作用，因此排序的结果不排除方案的双管齐下、多管齐下.

5. 专家调查除结构组成外，还涉及专家人数的问题. 到底人数为多少，得出的结论是收敛的，也即增加人数结论不变. 这似乎也是值得研究的. 不过可以这样推断，Gallup 抽样曾用 3000 人的意见来代表整个美国人的意见，那么以 63 个具有代表性的专家的意见来反映整个北京市的意见，应该是足够的.

研究的结果还表明，AHP 是一种研究水资源系统的有效方法，用于综合专家与领导的判断以研究水资源大系统是一种有益的尝试，随着水资源供需矛盾的进一步暴露，尚有许多问题需要继续研究.

致谢：本文曾得到李宪法同志的指点，计算机上机过程中得到李达、俞仁源同志的热情帮助，在此一并致谢.

参 考 文 献

[1] Saaty, T. L. Vargas, L. G., The Logic of priorities Application in Business. Energy. Health. Transportation, pp. 13—34, Kluwer, Nijhoff publishing, 1982.
[2] 马成尧等，模糊数学，4(2)，82(1984).
[3] 张启人等，湖南科技大学学报，1(2—3)，53(1985).

（收稿日期：1988 年 4 月 28 日）

废水生物处理的可靠性理论*

李继盛　　井文涌　顾夏声
（城建部城建司）　（清华大学环境工程系）

一、引　言

生物处理是当前国内外处理废水的基本方法. 从技术经济的角度来看，生物处理系统的建设与运行，应当以最少的消耗来实现处理废水的目标. 除此之外生物处理系统的研究、设计和运行还应考虑处理系统的可靠性因素. 但目前由于种种原因，废水处理的可靠性. 问题迄今尚未引起国内应有的重视. 在废水处理的理论研究、工艺设计和运行操作诸方面，可靠性这一重要理论均未取得一席地位. 也许，这是目前国内许多废水处理厂不能达到预期处理效果的一个原因.

由于可靠性问题存在于许多领域中，人们对它进行了大量研究，已形成一门可靠性科学[1]，在废水处理领域，国外也有人做了许多研究工作，取得了许多成果[2-5]. 本文在系统地总结国外研究成果的基础上，提出了适于我国的几种常用工艺的可靠性模型.

二、基 本 概 念

在现代科学技术中，系统的可靠性是指系统在规定条件下和规定期限内正常地实现其功能的性质，一般用概率论术语来表示，即是指系统在规定条件下和规定期限内正常工作的概率[1]. 对于废水生物处理系统，可靠性是指处理系统的出水水质指标满足规定标准的概率. 可用下式表示：

$$\text{可靠性}=1-\text{系统失效的概率} \quad (1)$$

式中：

$$\text{失效}=\text{出水污染物浓度}>\text{规定的出水浓度} \quad (2)$$

* 本文写作得到井文涌副教授、顾夏声教授指导，谨致谢忱.

上式表明，可靠性与出水污染物浓度是密切相关的。为了研究生物处理系统可靠性的定量模型，必须首先建立它的出水浓度的分布模型。此外，还必须确定系统可靠性的最低要求，也就是选取一个合适的失效概率值。通常应用统计经济决策理论的有关方法来解决这个问题[6]。其基本原理是使处理系统的总费用(包括基建投资、运行费用和失效所造成的经济损失)达到最小。

总费用＝最初基建投资＋运行费用
＋失效费用×失效概率 (3)

处理系统的可靠性水平不同，其基建投资、运行费用均有明显差别。

三、出水浓度的分布模型

废水生物处理系统出水污染物浓度的分布可以通过统计分析方法来研究。图 1 和图 2 是某处理厂出水 BOD_5 和 SS 浓度一年数据的矩形分布图。不连续的矩形分布图只是连续的概率密度函数分布图的一种近似。由图可见，比较适于废水处理厂出水浓度分布的概率分布是对数正态分布和 γ 分布。有人对三十七座活性污泥废水处理厂的出水 BOD_5 和 SS 浓度进行拟合良好性检验，看是否遵合对数正态分布，结果是肯定的。这些数据亦能较好地遵守 γ 分布，但比对数正态分布稍差[4]。对十一座生物滤池处理厂进行类似研究，结果基本一致[5]。

