

内梅罗污染指数公式与漓江水质评价*

金士博 (Wolfgang Kinzelbach)** 张孟威

(中国科学院环境化学研究所)

在桂林漓江水质评价中,我们采用了内梅罗(N. L. Nemerow)的污染指数公式。在主要方法上我们是按该公式计算的,但我们认为该公式在某些方面(如求溶解氧、pH值的单项污染值)是存在问题的。在提出问题后,我们提出了修正式。

为了便于了解漓江五年来(1975—1979年)污染变化情况,我们按10项参数计算了污染指数并绘了示意图,对漓江水质污染状况提出了评价意见。

一、内梅罗污染指数公式概述

近年来,在中国对若干河流和湖泊已积累了一些环境污染监测数据,由于这些数据的年监测次数较少,且数据尚不完整,目前还不能用其设计比较可靠的水质数学模式。然而可以将这些数据用于水质综合评价,即计算水质污染指数。目前,中国多采用线性污染指数公式。内梅罗污染指数公式不仅考虑到各种水质参数的平均污染状况,并且强调了最严重的污染项目对污染指数的影响,我们认为有必要对其加以简要的叙述,以便使读者了解我们所提出的修正式的依据。

评价水质污染状况的总污染指数 PI 用下式表示:

$$PI = \sum_{i=1}^3 W_i \cdot PI_i \dots \dots (1)$$

式中, PI_i 表示水的第 i 种用途的污染指数;
 W_i 表示水的第 i 种用途的加权系数。

$$PI_i = \sqrt{\frac{(C_i/L_{ij})^2_{\text{最大}} + (C_i/L_{ij})^2_{\text{平均}}}{2}} \dots (2)$$

式中, C_i 表示第 i 种参数的实测值; L_{ij} 表示第 i 种参数的第 j 种水用途的标准值; (C_i/L_{ij}) 表示单项污染值,对于一般的参数,是两个量的比值,对于溶解氧和pH值分别由以下两式求得:

$$\text{溶解氧}(C_i/L_{ij}) \rightarrow \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - L_{ij}} \dots \dots (3)$$

式中, C_{im} 为饱和溶解氧的数值。

$$\text{pH值}(C_i/L_{ij}) \rightarrow \frac{C_i - \bar{L}_{ij}}{L_{ij\text{最小值}} \text{ 或 } L_{ij\text{最大值}} - \bar{L}_{ij}} \dots \dots (4)$$

式中取 L_{ij} 最大值或 L_{ij} 最小值要根据实测值 C_i 接近哪个就取哪个值。

此外,内梅罗还考虑到污染治理费用对污染指数影响的公式,这里从略。

最后,总污染指数 PI 表明污染状况:

(1) 当 $PI \leq 0.70$ 时,表明没有超标的污染项;

(2) 当 $0.70 < PI \leq 1.0$ 时,可能有超标的污染项;

(3) 当 $PI > 1.0$ 时,定有超标的污染项,且 PI 值越大,污染越严重。

* 漓江环境数学模式工作在申葆诚先生领导下进行。桂林市环境保护办公室为促进本工作提供了许多数据,在此一并致谢。

** 金士博博士为德意志联邦共和国专家,现在环境化学研究所工作。

二、溶解氧、pH 值单项污染值 公式存在问题及其修正式

1. 溶解氧公式(3)存在问题及修正式

如前所述,一般的水质参数污染值是由 C_i 与 L_{ij} 相比计算的. 实测值 C_i 有可能测得任意大的数值,污染值亦可能是任意大值,即满足:

$$\lim_{C_i \rightarrow \infty} \left(\frac{C_i}{L_{ij}} \right) = \infty, \text{ 而水中溶解氧由于其}$$

具有的特征,超标的极限值只能是零,再不能取得小于零的负值,亦即水中溶解氧超标的极限值被限定. 由于这样的特性,用式(3)计算其单项污染值就不合理了,因式(3)满足:

$$\lim_{C_i \rightarrow 0} \left(\frac{C_i}{L_{ij}} \right) = \lim_{C_i \rightarrow 0} \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - L_{ij}} = R$$

