

33 年来中国铁路运输行业的大气污染物排放

徐雨晴¹, 何吉成^{2*}, 王长科¹

(1. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 2. 交通运输部规划研究院环境资源所, 北京 100028)

摘要: 铁路是中国重要的交通运输方式, 但中国至今尚无铁路运输行业大气污染物排放的报道. 根据中国铁路部门逐年统计数据, 采用基于燃料消耗量的排放因子法, 估算了 1975~2007 年中国铁路机车大气污染物排放量, 并分析了大气污染物排放强度及其变化. 结果表明, 33 年来中国铁路机车烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 排放量逐年降低, 分别由 1975 年的 351.06、39.97、84.60 和 84.53 万 t 降至 2007 年的 7.87、1.14、3.67 和 2.64 万 t, 年均减排量分别为 10.70、1.21、2.53 和 2.56 万 t. 但 NO_x 排放量呈上升趋势, 由 1975 年的 3.48 万 t 增至 2007 年的 9.83 万 t, 年均增加 0.20 万 t. 烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 的排放强度呈现明显的降低趋势, 其值分别由 1975 年的 68.62、7.81、16.54 和 16.52 × 10⁻⁴ kg·(t·km)⁻¹ 降至 2007 年的 0.54、0.08、0.25 和 0.18 × 10⁻⁴ kg·(t·km)⁻¹, NO_x 的排放强度在 0.5~0.8 × 10⁻⁴ kg·(t·km)⁻¹ 范围内波动. 中国铁路运输行业大气污染物排放量占全国总排放量的比重较低, 加上其排放强度还逐年降低, 因此可以说铁路运输是中国交通运输领域中理想的节能减排运输方式.

关键词: 中国铁路; 机车; 大气污染物; 烟尘; SO₂; CO; C_nH_m; NO_x

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1217-07

Air Pollutants Emissions of Locomotives in China Railways in Recent 33 Years

XU Yu-qing¹, HE Ji-cheng², WANG Chang-ke¹

(1. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. Division of Environment and Resources Research, Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China)

Abstract: Although railway has played a great role in transportation in china, there has been no any study on air pollutants emissions of locomotives until now. Based on the annual statistical data collected by the Chinese Railway Statistic Center, using the emission factor method derived from fuel consumption, the air pollutants emissions of locomotives during 1975-2007 were calculated, and their emission intensities and dynamic characteristics were analyzed. The results show that the emissions of soot, SO₂, CO and C_nH_m from steam and diesel locomotives in china decreased from 3510.6 thousand, 399.7 thousand, 846.0 thousand and 845.3 thousand ton in 1975 to 78.7 thousand, 11.4 thousand, 36.7 thousand and 26.4 thousand ton in 2007, indicating a decrease of 107.0 thousand, 12.1 thousand, 25.3 thousand and 25.6 thousand ton per year, respectively. However, the emissions of NO_x showed an increase trend from 34.8 thousand ton in 1975 to 98.3 thousand ton in 2007 with an increase rate of 2.0 thousand ton per year. The emission intensities of soot, SO₂, CO and C_nH_m decreased significantly from 686.2, 78.1, 165.4 and 165.2 g/(hundred converted ton-km) in 1975 to 5.4, 0.8, 2.5 and 1.8 g/(hundred converted ton-km) in 2007, respectively. The emission intensity of NO_x fluctuated in the range of 5.0~8.0 g/(hundred converted ton-km). Air pollutants emissions of locomotives accounted for very little of the total emissions in China, and the emission intensities decreased persistently. It shows that railway transportation is a perfect way of saving energy and reducing emission in the sector of transportation.

Key words: China railways; locomotive; air pollutant; soot; SO₂; CO; C_nH_m; NO_x

交通运输工具会排放多种大气污染物, SO₂ 和 NO_x 等气体是影响大气环境质量的重要污染物, 受到科学家和公众的普遍关注^[1~5]. SO₂ 可对呼吸系统造成伤害, 还可导致硫酸型烟雾^[6,7], NO_x 和 CO 可以引发城市光化学烟雾污染^[8,9]. 在我国交通运输行业的大气污染物排放研究方面, 主要关注城市机动车的排放问题^[10~14], 而对包括火车、飞机、船舶在内的非道路移动源的排放问题研究较少^[15]. 在铁路运输中, 蒸汽机车燃烧原煤、内燃机车耗用柴油均会直接排放 CO、NO_x、SO₂、C_nH_m (碳氢化合物) 和烟尘等大气污染物. 虽然目前已有一些内燃机车气态污染物排放测定工作^[16,17], 但对我国整个铁路运输

