

云南高原典型湖泊水样氮磷含量 随低温储存时间的变化

蔡萌 张虎才 常凤琴 李婷 胡京九 段立曾 张扬¹

(云南大学生态学与环境学院/高原湖泊生态与治理研究院高原湖泊生态与
环境变化实验室, 云南 昆明 650504)

【摘要】: 总氮(TN)、总磷(TP)是评价湖泊水体富营养化的主要指标,而实验分析中的总氮、总磷含量的测定结果受诸多因素(如水样储存方式、储存时间和氮磷赋存状态等)的影响,易造成分析数据的不稳定性。对于云南典型喀斯特地区湖泊水体氮磷含量分析而言,特别是在采样点距实验室距离远、样品数量多的情况下,不能按实验分析标准要求时间完成分析。该研究针对云南九大高原典型湖泊的特殊性和在大批量样品采集、远距离搬运、实验分析需要一定时间的实际情况,选择3个氮磷含量差异较大的抚仙湖、阳宗海和滇池为研究对象,对采样后样品在低温储存条件下随测定时间而发生变化进行分析,探讨样品 TN、TP 和溶解态氮(DN)、溶解态磷(DP)含量的变化特征,以确定最佳的实验分析时间。研究结果表明:(1)采样后即进行氮磷含量分析结果显示:3个湖泊水样氮磷含量差别明显,同时存在状态不相一致,滇池样品中氮磷含量最高,其 TN 含量为 2.44mg/L, DN 含量为 1.47mg/L, 占总氮的 60%, TP 含量为 0.13mg/L, DP 含量为 0.02mg/L, 占总磷的 15%;阳宗海次之,其中 TN 含量为 0.73mg/L, DN 含量为 0.60mg/L, 占总氮的 82%, TP 含量为 0.04mg/L, DP 含量为 0.03mg/L, 占总磷的 75%;抚仙湖最低,其中 TN 含量为 0.32mg/L, DN 含量为 0.28mg/L, 占总氮的 90%, TP 含量为 0.02mg/L, DP 含量为 0.01mg/L, 占总磷的 50%;(2)样品在低温室(3℃~4℃)随着静置时间的增长, TN、TP 含量均呈现降低趋势,说明静置时间对其有影响;其中滇池和阳宗海水样总氮总磷含量降低幅度较大,而抚仙湖较小;(3)样品经过滤后,滇池和阳宗海的水样氮磷含量呈现降低趋势,而抚仙湖则无明显变化。样品储存时间、过滤处理对氮磷含量低的湖泊水样影响较小,对氮磷含量大的湖泊影响较大,尤其是颗粒态氮磷含量较高的样品。由于水样中氮磷存在多种形态,湖泊营养程度不同,在对水样进行氮磷含量测定时,应当考虑水样储存时间和氮磷赋存状态等因素。

【关键词】: 总氮(TN) 总磷(TP) 对比分析 滇池 阳宗海 抚仙湖

【中图分类号】: P342.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)12-3029-09

总氮(TN)、总磷(TP)是衡量水质的重要常规指标^[1]。随着人类活动的不断加剧,湖泊水体中有机氮磷化合物含量持续增加,并在很多湖泊或水库水体中大量积累,导致水生生物大量繁殖,造成水体溶解氧(DO)含量降低、水质恶化,形成日趋严重的富营养化^[2]、蓝藻水华频繁爆发,如滇池等湖泊中形成常态化的蓝藻爆发现象。氮、磷营养元素赋存形态及其空间分布格局明显影响湖泊生态系统的诸多过程,从而支配着整个生态系统的生产力水平和湖泊富营养化进程,是湖泊富营养化及其水华暴发机理研究的核心课

作者简介: 蔡萌(1993-),女,硕士研究生,主要从事湖泊沉积与环境变化方面研究. E-mail:765208669@qq.com; 张虎才 E-mail:zhanghc@ynu.edu.cn

