

浅水水库中磷的周年变动及其影响因素*

李德尚 焦念志 刘长安

(青岛海洋大学, 266003)

提要 1987年2月—1988年3月在山东平度县大泽山水库进行了本研究。结果表明,总磷及颗粒磷夏季显著高于冬季,总溶解磷、溶解有机磷及溶解无机磷则是冬季高于夏季;总磷中几乎终年都以颗粒磷为主,总溶解磷中则基本上全年都以溶解有机磷为主;溶解无机磷的季节变化最剧烈,颗粒磷次之,全年中溶解有机磷最稳定,早春及冬季则以总磷最稳定;影响该水库磷变化的主要因素是进水、人工施肥,以及为风力和水深所影响的沉积物的沉浮。为此作者建议,冬季和早春的调查应选总磷为指标,全年调查应选溶解有机磷;浅水水域施磷肥的适宜时机为生长季节的高水位期,枯水期一般不必施磷肥。

磷是决定内陆水域鱼产力的最重要也是研究得最多的一种营养元素。但是,以往的研究主要是针对大型深水水域进行的^[4-7]。我国的养鱼水库大多数都是浅水型的,其营养盐的分布、循环、季节变动等都与深水水域很不相同。为查明这类水域中磷的周年变化规律及其影响因素,我们于1987年2月—1988年3月在山东平度县大泽山水库进行了本研究。

一、材料与方 法

大泽山水库主要用于蓄水灌溉,水位波动较大。养鱼面积为1125亩。观测期间,全库的最大水深,在高水位时为6.3m;低水位时为2.5m;水的硬度为6.4—7.5德国度;pH为7.5—9.0;无机氮含量为0.286—0.824mg/L。1987年6月11日向库中施入了0.1mg/L(以 PO_4-P 计)磷肥。

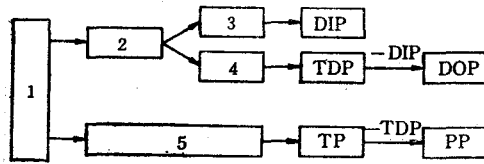


图1 分析各种形态磷的概要程序

Fig. 1 An outline of the procedure for analysing various forms of phosphorus

1.采水样; 2.经 $0.45\mu m$ 之微孔滤膜过滤; 3.不消解直接显色比色; 4.消解后显色比色; 5.不经过滤,消解后显色比色。

DIP为溶解无机磷, TDP为总溶解磷, TP为总磷, DOP为溶解有机磷, PP为颗粒磷。(全文同)再在中间加采1—2层。

调查期间共采样分析57次。常规观测每半月一次,特殊时期(春季翻水期¹⁾、施肥后、降雨进水时、大风后)酌情增加。在丰水期设中、下游两个采样站,枯水期只设下游一站。常规观测采水分表(水面下0.5m)、底(水底上0.5m)两层,特殊时期

* 本研究为国家水利部资助项目。

收稿日期: 1988年11月11日。

1) 此处系指融冰后约一个月的低温、混合期。

分析各种形态磷的概要程序如图 1。用于过滤的微孔滤膜要先经脱磷处理再使用。消解采用 $K_2S_2O_8$ 压热法^[3]。还原显色采用钼酸铵-酒石酸锑钾-抗坏血酸体系。比色波长为 710nm。

用最小类内方差法对全年各时期磷的变动情况进行聚类分析，将其划分为具有不同特点的“类”；用变异系数作指标考察总磷及其组分在不同时期（春季翻水期、冬季封冰期及全年）的时间稳定性；用双因子方差分析考察春季翻水期 TP 随时间、水深的变动情况；用逐步回归法筛选出对磷浓度变化影响最显著的因素。

