

滇池沉积物中磷的分布和迁移特征

余源盛

(中国科学院南京地理研究所)

摘要 滇池表层沉积物中总磷量平均为 0.523% (P_2O_5), 有效磷平均 43.14 ppm (P_2O_5), 均在高含量范围内。总磷的水平分布有两个富集区。湖心富集区与粘土矿物向湖心富集有关, 而海口富集区在一定程度上受工业污染的影响。磷的垂直分布, 表层明显较高。

滇池沉积物中磷含量高与其邻近昆阳磷矿有关。浅水和磷源充足是富营养化的主要原因。据参 1 井 500m 岩芯分析, 新生代以来滇池早已有过多次富营养化阶段, 如今滇池又处于湖缩浅水阶段, 富营养化是难以避免的自然规律。

有关湖水中磷的含量、分布和形态等方面的研究已较广泛而深入, 但底质中磷的含量、形态与湖水之间的关系则研究较少。作者在云南断陷湖泊综合调查研究的基础上, 通过分析 19 种化学元素, 发现滇池底质中磷的含量较本省其它断陷湖泊高。鉴于磷经常成为湖泊中生物繁殖和富营养化关键性的限制因子, 为了解滇池中磷的来源、分布和迁移特征及其对水质的影响, 作者进行了专题研究。

滇池位于昆明市之南, 面积 297 km², 最大水深为 6m, 平均水深 4m。取样站位采用网格形布点, 用重力采样器取样, 样柱深度 2m 左右。共采集湖底表层样品 54 个 (图 1), 剖面样品 9 个, 滨湖湖沼土表层样品 17 个。分析结果用 IBM/PC AT 微机绘制元素等值分布图及趋势图^[3-5]。

一、滇池沉积物中磷的含量及其分布特征

滇池表层沉积物中总磷量平均为 0.523% (以 P_2O_5 计, 全文同), 标准差为 0.430%, 变异系数为 82.3%, 为页岩平均值 (0.160%) 的 3 倍多 (其它元素大都与页岩平均值接近), 与云南其它断陷湖泊相比, 为抚仙湖的 1.4 倍, 洱海的 1.7 倍, 为江苏 7 个较大湖泊平均值 (0.272%) 的两倍左右^[1], 主要受物源的影响, 也与污染及生物富集有一定关系。因滇池之南紧靠昆阳磷矿, 从东南到西南有大小不等的磷矿厂数个, 这些厂的含磷“三废”入湖, 也提高了湖水及沉积物中磷的含量。

滇池沉积物中总磷的平面分布出现两个富集区 (图 2) [含磷量在 0.97—2.16% (P_2O_5) 之间, 图中代号为 5, 4, 3], 一个富集区位于滇池的出水口——海口附近, 这里受工业污染极为严重, 因淤积水浅, 水葫芦等水生植物孳生; 另一个富集区位于湖中心, 是由无机和有机浮游物的富集所致, 因为这些浮游物除了本身含有一定量的磷之外, 还吸附了湖水中的磷等生物营养元素。滇池北部盘龙江三角洲沉积物及东南部柴河三角洲沉积物中粉砂

