

成都市五大城区水样中总磷的测定与分析

王彦钦, 颜秋月, 贺盼, 王心杨, 杨禄, 杨怀金, 董银娟*

成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年2月3日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

随着环境保护的力度不断提升, 水环境污染等问题得到了人们的广泛关注。磷是水体富营养化的主要诱因之一, 过量的磷会导致藻类和其他水生植物过度繁殖, 形成“水华”现象。实时监测水体中磷的含量至关重要。分光光度法, 作为一种精密的分析检测技术, 因其高准确性、灵敏度和实用性, 成为测量水体中磷含量的常用手段之一。本论文选取了成都市五大城区的水样, 通过过硫酸钾使试样消解以及与钼酸铵反应, 进而被抗坏血酸还原, 生成蓝色络合物, 对水样中含磷情况进行了测试评估。通过分光光度计装置, 选择190 nm~1100 nm波长的光进行分析, 在光谱上得到700 nm特征峰。通过标准曲线的确定, 计算出样品的吸光值, 推算出水样中磷的浓度。结果显示, 锦江区水样总磷含量最高(0.24 mg/L), 其余各区含量在0.04 mg/L~0.16 mg/L之间。研究表明总磷浓度呈“中游骤升、下游衰减”的空间分布模式以及总磷浓度与各区人口密度及GDP的正相关关系。通过对比分析有助于更好地了解水环境的情况, 这对于环境保护和水质管理具有重要意义。

关键词

分光光度法, 水体, 磷含量, 环境问题, 成都市

Determination and Analysis of Total Phosphorus in Water Samples from the Five Major Urban Areas of Chengdu City

Yanqin Wang, Qiuyue Yan, Pan He, Xinyang Wang, Lu Yang, Huaijin Yang, Yinjuan Dong*

School of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: December 23, 2025; accepted: February 3, 2026; published: February 11, 2026

*通讯作者。

Abstract

With the continuous enhancement of environmental protection efforts, issues such as water pollution have garnered widespread attention. Phosphorus is one of the primary causes of water eutrophication, and excessive phosphorus can lead to the overgrowth of algae and other aquatic plants, resulting in the “water bloom” phenomenon. Real-time monitoring of phosphorus levels in water bodies is crucial. Spectrophotometry, as a precise analytical detection technique, has become one of the common methods for measuring phosphorus content in water due to its high accuracy, sensitivity, and practicality. This paper selected water samples from five major urban districts in Chengdu, digested the samples with potassium persulfate, and then reacted them with ammonium molybdate, followed by reduction with ascorbic acid to form a blue complex, thereby testing and evaluating the phosphorus content in the samples. Using a spectrophotometer device, light with wavelengths ranging from 190 to 1100 nm was selected for analysis, yielding a characteristic peak at 700 nm on the spectrum. By determining the standard curve, the absorbance values of the samples were calculated, and the phosphorus concentration in the water samples was estimated. The results showed that the Jinjiang District had the highest total phosphorus content (0.24 mg/L), while the contents in the other districts ranged between 0.04 and 0.16 mg/L. The study revealed a spatial distribution pattern of total phosphorus concentration characterized by a “sudden rise in the middle reaches and decline in the downstream,” as well as a positive correlation between total phosphorus concentration and the population density and GDP of each district. Comparative analysis helps us better understand the state of water environments, which is of great significance for environmental protection and water quality management.

Keywords

Spectrophotometry, Water Bodies, Phosphorus Content, Environmental Issues, Chengdu City

Copyright © 2026 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

随着工业化和城市化的快速推进，水体中磷的排放和积累问题愈发凸显，成为了全球范围内关注的水污染问题之一。2023年8月，上海科技报曾报道：全国生态日聚焦水污染问题——污水中的磷将“变废为宝”发出后，水环境问题得到广泛关注。在此之前，2019年，安陆市解放山水库出现“水华”现象，使大量居民用水困难。磷是水体富营养化的主要诱因之一，过量的磷会导致藻类和其他水生植物过度繁殖，形成“水华”现象[1]，这不仅会破坏水体的生态平衡，还会对水生生物和人类的健康产生严重影响。因此，实时监测水环境中磷的含量至关重要。