基金项目: 云南省领军人才项目(2015HA024);云南省高端人才引进项目(2010CI111)。

题之一^[3~5]。因此精确测定和正确评估 TP、TN 对于认识湖泊营养水平、开展湖泊生态管理具有重要的意义。

天然水体中氮的赋存状态包括溶解游离态氮、硝酸态氮、亚硝酸态氮和铵态氮;磷的赋存状态包括溶解态无机磷、溶解态有机磷和颗粒磷^[6]。对于各种地表水体水质指标而言, TN、TP 是两项必测项目。TN 的消化原理是将有机氮、无机氮转化成硝酸盐氮, TP 的消化原理是将有机磷和各种形式的磷酸盐转化成正磷酸盐^[7]。国家标准对水质 TN 的测定采用《水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》GB11894-1989^[8], 对水质 TP 的测定采用《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》GD11893-89^[9]。国家标准对 TN、TP 的测定均比较复杂, 都需要在高温和高压条件下消解, 且消解温度、时间和试剂均对测定结果有很大影响, 操作过程较繁琐, 给批量测定环境样品带来很大的不便^[10]。不仅如此, TN、TP 含量测定的准确性受到诸多因素的影响, 如采样后运输过程中的储存方式、样品带回实验室后的储存方式、样品测定的时间、样品测定的方法以及实验步骤等^[11]。以往的研究主要集中在沉积物氮磷的赋存状态分析, 如张路等^[12], 俞海桥等^[13], 刘静静等^[14], 张奇等^[15]研究了氮磷在沉积物中时空分布及赋存状态。磷作为富营养化的主要元素, 其研究尤为关键, 但在不同环境条件下水体中磷的赋存状态和分布存在很大差别, 影响因素也多种多样。例如, 在含有大量颗粒悬浮物的水体中, 磷不但可以吸附于悬浮颗粒物表面^[16~17], 也可以 Ca-P、Fe-P、闭蓄态磷等形式存在于矿物颗粒中^[18~19], 所以, 所采水样在静置 30min 或过滤过程中部分磷会随悬浮颗粒物的沉淀而损失。这个过程, 受悬浮颗粒物组成、粒径分布与悬浮颗粒物浓度的控制和影响^[20~21], 长江三峡河流域的研究结果表明, 悬浮颗粒物浓度与总磷之间的关系, 可以用非线性回归方法得出的经验关系式进行计算和校正^[22]。另外, 研究表明, 沉积物的化学组成、粒度分布和 pH 对磷酸盐具有显著的吸附作用^[16~17, 23]。

而对大批量、远距离水样即是在低温下运输和实验室储存、但不能立即进行实验分析的情况下, 样品不同赋存状态的氮磷含量发生了什么样的变化、在什么时间内获得分析数据仍然可靠这样实际问题研究较少。针对这一问题, 设计本实验来检验不同氮磷含量水样在低温储存过程中总氮总磷含量随时间的变化, 以确定远距离搬运、大批量样品最佳的分析测试时间。

云南九大湖泊是我国西南地区湖泊群主要的湖泊, 属典型的喀斯特地区高原湖泊, 具有分布地势高、主要受南亚季风气候干湿两季影响、干季日照时间长且流域气温日较差大于年较差的特点, 水体中以溶解态元素为主, 颗粒物物质仅分布在入湖口附近, 其它地方固体颗粒含量很低。由于不论地域偏僻与否、交通状况如何、自然环境优劣, 湖泊流域总是人类居住、生活的主要地区, 随着湖区社会经济的快速发展, 湖泊出现不同程度的富营养化。为了客观而准确的评价湖泊水质状况, 就需要在面上、断面上采集大量的样品进行分析。由于云南九大湖泊水域面积较大, 营养元素和污染物输入源不但多而且分散, 特别是对如滇池这样的大型湖泊更是需要多点密集采集样品进行分析才能获得湖泊水体氮磷含量的基本特征^[24], 这样, 不论从采样所需时间、样品运输和实验室处理均需要一定的时间, 不可能在国标要求的时间内完成分析测试, 面临要么根据分析时间限制来采集有限的样品进行分析测试, 但存在不能客观的反映湖泊水质实际情况, 要么采集足够的样品数量, 但又受到必须在规定时间内必须完成分析测试的困境。故而探讨样品低温运输和储存时间对于水样氮磷含量的影响、探讨是否可以在一定时间段内获得可用分析数据就成为必须考虑的问题。为此, 本文选择抚仙湖、阳宗海和滇池 3 个氮磷含量差异较大、富营养化程度不同的代表性湖泊水样进行分析, 探讨低温储存不同时间下 TN、TP 的变化特征, 分析不同时间间隔对氮磷含量测定的影响, 最后探究出针对不同氮磷含量水体的最佳测定时间, 以保证分析结果的可靠性和代表性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