叶绿素 *a*(Chl*a*)、透明度、水深、水温等资料由青岛海洋大学“中型水库综合养鱼研究”课题组提供；风力资料由平度县气象局和大泽山气象站提供。

二、结果与讨论

1. TP 及其组分的周年变动特点

(1) TP 及其组分的周年分布 周年调查结果见图 2、图 3。[TP] (浓度, 下同) 的周年变动范围为 0.030—0.165mg/L, 平均为 0.062mg/L。各组分占 TP 的百分比: PP (主要是非生源 PP) 为 34.17—91.69%, 平均 71.66%; TDP 为 8.31—65.83%, 平均 28.34%; DOP 为 7.45—48.09%, 平均 18.57%; DIP 为 0—18.64%, 平均 9.77%。周年分布情况: [TP], [PP] 显著地夏季高而冬季低; 而 [TDP], [DOP] 及 [DIP] 则冬季较高夏季较低(施肥和降雨进水期除外)。TP 中, 在夏季 PP 占绝对优势, 冬季 TDP 相对较高; TDP 中几乎全年都以 DOP 为主。

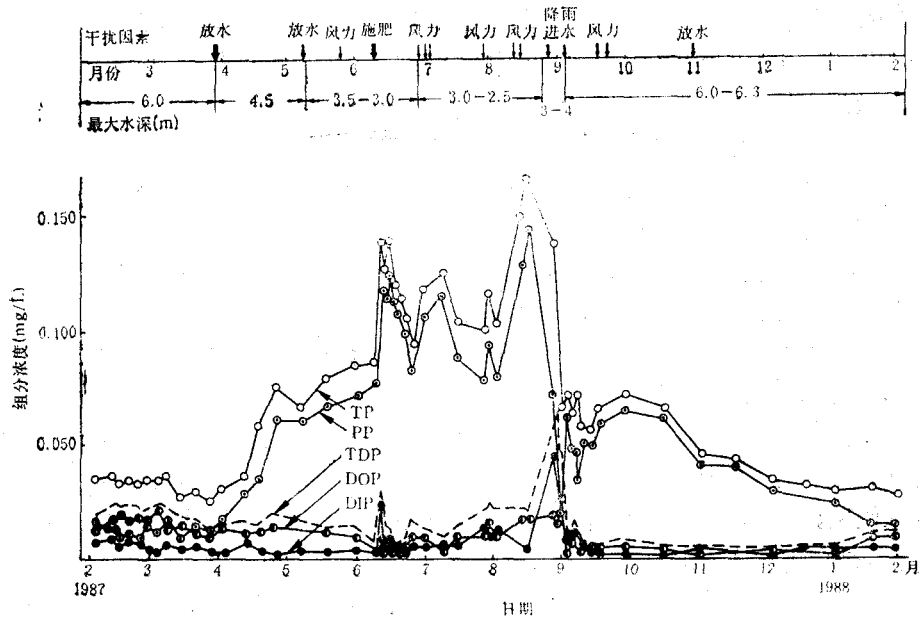


图 2 1987 年总磷及其组分的周年变化

Fig. 2 Annual variations of total phosphorus and its components in Dazeshan Reservoir in 1987

(2) TP 及其组分周年变动聚类分析

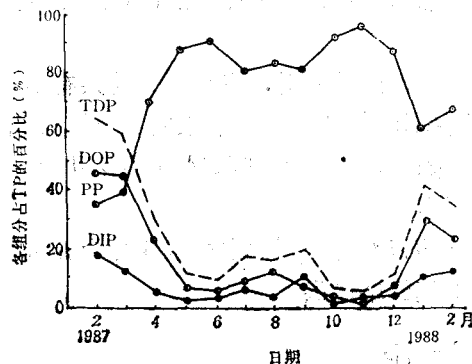


图3 1987年总磷组成的周年变化

Fig. 3 Annual variations of the composition of total phosphorus in Dazeshan Reservoir in 1987

将 TP, PP, TDP, DOP, DIP 五项指标的周年调查资料按采样时间用最小类内方差法聚类, 结果见图 4。图中按类内标准差 $S = 6$ 为界, 将全年各期归为下列 6 “类”。

I. 1987年2月6日—3月4日。这是春季翻水期。其特点是, [TP] 低(0.033mg/L); PP 占 TP 的比例为全年最低值(34.17%); DOP, DIP 则是全年最高的时期(分别占 TP 的 48.10% 和 17.73%); [TDP] 高于[PP]。该期磷浓度的变化很小, 为全年最稳定的时期。

