

# 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨

中国科学院南京地理与湖泊研究所 舒金华

**摘要:**本文通过对我国14个代表性湖泊富营养化调查资料的分析,就我国湖泊富营养化程度的评价参数、标准和模式进行了有益的探讨。所提出的评价方法较好地反映了我国湖泊的实际情况。

众所周知,湖泊富营养化系指湖泊水体在自然因素和人类活动的影响下,逐渐由生产力较低的贫营养状态向生产力较高的富营养状态变化的一种现象。湖泊水体一旦进入富营养阶段,就会因藻类等水生植物过量繁殖而导致水质恶化,影响湖区人民生活和经济建设的发展。为了准确评定湖泊所处的营养状态,进而为湖泊富营养化的防治提供科学依据,近半个世纪以来,世界各国一些著名科学家如吉村、沃伦维德、卡森、合田键等人先后提出了特征法、参数法、营养状态指数法、图解法和生物评价法等多种评价方法,在国外一些湖泊富营养化评价的应用中均收到了较好的效果<sup>[1,2]</sup>。但由于湖泊所处的地理位置、环境条件和受人类活动影响程度各不相同,湖泊富营养化的类型也有所差异(如浮游植物型、大型水生植物型等),其评价方法也不完全一致。

为了寻求适合我国湖泊(主要是浮游植物型湖泊)富营养化程度的评价方法,我们根据国内近期(1987~1988年)14个有代表性湖泊富营养化调查资料的综合分析,对我国湖泊富营养化程度综合评价的参数、标准和模式等作如下方面的分析与探讨。

## 一、评价因子

对于浮游植物型湖泊来说,富营养化现象的发生主要是湖水中磷、氮等营养物质增加,导致藻类过量繁殖所致。因而,一般均以反映湖泊藻类数量多寡的综合指标——叶绿素a(chla)作为占主导地位的评价因子。但因湖泊富营养化的演变过程十分复杂,影响富营养

化程度变化的因子甚多,所以在实际工作中采用多因子的综合评价,较单一因子的评价结果更接近湖泊的实际情况。为此,我们通过全国14个有代表性湖泊水质、生物调查资料的统计分析,求得叶绿素a与其他调查项目的相关关系(如表1所示)。

由表1的统计结果可以看出,12个参数中的TP、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub>、TN、SD、NH<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>等7个参数与chla有非常显著的相关关系,故这些参数均可作为湖泊富营养化的评价因子。但由于TP中包含有PO<sub>4</sub>的成份,TN中含有NH<sub>3</sub>-N的成分,COD<sub>Mn</sub>与BOD<sub>5</sub>有着较好的相关关系,且COD<sub>Mn</sub>的历史资料丰富,具有数据易于获得的优点,故在实际应用中拟选用chla、TP、TN、COD<sub>Mn</sub>、SD等5个参数作为我国湖泊富营养化评价的基本因子。

## 二、评价标准

目前,我国政府部门所颁布的各类水质标准中,除了“地面水环境质量标准”(GB3838-88)对总磷作了具体要求外,其他均未提及湖泊水体富营养化的有关标准。为了准确地评定湖泊水域富营养化的真实状况,根据国外湖泊富营养化评定标准的文献报道和我国湖泊富营养化引起用水障碍的分析,以及便于环境管理的原则,我们对我国湖泊富营养化各项评价因子的标准进行了初步研究。

