

· 研究报告 ·

CALRoads模式在上海市典型道路 CO 扩散预测中的应用

李莉, 陈长虹, 黄成, 景启国, 潘汉生, 黄海英
(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 根据上海市市区、郊区典型主干道的气象条件、车流量、车型比例, 以及 CO 小时质量浓度的监测资料, 采用 CALRoads 模式中 CALNE4 和 CAL3QHC 模块, 对郊区主干道和市区典型路口的适用条件分别进行了验证。结果表明, 在稳定的气象条件下, CALNE4 模式在模拟周围相对空旷主干道附近的 CO 质量浓度时, 具有较好的结果, 将 CAL3QHC 模式应用于市区典型交叉口, 可以得到同监测值相对吻合的模拟结果, 但准确性低于郊区。应用 CALRoads 模型对未来城郊典型道路附近 CO 高峰小时质量浓度的发展趋势进行了预测, 并基于情景分析给出了减少交通污染的对策建议。

关键词: CO; 大气扩散; 线源模式; CALRoads 预测; 上海

中图分类号: X169 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2006)04-0007-05

The Application of CALRoads Model into CO Concentration Prediction on Typical Roads in Shanghai

LI Li CHEN Chang-hong HUANG Cheng JING Qi-guo PAN Han-sheng HUANG Hai-ying
(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233 China)

Abstract Two arterial roads in urban and suburban areas of Shanghai were respectively selected to do monitoring based on the meteorological conditions, vehicle flow, vehicle type ratio and CO hourly concentration. The applications of CALNE4 and CAL3QHC modules that were included in CALRoads into a suburban arterial road and urban intersection respectively have been verified with the monitoring data. The results shown that the application of CALNE4 in the suburban arterial road in Shanghai could give a relatively good result. However, the accuracy of CAL3QHC simulation on urban arterial intersections is lower than CALNE4. The CALRoads model was applied in the CO concentration prediction during the rush hour on arterial roads and intersections. Based on the scenario analysis, the strategies on reducing vehicle pollution emissions were given.

Key words CO; Atmosphere dispersion; Line source model; CALRoads Prediction; Shanghai

机动车排气污染已成为城市大气污染的主要来源之一^[1], 机动车尾气污染物通过大气传输, 在传输过程中扩散和稀释, 由交通造成的空气污染具有时间及空间变化^[2]。准确模拟机动车排放污染物在大气中的传输扩散状况, 是进行交通环境研究的主要任务之一。城市机动车排放污染物浓度预测, 是制定机动车排放污染控制对策的基础^[3], 而大气扩散模型是模拟污染物在大气中扩散规律的有效方法。

欧美发达国家自 20 世纪 60 年代以来, 开发了若干大气扩散模式, 其中以高斯线源模式为主。尽管高斯模型具有本身的应用局限性, 但至今尚未建

立一种公认的应用性较好的准确模式, 故此类模型目前仍然在广泛的应用。

美国国家环保局曾对采用各种确定初始扩散参数算法的线源模式进行了对比和验证, 结果发现 CALNE 模式在模拟城市机动车污染扩散时具有最好的效果^[4]。CALNE 模式被美国国家环保局推荐, 且在世界各地应用非常广泛, 此模式在国内也得

收稿日期: 2005-09-01 修订日期: 2006-04-20

基金项目: 上海市城市交通白皮书环保专项规划研究基金资助项目(0503)

作者简介: 李莉(1979-), 女, 山东德州人, 工程师, 硕士, 从事交通环境和区域大气污染传输研究。

到了广泛应用^[5-7]。但是,结合情景分析应用此模式预测未来的污染状况,国内尚未有人做过这方面的研究。现基于在上海市城区、郊区典型道路进行的车流量、气象条件和空气质量调查,以 CO 为例,对该模式的适用性进行验证,并在情景分析基础上,给出未来在近期、中期、远期的 CO 质量浓度预测。