II. 1987年3月7日—4月11日及1988年1月25日—2月15日。这两段时间分别是1987年春季翻水期之后到大量放水之前和1988年初完全封冰期。其共同特点是, [TP] 最低(分别为 0.032mg/L 和 0.030mg/L); [PP] 相对较低(占 TP 的 47—54%); [TDP] 相对较高(占 TP 的 46—53%)。这两段时间内磷水平波动也不大, 属相对稳定期。

III. 1987年4月中—6月初及9月初。分别是大量放水后到施肥前和大量进水期。这两期的特点是, [PP] 增高(占 TP 的 80% 左右); [TP] 是非施肥期最高的(约 0.070 mg/L); 而 [DIP] 则相对较低(占 TP 的 4—14%)。

IV. 1987年6月中—7月中。这是施肥作用前期。由于6月11日向库中施入了 0.1mg/L 的磷肥(以 PO_4-P 计), 水中磷浓度显著增大了, [TP] 为 0.120mg/L, 但主要成分是 PP (占 TP 的 91% 左右); [DIP] 只维持在 0.005mg/L (占 TP 的 4.1%); DOP 的相对含量是全年最低的(占 TP 的 4.6%)。

V. 1987年7月中—8月末。这是施肥作用后期。该期, [TP] 处于全年最高水平¹⁾ (0.123mg/L); PP 占 TP 比重也很大(82%); DIP 只占 TP 的 6.6%; DOP 所占比例却由施肥前期的 4.6% 上升到 11.2%。

VI. 1987年9月初—12月末。这是降雨进水后直到半封冰状态的高水位期。在本期, [TP] 已大大下降(雨后为 0.070mg/L, 封冰期为 0.033mg/L); PP 仍占绝对优势, 但占 TP 的比例已由雨后的 92% 降至封冰时的 86%; DOP, DIP 则分别由 5.2%, 3.1% 上升到 7.5%, 6.1%。

按图 4, 更高层次 ($S=25$) 划分可将全年分为三“大类”: A 包括 I, II, III 三“类”, 即冬, 春, 进、排水期, 其共同特点是溶解磷相对较高; B 为 VI “类”, 即降雨后直到完全封冰前的高水位期; C 为 IV 和 V “类”, 即施肥后到进水前的低水位期, 其突出特点是 [TP], [PP] 很高, 是全年的峰值期。

最后, 按 $S=50$ 可将全年划分为二个“超类”: 其一、A 加 B, 即非施肥期; 其二、C, 即施肥期。可见施肥期磷的组成与分布有明显不同于其他期的特点。

1) 这里指阶段平均值最高, 不是单次测定值最高。

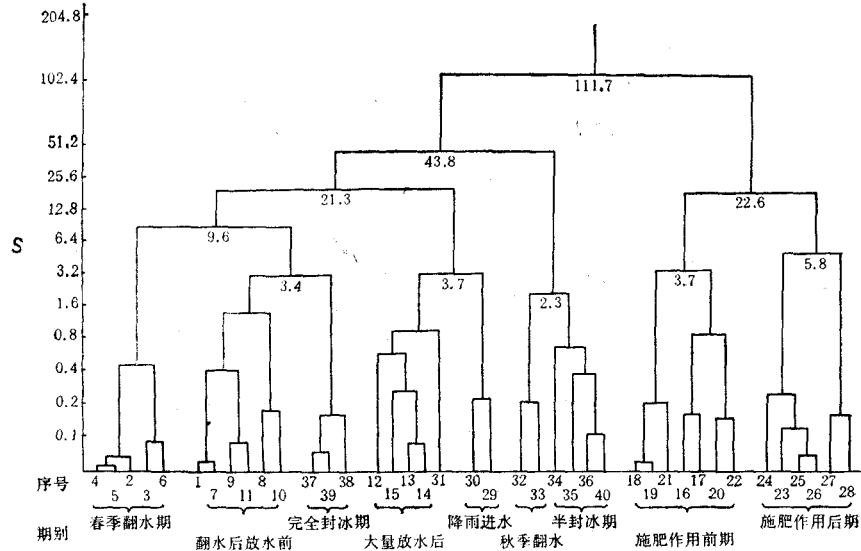


图4 1987年总磷及其组分周年变动聚类分析

Fig. 4 Results of cluster analysis on annual variations of total phosphorus and its components in Dazeshan Reservoir in 1987