行业的大气污染物排放量及排放强度变化的研究工作还未见报道, 30 多年来, 我国铁路运输密度、组织方式、能源消费结构不断变化, 本研究针对我国铁路运输行业的自身特点, 基于我国铁路行业逐年的统计数据来估算大气污染物排放量, 探讨了 30 多年来我国铁路运输行业的大气污染物排放规律及其强度变化, 讨论了铁路运输行业大气污染物排放占全

收稿日期: 2010-05-25; 修订日期: 2010-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40775070); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB955703); 中国气象局 2011 年气候变化专项(CCSF2011-14)

作者简介: 徐雨晴(1977~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为气候变化及生态环境, E-mail: xuyq@cma.gov.cn

* 通讯联系人, E-mail: jichenghe@gmail.com

国排放总量的比重及其变化,以期为估算我国交通行业大气污染物排放清单提供依据。

1 数据来源与计算方法

1.1 数据来源及说明

本研究中 1975 ~ 2005 年的原始数据来自铁路统计部门逐年的《全国铁路统计资料汇编》资料, 2006 ~ 2007 年的数据来自文献[18]。数据内容主要有机车运用指标、机车工作量等统计数据以及每年的货物周转量和旅客周转量。我国铁路机车分为 3 种类型: 蒸汽机车、内燃机车和电力机车。蒸汽机车燃煤、内燃机车燃烧柴油会直接排放 CO 、 NO_x 、 SO_2 、 C_nH_m 和烟尘等大气污染物, 电力机车因使用电力而达到了大气污染物的“零排放”, 所以本研究只考虑蒸汽机车和内燃机车排放量及其强度。

1.2 机车大气污染物排放量计算方法

机车大气污染物排放量的估算采用基于燃料消耗量的排放因子法, 我国铁路的蒸汽机车和内燃机车有多种型号, 但在年度统计上, 只有整个蒸汽机车或内燃机车的燃料消耗总量, 没有对不同型号机车的燃料消耗状况进行分门别类地统计。若要获得不同型号机车的燃料消耗状况和污染物排放水平, 不仅十分困难, 而且意义不大, 采用燃料消耗总量和平均排放因子来定量分析我国铁路机车污染物排放状况更实际一些。同时, 适当的排放因子对获得可靠的估算结果较为重要, 从我国已有的研究工作来看^[15, 19~21], 在分行业和分燃料的污染物排放因子选择上, 铁路行业的排放因子均引用国外 20 世纪 70 年代中期的数据, 事实上我国铁路运输的组织方式、燃料结构与国外相差较大, 因此造成一定的误差和不确定性。在本研究中, 采用我国铁路行业自己通过试验测定获得的排放因子来估算大气污染物排放量将较为合理, 从而可获得较为可靠的估算结果。蒸汽机车的 CO 、 NO_x 、 SO_2 、 C_nH_m 和烟尘年排放量计算公式为:

$$Z_{ij} = \frac{M_i \times K_j}{10^3} \quad (1)$$

式中, Z_{ij} 为蒸汽机车 i 年所排放的 j 种大气污染物数量(万 t), M_i 为蒸汽机车 i 年的原煤消耗量(万 t), K_j 为蒸汽机车 j 种大气污染物的排放因子。烟尘的排放因子采用大连机车厂的试验数据, 为 187 g/kg, CO 、 SO_2 、 NO_x 和 C_nH_m 的排放因子分别为^[22]: 45 g/kg、 $19 \times S$ g/kg、1.5 g/kg 和 45 g/kg, 其中 S 为燃煤的含硫量(%), 有研究表明我国原煤平均含硫量为 1.12%^[19], 因此 S 取 1.12%。

内燃机车的 CO 、 NO_x 、 SO_2 、 C_nH_m 和烟尘年排放量计算公式为:

$$N_{ij} = \frac{Y_i \times W_j}{10^3} \quad (2)$$

式中, N_{ij} 为内燃机车 i 年所排放的 j 种大气污染物数量(万 t), Y_i 为内燃机车 i 年的燃油消耗量(万 t), W_j 为内燃机车 j 种大气污染物的排放因子。内燃机车 CO 、 NO_x 、 SO_2 的排放因子采用蔡惟瑾等^[16]对 3 种内燃机车试验测试的平均值, 其值分别为 7.1 g/kg、50.3 g/kg、2.2 g/kg。内燃机车的烟尘和 C_nH_m 排放因子采用铁道部劳动卫生研究所及铁道机车车辆研究所的试验数据^[22], 其排放因子分别为 15.2 g/kg 和 5.1 g/kg。

