

# 用污染指示菌评价城市水体污染的研究

万登榜 丘昌强 马 宁\* 孙兴湘

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

## 提 要

选择湖南省常德市江北城区水体为代表开展本项研究。结果表明, 水体中污染指示菌, 总大肠菌群(TC)和粪大肠菌群(FC)密度同  $BOD_5$  负荷以及综合污染指数 P 呈高度正相关。所以, 污染指示菌指标, 特别是粪大肠菌群指标是综合评价城市污水, 尤其是生活污水污染的一个必不可少的重要参数。对该城区水体细菌污染的评价结果是, 生活污水排放愈集中的地区, 细菌污染愈严重。其中护城河水的 TC 密度超出我国地面水Ⅲ级标准 4 个数量级; FC 密度超过 WHO 娱乐用水标准 3 个数量级。护城河是细菌污染最严重水体。包括滨湖公园内湖在内的接纳生活污水多或较多的水体, 细菌污染也相当严重。只是远离城区的柳叶湖受污染程度较轻。

**关键词** 粪大肠菌群, 城市水体, 综合指数

TC 和 FC 是所有温血动物肠道的常见栖息菌, 它们在水中的存在可以指示粪便污染<sup>[1]</sup>。Canter<sup>[2]</sup>曾用包括 FC 在内的 9 项分指数求出的水质指数评价过河水质量。本研究则把 FC 密度同以 5 项化学指标换算的综合污染指数 P 进行了比较研究, 首次阐明了两者的相关性和作为城市水体污染指标所得评价结果的一致性。本研究还以 TC 和 FC 为指标, 按照我国地面水水质Ⅲ级标准<sup>[3]</sup>和 WHO 为娱乐用水规定的明显污染限下限标准<sup>[4]</sup>评价了该城区水体的污染状况。该城区水网发达, 沅江自西向东流经本区, 湖塘河渠星罗棋布。密集的人口和以纺织印染与食品加工为主体的轻纺和食品工业, 使本区目前的工业废水和生活污水日排放量达 9 万 t 以上。而且大部分污水未经任何处理便直接导入排水系统, 造成城区及周围河港水体的严重污染, 成为典型的有害有机物污染的水体。

## 1 研究方法

**1.1 采样点的设置** 根据污水流向与排水状况及城区水体分布特点, 设置了 16 个采样点(图 1)。其中 9 号点代表纳污量最大水域; 10, 12, 15, 16 各点代表纳污量较大水域; 6,

\* 工作单位: 湖南省常德市环境监测站。

1992 年 9 月 5 日收到。

7, 8, 11, 13, 14 诸点处污水扩散区; 1 号点代表受城市污水污染的沅江左岸岸边污染带; 2, 3, 4, 5 各点为基本未受城市污水污染的柳叶湖和东江乡渔塘样点。



图 1 常德市污水排放系统和采样点示意图

Fig.1 A map showing wastewater drainage system and sample sites in Changde city

**1.2 细菌计数** 自 1987 年 2 月至 1988 年 1 月, 每月在所设样点采样一次。水样的细菌学分析和常规水质监测同步进行。TC 和 FC 的计数方法详见文献<sup>[5]</sup>。

**1.3 数据处理** 由于细菌在水体里呈对数正态分布趋势, 所以, 各样点大肠菌群密度的年平均值以几何平均值表示。而且在 95% 置信水平上确定了细菌密度的年变动范围。

**综合污染指数的计算** 根据该城区水体污染状况, 采用 COD<sub>cr</sub>, BOD<sub>5</sub>, DO, 硫化物和挥发酚 5 个水质参数, 按照我国地面水水质Ⅲ级标准(GB3833—88), 分别求出各个分指数, 而后代入内梅罗公式<sup>[6]</sup>

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ci / Si\right)^2 + (\max Ci / Si)^2}{2}} \quad (1)$$

求出各样点的 P 值。式中 P 为综合污染指数; Ci 为第 i 个参数的实测浓度值; Si 为第 i 个参数的水质标准值。

含大肠菌群分指数在内的综合污染指数分别用两个公式计算: 在上述 5 项分指数中增加 1 项大肠菌群分指数, 即以 6 个分指数代入公式[1]求其 P' 值; 将 6 个分指数代入均值型指数公式

$$P'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Ci}{Si} \quad (2)$$

求其 P'' 值。回归分析 以 16 个样点 FC 密度的几何平均值对相应样点的综合污染指数

$P$  和  $BOD_5$  的算术平均值进行回归分析, 建立相应的回归方程, 并据以考察各对参数间的相关性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大肠菌群密度与综合污染指数的关系

