

研究报告

苏州水网黑臭警报方案的研究*

温灼如 张瑛玉 洪陵成 刘 培

(水电部南京水文水资源研究所)

方粤强 姚静华 翁建中 莫庆源

(苏州市环境监测中心站)**

一、概 述

苏州是河流比降很平缓的水网城市,随着城市经济建设的迅速发展,未经处理排入河道的工业、生活污水不断增长,水质逐渐恶化。近几年来,内外城河频频出现黑臭,从1978年至1985年期间有6年出现长短不等的黑臭期。黑臭多数发生在气温渐高水量较小(5月下旬至6月上旬)和夏季丰水期中的相对枯水期(8月中旬至9月上旬),尤其在雨量偏小的“干梅”季节更容易发生黑臭。根

据国内外文献和我们在苏州的观察研究,认为形成黑臭的内因是一种生物化学现象——水体中有机物质的厌氧分解^[1,2]。在分解过程中,伴随产生有臭气体逸出水面进入大气,黑色沉积物被气体和气泡托浮而起,间歇性地掀起底泥搅混水体,致使水体黑臭。若河道内有机污染负荷超载,并淤积一定厚度的滞流水体,无论在什么季节都有可能发生黑臭现象。

欲研究苏州水网黑臭警报方案,目前尚无完善的模型可资借鉴,我们试提出一种模型(图1),供城市环境监测与自动监测控制警报系统使用。

二、可能黑臭期的监测

1. 监测断面的设置和项目的选定

监测断面设置见图2。监测项目有水温、DO、pH值、COD、BOD₅、NH₃-N、硫化物、黑度BI、嗅阈值OTC、水位、流量和流向。监测次数以能掌握黑臭发生变化过程为宜。

2. 可能黑臭期的水量与水质指标变化

描绘1984年可能黑臭期4—9月的水量、水质指标浓度过程线,看出苏州外城河各断面的pH值只有微小变化,COD变化不明

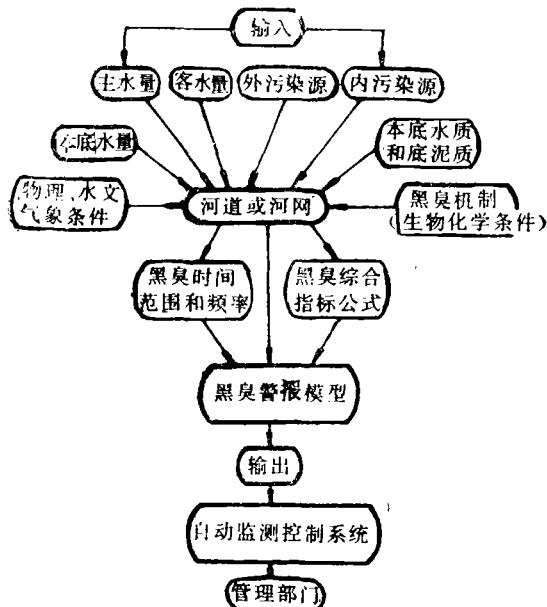


图1 苏州水网黑臭警报模型

* 本项研究为“六五”国家科技攻关项目,受苏州市环境保护局委托,由二个单位共同承担完成。

** 参加本课题的研究人员还有蒋晓江、郑次平。

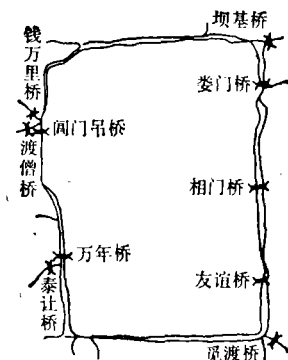


图2 苏州外城河监测断面设置图

显,一般在 10mg/l 左右,洪水期相对小些.部分时间 $\text{DO} < 1\text{mg/l}$, 水体处于严重缺氧状态. $\text{NH}_3\text{-N}$ 除万年桥外浓度都较高.硫化物在黑臭期间可检出.总之,苏州外城河水质较差,当温度渐高(24°C 以上)来水量减小(占总进水量 70% 的泰让桥来水量小于 $20\text{m}^3/\text{s}$),处于缓滞流状态的水体易于发生黑臭.