我国铁路机车的大气污染物年排放量为蒸汽机车和内燃机车的年排放量之和, 即为:

$$P_{ij} = Z_{ij} + N_{ij} \quad (3)$$

式中, P_{ij} 为我国铁路机车 i 年所排放的 j 种大气污染物数量(万 t), Z_{ij} 和 N_{ij} 的含义见公式(1)和(2)。

1.3 机车大气污染物排放强度的计算方法

在铁路运输统计中, 通常采用换算 $\text{t} \cdot \text{km}$ 作为计量全部周转量的单位(简称: $\text{t} \cdot \text{km}$), 并规定全部周转量(换算 $\text{t} \cdot \text{km}$) = 货物周转量($\text{t} \cdot \text{km}$) + 旅客周转量(人 $\cdot \text{km}$)^[23]。由于铁路燃料消耗统计没有将货运消耗和客运消耗分开进行统计, 针对我国铁路运输行业特点, 本研究设定机车某种大气污染物排放强度为单位全部周转量的排放量, 具体为每万换算 $\text{t} \cdot \text{km}$ 的污染物排放量。根据每年蒸汽机车和内燃机车承担的牵引工作量比例, 估算出这 2 类机车承担的全部周转量, 然后求得我国铁路机车的大气污染物排放强度。

2 我国铁路机车大气污染物排放量及排放强度

2.1 排放量

1975 ~ 2007 年我国铁路机车的烟尘、 SO_2 、 CO 和 C_nH_m 的排放量变化基本相似, 均呈降低态势; 1975 ~ 1984 年的排放量较高, 并呈小幅上下波动, 其中 1984 年的排放量最大, 1985 年以后排放量逐年大幅跌落。具体而言, 烟尘由 1975 年的 351.06 万 t 降至 2007 年的 7.87 万 t, 年均减排量达 10.70 万 t。1975 ~ 1984 年烟尘的年均排放量达 351.88 万 t, 1984 年高达 367.01 万 t; 1985 ~ 2007 年年均降低 16.12 万 t(降幅为 4.4%), 其中 1997 年降至 100 万 t 以下, 2002 年以后降至 10 万 t 以下[图 1(a)]。就 SO_2 来说, 其排放量由 1975 年的 39.97 万 t 降至

2007 年的 1.14 万 t, 年均减排 1.21 万 t. 1975 ~ 1984 年 SO₂ 的年均排放量达 40.1 万 t, 1984 年高达 41.81 万 t; 1985 ~ 2007 年年均降低 1.83 万 t, 其中 1994 年降至 20 万 t 以下, 1999 年以后降至 5 万 t 以下, 2002 ~ 2007 年年均排放量维持在 1.1 万 t 左右[图 1(b)]. 就 CO 而言, 其排放量由 1975 年的 84.60 万 t 降至 2007 年的 3.67 万 t, 年均减排 2.53 万 t. 1975 ~ 1984 年 CO 的年均排放量达 84.90 万 t, 1984 年高达 88.68 万 t; 1985 ~ 2007 年年均降低 3.82 万 t, 其中 1993 年降至 50 万 t 以下, 1999 年以后降至 10 万 t 以下, 2002 ~ 2007 年年均排放量维持在 3.54 万 t 左右[图 1(c)]. C_nH_m 排放量则由 1975 年的 84.53 万 t 降至 2007 年的 2.64 万 t, 年均减排 2.56 万 t. 1975 ~ 1984 年 C_nH_m 的年均排放量达 84.77 万 t, 1984 年高达 88.47 万 t; 1985 ~ 2007 年年均降低 3.85 万 t, 其中 1993 年降至 50 万 t 以下, 1999 年以后降至 10 万 t 以下, 2002 ~ 2007 年年均排放量维持在 2.55 万 t 左右[图 1(e)]. 33 年来, 由于大规模地淘汰能效低、排放强度大的蒸汽机车, 同时大量运用能效高、排放强度相对较低的内燃机车和“零排放”的电力机车, 使得我国铁路运输行业的烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 排放量逐年下降, 也使我国铁路行业在客货运输量不断增大的情形下取得了“运输量增加, 排放量降低”的好成绩, 为减少我国交通运输行业的大气污染物排放做出了贡献.

与烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 这 4 种大气污染物排放量变化不同, 1975 ~ 2007 年我国铁路机车 NO_x 排放量逐年上升, 其值由 1975 年的 3.48 万 t 升至 2007 年的 9.83 万 t, 年均增长量达到 0.20 万 t (增幅为 5.7%). 其中, 1978 年的排放量超过 4 万 t, 1985 年超过 5 万 t, 1987 年超过 6 万 t, 1991 年超过 7 万 t, 1995 年超过 8 万 t, 2004 年超过 9 万 t, 2007 年接近 10 万 t [图 1(d)].

2.2 排放强度

就大气污染物排放强度而言(图 1), 1975 ~ 2007 年我国铁路机车烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 这 4 种污染物的排放强度逐年降低, 变化趋势也基本相似. 烟尘的排放强度由 1975 年的 $68.62 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.54 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 年均降低 $2.13 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 其中 1981 年降至 $50 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 1997 年降至 $10 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 2002 年以后降至 $1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下[图 1(a)]. SO₂ 的排放强度由 1975 年的 $7.81 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$

降至 2007 年的 $0.08 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 年均降低 $0.24 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 其中 1984 年降至 $5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 1997 年以后降至 $1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 2002 ~ 2007 年年均排放强度维持在 $0.08 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 左右[图 1(b)]. 就 CO 而言, 其排放强度由 1975 年的 $16.54 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.25 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 年均降低 $0.51 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 其中 1985 年降至 $10 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 1992 年降至 $5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 1999 年以后降至 $1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 2002 ~ 2007 年年均排放强度在 $0.26 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 左右[图 1(c)]. C_nH_m 排放强度则由 1975 年的 $16.52 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.18 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 年均降低 $0.51 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 其中 1985 年降至 $10 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 1992 年降至 $5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 1999 年以后降至 $1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 以下, 2002 ~ 2007 年年均排放强度只有 $0.19 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 左右[图 1(e)].

1975 ~ 2007 年我国铁路机车 NO_x 的排放强度

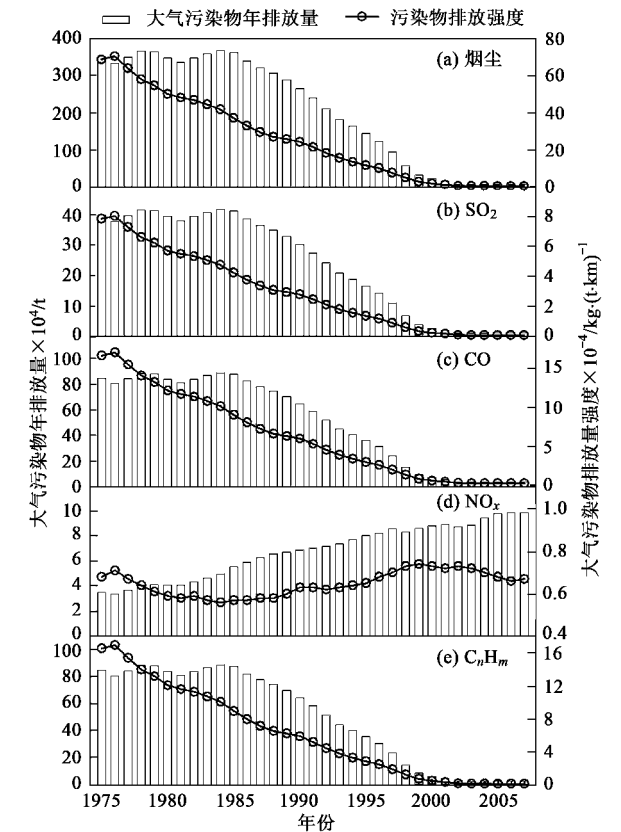


图 1 我国铁路机车的烟尘、SO₂、CO、NO_x 和 C_nH_m 逐年排放量及强度

Fig. 1 Annual soot, SO₂, CO, NO_x and C_nH_m emissions and their intensities of the locomotives in China

在 $0.50 \sim 0.80 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 范围内波动,平均排放强度为 $0.65 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ [图 1(d)]. 1975 ~ 2007 年 NO_x 的排放强度与烟尘、 SO_2 、CO 和 C_nH_m 这 4 种大气污染物变化不同,其变化可分为 3 个阶段: 1975 ~ 1983 年属于下降阶段,其值由 1975 年的 $0.68 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降低到 1983 年的 $0.57 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 年均降低 $0.014 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$; 1984 ~ 1999 年属于缓慢上升阶段,其值由 1984 年的 $0.56 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 升至 1999 年的 $0.74 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, 年均增加 $0.012 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$; 2000 ~ 2007 年属于缓慢下降阶段,其值由 2000 年的 $0.73 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.67 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$.

