

# 专论与综述

## 煤气化废水的可生化性研究

金承基 刘学洪 曲善慈 石广梅

(哈尔滨建筑工程学院)

**摘要** 本文通过对煤气化废水水质特性和实际废水生物反应器的研究,探讨了废水的复杂性和酚对 COD 的影响。研究表明,废水的可生化性较好,但经脱酚蒸氨后,因酚类物质的去除,COD 的可生化性能大大降低,但仍可进行生化处理。

**关键词** 煤气化废水;可生化性;酚。

随着煤制气工业的发展,煤气化废水因其水量大、水质成分复杂而成为水环境的主要污染源之一。国内外对煤气化废水的无害化处理进行过多方面研究,一般采用先回收高浓度的酚和氨,再进行好氧生物处理。但以褐煤为原料的加压气化废水,生化处理的 COD 去除率通常只有 75—85%,尚有相当一部分有机物难于生物降解。因此,这种废水仅靠生化处理能否达到排放标准尚有疑问。

本文通过对实际的褐煤加压气化废水的调查研究 and 可生化性的处理试验,剖析了煤气化废水的特性并对其生物可降解性进行了评估。

### 一、水量水质特性

#### 1. 水量

煤气化废水的水量 and 水质因煤种和工艺不同而不同。废水包括煤气冷却、净化过程中的冷凝液和副产品加工的分水。这些水主要来源于煤的含水和蒸汽以及少量的反应生成水。不同煤种的气化废水量见表 1。煤的炭化程度越深,废水量越大。

表 1 吨煤气化废水量

| 煤种     | 褐煤        | 烟煤       | 无烟煤      |
|--------|-----------|----------|----------|
| 煤水分(%) | 18.7—35.6 | 2.3—10.5 | 0.9—7.0  |
| 废水量(t) | 0.85—1.10 | 0.7—0.9  | 0.65—0.7 |

鲁奇加压气化是以氧-蒸汽作氧化剂,(其工艺流程示于图 1)由于蒸汽分解率仅有 32—38%,而 1t 煤需 0.85t 蒸汽,仅此一项就占废水量的 75—88%。因此,提高蒸汽分解率以减少蒸汽用量,是降

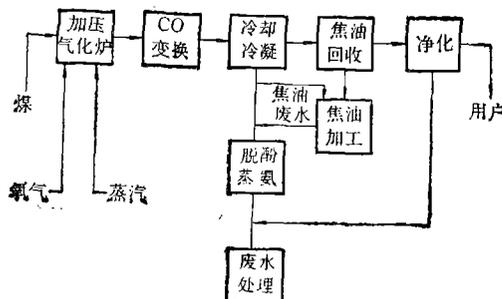


图 1 鲁奇加压气化工艺示意图

低废水量的主要途径,其次是降低煤的含水量。鲁奇气化工艺的废水量构成见表 2。

表 2 煤气化废水构成(%)

| 煤中水份 | 未分解蒸汽冷凝水 | 蒸汽冷凝水 | 生成水 | 焦油分离水 | 煤气净化水 |
|------|----------|-------|-----|-------|-------|
| 21.0 | 53.6     | 13.1  | 7.1 | 2.3   | 2.9   |

#### 2. 水质及其对生化处理的影响

废水水质因煤质和工艺的压力、温度等因素影响而有所不同,但主要组成基本相同。表 3 为鲁奇加压气化废水的水质,除贫煤含酚特别低外,其它项目的浓度相差不多。COD、酚、氰等主要成分含量均较高。因此,一般均采用脱酚蒸氨措施,以回收酚和氨。与焦化废水相比,气化废水的氰化物、硫化物较低,硫化物较高,而碱度则高很多。这是因为加压气化废水的氨和二氧化碳分压相对较高,在煤气冷却过程中,氨和二氧化碳一起溶于水,所以