### 1. 国外湖泊富营养化的判定标准

目前国外湖泊富营养化程度的评价标准甚多,其中应用较为广泛的有美国国家环保局

表1 我国部份湖泊 chla 与其他参数关系的分析

| 参 数                                    | 统计湖泊数量 | 相 关 系 数<br>(r) | 方 程 式  |
|--|--------|----------------|--|
| TP(毫克/米 <sup>3</sup> )                 | 14     | 0.93           | chl <sub>a</sub> = 0.21TP - 0.031                  |
| BOD <sub>5</sub> (毫克/升)                | 14     | 0.93           | chl <sub>a</sub> = 8.31BOD <sub>5</sub> - 6.93     |
| COD <sub>Mn</sub> (毫克/升)               | 14     | 0.90           | chl <sub>a</sub> = 11.63COD - 27.43                |
| TN(毫克/米 <sup>3</sup> )                 | 14     | 0.81           | chl <sub>a</sub> = 0.0098TN + 19.59                |
| SD(米)                                  | 14     | -0.65          | chl <sub>a</sub> = -37.70SD + 91.11                |
| NH <sub>3</sub> -N(毫克/米 <sup>3</sup> ) | 14     | 0.72           | chl <sub>a</sub> = 0.101NH <sub>3</sub> -N + 35.01 |
| PO <sub>4</sub> (毫克/米 <sup>3</sup> )   | 14     | 0.63           | chl <sub>a</sub> = 0.642PO <sub>4</sub> + 21.44    |
| pH                                     | 14     | -0.006         |  |
| SS(毫克/升)                               | 9      | 0.30           |  |
| 底栖动物                                   | 9      | 0.51           |  |
| 浮游动物                                   | 9      | -0.51          |  |
| 水温                                     | 14     | 0.46           |  |

(EPA, 1976年) 制定的评价标准; OECD 评价标准等<sup>[3]</sup>, 其主要指标值的范围可大致归纳为表 2 所示。

加拿大等国家一些著名学者研究成果中提出的

表2 国外湖泊富营养化分级标准的范围

| 指 标                          | 营 养 类 型  |          |          |           |
|------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
|                              | 贫 营 养    | 中 营 养    | 富 营 养    | 超 富 营 养   |
| 叶绿素a(毫克/米 <sup>3</sup> )     | 0.3~3.4  | 2~15     | 7~100    | 100~500   |
| 叶绿素a的峰值(毫克/米 <sup>3</sup> )  | 1.3~10.6 | 4.9~49.5 | 9.5~275  |           |
| 总磷(毫克/米 <sup>3</sup> )       | 4.8~13   | 10~49    | 20~500   | 500~10000 |
| 总氮(毫克/米 <sup>3</sup> )       | 250~1000 | 485~1200 | 861~4081 |           |
| 透明度(米)                       | >3.7     | 2.0~3.7  | <2.0     |           |
| COD <sub>Mn</sub> (毫克/升)     | <1       | 1~4      | >4       |           |
| 深水区溶解氧(饱和%)                  | >80      | 10~80    | <10      |           |
| 生物生产量(毫克C/米 <sup>2</sup> ·日) | 30~100   | 100~300  | 300~3000 |           |

## 2. 我国湖泊富营养化引起用水障碍的分析

我国部分湖泊富营养化引起用水障碍调查资料表明, 目前一些无用水障碍的湖泊如洱海、邛海等大都处于贫中营养或中营养的阶段; 有轻度用水障碍的湖泊如于桥水库、磁湖等局部出现水花, 水色发绿, 影响观瞻和饮用, 大致相当于中富或富营养水平; 出现严重用水障碍的湖泊如墨水湖、玄武湖等湖水发暗, 出现死鱼现象, 严重影响观光游览和水产事业

的发展, 属于富营养或重富营养水平。各湖泊相应的水质指标值如表 3 所示。

## 3. 便于环境管理的分析

表 3 还表明, 目前我国湖泊水质营养水平普遍较高, 如湖水中 TP、TN 的含量绝大部分都超国外湖泊富营养的水质标准。考虑到我国当前经济落后, 治理环境的技术水平也差, 标准如定得过高, 恐难以付之实施, 故拟选取有关基准值的下限值为宜。在具体指标值选