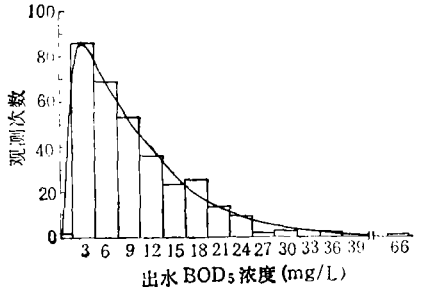

图 1 某处理厂出水 BOD_5 浓度数据的矩形分布与连续分布图

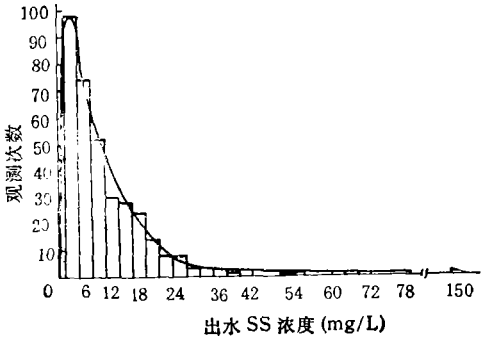

图 2 某处理厂出水 SS 浓度数据的矩形分布与连续分布图

对数正态分布的概率密度函数为：

$$f_x(x)=\frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma_{\ln x}}\cdot\ln\left(\frac{x}{\breve{m}_x}\right)\right]^2\right\}\quad x\geqslant 0 \qquad (4)$$

式中 x 为出水浓度变量，$\sigma_{\ln x}$ 为 x 的自然对数的标准差，$\breve{m}_x$ 为 x 的中位数。

根据正态分布矩母函数的性质，γ 阶原点矩为：

$$E(x^\gamma)=(\breve{m}_x)^\gamma\exp\left(\frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2_{\ln x}\right) \qquad (5)$$

特别地，

$$m_x=\breve{m}_x\exp\left(\frac{1}{2}\sigma^2_{\ln x}\right) \qquad (6)$$

$$\sigma_x^2=m_x^2[\exp(\sigma^2_{\ln x})-1] \qquad (7)$$

式中 m_x 和 σ_x^2 分别是原始数据的平均值和方差。

由式(6)、(7)可求得对数正态分布概率密度函数的参数为：

$$\sigma^2_{\ln x}=\ln\left(\frac{\sigma_x^2}{m_x^2}+1\right) \qquad (8)$$

$$m_{\ln x}=\ln m_x-\frac{1}{2}\sigma^2_{\ln x} \qquad (9)$$

式中 $m_{\ln x}$ 和 $\sigma_{\ln x}$ 分别是 x 的自然对数的平均值和方差。

四、可靠性的数学模型

由于处理系统出水水质是波动变化的，所以设计处理系统时应当使出水浓度的设计平均值低于排放标准。为保证在可靠性要求一定的前提下出水浓度低于排放标准，应当

采用多大的出水浓度值呢？为了解决这个问题，S. Niku 等人根据数理统计的理论和方法，建立了一种定量的可靠性模型，其核心是可靠性系数 COR (Coefficient of Reliability)[4]。

按 S. Niku 等人的观点，在考虑系统可靠性的情况下，系统出水污染物浓度平均值 m_x 与排放标准浓度值 x_s 之间存在着一定的关系，这种关系可以通过可靠性系数 COR 表达出来，如下式：

$$m_x = (\mathrm{COR})x_s \qquad (10)$$

上式表明，在考虑可靠性因素的情况下，出水浓度设计平均值并不是规定的排放标准浓度值。

可靠性系数COR 的计算公式推导如下。

假设处理系统失效的概率 α 介于 0 与 1 之间而接近于 0，欲使所设计的处理系统的对数正态变量 x 满足下列关系：

$$P(x \leqslant x_s) = 1 - \alpha \qquad (11)$$

式中 x_s 为规定的标准浓度值。

式(11)相当于选择对数正态分布的参数使

$$P\left(Z \leqslant \frac{\ln x_s - m_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right) = 1 - \alpha \qquad (12)$$

式中 Z 为标准化正态变量。若使 $Z_{1-\alpha}$ 满足

表 1　标准正态分布的部分数值

$Z_{1-\alpha}$	$1-\alpha$	$Z_{1-\alpha}$	$1-\alpha$	$Z_{1-\alpha}$	$1-\alpha$
3.090	99.9	1.405	92	0.253	60
2.326	99	1.282	90	0	50
2.054	98	0.842	80		
1.645	95	0.525	170		