表 3 不同煤种的气化废水水质 (mg/L)

| 煤种<br>成分         | 沈北<br>褐煤    | 小龙潭<br>褐煤   | 官地<br>煤 | 河北<br>蔚县煤 | 山东<br>黄县煤 | 焦化废水       |
|------------------|-------------|-------------|---------|-----------|-----------|------------|
| COD              | 19000—22000 | 16700—32460 | 22400   | 12000     | 18000     | 2500—10000 |
| 酚                | 3830—4060   | 3000—3960   | 350     | 2650      | 2911      | 400—3000   |
| 氨                | 8000—10600  | 7600        | 3840    | 4100      |           | 1800—6500  |
| CN <sup>-</sup>  | 40—60       | 29—260      | 690     | 20        | 99        | 10—100     |
| SCN <sup>-</sup> |             |             |         |           |           | 100—1500   |
| S <sup>2-</sup>  | 180—317     | 208—460     | 450     | 97        | 106       | 50         |
| 油                | 1047—1400   | 2500        |         |           |           |            |
| 吡啶               | 300—840     | 220—520     | 630     | 236       |           |            |
| 碱度               | 24000       |             |         |           |           | 3800—4300  |

气化废水中百分之九十以上是游离氨<sup>[1]</sup>,易于蒸汽汽提。而焦化废水的碱度比气化废水低一个数量级,游离氨仅占50%左右。因此,蒸氨时必须加碱提高pH,以抵消因氨逸出而释放的酸。

煤中所含的硫在气化过程中生成无机硫化物和有机硫化物。前者主要是硫化氢,约占无机物的90%。后者主要是CS<sub>2</sub>,其次是硫氧化碳、硫茂等,其中有些难于生物氧化。

煤气化废水成分复杂,中科院生态环境研究中心在这种废水中检出173种有机物,其中41%即71种为含氧有机化合物,酚类占了其中的42种。表4为各类化合物的比例。其中酚类化合物数占24.3%,含氮化合物占27.2%,脂肪烃占13.9%。有些含氮或含氧的多环和杂环化合物很难生物降解。在废水中还检出无机元素28种,其中主要是硫、钾、砷、钙等8种,此外还检出阴离子4种,主要是氟、氯和硫酸根。

表 4 煤气化废水中检出的有机化合物

| 项目<br>成分 | 有机化合物数 | 化合物数所占比例(%) |
|----------|--------|-------------|
| 脂肪烃      | 24     | 13.9        |
| 芳香烃      | 14     | 8.1         |
| 多环芳烃     | 12     | 6.9         |
| 含氧化合物    | 72     | 41.0        |
| 其中酚类     | 42     | 24.3        |
| 含氮化合物    | 47     | 27.2        |
| 含硫化合物    | 5      | 2.9         |
| 合计       | 173    | 100.0       |

这些无机元素除某些硫化物,如硫氧化合物不易生物降解外,其它元素浓度不高,对生化处理影响不大。

沈阳煤气化厂用沈北褐煤作原料,废水及其经

脱酚蒸氨后的水质见表5。由于低价酚和挥发氨含量高,脱酚蒸氨后分别去除98.4%和98.9%,COD去除86.9%。与此同时,大部分硫化物、吡啶、氰化物等也被去除。

表 5 沈阳煤气化厂废水水质 (mg/L)

| 项 目              | 原 水   | 脱酚蒸氨后出水 |        |
|------------------|-------|---------|--------|
|                  |       | 含 量     | 去除率(%) |
| COD              | 21500 | 2826    | 86.9   |
| BOD <sub>5</sub> | 10670 | 875     | 91.8   |
| 挥发酚              | 3945  | 65      | 98.4   |
| 固定酚              | 1925  | 954     | 50.4   |
| 挥发氨              | 9320  | 194     | 98.9   |
| 固定氨              | 635   | 621     | 2.2    |
| 硫化物              | 248   | 17.8    | 92.8   |
| 吡啶               | 571   | 37      | 93.5   |
| 氰化物              | 5.0   | 0.2     | 96     |