表3 我国部分湖泊用水障碍的调查结果

| 湖泊名称  | chl <sub>a</sub><br>毫克/米 <sup>3</sup> | TP<br>毫克/米 <sup>3</sup> | TN<br>毫克/米 <sup>3</sup> | COD<br>毫克/升 | SD<br>(米) | 用水障碍情况          |
|-------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|-----------|-----------------|
| 邛海    | 0.88                                  | 130                     | 410                     | 1.43        | 2.98      | 无               |
| 洱海    | 4.33                                  | 21                      | 180                     | 3.38        | 2.4       | 无               |
| 博斯腾湖  | 4.91                                  | 50                      | 969                     | 5.42        | 1.46      | 无               |
| 于桥水库  | 16.2                                  | 26                      | 1020                    | 5.16        | 1.16      | 局部出现水花, 对供水有影响  |
| 磁湖    | 15.38                                 | 87                      | 1540                    | 4.4         | 0.65      | 局部出现水花, 影响观瞻    |
| 巢湖    | 14.56                                 | 140                     | 2270                    | 4.34        | 0.27      | 大面积水花, 夏季出现供水障碍 |
| 甘棠湖   | 77.7                                  | 135                     | 2140                    | 6.96        | 0.36      | 出现水花, 影响观瞻      |
| 磨菇湖   | 82.4                                  | 332                     | 2660                    | 14.6        | 0.49      | 出现水花, 有大量死鱼现象   |
| 杭州西湖  | 95.94                                 | 136                     | 2230                    | 10.18       | 0.37      | 出现水花, 严重影响观瞻    |
| 南京玄武湖 | 202.1                                 | 708                     | 6790                    | 8.86        | 0.31      | 全湖出现水花, 大量死鱼    |
| 武汉墨水湖 | 262.4                                 | 500                     | 16050                   | 13.6        | 0.15      | 全湖出现水花, 严重影响养殖  |
| 广州东山水 | 185.1                                 | 670                     | 7200                    | 14.8        | 0.26      | 全湖出现水花, 严重影响观瞻  |

注: 上表的数据为湖泊藻类繁殖高峰期的测定值

取时, 还尽量考虑到与现有其他水质标准相一致, 以利于湖泊水域的环境管理。

综上所述三方面分析, 对前述诸项富营养化评价因子, 提出如表4所示的评价标准。

表4 我国湖泊富营养化的评价标准

| 营养分级<br>评价参数                          | 营养分级  |      |      |      |       |       |
|---------------------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|
|                                       | 贫营养   | 贫中营养 | 中营养  | 中富营养 | 富营养   | 重富营养  |
| chl <sub>a</sub> (毫克/米 <sup>3</sup> ) | <1.0  | <2.0 | <4.0 | <10  | <65   | >80   |
| TP(毫克/米 <sup>3</sup> )                | <2.5  | <5.0 | <25  | <50  | <200  | >200  |
| TN(毫克/米 <sup>3</sup> )                | <30   | <5.0 | <300 | <500 | <2000 | >2000 |
| COD <sub>Mn</sub> (毫克/升)              | <0.3  | <0.4 | <2.0 | <4.0 | <10   | >10   |
| SD(米)                                 | >10.0 | >5.0 | >1.5 | >1.0 | >0.4  | <0.40 |

### 三、评价模式

目前, 国外的湖泊富营养化程度评价中, 大多是根据本地区湖泊调查资料的综合分析, 编制或选择物理意义明确、使用简便而又适合当地实际情况的计算公式作为评价的基本模式。为了便于与国外湖泊营养状况的比较, 我们在参考国内外有关文献资料的基础上<sup>[4]</sup>, 结合我国湖泊的实际情况, 拟选用国外应用较为广泛的营养状态指数公式和应用简便的评分公式, 作为我国湖泊富营养化程度评价的基本模式。

#### 1. 营养状态指数模式

目前国外应用较多的以透明度为基准的卡森指数公式和以叶绿素a为基准的修正的卡森指数公式, 其中以后者应用更为广泛, 它的基本表达式为:

$$TSI_M(chl_a) = 10 \left( 2.46 + \frac{1 \cdot chl_a}{1 \cdot n2.5} \right) \quad (1)$$

式中:  $TSI_M(chl_a)$  为以叶绿素a为基准的营养状态指数

$chl_a$  为湖水生产层中叶绿素a的最大值(毫克/米<sup>3</sup>)

