

- 页, 92 页, 101 页, 人民卫生出版社, 1984 年.
- [2] 永寿大骨节病科学考察队环境专题组, 环境科学学报, 5(1), 1(1985).
- [3] Anderberg, M. R., Cluster Analysis for Application, Academic Press, New York, 1973.
- [4] Morrison, D. E., Multivariate Statistical Methods, McGraw-Hill, New York, 1967.
- [5] Horst, P., Factor Analysis of Data Matrices, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1965.
- [6] Kaiser, H. F., Psychometrika, 23, 187(1958).
- [7] Green, P. E. et al., Mathematical Tools for Applied Multivariate Analysis, Academic Press, New York, 1976.
- [8] 盛士骏等, 中国环境科学, 2(6), 46(1982).
- [9] 李继云等, 环境科学, 2(5), 18(1981).
- [10] Kowalski, B. R., Chemometrics: Theory and Application, American Chemical Society, Washington, D. C., 1977.
- [11] 闻芝梅等, 中国地方病学杂志, 4(1), 73(1985).
- [12] 王凡等, 中国地方病学杂志 1(1), 35(1982).

用灵敏度分析污水稳定塘设计裕量

许晓鸣 潘南鹏 曹维勤 朱新源 段振渤

(北京市环境保护科学研究所)

迄今为止, 污水稳定塘的各种设计方法都假定所依据的参数和边界条件是稳定不变的. 而在实际情况中, 不论是水质、水量还是环境因素和运行条件, 都有极大的可变性. 为了保证出水水质的相对稳定, 有必要在设计计算结果中加入一定的裕量, 即安全量. 但目前尚无求解污水稳定塘设计裕量的合理方法. 本文分析了主要的变化因素对稳定塘设计结果的影响. 在此基础上, 运用过程系统工程中的灵敏度分析^[1], 提出了求稳定塘设计裕量的方法.

一、影响处理效果的不确定因素及其变化范围

污水稳定塘净化效果受环境因素、运行情况、水质条件等的综合影响. 这些影响有的较为确定, 如温度, 一般已在设计中加以考虑. 有的影响因素却是不确定的. 各种不确定因素从两方面导致设计结果与实际情况相偏离.

1. 引起设计参数的变化. 污水稳定塘最重要的设计参数是 BOD₅ 一级降解速率常数 K 和无量纲扩散系数 d . K 值一般由动态试验得出. 它主要取决于污水的降解性质, 同时还受取得实验数据的试验方法和数据统计

方法的影响. 这当中任一环节的不确定性都能导致 K 值的误差. 故通常设计中所用的 K 值实际上只是一个具有较大变化范围的统计平均值. 其变化范围因系统而异. 对美国 Corinne 市稳定塘运行数据^[2]进行统计, 其结果表明, 当置信度为 0.1 时, K 的置信区间宽度为 ± 0.03 .

d 值综合表征稳定塘内流动与混合情况. 由于设计先于建塘, 故 d 值一般根据经验公式估值. d 值除受估值误差影响外, 还受到稳定塘的几何形状、进出口位置、风的搅动、流量变化等因素的影响. 用 Corinne 市稳定塘实测的数据^[2]分析, 当置信度为 0.1 时, d 的置信区间宽度为 ± 0.356 .

2. 引起设计边界条件的变化. 在实际运行中, 进水水质和水量都是高度可变的. 但根据现场实测数据, 可求得二者的均值置信区间. 水质的变化可影响 K 值, 水量的变化则影响停留时间.

综合以上的分析可知, 不确定因素对处理效果的影响主要体现在对速率常数 K 、扩散系数 d 、进水浓度 c_0 和水量 Q 的影响上. 这些因素的变化范围可取其均值的置信区间宽度.

二、设计裕量的求解

1. 过程方程

设稳定塘系统由 n 个塘串联而成。根据 Thirumurthi 提出的设计方程^[3], 对于第 i 塘, 有

$$c_{ei} = \frac{4a_i e^{1/2d_i} c_{oi}}{(1+a_i)^2 e^{a_i/2d_i} - (1-a_i)^2 e^{-a_i/2d_i}} \quad (1)$$