水质以城东北娄门桥最差,其次是阊门吊桥、相门桥、友谊桥,万年桥因受泰让桥来水影响其水质相对好些.

3. 外城河水流流型与黑臭的关系

根据 1984 年监测资料分析,以日平均流量及流向作为划分流型的准则,初步确定五种流型:(1)滞流型,各监测断面进出流量都很小,呈基本滞流状态,这是外城河发生黑臭的流态.(2)纯觅渡桥出流型,城东河段各断面水流均为自北向南流动,坝基桥是自东向西逆流或少量出流,此种流型可以发生全外城河黑臭或局部河段黑臭.(3)以觅渡桥为主出流型,若用觅渡桥日平均流量与坝基桥日平均流量之比值作为划分流型的准则,则此种流型 $\frac{Q_{\text{觅}}}{Q_{\text{坝}}} > 1.5$,城东河段各断面水流大多自北向南流,水质较差.(4)觅渡桥、相门、坝基桥出流型, $\frac{Q_{\text{觅}}}{Q_{\text{坝}}}$ 在 $0.6\text{—}1.5$,娄门桥和友谊桥有大小相当方向相反的流量,水质较

好.(5)纯坝基桥出流型和以坝基桥为主出流型, $\frac{Q_{\text{觅}}}{Q_{\text{坝}}} < 0.6$,各断面水流均为自南向北流动,水质好.我们用 1984 年监测资料建立流型准则,经过 1985 年监测资料做检验,获得了与实际情况相符合的结果.

4. 水体黑臭与内外污染源输入变化的关系

外城河两岸工厂直接排入的工业废水和内城河排出的生活污水,统称为内源污染,黑臭或非黑臭期污染量输入无明显变化,可看作常数.上游各来水中携带污染物进入外城河称为外源污染.据调查,外源污染输入量大于内源污染输入量,是苏州外城河主要的污染源.在上游来水量显著变小甚至趋近于零的黑臭期,外源污染输入量亦相应减小乃至趋于零.这说明外城河黑臭的发生与该期间内外污染源输入无直接关系,而是长期沉积于河底的有机污染物在不利的水文气象条件下起作用.

三、测定黑臭和黑度的实验室分析方法

水体变黑的程度用黑度 BI 表示,致黑的主要原因是水中存在腐殖质,黑度与其含量有关.罗纪旦、方柏容曾对悬浮颗粒中的发黑物质进行过研究,表明“水体的黑度和腐殖质的提取量存在着良好的对应关系”.由于腐殖质的定量测定很繁琐,难以应用,我们提出

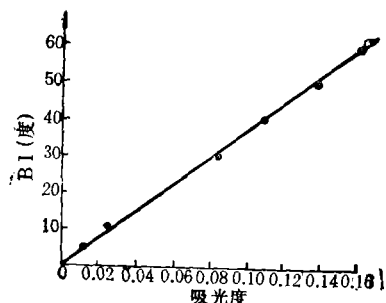


图3 水体参照黑度标准曲线

说明 1.每 10 度等于 $0.005\text{mg/l K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.
2.分光光度计 400nm 波长处所测定的吸光度 A 值.

在相同条件下,用水样中腐殖质的相对含量来测定黑度,其操作简便可行.我们从实验分析中发现腐殖质浓度 HC 与吸光度 A 有良好的线性关系.因腐殖质很不稳定,不同地区底泥中提取的腐殖质吸光度不同,故不宜当作标准液.经试验研究,我们改用重铬酸钾的色度作为水体参照黑度,它与腐殖质浓度有着良好的线性关系,可以间接地反映

水体中腐殖质浓度和水体黑度,为此我们制作了水体参照黑度标准线及其线性方程为 $BI = 378.8A$,以备查算,如图 3 所示.

臭度的测定是一项重要的感官指标,受人的心理因素、环境条件等影响,测定精度不高,目前我们暂时采用定性描述及《环境监测分析方法》一书中提出的嗅阈值标准分析法来评定臭的程度.

