上海水体营养分级的群落代谢率模型

殷浩文 赵华清

（上海市环境保护科学研究所，上海 200233）

摘要 在标准实验条件下测定天然浮游生物群落的产氧率(P)和呼吸率(R)。同时结合总氮、总磷、叶绿素a等水质化学、生物学指标，运用方差分析、多元逐步回归分析等定量研究手段，确定F值即$\sqrt{P\times(P/R)}$为代谢率的合适指标评价富营养化。在概率基础上确定F值的开放型分类，并建立了能快速、准确判别营养污染程度的判别模型。

关键词 浮游生物群落，富营养化，判别模型，上海水体。

富营养化是困扰湖泊、池塘的主要环境问题。使用群落功能性参数（目前大多数研究采用结构参数）监控富营养化是80年代以来水污染生态学的研究方向[1]。Odum(1956)首先将水生态系统总代谢用于群落定位[2]Caspers和Karbe(1967)进一步提出代谢与污染之间的关系，将生产力、呼吸及两者比值作为代谢指标去确定水体特征和群落位置[3]。津田松苗(1976)论述代谢-污染模型时认为将生理学观点引入污染生态学是一个飞跃，抓住了污染的本质。但无论是Caspers和Karbe还是津田松苗都没提出定量研究的结果[4]。Odum的研究属定量研究。但需要大量的人力、物力和长时间的野外工作。本研究在标准代谢率测试基础上建立了富营养化与代谢参数之间的数值模型并为环境管理提供了一种快速、准确的监控手段。

1 实验方法

选择浮游生物群落代谢作为指标而不选生态系统的总代谢，基于两个原因：①浮游生物群落（尤其是藻类）因营养输入过度而异常繁殖是富营养化的普遍规律和主要特性；②代谢率模型有很大潜力成为快速、准确的富营养监控手段。

代谢率测试标准化是将它用于监测的首要条件。笔者采用的可控测试系统由5部分组成，氧电极、反应小室、光源、记录仪和调温水浴。将30ml样品密闭在反应室中，根据条件试验结果，选取最适光照(11.84 J/cm^2·h)及温度（25±0.05℃），使即便来自贫营养水体的样品也能在适当时间内(≤10min)获得结果。这结果排除了野外代谢率测定的不确定性；它仅是特定营养条件下的生物学效应的表征。

2 数据基础

取样范围主要是上海的风景园林中的中、小型水体，也有部分郊区其它功能的水体。它们大多属半封闭或封闭型。样本共147个。现场参数有透明度、消光系数、电导、pH、溶解氧、水深、周围地貌组成、水体底质及感官指标。氮、磷等化学分析中采用平行未知样控制分析误差（相对误差<5%），生物学分析中进行精度试验。方法的数据重现性良好，结果均在95%置信限范围内。

147个样本的生物、化学参数统计见表1。由于样本从贫营养到超富营养非常离散，平均值及区间均作几何处理。与OECD的统计相比，上海水体的氮含量明显偏高，磷水平也不低，Chla的水平超过欧美水体。方差分析表明。Chla、总磷、产氧速率(P)和呼吸率(R)在时间尺度上的消长相互关联。

3 代谢相关因子多元回归分析

确定群落营养状况采用P和P/R是适宜的[5]。P值代表水体的群落产氧率，而P/R则是自、异养区别的最佳测度。根据Hilbert空间理论

1993年6月27日收到修改稿

表 1　147 个水体营养状态统计

参　数	符号	单位	几何均值	最小值	最大值	X±1.96SD	
消光系数	η	m^{-1}	3.53	0.87	23.38	0.90	13.88
总　氮	TN	mg/L	2.88	0.36	26.32	0.58	14.23
总　磷	TP	mg/L	0.22	0.03	1.91	0.03	1.65
产氧速率	P	$mgO_2/(L \cdot h)$	0.92	0.04	20.03	0.10	8.57
呼吸率	R	$mgO_2/(L \cdot h)$	0.39	0.04	4.90	0.04	3.43
叶绿素 a	Chla	mg/m^3	50.72	0.01	1945.38	2.42	1064.92
代谢率比	P/R		2.31	0.04	100.00	0.17	32.40
综合指数	F		1.45	0.04	20.00	0.16	12.80
卡森指数	TSIs		70.66	60.37	95.09	51.22	97.49
硝酸盐氮	NO_3-N	mg/L	0.42	0.03	2.28	0.08	2.20
氨　氮	NO_3-N	mg/L	0.70	0.07	10.60	0.06	7.94
可溶性磷	PO_4-P	mg/L	0.06	0.001	1.18	0.00	1.46

