

# 从营养状态指数看南极中山站、长城站 附近若干湖泊的环境质量\*

蔡庆华 王 骥 李植生 冯伟松 王洪铸 梁彦龄

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

**提要** 根据 1991—1995 年间对南极中山站和长城站附近淡水生态系统进行的三次夏季考察结果, 运用建立于藻类叶绿素  $a$  含量、湖水透明度及总磷浓度基础上的营养状态指数法以及层次分析和聚类分析等方法对南极若干湖泊的环境质量进行连续的数值化的综合评价。结果表明, 这些湖泊均属于贫营养—中营养水平, 特别是作为中山站饮用水源的莫愁湖和长城站饮用水源的西湖, 其水质甚佳。但比较 1995 和 1993 年西湖的水质, 发现有下降趋势, 应引起重视。

**关键词** 南极 湖泊 营养状态 综合评价 拉斯曼丘陵 菲尔德斯半岛

淡水水体在南极虽然小而分散, 但亦是该地区一类十分重要的生态系统, 比如一些湖泊作为饮用水源, 它们对人类在南极的生活有着直接和密切的关系。中国科学院水生生物研究所于 1991/1992, 1992/1993 以及 1994/1995 年度的夏季分别对中山站所在地——拉斯曼丘陵(Larsemann Hills)和长城站所在地——菲尔德斯半岛(Fildes Peninsula)的淡水生态系统进行野外综合考察, 并采用系统的数学分析方法, 对中山站附近主要湖泊生态系统进行环境综合分析及生态系统相似性研究(梁彦龄等, 1994), 运用多元统计分析中的逐步判别方法, 对南极中山站和长城站附近若干湖泊生态系统的基本生态学特征进行数学解析(蔡庆华等, 1996)。本文在这些工作的基础上, 从营养状态指数的角度, 对上述两个地区的湖泊, 特别是作为中山站饮用水源的莫愁湖及长城站饮用水源的西湖的环境质量进行综合评价。

## 1 材料与方法

当前世界各国广泛采用的湖泊营养状态评价方法, 可归纳为 6 大类型(蔡庆华, 1997), 其中营养状态指数(trophic state index, TSI)法, 即综合多项湖泊营养状态指标, 并将其转换为营养状态指数而对湖泊营养状态进行连续分级的方法, 由于可对湖泊营养状态进行连续的数值化的分级(Carlson, 1977)<sup>1)</sup>, 为进一步的定量分析提供了坚实的基础, 是湖泊水环境质量评价中的主要方法之一(蔡庆华, 1993)。但采用该方法评价某些水体的营养状态时, 常会遇到这样的问题: 选择不同的指标可能得到不同的评价结果, 这是因为

\* “八五”国家攻关项目, 85-905-02-02 号; 中国科学院“八五”重大项目 KJ85-08 号。蔡庆华, 男, 出生于 1964 年 9 月, 博士, 研究员。

1) Carlson, R. R., 1977, *Limnol. Oceanogr.*

收稿日期: 1997 年 3 月 27 日, 接受日期: 1997 年 11 月 25 日。

湖泊营养状态的评价,即确定水体的状态属性,实际上是一个将定性问题量化的多变量的综合决策过程;除了建立合理的指标体系外,确定各因子之间的权重分配也是一个关键性问题,因为各因子对湖泊营养状态的贡献并不一致,故在湖泊营养状态评价的过程中需要计算出评价指标的相对重要性从而保证评价的客观性与准确性。

研究湖泊见表 1。

### 1.1 评价方法与标准

Carlson(1977)<sup>1)</sup>提出了以湖水透明度( $S_d$ )、藻类叶绿素  $a$  浓度( $Chl. a$ )和湖水总磷浓度(TP)为指标的湖泊营养状态指数评价系统。其中,他假定湖水中的悬浮物质全部为浮游植物,因此湖水  $S_d$  主要受浮游植物丰度的影响,而 TSI 指数以  $S_d$  为基准,分为 0—100 的连续数值,作为评价湖泊营养状态的分级标准。此外,令  $S_d$  每增加一倍,TSI 指数下降 10 分。而当 TSI 指数为零时,湖泊营养状态应最低,此时,湖水  $S_d$  应为最大。据 Hutchinson(1957)报道,湖水  $S_d$  最大的湖泊是日本的 Masyuko 湖,其  $S_d$  达 41.6 m。Carlson(1977)<sup>1)</sup>以 64 m(大于 41.6 m 的 2 的整数幂)作为 TSI 指数等于零时的湖水  $S_d$  值,以使其 TSI 指数可适应于所有湖泊,其结果可用如下方程表示:

$$TSI(S_d) = 10 \{ 6 - \ln(S_d) / \ln 2 \} \quad (1)$$

根据一些湖泊的调查资料,Carlson 得出湖水  $S_d$  与  $Chl. a$ ,  $Chl. a$  与 TP 的经验公式:

$$\ln(S_d) = 2.04 - 0.68 \times \ln(Chl. a) \quad r = 0.93, n = 147$$

$$\ln(Chl. a) = 1.449 \ln(TP) - 2.442 \quad r = 0.846, n = 43$$

将此二公式合并,可得  $S_d$  与 TP 的经验公式:

$$\ln(S_d) = 3.876 - 0.98 \times \ln(TP)$$

化简即得:  $S_d = 48/TP$ , 从而可得到以  $Chl. a$  和 TP 为基础的 TSI 计算公式:

$$TSI(Chl. a) = 10 \times \{ 6 - [2.04 - 0.68 \times \ln(Chl. a)] / \ln 2 \} \quad (2)$$

$$TSI(TP) = 10 \times [6 - \ln(48/TP) / \ln 2] \quad (3)$$

1981 年, Aizaki 等在应用 Carlson 的 TSI 指数对若干日本湖泊进行营养分类时发现,以  $S_d$  为基准的 TSI 指数,忽视了浮游植物以外的其他因子如水色、湖水中的溶解物质以及其他悬浮物质对  $S_d$  的影响,因而具有一定的限制。他们认为,改以藻类  $Chl. a$  浓度为基准可较好地解决这一问题。其营养状态指数被称为修正的营养状态指数( $TSI_M$ )。他们假定  $TSI_M = 100$  时  $Chl. a$  浓度为  $1000 \text{ mg/m}^3$ , 而  $TSI_M = 0$  时的  $Chl. a = 0.1 \text{ mg/m}^3$ , 且  $Chl. a$  浓度每增加 2.5 倍时,对应的  $TSI_M$  指数增加 10 分,其结果可用如下公式表示:

$$TSI_M(Chl. a) = 10 \times [2.46 + \ln(Chl. a) / \ln 2.5] \quad (4)$$

根据日本 24 个湖泊的调查结果,  $Chl. a$  与  $S_d$  和 TP 分别有如下关系:

$$\ln(Chl. a) = 3.69 - 1.53 \times \ln(S_d) \quad r = 0.96, n = 22$$

$$\ln(Chl. a) = 6.71 + 1.15 \times \ln(TP) \quad r = 0.90, n = 22$$

从而可得  $S_d$  和 TP 的  $TSI_M$  指数计算公式:

$$TSI_M(S_d) = 10 \times \{ 2.46 + [3.69 - 1.53 \times \ln(S_d)] / \ln 2.5 \} \quad (5)$$

$$TSI_M(TP) = 10 \times \{ 2.46 + [6.71 + 1.15 \times \ln(TP)] / \ln 2.5 \} \quad (6)$$

1) Carlson, R. R., 1977, *Limnol. Oceanogr.*

### 1.2 权重分配

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)由 Saaty(1980)提出并广泛应用,是系统分析中经常使用的一种数学方法。它特别适用于处理那些多目标的、多层次的复杂大系统问题和难于完全用定量方法来分析与决策的社会系统工程中的复杂问题,它可以将人们的主观判断用数量形式来表达和处理,是一种定量与定性相结合的分析方法(赵焕臣等, 1986)。层次分析的一个基本步骤是要比较若干因素对同一目标的影响,从而确定它们在目标中所占的比重。因此,在环境质量评价中应用层次分析法来确定各指标的权重是合适与可行的(蔡庆华,1993)。

对于 Carlson(1977)<sup>1)</sup>指标中的 3 个因子,相对重要性可定为:Chl. *a* > S<sub>d</sub> > TP(OECD, 1982; Wetzal, 1983),相应判断矩阵为:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