在农业领域[2]及时了解土壤和水体中的磷含量，合理调节施肥和农药使用量，减少磷的排放，保护农田和水体健康。在工业用水[3]和食品用水[4]处理过程中，监测水中总磷的含量，保障供水的安全和质量。目前，国内外比较普遍的测量水体中磷含量的测量方法是分光光度法，其测磷的原因主要是其高准确性、灵敏度和实用性[5]。分光光度法基于朗伯(Lambert) - 比尔(Beer)定律，该定律表明溶液的吸光度与溶液的浓度和液层厚度的乘积成正比。这一原理确保了分光光度法在测量磷含量时的准确性。分光光度法通过测量被测物质在特定波长处或一定波长范围内光的吸收度，对该物质进行定性和定量分析。这种方法能够检测到溶液中微量的磷，因此具有很高的灵敏度。

2. 方法与原理

2.1. 实验仪器

日本岛津 SHIMADZUUV-2600 型紫外可见光分光光度计；XS204 型电子天平。

2.2. 实验材料

实验材料如下表 1。

Table 1. Experimental material
表 1. 实验材料

实验药品	制备方法
5%过硫酸钾溶液	溶解 5 g 过硫酸钾于水中，稀至 100 mL 纯水中
硫酸	1:1 比例
10%抗坏血酸溶液	溶解 10 g 抗坏血酸于纯水中，稀释至 100 mL。该溶液贮于棕色玻璃瓶中，冷处存放。
钼酸盐溶液	溶解 13 g 钼酸铵于 100 mL 水中。溶解 0.35 g 酒石酸锑氧钾于 100 mL 纯水中。搅拌下，将钼酸铵溶液缓缓倒入 300 mL (1:1)硫酸中，再加入酒石酸锑氧钾溶液混匀
磷酸盐贮备液	称取于 110°C 干燥 2 h 的磷酸二氢钾 0.2197 g 溶于纯水，转移入 1000 mL 容量瓶中，加(1:1)硫酸 5 ml，用纯水稀至标线。此溶液每毫升含 50.0 μg 磷
磷酸盐标准溶液	吸取 10.00 ml 磷酸盐贮备液于 250 mL 容量瓶中，用纯水稀至标线。此标准溶液每毫升含 2.00 μg 磷

2.3. 实验步骤

2.3.1. 标准曲线的绘制

- (1) 准备好 6 支比色管，标好编号，将标准曲线比色管按 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.12 mg/L 配置好后用纯水定容到 25 mL。
- (2) 再用灭菌锅消解。
- (3) 取出冷却后，将全部比色管用纯水定容到 50 mL。再依次按编号加入 1 mL 的配好的抗坏血酸溶液，全部加入完后再按序加入 2 mL 的配好的钼氨酸溶液，摇匀，静置 20 min。
- (4) 依次将待测液装入比色皿，用分光光度计测量其吸光度。
- (5) 记录测量结果，绘制标准曲线。

2.3.2. 水体中磷的测定

- (1) 采样：我们选取了五大城区的两个点位进行水样采取，双流区(N: 30.341 E: 103.922 N: 30.337 E: 103.993)锦江区(N: 30.575 E: 104.1376 N: 30.570 E: 104.1547)武侯区(N: 30.567 E: 104.064 N: 30.540 E: 104.051)青羊区(N: 30.663 E: 104.04 N: 30.660 E: 104.025)成华区(N: 30.665 E: 104.091 N: 30.667 E: 104.112)。选取区域后，使用采样器于河流或湖泊中间部分展开对水面下 0 cm~50 cm 的水体进行采取，放置到 50 mL 离心管中。
- (2) 消解：先取一定量的水样，加入配制好的硫酸使其酸化。再向水样中加入钼酸铵溶液、锑酸钾溶液和抗坏血酸溶液，混合均匀后静置一段时间，使显色反应完全。同时用去离子水代替水样，按照相同的步骤制备空白溶液。
- (3) 检测：使用分光光度计测量其吸光度，在测量时，将盛参比溶液的比色皿放在卡槽中的第一个位置，再将另一个比色皿倒入四分之三的待测溶液，用专业的擦拭纸擦去器皿表面附着液体，放入最后一