(3) 各种磷组分随时间变化的稳定性 由图2可大致看出,春季翻水期和冬季封冰期是全年中磷状况相对最稳定的时期。将各种形态磷按春季翻水期、冬季封冰期及全年,分别计算变异系数并加以比较,得出各种形态磷的时间稳定性次序为:

春季翻水期: $TP > TDP > DOP > PP > DIP$

冬季封冰期: $TP > TDP > DOP > PP > DIP$

全 年: $DOP > TP > TDP > PP > DIP$

可见,不论短期还是全年, DIP 都是最不稳定的,其次是 PP ; 在春季翻水期和冬季封冰期中 TP 最稳定,而全年范围内则以 DOP 最稳定,其次才是 TP ; 春季翻水期是全年中磷状况最稳定的时期,该期中又以 TP 变异最小。对 TP 的双因子方差分析表明,在2月6日—3月4日期间, $[TP]$ 随时间、水层的变化都不显著。

2. 磷浓度变化的影响因素

(1) 直接影响因素 第一、施肥作用。由图2可看出施肥后各种形态磷都有明显的增加,从前面的聚类分析又知,施肥后库水中磷的组成、分布具有明显区别于其他期的特点,可见施肥作用影响之大。值得注意的是,浅水水域施肥后, PO_4^{3-} 很快被沉积物颗粒吸附而以 PP 形式存在,所以水中的 $[PP]$, $[TP]$ 都有显著增高,而 $[DIP]$ 的增加并不显著。而且由于沉积物颗粒吸附 PO_4^{3-} 后,加速了凝聚沉淀^[1,2],因而磷浓度迅速下降,高峰期持续很短(施肥后第二天测定 TP , DIP 的净增加量仅为理论值的54%和23%)。但沉淀的 PP 当沉积物泛起时又会回到水中,因而施肥后磷浓度能在一个较高的水平上波动。第二、降雨进水。根据观测,水库上空降水造成的直接输入是微不足道的,而径流输入则会对水域磷浓度造成重大影响。由图2可见降雨进水后 $[TP]$ 不像一般认为的那样升高而是下降了。其原因在于,雨前水位很低,水中沉积物含量很高,因而 $[PP]$, $[TP]$

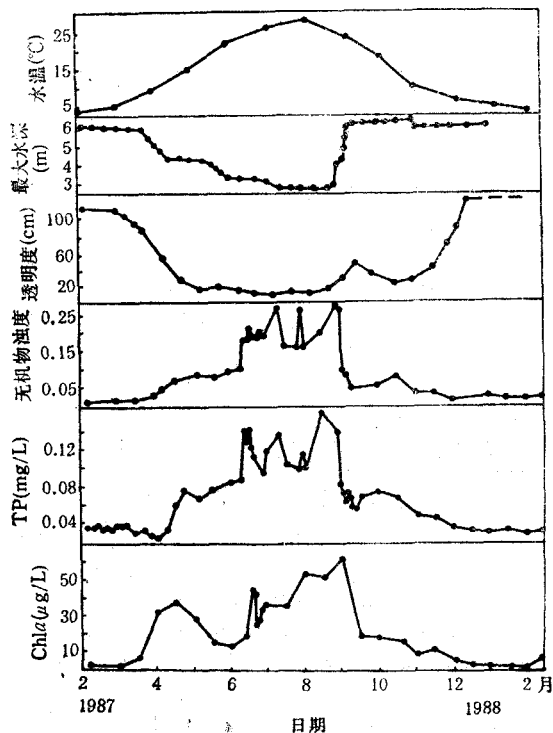


图5 1987年物理、化学、生物、水文要素的周年变化

Fig. 5 Annual variations of physical, chemical, biological and hydrometric factors in Dazeshan Reservoir in 1987

