

太湖五里湖沉降通量及其 有机质分解率研究*

胡春华 濮培民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

摘要 为了进一步探索重富营养化湖泊水质形成机理,1996年7月19日—9月2日,在太湖北端湖湾重富营养化水体——五里湖中层水体进行了试验。通过对微分方程的积分与数理统计分析,确定了该湖区该时段平均沉降通量为 $405\text{gd}^{-1}\text{m}^{-2}$,其中有机质沉降通量是无机沉降通量的3倍,有机质初始分解率为 0.0125h^{-1} ,长期分解率为 0.00662h^{-1} ,1个月的时间就有80%的有机质分解掉。这种作用造成许多重富营养化湖泊,当悬浮物以死亡的藻类为主时,就会出现透明度低而叶绿素并不高的现象;藻类死亡后,逐步沉降并矿化分解,其残体与矿物质又可返回水体,其中的营养盐又被新生的藻类再次吸收利用,导致富营养化湖泊水质的变化长期处于恶性循环,这一现象在当前富营养化湖泊的治理中应予重视。

关键词 沉降通量 有机质分解率 太湖 五里湖

学科分类号 X824

太湖水质恶化直接影响到沿湖城市自来水管的供水量和水质,危及居民健康,严重地制约该地区的工农业生产与旅游业的发展。自1991年起,中国科学院南京地理与湖泊研究所,通过建立优化的人工生态系统,进行从局部开始改善水质的实验与研究(濮培民,1997)。1994年中国与丹麦两国又在太湖开展了净化水质的人工生态系统工程合作研究。由于在生态系统水质形成机制和模式的研究中,需要沉降通量这个重要参数,本文首次对沉积量采取微积分与数理统计分析方法,求得沉降通量的组成和可能的变化速率,来进一步探索许多重富营养化湖泊其透明度低而叶绿素有时并不高或不成比例、截污挖泥等措施改善水质的效果不够理想的原因或机理。

1 材料与方法

风浪与湖流是影响本试验研究的主要不利因子,因此试验区选择于太湖北端湖湾五里湖中桥老水厂附近($31^{\circ}31'20''\text{N}$, $120^{\circ}16'30''\text{E}$,水深2m)(图1),使其干扰影响削减至最小。五里湖水质常年属富营养型,为地表水IV—V类,透明度仅有0.25—0.60m,叶绿素值极低(孙顺才等,1993;金相灿等,1995);透明PVC采样管取出的底泥为灰黑色腥臭、半塑状—块状淤泥,显示该区有机质来源丰富且为低能的环境。1996年7月19日—9月2日,用特制

* 中国国家科委和欧洲联盟科技部资助项目, C11*-CT93-0094(DG12HSMU)。胡春华,男,出生于1965年3月,硕士,助研, E-mail: chhhu@niglas.ac.cn

收稿日期:1998-07-14, 收修改稿日期:1999-01-12

捕获瓶(内口径 5.5cm、高 15cm、体积 1L)挂在中层(水深 1.0m 处)水体,在 22.6—714.3h、11

个不等时段内收集沉降下来的悬移质,为了减少扰动,放取动作尽可能轻缓;对该悬移质用醋酸滤膜(孔径 4.5 μm 直径 60mm)抽滤,放在铝盒中用烘箱在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘 4 小时至衡重,经万分之一天平称量,求出沉降量;对同一时段的沉降量均采取多个捕获时间极相近的同时或不同时放取的沉降量加权平均值,例如 $t = 23.77\text{h}$ 沉降量为 18 个捕获时间在 23—24h 内同时或不同时放取的沉降量的加权平均值。同一时段不同放取时间的沉降量相差小于 5%,多在 2%;试验期间水体悬移质浓度变化小,波动于 19.1—21.8 mg/L ;均指示试验期间风浪作用小,几乎可以忽略。