或概率原理，提出两种综合代谢率指标：

$$F_1 = \sqrt{P^2 + (P/R)^2} \quad (1)$$

$$F_2 = \sqrt{P \times (P/R)} = P/\sqrt{R} \quad (2)$$

F_1 认为 P 和 P/R 是不同的矢量，将它们的模值作为综合代谢指标；F_2 将 P 和 P/R 视为判别富营养化的均权因子，只有 2 个因子都超过一定数值，才能形成污染。同样，营养因子数据集合根据 N/P 的不同也分成两类：一类 N/P 在 7—15 之间。OECD(1982)认为在此范围内营养水平与营养盐存在较好的相关[6]；而 Forsberg(1978)则认为比值范围以 10—17 为宜[7]。笔者将 F_1、F_2 分别与两个不同 N/P 的数据集合作逐步回归分析，选出残差平方和最小、相关系数最大的方程：

$$F_2 = 0.8646 - 0.0579x_1 + 1.9712x_2 + 0.085x_3 \quad (3)$$

x_1 为总氮，x_2 为总磷，x_3 为叶绿素 a。方程相关系数(r)为 0.8725。而全回归 r 值仅提高 0.0061。方程(3)F 检验回归相关显著，所选用的数据集合为 Forsberg 的 N/P(10—17)。对方程(3)作灵敏度分析(表 2)，表明 3 个自变量中 Chla 对 F_2 的影响最大，总磷次之，总氮最小。综上所述可得如下结论：

(1)代谢率综合指标 F_2 适宜评判水体富营养化；

(2)回归及灵敏度分析显示 F_2 是生物学、化学因子的综合，对生物因子更灵敏，这在数值上验证了有关代谢率与富营养关系的理论。

在以下论述中将 F_2 表示为 F。

表 2　逐步回归方程灵敏度分析

指　标	变量 1(T-N)	变量 2(T-P)	变量 3(Chla)
变量扰动量	0.1	0.1	0.1
状态方程扰动	0.0058	0.1971	0.0085
灵 敏 度	0.0038	0.0719	0.7076

4　营养判别模型及应用

4.1　F 的评价基础

现行的富营养化评价方法很多。影响较大、较常用的有我国实行的氮、磷标准、Chla 评价和 Carlson 指数。3 种方法由于侧重点不同，结果不完全一致。代谢率值(F、P、P/R)与这些方法的数值关系见表 3，统计分析表明 F 与 3 种方法有稳定的关系，尤其是贫、中营养分类中 F 值统计有确定的数值范围：贫营养在 0.5 左右，中营养约 0.7。当 F 大于 1，在 3 种方法中富营养的概率大大高于其它营养分级。按小样本 t 分布处理，将 3 种方法判为贫营养的样本作为并集，α 取 0.01，P 平均值为 0.32(0.19—0.56)，P/R 为 0.74(0.45—1.21)，Chla 为 5.82(1.89—17.85)。可见 P 为

0.6 是贫营养的上限；当 $P<0.2$，$P/R<0.45$ 水 体在很大程度上有外源性可降解有机污染。

表 3 代谢率指标在 3 种现行分类中的统计

方 法	参数	贫营养	中营养	富营养	超富营养
T-N/P	F	0.56(0.28—1.11)	0.75(0.44—1.28)	1.83(1.40—2.37)	
	P	0.39(0.17—0.88)	0.56(0.31—1.03)	1.14(0.87—1.48)	
	P/R	0.75(0.29—1.90)	1.00(0.49—2.06)	3.02(2.20—4.14)	
Carlson	F	0.55(0.37—0.82)		1.87(1.45—2.41)	
	P	0.39(0.24—0.66)		1.15(0.89—1.49)	
	P/R	0.75(0.46—1.21)		3.31(2.30—4.26)	
Chla	F	0.50(0.29—0.86)	0.66(0.38—1.14)	1.18(0.82—1.69)	2.98(2.22—4.00)
	P	0.30(0.13—1.02)	0.48(0.26—0.88)	0.70(0.50—0.99)	1.85(1.37—2.51)
	P/R	0.82(0.42—1.58)	0.98(0.74—2.02)	1.97(1.23—3.17)	4.82(3.29—7.06)