也很高;而降雨后,大量进水起了冲稀作用,加之水位升高后沉降作用增强,因而 [PP], [TP]也下降了。但我们注意到,进水后初期 [PO₄-P] 有明显升高,这是因为来水将集水区(农田、果园)大量的磷酸盐带入库中所致。此后同样由于吸附沉降作用使 [PO₄-P] 很快即下降到原有水平。

(2) 间接影响因素 水域中磷浓度的波动与水域所处的状态有关。大泽山水库1987年的水温、水深(用最大水深表示)、透明度、无机物浊度¹⁾、TP及Chl a浓度的周年变化如图5所示。

将上述其他5个指标对TP进行逐步回归分析,依次淘汰相关较不显著的因子得到5级回归方程,5个因素对TP相关的程度依次为:

无机物浊度 > 水温 > 水深 > Chl a > 透明度

偏相关系数显著性检验表明,非生物浊度、水温与TP相关高度显著,而在同一方程中其他因子相对不显著。这说明,全年中TP的波动主要取决于无机物浊度和水温,二者分别代表了水中沉积物含量和季节因素。季节变化引起磷浓度波动是很常见的^[4,6,7],而沉积物的影响成为首要因子则是浅水水域的特点。另外必须指出,水深、Chl a透明度在逐步回归方程中与TP相关不显著是相对而言的,并不能由此说明其对TP的影响不重要。

1) 系指水样经消解后只加还原剂而不加显色剂在测磷状态下测得的读数。

事实上逐步回归方程中未被选入的因子有些是通过已选入因子来表达其影响的。

无机物浊度。无机物浊度与 TP 正相关,这意味着沉积物的泛起使 [TP] 提高了。这是因为,通常沉积物中磷含量要比上覆水中高许多倍^[2,3]。浅水水域,水体混合强烈,沉积物很容易泛起,因而由此引起的内输入在很大程度上左右了水中磷浓度的变动。

水深的影响。水深变化对 [TP] 的影响可以从图 2 直观看出,水深增大,[TP]降低;水深减小,[TP]上升。回归分析表明二者呈线性负相关。

风力作用。风力的作用除受水深制约外,还与风速和作用时间、距离等因素有关。在 1987 年 5—9 月初这段低水位期间,[TP]受风力影响而波动呈下列关系:

$$\Delta TP = -0.02703 + 0.01070WS, r = 0.7118, P = 0.05, n = 20$$

式中, ΔTP 为风后 TP 的增量 (mg/L); WS 为测 TP 前 2—5 天平均风速 (m/s)。由本式可知,当 $WS > 2.5\text{m/s}$ 时可引起明显增磷。

生物影响。叶绿素浓度反映了浮游植物现存量,它本应与 PP 乃至 TP 密切相关^[4,7],但在沉积物造成的 PP 占绝对优势的情况下,生物 PP 的变化对 TP 的影响就相对不显著了。同样,透明度是由生物浊度和非生物浊度所决定的,在浅水情况下,无机物浊度占主导地位,因而在回归方程中它对 TP 的影响在很大程度上由无机物浊度取代了。

季节影响。季节因素实际上是一个综合指标。它在很大程度上覆盖了生物和水位变动的的影响。[TP]一般是夏高冬低^[6,7]。本例中夏季水浅,沉积物干扰严重,使这种季节变化更明显了。

总之,一切影响磷的内、外输入的因素都将引起水域中磷浓度的波动,而对于浅水水域来说,则是以风力和水深的综合作用所决定的无机物浊度为主导因素。

三、小 结

浅水水域磷周年变动的基本情况是: [TP]、[PP] 显著的夏季高而冬季低,[TDP]、[DOP]及[DIP]则冬季较高而夏季较低; TP 的组成几乎终年都以 PP 为主,而 PP 又以非生源 PP 为主; TDP 中基本上全年都是 [DOP] > [DIP]; 各种形态磷的时间变动在全年中以 DOP 最小,而在春季翻水期和冬季封冰期则以 TP 变动最小; DIP 的时间变动最大,其次是 PP。TP 及其组分在整个明水期都分层不显著。