1 CALRoads 模型

CALRoads 是由美国加利福尼亚交通部开发的道路大气扩散模型,其中包括 CALNE4、CAL3QHC 和 CAL3QHCR 3 个模块。CALNE4 是 CALNE 模式系列的最后一个版本,它基于高斯扩散方程,应用混合层的概念描述道路上方污染物的扩散。CALNE 模型原理及核心计算公式在许多文献有所描述^[6-8]。

CALNE4 模型根据交通源排放因子、站点几何坐标和气象条件预测道路附近污染物质量浓度。可以预测的污染物包括 CO、NO₂、惰性气体(如 SF₆)和悬浮颗粒物。模式最多可以计算 20 条路段(即 20 个源)、20 个受点的污染物扩散状况,可预测距离道路 500 m 范围内受点的污染物质量浓度。

CAL3QHC 模型是预测道路交叉口附近机动车污染物排放质量浓度的模式,其中包括 CALNE 线源扩散模式和信号灯交叉口交通排队长度算法。CAL3QHC 模式最多可以模拟 120 条路段、60 个受点的污染物质量浓度。

2 模式检验

2.1 模式参数输入

上海市环境科学研究院于 2005 年 5 月 17 日、18 日在上海市奉贤县南奉公路进行了为期两天的车流量、车型比例、气象条件和 CO 小时质量浓度监

测,监测时段为 6:00—20:00 并与上海市车管所合作,在江苏路—延安西路路口进行了 48 h 的车流量及 CO 小时质量浓度监测。应用 CALNE4 模式、CAL3QHC 模式分别对南奉公路及江苏路、延安西路交叉口 CO 小时质量浓度进行模拟,并根据实际监测数据对模型在城、郊主干道的适用性进行验证。

模型输入参数主要有气象参数(风向、风速、温度、风向标准离差、混合层高度),路段和受点位置、车流量及排放因子数据,其中气象参数选取小时实际监测数据,受点选择与监测点相吻合的位置。由于实际道路上不同小时内车型比例有所不同,故可以根据公式(1),计算道路综合排放因子:

$$TEF = \sum (EF_i \times \delta_i) \quad (1)$$

式中:TEF——车队综合排放因子, g/km;

EF_i——车型 i 的单车排放因子, g/km;

δ_i——车型 i 在车队中的比例。

根据公式(1)进行单车排放因子选择,其中重型车单车排放因子选用了上海市环境科学研究院采用 SEMTECH-D^[9]在实际道路上的测试数据,其他车型根据本地化的 ME 模型^[10]计算得到。各车型单车排放因子见表 1。

表 1 各车型单车排放因子 g/km

| 车型 | 摩托 车 | 轻便 摩托车 | 燃油 助动车 | LPG 助动车 | 轻型 客车 | 轻型 货车 | 大型 客车 | 大型 货车 |
|----------|---------|-----------|-----------|------------|----------|----------|----------|----------|
| 排放 因子 | 15.02 | 14.21 | 14.21 | 6.45 | 12.00 | 12.00 | 33.24 | 43.24 |

2.2 模式检验结果

2.2.1 郊区典型道路适用性检验

南奉公路 CO 小时质量浓度监测值与模拟值关系见图 1。

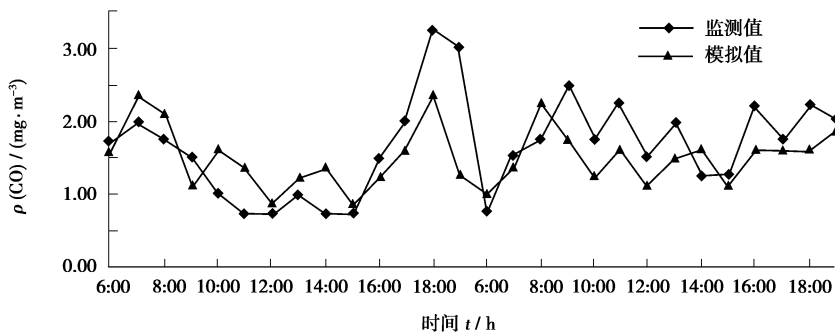


图 1 南奉公路 CO 小时质量浓度监测值与模拟值的比较

南奉公路为东西向郊区主干道,其中机动车道是双向四车道,每车道路宽 3.5 m,自行车及助动车道是双向两车道,每车道 3 m,道路总宽度为 20 m。道路附近较为空旷,5 m 以外存在建筑物,高度约 10 m 以下。监测点位于道路北侧自行车道旁。