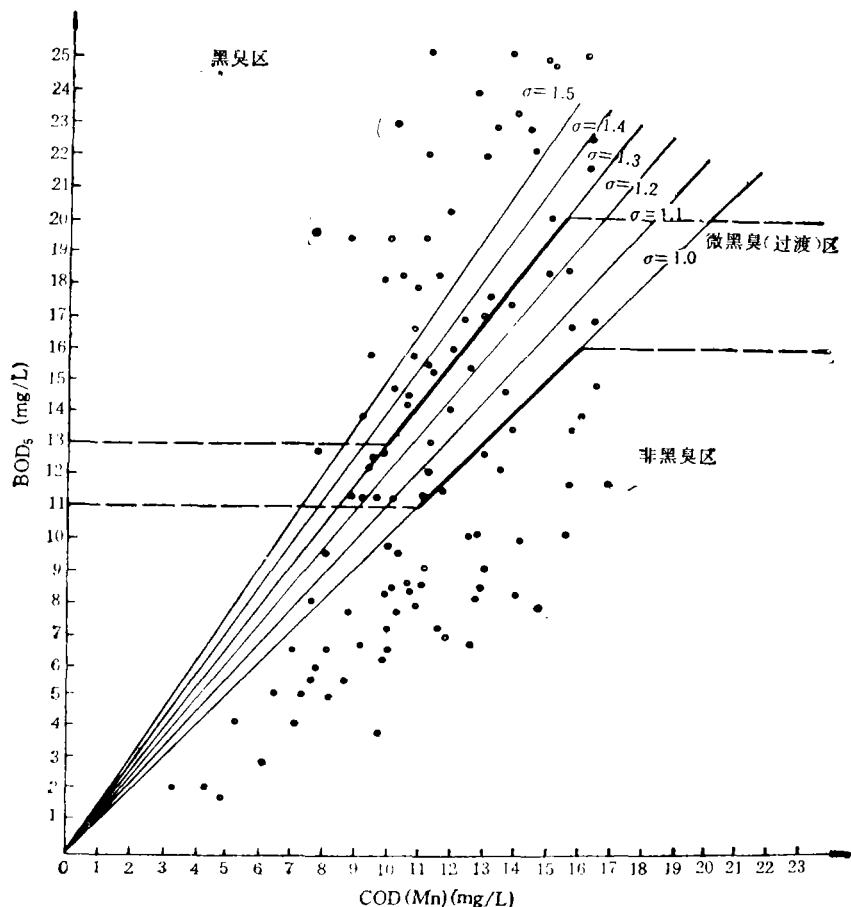


图 4 苏州水网 BOD_5 与 $COD(Mn)$ 关系图

黑臭区 $BOD_5 > 13 \text{ mg/l}$ $\sigma = \frac{BOD_5}{COD(Mn)} \geq 1.3$

$BOD_5 > 20 \text{ mg/l}$ $\sigma = \frac{BOD_5}{COD(Mn)} \leq 1.3$

微黑臭(过渡)区 $13 \text{ mg/l} > BOD_5 > 11 \text{ mg/l}$ $\sigma \geq 1.0$

$16 \text{ mg/l} > BOD_5 > 13 \text{ mg/l}$ $1.3 > \sigma < 1.0$

$20 \text{ mg/l} > BOD_5 > 16 \text{ mg/l}$ $\sigma < 1.3$

非黑臭区 $BOD_5 < 11 \text{ mg/l}$ $\sigma > 1$

$BOD_5 < 16 \text{ mg/l}$ $\sigma < 1$

四、发生黑臭的水质指标

我们用以下方法判断水体是否发生黑臭:

1. 单项指标法: 因指标多而孤立, 很难全部符合判定要求, 任意抽取其中二或三项指标来判断是不正确的, 因此只能参考而不作判别依据。

2. 水质指标比值法: 根据日本的研究指出, $BOD_5/COD(Mn)$ 的比值大小可推测出水体生物的分解程度^[3]。我们根据苏州水网 1984—1985 年监测资料分析了 BOD_5 与 $COD(Mn)$ 的关系, 并绘成图(图 4), 图中不同 σ 值定出不同的关系线, 可划分为黑臭、微黑臭(过渡)和非黑臭三个区域。在三个区内, 还可划分以有机或无机污染为主以及混合污染的不同区域, 可供进一步探讨。如此只要预测 $COD(Mn)$ 和 BOD_5 值, 即可按 $BOD_5/COD(Mn)$ 的比值来预测水体是否发生黑臭。