R 是随水温变化的一个确定的实数值, R 一般在 1.3—2.5 之间,同其它参数达到超标极限值时相比,单项污染值显得小多了. 但溶解氧的单项污染值要与其它参数的单项污染值在同一个式(2)中运算求污染指数,并在式(2)中起到相近的作用,这就要求式(3)亦能满足:

$$\lim_{C_i \rightarrow 0} \left(\frac{C_i}{L_{ij}} \right) = \lim_{C_i \rightarrow 0} \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - L_{ij}} = \infty$$

为了达到这个目的,只有修正式(2),使修正式除满足以上要求外,还应满足:当实测值 $C_i = L_{ij}$ (标准值) 时, $(C_i/L_{ij}) = 1.0$; 当 $C_i = C_{im}$ (饱和溶解氧) 时, $(C_i/L_{ij}) = 0$; 适当提高 $C_i \in (0, L_{ij})$ 区间相对污染值. 为满足上列四点,建议采用下列修正式:

$$\left(\frac{C_i}{L_{ij}} \right) = \begin{cases} \left(\frac{L_{ij}}{C_i} \right)^\delta & 0 < C_i \leq L_{ij} \\ \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - L_{ij}} & L_{ij} \leq C_i \leq C_{im} \end{cases} \quad \dots\dots (3-1)$$

式中符号同(3)式, δ 为正实数,可根据实际情况确定,一般可取 2(2.0—2.5 皆可).

尽管式(3-1)在理论上是合理的,当实

测值不为零或接近零时可以采用,但当实测值接近于零或等于零,使得式(3-1)不便于求值,因此我们建议采用下式:

$$\left(\frac{C_i}{L_{ij}} \right) = \begin{cases} A_{\max} \cdot \left(1 - \frac{C_i}{L_{ij}} \right) + \frac{C_i}{L_{ij}} & \text{当 } 0 \leq C_i \leq L_{ij} \\ \frac{C_{im} - C_i}{C_{im} - L_{ij}} & \text{当 } L_{ij} \leq C_i \leq C_{im} \end{cases} \quad \dots\dots (3-2)$$

式中符号同(3)式,其中饱和溶解氧

$$C_{im} = \frac{468}{31.6 + T} \text{ (毫克/升)},$$

T 为水温($^{\circ}\text{C}$), $A_{\max}$ 表示水中溶解氧实测值为零时,给定的最大污染值. 在桂林漓江质量评价中采用 $A_{\max} = 10$,是根据漓江的情况确定的(见表1、表2),从表1实测值可看出,在漓江龙隐桥监测点对同一水样分析结果表明:当溶解氧实测值为零时,按式(3)计算其污染值为 1.74,而其它污染物的污染值超过 4 (且此时其它污染物并未达到其超标极限值),同时在相邻的监测点六合桥耗氧量的单项相对污染值为 12.24. 再从表2中可看到三项的单项污染值可高达 10—20.

我们将溶解氧的最大相对污染值定为 10,这样才能与其它污染项相适应.

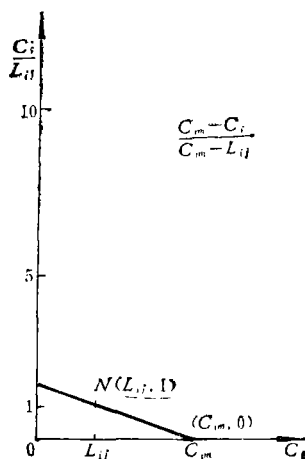


图1 溶解氧污染值图

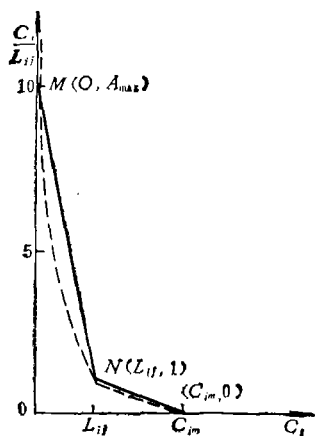


图2 溶解氧污染值修正式图
——式(3-2) ——式(3-1)