个卡槽中，在特定的波长(通常为 700 nm)下测量样品溶液和空白溶液的吸光度。

(4) 分析结果：最后根据标准曲线的数据，通过吸光度差值计算出样品中磷的浓度。

2.4. 实验原理

经研究，目前检测最大有效范围方法是钼酸盐分光光度法[6]，其原理如图 1。

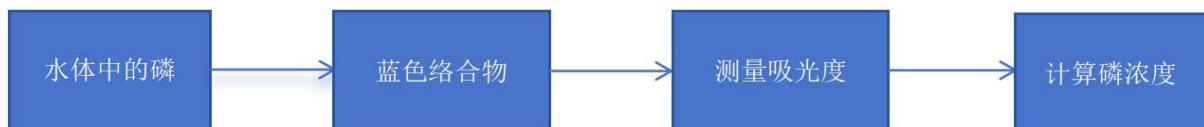


Figure 1. The experimental principle of molybdate spectrophotometry

图 1. 钼酸盐分光光度法实验原理

在中性条件下，使用过硫酸钾(或硝酸 - 高氯酸)作为氧化剂，将水样中的磷(包括溶解的、颗粒的、有机的和无机磷)全部氧化为正磷酸盐。在酸性介质中，正磷酸盐与钼酸铵反应，并在锑盐的存在下生成磷钼杂多酸。磷钼杂多酸随后被抗坏血酸还原，生成一种蓝色的络合物。通过分光光度计装置，选择 700 nm 波长的光进行分析，在光谱上得到磷的特征峰。通过对比已知浓度的磷标准溶液的吸光度，可以计算出水样中磷的浓度[7]。

3. 结果与讨论

3.1. 标准曲线的绘制

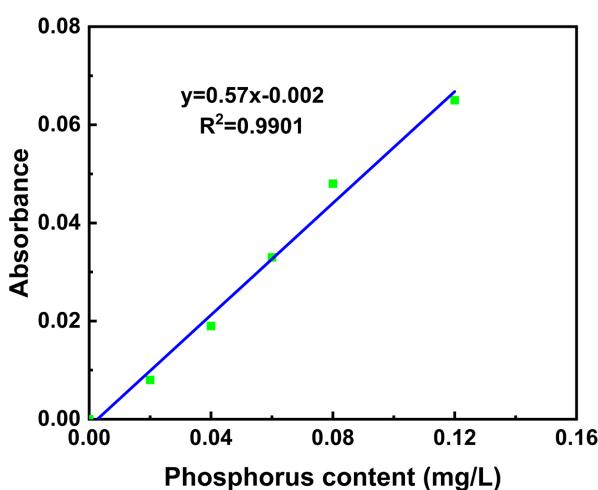


Figure 2. Standard curve of standard samples
图 2. 标准样品的标准曲线

通过利用分光光度计对配制的标准溶液测试，我们得到了吸光度与磷含量的线性关系，进而绘图，形成了标准曲线如图 2 所示。

3.2. 各区域与国标的对比分析

各地区样品吸光度和磷含量如表 3，将样品测试的磷含量与国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中III类标准的磷含量(0.2 mg/L)相比较，发现双流样品、武侯样品、成华样品、青羊样品的磷含量均

小于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中磷含量,而锦江样品磷含量大于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中磷含量。这可能是因为(1) 锦江区人口密度约为21,800人/平方公里,远大于青羊区:约8100人/平方公里;武侯区:约15,500人/平方公里;成华区:约10,900人/平方公里;双流区:约1600人/平方公里,密集的人口增加了磷的排放,使得锦江区总磷含量超标。(2) 锦江区作为成都市的中心城区之一,其工业发展在多个方面展现出了较为发达的特点。锦江区的产业特色鲜明,以商贸见长,截至2019年,已入驻世界500强企业127家。发达的工商业使得排污增加,因此,水体中总磷含量偏高。这一结论也进一步证实了分光光度法测磷的可靠性。