在 28 个样本中,误差在 30% 以下的占 82%,其中误差在 10% 以下的占 39%。相关分析表明,CO 小时质量浓度监测值与模拟值相关性在 0.01 的显著性水平上达到了 0.83。误差产生的主要原因:一是车队排放因子确定的误差,该文采用的机动车排放因子仅重型车为实际道路测试数据,与实际排放状况较为吻合,其他车型均来自经过修正的

ME 模式计算结果。因此,该文所选用的排放因子可能同实际道路排放状况存在差异。二是 CALNE4 模式应用条件的局限性。该研究选取的两天气象条件相对较为稳定,大气稳定度较高,风速大部分在 1 m/s 左右。然而当风速低于 0.5 m/s 时,模式对受点污染物质量浓度的计算误差估计会相当大。因此,在位于郊区的主干道、下垫面相对简单、气象条件较为稳定、大气稳定度高、并且风速相对较低的情况下,CALNE4 模式具有较好的适用性。

2.2.2 市区典型道路适用性检验

延安西路和江苏路路口 CO 小时质量浓度监测值与模拟值比较见图 2。

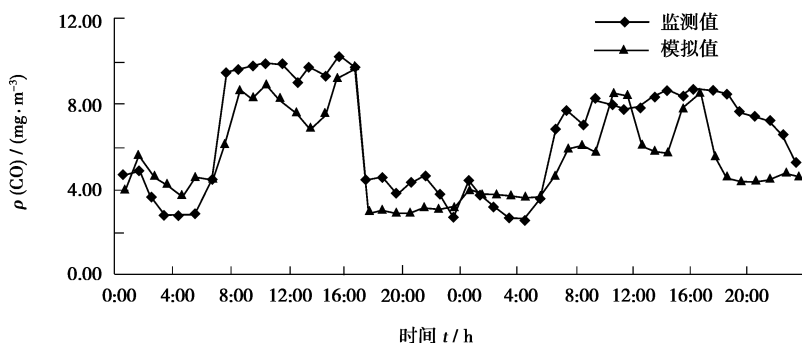


图 2 延安西路和江苏路路口 CO 小时质量浓度监测值与模拟值的比较

延安西路、江苏路分别是上海市区典型主干道,高峰小时车流量在 6 000 辆以上。日均小时车流量为南奉公路的 2 倍。结果表明,江苏路、延安西路路口 CO 小时平均质量浓度为 5.5 mg/m³,是南奉公路的 3.4 倍。在 48 个样本中,模拟结果误差低于 30% 的占 62.5%。分析表明,监测值与模拟值的相关系数在 0.01 显著性水平时达到了 0.83。可见在稳定的气象条件下,CAL3QHC 模式在上海市区典型路口的适用性低于 CALNE4 模式在郊区道路的适用性。然而,对于市区交叉路口污染物质量浓度的模拟,由于没有更好的模式,故 CAL3QHC 仍然具有利用价值。需要注意的是,此模式仅适用于气象条件稳定状态下的扩散模拟。

3 上海市城郊典型道路附近空气质量预测

3.1 情景假设

郊区机动车出行车辆增长趋势见图 3。

由于郊区目前道路状况比较通畅,故根据上海

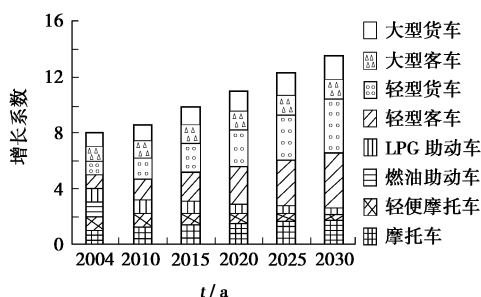


图 3 郊区机动车出行辆增长趋势

市环境科学研究院对车辆出行增长的预测,给出了情景分析的基本假设,即郊区各车型比例的系数增长。根据出行需求,假设随着经济的增长,轻型客车出行量会进一步增大,燃油助动车在 2005 年底全部淘汰,LPG 助动车及摩托车逐步减少甚至淘汰,还包括卡车和公交巴士在内的大型货车、客车在郊区得到一定发展。目前市区车流量基本达到饱和,故对市区道路的模拟,是假设在未来年份中车流量不再增加,保持目前的车流状况。