图1是式(3)的取值范围,图2是修正式(3-2)的取值范围。

综上所述,我们认为采用式(3-2)取代式(3)较为合理。在桂林漓江水质评价中即采用了式(3-2)。

2. pH 值公式存在的问题及建议

pH 值求单项污染值公式(4)存在的问题类似于求溶解氧污染值的公式(3),内梅罗原式(4)用图3表示,我们建议的修正式(4-1)用图4表示,修正式(4-1)如下:

$$\frac{C_i}{L_{ij}} = \begin{cases} \frac{C_i - \bar{L}_{ij}}{L_{ij\text{最小值}} \text{ 或 } L_{ij\text{最大值}} - \bar{L}_{ij}} & \text{当 } L_{\min} \leq C_i \leq L_{\max} \\ B_{\max} \left(1 - \frac{C_i}{L_{\min}}\right) + \frac{C_i}{L_{\min}} & \text{当 } C_i \leq L_{\min} \\ B_{\max} \left(\frac{C_i - L_{\max}}{L_{\min}}\right) + \frac{(L_{\max} + L_{\min} - C_i)}{L_{\min}} & \text{当 } C_i > L_{\max} \end{cases} \quad (4-1)$$

式中符号同式(4)。

$B_{\max} \geq \frac{\bar{L}_{ij}}{L_{ij} - L_{\min}}$, $B_{\max}$ 值的确定应根据实际情况,可参照溶解氧的测定方法,式(4-2)的取值范围如图4。

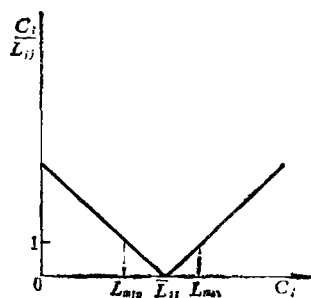


图3 原式(4)取值范围图

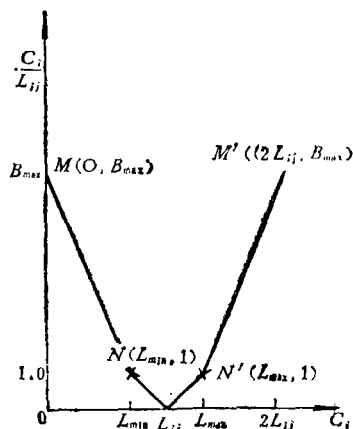


图4 式(4-1)取值范围图

由于漓江监测数据 pH 值一般不超标,故计算 pH 值的污染指数时,不涉及到确定 $B_{\max}$ 值。

对于内梅罗污染指数公式中所考虑到的治理费用对污染值影响的公式,我们在评价计算中没有采用,原因是下列两点:

1. 国内环境污染治理费用尚不明确,各项污染物的治理费用标准相差就更大,特别是损害治理费用同污染值之间是否符合式中的关系(系数 P 值),更需要结合中国情况进一步研究。

2. 对污染不很严重的水质,即其相对污染值相差不很悬殊时,不采用治理费用式对求污染指数 PI_i 影响不大。这一点我们在评价计算中已作了验证。

三、漓江水质评价

在漓江的水质评价中,考虑水的用途为

表 1 在一个监测点的多项指标值

项目	允许最高值	77 年 3 月漓江龙隐桥		77 年 3 月六合桥	
		实测值	相对污染值	实测值	相对污染值
溶解氧	4 毫克/升	0.0	1.74	4.0	1.0
耗氧量	10 毫克/升	42.48	4.25	122.4	12.24
浑 浊 度	20 度	80.0	4.00	80	4.00
大肠杆菌	1000 个/升	>23800	>2.380	>23800	>2.380
悬 浮 物	25 毫克/升	115.5	4.620	19.5	0.78