表 2　各种工艺的可靠性指标

	$1-\alpha$ / m_x/x_s / 工艺类别	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
BOD_5	传统曝气	>0.9999	0.9981	0.9874	0.9625	0.9226	0.8708	0.8106
	阶段曝气	>0.9999	0.9982	0.9881	0.9633	0.9236	0.8729	0.8133
	接触稳定	0.9999	0.9955	0.9778	0.9441	0.8962	0.8389	0.7764
	完全混和	>0.9999	0.9965	0.9826	0.9545	0.9131	0.8621	0.8051
	生物滤池	>0.9999	>0.9999	0.9985	0.9896	0.9641	0.9177	0.8485
SS	传统曝气	>0.9999	0.9995	0.9946	0.9788	0.9474	0.9032	0.8461
	阶段曝气	>0.9999	0.9998	0.9975	0.9878	0.9656	0.9306	0.8810
	接触稳定	0.9996	0.9934	0.9744	0.9430	0.9015	0.8531	0.8023
	完全混和	0.9993	0.9906	0.9686	0.9357	0.8944	0.8485	0.8010
	生物滤池	>0.9999	0.9997	0.9962	0.9817	0.9495	0.8997	0.8340
	$1-\alpha$ / m_x/x_s / 工艺类别	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0
BOD_5	传统曝气	0.7480	0.6844	0.6225	0.5080	0.3669	0.2946	0.2119
	阶段曝气	0.7486	0.6844	0.6217	0.5040	0.3632	0.2912	0.2061
	接触稳定	0.7123	0.6480	0.5910	0.4840	0.3557	0.2877	0.2110
	完全混和	0.7460	0.6915	0.6331	0.5279	0.4001	0.3300	0.2499
	生物滤池	0.7284	0.6722	0.5871	0.4207	0.2358	0.1611	0.0869
SS	传统曝气	0.7823	0.7123	0.6443	0.5160	0.3594	0.2776	0.1894
	阶段曝气	0.8238	0.7580	0.6915	0.5596	0.3936	0.3050	0.2061
	接触稳定	0.7502	0.6985	0.6517	0.5585	0.4443	0.3821	0.3015
	完全混和	0.7530	0.7504	0.6628	0.5793	0.4721	0.4129	0.3372
	生物滤池	0.7517	0.6772	0.5987	0.4522	0.2843	0.2061	0.1271

$$P(Z \leqslant Z_{1-\alpha}) = 1-\alpha \qquad (13)$$

则 $Z_{1-\alpha}$ 可从标准化正态表查得。表 1 给出了部分累积概率 $1-\alpha$ 及其相应的百分位点数值 $Z_{1-\alpha}$。其中数据的意义可从下列例子看出。当 $Z_{1-\alpha}=2.054$，$1-\alpha=0.98$，这是表示 $\ln x$ 的值小于 $\mu_{\ln x}+2.054\sigma_{\ln x}$ 的概率为 98%。

由式(8)、(9)、(12)及(13)可得:

$$\frac{\ln x_i - \left[\ln m_x - \frac{1}{2}\ln(v_x^2+1)\right]}{[\ln(v_x^2+1)]^{\frac{1}{2}}} = Z_{1-\alpha} \qquad (14)$$

由此得:

$$m_x = x_i(v_x^2+1)^{\frac{1}{2}}\exp\{-Z_{1-\alpha}[\ln(v_x^2+1)]^{\frac{1}{2}}\} \qquad (15)$$

由式(10)及式(15)得:

$$COR = (v_x^2+1)^{\frac{1}{2}}\exp\{-Z_{1-\alpha}[\ln(v_x^2+1)]^{\frac{1}{2}}\} \qquad (16)$$

上式即是在给定可靠性水平为 $1-\alpha$ 的前提下，通过废水处理系统出水浓度 x 的变异系数 v_x[7] 计算其可靠性系数 COR 的公式。

五、不同工艺的可靠性

以前的研究[7]表明，各种生物处理工艺的稳定性是有差别的。由此我们考虑，它们的可靠性也应是各不相同的。为此，我们根据文献[4,5]提供的一年运行数据，分别计算了它们的可靠性，列于表 2。

从表 2 可以看出，五种工艺的可靠性均随 m_x/x_i 的取值不同而变化。只有在给定 m_x/x_i 数值的前提下，才能比较不同工艺的可靠性。例如当出水 BOD_5 浓度的 $m_x/x_i=0.5$ 时，五种工艺的可靠性次序为:

生物滤池>阶段曝气>传统曝气
>完全混和>接触稳定

表 3 我国废水生物处理常用工艺的可靠性指标(按 BOD_5 计算)