根据沉降量来计算沉降通量,通过对微分方程的积分与数理统计分析,求出无机沉降通量与有机沉降通量、以及有机质分解率等。

2 结果与讨论

2.1 初级近似

不把沉积物细分为有机与无机部分,且不考虑有机质的分解。随着接收时间(t :h)的增加(23.37→714.43),按(1)计算的平均沉降通量(F_a : $\text{gh}^{-1}\text{m}^{-2}$)却递减(17.56→7.07)(表 1),说明随着时间的推移,部分沉积物消失了。

$$F_a = W / t \quad (1)$$

其中 W 为通过单位面积的沉积量(g/m^2), $W = W_b / S_b$, S_b 瓶口截面积(23.758 cm^2), W_b 进入沉降瓶中的沉积物质量(g)。

表1 初级近似条件下不同时段平均沉降通量(F_a)

Tab.1 Average of downward fluxes (F_a) in the different collecting periods, based upon the primary approximation

$t(\text{h})$	23.37	29.17	73.39	98.27	167.35	291.00	714.43
$F_a(\text{gh}^{-1}\text{m}^{-2})$	17.56	17.15	12.12	10.43	12.58	9.17	7.07

显微镜下发现该沉积物中含有大量有机碎屑(死亡藻类),水质分析表明:沉积物捕获瓶内水样 TN-N、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TP-P 等含量比瓶外高数倍。笔者认为:进入此瓶中的沉积物由有机与无机两部分组成,前者来源于死落的生物碎屑(藻类),在细菌等微生物的作用下分解,返回到水体中,自瓶内向瓶外扩散,导致平均沉降通量递减。

2.2 一级近似

将沉积物分为有机与无机,经一段时间(t)后,通过单位面积的沉积量(W : g/m^2)为单位面积无机量(W_i : g/m^2)与单位面积经分解所剩余的有机量(W_{or} : g/m^2)之和,假定无机沉降通量(F_i : $\text{gh}^{-1}\text{m}^{-2}$,单位时间内通过单位面积所沉降的无机质质量)、有机沉降通量(F_o : $\text{gh}^{-1}\text{m}^{-2}$,单位时间内通过单位面积所沉降的有机质质量)与有机质分解率(D : h^{-1} ,单位

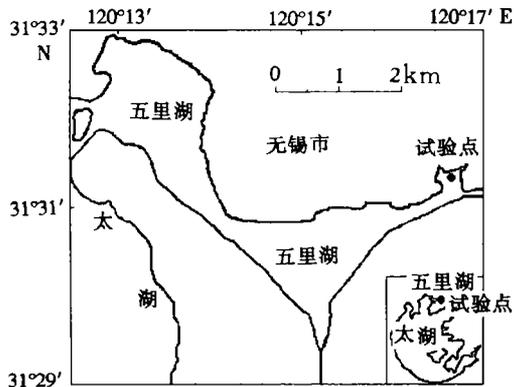


图1 试验点(•)位置示意图

Fig.1 Sketch map showing the testing site (•)

时间内有机质分解比率)恒定,求 F_i 、 F_o 、 D 的方程组如下:

$$W = W_i + W_{or} \quad (2)$$

$$\partial W_i / \partial t = F_i \quad (3)$$

$$\partial W_{or} / \partial t = F_o - DW_{or} \quad (4)$$

为了便于解由(2)–(4)式组成的微分方程组,设 $E = e^{-Dt}$,式中 $-Dt$ 为指数(即上标),则:

$$W_i = F_i t \quad (5)$$

$$W_{or} = F_o(1 - E) / D \quad (6)$$

$$W = F_i t + F_o(1 - E) / D \quad (7)$$

利用数理统计方法求出(7)中的 F_i 、 F_o 、 D 三个未知数。即利用最小二乘法(使实测值与计算值差的平方和最小),解出 F_i 、 F_o 、 D 的数学表达式,将实测值代入这些表达式,再利用计算机编程计算,可得 F_i 、 F_o 、 D 。不同时段的结果(表2)表明:随着接收时间(t :h)的增加, F_i 下降很小,基本恒定;而 F_o 、 D 却成倍衰减。为了便于讨论,暂定义有机质半衰期(τ :h)为有机质分解一半所需时间($E = e^{-D\tau} = 0.5 \Rightarrow \tau = \ln 2 / D$)。 T 越短, τ 越小(例如 T 为 22.6–163.75, $\tau = 1.35$),显示有机质分解越快;反之 T 越长, τ 越大(例如 T 为 22.6–714.43, $\tau = 19.31$),指示有机质分解越慢(表2)。这揭示沉降下来的有机质内部存在着容易变质(快速分解)与不易变质(慢速分解)的部分;刚沉降下来的有机质,容易变质的部分很快分解,剩下的越到后来越难分解即分解率减小。这表明有机质存在一、二级分解率,需进一步研究。

表2 一级近似条件下不同时段(T)无机沉降通量(F_i)、有机沉降通量(F_o)与有机质分解率(D)

Tab.2 Inorganic downward fluxes (F_i), organic downward fluxes (F_o), and organic decomposition rate (D) in the different collecting periods (T), based upon the first approximation

T (h)	F_i ($\text{gh}^{-1}\text{m}^{-2}$)	F_o ($\text{gh}^{-1}\text{m}^{-2}$)	D (h^{-1})	τ (h)
22.6–163.75	10.21	78.89	0.51285	1.35
22.6–291.00	9.64	23.82	0.13581	5.10
22.6–714.43	7.80	13.07	0.03590	19.31

2.3 二级近似

考虑有机质存在一、二级分解率。有机质瞬时分解率(D : h^{-1})理论上应为: $D = D(t) = (\partial W_o / \partial t - F_o) / W_o$,很难直接求出,但沉降下来的有机质初始时分解率大,而后自然衰减变小,因此可设有机质分解率长期稳定值($t \rightarrow \infty$)为 D_1 ,初始时($t = 0$)有机质分解率为 $D_1(1 + D_2)$,式中 D_2 为调节系数,有机质瞬时分解率(D)近似为:

$$D = D_1(1 + D_2 e^{-D_1 t}) \quad (8)$$

(4)式相应变为: $\partial W_{or} / \partial t = F_o - D_1(1 + D_2 e^{-D_1 t})W_{or}$ (9)

为了便于解(2)、(3)、(9)组成微分方程组,将(9)无量纲化: $\partial y / \partial x + (1 + D_2 e^{-x})y = 1$,其中 $x = D_1 t$, $y = W_{or} D_1 / F_o$;由于 x 是 y 的唯一变量,进一步变为:

$$dy / dx + (1 + D_2 e^{-x})y = 1 \quad (10)$$

(10)的解为: $y = H(x)e^{-G(x)}$,其中 $g(x) = 1 + D_2 e^{-x}$, $G(x) = \int_0^x g(z) dz$, $H(x) = \int_0^x e^{G(z)} dz$

解的讨论如下:

(1) 当 $D_1 = 0$ 时(初级近似:不把沉积物细分为有机与无机部分,且不考虑有机质的分解), $x = 0$, $g(x) = 1 + D_2$, $G(x) = 0$, $H(x) = x$, $y = x \Rightarrow F_o = W_{or} / t$ (或 $W_{or} = F_o t$), 它与(1)式相似。

(2) 当 $D_1 \neq 0$, $D_2 = 0$ 时(一级近似:沉积物分为有机与无机,及有机质分解率恒定, $D_1 = D$), $g(x) = 1$, $G(x) = x$, $H(x) = e^x - 1$, $y = (e^x - 1)e^{-x} = 1 - e^{-x} \Rightarrow W_{or} D_1 / F_o = 1 - e^{-D_1 t} \Rightarrow W_{or} = F_o / D_1 (1 - e^{-D_1 t})$ 它与(6)式完全相同。

(3) 当 $D_1 \neq 0$, $D_2 \neq 0$ 时(二级近似:有机质存在一、二级分解率): $g(x) = 1 + D_2 e^{-x} = 1 + D_2 E_h$, $G(x) = \int_0^x g(z) dz = x + D_2(1 - E_h)$, $H(x) = -1 + e^{D_2(1 - E_h)} / E_h - D_2 e^{D_2}$