3.2 情景定义

根据不同的交通环境改善措施设置情景, 分别选择 2004 年、2010 年、2020 年、2030 年作为现状年和近期、中期、远期时间节点, 模拟不同措施下高峰小时道路附近空气质量的发展趋势, 见表 2。

表 2 情景定义

| 名称 | 定义 | 说明 |
|---------|------------|---|
| BAU | 基础情景 | 2003 年实施欧 II 标准, 2004 年后不实施新的排放标准, 按现行的机动车发展趋势进行 |
| Sce 1 | 加强型 I/M 计划 | 自 2006 年起实施加强型 I/M 计划 |
| Sce 2 | 加强淘汰 | 在 Sce 1 基础上, 到 2005 年底淘汰所有的燃油助动车, 2006 年起加速淘汰各类高龄、高污染车辆 |
| Sce 3 | 清洁燃料替代 | 在 Sce 2 基础上, 分别提高公交巴士和出租车每年购入新车中 CNG、LPG 车辆的比重 |
| Sce 4-1 | 实施欧 III 标准 | 在 Sce 3 基础上, 自 2007 年起各类型车辆实施欧 III 标准 |
| Sce 4-2 | 实施欧 IV 标准 | 在 Sce 4-1 基础上, 到 2010 年进一步实施欧 IV 标准 |

3.3 预测结果

根据以上的车辆出行状况预测, 给出未来车流量预测; 根据不同的情景做出机动车排放系数的预测; 假设气象条件不发生大的变化, 将数据输入 CALRoads 模型进行空气质量模拟。

3.3.1 郊区道路附近空气质量预测结果

在 BAU 和 Sce 4-2 两种情景下, 通过 CALINE4 对南奉公路高峰小时 CO 小时质量浓度进行了预测模拟, 该模拟选择了南奉公路车流量最大的高峰小时 9:00—10:00 并以 2004 年和 2020 年为例。在不同控制情景下, 通过模型计算得到的南奉公路附近 CO 高峰小时质量浓度变化趋势见图 4。

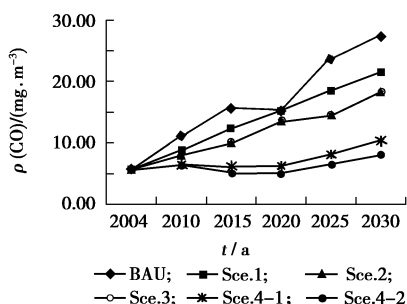


图 4 不同控制情景下南奉公路附近 CO 小时质量浓度变化趋势

图 4 表明, 若不采取措施, 郊区主要道路机动车的发展趋势会随着郊区道路车流量而增大, 单车排放系数也会随着车龄增大而逐步劣化, 致使道路附近 CO 质量浓度显著升高。模拟结果表明, 2004 年南奉公路附近 CO 高峰小时质量浓度为 5.7 mg/m^3 , 2010 年和 2020 年分别为 11.2 mg/m^3 和 15.6 mg/m^3 , 2030 年将达到 27.4 mg/m^3 , 是 GB 3095-1996 《环境空气质量标准》二级标准 (10 mg/m^3) 的 2.74 倍, 污染将变得十分严重。

如果自 2006 年开始实施 I/M 计划, 那么在用车的单车排放将有所下降。在此情景下, 2010 年道路附近 CO 高峰小时质量浓度模拟结果为 8.6 mg/m^3 , 比基础情景削减了 23%; 2015 年为 12.3 mg/m^3 , 2020 年为 15.2 mg/m^3 , 比基础情景削减 21.8%; 2030 年将达到 21.5 mg/m^3 , 与基础情景同比削减 21.5%。