抚仙湖是半封闭的高原深水断陷湖泊, 为云南九大高原湖泊中的贫营养型湖泊之一^[25]。李荫玺等^[26], 曹言等^[27], 肖蕾等^[28]对抚仙湖的氮磷含量进行了分析。从抚仙湖 2008~2014 年氮磷含量分析结果得出, 抚仙湖总体水质为 I 类水, 但 TN 和 TP 含量的变化较为明显, 其中 TP 由无变有, 其含量平均值为 0.0056mg/L, TN 含量上升的趋势较为明显^[29]。滇池是我国第六大淡水湖, 水体透明度均小于 1m, 草海呈现黄绿色, 外海呈现褐绿色, 每年 4~11 月水华频繁爆发^[30], 张虎才等^[24]、李杰等^[31]、张治中^[32]、贺克雕^[33]对滇池的水质进行了研究, 2014~2015 年滇池 TN、TP 含量变化范围分别为 1.502~12.012mg/L 和 0.078~0.980mg/L。需要特别指

出的是,分析测试结果显示,不同点、不同水深、不同季节湖泊水体氮磷含量均存在较明显的变化和不同^[24]。阳宗海是一个封闭性高原深水湖泊,多年平均水质为III类,营养化程度为中度营养化^[34],1997年以来阳宗海水质总体上呈现改善趋势,但浓度仍处于相当高的水平^[35]。2008年6月,阳宗海发生严重砷污染事故,成为备受关注的有毒重金属污染事件^[36]。

1.2 样品采集

为了能够对富营养化程度不同的湖泊水样氮磷含量随低温储存时间的变化有一个系统的了解和认识,我们选择了目前保持为I类水质的抚仙湖、III类水质的阳宗海和V类水质的滇池进行采样。具体采样信息见表1。

表1 样品采样点位置及其他相关信息

| 湖名 | 采样编号 | 坐标位置 | 样点水深(m) | 采样量 | 营养水平 |
|-----|------|-------------------------------|---------|-----|------|
| 抚仙湖 | A | 24° 25' 36" N, 102° 52' 41" E | 96 | 25L | 贫 |
| | B | 24° 31' 41" N, 102° 53' 04" E | 100 | 25L | |
| | C | 24° 36' 34" N, 102° 53' 37" E | 80 | 25L | |
| 阳宗海 | S1 | 24° 52' 57" N, 102° 59' 41" E | 26 | 25L | 中 |
| | S2 | 24° 54' 40" N, 103° 00' 17" E | 28 | 25L | |
| 滇池 | D | 24° 50' 27" N, 102° 46' 09" E | 3 | 25L | 富 |

1.3 实验方法

1.3.1 样品采集、运输及储存

对滇池、阳宗海、抚仙湖湖水采样用保温箱运回实验室后,分成原样和用0.45 μm 滤头进行过滤样品两份,依国标测定法进行分析,并将两份剩余样品低温储存(<6°C),按设计时间间隔进行分析。

1.3.2 时间间隔

第一阶段:采样后第1天间隔2h重复实验5次;第二阶段:第2天开始间隔24h重复实验7次;第三阶段:之后间隔7d重复实验5次。实验周期为40d。

1.3.3 数据处理

实验数据用 SPSS18.0 软件统计分析, 单因素方差分析不同预处理方式、不同时间间隔测得的氮磷含量差异, 并利用 Grapher10、Sigma Plot10.0 作图。本文对抚仙湖 3 个采样点和阳宗海两个采样点取平均值进行分析。

2 结果与分析

3 个湖泊水样采集后即刻氮磷含量分析结果如图 1 所示。从图 1 可以看出, 滇池样品中氮磷含量最高, 其中 TN 含量高达 2.44mg/L, 而溶解态氮(DN)含量为 1.47mg/L, 占 TN 的 60%, 在 3 湖对比中其 DN 所占 TN 百分比最低; TP 含量为 0.13mg/L, 溶解态磷(DP)含量为 0.02mg/L, 占 TP 的 15%, 是 3 湖中 DP 含量所占 TP 百分比最低的; 阳宗海样品 TN 含量为 0.73mg/L, DN 含量为 0.60mg/L, 占 TN 的 82%, TP 含量为 0.04mg/L, DP 含量为 0.03mg/L, 占 TP 的 75%; 抚仙湖样品 TN 含量为 0.32mg/L, DN 含量为 0.28mg/L, 占 TN 的 90%, TP 含量为 0.02mg/L, DP 含量为 0.01mg/L, 占 TP 的 50%。

