

# 中国水路运输业能源消耗与废气排放测算

邢 辉,段树林\*,黄连忠,刘勤安 (大连海事大学轮机工程学院,辽宁 大连 116026)

**摘要:** 采用基于运输周转量的自下而上方法建立了中国水路运输业能源消耗和废气排放测算模型.根据 GDP 增长预测得到未来一段时间内中国内河、沿海和远洋货运周转量,结合 IMO(International Maritime Organization)温室气体研究采用的废气排放因子,测算得到 2001~2030 年中国水路运输业的能源消耗和废气排放.研究表明:2001 年,中国水路运输业燃油消耗量及 NO<sub>x</sub>、CO、NMVOC(非甲烷挥发性有机物)、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 PM 排放量分别为 790.9,63.6,5.9,1.9,2483.2,37.2,4.6 万 t,到 2030 年,将分别为 5951.8,405.1,16.5,18.3,18743.2,15.5,6.1 万 t;2001~2030 年,中国水路运输业燃油消耗及 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放呈逐年增长趋势,年均增长率分别为 7.2%、7.2%和 6.6%;受国际公约的限制,与硫含量密切相关的 SO<sub>2</sub> 和 PM 排放量自 2020 年之后显著下降;2001 年,中国水路运输业 CO<sub>2</sub> 排放量占世界航运排放量的比重在 3.2%左右,此后呈逐渐上升趋势,到 2020 和 2030 年,将分别增长至 11.5%和 15.3%.

**关键词:** 水路运输; 能源消耗; 废气排放; 运输周转量; 中国

**中图分类号:** X51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2016)06-1913-08

**Estimation of energy consumption and exhaust emissions for water-borne transportation sector in China.** XING Hui, DUAN Shu-lin\*, HUANG Lian-zhong, LIU Qin-an (College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China). *China Environmental Science*, 2016,36(6): 1913~1920

**Abstract:** A bottom-up approach based on transport turnovers was employed to establish a model for calculation of energy consumption and exhaust emissions from water-borne transportation sector. Chinese inland, coastal and ocean transport turnovers were obtained based on the relationships of transport turnovers against GDP and the growth prediction of GDP in next years. Combined with emission factors employed by IMO, energy consumption and exhaust emissions of water-borne transportation in China from 2001 to 2030 were estimated. In 2001, fuel consumption and NO<sub>x</sub>, CO, NMVOC, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and PM emissions from water-borne transportation sector in China were 7.909, 0.636, 0.059, 0.019, 24.832, 0.372 and 0.046 million tons respectively; in 2030, fuel consumption and NO<sub>x</sub>, CO, NMVOC, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and PM emissions were 59.518, 4.051, 0.165, 0.183, 187.432, 0.155 and 0.061 million tons respectively; from 2001 to 2030, fuel consumption and CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from water-borne transportation sector in China increased with an average annual growth rate of 7.2%, 7.2% and 6.6% respectively; Due to the restriction of international maritime conventions, SO<sub>2</sub> and PM emissions which are closely related to sulfur content in fuels reduced significantly since 2020; in 2001, CO<sub>2</sub> emissions from water-borne transportation sector in China contributed around 3.2% CO<sub>2</sub> emissions of world shipping, and thereafter gradually upward, in 2020 and 2030, the contribution would grow to 11.5% and 15.3% respectively.

**Key words:** water-borne transportation; energy consumption; exhaust emission; transport turnover; China

水路运输业作为化石燃料消费的重点行业,是全球温室气体和大气污染物排放的重要来源之一<sup>[1]</sup>.根据 IMO 2014 年第 3 次温室气体研究报告<sup>[2]</sup>,2007~2012 年,世界航运(含国际、国内航行船舶和渔业船舶,不含军事用途船舶)年均燃油消耗量为 3.25 亿 t,年均 CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>x</sub> 排放量约占当年全球 CO<sub>2</sub> 和人为源 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 排放总量的 3.1%、15%和 13%.近年来,中国水路运输业持续快速增长.根据交通运输行业发展统计公