浅水水域磷浓度波动的主要影响因素是人工施肥、降雨进水、风力和水深,其中又以风力和水深的综合作用最为经常最为明显。

为研究水域生产力而调查浅水水域磷状况的适宜时间是早春或冬季。这时磷浓度最稳定,调查结果最有代表性。适宜的调查指标,在早春和冬季为 TP,而在全年则为 DOP。

向浅水水域施磷肥的适宜时机是生长季节的高水位期。枯水期一般不缺磷,不必施磷肥。

参 考 文 献

- [1] Anderson J. M., 1982. Effect of nitrate concentration in lake water on phosphate release from the sediment. *Water Res.* 16: 1119—1126.
- [2] Fitzgerald, G. P., 1970. Evaluation of the availability of sources of nitrogen and phosphorus for algae. *J. Physiol.* 6: 239—347.

- [3] Grasshoff, K., 1983. *Methods of Seawater Analysis*, 2nd ed. Verlag Chemie, Weinheim, pp. 125—139.
- [4] Heren, J., 1961. The seasonal variation of phosphate, silicate and nitrate in waters of the English Lake District. *Limnol. Oceanogr.* 6: 338—346.
- [5] Larson Devid P., Donald W. Schults and Kenneth W. Malueg, 1981. Summer internal phosphorus supplies in Shagana Lake Minnesota. *Limnol. Oceanogr.* 26: 740—753.
- [6] Rigler, F. H., 1964. The phosphorus fractions and the turnover time of inorganic phosphorus in different types of lakes. *Limnol. Oceanogr.* 9: 511—518.
- [7] Strickland, T. D. M. & K. H. Aurtin, 1960. ON the forms balance and cycle of phosphorus observed in the coastal and oceanic waters of the Northeastern Pacific. *J. Fish. Res. Board Can.* 17(3): 337—345.

ANNUAL VARIATIONS OF PHOSPHORUS IN A SHALLOW RESERVOIR

Li Deshang, Jiao Nianzhi and Liu Changan

(Ocean University of Qingdao, 266003)

ABSTRACT

This work was conducted in Feb. 1987—Mar. 1988 in Dazeshan Reservoir, Pingdu County, Shandong Province. The reservoir was 1 125 mu (ca. 73 ha) in area and 2.8 m in average depth. Stratification of concentrations of total phosphorus ([TP]) and its components in the reservoir was not conspicuous throughout the ice-free season. [TP] varied from 0.030 to 0.165 mg/L and averaged 0.064 mg/L throughout the year. The percentages of particulate phosphorus (PP), total dissolved phosphorus (TDP), dissolved organic phosphorus (DOP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP), were 34.17—91.61%, 71.66% in average; 8.31—65.83%, 28.34% in average; 7.45—48.09%, 18.75% in average; and 0—18.64, 9.77% in average respectively.

[TP] and [PP] were higher in summer but lower in winter, while [TDP], [DOP], and [DIP] were just the opposite. [PP] mostly abiogenic, constituted a dominant part of [TP]. Among the components, [DOP] was most stable throughout the year, [TP] was stable during the winter and the early spring; the temporal variation of [DIP] was the largest, and that of [PP] came next.

Principal factors affecting the variation of phosphorus in the reservoir were the inflow of water, artificial fertilization, and the suspension of the sediments which, in turn, was governed by wind force, water depth and inflow of water. The effects of wind force in combination with water depth was most conspicuous.

On the basis of the results, the authors suggested that: 1) the proper time for P-level observation for assessment of the productivity of water bodies would be winter or early spring, in case one could not take a year-round sampling; and TP should be chosen as the index of P-level in winter or early spring, and DOP for year-round observations; 2) the proper time for phosphorus fertilization to shallow inland waters would be the highwater-level periods in the growing season.