实验 40d 后, 抚仙湖湖水和阳宗海湖水样品 TN 分别从 0.38、0.93mg/L 下降为 0.28、0.7mg/L, 分别下降 28%和 23%, TP 分别从 0.026、0.049mg/L 下降为 0.018、0.035mg/L, 分别下降 30%和 29%; DN 分别从 0.37、0.70mg/L 下降为 0.26、0.43mg/L, 分别下降 30%和 39%; TP 含量分别从 0.019、0.034mg/L 下降为 0.013、0.022mg/L, 下降量分别为 32%和 35%(图 2、图 3)。相对而言, 滇池湖水氮磷含量发生了显著变化, TN、TP 分别从 3.3、0.17mg/L 下降为 1.5、0.06mg/L, 分别下降 55%和 65%; DN、DP 含量分别从 2.07、0.058mg/L 下降为 0.7、0.03mg/L, 分别下降 66%和 48%(图 4)。从进行分析的不同时间间隔看, 抚仙湖湖水和阳宗海湖水 TN、DN、TP 和 DP 在第一阶段(即采样后第一天)、第二阶段(即采样后一周内)分别采用未过滤和过滤测得的结果变化趋势较稳定, TN、DN 分别减少了 5%、11%和 5%、14%, 而在第三阶段(采样后一周至第 40 天)测得的含量呈急转下降趋势; 滇池水样在三个阶段测得的氮磷含量结果呈下降趋势。从数值上看, 抚仙湖湖水和阳宗海湖水中 TN、DN、TP 和 DP 含量相差较小, 表明水体中主要以溶解性的氮磷存在, 颗粒状的氮磷含有量较少。而滇池水样中 TN、DN、TP 和 DP 含量相差较大, 这种变化的差异性表明, 滇池水体中高总氮总磷含量显著变化受到氮磷赋存状态的控制和影响。