报<sup>[3]</sup>,截止 2014 年末,全国拥有水上运输船舶 17.20×10<sup>4</sup>艘;1998~2014 年,中国水路货运量年均增长 11.2%,货运周转量年均增长 10.3%.但目前中国水路运输业的能源消耗和废气排放的现状计算及趋势预测均缺少充分的研究.针对能源消

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 交通运输部科技计划项目(2015328225150);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132016018)

\* 责任作者, 教授, oliverduan@163.com

耗的研究主要着眼于交通运输行业<sup>[4-9]</sup>,而对于具体的水路运输业尤其是中国内河、沿海和远洋运输的能源消耗缺少详细的研究;对于废气排放的研究主要针对国际海运船队 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[10-11]</sup>和区域性船舶废气排放<sup>[12-17]</sup>,而对于水路运输业相关大气污染物排放、中国境内船舶废气排放以及中国内河和沿海运输船队的排放测算也缺少系统的研究.针对中国水路运输业能源消耗和废气排放进行准确的计算和趋势预测,对于交通运输行业通过结构优化、技术进步和强化管理等相关措施实现节能减排具有重要的指导意义.本文根据 IPCC(政府间气候变化专门委员会)温室气体排放量估算方法,针对基于燃油消耗的自上而下方法和基于做功的自下而上方法均存在基础数据缺乏的问题,提出采用基于运输周转量的自下而上方法测算 2001~2014 年中国水路运输业的能源消耗和废气排放;通过建立中国内河、沿海及远洋货运周转量与 GDP 的回归关系,预测得到 2015~2030 年中国水路运输业的能源消耗和废气排放.相关计算方法和结果可为中国交通运输行业节能减排政策措施的制定提供参考.

## 1 研究方法

### 1.1 计算模型

参照 IPCC 温室气体排放量估算方法<sup>[18]</sup>,船舶废气排放量计算公式可表达为

$$E_k = \sum(\text{FC}_a \cdot \text{EF}_{ak} \cdot 10^{-3}) \quad (1)$$

式中: $E$  为排放量,t; $\text{FC}$  为燃油消耗量,t; $\text{EF}$  为废气排放因子,kg/t 燃料; $a$  为燃油类型编号; $k$  为废气成分编号.

### 1.2 模型参数

**1.2.1 燃油消耗量(FC)** 对于式(1)中的燃油消耗量,一般采用自上而下或自下而上两种方法进行测算<sup>[19-20]</sup>.自上而下方法是根据船用燃油供应商的销售数据统计得到燃油消耗量,其准确性取决于是否能准确收集到一年当中中国水路运输业消耗的各类型燃油量,考虑的因素较少,计算模型简单.但中国目前还没有一套完整的各类型水路运输船队燃油消耗量监测系统,船舶燃油消耗量的统计还存在诸多困难;另外,国外学者的研究

表明自上而下方法的测算结果存在较大误差<sup>[2,21-24]</sup>,因此国家或地区性船舶废气排放测算均摒弃了该方法.

基于做功的自下而上方法是根据各艘船舶的活动强度来推算船舶实际燃油消耗量,该方法考虑了燃料类型、船舶或发动机类型以及具体的船舶活动过程<sup>[2,18,20]</sup>,其燃油消耗量计算公式可表达为

$$\text{FC} = \sum_m \sum_i \sum_j (P_{m,i} \cdot \text{LF}_{m,i,j} \cdot T_{m,i,j} \cdot \text{SFC}_{m,i,j} \cdot 10^{-6}) \quad (2)$$

式中: $\text{FC}$  为燃油消耗量,t; $P$  为标定功率,kW; $\text{LF}$  为负荷因子; $T$  为运行时间,h; $\text{SFC}$  为燃油消耗率,g/(kW·h); $m$  为船舶编号; $i$  为设备编号,包括主机、副机和燃油锅炉; $j$  为运行工况编号.

基于做功的自下而上方法能比较准确的测算出船舶燃油消耗量,是目前全球性、区域性或地区性船舶废气排放测算过程中普遍使用的方法<sup>[25-30]</sup>.但该方法对船舶标定功率、发动机负荷因子、工作时间、运行工况和燃油消耗率等参数做了诸多假设和简化,且忽略了航运市场景气状况对船舶活动的影响,实际的测算结果也会存在一定的误差<sup>[10]</sup>.中国目前还缺少具体船舶活动过程的监控数据,另外也存在国外模型参数对中国船队尤其是内河及沿海船队的适用性问题,因此,寻找简单、实用的方法用于中国现阶段水路运输业燃油消耗量测算变得尤为迫切.