工艺类别 \ $1-\alpha$ \ m_x/x_i	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
鼓风曝气	>0.9999	>0.9999	0.9990	0.9920	0.9693	0.9251	0.8577
合建式表曝	>0.9999	>0.9999	0.9988	0.9908	0.9671	0.9207	0.8531
分建式表曝	>0.9999	0.9999	0.9978	0.9868	0.9591	0.9099	0.8438
射流曝气	>0.9999	>0.9999	0.9997	0.9963	0.9830	0.9525	0.9015
生物滤池	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9995	0.9932	0.9608
塔式滤池	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9981	0.9864	0.9394
生物转盘	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9999	0.9972	0.9812	0.9319
接触氧化	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9997	0.9959	0.9788	0.9315
氧化塘	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9986	0.9893	0.9591	0.8962

工艺类别 \ $1-\alpha$ \ m_x/x_i	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0
鼓风曝气	0.7734	0.6772	0.5832	0.4090	0.2206	0.1423	0.0722
合建式表曝	0.7704	0.6772	0.5840	0.4168	0.2297	0.1515	0.0793
分建式表曝	0.7642	0.6772	0.5910	0.4325	0.2578	0.1762	0.1003
射流曝气	0.8315	0.7486	0.6554	0.4801	0.2743	0.1814	0.0934
生物滤池	0.8749	0.7291	0.5478	0.2358	0.0409	0.0102	0.0001
塔式滤池	0.8461	0.7088	0.5517	0.2743	0.0681	0.0233	0.0041
生物转盘	0.8365	0.7019	0.5517	0.2877	0.0793	0.0294	0.0060
接触氧化	0.8531	0.7422	0.6197	0.3745	0.1401	0.0668	0.0202
氧化塘	0.8023	0.6879	0.5636	0.3446	0.1379	0.0694	0.0238

而当 $m_x/x_s = 1.0$ 时，则变为：

完全混和＞传统曝气＞阶段曝气

＞接触稳定＞生物滤池

表 2 的结果是根据美国的处理厂数据计算的。我们根据上述可靠性模型和国内部分处理厂的统计数据[7]，计算了我国目前应用较多的九种生物处理工艺的可靠性，列于表 3 和表 4，可供参考。

六、可靠性理论的实用意义

废水生物处理的可靠性理论具有多方面的实用价值。

表 2 可用来比较五种工艺的可靠性。表 3 和表 4 亦然。

表 5 给出了不同的可靠性水平 $(1-\alpha)$ 和不同变异系数 (v_x) 对应的可靠性系数。该表所列的可靠性系数 (COR) 用处理系统的工艺设计和运转操作中可用作确定出水浓度的一种参数。为此，必须首先确定变异系数 v_x 的值。v_x 的选取主要凭经验，也可参考表 2、表 3 和表4。

例：设某处理厂的出水 BOD_5 浓度的变异系数 v_x 取为 0.70。为使出水 BOD_5 浓度值小于或等于规定的排放标准 x_s 的可靠性不低于 95%，在工艺设计(或运转操作)时出水 BOD_5 浓度平均值 m_x 应当选取多大？

解：

由式(10) $m_x = (COR)x_s$　　(10)

由表 5 查得当 $v_x = 0.70$，$1-\alpha = 95\%$ 时，$COR = 0.43$，

所以，$m_x = 0.43x_s$。

若 $x_s = 60mg/L$，则 $m_x = 0.43x_s = 25.9mg/L$，

若 $x_s = 90mg/L$，则 $m_x = 0.43x_s = 38.7mg/L$。

即出水 BOD_5 浓度值应小于或等于 25.9

表 4　我国废水生物处理常用工艺的可靠性指标(按 SS 计算)

工艺类别 \ $1-\alpha$ \ m_x/x_s	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
鼓风曝气	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9995	0.9898
合建式表曝	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9974	0.9762
分建式表曝	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9999	0.9957
射流曝气	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9991	0.9916	0.9641	0.9049
生物滤池	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9995	0.9896
塔式滤池	>0.9999	>0.9999	0.9996	0.9951	0.9773	0.9358	0.8686
生物转盘	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999
接触氧化	>0.9999	>0.9999	0.9996	0.9950	0.9767	0.9340	0.8669
氧化塘	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9996	0.9914