Table 2. The phosphorus content in terms of absorbance for different samples
表2. 不同样品对于吸光度的磷含量

地区	样品吸光度	平均值	磷含量(mg/L)
双流区	0.143, 0.136	0.1395	0.06
锦江区	0.551, 0.566	0.5585	0.24
武侯区	0.382, 0.373	0.3775	0.16
成华区	0.346, 0.338	0.3420	0.15
青羊区	0.264, 0.297	0.2805	0.12

3.3. 各区域与文献的对比分析

Table 3. Comparison of experimental data with literature data (unit: mg/L)
表3. 实验数据与文献数据对比(单位(mg/L))

	双流区	锦江区	武侯区	成华区	青羊区
文献数据	0.04	0.05	0.04	0.09	0.12
实验数据	0.06	0.24	0.16	0.15	0.04

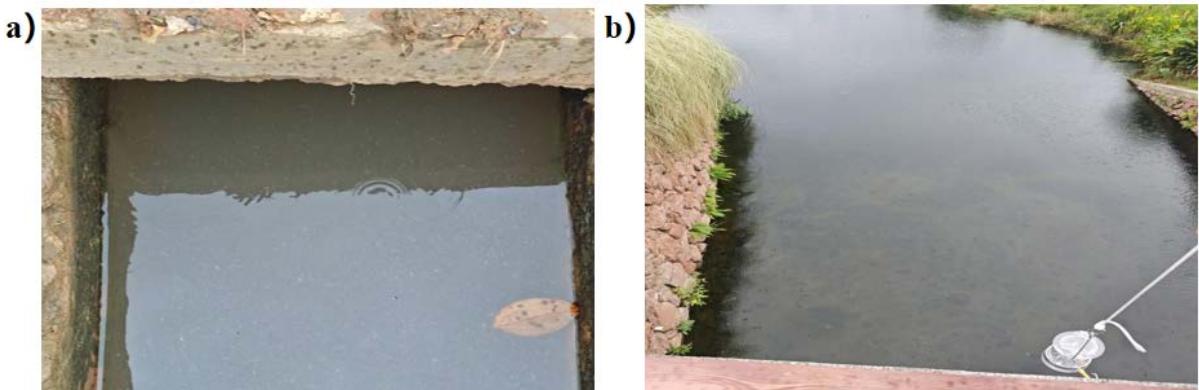


Figure 3. a) The underground channel near the farmland; b) The stream near the farmland
图3. a) 农田附近的暗渠; b) 农田附近的溪流

实验测得数据与文献数据[8] (取最近采样地点数据)相比,实验数据均存在不同程度的偏高,可能是由于:(1) 实验所取水样来自农田附近的暗渠或溪流,农药排放使得水中总磷含量偏高(图3(a)、图3(b)),而文献中水样主要取自生态景观湖泊,水质良好,富营养化程度不高,因而总磷含量较低。(2) 这种误差

还可能来自实验操作，例如分光光度计光源不稳定，发生了波长漂移；消解过度导致非磷化合物转化为磷，干扰测定；实验未在完全避光的条件下进行，导致显色产物发生变化；磷钼蓝吸附在比色皿上未彻底清洗等。双流区实验数据与文献数据相近，可能是因为双流区取样点位于城郊，污染不严重，所以农业灌溉用水与生态景观用水水质相近。这一点也证实了分光光度法测总磷的准确性和可靠性。

3.4. 各区域之间的对比分析

3.4.1. 总磷浓度与地理点位的关系

本研究在成都锦江水系流经的五大核心城区(青羊区、成华区、锦江区、武侯区、双流区)共布设 10 个采样点位。所有点位均位于该水系的主干河道或关键支流上，构成了一个完整的上下游监测断面。其空间关系为：青羊区点位与成华区点位分别位于南河与府河的上游段；两条支流于锦江区合江亭汇合形成锦江干流；锦江区点位位于干流中游，其下游依次为武侯区点位与双流区点位。水质分析显示，总磷浓度沿程呈非单调性变化：上游青羊区与成华区浓度分别为 0.12 mg/L 和 0.15 mg/L；至中游锦江区点位浓度骤升至 0.24 mg/L，出现显著峰值；随后在下游武侯区与双流区点位浓度逐级下降至 0.16 mg/L 和 0.06 mg/L。这一“中游骤升、下游衰减”的空间分布模式表明，研究河段的磷污染并非呈现简单的顺流累积效应，而是强烈受到中游河段外源输入(如城市排放)与下游河段自然净化(如稀释、沉降及生物作用)两个关键过程共同调控的结果。