**2.1.1 FC 与 P 的关系** 将表 1 所列 16 个样点 FC 密度的几何平均值和列于表 2 的综合污染指数 P 进行回归分析, 建立幂函数方程:

$FC(MPN / 100ml) = 1201.73P^{2.10}$  ( $r = 0.7038, n = 16, p < 0.01$ ), 即 FC 密度同 P 呈正相关。而且从图 2 可以看到, 用这两个参数进行水质评价, 所得结果基本一致。即 2—6, 13 样点为轻到中污染; 7—10, 12, 15, 16 样点为严重污染。只有 11 和 14 样点的评价结果与两个参数水质评价有差异。这是因为 11 号站水域藻类大量繁殖引起 CODcr 和  $BOD_5$  严重超标所致。而 14 号样点水域属距城市污染源较远的污水扩散区, 从化学性质看, 水质已显著净化, 但因小河流经农业生产区域, 还不时受到粪便污染, 故 TC 和 FC 指标偏高。

对于一个水系发达的城市而言, 个别样点或这一指标突出, 或另一指标异常难免会造成两个评价结果的不一致。但个别情况不足影响总体评价结果, 同时, 也可得到解释。

表 1 各样点大肠菌群的密度的分布

Tab.1 The distributions of coliform densities in various sample sites

采样点 No.sample sites	年变动范围(MPN / 100ml)		几何平均值(MPN / 100ml)	
	Ranges of annual change		Geometric meanl	
	TC	FC	TC	FC
1	$2.2 \times 10^3 - 2.3 \times 10^4$	$6.0 \times 10 - 4.2 \times 10^3$	$7.2 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$
2	$5.0 \times 10 - 1.1 \times 10^3$	$4.6 \times 10 - 4.8 \times 10^2$	$2.3 \times 10^2$	$1.5 \times 10^2$
3	$7.0 \times 10 - 1.5 \times 10^3$	$3.0 \times 10 - 3.1 \times 10^2$	$3.3 \times 10^2$	95
4	$1.5 \times 10^2 - 2.4 \times 10^3$	$4.0 - 9.8 \times 10^2$	$6.0 \times 10^2$	$2.2 \times 10^2$
5	$2.2 \times 10^2 - 8.5 \times 10^3$	$1.6 \times 10^2 - 7.1 \times 10^3$	$1.4 \times 10^3$	$1.1 \times 10^3$
6	$2.0 \times 10^2 - 3.3 \times 10^4$	$1.0 \times 10^3 - 1.8 \times 10^5$	$2.5 \times 10^3$	$1.3 \times 10^3$
7	$1.1 \times 10^5 - 6.9 \times 10^5$	$8.0 \times 10^3 - 4.3 \times 10^5$	$8.5 \times 10^4$	$5.8 \times 10^4$
8	$3.0 \times 10^4 - 2.7 \times 10^6$	$1.8 \times 10^5 - 1.1 \times 10^6$	$3.0 \times 10^5$	$1.4 \times 10^5$
9	$3.2 \times 10^6 - 8.1 \times 10^6$	$5.7 \times 10^5 - 5.4 \times 10^6$	$5.1 \times 10^6$	$1.8 \times 10^6$
10	$8.3 \times 10^4 - 7.2 \times 10^5$	$5.5 \times 10^4 - 4.4 \times 10^5$	$2.5 \times 10^5$	$1.5 \times 10^5$
11	$1.1 \times 10^3 - 7.8 \times 10^3$	$7.9 \times 10^2 - 6.0 \times 10^3$	$2.9 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$
12	$4.3 \times 10^2 - 2.3 \times 10^5$	$7.0 \times 10^4 - 1.9 \times 10^6$	$4.3 \times 10^5$	$3.6 \times 10^5$
13	$3.3 \times 10^2 - 6.3 \times 10^3$	$2.4 \times 10^2 - 5.2 \times 10^3$	$1.5 \times 10^3$	$1.1 \times 10^3$
14	$2.2 \times 10^2 - 4.6 \times 10^3$	$9.0 \times 10^3 - 2.1 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$	$4.4 \times 10^4$
15	$3.1 \times 10^5 - 3.2 \times 10^6$	$2.4 \times 10^5 - 1.6 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$	$6.2 \times 10^5$
16	$6.2 \times 10^5 - 3.9 \times 10^6$	$4.7 \times 10^5 - 1.8 \times 10^6$	$1.5 \times 10^6$	$9.1 \times 10^5$

