问题讨论

评内梅罗的污染指数

关伯仁

（北京大学地理系）

美国叙拉古大学内梅罗（N.L. Nemerow）教授，在其所著的《河流污染科学分析》一书*中，提出一种水污染指数（Pollution Index），并在该书的第七章第四节中，阐述了他制定这个指数的原则和方法．近两年来，我国有些环境保护工作者，对此污染指数很感兴趣，并将它引用到某些地区的水污染评价工作中去．笔者近年来曾对这个污染指数做了某些研究，并试用它做了某地区的水质污染评价，在实际工作中发现此指数在表征水污染上，还存在一些问题，因之提出下面的评论．

内梅罗不满足用单项指标来评价水质污染情况，而提出这个用多项指标评价水污染的指数．他规定此污染指数的目的，是指出水是否污染了；在用水前是否需要处理以及水被污染所遭受的损害情况，而这种损害情况应用处理费用的大小表示出来．他共选用了14个水质参数或污染物（水温、水色、混浊度、pH、大肠杆菌、总溶解固体、悬浮固体、总氮、碱度、硬度、氯、铁和锰、硫酸盐、溶解氧）做计算污染指数的依据．他将水的用途分为三类：(1)人接触用的；(2)人间接接触用的；(3)人不接触用的．他先算出各种用途的污染指数（Pl_j），然后再算出总污染指数（Pl）．内梅罗规定 Pl_j 用下式计算：

$$Pl_j=\sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^2_{最大}+\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^2_{平均}}{2}} \qquad (6)^{**}$$

式中，C_i 是水中 i 种水质参数的实测值；

L_{ij} 是 i 种水质参数在 j 类用途下的最高容许值；

$\frac{C_i}{L_{ij}}$ 是 i 种水质参数在 j 类用途下的相对污染值；

$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 是 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$ 中的最大值；

$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 是 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$ 总和的平均值．

在计算各个 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 值时，当 $\frac{C_i}{L_{ij}}>1$，表示水受 i 种物质污染，要把这种污染损害表现在处理的必要费用上，他提出了下面的修正算法，即

当 $\frac{C_i}{L_{ij}}\leqslant 1.0$ 时，$\frac{C_i}{L_{ij}}=\frac{C_i}{L_{ij}}$ 的实际值；

当 $\frac{C_i}{L_{ij}}>1.0$ 时，

$$\frac{C_i}{L_{ij}}=1.0+P\cdot\log\frac{C_i}{L_{ij}} \qquad (12)^{**}$$

式中，P 是一个常数，定为5．

公式(6)和(12)是计算内梅罗污染指数最基本的公式，也是他的污染指数存在问题的部分，我们以下从这两个公式评论起．

1. 如前所述，当 $\frac{C_i}{L_{ij}}>1.0$，即水受 i 种物质污染时，内梅罗规定用(12)式计算 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 值．这种算法实质上是认为随着 $\frac{C_i}{L_{ij}}$（相对

* N. L. Nemerow: Scientific Stream Pollution Analysis, McGraw-Hill, New York, 1974.

** 按内梅罗原书上的公式号注记，下同．

污染值）的增大，处理费用是按对数关系增加，而（12）式中的常数 P 则将具有单位相对污染值的处理费用的含义，即"单价"之义．我们认为这种计算法是有问题的：第一，可造成水污染的物质种类很多，如内梅罗在制定本污染指数时就选用了 14 种，现在尚不能证明这些污染物的相对污染值 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$ 与处理它们的费用都成对数关系；第二，即或是它们都与处理费用成对数关系，则（12）式中的 P 也不应当是一个常数 5，而应是一个变数，它不但要随着污染物的种类而变，还要随技术条件、物价涨落而变．例如，水中氯和大肠杆菌的相对污染值就是相等，但处理它们的费用也不会相同．因此，用（12）式计算是不能表明水受污染的真实损害情况，反而歪曲了污染的真实情况．现略证明如下：

（12）式中 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 与 $1.0+5\log\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$ 呈对数关系，可做出曲线如图1．从（12）式和图 1

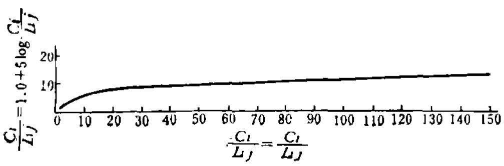

图 1 $\frac{C_i}{L_{ij}}=1.0+5\log\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$ 与 $\frac{C_i}{L_{ij}}=\frac{C_i}{L_{ij}}$ 的关系