注：龙隐桥与六合桥是相邻两个监测点，皆是漓江支流小东江上的监测点（小东江是污染较严重的水域）

表 2 在一个监测点的单项指标值

项目	地点	时间	实测值（毫克/升）				允许标准值 （毫克/升）	相对污染值
			1	2	3	实测平均值		
氟	漓江 灵川木马村	78 年 2 月 17 日 25	0.025	0.024	1.05	1.0615	0.05	21.23
			0.12	0.15	5.00			
镉	漓江 灵川木马村	77 年 1 月 24 日 3	0.86	0.015	0.0003	0.148	0.01	14.80
			0.011	0.0013	0.002			
锰	灵川木马村	76 年 3 月 8 日 15	1.00	0.72	0.80	2.443	0.1	24.43
			0.04	0.01	12.0			
砷	灵川木马村	75 年 3 月 5 日 13	0.075	0.005	0.70	0.630	0.05	12.60
			0.0	—	3.0			

便利旅游及饮用，我们选定了 19 项水质参数及其标准值（见表 3），作了近五年来的污染指数的计算，其中 1978 年 7 月污染指数分布见表 4，相应的污染指数分布示意图见图 7。因为只采用了一组参数标准，所以式(1)中的 $PI = PI_i$ 。

对于选定的 19 项参数，在漓江不是每年都有齐全的数据。然而要对比不同的监测点，不同时间的污染指数，就必须用同一组水质参数。因此，我们从 19 项中选出数据完整的 10 项参数，计算了 1975—1979 年的污染指数（见表 5）。尽管这 10 项参数不能充分反映污染全貌，但仍可以起到部分地对比污染状况的作用。

对于每个监测点 P 由式(2)计算 PI_P 。

为了考虑整个漓江的污染情况，我们定

$$\text{义总的污染指数 } PI = \sum_{P=1}^N \eta_P PI_P, \quad N = 22,$$

式中 η_P 表示污染指数的加权系数，其确定的方法是按各监测点所占据的河段长度的比例求得。

桂林漓江每年 3 月份前后为枯水期，7 月份开始进入丰水期，按实测数据（3 月份两次，取平均值；7 月份两次，取平均值）分别计算了 3 月份污染值及 7 月份污染值（见表 5）。

鉴于枯水期污染指数一般较丰水期污染指数高，我们探讨了河水流量与污染指数的关系（见表 6）。从表 6 及图 5、6 可分析到污

表 3 水质参数及标准值

编号	参数	标准	L	19 项参数	10 项参数	注
1	酚	0.01	毫克/升	C ₁	C ₁	
2	砷	0.04	毫克/升	C ₂	C ₂	
3	汞	0.001	毫克/升	C ₃	C ₃	
4	镉	0.01	毫克/升	C ₄	C ₄	
5	锌	1.0	毫克/升	C ₅	C ₅	
6	氟	0.05	毫克/升	C ₆	C ₆	
7	铅	0.1	毫克/升	C ₇	C ₇	
8	六价铬	0.05	毫克/升	C ₈	C ₈	
9	铜	0.1	毫克/升	C ₉	C ₉	
10	氟化物	1.0	毫克/升	C ₁₀	C ₆	
11	硫化物	1.0	毫克/升	C ₁₁		**
12	铁	0.3	毫克/升	C ₁₂		
13	锰	0.1	毫克/升	C ₁₃	C ₇	
14	耗氧量	10	毫克/升	C ₁₄	C ₈	*
15	大肠杆菌	10000	个/升	C ₁₅		*
16	悬浮物	25	毫克/升	C ₁₆		*
17	浑浊度	20	度	C ₁₇		*
18	溶解氧	5	毫克/升	C ₁₈	C ₉	**
19	pH 值	8.5-6.5	平均 7.5	C ₁₉	C ₁₀	