3 讨论

在我国环境状况逐年统计资料中,大气污染物中只有 SO_2 和烟尘的全国逐年排放量数据较为连续和完整. 根据文献[24 ~ 27]中对我国 1985 ~ 2007 年 SO_2 和烟尘排放量的统计数据,结合本研究的计算结果可看出,我国铁路机车 SO_2 排放量占全国 SO_2 排放量的比重很小: 1985 ~ 2007 年平均比重只有 1.03%,并且还逐年降低,由 1985 年的 3.12% 降至 2007 年的 0.05%, 年均降低 0.14% [图 2(a)]. 就烟尘排放量比重来看[图 2(b)], 1985 ~ 2007 年我国铁路机车烟尘排放量占全国排放量比重也不大,平均为 10.1%, 由 1985 年的 28% 降至 2007 年的 0.8%, 年均降低 1.24%. 其中, 1985 ~ 1990 年平均比重较大,达 23%, 但 1995 年降至 10% 以下, 2002 年降到不足 1%, 综合上述结果可以看出,我国铁路运输行业所排放的 SO_2 和烟尘占全国总排放量的比重较低,加上其排放强度还逐年降低[图 1(a) 和 1(b)], 因此,可以说铁路运输是我国交通运输领域中理想的节能减排运输方式.

据田贺忠等^[28]的研究,1991、1998 和 1999 年我国生物质燃料燃烧排放的 SO_2 分别为 38.1、31.2 和 33.2 万 t, 上述年份我国铁路机车 SO_2 排放量均低于生物质燃烧的排放量, 分别只有前者的 72%、22% 和 12%. 水泥工业是多种大气污染物的重要排放源, 1995 和 2005 年我国水泥工业 SO_2 排放量分别为 46.70 万 t 和 86.09 万 t^[29], 对应年份我国铁路机车 SO_2 排放量分别只有水泥工业排放量的 35.7% 和 1.3%.

我国 NO_x 排放量统计上十分薄弱,直到 2006 年才纳入国家环境统计范围中, 因此全国及行业的

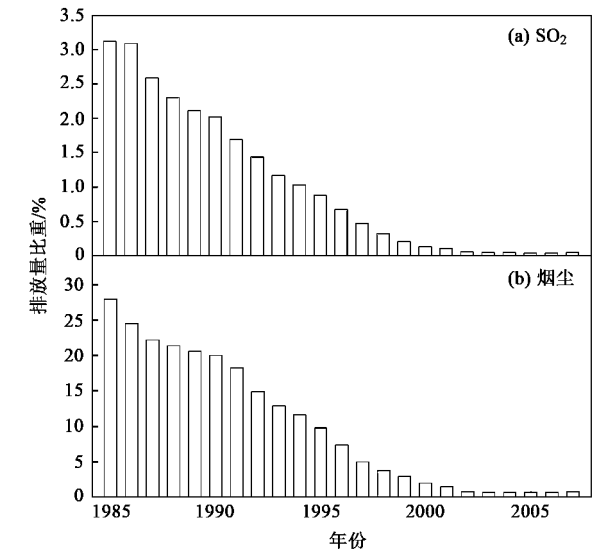


图 2 铁路机车 SO_2 和烟尘排放量占全国排放量的比重

Fig. 2 Percentages of SO_2 and soot emissions of the locomotives to the total emissions in China

NO_x 排放量数据只能在部分研究工作中获得(表 1). 通过比较发现,我国铁路机车 NO_x 年排放量占全国总排放量比重很小, 不到 1% (平均值仅为 0.73%). 1991、1998 和 1999 年我国生物质燃料燃烧排放的 NO_x 分别为 54.9、45.5 和 45.3 万 t^[28], 上述年份我国铁路机车 NO_x 排放量分别只有前者的 13%、18% 和 19%. 1995 和 2005 年我国水泥工业 NO_x 排放量分别为 95.20 万 t 和 286.67 万 t^[29], 对应年份我国铁路机车 NO_x 排放量只有水泥工业的 8% 和 3%. 田贺忠等^[20]研究表明 1997 年我国交通运输行业排放了 130.86 万 t NO_x , 1997 年我国铁路机车共排放了 8.57 万 t NO_x , 只占交通运输行业排放总量的 6.5%.