相应权向量为  $W = (0.540, 0.297, 0.163)$ ,其中,  $\lambda_{max} = 3.009$ ,  $CI = 0.005$ ,  $RI = 0.580$ ,  $CR = 0.006$ 。式中,  $\lambda_{max}$  为上述判断矩阵的最大特征值;CI 为一致性指标(consistency index),  $CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ ,其中  $n$  为判断因子的个数(本文中  $n = 3$ );RI 为随机一致性指标(random consistency index);CR 为一致性比率(consistency ratio),  $CR = CI/RI$ 。Saaty(1980)指出,当  $CR < 0.1$  时,可以认为具有满意的一致性,即所构造的判断矩阵的不一致性是可以接受的。本研究所构造的判断矩阵的  $CR = 0.006 \ll 0.1$ ,因此,权重分配结果具有满意的一致性。即权重分配为  $W(\text{Chl. } a) = 0.540$ ,  $W(S_d) = 0.297$ ,  $W(\text{TP}) = 0.163$ 。将其与式(1)—(3)的 TSI 指数及式(4)—(6)的 TSI<sub>M</sub> 结合起来,便可得到湖泊营养状态的综合评价模型:

$$TSI = W(\text{Chl. } a) \times TSI(\text{Chl. } a) + W(S_d) \times TSI(S_d) + W(\text{TP}) \times TSI(\text{TP}) \quad (7)$$

$$TSI_M = W(\text{Chl. } a) \times TSI_M(\text{Chl. } a) + W(S_d) \times TSI_M(S_d) + W(\text{TP}) \times TSI_M(\text{TP}) \quad (8)$$

### 1.3 聚类分析

综合评价,实际上是通过某种映射,将由  $n$  个指标组成的  $n$  维状态空间的点投影到 1 维空间,从而得到人们易于比较大小的纯量。但在投影过程中,或多或少会有信息损失。而聚类分析则是直接研究  $n$  维空间中点与点之间的相似关系,将相似程度高(或距离小)的点归聚成类,这虽避免了投影过程中的信息损失问题,但又无法定量地比较类与类间的

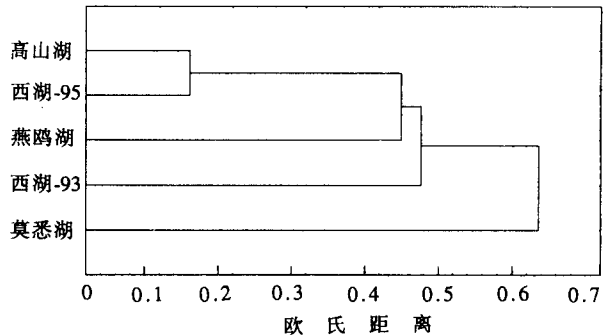


图1 基于 Chl. *a*, S<sub>d</sub> 和 TP 三项指标的南极中山站、长城站附近若干湖泊的营养状态聚类图(1992—1995)

Fig.1 Cluster dendrogram of trophic state based on Chl. *a*, S<sub>d</sub> and TP of some lakes around Chinese Zhongshan Station and Great Wall Station, Antarctica (1992—1995)

大小。因此,工作中应将此二种方法结合起来使用,才能得出更为客观和准确的结果(蔡庆华等,1992)。有关聚类分析的方法很多,本研究使用的是基于欧氏距离的系统聚类法。

## 2 结果与讨论

用上面得出的评价标准和权重分配结果即式(7)—(8),对南极长城站和中山站附近若干湖泊的营养状态进行综合评价,结果如表1所示。图1则绘出了基于3项指标(Chl.  $\alpha$ , Sd, TP)的营养状态聚类图,不难看出,结果与综合评价的结果是一致的。分析表明,这些湖泊的环境质量基本处于贫营养水平,少数湖泊接近中营养水平。特别是作为中山站饮用水源的莫愁湖和长城站饮用水源的西湖,其水质的各项指标及综合评价值都很低,是相当清洁的水体,也是较为理想的饮用水源。但值得注意的是,1995年西湖的水质较1993年有较大的下降趋势,综合评价值接近中营养水平,由此看来,站区人类活动对西湖水环境的影响较大,应抓紧保护这一宝贵的水资源。

表1 南极中山站和长城站附近若干湖泊营养状态的综合评价(1992—1995)

Tab.1 Comprehensive evaluation for trophic state of some lakes around Chinese Zhongshan Station and Great Wall Station, Antarctica (1992—1995)