4.2 F 值分级研究

F 值分级同时参考了 P 和 P/R 的数值。Odum 认为 P/R 接近 1 为代谢率比的一个临界值[8]，笔者将其范围设定为 0.9—1.1，P 值小于 0.6 作为另一个临界值。由此产生以代谢率模型中参数为基准的营养分级系统(表 4)。该系统分 4 级：富营养、中营养、贫营养、超贫营养。上海地区 147 个样品中 81 个属富营养，34 个中营养，14 个贫营养，18 个超贫营养。对各营养分级的生物学因子(P、P/R、Chla 和 F)作统计。各因子平均值及范围($\alpha=0.01$)见表 5。由此获得代谢率综合指标 F 的开放型分类系统，从而摆脱了表 4 所列的繁锁、固定的分类。考虑到上海地区水体营养水平较高、生物效应显著(Chla 的水平很高)的特征，将超贫与贫营养合并，增加超富营养一类(F 值>3.7)。用计算机在 P、R 平面上模拟 F 值变化(图 1)。斜线区为超富营养(H)；圈状区为富营养(E)；点状区为中营养(M)；空白区为贫营

表 4 营养状况的代谢率分级

分级的代谢率条件	营养分级	系统营养状况
$P<0.6$ $P/R<0.9$	超贫	系统生产力极低[1)]
$P<0.6$ $P/R=0.9$—1.1	贫	系统生产力较低，系统相对稳定
$P<0.6$ $P/R>1.1$	中	系统处于过渡状态，很不稳定
$P>0.6$ $P/R<1.1$	中	有时偏向富营养或贫营养
$P>0.6$ $P/R>1.1$	富	系统生产率很高[2)]

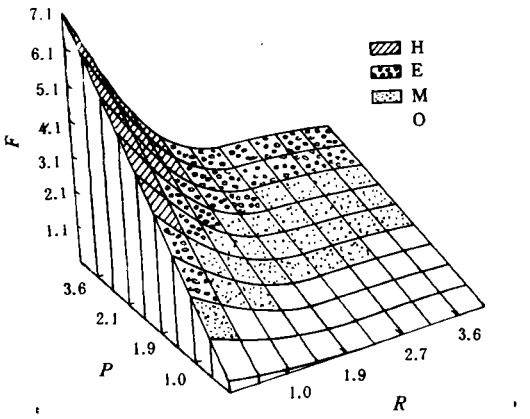
1) 当 $P<0.2$，$P/R<0.45$，外源性有机污染的概率增加

2) 当 $P>2.2$，$P/R>6.6$，系统处于超富营养，浮游生物与营养盐失去比例关系

表 5 代谢率分级中生物因子的统计

营养分级	P	P/R	Chla[1)]	F
超贫	0.17(0.10—0.29)	0.28(0.17—0.45)	14.17(5.47—36.69)	0.22(0.14—0.35)
贫	0.25(0.13—0.47)	1.00	15.41(6.43—36.89)	0.50(0.36—0.68)
中	0.78(0.45—1.13)	1.46(0.97—2.20)	27.06(18.26—40.1)	1.02(0.86—1.92)
富	1.79(1.46—2.20)	5.20(3.89—6.69)	101.70(70.0—165.6)	3.05(2.49—3.74)

1) Chla 含脱镁叶绿素



P-R 平面上的 F_1 值模拟图

养。显然，代谢率综合指标所表征的富营养过程是非线性的。当代谢率参数越过某一数值(可称之为门槛)，富营养化过程会急剧加速。

4.3　营养判别模型

F 值分级无论开放型或固定型都有不足之处。前者对非专业人员而言使用困难，后者主观性强，易被误用。因此，笔者建立了上海水体营养判别模型。它使管理人员仅有样品的 *P*、*R* 值便可对水体作营养分类(表 6)。由于代谢率与营养分级之间是非线性关系，模型采用二次判别。经 *F* 值检验 4 个营养判别模型之间差异显著。

表 6　营养判别模型

方程系数	变量	贫	中	富	超富
1	—	−2.20	−11.44	−8.93	−5.86
2	*P*	−37.66	−11.87	−4.68	−0.61
3	*R*	11.22	6.99	7.03	6.81
4	*F*	37.56	26.43	8.91	0.70
5	P^2	−114.12	−15.38	−4.93	−0.15
6	*PR*	57.77	16.54	10.74	1.86
7	*PF*	167.64	23.34	5.76	0.14
8	R^2	−8.74	−4.85	−6.86	−8.78
9	*RF*	−42.21	−12.36	−6.62	−0.92
10	F^2	−73.68	−16.13	−2.85	−0.57