3. 综合指标公式法: 采用多元非线性逐步回归分析法, 对苏州外城河各断面 1984—1985 年监测的 17 次黑度和 29 次嗅阈值与它们对应的 pH 、 COD 、 $DO\%$ 、 NH_3-N 、 $Tw^\circ C$ 、 Q 资料进行回归计算, 建立各断面的黑度和臭度综合指标公式。从中看出影响黑度和臭度的主要因子是 COD 、 $DO\%$, 但因各断面污染情况不一, 使公式不尽相同。

回归分析计算结果表明, 黑度综合指标公式的相关系数和合格率都比较高, 可以用它来预测苏州外城河发生黑臭的程度、时间及其范围。

臭度综合指标公式的相关系数和合格率都较低, 不宜作判别公式, 仅供参考。另外, 实验室测定是水样中的臭度, 而人们闻到的是逸出水面进入空气中的臭味, 两者不完全一致。

五、苏州水网水量与水质过程线警报和

预测方法

我们应用复杂的鲍克斯-詹金斯预测模型^[4]与简单的前后期相关法分别连续预测(预测期 5 日)各水质及其水量指标过程线。鲍克斯-詹金斯预测模型是根据至少 50 年连续观测系列的平稳时间序列, 通过辨识、拟合、特征检验三个阶段。我们应用苏州外城河 1984 年监测资料建立模型并优选其参数, 再用 1985 年监测资料来检验模型的适用性。各个监测断面水质水量指标均以一阶差分自回归模型和一阶差分滑动平均模型拟合较好, 预测方程为

$$XT_{t+1} = (1 + \phi_1)X_t - \phi_1 X_{t-1} \quad (1)$$

$$XT_{t+1} = -\theta_1(X_{t,0} - X_{t,c}) + X_{t,0} \quad (2)$$

式中 XT_{t+1} 为需求项预测值, X_t 和 X_{t-1} 为预测时段前二个时段需求项的监测值, $X_{t,0}$ 和 $X_{t,c}$ 分别为预测时段前一个时段需求项的监测值和预测计算值, ϕ_1 为自回归模型系数, θ_1 为滑动平均模型系数。

前后期相关法是用最小二乘法计算, 其通式为

$$y = AX + B \quad (3)$$

式中 A 和 B 分别为系数和常数。

把上述三种预测模式中的系数和常数, 分监测断面优选得到水质水量指标的系数和常数 ϕ_1 、 θ_1 、 A 和 B , 汇总列为表 1。若要做水质水量指标的警报或预测时, 先按欲警报的监测断面从表 1 分别取其系数和常数代入通式(1)、(2)和(3), 已知需求项实测值即可计算 5 日后的预测值。若连续监测, 则使用式(1)至(3)预测黑臭与非黑臭的各项水质和流量过程线。

六、黑臭警报模型的检验

我们从 1984 年 4 月 10 日至 9 月 30 日共监测 35 次(每次间隔 5 日), 得到 $\Delta t = 5$ 日的各水质水量指标监测过程线。使用方程式(1)、(2)、(3)对各水质水量指标监测过程线进行三种方法的模拟拟合计算, 得到各断

表 1 ϕ_i 、 θ_i

断 面	DO%(mg/l)				COD(mg/l)				ϕ_i
	ϕ_i	θ_i	A	B	ϕ_i	θ_i	A	B	
閘门吊桥	0.30	0.16	0.8502	2.2359	0.06	0.14	0.8059	1.5452	0.21
万年桥	0.27	-0.10	0.8910	2.8573	0.13	-0.32	0.7296	2.3149	0.32
委门桥	0.01	-0.34	0.7037	2.1264	-0.11	-0.27	0.8672	1.0477	0.24
相门桥	0.22	0.04	0.8230	1.3241	0.09	-0.32	0.8421	1.1870	0.19
友谊桥	0.31	-0.28	0.8411	2.3547	0.27	-0.35	0.8610	1.0623	0.35
泰让桥	0.36	-0.29	0.8664	4.3404	-0.15	-0.01	0.7589	1.9372	0.28