工艺类别 \ $1-\alpha$ \ m_x/x_s	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	2.0
鼓风曝气	0.9306	0.7704	0.5319	0.1423	0.0068	<0.0001	<0.0001
合建式表曝	0.8980	0.7422	0.5398	0.1922	0.0202	0.0034	<0.0001
分建式表曝	0.9525	0.7967	0.5279	0.1075	0.0023	<0.0001	<0.0001
射流曝气	0.8080	0.6915	0.5636	0.3336	0.1251	0.0594	0.0188
生物滤池	0.9295	0.7690	0.5300	0.1415	0.0071	<0.0001	<0.0001
塔式滤池	0.7794	0.6772	0.5754	0.3859	0.1922	0.1151	0.0526
生物转盘	0.9996	0.5418	0.5120	0.0033	<0.0001	<0.0001	<0.0001
接触氧化	0.7780	0.6790	0.5760	0.3890	0.1940	0.1170	0.0537
氧化塘	0.9358	0.7764	0.5419	0.1357	0.0055	<0.0001	<0.0001

表 5　可靠性（$1-\alpha$）、变异系数（v_x）与可靠性系数（COR）的关系

COR / $1-\alpha$ / v_x	50%	80%	90%	92%	95%	98%	99%	99.9%
0.3	1.04	0.81	0.71	0.69	0.64	0.57	0.53	0.42
0.4	1.08	0.78	0.66	0.63	0.57	0.49	0.44	0.33
0.5	1.12	0.75	0.61	0.58	0.51	0.42	0.37	0.26
0.6	1.17	0.73	0.57	0.54	0.47	0.37	0.32	0.21
0.7	1.22	0.72	0.54	0.50	0.43	0.32	0.28	0.17
0.8	1.28	0.71	0.52	0.48	0.40	0.30	0.25	0.15
0.9	1.35	0.70	0.50	0.46	0.38	0.28	0.22	0.12
1.0	1.41	0.70	0.49	0.44	0.36	0.26	0.20	0.11
1.2	1.56	0.70	0.46	0.41	0.33	0.22	0.17	0.08
1.5	1.80	0.72	0.45	0.39	0.30	0.19	0.14	0.06

表 6　出水浓度的 v_x、m_x/x_s 与 $1-\alpha$ 的关系

$1-\alpha$ / m_x/x_s / v_x	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.25	1.5	2.0
0.3	>0.9999	>0.9999	>0.9999	0.9995	0.9939	0.9706	0.9134	0.8179	0.6932	0.5583	0.2698	0.1083	0.0136
0.4	>0.9999	>0.9999	0.9995	0.9950	0.9767	0.9353	0.8681	0.7799	0.6793	0.5763	0.3507	0.1950	0.0542
0.5	>0.9999	>0.9999	0.9973	0.9852	0.9557	0.9062	0.8391	0.7607	0.6770	0.5934	0.4064	0.2669	0.1093
0.6	>0.9999	0.9993	0.9928	0.9732	0.9366	0.8846	0.8212	0.7516	0.6798	0.6092	0.4502	0.3251	0.1660
0.7	>0.9999	0.9979	0.9869	0.9610	0.9212	0.8675	0.8107	0.7483	0.6853	0.6239	0.4850	0.3721	0.2171
0.8	>0.9999	0.9959	0.9805	0.9509	0.9087	0.8594	0.8047	0.7482	0.6920	0.6373	0.5137	0.4110	0.2632
0.9	0.9996	0.9932	0.9743	0.9423	0.9006	0.8527	0.8018	0.7539	0.6992	0.6499	0.5380	0.4439	0.3033
1.0	0.9993	0.9905	0.9686	0.9353	0.8941	0.8485	0.8009	0.7530	0.7065	0.6614	0.5589	0.4718	0.3398
1.2	0.9982	0.9851	0.9597	0.9254	0.8864	0.8445	0.8023	0.7604	0.7201	0.6816	0.5936	0.4828	0.3967
1.5	0.9961	0.9785	0.9507	0.9172	0.8812	0.8446	0.7754	0.7728	0.7389	0.7075	0.5612	0.5675	0.4620

mg/L（当 $x_s = 60$mg/L）或 38.7mg/L（当 $x_s = 90$mg/L）。

表 6 给出了可靠性随变异系数 v_x 和规范化平均值 m_x/x_s（注意 m_x/x_s 在数值上等于 COR）变化的函数关系。表 6 可用来在已知处理厂出水浓度平均值及变异系数的情况下，估计它的可靠性。在这基础上，可以进一步比较不同处理厂的可靠性。例如，若甲厂的平均值 $m_x = 0.6x_s$，变异系数 $v_x = 0.8$，则它的可靠性为 86%；若乙厂的 $m_x = 0.7x_s$，$v_x = 0.9$，则它的可靠性为 80%。显然，两座处理厂相比，甲厂的可靠性比乙厂要好。