将 24 组已知 *P*、*R* 值的未参加建模的样本数据代入判别模型验证(表 7)，判对 21 个(与 *F* 值分级符合)，判错 3 个。其中 5 号样品($P=3.01, R=2.87, F=1.78$)原判富营养，新判中营养。13 号样品($P=0.56, R=0.55, F=0.76$)原判中营养。新判贫营养。24 号样品($P=4.31, R=6.24, F=1.73$)原判富营养，新判中营养。原判的依据是 *F* 值的分级，判别模型是依据 *P*、*R* 和 *F* 3 项指标综合考虑。从 13 号样品明显可以看出判别模型优于 *F* 值分类，该样品 *P*/*R* 近 1，$P<0.6$，属贫营养较合理。5 号样品虽 *P* 值较高，但 *P*/*R* 仍近似 1，有机物积累速率并不大，判中营养有一定理由；24 号样品较特殊，*P*、*R* 都很大($R>P$)，*P*/*R* 显著小于 1，与其说富营养严重不如说外源性有机污染更恰当。该样品是一个以分解代谢为主的生理、生化过程。

表 7　样品的模型检验

编号	旧分类	新分类	验后概率
1	1	1	0.98
2	4	4	0.99
3	2	2	0.99
4	1	1	0.99
5	3	2	0.83
6	2	2	0.98
7	2	2	0.99
8	3	3	0.99
9	2	2	0.99
10	1	1	1.00
11	2	2	1.00
12	1	1	1.00
13	2	1	0.88
14	3	3	0.99
15	1	1	0.99
16	1	1	1.00
17	3	3	0.99
18	1	1	1.00
19	2	2	0.99
20	1	1	0.99
21	2	2	0.99
22	1	1	0.99
23	4	4	1.00
24	3	2	0.85

5　结论

(1)标准化的群落代谢测试技术是将代谢率指标用于监控富营养化的首要条件。在此基础上产生的数据不仅能建立管理模型而且在生态毒理研究中有广阔的前景。

(2)与理、化评价方法比较,代谢率模型更直接地反映了富营养化的本质并有回顾与趋势分析功能。与其它生物评价方法比较,代谢率作为群落功能参数比结构参数(Chla 等)更稳定,易排除干扰,对污染反应较一致。

(3)营养判别模型具有迅速、准确的优点。样品取样量少、测试时间短,适宜大样本、经常性污染监控。判别结果用计算器也能求算。不足之处在于由于样本的限制,目前模型还是区域性的。另外,代谢测试过程有一定的技术难度。

致谢 陆继红、姚士晶参加了部分工作,谨致谢意。

参考文献

1 Kruijf H A M et al.. Manual on Aquatic Ecotoxicology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988
2 Odum H T. Limnol. Oceanogr. 1956, (1): 102
3 Caspers H et al.. Arch. Hydrobiol.. 1966, 61: 453
4 日本生态学会环境问题委员会. 环境和指示生物. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 12
5 Odum E P. Fundamentals of Ecology (3rd ed.) Philadelphia; Saunder Co., 1971: 245
6 OECD Eutrophication of Waters Monitoring, Assessment and Control. Paris: OECD Publications, 1982: 182
7 Forsberg C R et al.. Verein. Limnol. 1978 20: 825
8 Odum E P. Science. 1969 (164): 262

·新仪器·

氢化物原位富集石墨炉自动进样器

根据我中心多年的研究成果——氢化物石墨炉原位富集分析方法而研制的氢化物原位富集石墨炉自动进样器已于 1991 年 5 月通过中国科学院主持的技术鉴定,并于 1993 年 3 月生产出单片机控制的改进型仪器。

该仪器是根据金属钯、锆等元素对能形成氢化物的砷、碲、锑、铋、锗、硒、汞、铅和锡等元素有选择性吸收特性而研制的一种无火焰原子吸收仪用的氢化物自动进样器。

该仪器配合石墨炉原子吸收仪可分析砷、硒等能形成氢化物的 9 种有益有害元素,其中分析砷的指标如下:

灵敏度:11pg/0.0044A,**检出限**:21pg/ml

重现性:6.2×10^{-3},

本仪器由于采用了原位富集方法,不但样品前处理简单,而且灵敏度比常规分析方法高 2 个数量级。仪器使用方便,不须对原子吸收仪做任何改动放在石墨炉旁即可配合使用。

本仪器配合石墨炉原子吸收仪可用于人的血、尿、头发和食品,自来水等样品中有益有害元素的超痕量分析,也可用于环境保护,商品检验,地矿样品等分析。

该仪器配合石墨炉原子吸收仪具有灵敏度高,重现性好,检出限低,操作简单,自动化程度高等优点,是利用石墨炉原子吸收仪分析氢化物的分析工作者有利的辅助仪器。

联系人:李绍元

地 址:北京市海淀区双清路 15 号中科院生态环境研究中心

邮编:100085 **电话**:2555378

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

Emission of Isoprene from Deciduous Forest. Zhang Fuzhu. Miao Hong, Lu Chun (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080): *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(1), 1994, pp. 1—5