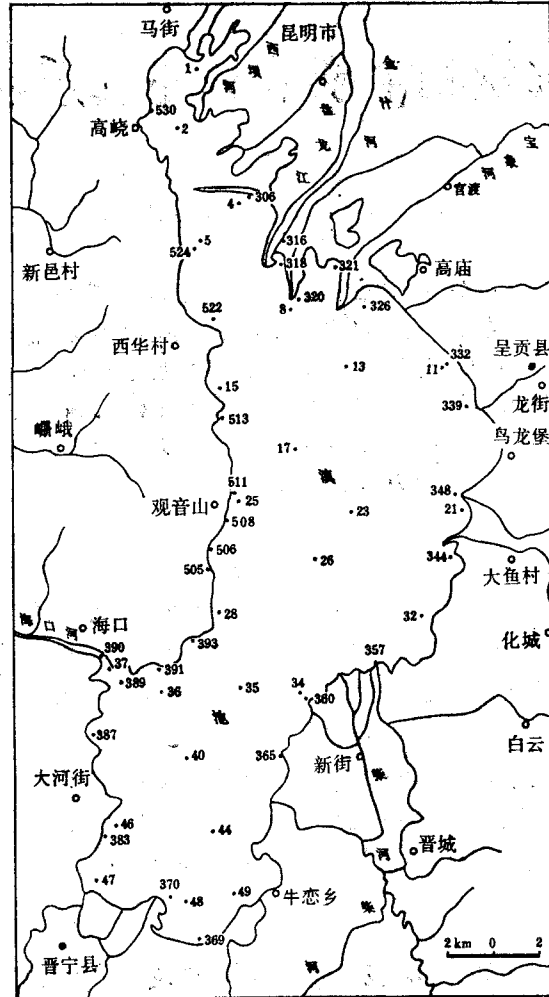


图1 滇池采样点分布

Fig. 1 The sampling stations in Dianchi Lake

成分较高,因此含磷量较低。此外,北部草海区域内沉积了厚1m左右的草渣层,磷被生物吸收而减少,又由于pH值较低($\text{pH} \leq 5.5$),并处于较强的还原条件下,磷的移动性增大而导致磷的淋失,因而沉积物中含磷较低,与湖沼土中磷的含量近似(0.2%左右)。从滇池岸边陆地(湖沼土)到湖中心这一断面,依次分为滨湖沼泽土、三角洲,扇三角洲,滨岸带沉积物,近岸开阔湖沉积物和远岸开阔湖沉积物等5种沉积物类型(表1),其总磷含量有明显的差异。总的变化规律为随着湖水由浅到深,沉积物中总磷量由低到高。形成这样分布规律的原因如下:湖退后原来滨岸带沉积物逐渐发育成湖沼土,由于氧化条件大为改善,促进了有机物大量分解,为植物生长创造了营养条件;植物生长又活化了土壤中的磷,在土壤氧化变酸和磷的活化作用下,磷的迁移性增大而导致湖沼土中总磷量下降和有效磷的提高,有效磷与总磷之比为其它沉积类型的两倍左右,与附近农田相似。远岸开阔

图2 滇池总磷分布 ($P_2O_5, \%$)

Fig. 2 The distribution of total Phosphorus in Dianchi Lake

1. 0.18—0.57; 2. 0.58—0.96; 3. 0.97—1.36;
4. 1.37—1.76; 5. 1.77—2.16。

图3 滇池有效磷分布 (P_2O_5, ppm)

Fig. 3 The distribution of valid Phosphorus in Dianchi Lake

1. <10, 缺乏; 2. 10—20, 低; 3. 20—40, 中;
4. 40—60, 高; 5. >60, 丰富。

表1 滇池各类沉积物中总磷和有效磷的分布

Tab. 1 Distribution of total phosphorus and valid phosphorus in various sediments of Dianchi Lake

沉积物类型	样品数 (n)	总磷含量 ($P_2O_5, \%$)	有效磷含量 (P_2O_5, ppm)	有效磷占总磷比值 (%)
湖沼土	17	0.267	43.8	1.64
三角洲及扇三角洲沉积物	14	0.434	40.3	0.93
滨岸带沉积物	29	0.520	40.8	0.78
近岸开阔湖沉积物	12	0.484	40.6	0.84
远岸开阔湖沉积物	8	0.674	50.2	0.74

湖沉积物,主要是受粘土矿物向湖心富集规律的影响。

滇池有效磷的平面分布(图 3)与总磷分布基本一致,区别仅在于湖心富集区有效磷的含量和范围不如总磷那样明显,这是因为有效磷含量受生物转化作用较大,湖心深水区生物转化作用低于浅水区。因此,从湖盆周围的湖沼土到湖心这一断面中,有效磷占总磷的百分比逐渐减少。图 4 明显反映有效磷向海口方向递增的趋势。在垂直分布方面,表