可以看出：当 $\frac{C_i}{L_{ij}}<4.0$ 时，用（12）式计算的数值和不用（12）式计算的 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 值相差不大（见表 1）．但当 $\frac{C_i}{L_{ij}}>4.0$ 时，用（12）式计算出的数值便小于 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 的实际值了．随着 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 的增大，即随着水质污染的加重，用（12）式的计算结果便愈偏离真实的污染状况（见表 1）．这样，在表示水污染的程度上，就造成一种歪曲真实现象的情况．例如在某河上，69 号和 70 号测点各测得酚浓度为 160 毫克/升和 80 毫克/升，它们实际的相对污染值 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$ 各为 16000 和 8000，即各超过地面水最高容许标准的 16000 倍和 8000 倍，污染是极严重的，且 69 号点比 70 号点酚污染重一倍．如用（12）式计算，则 69 号点为 22.02，70 号点为 20.52，从这两个数字上很难直接看出此两点污染的严重情况，亦不能看出 69 号点比 70 号点污染重一倍的情况，更难相信 22.02 和 20.52 就是内梅罗所认为的用处理费用所表示的污染损害情况．因为：第一，酚的相对污染值与处理费用是否成对数关系没有证实；第二，这两个数字都不是绝对值，不能代表实际费用；第三，按本例的计算，处理 160 毫克/升的含酚水和处理 80 毫克/升的含酚水的费用是相近的（比较的数字只差 1.5），恐怕也是不符合实际情况的．因此，我们认为在内梅罗的污染指数计算中，（12）式是不够科学的，应加以改进．

2. 如前所述，某种水用途的污染指数 Pl_j 是由（6）式计算出来的，即

$$Pl_j=\sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^2_{最大}+\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^2_{平均}}{2}}.$$

在（6）式中，当某些 $\frac{C_i}{L_{ij}}$ 值大于 1.0 时，则要用（12）式计算它们．这样，（6）式中两个参数 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$，将产生前述的歪曲真实污染的现象，结果必使 Pl_j 亦产生歪曲真实的现象．其次，在（6）式中，$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 起

表 1

$\frac{C_i}{L_{ij}}$	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0	20.0	50.0	100	1000	10000
$1.0+5\log\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$	2.5	3.4	4.0	4.5	6.0	7.5	9.5	11	16	21

着决定性作用，而前面已经证明，$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$值越大，用(12)式计算后其歪曲真实的污染情况越大，所以，用(6)式计算出的Pl_j值的歪曲情况比用(12)式计算的单项值更显著。

我们试用1977年某区87个测点的资料，将各点用(12)式和(6)式计算的Pl_j值，与各点的$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$总和的平均值$\left(\frac{1}{n}\sum\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^*$相比得出图2。从图2可以看出，当$Pl_j$值约在7.5以下时，则$Pl_j$值大于$\frac{1}{n}\sum\frac{C_i}{L_{ij}}$值，即表示用(6)式计算的结果大于平均污染程度，但其增大或歪曲实际污染情况尚不大。可是，当Pl_j值大于7.5以后，它就变化很小了，即污染程度再增大，它却增加很少。这样，用它就很难表征真实的污染情况了。如在某河50号点上，其Pl_j值为16.45，而其$\frac{1}{n}\sum\frac{C_i}{L_{ij}}$值却为2212.27，即该点的实际污染程度是平均每一项污染物含量超过了地面水最高容许标准的2212.27倍，污染是极严重的。可是用Pl_j表示时，却不能直接看出这种严重污染情况来。又如在前述的69号点和70号点，前者的Pl_j值为15.89，后者为14.81，二者相差很小，仅为1.09，似乎它们的污染程度差不多，可视为一个污染等级。但是，它们的实际污染情况是：69号点的$\frac{1}{n}\sum\frac{C_i}{L_{ij}}$值为1608.5，70号点为805.7，相差达一倍，是两种完全不同的污染水平。曾有人将Pl_j值在6以上定为严重污染带，如按这个标准，就我们1977年研究的地区来说，则此带的Pl_j值在6.0—16.45之间，相差为2.5倍，似可归为一带。但是，在此带的范围内，其实际污染程度，即$\frac{1}{n}\sum\frac{C_i}{L_{ij}}$值则在3.3—2212.2之间，相差达700倍！由此可见，内梅罗的污染指数Pl_j，不但不能简明直接的表示出某点水污染的实际程度来，而且，当用它做为对比不同点的污染情况和划分污染等级时，还易造成不符合实际或错误的结果，尤其是在水质污染严重的情况下，它更偏离实际情况。