表 1 铁路机车 NO_x 排放量占全国排放量比重
Table 1 Percentages of NO_x emission of the locomotives to the total emissions in China

年份	全国排放量数据及来源/万 t	全国排放量均值/万 t	占全国排放量比重/%
1980	476 ^[21]	476	0.86
1988	784.9 ^[19]	784.9	0.83
1990	840 ^[20] ; 842.2 ^[19] ; 827.3 ^[30] ; 954 ^[31]	865.9	0.79
1995	1 130 ^[21] ; 1 199.1 ^[31]	1 164.6	0.69
1996	1 203 ^[21]	1 203	0.68
1997	1 167 ^[21]	1 167	0.73
1998	1 118 ^[21]	1 118	0.74
2000	1 371.9 ^[30] ; 1 112.1 ^[32] ; 1 135 ^[33]	1 206.3	0.73
2006	1 524 ^[27]	1 524	0.65
2007	1 643 ^[27]	1 643	0.60

就 CO 而言,Tonooka 等^[34]估计我国 1990 年的 CO 排放量为 8 740 万 t,Streets 等^[31]的估算值为 9 795 万 t,取平均值为 9 268 万 t,Streets 等^[31]估算的我国 1995 年 CO 排放量为 11 267 万 t,王丽涛等^[35]通过 CO 排放清单估算我国 2001 年 CO 排放量为 1.5×10^4 万 t,即我国铁路机车 1990、1995 和 2001 年的 CO 排放量分别只占全国总排放量的 0.7%、0.3% 和 0.04%。1995 年和 2005 年我国水泥工业 CO 排放量分别为 864.33 万 t 和 1 987.97 万 t^[29],对应年份我国铁路机车 CO 排放量只有水泥工业的 4.2% 和 0.2%。Streets 等^[31]认为 1995 年我国交通运输行业排放的 CO 占全国总排量的 22%,为 2 478.7 万 t,按此数估算的话,1995 年我国铁路机车 CO 排放量仅占全国交通运输行业排放量的 1.5%。

在 20 世纪 80 年代中期以后,内燃机车和电力机车逐渐大幅度取代蒸汽机车,90 年代末期至今,进入电力机车取代内燃机车的阶段.由于电力机车使用电力本身不会直接排放大气污染物,即减少了铁路运输行业的大气污染物排放,其减排量可采用替代算法来估算,即采用内燃机车承担电力机车的牵引工作量而直接排放的大气污染物的数量.1975~2007 年,我国铁路电气化率逐步升高,铁路电气化率与蒸汽和内燃机车承担的工作量比例呈线性负相关[图 3(a)],电气化率与污染物减排量之间呈线性正相关关系[图 3],今后几年里随着一批客运专线的建成,我国电气化铁路规模会更高,因此我国铁路运输行业的大气污染物排放量还会不断降低.根据我国中长期铁路网调整规划,到 2020 年我