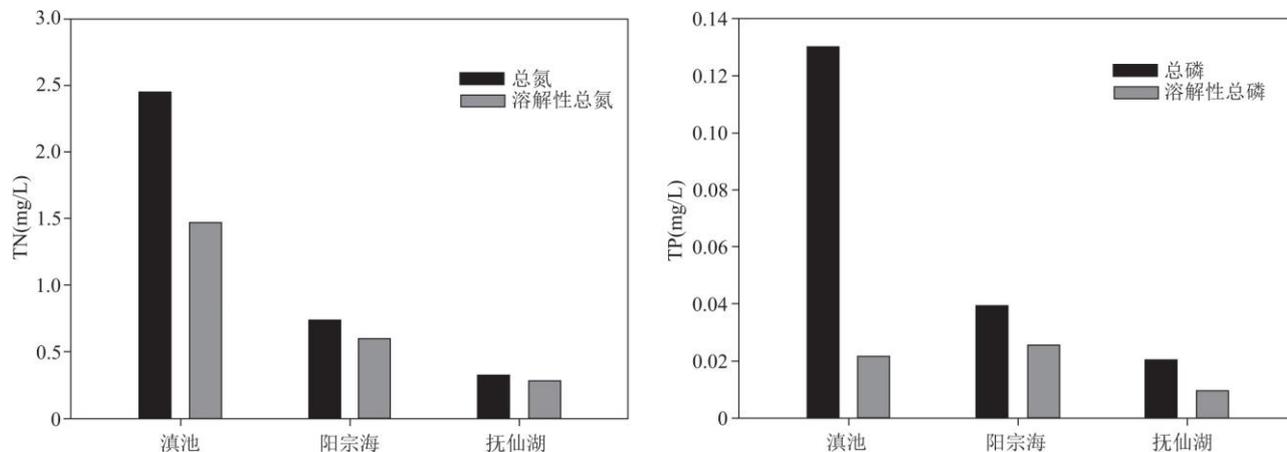


图 1 三个湖湖水样品 TN、TP 含量对比

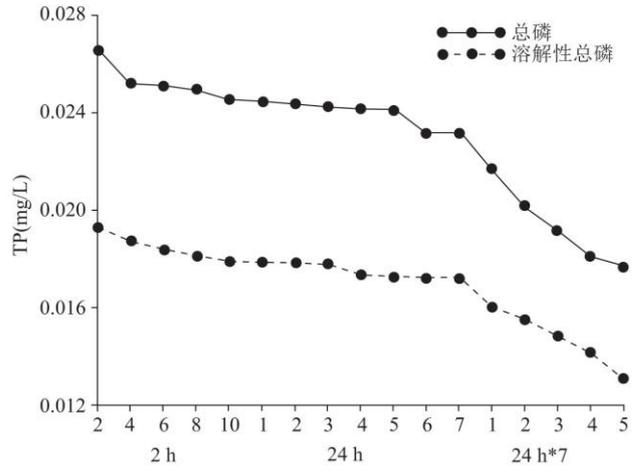
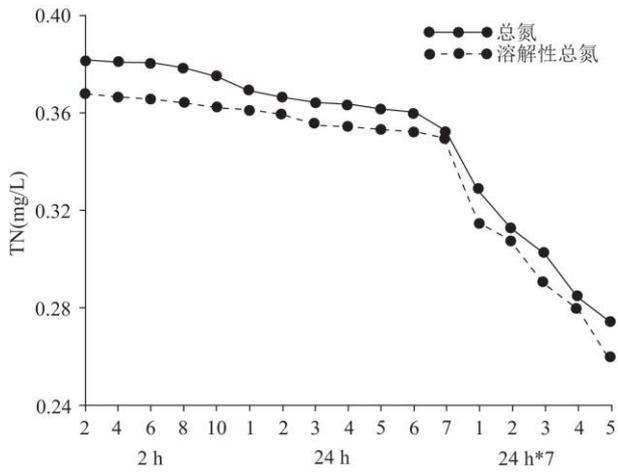


图2 抚仙湖湖水样品 TN、TP 含量变化趋势

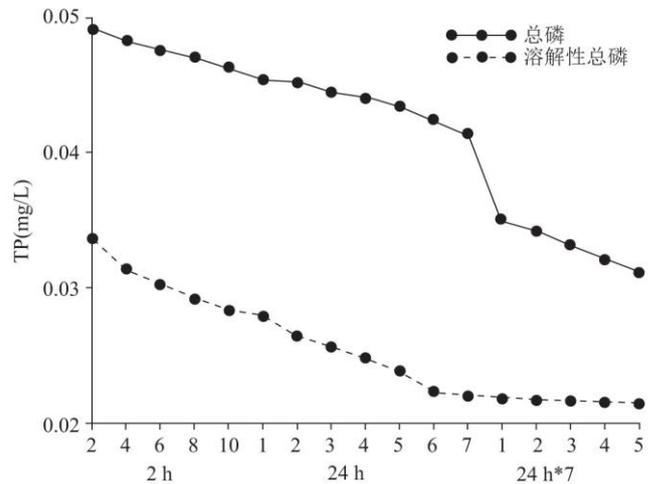
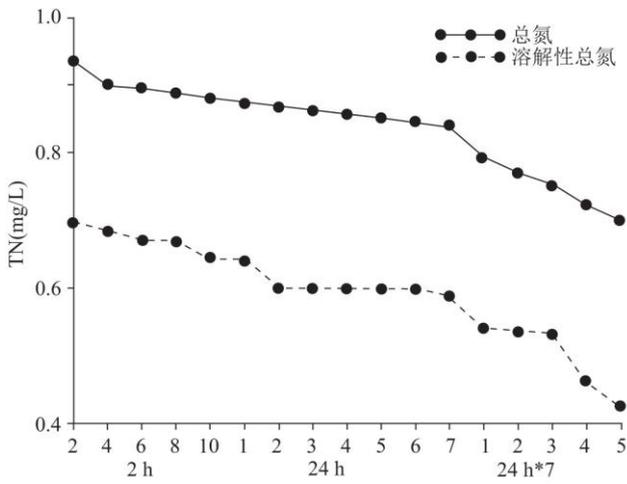