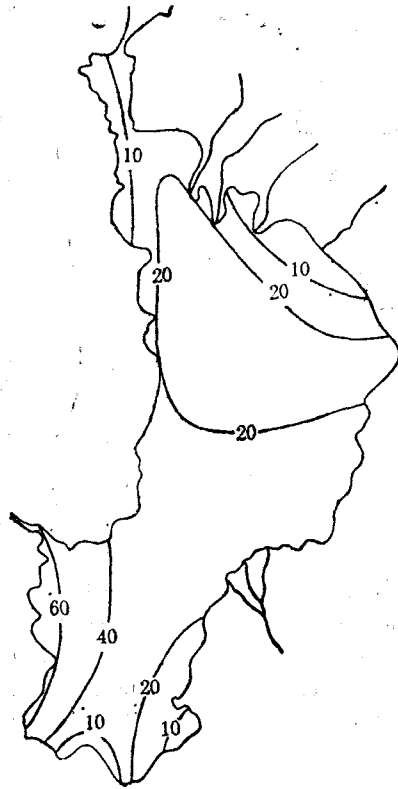


图 4. 滇池有效磷分布趋势 (P_2O_5 , ppm)

Fig. 4 The distributing trend of valid phosphorus in Dianchi Lake (P_2O_5 , ppm)

表 2 滇池 26 号及 40 号样点总磷垂直分布(单位: P_2O_5 ,%)

Tab. 2 Vertical distribution of total phosphorus in sampling stations No. 26 and No. 40, Dianchi Lake (unit: P_2O_5 ,%)

样品代号	层次	深度 (cm)	总磷	样品代号	层次	深度 (cm)	总磷
D-26-1	1	0—15	2.25	D-40-1	1	0—15	0.479
D-26-2	2	15—26	2.33	D-40-2	2	15—50	0.564
D-26-3	3	26—50	0.523	D-40-3	3	50—75	0.477
D-26-4	4	50—100	0.261	D-40-4	4	75—175	0.252
D-26-5	5	100 以下	0.275				

层沉积物中总磷的含量明显高于下面各层(表 2)。

二、滇池沉积物中磷的迁移特征

湖泊沉积物中磷的含量与形态主要决定于沉积物的物质来源,但也与湖水和水生生物有关,因为它们对沉积物中磷的转化、迁移影响很大,所以最终也将影响沉积物磷的含量。

沉积物中磷虽属于大量元素之一,然而与其它大量元素相比,其相对量是较小的,如碳:氮:磷为 100:9:1^[2]。湖泊沉积物中的总磷量为湖水的几十倍、几百倍甚至几千倍(如滇池沉积物中总磷为湖水总磷 2300 倍)。湖水中的磷百分之九十以上以有机态浮游物悬浮于湖水中或被吸附在无机颗粒的表面随水流而移动,只有很少部分正磷酸(PO_4^{3-})的无机盐呈水溶性,能被水生生物直接利用,(如云南滇池中 P_2O_5 约 0.037ppm,抚仙湖和洱海只有 0.0075—0.015ppm)。沉积物中的磷则大部分以难溶性的无机盐为主(酸性沉积物中为磷酸铝和磷酸铁的化合物,石灰性沉积物中则为磷酸钙的化合物),如滇池沉积物中的磷绝大部分以难溶性的磷酸钙化合物形态存在。在有机质不太丰富的沉积物中,有机态磷约占总磷的 20%—50%,其中约 50% 存在于较难分解的核酸中,沉积物中能为生物所利用的磷包括水溶性磷和构溶性磷两部分,两者之和称为有效磷,其量尚不到总磷的 1%(滇池有效磷为总磷的 1%),是沉积物中较易流动的磷素形态。那些非水溶性的磷酸化合物,在未经转化之前移动性很小,经常“固定”在沉积的各层次中。因此,沉积物中磷的转化是磷迁移的首要条件,凡与有机物质矿化作用有关的因素,如温度、酸度、通气性、微生物区系等,都与磷的迁移有关;凡能促进难溶性磷酸化合物转化溶解的因素,如 pH 值 Eh 和微生物活动等,也都对磷的迁移有较大的影响。