如果在 Sce 1 的基础上加强对高污染车辆的淘汰速度, 并且 2005 年底强制淘汰现有的燃油助动车, 那么 2010 年道路附近 CO 高峰小时质量浓度为 8.1 mg/m^3 , 比基础情景削减 27.8%; 2020 年为 13.6 mg/m^3 , 同比基础情景削减 30%; 2030 年将达到 18.4 mg/m^3 , 同比基础情景削减 32.9%。

如果在 Sce 2 基础上分别提高出租车、公交车中 LPG、CNG 车辆的比重, 在此情景下, 模拟结果表明, 2010 年、2020 年和 2030 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别为 8.0 mg/m^3 、 13.5 mg/m^3 和 18.2 mg/m^3 。

从图 4 还可以看出 Sce 4-1 控制措施下的郊区道路附近污染物发展状况, 即在 Sce 3 基础上, 2007 年将实施欧 III 标准。在此情景下, 2010 年和 2020 年、2025 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别为 6.5 mg/m^3 、 6.1 mg/m^3 和 8.1 mg/m^3 , 而 2030 年将达到 10.2 mg/m^3 。

在 Sce 4-2 控制措施下, 即在 Sce 4-1 基础上, 2010 年将实施欧 IV 标准。在此情景下, 2010 年和 2015 年、2020 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度分别为 6.4 mg/m^3 、 5.1 mg/m^3 和 4.9 mg/m^3 , 2030 年将被控制在 8.2 mg/m^3 。

3.3.2 市区道路附近空气质量预测结果

在 BAU 和 Sce 4-2 两种情景下, 通过 CAL3QH C 对市区延安西路附近 CO 高峰小时质量浓度进行了预测模拟, 该模拟选择路口车流量最大的高峰小时为 9:00—10:00。在不同控制情景下,

道路附近 CO 小时质量浓度对比见图 5。

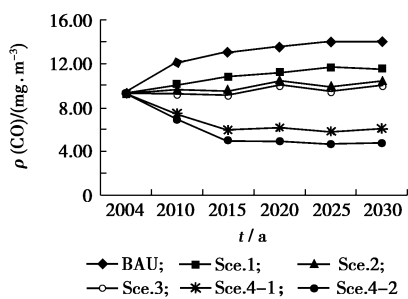


图 5 不同控制情景下 CO 小时质量浓度变化趋势

从图 5 可知,在基础情景下,2010 年、2020 年、2030 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别达到 12.1 mg/m^3 、 13.5 mg/m^3 、 14 mg/m^3 。

如果自 2006 年开始实施 IM 计划,那么 2010 年、2020 年和 2030 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别为 10.0 mg/m^3 、 11.1 mg/m^3 、 11.5 mg/m^3 ,分别比基础情景削减 17% 左右。如果在此基础上加强对高污染车辆的淘汰速度,并且 2005 年底强制淘汰现有的燃油助动车,那么 2010 年、2020 年、2030 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别达到 9.6 mg/m^3 、 10.3 mg/m^3 、 10.3 mg/m^3 ,分别比基础情景削减 20%、23%、26%。

在以上措施的基础上,如果再分别提高出租车、公交车中 LPG 和 CNG 车辆的比重,那么 2010 年、2020 年、2030 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别达到 9.3 mg/m^3 、 10.1 mg/m^3 、 10.0 mg/m^3 ,分别比基础情景削减 24%、25%、28%。

若在 Sce 3 基础上,2007 年实施欧 III 标准,那么 2010 年、2020 年、2030 年的道路附近 CO 高峰小时浓度将分别达到 7.3 mg/m^3 、 6.1 mg/m^3 、 6.0 mg/m^3 ,分别比基础情景削减 40%、55%、57%。

同样,如果 Sce 4-2 是在以上情景的基础上于 2010 年实施欧 IV 标准,那么 2010 年、2020 年、2030 年道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别达到 7.0 mg/m^3 、 4.9 mg/m^3 、 4.7 mg/m^3 ,分别比基础情景削减 42%、64%、66%。