将表 6 的数据绘成图形，如图 3。这个图形也有较大的实用价值。除了在已知实际处理厂的实际数据情况下用来评估它的可靠

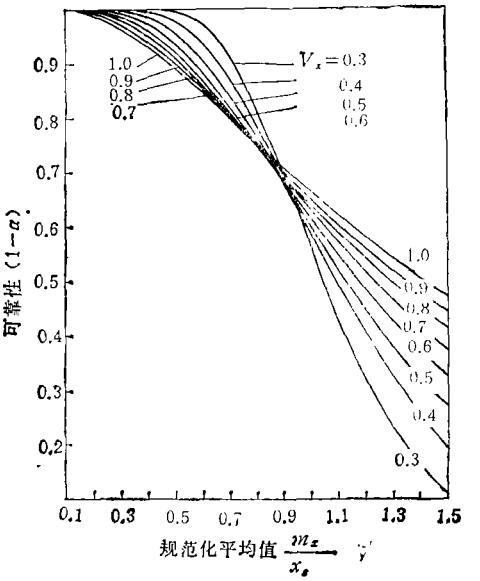

图 3　v_x、m_x/x_s 与 $1-\alpha$ 的关系图

性外，还可在工艺设计过程中用来估算所需的出水浓度平均值.

七、一个重要问题

我们在上一节已经通过一个例子提到，假设规定出水 BOD_5 排放标准 $x_s = 60mg/L$，若要保证处理系统的可靠性$(1-\alpha)$为95%，则处理系统出水 BOD_5 浓度的设计取值 m_x 不应当是规定的 60mg/L，而应当是 25.9mg/L. 这就是说在考虑处理系统可靠性的情况下，出水 BOD_5 浓度比不考虑可靠性时所采用的数值要减小一半以上. 若 $x_s = 90mg/L$，$1-\alpha = 95\%$，则 $m_x = 38.7mg/L$，结论同样成立.

更进一步，我们考虑这种变化对于处理程度的影响. 设进水浓度为 200mg/L，若 $x_s = 60mg/L$，系统的去除率为 70%；若考虑系统的可靠性 $(1-\alpha = 95\%)$，x_s 应按 25.9mg/L 计算，则去除率提高到 87.1%. 这就是说考虑系统可靠性比不考虑可靠性，处理程度提高了近 20%. 若 $x_s = 90mg/L$，则提高幅度更大 (32.7%).

这样看来，处理系统的可靠性不是一个可以忽视的小问题. 是否考虑可靠性，怎样选取可靠性，对于处理程度确定、处理流程选择、构筑物设计以及处理过程的控制等废水处理的几乎所有环节，都将产生十分重要的影响.

不仅如此，处理系统的可靠性标准必须由国家有关管理部门制订和颁行. 在这个意义上说，这是一个管理问题.

因此，废水处理的可靠性问题是一个必须引起重视并予以深入全面研究的重要的技术经济问题. 目前各地正在兴建许多废水处理设施，研究废水处理的可靠性问题，对于保证废水处理投资正常地发挥效益，有效地控制水污染，具有重要的理论意义和实际意义.

参 考 文 献

[1] 王时任，陈继平，可靠性工程概论，第 5 页，华中工学院出版社，1983 年.

[2] Dean, R. B., and Forsythe, S. L., *Water & Sewage Works*, June, pp. 87—89, 1976.

[3] EcKenfelder, W. W., and Roth, J. A., *Progress in Water Technol*, 8, 1(1976).

[4] Niku, S. et al., *JWPCF*, **51**(12), 2841 (1979).

[5] Niku, S. et al., *JWPCF*, **54**(2), 129 (1982).

[6] Benjamin, J. R., et al., *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*, p.456, McGraw-Hill, Inc., New York, 1978.

[7] 李继盛，环境科学情报，4，1(1986).

(收稿日期：1988 年 1 月 18 日)

低等动物的微核试验及其在环境监测中的意义

蔡亚娜　何海晏

(广州师范学院生物系)*

很久以前 Dawson (1933, 1935)[1,2] 就报道过饲养水中含有微量的铅，能使鱼类循环血液中的红血细胞发生损伤. Ostroumova (1957)[3] 报道了在低等脊椎动物中，血球的组成与环境因素有关. Evans 等(1959)[4]是第一个提出用含有微核的细胞来评价细胞遗

* 钱黎明老师协助查阅文献，特致谢意.