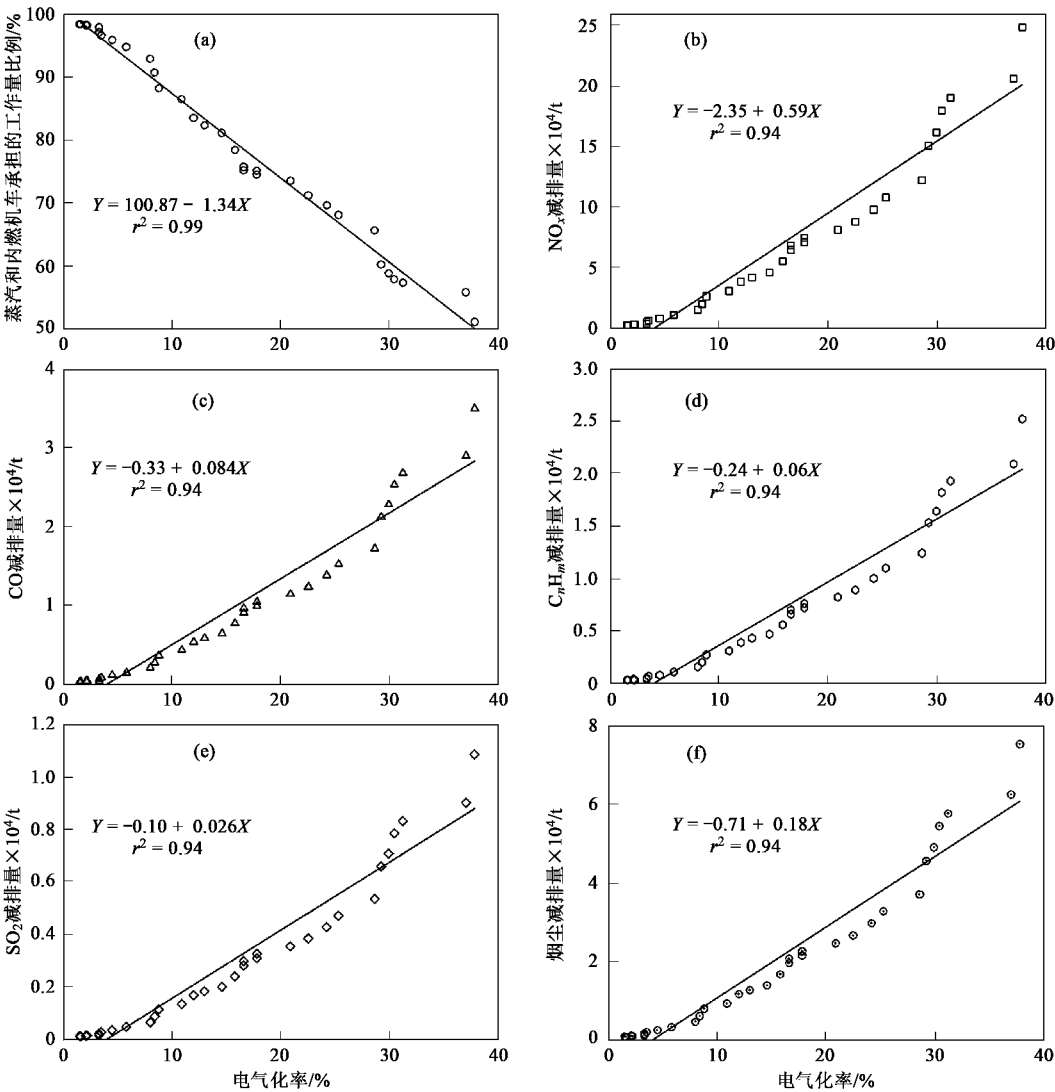


图 3 铁路电气化率与蒸汽和内燃机车承担的工作量比例及污染物减排量间的关系

Fig. 3 Correlations of electrification rate with the traction proportion of steam and diesel locomotives, and with air pollutants emission reduction

国铁路电气化率要达到 60% 以上^[36], 可以推算到 2020 年, 我国铁路运输行业的烟尘、SO₂、CO、NO_x 和 C_nH_m 的排放量将分别减少 10.1、1.46、4.71、33.1 和 3.4 万 t.

为了保障铁路运输的安全, 我国铁路运营组织实行“全国一盘棋”, 通过 18 个铁路局来对运营工作进行管理, 没有分地区或省市进行管理. 张礼俊等^[15]基于客货周转量、我国内燃机车平均燃油消耗量和国外的排放因子, 估算了珠三角地区铁路机车 2006 年 SO₂、NO_x 和 CO 排放量, 其值分别为 759.4 t、2 760.9 t 和 209.7 t, 结合本研究 2006 年的排放量数据可知, 其值占全国的比例分别只有 6.7%、2.8% 和 0.6%. 本研究是对中国铁路运输行业大气污染物排放总体状况的初步核算, 由于我国不同地区铁路的线路条件、列车运行速度、电化率等因素的不同, 导致不同铁路局的燃料消耗和污染物排放也有较大差异, 但限于统计资料的缺乏和多数列车跨局运行的事实, 目前要实现分不同铁路局甚至不同地区或省市来对我国铁路运输行业的污染物排放进行分解还较为困难, 这也是下一步研究的重点.

4 结论

(1) 1975~2007 年, 我国铁路机车的烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 的排放量均呈降低态势. 烟尘由 1975 年的 351.06 万 t 降至 2007 年的 7.87 万 t, 年均减排 10.70 万 t; SO₂ 由 1975 年的 39.97 万 t 降至 2007 年的 1.14 万 t, 年均减排 1.21 万; CO 由 1975 年的 84.60 万 t 降至 2007 年的 3.67 万 t, 年均减排 2.53 万 t; C_nH_m 则由 1975 年的 84.53 万 t 降至 2007 年的 2.64 万 t, 年均减排 2.56 万 t. 但 NO_x 排放量逐年上升, 其值由 1975 年的 3.48 万 t 升至 2007 年的 9.83 万 t, 年均增长 0.20 万 t.

(2) 就大气污染物排放强度来说, 1975~2007 年我国铁路机车烟尘、SO₂、CO 和 C_nH_m 这 4 种污染物的排放强度逐年降低. 烟尘由 1975 年的 $68.62 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.54 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, SO₂ 由 1975 年的 $7.81 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.08 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, CO 由 1975 年的 $16.54 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.25 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, C_nH_m 排放强度则由 1975 年的 $16.52 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 降至 2007 年的 $0.18 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$, NO_x 的排放强度则在 $0.65 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 上下波动.