图3 阳宗海湖水 TN、TP 含量变化趋势

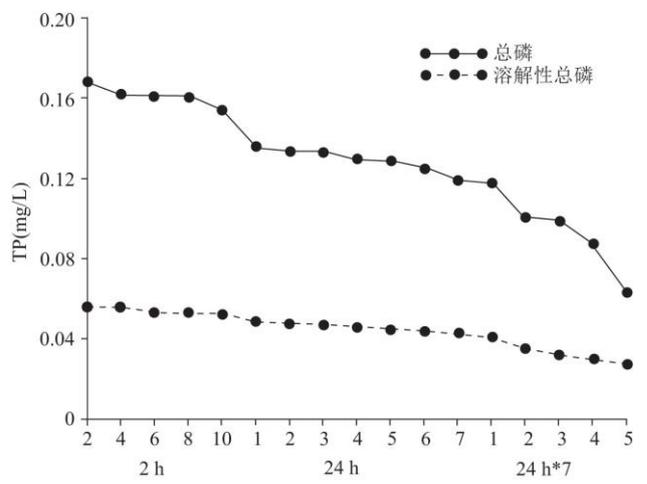
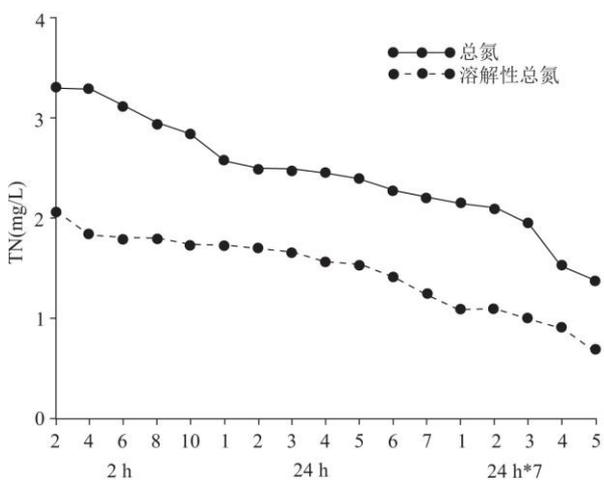


图 4 滇池湖水样品 TN、TP 含量变化趋势

3 讨论

3.1 总氮磷和溶解性总氮磷含量变化的对比

如前所述,湖泊水样氮磷一般分为 12 种:即硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、有机氮、溶解性总氮、颗粒态总氮、总氮;磷酸根磷、有机磷、溶解性总磷、颗粒态总磷、总磷。过滤会减少水样中含氮含磷的颗粒态物质,故而造成氮磷含量会降低。本研究中,抚仙湖、阳宗海湖水总氮、溶解性总氮、总磷和溶解性总磷含量变化不大,表明此水体中的氮主要以溶解态存在。滇池氮磷含量变化均较大,表明此水体中的氮可能主要以颗粒态存在,且氮磷含量高。

3.2 不同时间间隔对氮磷含量的影响

低温储存时间对氮磷含量的影响主要表现在随时间的推移氮磷含量均有所降低。这可能是由于水体中在经过静置后,颗粒态含氮含磷物质不断沉淀下来,如滇池水样中颗粒态含氮含磷物质较多,导致含量降低。另外,水体中也有部分氮磷会受到温度等的影响,在静置过程中发生气化而蒸发,导致含量降低。但是,对于氮磷含量较低和主要以溶解态存在的水样(如抚仙湖和阳宗海),随时间的推移含量变化则比较小。