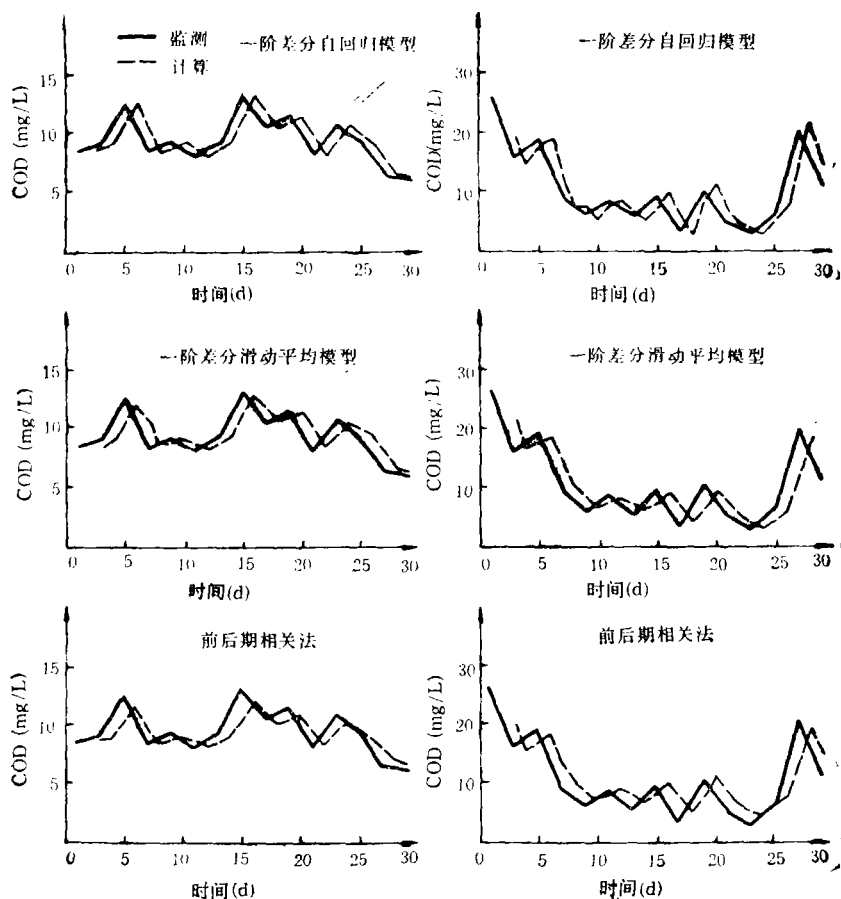


图 5 閘门吊桥 1985 年实测与预测 COD、DO% 过程线比较

面水质水量指标计算系数和常数。1985 年可能黑臭期监测从 4 月 10 日至 8 月 30 日,共监测 29 次,点绘出各水质水量指标过程线,然后按预测方程式 (1)、(2)、(3) 分别计算作为独立检验是否与监测相符合,上述三种方法均以相对误差 $\pm 20\%$ 作为检验合格的标

准。例如閘门吊桥 1985 年 4—8 月实测与预测 COD、DO% 过程线比较如图 5 所示,三种方法监测与预测结果均较相一致。使用 1985 年资料与计算结果进行独立检验比较表明:各断面 $T_w^{\circ}\text{C}$ 和 COD 都达到 100% 合格要求, $\text{NH}_3\text{-N}$ 合格率次之,而变幅比