Sommers 等(1970)认为,湖水中大量有机磷受沉积作用而分解和水解,从而到达沉积物表面。Shukla (1971), Williams 等(1970—1971), Williams 和 Mayer (1972)等通过对威斯康星湖沉积物及其它大湖沉积物的研究,证明磷主要以磷灰石、有机磷和正磷酸离子与水合氧化铁共价结合存在于沉积物中。湖水中 CaCO_3 的含量不直接影响无机磷和总磷,即使当 CaCO_3 达到 30—60% (W/W) 的硬水也是如此。

沉积物中磷的形态很复杂,本文未作详细研究,仅从与湖泊富营养化密切相关的有效磷及与磷的潜力有关的总磷进行了初步分析,并从两者与其它元素的相关分析中判断其磷化物的种类。

在总磷与 19 个元素的相关矩阵分析中,总磷只与钙相关极明显($r_{\text{P-Ca}} = 0.410$, $r_{0.01} = 0.354$),与其它 18 种元素的关系都不显著($r < 0.354$)¹⁾。这说明沉积物中的磷主要以磷酸钙化合物的形态存在,明显受昆阳磷矿(磷灰石)的影响。有效磷与钙没有明显的相关性,而与有效铁的相关极为显著($r_{\text{P-Fe}} = 0.959$, $n' = 45$ 时, $r_{0.01} = 0.372$),与铝的关系也很密切($r_{\text{P-Al}} = 0.452$, $n' = 40$ 时, $r_{0.01} = 0.393$),从元素的相关分析可知有效磷主要以 Fe-P 和 Al-P 化合物的形态存在。在中性或微酸性条件下,有效磷的移动性较大,除了受重力作用向下移动外,还可以水平扩散和向上移动。但当向上迁移到水土界

1) 其它 18 种元素指硅、铁、铝、钾、钠、钙、镁、钛、氮、碳、锰、铜、铅、锌、镍、钴、钒和铬。

面时,由于微域氧化层的存在,部分有效磷微粒外缘包裹了一层铁的氧化物而变为闭蓄态磷,这种闭蓄态磷虽然仍属于有效磷的范畴,但若进一步被氧化,则其流动性更小而富集在沉积物的表面,因此,微氧层阻止了磷向湖水中的扩散而使沉积物表层含磷量增高。当新的沉积物覆盖于原表层后,由于氧化还原电位下降,原表层沉积物中移动性不大的闭蓄态磷因包裹层(铁的氧化物)被还原溶解,其移动性重又增大,磷再次迁移,建立起新的富磷表层。与此同时原沉积物表面富磷层逐渐消失。在沉积过程中,磷不断地向上富集,同时湖水中的有机碎屑及吸附磷的其它浮游物不断沉积于湖底,因而水土界面始终保持着富磷层。但是,若沉积物中有机质或生物残体累积过多(如滇池的内草海区域,水生植物残体形成的大量碎屑层,厚度深达 1—2m, pH 值 5.5 左右),在残体腐烂过程中造成较强的还原条件和酸性环境,甚至底层湖水夏季也处在缺氧状态,因此,其表层微氧层不能存在,使沉积物中的磷大量流失。但是,因为湖水量大和水体的交换作用,这种水溶性磷的大量流失并未引起湖水含磷量的明显提高。然而通过残体碎屑层向下淋溶的磷,若碎屑层下面是泥质沉积层,则经常使沉积物中磷的含量明显提高。根据参 1 井 500 m 岩芯各层段分析结果,在 22.38—26.15m 为褐黑色煤层,其总磷量只有 0.064%;与其紧接的泥岩层(26.15—28.52m)总磷高达 0.325%;又 437.89—441.80m 为黑褐色褐煤层,总磷量为 0.059%,下面的灰色泥岩总磷量高达 0.577%。这一淋溶作用不象硅和铝的淋溶需要很长的时期才能反映出来,而是在植物碎屑层形成后就有明显的反映。沉积物中磷的流失主要在酸性反应和还原性条件下发生,大量水生植物残体的沉积层具备了上述条件。因此褐煤层、泥炭层或植物残体层含磷量很低。此外,水生植物对沉积物中磷的活化(由难溶磷转变为有效磷)有很大作用,同时也促进了土壤微生物的活动。因此,沉积物中磷大量损失(包括生物吸收及流失),是浅水湖泊磷的转化迁移特征。深水湖泊由于水生生物少,水土界面处的微氧层在一定程度上对沉积物中有效磷起保护作用,减少或阻止有效磷向湖水扩散,因此,沉积物中的有效磷高于浅水湖泊,而湖水中水溶性磷则低于浅水湖泊(表 3)。