磷浓度峰值出现在锦江区(锦江干流中游)，直接反映了成都市中心城区合流制管网溢流、污水管网长期带压运行及污水处理能力不足等系统性问题的集中爆发，该区域汇集了上游老城区因管网老化与雨污分流不彻底产生的生活污水渗漏和地表径流污染。上游青羊、成华区的基础浓度则体现了管网历史遗留的结构性问题。而下游双流区浓度的显著降低，表明在点源与面源输入减弱后，河流具备一定的自净与稀释能力。该污染分布模式印证了《成都市城市防洪规划》及相关研究所指出的管网瓶颈，并明确了未来治理需以削减中游污染负荷为核心，通过持续推进深层排水管网改造、彻底雨污分流、污水处理厂提质扩能以及海绵城市建设等系统性工程，方能实现水环境的根本改善。

3.4.2. 总磷浓度与人口密度以及年 GDP 的关系

各区域总磷浓度与人口密度(图 4(a))以及总磷浓度与年 GDP (图 4(b))的关系如图所示。

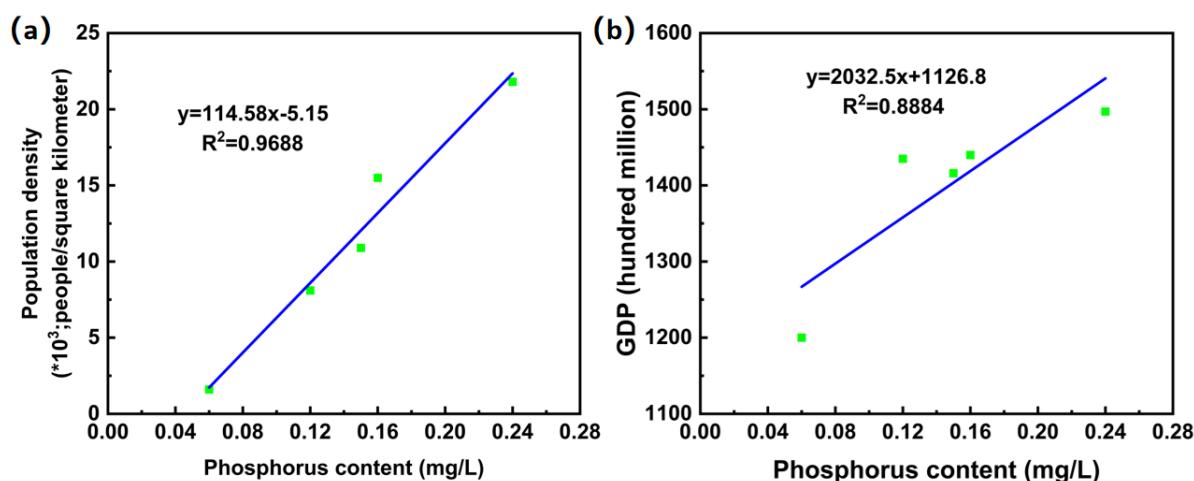


Figure 4. (a) Relationship between total phosphorus concentration and population density; (b) Relationship between total phosphorus concentration and annual GDP

图 4. (a) 总磷浓度与人口密度；(b) 总磷浓度与年 GDP 关系图

以人口密度和年 GDP 作为地区发达程度的评判标准,由图 4 可以得知,总磷浓度与区域人口密度,GDP 均成正相关。由此我们可以得出结论:区域越发达,水体中总磷含量越高,发生富营养化的风险就越大。因此,我们应加大对更发达区域的监管力度,减少水华现象对经济和生活带来的损失。