* 参照国外资料确定的标准 ** 参照北京市自来水公司标准 其它项参照桂林市环境保护办公室采用的标准。

表 4 漓江污染指数表 (19 项参数)

监测点位置	污染指数 PI_p	污染指数 PI_p 平均	求总污染指 数权重系数	备 注
漓江 { 大河 干流 { 象山 { 柘木	1.360 1.691 1.694	1.36 1.69 1.69	0.10 0.07 0.09	本表是按前述公式所计算的 78 年 7 月各监测点的实测值。 总污染指数 $PI = \sum \eta_p \cdot PI_p$ $PI = 1.428$ 表明 78 年 7 月漓江桂林段水质受到污染损害。 式中 η_p 为权重系数按表中所列数据计算。
兴坪河 { 阳朔兴坪(铅锌矿上游) { 阳朔兴坪(铅锌矿下游) { 阳朔县城	0.725 0.709 0.676	0.70	0.21	
漓江下 { 平乐三江会合处 游 { 平乐水厂 { 平乐物资局	1.125 0.783 0.747	0.89	0.13	
桃花江 { 五仙桥 { 西门桥 { 莫边桥	1.203 1.700 1.708	1.54	0.10	
小东江 { 六合桥 { 新 桥 { 龙隐桥	3.657 1.703 3.520	2.96	0.10	
相思江 { 良丰桥 { 李家村 { 渡 口	1.695 1.698 3.073	2.14	0.10	
甘棠河 { 灵川狮子铺 { 灵川木马村 { 灵川水厂 { 灵川县医院	0.709 0.863 1.292 0.916	0.95	0.10	

表 5 漓江污染指数表 (10 项参数)

监测点位置		污染指数 $PI_P = \sqrt{\frac{1}{2} [(C_i/L_{ij})^2_{\text{最大}} + (C_i/L_{ij})^2_{\text{平均}}]}$								
		75.3	75.7	76.3	76.7	77.3	77.7	78.3	78.7	79.3
漓 江 干 流	大河	0.25	0.44	0.15	0.44	0.25	0.38	0.17	0.25	0.17
	象山	1.09	0.41	0.23	0.48	0.27	0.41	0.24	0.41	0.20
	柘石	2.60	0.62	0.34	0.57	0.37	0.46	0.25	0.43	0.18
	大圩	2.14	0.44	0.19	0.49	0.45	0.47			
	草坪	5.73	0.61	0.22	0.46	0.34	0.43			
	兴坪	2.85	0.46	0.15	0.40	0.22	0.39	1.77	0.33	
	阳朔	2.00	0.15	0.20	0.50	0.20	0.43			
小东江(平均)		5.17	2.13	3.17	1.81	6.33	1.15	1.67	2.63	4.24
桃花江(平均)		2.14	0.51	0.40	0.58	0.56	0.47	0.28	0.45	0.28
甘棠河(平均)		1.17	4.08	4.69	1.84	3.03	1.52	4.54	0.41	
平乐(平均)		0.13	0.67	0.39	0.34	0.15	0.71	3.19	0.62	
相思江(平均)									0.48	
总污染指数 $PI = \sum_{P=1}^N \eta_P PI_P$		2.50	0.82	0.75	0.65	0.91	0.58	1.65	0.64	1.00

表 6 总污染指数与流量表

	3 月		7 月	
	PI	流量 Q	PI	流量 Q
1975 年	2.50	59.6	0.82	91
1976 年	0.75	35.4	0.65	230
1977 年	0.91	23.6	0.58	187
1978 年	1.65	150.0	0.64	52.9
1979 年	1.00	117		

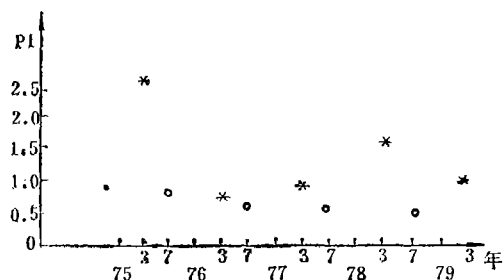


图 5 污染指数逐年变化图
(* 3 月污染指数 ○ 7 月污染指数)