根据我国11个代表性湖泊调查资料的统计分析,求得湖水叶绿素a(chla)与透明度(SD)和总磷(TP)之间的相关关系式为:

$$1nchla = 2.34 - 1.821nSD \quad (2)$$

$$(r=0.91, n=14)$$

$$1nchla = 1.321nTP - 3.28 \quad (3)$$

$$(r=0.82, n=14)$$

将上述(2)(3)式代入(1)式,分别求得透明度和总磷营养状态指数的计算公式为:

$$TSM(SD) = 10 \left( 2.46 + \frac{2.34 - 1.821nSD}{\ln 2.5} \right) \quad (4)$$

$$TSM(TP) = 10 \left( 2.46 + \frac{1.321nTP - 3.28}{\ln 2.5} \right) \quad (5)$$

然后,将前述表4所示的chla、SD、TP的评价标准代入(1)、(4)、(5)式,分别求得营养状态指数的分级标准(如表5所示)。在实际应用中,只要求得其营养状态指

表5 营养状态指数的分级指标

| 营养程度<br>状态指数 | 营养程度  |       |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | 贫营养   | 贫中营养  | 中营养   | 中富营养  | 富营养   | 重富营养  |
| TSM(chla)    | <24.6 | <32.2 | <39.7 | <47.6 | <70.2 | >70.2 |
| TSM(SD)      | <4.4  | <18.2 | <42.1 | <50.1 | <68.3 | >68.3 |
| TSM(TP)      | <2.0  | <11.9 | <35.1 | <45.2 | <65.2 | >65.2 |

数的数值,对照表5,即可判定湖泊的富营养化程度。

### 2. 评分模式

评分模式是根据相关分析所选定的评价因子和它们相应的评价标准(表4),在0~100分的范围内分别赋予各评价参数相应的评分值。其评分值越高,表明湖泊富营养化程度越严重。湖泊富营养化评分值(或各测点的评分值)

的计算公式为:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (6)$$

式中: M——湖泊富营养化的评分值

M<sub>i</sub>——各评价参数的评分值

n——参加评价参数的个数

各参数的评分值和相应的营养状态的分级指标如表6所示。

表6 湖泊富营养化评分和分级标准

| 营养程度   | 参数<br>评分值 | chl <sub>a</sub>     | TP                   | TN                   | COD    | SD   |
|--------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|--------|------|
|        |           | (毫克/米 <sup>3</sup> ) | (毫克/米 <sup>3</sup> ) | (毫克/米 <sup>3</sup> ) | (毫克/升) | (米)  |
| 贫营养 ≤  | 10        | 0.5                  | 1.0                  | 20                   | 0.15   | 10.0 |
|        | 20        | 1.0                  | 2.5                  | 30                   | 0.3    | 8.0  |
| 贫中营养 ≤ | 30        | 2.0                  | 5.0                  | 50                   | 0.4    | 5.0  |
| 中营养 ≤  | 40        | 4.0                  | 25                   | 300                  | 2.0    | 1.5  |
| 中富营养 ≤ | 50        | 10.0                 | 50                   | 300                  | 4.0    | 1.0  |
| 富营养 ≤  | 60        | 26.0                 | 50.0                 | 800                  | 8.0    | 0.5  |
|        | 70        | 65                   | 200                  | 2000                 | 10     | 0.40 |
| 重富营养 > | 70        | 64                   | 200                  | 2000                 | 10     | 0.40 |
|        | 80        | 160                  | 600.0                | 6000                 | 25     | 0.30 |
|        | 90        | 400                  | 900                  | 9000                 | 40     | 0.20 |
|        | 100       | 1000                 | 1300                 | 14000                | 60     | 0.12 |

(6)式中的参数项目(n)可根据调查资料的多寡灵活选择。在实际应用中,如果发现某一评价参数的评分值明显低于(或高于)其他参数的评分值时,表明该参数的变化除了受到湖泊富营养化因素的影响外,其他因子对该参数的影响也较大。故在评价工作中,若将该项目从评价参数中删去,则可使评价结果更接近该湖泊的实际情况。