未经脱酚蒸氨的原水,BOD<sub>5</sub>与COD之比约为0.5,这说明该种废水的可生化性是相当好的。脱酚蒸氨后,挥发酚绝大部分被去除,而这一部分正是比较容易为微生物氧化的。因此,脱酚蒸氨后,BOD<sub>5</sub>与COD之比仅为0.31,生化性能大大降低,但仍然可进行生化处理。其它对生化有害的元素和化合物含量不高,对生化处理的毒害或抑制作用不大。但高浓度氨对生化不利,故生化前必须去除,特别是游离氨,其浓度若高于500—2000mg/L,将对生化处理产生抑制作用<sup>[1]</sup>,对生物硝化脱氮的抑制作用就更大。

### 3. 酚类化合物对 COD 的影响

在煤气化废水中,由COD表征的有机物是相当复杂的,其中最主要的是酚类化合物。表6是几种煤气化废水中挥发酚类在COD中的占有量。表中按1g酚相当于2.38gCOD计。这些废水中酚

表 6 煤气化废水中酚构成的 COD (mg/L)

| 项 目      | 鲁奇炉   | 焦化炉  | Synthane | Hygns | 发生炉  |
|----------|-------|------|----------|-------|------|
| COD      | 21500 | 6250 | 23000    | 4050  | 3900 |
| 酚        | 3945  | 1700 | 4100     | 480   | 1150 |
| 酚相当的 COD | 9389  | 4046 | 9758     | 1142  | 2737 |
| 百分比(%)   | 43.7  | 64.5 | 42.4     | 28.2  | 70.2 |

类成分构成的 COD 占总 COD 的 28.2—70.2%，其中鲁奇加压气化废水，则占 43.7%。这说明酚是 COD 的主要组成。若包括非挥发酚在内，酚类化合物可占总 COD 的 60—70%。所以，酚回收与否与 COD 的浓度密切相关，同时，对生化处理也有重大的影响。

沈阳煤气化厂废水经醋酸丁脂或异丙醚脱酚，蒸汽脱氨后的水质如表 7 所示。表 7 表明，酚的减少仅发生在脱酚工艺中，但蒸氨后 COD 则有较大的降低。显然，脱酚时去除的 COD 大部分是酚，而蒸氨时则主要是其它有机物。

表 7 煤气化废水脱酚、蒸氨后的水质 (mg/L)

| 项目  | 原水     | 脱酚后   |       | 蒸氨后   |       |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|
|     |        | 浓度    | 效率(%) | 浓度    | 效率(%) |
| COD | 21854  | 9118  | 58.3  | 2364  | 89.2  |
| 挥发酚 | 4454   | 130.6 | 97.1  | 122.7 | 97.3  |
| 固定酚 | 1667.6 | 830.4 | 51.8  | 780.6 | 54.4  |

挥发酚既包括一元酚，也包括一些沸点较低的二元酚，如邻苯二酚等。据检测，煤气化废水中一元酚占 45.9%，二元酚及其它能检出的酚占 51.1%。一元酚中苯酚占 38.5%，甲酚占 39.4%，二甲酚占 15.6%，其它一元酚及其取代酚占 6.5%。二元酚中邻苯二酚和甲基苯二酚含量最多，分别占二元酚的 29.4%和 40.3%。按上述比例和化学反应式将表 7 中的挥发酚（包括邻苯二酚）和固定酚折算的

COD 列于表 8 中。

原水中挥发酚占 COD 的 47.7%，固定酚占 15.5%，二者总计占 63.2%。而原水的 COD 为 21854 mg/L，脱酚后去除 12736 mg/L，去除率为 58.3%，这时挥发酚与固定酚的去除率分别为 97.1%和 51.8%。按此去除率计算，酚去除折算的 COD 分别为 10129.5 mg/L 和 1754.5 mg/L，占被去除 COD 的 93.3%。这就是说，在脱酚工艺中，被去除的 COD 中只有 6.7%是酚以外的有机化合物。

