及环保清淤深度研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [5] 靳郑海. 城市河网区河流沉积物磷释放潜力及原位固磷材料研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2022.
- [6] 崔松波. 湿地表层底泥磷的分布及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.

- [7] 田腾飞, 黄鹏, 刘钰, 等. 城市水体底泥磷元素释放量化方法研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(3): 58-63.
- [8] 李海宗, 潘梅. 富营养化水体底泥磷释放的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(21): 11008-11010+11013.
- [9] 亢增军. 底泥中磷的原位化学控制试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [10] 高湘, 李妍, 何怡. 湖泊底泥磷释放及磷形态变化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3350-3354.
- [11] 俞林伟. 广东省城市湖泊底泥磷形态及其与富营养化的关系[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2006.
- [12] 郝汉舟, 汤民, 张文胜, 等. 水体底泥磷释放及控制研究进展[J]. 绿色科技, 2022, 24(14): 16-22.
- [13] 刘冠男, 董黎明, 王小辉. 湖泊沉积物中三种磷提取方法比较[J]. 岩矿测试, 2011, 30(3): 276-280.
- [14] 朱梦圆, 朱广伟, 钱君龙, 等. SMT 法插标分析沉积物中磷的地球化学形态[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1502-1507.
- [15] Ruban, V., López-Sánchez, J., Pardo, P., *et al.* (2001) Harmonized Protocol and Certified Reference Material for the Determination of Extractable Contents of Phosphorus in Freshwater Sediments—A Synthesis of Recent Works. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, **370**, 224-228. <https://doi.org/10.1007/s002160100753>
- [16] 贺阳, 郭劲松, 付川. SMT 法和酸溶-全消解法测定土壤全磷的比较[J]. 三峡环境与生态, 2009, 2(4): 10-12.
- [17] 白亚亚, 丁梦琦, 盛婕, 等. 固体水处理剂总磷酸盐测定结果的影响因素及优化[J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2019, 19(1): 5-8.
- [18] 侍兵兵. 分光光度法测定固体废弃物中的总磷含量[J]. 中国新技术新产品, 2013(24): 5-6.
- [19] 苏占峰, 孙卫荣. 过硫酸钾消化-分光光度法测定水中总磷方法研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(2): 171-172.
- [20] 黄志学. 环境水质监测质量保证手册[J]. 化工进展, 1989(1): 62-55.
- [21] 吴曼萍. 地表水水质总磷的钼酸铵分光光度法测定[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(11): 222-224+243.
- [22] 辛建珍. 钼酸铵分光光度法测定水中总磷的主要影响因素研究[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(10): 23-25.
- [23] 北京市环保监测中心, 上海市环境监测中心. GB11893-89 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989: 4.
- [24] 魏复盛, 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 784.
- [25] 王文路. 显色酸度对钼锑抗分光光度法测定土壤中总磷的影响[J]. 环境监控与预警, 2015, 7(6): 30-32.
- [26] 沈志群, 张琪, 刘琳娟, 邱燕. 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定土壤中的有效磷[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(5): 12-15.