A 和 B 汇总表

NH ₃ -N(mg/l)			Tw(°C)				Q(m ³ /s)			
θ_1	A	B	ϕ_1	θ_1	A	B	ϕ_1	θ_1	A	B
-0.17	0.8346	0.1218	0.26	0.14	0.8647	3.7031	0.61	0.20	0.9079	0.8346
0.18	0.5154	0.3200	0.33	-0.35	0.8346	4.5466				
-0.35	0.8361	0.2292	0.32	-0.45	0.8485	4.1603	0.01	-0.14	0.4965	4.1357
-0.29	0.7182	0.4599	0.32	-0.22	0.8604	3.8750				
-0.36	0.7557	0.4775	0.14	0.27	0.8507	4.0929				
-0.48	0.7972	0.1080	0.20	-0.17	0.8592	3.8624	-0.62	0.55	0.5226	15.6436

较大的 DO% 和 Q 只有 60% 左右合格率,说明资料不足或者方法本身使用是否存在局限性,需要进一步研究。

计算比较检验,计算的嗅阈值相关系数和合格率都较低。因此,用 OTC 来表征臭度的方法目前尚欠成熟供作预测之用。

七、黑臭警报模型中黑度综合指标

公式检验结果

1985 年黑度 BI 的预测值与监测值比较,有 80% 达到误差合格率标准。表 2 表示阊门吊桥断面 BI 监测与计算值结果比较,说明方法本身还可以用,而测定黑度的实验室分析方法尚需进一步改进。至于 1984 年监测资料用多元非线性逐步回归计算建立的嗅阈值 OTC 综合指标公式,经 1985 年监测与

八、结 语

本文用测定水体中 BOD₅ 与 COD (Mn) 的比值判定作为苏州水网黑臭警报模型,提出了适用于以有机污染为主的缓流和滞流水体中测定水体黑度的实验室分析法,采用鲍克斯-詹金斯预测模型和前后期相关法,可以连续警报黑臭和预测非黑臭的各水质指标及流量过程线,三种方法均具有推广使用的价值。对多元非线性逐步回归计算可建立黑度

表 2 1985 年阊门吊桥黑度 BI 监测与各预测模型计算值结果比较

实测	预测 1 按式(1)	相对误差(%)	预测 2 按式(2)	相对误差(%)	预测 3 按式(3)	相对误差(%)
32.20	34.60	7.46	33.52	4.09	34.17	6.12
39.50	35.65	9.74	36.07	8.68	36.29	8.13
47.30	39.86	15.72	37.99	19.69	38.50	18.61
62.80	46.95	25.24	45.48	27.57	44.51	29.13
32.90	46.14	40.24	47.02	42.92	44.98	36.71
44.20	47.58	7.66	46.58	5.39	45.07	1.96
49.20	45.15	8.22	46.43	5.63	44.42	9.71
53.10	49.66	6.48	47.14	11.22	45.79	13.76
50.50	45.45	9.99	47.93	5.09	45.23	10.44
41.20	47.28	14.76	45.44	10.29	44.38	7.72
52.70	54.93	4.22	53.22	0.99	49.81	5.48
48.50	50.25	3.61	52.29	7.81	48.35	0.32
44.90	37.42	16.66	40.16	10.56	38.94	13.28
34.70	38.41	10.69	36.88	6.28	37.34	7.62

(下转第94页)

的。虽然同一类型的病毒感染而引起广泛的临床综合症中的任何一种表现,但不同的病毒也可引起这种症状和相同的综合症。(3)人们往往低估了现尚未发现会引起流行或严重疾病的某种病毒和人体健康的关系。(4)许多因素会影响目前的检测系统,检测敏感性和检测技术所能发现的一系列病毒。(5)从大量样品中收集少量病毒有技术和经济上的困难,虽然有许多有效方法可采用。但没有一个单独方法能用于发现存在于各种环境样品中的各类病毒。

四、自然界的病毒传播到人的途径

病毒不具备运动器官,本身不能移动,因而病毒由一个寄主传到另一寄主,由自然界传播到人完全以一种被动的方式进行。下图是自然界的病毒通过不同途径感染人的示意图。

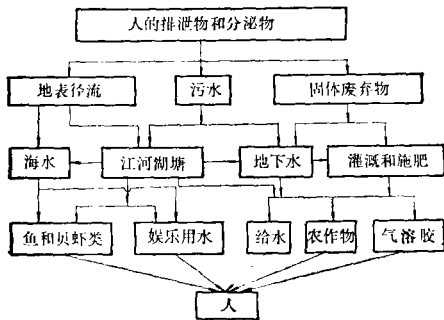


图1 病毒感染人的途径示意图

从上图可见,在人类的生产与生活过程中,无时无刻不与各种环境接触,因此存在于环境中的病毒感染人的途径是多种多样的,感染机会也是很多的。这样人类即使接触少量病毒也要比目前我们所认识的要危险得多。所以,环境的病毒污染的潜在危害对人类威胁很大。

参 考 文 献

- [1] Fattal, B., et al., *Water Res.*, **11**, 393(1977).