蒸氨后，COD 又被去除 6754 mg/L，使总去除率达到 89.2%。而这时被去除的挥发酚和固定酚相当的 COD 值仅为 21 mg/L 和 88 mg/L，只占蒸氨去除的 COD 值的 1.6%。由此可见，蒸氨时去除的 COD 主要是酚以外的有机物。

由上述分析可知，脱酚后挥发酚所剩无几，而固定酚仅去除一半，这就相对增加了生物氧化的难度。下面对此将做进一步的论述。

## 二、煤气化废水的可生化性评估

煤气化废水是相当复杂的，除含氧化合物外，尚有多种含碳、含氮化合物，其中有的很难生物降解，有的虽对微生物没有毒性，但当浓度达到一定限度时，就可能对生物起抑制或毒害作用，而其作用和影响大多尚不清楚。因此，有必要对此种废水做进一步的可生化性评估。

### 1. 有机物降解与耗氧速率

表 8 褐煤加压气化废水中酚占 COD 的百分比

| 项目                         | 挥 发 酚 |      |       |      |      |       | 固 定 酚 |       |         | 合计    |
|----------------------------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|---------|-------|
|                            | 苯酚    | 甲酚   | 二甲酚   | 邻苯二酚 | 其它   | 小计    | 甲基苯二酚 | 其它    | 小计      |       |
| 百分含量(%)                    | 29.5  | 30.1 | 11.90 | 23.5 | 5.0  | 100   | 57.1  | 42.9  | 100     |       |
| 酚量 (mg/L)                  | 1314  | 1340 | 530   | 1047 | 223  | 4454  | 952.2 | 715.4 | 1667.60 | 6122  |
| 需氧量 mgO <sub>2</sub> /mg 酚 | 2.38  | 2.52 | 2.62  | 1.89 | 2.51 |       | 2.07  | 1.98  |         |       |
| 酚相当的 COD                   | 3127  | 3377 | 1389  | 1979 | 560  | 10432 | 1971  | 1416  | 3387    | 13819 |
| 酚占废水 COD 的百分比(%)           | 14.3  | 15.4 | 6.4   | 9.1  | 2.5  | 47.7  | 9.0   | 6.5   | 15.5    | 63.2  |

废水中酚类化合物是主要成分,其降解途径大体上反映了芳香族化合物的氧化过程。

据 P. C. Sager 报道<sup>[2]</sup>,在单一基质培养下,细菌和真菌利用芳香烃作碳源,生成环可断裂的二元酚类。在不同细菌作用下,邻位断裂形成二酚基酸,间位断裂则成醛酸或酮酸。大多数酚类化合物环断裂产物不是进行脂肪酸代谢,就是参与微生物的三羧酸循环。

煤气废水成分复杂,酚的种类很多,细菌也是混合型的。由于不同基质驯化的活性污泥对各种物质的降解能力不同,因而废水的氧吸收情况千差万别。图 2 是实际的褐煤加压气化废水的活性污泥耗氧曲线。I、II、III 分别表示连续处理的三个串联生化反应器。第 I 反应器因基质浓度高而氧化快,耗氧速率为 0.375 mg/min,第 III 反应器因基质浓度低,耗氧速率仅 0.04 mg/min。试验表明,90% 以上的可降解物(主要是酚类),在 I、II 级反应器内被氧化,氧化速率较快,这说明 COD 中酚类所占比重较大。故煤气化废水比较适合生化处理。