### 2.1.2 大肠菌群分指数对综合污染指数的影响

由于大肠菌群密度同综合污染指数  $P'$  呈正相关,那么,计入它的分指数后的综合污染指数  $P''$  自然与综合污染指数  $P$  相关。从  $P'$  与  $P$  的幂函数方程:  $P' = 3.81 \cdot P^{1.70}$  ( $r = 0.6789, n = 16$ ) 得到确证。然而,必需指出,在单项污染分指数中大肠菌群分指数的突出性(表 2)。尤其在纳污量较大的水体,该分指数对  $P$  有较大影响,使得  $P$  和  $P'$  产生很大差异。如 14 号样点,以前 5 项指标求得的  $P$  值进行评价应划归为轻污染水质,但一旦包容 TC 分指数,遂使  $P$  值增大,以至成为严重污染水体了。9 号点的情况更加特殊,它的 TC 分指数高达 5,400,使并入此分指数后的  $P''$  为  $P$  的 256.9 倍。然而,当水体里的 TC 密度达到或接近达到我国地面水水质Ⅲ级标准时,TC 分指数对  $P$  几乎没有什么影响,表现为  $P''$  和  $P$  值的非常接近(2—6 与 13 号样点即是)。因为当 TC 分指数处于低值时,方程(1)式中的最大分指数仍来自化学组分分指数中之最大者。

表 2 各样点水质污染分指数及其综合污染指数

Tab.2 Water quality pollution subindexes and their comprehensive pollution indexes in various sample sites

采样点 No.sample sites	各项分指数 Various subindexes						综合污染指数 Comprehensive pollution indexes		
	DO	COD <sub>cr</sub>	BOD <sub>s</sub>	硫化物 Sulfide	酚 Phenol	TC	P	P'	P''
							P	P'	P''
1	0.34	0.87	0.35	0.09	0.80	7.20	0.70	5.22	1.61
2	0.30	1.33	0.70	0.11	1.00	0.23	1.06	1.04	0.61
3	0.65	1.47	1.13	0.17	0.80	0.33	1.20	1.17	0.76
4	0.28	2.00	0.85	0.23	1.60	0.60	1.58	1.56	0.93
5	0.25	1.93	1.75	0.17	0.14	1.40	1.51	1.53	0.98
6	0.90	2.73	2.38	0.27	0.80	2.50	2.17	2.24	1.68
7	1.35	4.20	4.25	0.77	2.40	85	3.52	61.14	16.32
8	1.44	5.40	4.63	0.67	3.00	300	4.38	215.36	52.56
9	2.21	10.13	19.00	12.60	4.40	5,400	15.07	3871.99	908.06
10	1.03	4.53	5.75	0.35	1.40	250	4.47	179.47	43.84
11	0.13	4.33	2.30	0.15	1.00	2.90	3.26	3.30	1.80
12	2.09	4.47	5.25	110.95	3.20	430	80.45	311.03	92.66
13	0.45	2.13	1.78	0.30	1.20	1.50	1.72	1.74	1.23
14	1.31	2.40	2.25	0.15	1.60	100	2.02	71.84	17.98
15	2.12	3.27	2.75	6.05	1.80	1,000	4.28	716.92	69.33
16	1.96	3.53	2.75	0.25	2.40	1,500	2.93	1075.50	251.81

含 TC 分指数在内的综合污染指数  $P''$  若按式(2)计算,得到的  $P''$  值(以  $P''$  表示)同  $P$  的幂函数方程为  $P'' = 1.80 \cdot P^{1.51}$  ( $r = 0.7058, n = 16$ )。该方程显示,  $P''$  较之  $P'$  同  $P$  的关系更紧密。因为这可以修正一部分由于用公式(1)计算引致的 TC 分指数的人为夸大给水污染评价带来的影响。表 2 的结果清楚地表明,所有受 TC 严重污染水域的  $P''$  均比  $P'$  低