湖名	年份	所属站名	Chl. $\alpha$			Sd			TP			加权平均		营养水平
			$\mu\text{g/L}$	TSI	TSI <sub>M</sub>	m	TSI	TSI <sub>M</sub>	mg/L	TSI	TSI <sub>M</sub>	TSI	TSI <sub>M</sub>	
莫愁湖	1992	中山站	0.36	21	13	3.3	43	45	0.026	51	52	32	29	贫营养
高山湖	1993	长城站	1.39	34	28	2.6	46	49	0.035	55	56	41	39	中营养
燕鸥湖	1993	长城站	0.91	30	24	2.5	47	50	0.040	57	57	39	37	贫营养
西湖	1993	长城站	0.50	24	17	2.7	46	48	0.024	50	51	35	32	贫营养
西湖	1995	长城站	1.29	33	27	2.7	46	48	0.030	53	54	40	38	中营养

## 参 考 文 献

- 赵焕臣等,1986,层次分析法,科学出版社(北京),1—56。  
 梁彦龄等,1994,水生生物学报,18(1):92—94。  
 蔡庆华,1997,湖泊科学,9(1):89—94。  
 蔡庆华,1993,海洋与湖沼,24(4):335—339。  
 蔡庆华等,1992,湖泊科学,4(2):46—51。  
 蔡庆华等,1996,水生生物学报,20(1):83—85。  
 Aizaki, M. et al., 1981, Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud., 23:13—31 (in Japanese, with English Abstract).  
 Hutchinson, G. E., 1957, A treatise on Limnology. Vol. I, Geography, Physics and Chemistry, John Wiley & Sons Inc. (New York), pp. 1—163.  
 OECD, 1982, Eutrophication of Waters, OECD (Paris), pp. 1—154.  
 Saaty, T. L., 1980, The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill Inc. (New York), pp. 1—90.  
 Wetzel, R. G., 1983, Limnology, 2nd ed., Saunders College Publ. Co. (Philadelphia), pp. 134—341.

# EVALUATION OF ENVIRONMENTAL QUALITY OF SOME LAKES AROUND CHINESE ZHONGSHAN STATION AND GREAT WALL STATION, ANTARCTICA, BASED ON TROPHIC STATE INDEX

Cai Qinghua, Wang Ji, Li Zhisheng, Feng Weisong, Wang Hongzhu, Liang Yanling

(*Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072*)

**Abstract** The freshwater ecosystems around Chinese Zhongshan Station and Great Wall Station, Antarctica, were surveyed three times in the summer of the years 1991/1992, 1992/1993, and 1994/1995. By means of the trophic state index (TSI) and its modifier (TSI<sub>M</sub>) including algal chlorophyll *a* (Chl. *a*), water transparency (*Sd*) and total phosphorus (TP), the continuous numerical classification for environmental quality of some lakes (Tab. 1) near the Chinese Antarctic stations is obtained. But the evaluation of environmental quality or the determination of the trophic state of the lakes is a multivariable comprehensive decision process, of which the qualitative aspects should be quantitatively represented. The authors therefore built a comprehensive assessment model after calculating the weight attribution of the three TSI (and TSI<sub>M</sub>) indices by using the method of analytic hierarchy process. The model was listed as:

$$TSI = W(\text{Chl. } a) \times TSI(\text{Chl. } a) + W(Sd) \times TSI(Sd) + W(TP) \times TSI(TP)$$

or

$$TSI_M = W(\text{Chl. } a) \times TSI_M(\text{Chl. } a) + W(Sd) \times TSI_M(Sd) + W(TP) \times TSI_M(TP)$$

where  $W(X)$  were the weights for the above three parameters with value as 0.540, 0.297 and 0.163, respectively. Since the process of making a comprehensive evaluation with  $n$  indices is actually a mathematical operation producing the map from  $n$ -dimension state space to 1-dimension one, there was certain information loss. To make up for this loss, cluster analysis based on Euclidean distance was also used in the study. The result indicates that these lakes are oligotrophic or mesotrophic waters, especially Mochou Lake at Zhongshan Station and Xihu Lake at Great Wall Station, where lake water is of good quality and suitable as source of drinking water. Comparing the results of Xihu Lake between 1995 and 1993, however, it indicates that the water quality of the lake has more or less declined.

**Key words** Antarctica Lakes Trophic state Comprehensive evaluation Larsemann Hills Fildes Peninsula