$\cdot [E_i(-D_2) - E_i(-D_2 E_h)]$, 其中, $E_h = e^{-D_1 t}$, $E_i(x) = \int_{-\infty}^x e^t / t dt (x < 0) \Rightarrow y = H(x) e^{-G(x)} = \{-1 + e^{D_2(1 - E_h)} / E_h - D_2 e^{D_2} [E_i(-D_2) - E_i(-D_2 E_h)]\} e^{-(x + D_2(1 - E_h))} \Rightarrow y = 1 - E_h \lambda$
 $\{1 + D_2 e^{-D_2} [E_i(-D_2) - E_i(-D_2 E_h)]\}$, 即: $y = 1 - E_h \lambda \Rightarrow W_{or} D_1 / F_o = 1 - E_h \lambda \Rightarrow W_{or} = F_o (1 - E_h \lambda) / D_1 \Rightarrow$

$$W = F_i t + F_o (1 - E_h \lambda) / D_1 \quad (11)$$

其中, $\lambda = e^{-D_2(1 - E_h)} \{1 + D_2 e^{-D_2} [E_i(-D_2) - E_i(-D_2 E_h)]\}$

同理, 利用数理统计方法与计算机编程计算, 可求出(11)中 F_i 、 F_o 、 D_1 、 D_2 即: $F_i = 4.220 0 (\text{gh}^{-1} \text{m}^{-2})$, $F_o = 13.900 0 (\text{gh}^{-1} \text{m}^{-2})$, $D_1 = 0.006 624 1 (\text{h}^{-1})$, $D_2 = 0.890 00$ 将这些参数依次代入下列各式:

$$\begin{aligned} D &= D_1 (1 + D_2 E_h) & W_{oi} &= F_o [t - (1 - E_h \lambda) / D_1] \\ W_i &= F_i t & W &= F_i t + F_o (1 - E_h \lambda) / D_1 \\ W_{oi} &= F_o t & DE &= 100 [1 - (1 - E_h \lambda) / D_1 / t] \\ W_{or} &= F_o (1 - E_h \lambda) / D_1 & OR &= 100 F_o (1 - E_h \lambda) / [F_i t D_1 + F_o (1 - E_h \lambda)] \end{aligned}$$

其中, $E_h = e^{-D_1 t}$, $\lambda = e^{-D_2(1 - E_h)} \{1 + D_2 e^{-D_2} [E_i(-D_2) - E_i(-D_2 E_h)]\}$, $E_i(x) = \int_{-\infty}^x e^t / t dt$

($x < 0$) 可逐一算出某一时间(t)有机质瞬时分解率(D)、以及这段时间内通过单位面积的无机量(W_i)、有机总量(W_{oi})、经分解所剩余的有机量(W_{or})、有机分解量(W_{od})、沉积总量(W)、已分解的有机质占有有机总量的百分比(DE)、沉积物中的有机质百分含量(OR) (表3)。

计算值(W)与实测值(W^*)具有较好相关性(表4, $W^* = 0.995W + 14.5$, 相关系数 $R = 0.992$), 显示计算的可信性。另外, 微囊藻在水体内降解的实验结果表明: 5、9、30天内的降解比率分别为45%(有机碳)、58%(悬移质)、70%(有机氮)(蔡后建等, 1998), 均与同时间的 DE 相吻合即44.18% (t 为120h), 55.90% (216), 79.76% (720) (表3), 再次证明结果的可信性。

上述结果表明该湖区该时段平均沉降通量为 $405 \text{gd}^{-1} \text{m}^{-2}$ ($F = F_i + F_o = 4.22 + 13.90 = 18.12 (\text{gh}^{-1} \text{m}^{-2}) = 18.12 \text{gh}^{-1} \text{m}^{-2} \times 24 \text{h} / \text{d} = 405 \text{gd}^{-1} \text{m}^{-2}$), 其中有机沉降通量为