得多,即使得 P' 同 P 的差距相对缩小,因而更能反映实际情况。所以,作者建议,为建立受细菌严重污染水体 P' 与 P 的回归方程,宜按公式(2)进行 P' 值的计算。不过,对于 TC 密度达标水域,无论是用公式(1)还是公式(2),计算结果相差无几。

## 2.2 大肠菌群密度同有机污染的关系

Pipes<sup>[7]</sup>曾指出细菌群落大小和营养水平的相关性:水中的细菌含量随营养水平的提高而增加。根据 FC 密度与  $BOD_5$  的幂函数方程:

$FC(MPN / 100ml) = 23.34BOD_5(ppm)^{2.81}$  ( $r = 0.78, n = 16$ ), 表明 FC 密度是与  $BOD_5$ , 即有机营养水平密切相关的。也就是说,FC 密度与来自生活污水的有害有机物污染程度呈正相关关系。

## 2.3 江北城区水体污染的细菌学评价

从列于表 1 中的 16 个样点指示菌群密度的全年监测结果可以看出,该区水体受 TC 和 FC 的污染相当严重,而且这种污染已扩散到城区以外水域。远郊水体的水质较好。现分述如下。

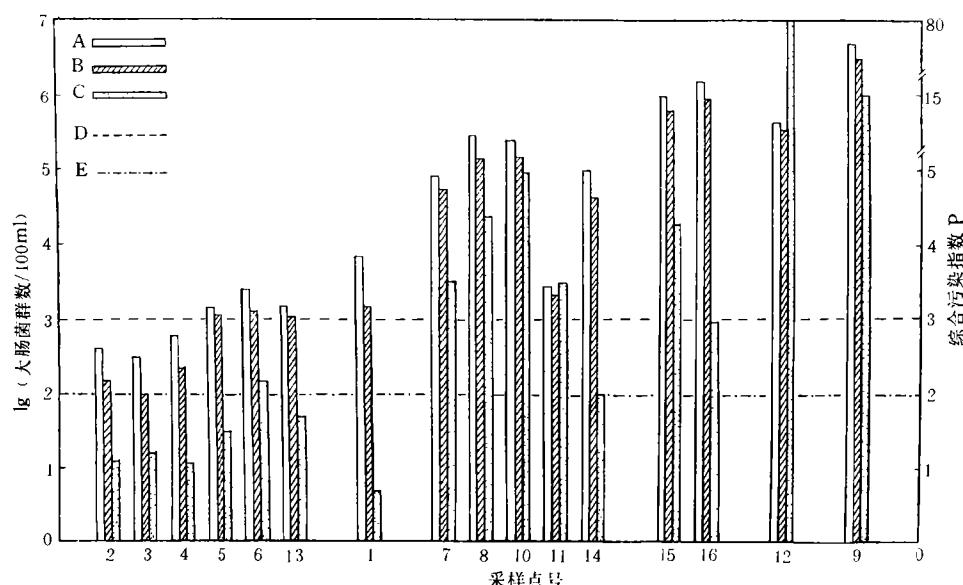


图 2 以 TC, FC 密度和综合污染指数 P 表示的各样点污染程度的比较

Fig.2 The comparisons of pollution in different sample sites as indicated by TC and FC densities and comprehensive pollution index P

A. TC 密度; B. FC 密度; C. 综合污染指数 P; D. TC 密度的Ⅲ级地面水标准; E. 综合污染指数 P 的轻污染限。

———TC 密度的Ⅲ级地面水标准和 FC 密度的明显污染限下限 The state standard III degree for TC of surface water and the lower limit of distinct pollution limitation for FC

———综合污染指数 P 的轻污染限 The light pollution limit for comprehensive pollution index P

**2.3.1 护城河(9 号点)** 是江北城区纳污量最大水道,  $COD_{cr}$  和  $BOD_5$  均远远超过我国地面水标准, 其年平均值分别为 151.9 和 75.8ppm; TC 和 FC 密度分别超过国家标准 4

个数量级和 WHO 标准 3 个数量级, 而且从中检测到危害人体的致病菌沙门氏菌 (*Salmonella* sp.), 故为江北城区有机污染和细菌污染最严重水体。