表 3 湖水深度对湖水及沉积物中有效磷含量的影响 (单位: P_2O_5 , ppm)

Tab. 3 Influence of water depth on content of valid phosphorus in water and sediments (Unit: P_2O_5 , ppm)

湖泊名称	平均水深 (m)	最大水深 (m)	湖水中水溶性磷	沉积物中有效磷
抚仙湖	87.0	155	0.00747	87.3
洱海	10.2	20.7	0.01490	90.0
滇池	3.9	5.9	0.03740	45.2

湖泊沉积物长期处于嫌气还原条件下,磷的转化以活化为主;农田土壤则处于好气氧化条件(沅水田除外),磷的转化以“固定”(从有效磷转变为非有效磷)为主,所以沉积物中磷迁移的结果使总磷量降低。如目前滇池表层沉积物中总磷量为 0.523%,而参 1 井 500m 岩芯(除表土外)平均总磷量为 0.158%,前者为后者的 3.3 倍,证明了磷的淋溶损失。

三、讨 论

根据 1980—1986 年“云南断陷湖泊环境和沉积”研究中水化学及沉积物化学分析结果,认为滇池目前水质属于中富营养型至富营养型,草海区域内已达到富营养型至重富营养型程度,对昆明市及湖区周围居民生活用水已产生了不良影响,引起了有关方面的关注。为了防止水质进一步恶化,必须弄清污染原因,才能提出切实有效的措施。作者认为生活污水及工业排污对滇池富营养化虽有一定影响,但不是最主要的原因,底质中磷的转化并且不断向湖水中扩散是造成滇池富营养化的根本所在。由于滇池紧靠昆阳磷矿,入湖碎屑物中磷较丰富;湖盆底坡平缓(平均 $5'31''$),库容较小(11.69km^3),湖水很浅(平均不到 4m),滨岸带宽广;气候温和,光照充沛,又富含氮、磷等生物营养元素,因此生物循环较快^[6],结果不仅使沉积物中有机质增加,而且使部分难溶性磷逐步转化为有效磷,在风浪作用下破坏了水土界面处的微氧层,使沉积物中的有效磷不断向湖水中扩散,大风浪更能使水土之间直接发生交换,其数量之大远胜于局部生活污水或工业排污。因此,湖水中磷的含量达到了中富营养型至富营养型水平,进一步促进了生物循环。从表层沉积物中有效磷只有其它断陷湖泊的 50% 左右(见表 3),说明滇池发展到浅水阶段的自然特征;当湖盆下陷速率大于沉积速率时,则重又进入深水阶段。目前这种富营养化或沼泽化现象自然消失。从参 1 井 500m 岩芯中共发现 27 层厚度不等的褐煤层或泥炭层,累计厚度占全井深度的 13.8%,证明新生代以来滇池早已出现过多次富营养化阶段。目前富磷和浅水两个自然条件尚难以人为加以控制,然而小型水库的建造、围湖造田、筑埂等却又在程度不同地加剧着富营养化的进程。因为小型水库虽有利于局部,但减少了入湖水量,为了控制滇池水位则影响了排水泄污,使富营养化发展更快;围湖造田(如内草海北部)不但减小了库容量,而且增加了农药化肥的入湖量;海埂隔断了内外草海的水流,加快了沼泽化速度。为此,要减少或控制滇池磷富营养化,除了自然的因素非人力所能及外,对上述的纯属社会诸因素,目前完全可以通过全面规划人为地加以调整。此外,排污及捕捞使水生植物遭受破坏,降低了湖泊的自净能力,从这个意义上有必要对滇池的营养物质容量及有毒物质的容量作进一步研究,为制定规划提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京地理研究所湖泊室编著, 1981。江苏湖泊志。江苏科学技术出版社, 35—36页。
- [2] 史瑞和、鲍士且、秦怀英等, 1980。土壤农化分析。农业出版社, 61—78页。
- [3] 刘承祚、孙惠文编著, 1981。数学地质基本方法及应用。地质出版社, 156—186页。
- [4] Chester, R. and M. J. Hughers, 1967. *Chemical Geology*. Vol. 2. Elsevier Scientific Publishing Co., p. 249762。
- [5] Robinson, J. E., 1982. *Computer applications in Petroleum Geology*. Hutchinson, Ross, pp. 47—69。
- [6] Wetzel, R. G., 1975. *Limnology*. Chapter 12. Philadelphia Saunders, pp. 215—229。

CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTION AND MIGRATION OF PHOSPHORUS IN DEPOSITS OF DIANCHI LAKE

Yu Yuansheng

(*Nanjing Institute of Geography, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Average value of total phosphorus is 0.523% (P_2O_5) in deposits of Dianchi Lake in the form of Ca-P compounds which were effected mainly by Kunyang and other phosphorus deposits (apatity). The value is 1.4—1.7 times higher than other representative lakes of rift origin in Yunnan Province.

There are two accumulation areas for horizontal distribution of total phosphorus, the Haikou (the outlet of Dianchi Lake) and the center of the lake. The former is influenced mainly by phosphorus source of Kunyang and closely related to industrial water pollution and organic enrichment in swamp. The latter is closely related to the accumulation of inorganic clay. The vertical profile of total phosphorus shows that superficial sediments contain higher phosphorus than the lower natural beds.

Valid phosphorus is mainly accumulated near the Haikou outlet owing to the influence of the industrial water pollution and accumulation of organic materials.

The total phosphorus in the sediments of Dianchi Lake is mainly found in Ca-P compounds, and the valid phosphorus is often in Fe-P and Al-P compounds. These are proved with correlation analysis between related elements. The mobility of Ca-P is small. Fe-P and Al-P are two main mobile states of phosphorus compounds (except soluble PO_4^{3-} salts). All the layers of sediments below the surficial layer are in reduced condition. Therefore, the mobility of phosphorus is large. The phosphorus would gradually move with downward water and be accumulated in the mud layer of sediments. The microaerophilic layer of sediments in water-sediment surface restrains phosphorus from being released from sediment to water, resulting in a much higher accumulation of phosphorus in the surficial layer than the other layers.

Twenty-seven layers of lignite or peat are discovered, with a total thickness of up to 13.8% of the 500 m-long profile of Core-Cheng-1 east of Dianchi Lake. From this we know that Dianchi Lake has had several periods of eutrophication since Cenozoic. At present, Dianchi Lake is a shallow lake or even a swamp at some places. Therefore, eutrophication of Dianchi Lake is an inevitable result and accelerated by industrial pollution. The lake is shallow and the sediments contain a large amount of phosphorus. Only by overall planning and limiting the small-sized reservoirs etc can the water level be maintained, only by the conservation of aquatic plants can the ability of self-purification of the water body be restored and the process of eutrophication of the lake be slowed down.