通过公开出版的统计资料的对比分析,本文采用基于运输周转量的自下而上方法对中国水路运输业燃油消耗量进行测算.

$$\text{FC} = \sum(\text{TT}_n \cdot \text{SEC}_n \cdot 10^2) \quad (3)$$

式中: $\text{FC}$  为燃油消耗量,t; $\text{TT}$  为运输周转量,亿 t·km 或亿人·km; $\text{SEC}$  为单位运输周转量能耗(本文中均指油耗),g/(t·km)或 g/(人·km); $n$  为水路运输类型,指内河货运、沿海货运、远洋货运和水路客运.

**1.2.2 运输周转量(TT)** 表 1 为根据交通运输行业发展统计公报<sup>[3]</sup>得到的 2001~2014 年各年份水路运输周转量.货运周转量与经济发展程度密切相关,可用货运周转量与 GDP 的回归关系来

预测未来货运周转量<sup>[4]</sup>。基于 2001~2014 年的统计数据,货运周转量与 GDP 的回归公式为

$$TT_{\text{内河}}=0.039 \times \text{GDP}-3838.7 \quad (4)$$

$$R^2=0.905; F=113.697; \text{Sig.}=0.000$$

$$TT_{\text{沿海}}=0.075 \times \text{GDP}-4056.8 \quad (5)$$

$$R^2=0.977; F=518.315; \text{Sig.}=0.000$$

$$TT_{\text{远洋}}=0.120 \times \text{GDP}+12730.7 \quad (6)$$

$$R^2=0.767; F=39.605; \text{Sig.}=0.000$$

式(4)~式(6)中:TT 为各年份货运周转量,亿 t·km; GDP 为各年份国内生产总值(按 2000 年可比价计算),亿元。

模型决定系数  $R^2$  越接近 1 说明回归的越好,各模型  $t$  检验的 Sig 值均小于 0.01,说明回归模型具有统计学意义;模型系数的  $t$  检验值列于公式系数和常数项下面的括号内,各回归公式系数和常数项均有统计学意义。内河、沿海货运周转量与中国 GDP 之间表现出了明显的相关性。远洋货运周转量除受中国经济社会发展的影响外,还受到全球经济、贸易及航运形势的影响,2008 年出现了明显的波动,但总体发展形势仍与中国 GDP 增长之间表现出了一致性。刘建翠<sup>[4]</sup>和周玲玲等<sup>[11]</sup>的研究均表明,截止 2030 年,中国水路运输业仍会保持快速增长,因此,本文建立的线性回归模型对于现阶段中国水路运输业的发展还是具有适用性的。

2001~2014 年,客运周转量在 59.18~89.90 亿人·km 区间内波动,其均值为

$$TT_{\text{客运}}=72.55 \pm 7.88 \quad (7)$$

式中:TT<sub>客运</sub> 为各年份客运周转量,亿人·km。

水路客运周转量可取换算系数为 1/2 将其转换为货运周转量进行计算<sup>[4]</sup>,换算后,水路客运周转量相对于总的货运周转量数值极小。因此,本文计算中忽略水路客运对中国水路运输业燃油消耗和废气排放的贡献。考虑中国经济社会发展目标以及正在进行的经济增长方式的转变,将中国“十三五”~“十五五”期间的 GDP 年度增长率(记为 AGR)设定为 6.5%、6.0%和 5.5%。根据式(4)~式(6),预测得到 2015、2020、2025 和 2030 年内河、沿海及远洋货运周转量也列于表 1 中。刘建翠<sup>[4]</sup>根据目前中国的交通运输结构、交通运输规划以及未来发展趋势,把基于 GDP 增长预测得到