表3 二级近似条件下部分时段的各项计算值

Tab.3 The calculated values in some collecting periods, based upon the second approximation

t (h)	W (g/m^2)	W_i (g/m^2)	W_{or} (g/m^2)	$D\%$ (h^{-1})	W_{oi} (g/m^2)	W_{od} (g/m^2)	OR (%)	DE (%)
1	15.22	4.22	11.00	1.25	13.90	2.90	72.28	20.85
12	179.12	50.64	128.48	1.21	166.80	38.32	71.73	22.97
24	349.77	101.28	248.49	1.17	333.60	85.11	71.04	25.51
48	664.61	202.56	462.05	1.09	667.20	205.15	69.52	30.75
120	1 437.49	506.40	931.09	0.93	1 668.00	736.91	64.77	44.18
216	2 235.50	911.52	1 323.98	0.80	3 002.40	1 678.42	59.23	55.90
240	2 411.22	1 012.80	1 398.42	0.78	3 336.00	1 937.58	58.00	58.08
360	3 200.35	1 519.20	1 681.15	0.72	5 004.00	3 322.85	52.53	66.40
720	5 064.20	3 038.40	2 025.80	0.67	10 008.00	7 982.20	40.00	79.76

表4 二级近似条件下部分时段计算值(W)与实测值(W^*)的比较Tab.4 Comparison between calculated (W) and measured values (W^*) for some periods, based upon the second approximation

t (h)	23.37	29.17	73.39	98.27	167.35	291.00	714.43
W (g/m^2)	340.99	420.55	962.59	1226.01	1853.65	2762.79	5038.55
W^* (g/m^2)	410.38	500.27	889.49	1024.96	2105.26	2668.47	5051.02

无机沉降通量的3倍($F_o / F_i = 13.90 / 4.22 = 3.29$)。

$D = 0.006\ 624\ 1 + 0.005\ 859e^{-0.006\ 624\ 1t}$, 随着 t 增大 (1h→24h→720h), OR 下降 (72.28%→71.04%→40.00%), DE 迅速增快 (20.85%→25.51%→79.76%) (表3), 即仅1个月的时间就有80%的有机质分解掉, 这揭示: 许多重富营养化湖泊, 当悬浮物以死亡的藻类为主时, 就会出现透明度低而叶绿素并不高的现象; 大面积长期污染的水体, 尤其是藻型湖泊, 藻类等生物吸收水体中的无机盐, 死亡后逐步沉降并矿化分解。其残体与矿化物又可返回水体, 其中的营养盐又被新生的藻类再次吸收利用, 导致富营养化水体水质的变化长期处于恶性循环(图2), 冲淤、挖泥等方法, 并不能打破其恶性循环, 结果效果不理想。要治理好当前富营养化湖泊, 必须打破这种由藻类引起水质的恶性循环。

3 结论

长时间、强风浪、大湖面的条件下, 情况更为复杂, 需要考虑温度、光照、风浪、湖流等因素的作用, 有待于进一步研究。本研究为夏季短时间低能-静水条件下的初步结果。通过在1996年7月19日—9月2日对太湖五里湖的试验与研究, 得出以下结论。

3.1 太湖五里湖中层水体沉降通量为 $405gd^{-1}m^{-2}$ 。

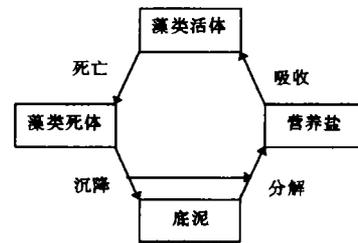


图2 富营养化湖泊水质的变化长期处于恶性循环示意图

Fig.2 Sketch map showing water quality changes which are for long periods in vicious circles in the hypertrophic lake

3.2 有机沉降通量为无机沉降通量的 3 倍。

3.3 有机质瞬时分解率 ($D, 1/h$) 为 $D = 0.006\ 624\ 1 + 0.005\ 859e^{-0.006\ 624\ 1t}$ 。

3.4 1 个月的时间就有 80% 的有机质分解掉。

3.5 当悬浮物以死亡的藻类为主时,许多重富营养化湖泊就会出现透明度低而叶绿素并不高的现象;藻类死亡后,逐步沉降并矿化分解,其残体与矿化物又可返回水体,其中的营养盐又被新生的藻类再次吸收利用,导致富营养化水体水质的变化长期处于恶性循环,这一现象在当前富营养化湖泊的治理中应予重视。