式中, c_{ei} 为出水 BOD₅ 浓度 (mg/L); c_{oi} 为进水 BOD₅ 浓度 (mg/L); d_i 为无量纲扩散系数。

$$a_i = \sqrt{1 + 4K_i t_i d_i}$$

K 为 BOD₅ 一级降解速率常数 (d^{-1}); t_i 为实际停留时间 (d)。

$$i = 1, 2, \dots, n$$

由于

$$(1+a_i)^2 e^{a_i/2d_i} \gg (1-a_i)^2 e^{-a_i/2d_i}$$

故式 (1) 可简化为^[4]:

$$c_{ei} = \frac{4a_i e^{1/2d_i} c_{oi}}{(1+a_i)^2} \quad (2)$$

根据过程方程式 (2), 即可按下列步骤求设计裕量。

2. 求灵敏度系数

各种不确定因素对第 i 塘出水水质的影响程度, 可用灵敏度系数表示。根据式 (2), 可分别求 c_{ei} 关于 K_i 、 d_i 、 Q_i 、 c_{oi} 的偏导数, 得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial c_{ei}}{\partial K_i} &= \frac{2t_i d_i c_{ei}}{a_i(1+a_i)} \left(\frac{1}{a_i} - 1 - \frac{1+a_i}{2d_i} \right) \\ \frac{\partial c_{ei}}{\partial d_i} &= \frac{c_{ei}}{a_i(1+a_i)} \left(\frac{2K_i t_i}{a_i} - 2K_i t_i \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1+a_i)(2K_i t_i d_i + a_i - a_i^2)}{2d_i^2} \right) \\ \frac{\partial c_{ei}}{\partial Q_i} &= \frac{c_{oi}(1-a_i)}{2Q_i a_i(1+a_i)} \left(\frac{1}{a_i} - 1 \right. \\ &\quad \left. - \frac{1+a_i}{2d_i} \right) \\ \frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}} &= c_{ei}/c_{oi} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} (3)$$

根据上式即可求得各级塘各个灵敏度系数。而 c_{ei} 随停留时间 t_i 的变化率为

$$\frac{\partial c_{ei}}{\partial t_i} = \frac{2K_i d_i c_{ei}}{a_i(1+a_i)} \left(\frac{1}{a_i} - 1 - \frac{1+a_i}{2d_i} \right) \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

3. 求设计裕量

由于串联塘满足 $c_{ei} = c_{oi+1}$, 即上一塘出水为下一塘的进水, 故在各个塘中发生的变化最终会对总的出水 (即第 n 塘出水 c_{en}) 产生影响。设第 i 塘各参数变化分别为 ΔK_i 、 Δd_i 、 Δc_{oi} 、 ΔQ_i 、 Δc_{ei} 、 Δt_i ($i = 1, 2, \dots, n$)。由于各因素的变化, 引起第 i 塘出水水质的变化, 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta c_{ei} &= \frac{\partial c_{ei}}{\partial K_i} \Delta K_i + \frac{\partial c_{ei}}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial c_{ei}}{\partial Q_i} \Delta Q_i \\ &\quad + \frac{\partial c_{ei}}{\partial t_i} \Delta t_i + \frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}} \Delta c_{oi} \quad (5) \end{aligned}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中 $\frac{\partial c_{ei}}{\partial K_i}$ 、 $\frac{\partial c_{ei}}{\partial d_i}$ 、 $\frac{\partial c_{ei}}{\partial Q_i}$ 、 $\frac{\partial c_{ei}}{\partial t_i}$ 、 $\frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}}$ 由式 (3)、式 (4) 解算得出。

由式 (5) 可推知, 最后一塘 (即第 n 塘) 出水水质变化为:

$$\begin{aligned} \Delta c_{en} &= \frac{\partial c_{en}}{\partial K_n} \Delta K_n + \frac{\partial c_{en}}{\partial d_n} \Delta d_n + \frac{\partial c_{en}}{\partial Q_n} \Delta Q_n \\ &\quad + \frac{\partial c_{en}}{\partial t_n} \Delta t_n + \frac{\partial c_{en}}{\partial c_{on}} \Delta c_{on} \quad (6) \end{aligned}$$