(上接第7页)

综合指标公式,仅做了初步尝试,只适用于苏州外城河。为了深入了解水体发生黑臭的内因,需要开展对于水体底泥的测定和黑臭机理的探讨,才有可能真正找到反映水体黑度的定量指标。

- [2] Melnick, J. L., et al., *Bull. WHO*, **56**(4), 499 (1978).
- [3] Feachem, R., et al., *Tropical Disease of Bulletin*, **78**(3), 185 (1981).
- [4] Block, J. C., et al., *Tech. Sci. Munic. — L'eau*, **73**, 181 (1978).
- [5] Vilagines, P., et al., *Bull. Acad. Natl. Med.*, **163**, 668 (1979).
- [6] 张楚瑜等, *中国环境科学*, **3**(4), 55(1983).
- [7] Keswick, B. H., et al., *Environmental Science and Technology*, **14**(11), 1290 (1980).
- [8] Wellings, F. M., et al., *Proceedings of the Institute of Food and Agricultural Science*, pp. 202—214, 2nd Annual Wastewater Workshop, May 1973, University of Florida, Gainesville, 1973.
- [9] WHO Scientific Group, *WHO Technical Report Series* 639, pp. 32—54, WHO, Geneva, 1979.
- [10] Rabishko, E. V., *Gigienai Sanitariia*, **4**, 105 (1974).
- [11] 张楚瑜等, *环境科学*, **5**(2), 29(1984).
- [12] Loh, P. C., et al., *Water, Air and Soil Pollution*, **12**, 197 (1979).
- [13] Gerba, C. P., et al., *Journal of the Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers*, **101**, 157 (1975).
- [14] Bitton, G., *Introduction to Environmental Virology*, pp. 273—289, John Wiley & Sons Press, New York, 1980.
- [15] Larkin, E. P., et al., *J. Environ. Eng. Div.*, **102**, 29 (1976).
- [16] Bryan, F. L., *J. Food Protection*, **40**(1), 45 (1977).
- [17] Sullivan, R., et al., *J. Food Sci.*, **35**(5), 624 (1970).
- [18] Cliver, D. O., *Health Lab. Sci.*, **4**, 213 (1967).
- [19] Baylor, E. R., et al., *Science*, **198**, 575 (1977).
- [20] Blanchard, D. C., et al., *Journal de recherches atmosphériques*, **8**, 529 (1974).
- [21] Parker, D. T., et al., *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **49**, 2359 (1977).
- [22] Teltsch, B., et al., *Applied and Environment Microbiology*, **35**, 290 (1978).
- [23] Melnick, J. L., et al., *CRC critical reviews in environment control*, **33**, 385 (1980).
- [24] Wallis, C., et al., *J. Bacteriol.*, **89**, 41 (1965).
- [25] Cliver, D. O., et al., *Water Res.*, **6**, 797 (1972).
- [26] Mosley, J. W., *Transmission of Viruses by the Water Route*, G. Berg, Ed, pp. 5—23, Wiley-Interscience, New York, 1967.

参 考 文 献

- [1] Lazaro, T. R., *Urban Hydrology*, p. 50, Ann Arbor, Science Publishers Inc. (1979).
- [2] L. G. 列奇著(《环境系统工程》翻译组译), *环境系统工程*, 83—84页,水利出版社,1981年。
- [3] 马中汉译夏立云校, *中国环境监测*, **4**, 44—62 (1983).
- [4] 尼克、森姆波勒斯著刘湧康等译, *实用预测方法*, 226—258页,上海科学技术文献出版社,1983年。