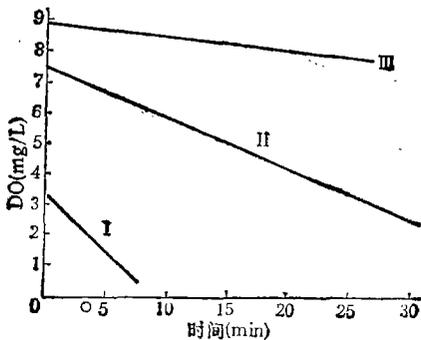


图 2 反应器耗氧曲线

## 2. 可生化性

煤气化废水中 COD 的降解程度随菌种、环境条件和污染物性质而不同。在特定条件下,有一部分 COD 可被生物氧化 ( $COD_B$ ),有一部分是不能降解的 ( $COD_N$ ),包括裹挟的悬浮物中和细菌代谢产生的一部分 COD。因此,用  $COD_N/COD$  来表达不可生物氧化的程度<sup>[3]</sup>;用  $BOD_5/COD_B$  来表达可生物氧化的 COD 的氧化速度,可一定程度地避免生化处理中惯用  $BOD_5$  与 COD 之比来说明可生化性的局限性。上述描述可用下式表示:

$$COD = COD_B + COD_N \quad (1)$$

设  $BOD_5/COD_B = m$ ,  $COD_N/COD = N$ ,

$BOD_5/COD = R$  则 (1) 式可写成:

$$COD = COD_N + BOD_5/m \quad (2)$$

若根据进出水 COD、BOD, 的实测数据建立回归曲线方程,则其斜率的倒数即为  $m$  值,截距为  $COD_N$ 。在特定工艺下, $m$  值只与水质有关,但  $COD_N$  尚与浓度有关。因此,将未脱酚蒸氨与脱酚蒸氨的废水分别回归,得出各自的回归方程 (3) 和 (4)。

$$COD = 254 + \frac{1}{0.62} BOD, \quad (3)$$

$$COD = 418 + \frac{1}{0.34} BOD, \quad (4)$$

上述方程是根据图 3 的 COD 与 BOD, 相关曲线得出的。曲线的相关系数分别为 0.984 和 0.974。按回归方程得出的  $COD_N$ , 其  $N$  值分别为 0.13 和 0.22。表 9 列出了用  $m$ 、 $N$  和  $R$  值评估废水的可生化性时它们各自的数值范围<sup>[1,4]</sup>。

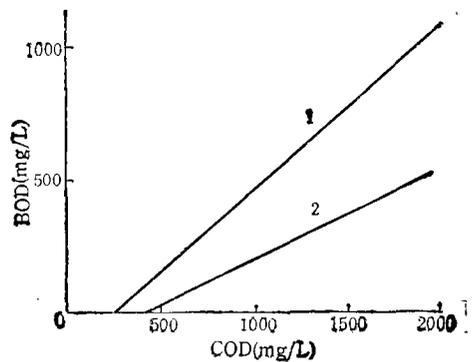


图 3 COD 与 BOD, 相关曲线

1. 未脱酚蒸氨  $COD = 2000 \text{ mg/L}$ 。

2. 脱酚蒸氨,  $COD = 1900 \text{ mg/L}$ 。

从表 9 可以看出,未经脱酚蒸氨的废水其生化性能远比脱酚蒸氨的好,这是因为煤气化废水中酚所占 COD 的比例大,细菌主要是受到了经酚驯化培养的影响。因此,其降解酚的能力强,氧化其它有机物的性能相对较差。所以,只要酚的浓度不太高,生化出水的含酚量就不会超出规定值。

废水的可生化性能也可从另一侧面用生化模式来加以说明。煤气化废水的复杂基质决定了细菌的混杂性,故可采用 Grau 等人研究的模式:

$$\frac{Q(S_0 - S_e)}{VX} = K \frac{S_e}{S_0} \quad (5)$$

式中,  $Q$ ——入流量;

$V$ ——反应器容积;

$S_0$ ——COD 入流浓度;

$S_e$ ——COD 出水浓度;

$X$ ——污泥挥发份浓度;

$K$ ——降解速率常数。

表 9 可生化性评价

| 类 别 | $m$       | $N$   | $R$      | 可生化性    | 备 注              |
|-----|-----------|-------|----------|---------|------------------|
| I   | >0.45     | <0.20 | >0.4     | 好       | COD 去除率 80%以上    |
| II  | 0.35—0.45 | <0.50 | 0.30—0.4 | 尚好      | COD 去除率 70%左右    |
| III | <0.25     | >0.50 | <0.25    | 差(不宜生化) | COD 去除率 60—65%以下 |
| I   | 0.62      | 0.13  | 0.50     | 好       | 未脱酚蒸氨废水          |
| II  | 0.34      | 0.22  | 0.31     | 尚可      | 脱酚蒸氨废水           |