(3) 我国铁路运输行业所排放的 SO₂、烟尘、NO_x 和 CO 量占全国总排放量的比重很低, 且所占比重还呈降低态势, 与其他行业排放量相比, 我国铁路运输行业所排放的大气污染物质也较小.

参考文献:

- [1] Wang W X, Chai F H, Zhang K, *et al.* Study on ambient air quality in Beijing for the summer 2008 Olympic Games[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2008, **1**(1): 31-36.
- [2] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during 2008 Beijing Olympic Games[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(3): 480-492.
- [3] Sun Y, Wang Y S, Zhang C C. Measurement of the vertical profile of atmospheric SO₂ during the heating period in Beijing on days of high air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(2): 468-472.
- [4] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production[J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(1): 512-518.
- [5] 潘月鹏, 王跃思, 胡波, 等. 北京奥运时段河北香河大气污染观测研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 1-9.
- [6] 吴小玲, 张斌, 艾南山, 等. 基于小波变换的上海市近 10 年 SO₂ 污染指数的变化[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2193-2198.
- [7] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区 SO₂、NO_x、O₃ 和 PM_{2.5} 变化特征的城郊对比分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1059-1065.
- [8] 安俊琳, 李昕, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气 O₃、NO_x 和 CO 浓度变化的观测实验[J]. 环境科学, 2003, **24**(6): 43-47.
- [9] 薛敏, 王跃思, 孙扬, 等. 北京市大气中 CO 的浓度变化监测分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 200-206.
- [10] 邓顺熙, 董小林. 我国山岭公路汽车 CO、HC_x 和 NO_x 排放系数[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 109-112.
- [11] Cai H, Xie S D. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(39): 8963-8979.
- [12] 汪婷, 谢绍东. 北京奥运交通限行前后街道机动车污染的模拟[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 566-572.
- [13] 傅立新, 郝吉明, 何东全, 等. 北京市机动车污染物排放特征[J]. 环境科学, 2000, **21**(3): 68-70.
- [14] 谢绍东, 宋翔宇, 申新华. 应用 COPERT III 模型计算中国机动车排放因子[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 415-419.
- [15] 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 886-891.
- [16] 蔡惟瑾, 赵春亭, 杨玉森. 内燃机车用柴油机排放气态污染物的试验研究[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 1996, **23**(2): 136-138.
- [17] 任富民, 牛牧晨, 周玉松, 等. 铁路内燃机车不同工况下废气排放的影响研究[J]. 铁道学报, 2008, **30**(2): 94-97.
- [18] 铁道部统计中心. 铁路简明统计资料[M]. 北京: 中国铁道

出版社, 2009. 10-35.

[19] 王文兴, 王玮, 张婉华, 等. 我国 SO₂ 和 NO_x 排放强度地理分布和历史趋势[J]. 中国环境科学, 1996, **16**(3): 161-167.

[20] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪. 中国商品能源消耗导致的氮氧化物排放量[J]. 环境科学, 2001, **22**(6): 24-28.

[21] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(6): 493-497.

[22] 铁道部劳动卫生研究所. 陇海线郑州—宝鸡段铁路电气化改造工程环境影响报告书(大气环境影响评价)[R]. 北京: 铁道部劳动卫生研究所, 1988. 3-4.

[23] 佟立本. 铁道概论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008. 225.

[24] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴(1985-1993 年)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986-1994.

[25] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴(1994-2001 年)[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 1995-2002.

[26] 国家环保总局. 中国环境统计年报(2006)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. 1-15.

[27] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年报(2007)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. 3-16.

[28] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国生物质燃烧排放 SO₂、NO_x 量的估算[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 204-208.

[29] 王永红, 薛志刚, 柴发合, 等. 我国水泥工业大气污染物排放量估算[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(2): 207-212.

[30] Aardenne J A, Carmichael G R, Levy H, *et al.* Anthropogenic NO_x emissions in Asian in the period 1990- 2020 [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(4): 633-646.

[31] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(3): 363-374.

[32] 孙庆贺, 陆永琪, 傅立新, 等. 我国氮氧化物排放因子的修正和排放量计算: 2000 年[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, **5**(2): 90-94.

[33] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geographical Research, 2003, **108**(D21): 8809-8831.

[34] Tonooka Y, Kannari A, Higashino H, *et al.* NMVOCs and CO emission inventory in East Asia [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, **130**: 199-204.

[35] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1580-1585.

[36] 李军. 中国铁路新读[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. 75.