4. 结论

随着水体富营养化和水华问题的日益严峻,对水中磷含量的准确监测和控制将变得尤为重要。本研究采用钼酸铵紫外分光光度法成功测定了成都五大城区水中磷的含量。该方法基于过硫酸钾消解水样,将磷转化为正磷酸盐,随后在酸性条件下与钼酸铵反应生成蓝色的磷钼杂多酸络合物,并通过紫外分光光度计在 700 nm 波长下测定其吸光度,从而间接计算出水中磷的浓度。实验结果表明,该方法具有较高的准确度和精密度,适用于不同类型水样的磷含量测定。研究发现,当水体中的磷浓度超过一定阈值时,水华的发生风险显著增加。研究发现水体中的磷浓度呈“中游骤升、下游衰减”的空间分布模式,河段的磷污染并非呈现简单的顺流累积效应。区域人口越密集或区域地理点位越劣势,水体中总磷含量越高,发生富营养化的风险就越大。因此,针对当前研究中存在的问题和不足,应加大对更发达区域的监管力度,减少水华现象对经济和生活带来的损失,同时,我们可以在优化测定方法材料方面做出改进。

基金项目

本研究受成都信息工程大学人才引进项目资助(资助号: KYTZ2022140)和国家级大学生创新创业项目资助(资助号: 202410621042)。

参考文献

- [1] 邓连森,李亚群,高杰,于雪松,梁梓豪,姚婧梅,韩乐.苏氏尾鳃蚓扰动下膜曝气生物膜对富营养化水体氮磷去除的研究[J/OL].中国环境科学,1-9.<https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250923.010>,2025-09-24.
- [2] Xu, J., Lin, K., Huang, Y., Guo, Q., Li, H. and Yuan, D. (2019) Development of an Online Analyzer for Determination of Total Phosphorus in Industrial Circulating Cooling Water with UV Photooxidation Digestion and Spectrophotometric Detection. *Talanta*, **201**, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.03.094>
- [3] 韩瑞,李小辉,孙慧莹,王曼曼,朱好杰,陈亚杰,郭金,杨奇.基于在线紫外消解-磷钼蓝分光光度法的流动注射分析法测定污水处理站进、出水中总磷的含量[J/OL].理化检验-化学分册,2025: 1-7.<https://link.cnki.net/urlid/31.1337.TB.20250915.1631.002>,2025-09-15.
- [4] Zaporozhets, O.A., Zin'ko, L.S. and Kachan, I.A. (2007) Solid-Phase-Spectrophotometric and Test Determination of Simultaneously Present Phosphorus Forms (Phosphorus Speciation) in Water. *Journal of Analytical Chemistry*, **62**, 1146-1150. <https://doi.org/10.1134/s1061934807120088>
- [5] Li, Y., Luo, Q., Hu, R., Chen, Z. and Qiu, P. (2018) A Sensitive and Rapid UV-Vis Spectrophotometry for Organophosphorus Pesticides Detection Based on Ytterbium (Yb^{3+}) Functionalized Gold Nanoparticle. *Chinese Chemical Letters*, **29**, 1845-1848. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2018.11.016>
- [6] Jastrzębska, A., Brudka, B., Szymański, T. and Szłyk, E. (2003) Determination of Phosphorus in Food Samples by X-Ray Fluorescence Spectrometry and Standard Spectrophotometric Method. *Food Chemistry*, **83**, 463-467. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(03\)00225-5](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(03)00225-5)
- [7] Scroggins, L.H. (1968) Spectrophotometric Microchemical Phosphorus Determination: A Quantitative Oxygen Flask Procedure Applicable to Problem Organophosphorus Compounds. *Microchemical Journal*, **13**, 385-391. [https://doi.org/10.1016/0026-265x\(68\)90103-3](https://doi.org/10.1016/0026-265x(68)90103-3)
- [8] 成都市生态环境局. 2024 年成都市地表水环境质量状况[EB/OL].https://sthj.chengdu.gov.cn/cdhbj/c110806/2025-03/11/content_11825a18172047318952e5c2056d6f8e.shtml,2025-02-10.