Grau<sup>[3]</sup> 等认为,基质的降解速率

$$G = \frac{Q(S_0 - S_e)}{VX}$$

与浓度成一次方关系,且与进水浓度有关。将未经脱酚蒸氨废水进生化反应器的<sup>1</sup>COD 值绘制于图 4 中,得到降解速率常数  $K = 12.27$ ,则图 4 的曲线可用下式表达:

$$G = 11.18 \frac{S_e}{S_0} - 1.386 \quad (6)$$

当  $G$  为零时  $S_e/S_0 = 0.114$ ,这实际上就是不可生物降解的  $COD_N/COD$  之比 ( $m$ ),在表 9 中该值为 0.13,两值相差不大。

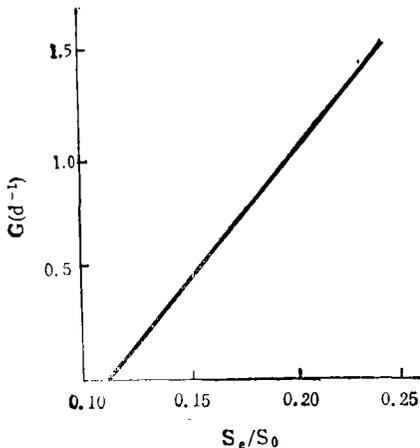


图 4 降解速率与浓度的关系曲线

### 三、结 论

1. 煤气化废水的成分比较恒定,不同工艺与煤质对其影响不大,但废水浓度与工艺过程与煤质有关。

2. 煤气化废水水质复杂,已检出的有机物就达 170 多种。酚类折算的 COD 占 COD 总值的 60% 以上,其中大部分是挥发酚。

3. 脱酚蒸氨不仅可回收酚和氨,同时可去除 80% 以上的 COD,其中绝大部分是比较容易生化的酚类化合物。脱酚蒸氨后,废水的可生化性虽大大降低,但略加稀释仍可进行生化处理。而未经脱酚蒸氨的废水其  $m = 0.62, N = 0.13$ ,说明其生化性能很好。因此,从生化性角度而论,酚不一定非去除不可。

### 参 考 文 献

- [1] Luthy, R. G. Tallon J. T. 著,金承基等译,环境科学情报,12,23(1984).
- [2] Singer P. C. 等,纪础译,环境科学情报 12,12 (1984).
- [3] 肖志成等,环境科学,4(5),75(1983).
- [4] 孙玉修,化工环保,3(1),31(1983).
- [5] 张自杰等,活性污泥生物学与反应动力学,第 292—297、457—460 页,中国环境科学出版社,北京,1989 年。

(收稿日期:1991 年 1 月 17 日)

(上接第 54 页)

基本试验,则可求得所需参数。在废水处理的工艺操作中,可以更好地控制工艺参数,以得到理想的处理效果。

### 参 考 文 献

- [1] Arbuckle, W. B. et al., J. WPCF., 54 (12),

1554(1982).

- [2] Lee, J.S. et al., J. WPCF., 51 (1), 111(1979).
- [3] 美国公共卫生协会等著,宋仁元等译,水和废水标准检验法(第 15 版),第 84 页,中国建筑工业出版社,北京,1985 年。

(收稿日期 1991 年 3 月 18 日)

analysing soil, water, coal, plant samples collected in Shanghai.