由于 $c_{ei} = c_{oi+1}$, $\Delta c_{ei} = \Delta c_{oi+1}$ 。且假设各级流量不变, 即 $Q_i = Q$ 、 $\Delta Q_i = \Delta Q$; 各级塘水中 K 值不变, 即 $K_i = K$ 、 $\Delta K_i = \Delta K$; 各级塘扩散系数的变化范围不变, 即 $\Delta d_i = \Delta d$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。则式 (6) 由式 (5) 递推可得:

$$\begin{aligned} \Delta c_{en} &= \frac{\partial c}{\partial K} \Delta K + \frac{\partial c}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial c}{\partial Q} \Delta Q \\ &\quad + \frac{\partial c}{\partial c_o} \Delta c_o + \frac{\partial c_{en}}{\partial t_n} \Delta t_n \\ &\quad + \frac{\partial c_{en}}{\partial c_{on}} \cdot \frac{\partial c_{cn-1}}{\partial t_{n-1}} \Delta t_{n-1} + \dots \\ &\quad + \frac{\partial c_{en}}{\partial c_{on}} \cdot \frac{\partial c_{cn-1}}{\partial c_{on-1}} \dots \end{aligned}$$

$$\frac{\partial c_{e2}}{\partial c_{o2}} \cdot \frac{\partial c_{e1}}{\partial t_1} \Delta t_1 \quad (7)$$

式中,

$$\frac{\partial c}{\partial K} = \sum_{j=1}^{n-1} \left[\frac{\partial c_{ej}}{\partial K} \prod_{i=j+1}^n \frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}} \right] + \frac{\partial c_{en}}{\partial K}$$

$$\frac{\partial c}{\partial d} = \sum_{j=1}^{n-1} \left[\frac{\partial c_{ej}}{\partial d_j} \prod_{i=j+1}^n \frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}} \right] + \frac{\partial c_{en}}{\partial d_n}$$

$$\frac{\partial c}{\partial Q} = \sum_{j=1}^{n-1} \left[\frac{\partial c_{ej}}{\partial Q} \prod_{i=j+1}^n \frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}} \right] + \frac{\partial c_{en}}{\partial Q}$$

$$\frac{\partial c}{\partial c_0} = \prod_{i=1}^n \frac{\partial c_{ei}}{\partial c_{oi}}$$

式(7)反映了各种因素变化与出水水质变化的联系。为了使系统不灵敏,即当环境条件、进水水质水量发生改变时,稳定塘出水水质仍保持在一定的范围内,就需要在根据式(2)设计的各塘停留时间 t_i 上加入一定的设计裕量 Δt_i ($i = 1, 2, \dots, n$),使最终设计结果为第 i 塘停留时间等于 $t_i + \Delta t_i$,串联稳定塘总停留时间为:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (t_i + \Delta t_i) \quad (8)$$

这样设计的稳定塘系统将具有缓冲能力大,出水稳定的特点。

式(7)中 Δc_{en} 为出水 BOD_5 浓度允许变化范围,一般根据出水用途而定。对出水水质的要求越严格,相应 Δc_{en} 也越小。

若给定 $\Delta c_{enmax} = A$,则求设计裕量 Δt_i ($i = 1, 2, \dots, n$)归结为在线性约束

$$\begin{aligned} \Delta c_{en} &\leq A \\ \Delta t_i &\geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

条件下,求满足

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i \rightarrow \min$$

的各级 Δt_i 的线性规划问题。式(9)中 Δc_{en} 由式(7)规定。

在实际问题中,亦可根据地形,确定在某级或在某几级中加入设计裕量,但需满足式(7)。

三、计算实例

设需处理污水量为 $1000\text{m}^3/\text{d}$ 。采用三塘串联流程。进水 BOD_5 平均浓度为 $150\text{mg}/\text{L}$,变化范围在 $100\text{—}200\text{mg}/\text{L}$ 之间。要求出水 BOD_5 平均为 $10\text{mg}/\text{L}$,最大不超过 $15\text{mg}/\text{L}$ 。根据动态试验结果, $K = 0.3\text{d}^{-1}$, $\Delta K = \pm 0.03\text{d}^{-1}$ 。初步设计结果如表1。其中 d 值由Arceivala公式估得^[5]。

表1 初步设计结果

| 塘号 | 参数 | c_0 (mg/L) | c_e (mg/L) | 扩散系数 d | 停留时间 t (d) |
|----|----|-----------------|-----------------|-------------|--------------------|
| 1 | | 150 | 32 | 0.5 | 7.7 |
| 2 | | 32 | 20 | 0.8 | 1.8 |
| 3 | | 20 | 10 | 0.6 | 2.9 |
| 总计 | | | | | 12.4 |

设根据实际情况分析,并结合试验结果,得各种因素对处理效果不利的变化范围为:

$$\begin{aligned} \Delta K &= -0.03\text{d}^{-1} \\ \Delta Q &= 500\text{m}^3/\text{d} \\ \Delta c_0 &= 50\text{mg}/\text{L} \\ \Delta d &= 0.356 \end{aligned}$$