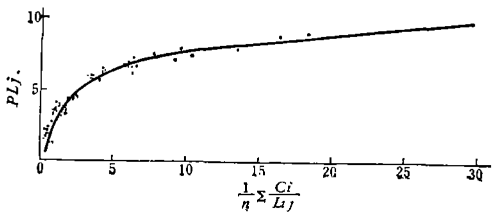

图2 Pl_j 与 $\frac{1}{n}\Sigma\frac{C_i}{L_{ij}}$ 的关系

3. 内梅罗在计算污染指数Pl_j时，用$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$的最大值做为一个参数，并用图3表示$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$、$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$与$Pl_j$的关系，从而得出(6)式来。这样的计算结果是使$Pl_j$值主要由$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$所决定，而使$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$不起多大作用，现略加论证。

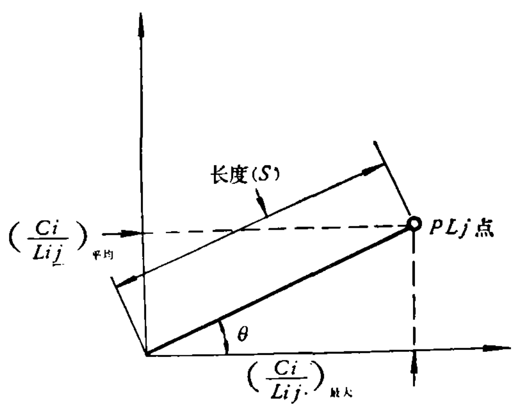

图3 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$与$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$的关系
(引自内梅罗原书图7-1)

(6)式中的$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$是各项污染物的相对污染值总合$\left(\sum\frac{C_i}{L_{ij}}\right)$除以统计项数的平

---

* $\frac{1}{n}\Sigma\frac{C_i}{L_{ij}}$是按算术计算出来的，表示某点平均每项污染物超过最高容许标准的倍数，可以用它来表征某点的平均污染程度。

表 2

$\Sigma \frac{C_i}{L_{ij}} \Big/ \left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$(%)	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80 以上
出现次数	2	25	30	19	5	5	1
出现频率(%)	2.3	28.7	34.5	21.8	5.75	5.75	1.2

均值，因之，在 $\sum \frac{C_i}{L_{ij}}$ 中就包括 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 这一项了。这样，当取系列的平均值 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 代表系列时，系列中的极值（如最大值）的影响常是很大的，有时可起决定的作用。据前述87个点的资料计算，各点的 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 占其 $\sum \frac{C_i}{L_{ij}}$ 的百分比如上表。从表2可以看出，在 $\sum \frac{C_i}{L_{ij}}$ 中，$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 占到40%以上的机会达69%，平均各点的 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 值占到其 $\sum \frac{C_i}{L_{ij}}$ 的47%，由此可见，(6)式中的 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 值也将主要决定于 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 的大小了。这样，在(6)式中再加另一个参数 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$，则其结果必然更增大了 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 的作用，使 Pl_j 值就基本上由 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 所决定了。我们曾用上述87个点的资料，将各点的 Pl_j 值与其 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 点绘在直角坐标上得出图4。从图4明显看出 Pl_j 值与 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 值的关系极好，所有点子几乎全落在一条直线上，得出其回归方程为 $Pl_j = 0.725\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$。但是，$Pl_j$ 值和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 值的关系则不好，点子很分散。这也证明 Pl_j 值主要是由 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 决定的。

4. Pl_j 值不但主要由 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 决定的，而且按(6)式的规定，则 Pl_j 和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 的比

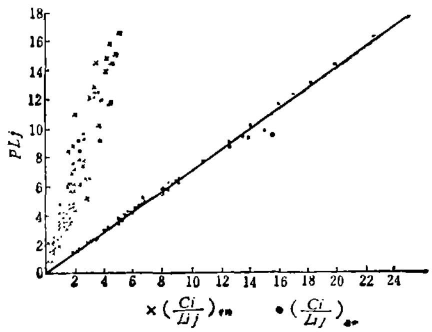

图4 Pl_j 与 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 及与 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 的关系

值也变化很小，结果使 Pl_j 变成很“死”的一个数。现略加证明：

从图3和(6)式可得：

$$S^2 = \left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^2_{最大} + \left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)^2_{平均} \qquad ①$$