的交通运输业货运周转量预测值分解到各种运输方式中,测算得到 2020 和 2030 年中国水路货运周转量为 117408~127462 亿 t·km 和 194542~204244 亿 t·km。而本文测算得到的 2020 和 2030 年中国水路货运周转量分别为 131955.10 和 227168.61 亿 t·km,比刘建翠<sup>[4]</sup>预测值的中值分别高出 7.8%和 13.9%。因此,本文的测算模型和测算结果具有合理性。

表 1 2001~2030 年中国水路运输周转量

Table 1 Water-borne transportation turnovers in China from 2001 to 2030

年份	GDP (亿元, 2000 年可比价)	内河货运 周转量 (亿 t·km)	沿海货运 周转量 (亿 t·km)	远洋货运 周转量 (亿 t·km)	客运周 转量 (亿人·km)
2001	108057.41	1262.51	3696.28	20085.67	89.90
2002	117890.63	1508.70	4269.20	21732.70	81.80
2003	129679.70	1708.80	4702.10	22304.80	63.00
2004	142777.34	2184.00	6989.00	32255.00	66.30
2005	158911.18	2626.00	8495.00	38552.00	67.77
2006	179092.90	3025.32	9883.13	42577.30	73.58
2007	204524.10	3553.12	12045.83	48685.89	77.78
2008	224158.41	4151.19	13267.14	32854.63	59.18
2009	244780.98	4632.73	13399.81	39524.12	69.38
2010	270727.77	5535.74	16892.63	45999.15	72.27
2011	296446.91	6564.88	19503.56	49355.40	74.53
2012	319273.32	7638.42	20657.06	53412.10	77.48
2013	343857.36	11514.14	19216.14	48705.37	68.33
2014	369302.81	12784.90	24054.59	55935.06	74.34
2015	395154.01	11730.37	25658.78	60228.51	—
2020	541395.23	17492.27	36656.12	77806.71	—
2025	724508.95	24706.95	50426.27	99816.98	—
2030	946904.22	33469.33	67150.40	126548.89	—

1.2.3 单位运输周转量能耗(SEC) 中国营运船舶单位运输周转量能耗数据比较缺乏,根据文献[31],2005 年内河船舶单位运输周转量能耗为 9.38g/(t·km);另根据交通运输行业发展统计公报<sup>[3]</sup>,2011~2014 年监测的沿海及远洋货运船舶单位运输周转量能耗平均值为 2.30g/(t·km),计算中设定此值为 2013 年能耗水平。另外,根据交通运输部《公路水路交通节能中长期规划纲要》确定的节能目标<sup>[1]</sup>,2015 年与 2005 年相比,营运船舶单位运输周转量能耗要下降 15%左右;2020 年与 2005 年相比,营运船舶单位运输周转量能耗要

下降20%左右.因此,设定2001~2015年单位运输周转量能耗每年降低1.6%;2016~2020年单位运输周转量能耗每年降低1.2%.船舶能效达到一定水平之后,再进行有效提高将越来越困难.因此,设定2021~2030年单位运输周转量能耗每年降低1.0%.通过对单位运输周转量能耗下降的合理设定,将能有效考虑到行业技术进步和国际、国内相关法规对船舶能效水平逐渐提高的影响,测算结果也能尽可能真实反映中国水路运输业燃油消耗和废气排放情况.

表2 废气排放因子(kg/t 燃料)  
Table 2 Exhaust emission factors (kg/t fuel)

废气成分	EF		备注
	文献[20]	文献[2]	
NO <sub>x</sub>	85	87/78①	SSD
	56	60/52①	MSD
CO	7.4	2.77	—
NM VOC	2.4	3.08	—
CO <sub>2</sub>	3130	3114	HFO
	3190	3206	MDO
SO <sub>2</sub>	54	49	HFO
	10	2.6	MDO
PM	6.7	7	HFO
	1.1	1.02	MDO

注:SSD-低速柴油机;MSD-中速柴油机;HFO-船用燃料油;MDO-船用轻柴油;①-分别适用于IMO NO<sub>x</sub> Tier I/II柴油机.