根据式(3)和表1,可求得各塘中各种因素对出水水质影响的灵敏度系数,如表2。

将表2的数据代入式(7),即可得下面的表达式:

$$\begin{aligned} \Delta c_{e3} &= -71.2\Delta K + 5.34\Delta d + 0.00703\Delta Q \\ &\quad + 0.0656\Delta c_0 - 2.03\Delta t_3 \\ &\quad - 2.25\Delta t_2 - 1.48\Delta t_1 \end{aligned}$$

表2 灵敏度系数表

| 塘号 | 灵敏度 | $\frac{\partial c_e}{\partial K}$ | $\frac{\partial c_e}{\partial d}$ | $\frac{\partial c_e}{\partial Q}$ | $\frac{\partial c_e}{\partial c_0}$ | $\frac{\partial c_e}{\partial t}$ |
|----|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | | -122 | 14.7 | 0.0108 | 0.210 | -4.74 |
| 2 | | -27.0 | 0.0628 | 0.00305 | 0.625 | -4.50 |
| 3 | | -19.6 | 0.719 | 0.00213 | 0.500 | -2.03 |

代入各变化量,并根据式(9)–(10),即

可求得设计裕量 $\Delta t_2 = 2.6d$ 。即需使第二塘停留时间为 $1.6 + 2.8 = 4.4d$ ，使系统总停留时间达到 $12.4 + 2.6 = 15d$ ，才能使出水 BOD₅ 稳定在 10mg/L 左右，最大不超过 15mg/L。

四、小 结

以上讨论了用灵敏度分析方法求污水稳定塘设计裕量的过程。由于充分考虑了几种主要因素的不确定性以及它们对稳定塘处理效果的影响，并通过补充适当的设计裕量来加以补救，可使得设计的串联塘系统运行更为稳定可靠。若稳定塘出水用于养鱼或回用，这种做法尤为必要。

致谢：本文承蒙北京市环保所张忠祥副研究员和清华大学钱易教授指正，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 张能力等, 化工系统工程, 222 页, 化学工业出版社, 北京, 1982 年.
- [2] Reynolds, J. H. et al., Facultative Lagoon Performance, In *Developments in Land Methods of Wastewater Treatment and Utilization*, p. 361. Ed Jenkins, S. H., Pergamon Press, Great Britain, (1979).
- [3] Thirumurthi, D., *J. Water Poll. Control Fed.*, 46, 2094(1974).
- [4] Kilani, J. S. et al., *Water Res.*, 18, 941, (1984).
- [5] Arceivala, S. J., *Wastewater Treatment and Disposal*, p. 577, Marcel Dekker Inc., New York, (1981).

粉尘污染的风洞试验研究

王献孚 刘 琴 汤忠谷

(武汉水运工程学院)

杨 贺 清

(山西省环境保护科学研究所)

一、概 述

露天煤矿开发的实质是剥去岩层取出煤炭。其主要工艺流程是爆破、装卸、破碎、分级、洗选、堆放和搬运。在这些过程中，由于物料(煤或煤矸石)与空气的相对运动，或静止物料堆由于风力作用，使粉尘扬起(此作用称为风蚀扬尘)，对矿区周围环境造成严重污染。特别是物量中小于 $75\mu\text{m}$ 的固体颗粒粉尘会悬浮于大气中，造成矿区周围的大气严重污染，降低大气的环境质量。

在进行露天开采时，长期吸入粉尘很容易引起矽肺病，小于 $10\mu\text{m}$ 的可吸入尘对人体危害更直接。

露天矿大气中过高的粉尘含量使设备零件易受磨损。矿区空气污浊而产生的烟雾又是造成剥离和采矿停产的原因，这将给矿山

企业带来巨大的损失。

粉尘污染是露天煤矿开发前环境质量评价的主要内容之一。鉴于矿区粉尘的重要性，有必要对它在空气中的形成和运动状况作深入的了解。

为了预测贮煤场上煤堆和剥离物煤矸石堆的表面在风力作用下的起尘和扩散、物料装卸作业的起尘和扩散、自卸卡车倾卸物料时的起尘对矿区周围环境造成的污染程度，我们利用环境风洞进行了这方面的试验研究。利用风洞模拟试验来研究露天煤矿的起尘和扩散规律，具有比现场测试更为经济和易于控制的优点。

本课题为国家自然科学基金资助项目。参加本试验工作的还有吴学文、郭如珍、韩久瑞、楼宇娟、陈全友、王坚、俞济清、龚晴、周长城等。