A measurment of isoprene emission from deciduous forest was finished in North China. Three groups were classified according to their isoprene emission rates. The high emission species, Liaodong Oak, was found to have an obvious variation from day to night. There were the maximum emission raters (1.92μg/g • h) at 14 : 00 and the minimum (−0) at 2: 00. In several environmental factors, light has significant correlation ($r = 0.86$) with the emission rates of Liaodong Oak. Factors could be ranked by the following order in terms of the degrees of their impacts on plant emission: light > leaf temperature > ambient temperature > humidity. In deciduous broadleaf forest, the concentration of isoprene varied from 13.6×10^{-6} to 26.7×10^{-6} with time and height. By the energy balance ratio method, the flux of isoprene above canopy was about 4800 g/(m^2 • h) in the morning. This research collected a new gas analysis system. Using GC-PID gas chase chromatograph, the untreated air samples could be measured directly.

Key words: isoprene, emission, deciduous forest.

Determination of Toluene and Xylene using a Piezoelectric Crystal Sensor Coated with Crown Ethers. Huang Zaifu, Xie Yuhua et al. (Department of Environmental Science, Wuhan University 430072): *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(1), 1994, pp. 6—9

The vibrational frequency of a piezoelectric crystal will be decreased as a gaseous pollutant is absorbed on its coat, and under the test conditions, the decrease of frequency is propotional to the concentration of the gas. In this paper, three of the crown ethers were used as a coat for monitoring toluene and xylene first, and they can selectively adsorb the particular gas, the concentration of that gas can be determined quantitatively. The absorption-desorption is reversible process rapidly, the response sensitivity is quite good. The low molecular hydrocarbons do not interfere with this determination.

Key words: crown ether, piezoelectric crystal, toluene, xylene.

Metabolic Model of Plankton Communities in Eutrophication Classification in The Waters of Shanghai. Yin Haowen, Zhao Huaqing (Shanghai Research Institute of Environmental protection, Shanghai 200233): *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(1), 1994, pp. 10—14

Under the standard conditions, the oxygen production rates (P) and respiratory rates (R) of natural plankton communities were measured. Meanwhile, chemical and biological characteristics were tested in water, such as T-N, T-P, CHLa. Data sets were handled by means of variance analysis, correlation analysis, and multiple regression. The F value, SQRT(P × (P/R)), was determined as the suit metabolic rate index in evaluating eutrophication. Having based on probability, the opening classification with F and a judgement model which could partition nutrient type were set up quickly and accurately.

Key words: plankton communities, eutrophication, judgement model, waters of Shanghai.

Experimental Studies on Removal of SO_2 and NO by Positive Pulse Corona and Ammonia Spirit. Ning Cheng, Li Jin et al. (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074): *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(1), 1994, pp. 15—18

Pulse corona for removing SO_2 and NO from Coal-burning exhaust gas is a newly developed technology. Removal of SO_2 and NO from a simulated flue gas, which was made by combining SO_2 and NO with air, was studied to understand the relationship between removal efficiency, the amount of added ammonia spirit, corona, and temperature, by utilizing high voltage positive pulse produced by a nanosecond pulse voltage generator. Removal efficiency for SO_2 was 95%. The same efficiency can be obtained even if the gas temperature is higher by increasing amount of injected ammonia spirit. Pulse corona enhanced the reaction of ammonia and sulfur oxides and rised the stability- heat of by products. NO can' t be removed by ammonia alone. Oxidation efficiency of NO was 31% by using pulse corona.

Key words: pulse corona, SO_2, NO, ammonia spirit.

Study and Preparation of Environmental Soils Standard Reference Materials. Li Baomin (Environmental Monitoring Centre of Heilongjiang Province): *Chin. J. Environ. Sci.*, **15**(1), 1994, pp. 19—24

The samples of sandy soil, dark soil and dark brown podzolitic soil were collected, dried at 120℃ for 30 hours, and then ground in a high-alumina ceramic ball mill. X-ray fluorecence spectrometry was used to test the homogeneity of Cu, Zn, Fe, Mn, Ti, Sr, V, Zr, etc. A two-level nested variance analysis and coparison, F-test and t-test were carried out. The results showed that the samples were homogeneous. Eighteen different techniques were used for certification, including plasma spectrometry, atomic