将①式代入(6)式得：

$$Pl_j = \sqrt{\frac{S^2}{2}} = \frac{S}{\sqrt{2}} \qquad ②$$

又由图3知，

$$S = \frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}}{\cos\theta},$$

所以②式可写成：

$$Pl_j = \frac{\frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}}{\cos\theta}}{\sqrt{2}} = \frac{\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}}{\sqrt{2}\cos\theta} \qquad ③$$

由于 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 永大于 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$，所以，图3上的 θ 角也永小于45°，亦即 $0° < \theta < 45°$。这样得出的 $\cos\theta$ 值必然在 $\frac{\sqrt{2}}{2}$—1.0 之间，即：

$$\frac{\sqrt{2}}{2} < \cos\theta < 1 \qquad ④$$

将④代入③式便可得出 Pl_j 值的变化范围仅只在 $0.7022\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$—$1.0\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$之间．这就证明了由（6）式求出的 Pl_j 值不但基本上由 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 决定的，而且其变化范围还很小．如由图 5 可以看出，当$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$为$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$的 2 倍时，$Pl_j = 0.8\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$；当 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$为 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 的 3 倍时，$Pl_j = 0.74\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$．以后虽然 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 的比值再增大，但 Pl_j 和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 间的比值则很少变化了，概都在 0.73—0.71 之间．从实际工作中可知，在污染的水域内，一个点的 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 值常为其 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 值的几倍，这样，Pl_j 和 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$间的关系就更简单了，只要将$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$乘以一个 0.72 左右的数便可得出 Pl_j 值了．

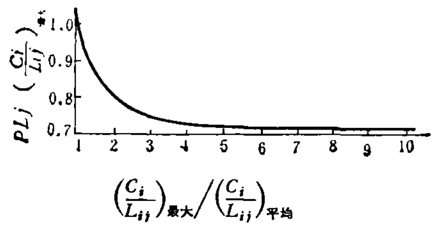

图 5　$Pl_j/\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$与$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}/\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{平均}$ 的关系

最后还应指出，由（6）式求出的 Pl_j 值虽然是由 $\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 所决定的，但是反过来从 Pl_j 中却又很难找出$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$值所代表的污染物的真实污染程度，或者它所占的污染比重．例如在 20 号点计算出 Pl_j 值为 12.72，$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 值为 17.70，污染物是酚．但是，这个 17.70 值，即不是酚的绝对浓度，也不是相对比重，用它无法和 Pl_j 值相比来说明此点酚的污染比重是多大．

通过以上的论述，证明了内梅罗的污染指数 Pl_j，实质上是由水中污染物的相对污染值中的最大值所决定的，这样就与他原来的设想不符合了．他在书中曾批评用单一指标评价水污染不全面，因之提出这个污染指数来．但是，由于受他制定的计算方法所限，他的污染指数在实质上仍由单项指标决定的．这个指数在一定条件下可以满足一部分他所要求的目的，如可以给出水是否受污染了；用水前是否需要处理，等等．但是，我们认为这个指数是难以正确给出他所要求的损害费用的．我国目前一些同志引用这个指数，多做为水质污染的综合评价，或作为水质污染分类、分级的依据．通过以上的论证，则这个指数是难满足要求的．尤其是只用一、二次的检测资料，就用内梅罗的公式计算 Pl_j 值，影响$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$值的偶然因素（如分析上的误差、瞬时的水团、水质变化等等）尚未能消除，则$\left(\frac{C_i}{L_{ij}}\right)_{最大}$ 的代表性很差．这时把用（6）式计算的 Pl_j 值做为评价水质污染的依据，则更易造成不正确的结果．

（上接封三）

开始冒硫酸白烟，取下冷却，将此液转入 250 毫升反应瓶中，用 100 毫升 6N 盐酸洗涤烧杯，洗涤液全部转入反应瓶内，按制作工作曲线步骤测定消光值，求出硒含量．

（三）硒回收试验

为验证本方法的可靠性和适应性，取不同水样作硒回收试验，见表 1．1 至 83-原-1 水样（因二价硫含量小于 5 微克）直接吸收测定．而 84-原-1 和珠-1 水样（二价硫含量大于 5 微克）需先将低硫化物氧化成高价后吸收测定．回收率在 80-100％ 之间，故本法适用于一般水质和工业废水中微量硒的测定．