**Key Words:** Thorium analysis.

**Basic Theoretical Analysis of Gas-Detector Method Used for the Detection of Atmospheric Pollutants.** Wang Hongdao, Zhao Pingya (Research Laboratory of Environmental Chemistry Dalian Railway Institute), Zhang Junxiang, Zhang Lairong (Dalian Institute of Chemical Physics Chinese Academy of Science): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(6), 1991, pp. 69--71

According to the basic theory of gas-detector, the relationship between the detection sensitivity and related parameters was derived as follows:  $L=C.F\frac{1}{C.A}$ . From the equation, the controlling parameters for the operation of gas-detector can be selected easily. The relationship was experimentally verified using the developed  $H_2S$  detector.

**Key Words:** gas-detector; detection sensitivity.

**Study on Biodegradability of Coal Gasification Waste water.** Jin Chengli, Liu Xuehong, Ou Shanci, Shi Guangmei (Harbin Achi. & Civil Eng. Inst.): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(6), 1991, pp. 72--76

Experimental research on characteristics of waste water resulting from coal gasification and bio-reactor for its treatment was carried out. The research shows that when the ratio of phenol to COD is in the range of 43.7--47.7%, biodegradability of the waste water is high ( $m=0.62, n=0.13$ ). Whereas when phenol is removed and ammonia is stripped, biodegradability of the waste water

becomes much lower ( $m=0.34, n=0.22$ ) due to the removal of phenolic matters, but it is still biodegradable.

**Key Words:** coal-gasification wastewater; biodegradability; phenol.

**Some Problems about Wind Erosion and the Environment.** Lü Yuelai (Northwestern Forestry College): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(5), 1991, pp. 77--78

Soil wind erosion is one of the major environmental problems. This paper reviews the influence of wind erosion on plant growth environment, and the relation between wind erosion and dust storms, and analyses the anthropocentric factors causing the wind erosion. Some proposals are also offered to control soil erosion by wind and water in certain reaches of the Yellow River Basin.

**Key Words:** wind erosion, environment.

**An Approach to the Sensitivity and Errors of the Air Quality Model of Mountainous Region** Tang Shibao, Chen Meifang (Environmental Monitoring Station of Panzhihua, Sichuan): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(5), 1991, pp. 79--83

This paper analyses the relative significance of parameters of the air quality model of mountainous regions and their influence on the output of the model, based on the analysis of sensitivity and the simulation of errors of the model. It is suggested that great attention should be paid to the selection of correct model and reasonable use of parameters, particularly those like intensity of source, wind direction, wind speed, diffusion parameters, correcting factor of topography and the height of source.

**Key Words:** air quality modelling.

(上接第 78 页)

期的观测数据。因此,建立永久性的监测网不仅对土壤风蚀与环境质量的评价而且对土壤风蚀的防治都是非常必要的。

参 考 文 献

[1] 吕悦来,土壤学进展, 18(5),(1990).  
 [2] 朱震达等,中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划,第 18—19 页,中国林业出版社,1981 年.  
 [3] Williams, J. R. et al., *Transactions of the ASAE*, 27(1), 129(1984).  
 [4] Fryrear, D.W., *Transactions of the ASAE*, 18(3), 888(1975).  
 [5] Gillette, D.A., *Transactions of the ASAE*, 20(3), 890(1977).

[6] 中国科学院北京农业生态系统试验站,农业生态环境研究,第 421—486 页,气象出版社,1989 年.  
 [7] 陆鼎煌,北京林业学院学报, (3)19(1982).  
 [8] 赵松乔,中国干旱地区自然地理,第 203—216 页,科学出版社,1985 年.  
 [9] 朱震达等,中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划,第 7—16 页,中国林业出版社,1981 年.  
 [10] Dhir, R. P., 李孝泽译,世界沙漠研究, (3), 32 (1989).  
 [11] Lyles, L. et al., *Transactions of the ASAE*, 24(2), 405(1981).  
 [12] 吕悦来等,中国水土保持, (3), 29(1991).  
 [13] 中国科学院黄土高原综合科学考察队,黄土高原地区综合治理开发研究, 153—162 页,科学出版社,1983 年.

(收稿日期: 1991 年 2 月 20 日)