#### 四、评价步骤

1. 根据湖泊富营养化调查结果,分别统计出湖泊(或测点)chl<sub>a</sub>最大值及出现chl<sub>a</sub>最大值期间的其他参数值。
2. 通过监测项目的相关分析或主成分分析,确定该湖泊富营养化的主要评价因子。
3. 根据湖泊实例资料和所选定评价因子的实际情况,选择合适的评价模式。
4. 依据模式计算的结果,评定湖泊(或各测点)的富营养化程度。
5. 对于面积较大、同一湖泊不同湖区富营养化程度有明显差异的湖泊,首先按上述步骤,分别评定出各测点水质的富营养化程度。然后,按湖面面积加权的方法,求算该湖泊平均状况下的富营养化程度。

#### 五、应用实例

某湖泊采用网格均匀布点的调查方法,测得1988年叶绿素a高峰期各测点的调查数据(如表7所示)。

表7 某湖泊叶绿素a高峰期调查资料

| 测点号 | chl <sub>a</sub><br>(毫克/米 <sup>3</sup> ) | TN<br>(毫克/米 <sup>3</sup> ) | TP<br>(毫克/米 <sup>3</sup> ) | COD<br>(毫克/升) | SD<br>(米) |
|-----|--|----------------------------|----------------------------|---------------|-----------|
| 1   | 24.1                                     | 1810                       | 180                        | 8.0           | 0.55      |
| 2   | 27.5                                     | 1710                       | 165                        | 7.0           | 0.60      |
| 3   | 46.4                                     | 1870                       | 132                        | 7.3           | 0.52      |
| 4   | 40.9                                     | 2040                       | 110                        | 8.1           | 0.50      |
| 5   | 38.0                                     | 1800                       | 140                        | 6.0           | 0.58      |
| 6   | 113.7                                    | 2690                       | 332                        | 14.5          | 0.40      |
| 7   | 97.3                                     | 2460                       | 398                        | 12.1          | 0.40      |
| 8   | 86.7                                     | 2940                       | 247                        | 12.3          | 0.45      |
| 9   | 36.0                                     | 1700                       | 140                        | 7.0           | 0.55      |

将表7中chl<sub>a</sub>、TP、SD、TN、COD诸项参数的数值,分别代入(1)、(4)、(5)、(6)式,求得该湖泊各测点水质营养程度的评价指数和评分数值(如表8所示)。

表8 各测点营养状态指数和评分指数的计算结果

| 测点号 | 营养状态指数           |      |      | 评分指数 |
|-----|------------------|------|------|------|
|     | chl <sub>a</sub> | TP   | SD   |      |
| 1   | 59.3             | 63.6 | 62.0 | 62.4 |
| 2   | 60.1             | 62.4 | 60.3 | 61.6 |
| 3   | 66.5             | 59.2 | 63.1 | 62.8 |
| 4   | 65.1             | 56.5 | 63.9 | 63.4 |
| 5   | 64.3             | 60.0 | 60.9 | 61.6 |
| 6   | 76.3             | 72.5 | 68.3 | 72.6 |
| 7   | 74.5             | 75.1 | 68.3 | 71.6 |
| 8   | 73.3             | 68.2 | 65.9 | 70.2 |
| 9   | 63.7             | 60.0 | 62.0 | 61.7 |

根据表8的计算结果,对照表5和表6的分级标准求得该湖泊各测点水质的营养程度(如表9所示)。

表9 各测点水质富营养化程度的评价结果

| 测点号 | 营养状态指数模式         |      |      | 评分模式 |
|-----|------------------|------|------|------|
|     | chl <sub>a</sub> | TP   | SD   |      |
| 1   | 富营养              | 富营养  | 富营养  | 富营养  |
| 2   | 富营养              | 富营养  | 富营养  | 富营养  |
| 3   | 富营养              | 富营养  | 富营养  | 富营养  |
| 4   | 富营养              | 富营养  | 富营养  | 富营养  |
| 5   | 富营养              | 富营养  | 富营养  | 富营养  |
| 6   | 重富营养             | 重富营养 | 重富营养 | 重富营养 |
| 7   | 重富营养             | 重富营养 | 重富营养 | 重富营养 |
| 8   | 重富营养             | 重富营养 | 富营养  | 重富营养 |
| 9   | 富营养              | 富营养  | 富营养  | 富营养  |