3.3 不同湖泊之间的氮磷含量变化比较

云南高原湖泊具有不同的营养化状况,水质特征不同,对氮磷含量较低的抚仙湖和较高的滇池分析结果进行对比可以看出,抚仙湖水水质良好,水样中氮磷存在状态比较单一,干扰因子少,因此 TN、DN、TP 和 DP 含量趋势都比较稳定,如在实验的第一阶段 TN、DN 仅分别降低 1.3%和 0.8%;TP、DP 仅分别降低 6%和 5.2%;第二阶段 TN、DN 仅分别降低 4%和 1.3%;TP、DP 仅分别降低 8.1%和 5.5%;第三阶段由于持续时间较长,氮磷含量降低明显,TN、DN 分别降低 22%和 26%,TP、DP 分别降低 21.7%和 23.5%。阳宗海样品显示出不同的变化特点,无论是总氮磷和溶解态总氮磷在第一、第二阶段均呈现缓慢下降,TN、DN 分别降低 8.6%和 14.2%,TP、DP 仅分别降低 12.2%和 35.2%;在第三阶段,随着样品存储时间的增长,出现较明显的下降,TN、DN 分别降低 17.6%和 28.3%,TP、DP 分别降低 23.2%和 4.5%。滇池样品 TN 含量在实验的第一阶段从 3.3mg/L 下降至 2.9mg/L,降低了 12.1%,第二阶段和第三阶段前期变化较小,DN 表现出幅度较小的持续下降,而 TP 含量在第一阶段从 0.17mg/L 下降至 0.15mg/L,降低了 11.7%,第二阶段和第三阶段则出现了较明显的下降,DP 含量随着时间的推移表现为下降的趋势,其中第一阶段从 0.058mg/L 下降至 0.051mg/L,降低了 12%,第二阶段和第三阶段前期变化较小。

对比 3 个湖水样品实验结果显示,随着样品低温保存时间的增长,无论是 TN、TP 还是 DN、DP,其含量均呈下降趋势,但存在含量下降程度的差异性,其中 TN、TP 的变化要大于 DN、DP 的变化。这首先可能受到水样中颗粒态总氮磷的影响,除此之外,可能还受到氮磷自身分解挥发、实验过程中样品量的变化等因素的综合影响。

4 结论

本研究通过测定云南 3 个高原湖泊湖水样品 TN、TP 和 DN、DP 含量,讨论了氮磷含量随低温储存时间的变化,结果表明:水质良好的贫营养湖泊抚仙湖和水质较差、中度富营养化的阳宗海水样氮磷以溶解态氮磷为主,而水质为劣 V 类、严重富营养化的滇池水质中含有大量的颗粒态氮磷存在;水样在实验室分析经过过滤、不过滤和采样后静置时间长短均会影响湖泊水样的氮磷含量分析结果。因此,对于氮磷含量较高的湖泊(如滇池)应当在样品采集后当天(2h 内)测定,对于氮磷含量较低的水样(如抚仙湖)在样品采集后同样应尽快分析。对于大批量的样品,最晚应在一周内测定。通过本实验分析研究认为,水样中氮磷存在多种形态,湖泊营养程度不同,在对水样进行氮磷含量测定时,应当考虑水样储存方式、储存时间、预处理方式和氮磷赋存状态等因素,特别是

对大批量分析样品而言,应当以最快的速度进行样品处理分析,降低样品因储存时间对分析结果的影响。由于这些位于典型喀斯特地区湖泊有别于其它地区湖泊及河流,尤其是水体中固体颗粒含量较少,影响氮磷赋存状态的因素不同,在可能的情况下,未来很有必要用多种实验方法,找出不同水质湖泊样品氮磷含量随时间变化的内在原因,建立可靠的校正关系,提高大量样品分析结果的可靠性。当然,要测得准确可靠的氮磷含量数据,还应注意样品采集的代表性、样品的储存方式、试剂的选择、实验操作过程的一致性、足够大的样品量以消除因多次取样而导致测量结果的变化以及样品测定的时间等方面的影响。同时,在以湖泊水体氮磷含量描述水质时,应当以多点断面测量数据的平均值为参考值,同时给出水样采集的地点、时间和实验室分析时间与方法,这样便于不同研究人员、不同时期所获数据之间的对比。

参考文献:

- [1]孙怀英. 2008-2012年洱海总磷、总氮变化分析[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(4):56-58.
- [2]秦伯强, 高光. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, 58(10):855-864.
- [3]SCHLESINGER W H. Biogeochemistry: An analysis of global change[M]. San Diego: California Academic Press, 1991:41-65.
- [4]OHKUHON, YAGI O, OKADA M. Effect of humic and fluvic acids on the growth of microcystins aeruginosa [J]. Environmental Technology. 1998, 19(6):611-617.
- [5]卢韦坤, 余凌翔, 欧晓昆, 等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3):534-545.
- [6]WU Y Y, LI P P. The distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the ecological system of Mt. Beigu wetland[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2009, 28:055-060.
- [7]柳淼, 王晓玉, 连东. 关于总磷和总氮的前处理方法摸索的试验[J]. 北方环境, 2011, 6(23):54-55.
- [8]上海市环境监测中心. 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法:GB11894-89[M]. 北京:中国标准出版社, 1989:192-195.
- [9]中国环境保护总局. 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法:GB11893-89. 北京:中国环境保护总局, 1989.
- [10]邱国良, 陈泓霖. 紫外分光光度法测定水质总氮的影响因素分析[J]. 广州化工, 2016, 44(4):89-90, 161.
- [11]孙健. 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定水中总氮的最佳条件[J]. 北方环境, 2002, (2):73-74.
- [12]张路, 范成新, 王建军, 等. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3):263-270.
- [13]俞海桥, 方涛, 夏世斌, 等. 不同生态修复措施下太湖西五里湖沉积物氮磷形态的时空分布[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6):683-689.
- [14]刘静静, 董春颖, 宋英琦, 等. 杭州西湖北里沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算[J]. 生态学报, 2012, 32(24):7932-7939.

-
- [15]张奇,喻庆国,王胜龙,等.滇西北剑湖沉积物磷形态、空间分布及释放贡献[J].环境科学学报,2017,37(10):3792-3803.
- [16]张斌亮,张昱,杨敏,等.长江中下游平原三个湖泊表层沉积物对磷的吸附特征[J].环境科学学报,2004,24(4):595-600.
- [17]李敏,韦鹤平,王光谦,等.长江口、杭州湾水域沉积物对磷吸附行为的研究[J].海洋学报,2004,26(1):132-136.
- [18]朱广伟,秦伯强,高光,等.长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J].环境科学学报,2004,24(3):381-388.
- [19]候立军,陆健健,刘敏,等.长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J].环境科学学报,2006,26(3):488-494.
- [20]张晓华,潘贤娣,李勇,等.长江中游干流泥沙组成规律[J].泥沙研究,1999,(4):70-74.
- [21]梁志勇,李文学.论黄河干支流悬移质粒径与含沙量关系[J].泥沙研究,2004,(2):51-55.
- [22]娄保锋,臧小平,洪一平,等.水样不同处理方式对总磷监测值的影响[J].环境科学学报,2006,26(8):1393-1399.
- [23]ARIAS C A, DEL BUBBA M, BRIX H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds[J]. Water Research, 2001, 35(5), 1159-1168.
- [24]张虎才,常凤琴,段立曾,等.滇池水质特征及变化[J].地球科学进展,2017,32(6):651-659.
- [25]董静,李根保,宋立荣,等.抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群1960s以来演变特征[J].湖泊科学,2014,26(5):735-742.
- [26]李荫玺,刘红,陆娅,等.抚仙湖富营养化初探[J].湖泊科学,2003,15(3):286-288.
- [27]曹言,王杰,谢永红,等.抚仙湖水质评价及其变化特征分析[J].安徽农业科学,2016,44(35):100-103.
- [28]肖蕾,金宝轩,李石华,等.2002-2015年抚仙湖总磷浓度变化分析[J].浙江农业科学,2017,58(2):335-337.
- [29]MITSURU S, MASAHITO S, MASAHIRO M. Distribution and dynamics of nitrogen and phosphorus in the Fuxian and Xingyun lake system in the Yunnan plateau, China[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2002, 14(2):1-9.
- [30]郭怀成,孙延枫.滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J].地理科学进展,2002,21(5):500-506.
- [31]李杰,宋迪,白晓华,等.滇池蓝藻水华与氮磷响应机制研究[J].环境科学与技术,2017,40(S1):181-185.
- [32]张治中.滇池氮与富营养化研究[J].环境科学导刊,2007,26(6):34-36.
- [33]贺克雕.滇池水质状况综合评价及变化趋势分析[J].人民长江,2012,43(12):37-41.
- [34]邓丽仙,孔桂芬,杨绍琼,等.阳宗海湖泊水质与来水量的关系研究[J].水文,2008,28(4):43-45,67.

-
- [35]王红梅. 阳宗海水质现状及变化趋势分析[J]. 云南环境科学, 2003, 22: 170-171.
- [36]毕建培, 刘晨, 黎绍佐, 等. 阳宗海砷污染水质变化过程分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 84-89.
- [37]李玉照, 颜小品, 吴桢, 等. 典型云南高原湖泊叶绿素 a 与影响因子的定量关系及对比分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 402-410.