致谢 本文得到了本研究组的黄宜凯、张圣照、张文华、胡维平、王国祥、张静仪、严京松、李文朝以及丹麦药学院环境化学研究所的 Sven Eric Jørgensen、Soren Nors Nielsen、Jorgen Salomonsen 等帮助,另外还得到了无锡中桥自来水厂的支持,谨致谢忱。

参 考 文 献

孙顺才, 黄漪平, 1993. 太湖. 北京: 海洋出版社, 120—130, 196—218

金相灿, 刘树坤, 章宗涉等, 1995. 中国湖泊环境(第一册). 北京: 海洋出版社, 166

濮培民, 胡维平, 逢 勇等, 1997. 净化湖泊饮用水源的物理-生物工程实验研究. 湖泊科学, 9(2): 159—167

蔡后建, 陈伟民, 1998. 微囊藻水华的漂移和降解对太湖环境的影响. 见: 蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一). 中国生态系统网络丛书. 北京: 气象出版社, 149—157

DOWNWARD FLUX OF SUSPENDED SUBSTANCE AND ORGANIC DECOMPOSITION RATE IN WULIHU BAY, TAIHU LAKE

HU Chun-hua, PU Pei-min

(Nanjing Institute Of Geography and Limnology, The Chinese Academy Of Sciences, Nanjing, 210008)

Abstract In order to explore further the water-quality-change mechanism in hypertrophic lakes, the test was undertaken for the middle water layer in hypertrophic Wulihu Bay, northern Taihu Lake, during the period from July 19 to September 2 in 1996. On the basis of differential-equation integration calculus and mathematical and physical statistics, it was found that in this part of the lake during the period, the downward flux was $405\text{ g d}^{-1}\text{ m}^{-2}$ on average, and that the downward organic fluxes were three times more than the downward inorganic fluxes. The initial decomposition rate of organic substances is about $0.012\ 51\text{ h}^{-1}$, and the long-term decomposition rate is $0.006\ 62\text{ h}^{-1}$, the instantaneous decomposition rate ($D, \text{ h}^{-1}$) may be described by the following equation: $D = 0.006\ 624\ 1 + 0.005\ 859e^{-0.006\ 624\ 1t}$, where t is time (h). Around 80% of the organic substance was decomposed within a month. In many hypertrophic lakes it appears that transparency is low and chlorophyll- a is not high when suspended substances are dominated by dead algae. After algae die, they drop progressively, mineralize and are decomposed simultaneously, then the remains and

mineralized substances return to water body, and the nutrients are absorbed and utilized by the newborn algae. Thus, the water quality changes are for long periods in vicious circles in the hypertrophic lake. The effects of rinsing and dredging ect., which cannot break the vicious circle, are not very ideal. The phenomenon should be taken into account during harnessing the present hypertrophic lake.

Key words Downward flux of suspended substance Organic decomposition rate Taihu Lake Wulihu Bay

Subject classification number X824

本刊加入万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,本刊现已入网“万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律由编辑部统一纳入万方数据资源系统(ChinaInfo),进入因特网提供信息服务。凡有不同意见者,请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付。

万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群是国家“九五”重点科技攻关项目,截止1999年底已有1000种期刊全文上网(网址:<http://www.chinainfo.gov.cn/periodical>)。本刊全文内容按照统一格式制作编入万方数据资源系统(ChinaInfo),读者可上因特网进入万方数据资源系统(ChinaInfo)免费(一年后开始酌情收费)查询浏览本刊内容,也欢迎各界朋友通过万方数据资源系统(ChinaInfo)向我刊提出宝贵意见、建议,或征订本刊。

《海洋与湖沼》编辑部
二〇〇〇年三月