**2.3.2 纳污量较大水域** 乌龙港(15, 16 号点), 贾家湖(12 号点), 沙河(10 号点)水样的 TC 和 FC 密度分别超标 2—3 个数量级, 属严重污染水体。由于倾倒垃圾和水草覆盖水面, 常使贾家湖湖水的 DO 降低到零。再加上异常高的含硫污水(硫化物高达 114.5ppm)的排入, 使水面散发出硫化氢恶臭, 以至综合污染指数 P 成为 16 个样点中的最高者。

**2.3.3 污水扩散区** 位于该区域的二号桥(7 号点), 战备桥(8 号点)和长生桥(14 号点)等水域的 TC 和 FC 密度超标 2 个数量级, 明显受到细菌污染。栗家墙(6 号点)和七里桥(13 号点)位于污水扩散区的最边缘处, 污水已得到一定净化。同时, 南碚开闸向沅江排水时受到柳叶湖湖水的稀释, 因此, 这两处水域的 TC 密度基本上达到了国家地面水Ⅲ级标准。

**2.3.4 滨湖公园湖水(11 号点)** TC 密度基本达标, 但 FC 密度却超出明显污染限下限标准。而且湖水的 COD<sub>cr</sub> 值高(因藻类大量繁殖所致), 已不符合娱乐用水要求。沅江岸边污染带(1 号点)的 FC 密度起伏很大, 以至全年的最高值和最低值竟相差 2 个数量级。这种大幅度波动是由于南碚排污口污水排放量波动大(常间歇排放)和沅江干流水文条件变化大所引起的。

**2.3.5 受污染影响较小的水体** 东江乡渔塘(3, 4 号点)和柳叶湖(2.5 号点)因远离城区, 较少地受城区污水的影响, 加上水体的天然自净作用, 除地处柳叶湖湖口水域属基本达标外, 其余水域的 TC 密度均在地面水Ⅲ级标准限以下, 水质较好。若以 FC 密度评定, 也仅属轻污染。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Bull R J, et al. Evaluation of the health risks associated with disinfection critical review, *Environmental control*, 1990, **20** (2), 101—102.
- [ 2 ] Canter L W. Data analysis and presentation, in river water Quality monitoring. michigan: Lewis Publishers, 1985: 83—96.
- [ 3 ] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 576—577.
- [ 4 ] Suess M J. Bacterial water quality and standards: the role of world health organization, in Bacterial indicators / health hazards associated with water. (Hoadley A W and Dutka B J eds), Chicago: ASTM comitte on publications, 1977.
- [ 5 ] 万登榜等. 模拟稳定塘系统对污染指示菌的去除作用, 应用生态学报, 1992, **3** (1), 76—80.
- [ 6 ] 高荣松等. 开发项目环境影响评价原理和方法. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.
- [ 7 ] Pipes W O. Indicators and water quality, in bacterial indicators of pollution. Florida: CRC Press, 1982.

## ASSESSMENT OF URBAN WATER BODIES CONTAMINATION USING POLLUTION INDICATION BACTERIA

Wan Dengbang, Qiu Changqiang, Ma Ning and Sun Xingxiang

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

### Abstract

This study was conducted in water bodies in a Jiangbei district of Changde City. Densities of indication bacteria were related closely to  $BOD_5$  and to comprehensive index P, with correlation coefficients being 0.78 and 0.70 respectively ( $p < 0.01$ ). Similar assessment results were obtained in terms of fecal coliform (FC) densities and comprehensive pollution index. Therefore, the indication bacteria can be considered as important parameters for comprehensive assessment on the pollution of urban wastewater. The total coliform (TC) density exceeded the state standard III degree of surface water quality by 4 orders of magnitude, and according to WHO recreational water standard, the FC density exceeded by 3 orders of magnitude. Furthermore, the enteric pathogenic bacteria such as *Salmonella* sp. were found in Huchenghe. Bacterial contamination in other water bodies including a lake in Bin Lake Park was serious. Only suburban Liuye Lake was one of the slightly polluted localities.

**Key words** Fecal coliforms, Urban water bodies, Comprehensive index