4 结语

(1)通过 CALRoads 模式对上海市市区、郊县主干道实际调查监测的车流量、车型比例、气象条

件和 CO 小时质量浓度数据进行验证,结果表明,在稳定的气象条件下,单一下垫面和周围相对空旷的郊区, CALNE4 对 CO 小时质量浓度的模拟结果误差在 30% 以内的占 82%,具有较高的实用性。CAL3QH C 模型在市区典型路口的准确率小于郊区,其中 62.5% 的模拟结果误差低于 30%。

(2)在郊区车型构成中,以轻摩、助动车和重型车比重较大,车龄比市区高,单车排放较市区恶劣。目前,郊区道路相对比较通畅,车流远比市区小,但是,模拟结果表明,如果不采取控制措施,郊区主要道路机动车的发展趋势,在 2004 年南奉公路附近 CO 高峰小时质量浓度达 5.7 mg/m^3 ,2010 年和 2020 年为 11.3 mg/m^3 和 19.5 mg/m^3 ,2030 年将达到 27.3 mg/m^3 。

(3)目前,市区主要道路车流已趋于饱和,如果不采取控制措施,环境将持续被污染,模拟结果表明,在基础情景下,2010 年、2020 年、2030 年的道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别达到 12.1 mg/m^3 、 13.5 mg/m^3 、 14 mg/m^3 。

(4)情景分析结果表明,采用不同的控制措施,可以强化高污染车辆的淘汰,增加出租车、公交车中 LPG、CNG 车辆的比重,严格新车排放标准,对环境质量改善具有显著作用。如果控制措施得到综合贯彻实施,即在 Sce 4-2 情况下,到 2010 年、2020 年、2030 年,郊区主要道路附近 CO 高峰小时质量浓度将分别约为 6.4 mg/m^3 、 6.1 mg/m^3 、 8.2 mg/m^3 。市区主干道附近 CO 小时质量浓度分别约 7.0 mg/m^3 、 4.9 mg/m^3 、 4.7 mg/m^3 ,将分别比基础情景改善 42%、64%、66%。

[参考文献]

- [1] 刘继明.南京市机动车排气污染控制和管理对策[J].环境监测管理与技术,2004 16(2): 14-17.
- [2] HELMUT M. Air pollution in cities[J]. Atmospheric Environment 1999(33): 4029-4037.
- [3] 王文,于雷,裴文文,等.基于高斯线源模式的主要尾气扩散模型综述[J].交通环保,2004 25(5): 7-10.
- [4] 郝吉明,傅立新.城市机动车排放污染控制——国际经验分析与中国的研究成果[M].北京:中国环境科学出版社,2001.
- [5] 李修刚.基于 GIS 的城市交通大气环境模拟研究[D].江苏:东南大学,1999.
- [6] 郑飞,张镭,阎军.利用 CALNE3 模式模拟汽车尾气污染扩散[J].甘肃环境研究与监测,2002,15(1): 5-22.

(下转第 20 页)

合标液 (BBP 为 20 mg/L, 其他均为 10 mg/L) 与武汉某厂生产车间未经处理的废水样, 其电泳对照图谱见图 1。从图 1 可知, 在 30 min 内, 5 种邻苯二甲酸酯得到了较好的分离, 出峰顺序为 DMP、DEP、DBP、BBP、DEHP, 其中 DBP 出峰时间为 24.9 min, 实际废水样中存在 DBP 吸收峰。

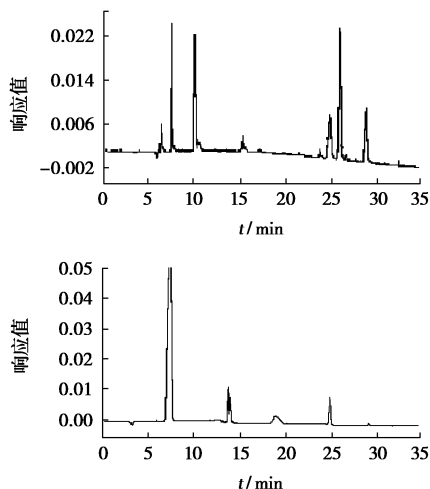


图 1 混合标液 (上) 与实际废水样 (下) 的电泳峰

2.2 有机添加剂的选择

邻苯二甲酸酯类化合物具有疏水性, 需要在缓冲溶液中加入有机添加剂, 以增加样品在缓冲液中的溶解度。经条件试验, 选择有机添加剂甲醇, 其体积分数为 22% 时分离效果最佳。