表9的评价结果可以看出,该湖泊有6个测点的水质属于富营养,3个测点的水质属于重富营养。由于是采用网格式的均匀布点,各测点所代表的湖泊水域面积大致相同,表明该湖泊的三分之二的水域达富营养程度,三分之

# 山溪小河中 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的自净作用研究

湖北省十堰市环境保护研究所 杨军庆

**摘要:** 本文以十堰市山溪小河——神定河为对象,进行了  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的自净规律、能力研究。绘制了自净曲线;计算了自净百分率、自净速率常数、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  半衰期;讨论了温度、流速、河深对自净的影响,并对各种影响因素与自净速率常数的关系作了定量相关分析。通过分析研究,认为山溪小河对有机污染物有很强的自净能力,水浅流急等条件有利于河水复氧和生化自净。

研究有机污染物在河流中的自净规律与能力,对于充分利用自然自净能力、节约治理投资、预测污染等有重要意义。不同的河流、同一河流的不同河段、不同季节对有机物的自净能力有很大差别<sup>[1]</sup>。目前人们对此已做了大量的研究,但有关有机物在山溪小河中自净问题研究的报道尚不多见。为此,本文以十堰市山溪小河神定河为对象,以  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  为有机污染指标 ( $\text{BOD}_5$  测定受河藻干扰严重),在这一方面作了初步讨论。

## 一、神定河及其有机污染概况

神定河是一条流经十堰市中心区的季节性山溪小河,流域集中了市内70%的人口及工业。研究河段为其中下游,由污染源下方清污混匀后的1\*站至入汉江口处的5\*站(见图1)。全长20.5公里。河水平时流量为0.4~0.5米<sup>3</sup>/秒,平均流速为0.35~2.0米/秒,河深一般为20~40厘米。河床落差大,水流湍急,平均每隔50米左右就有一处跌水。河床底质为

砂砾、石块和基岩等,粗糙系数为0.1左右。

神定河废水年排入量为3459万吨,工业废水占75%,生活污水占25%<sup>[2]</sup>;  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$

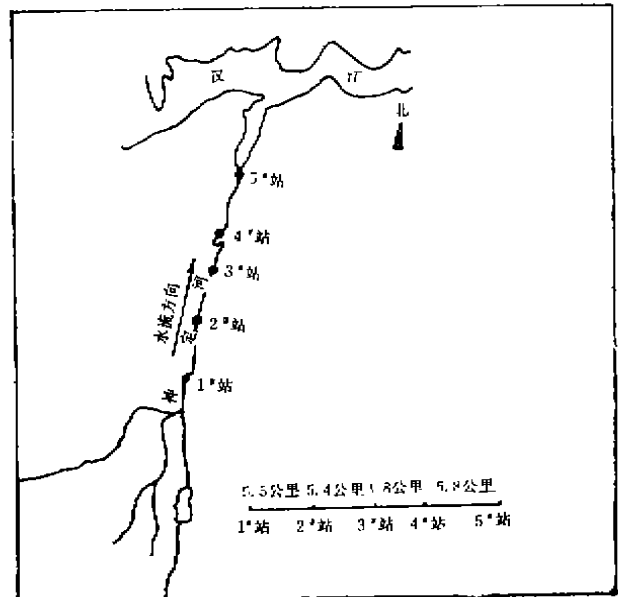


图1 神定河采样点示意图

一的水域达重富营养程度。因此,富营养化已成为该湖的重要环境问题之一。

由表9的评价结果还可以看出,两种评价模式除8号点SD的评价结果稍有偏差外,其他测点完全一致,说明上述两种评价模式均能较好地反映出湖泊富营养化程度的实际情况。且不同评价方法之间具有较好的可比性。

## 参考文献

- [1] 合田健编著,水环境指标,思考社(1979)
- [2] 顾丁锡、舒金华编著,湖泊污染预测与防治规划方法,环境科学出版社(1988)
- [3] 全国湖泊富营养化调查组编著,湖泊富营养化调查规范,环境科学出版社(1987)
- [4] 舒金华,我国主要湖泊富营养化程度的评价,环境科学丛刊, Vol.7 No.2 (1985)