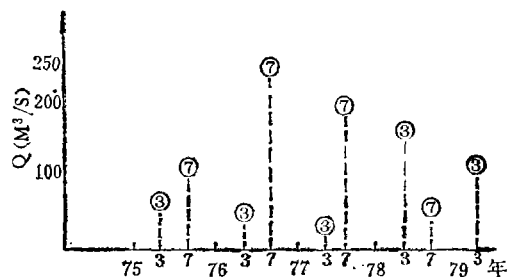


图 6 流量逐年变化图(③ 3 月流量值 ⑦ 7 月流量值)
注：图 6 流量为漓江桂林水文站数据

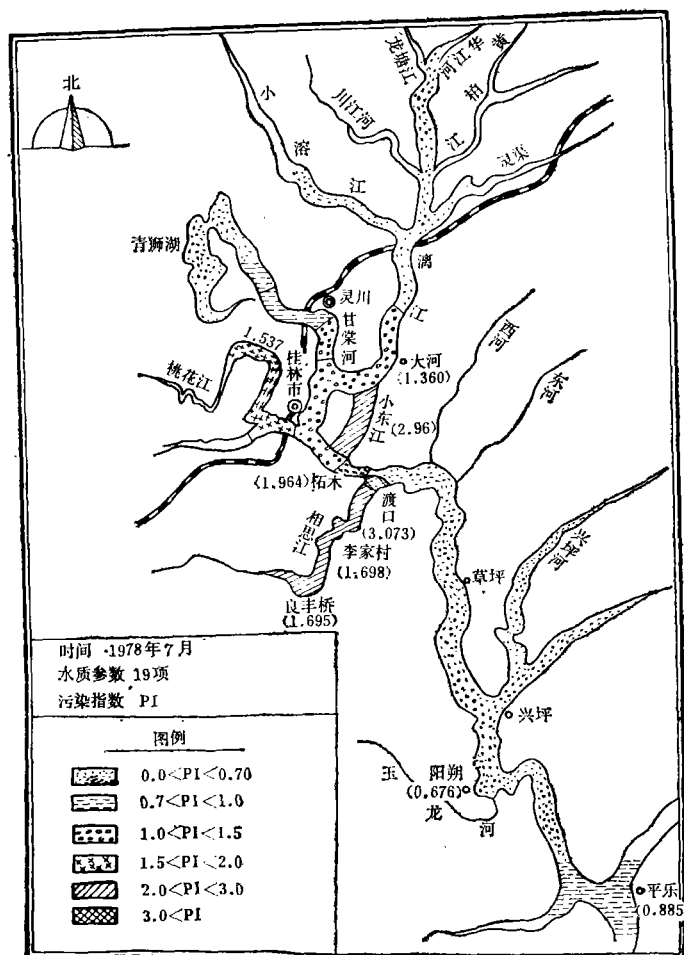


图7 漓江污染状况示意图

染指数的大小不完全取决于河水流量, 还应看到排放量等因素。

内梅罗污染指数的评价方法有助于我们对漓江水质的评价, 从表4、表5中看到, 污染指数一般都偏低, 说明漓江水质污染目前并不严重; 漓江水质污染较严重的水域是小东江、甘棠河等支流(枯水季节)。因此, 我们认为只要着重治理支流及其污染源, 便可在很大程度上改善漓江水质状况。

参 考 文 献

- [1] Nemerow, N. L., and Hisashi Suitomo, *Benefits of Water Quality Enhancement*, Syracuse University, Syracuse, NY, Report No. 16110 DAJ, prepared for the U.S. Environmental Protection Agency (December 1970).
- [2] Nemerow, N. L., *Scientific Stream Pollution Analysis*, 1974.