2.3 峰面积与迁移时间的重现性

胶束电动毛细管色谱法中, 样品挥发性对峰面积重现性的影响较大, 而缓冲液的挥发则影响迁移时间的重现性。试验证明, 因邻苯二甲酸酯沸点较高, 样品挥发对峰面积重现性的影响较小; 但由于缓冲液中有有机添加剂甲醇的挥发性较强, 对迁移时间重现性的影响较大, 需每运行 2 h 左右更换缓冲液。进行 DBP 峰面积与迁移时间重现性试验 ($n=10$), 结果 $RSD_s=2.6\%$, $RSD_t=0.3\%$ 。

2.4 标准曲线与检出限

测定 4 mg/L~50 mg/L DBP 标准溶液系列, 用峰面积回归, 得标准曲线回归方程为 $y=0.1028x+0.0039$, 相关系数 $r=0.9998$, 以信噪比为 3 计, 检出限为 0.64 mg/L。

2.5 加标回收试验

用该方法测定实际废水样, 并进行 10 mg/L DBP 加标回收试验 ($n=3$), 结果见表 1。

表 1 加标回收试验结果

| 样品 | 1 | 2 | 3 |
|------------------------------|------|------|------|
| 测定值 $\rho/(mg \cdot L^{-1})$ | 10.7 | 10.4 | 10.7 |
| 回收率 % | 104 | 105 | 106 |

3 结论

采用胶束毛细管电泳法可快速分离水中 DMP、DEP、DBP、BBP、DEHP 5 种化合物, 直接测定化工废水中 DBP, 方法线性关系良好, 峰面积与迁移时间的重现性较好, 精密度和准确度均符合要求。

[参考文献]

- [1] 胡晓宇, 张克荣, 孙俊红, 等. 中国环境中邻苯二甲酸酯类化合物污染的研究 [J]. 中国卫生检验杂志, 2003, 13(1): 9-14
- [2] 周少奇, 林云琴. 环境激素污染研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2004, 26(1): 25-27
- [3] 牛增元, 房丽萍, 孙健, 等. 气相色谱法同时测定涂料中的苯系物和邻苯二甲酸酯类环境激素 [J]. 分析测试学报, 2004, 23(3): 106-109
- [4] 焦飞, 多克辛, 王玲玲, 等. 河南省主要城市水源水中微量有毒有害有机污染现状调查与研究 [J]. 中国环境监测, 2004, 20(2): 5-9
- [5] 王琳玲, 黄卫红, 邵秀梅, 等. 环境内分泌干扰素分析方法进展 [J]. 分析科学学报, 2003, 19(2): 179-184
- [6] SOGA T, MAZUM IM. Capillary electrophoresis method for the analysis of inorganic anions, organic acids, amino acids, nucleotides, carbohydrate and other anionic compounds [J]. Electrophoresis, 2001, 22(16): 3413-3425
- [9] 陈长虹, 景启国, 王海鲲, 等. 重型机动车实际排放特性与影响因素的实测研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(7): 870-878
- [10] 王海鲲, 陈长虹, 黄成, 等. 应用 ME 模型计算上海市机动车污染物排放 [J]. 环境科学学报, 2006, 26(1): 1-9

本栏目责任编辑 张启萍

(上接第 11 页)

- [7] 李昭阳, 汤洁, 孙平安, 等. 长春市城市道路交通 CO 污染空气分布模拟研究 [J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 78-82
- [8] 陈红梅, 陈崇成, 汪小钦. 应用 CALNE4 模式模拟机动车排气污染的时空分布——以厦门市主干道路为例 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2004, 32(2): 257-260