**1.2.4 废气排放因子(EF)** 废气排放因子受到发动机类型、生产年份、使用年限、燃油类型等因素的影响.IMO 分别于2000、2009和2014年开展了3次海运温室气体排放研究,其中第2次和第3次温室气体研究报告均采用了自上而下和自下而上两种方法进行了对比测算<sup>[2,20]</sup>.表2为2次报告采用的废气排放因子,取值略有不同.考虑技术进步及MARPOL公约(国际防止船舶污染公约)附则VI的实施,本研究将表2中废气排放因子用于中国水路运输业废气排放量测算时作如下处理:内河货运船舶均采用中速柴油机,燃用MDO;沿海及远洋货运船舶均采用低速柴油机,燃用HFO;为和IMO的两次研究报告进行对比,2001~2007年排放因子采用文献[20]的数据;2008~2019年,排放因子采用文献[2]的数据,其中

NO<sub>x</sub>排放因子采用Tier I数据;2020~2030年,排放因子采用文献[2]的数据,其中NO<sub>x</sub>排放因子采用Tier II数据,SO<sub>2</sub>和PM排放因子采用MDO数据.在不能明确获知具体船舶发动机信息的条件下,本研究计算时作了一定的简化和假设:没有详细区分船舶主机、副机的类型;忽略了发动机生产年份的影响;燃油品质的影响也做了简化,采用恒定的燃油类型;忽略发动机使用年限对排放因子的影响;不考虑发动机运行工况的影响等.

### 1.3 测算范围和数据来源

本研究将中国水路运输业废气排放限定为水路货运排放,忽略水路客运排放,并将水路货运分为内河货运、沿海货运和远洋货运.参照IMO研究报告<sup>[20]</sup>,排放包括温室气体CO<sub>2</sub>和大气污染物NO<sub>x</sub>、CO、NMVOC、SO<sub>2</sub>和PM,但忽略温室气体CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O.本研究中2000~2014年GDP及AGR数据来源于《中国统计年鉴》<sup>[32]</sup>;2001~2014年运输周转量数据来源于交通运输部发布的《交通运输行业发展统计公报》<sup>[3]</sup>;废气排放因子参考IMO第2次温室气体研究报告<sup>[20]</sup>和第3次温室气体排放研究报告<sup>[2]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 中国水路运输业燃油消耗量

表3为中国水路运输业燃油消耗量.目前对中国水路运输业燃油消耗量的统计数据和测算研究均较少,周玲玲<sup>[11]</sup>预测中国未来国际海运(注:各参考文献中"国际海运"含义等同于本文中"远洋货运")排放量时选定2010年作为计算基准年,用于测算的2010年中国国际海运燃油消耗量数据为1009.32万t.本文测算得到的2010年中国远洋货运燃油消耗量为1111.8万t,比周玲玲等<sup>[11]</sup>的数据高出10.2%,说明本文所建立的测算模型具有合理性.

燃油消耗量总体呈不断上升趋势,2001~2030年年均增长率为7.2%,其中,内河货运、沿海货运和远洋货运燃油消耗量年均增长率分别为10.5%、9.1%和5.1%.中国水路运输业燃油消耗量占世界航运燃油消耗量的比重也呈增长态势:2001年,中国水路运输业燃油消耗量为790.9

万 t,约占世界航运燃油消耗量的 3.2%;2012 年,中国水路运输业燃油消耗量为 2373.4 万 t,约占世界航运燃油消耗量的 7.9%。国家大力发展内河航运的战略部署能够通过内河船队燃油消耗量的增长得以体现,其中 2013 年中国内河货运出现跳跃式发展。

表 3 2001~2030 年中国水路运输业燃油消耗量(万 t)

Table 3 Fuel consumptions of water-borne transportation in China from 2001 to 2030 ( $10^4$ t)

年份	FC <sub>内河</sub>	FC <sub>沿海</sub>	FC <sub>远洋</sub>	FC <sub>水路运输</sub>
2001	126.3	103.3	561.3	790.9
2002	148.5	117.4	597.6	863.5
2003	165.5	127.2	603.5	896.2
2004	208.2	186.1	858.8	1253.1
2005	246.3	222.5	1010.1	1478.9
2006	279.2	254.8	1097.7	1631.7
2007	322.6	305.6	1235.1	1863.3
2008	371.0	331.2	820.1	1522.3
2009	407.4	329.1	970.8	1707.3
2010	479.0	408.3	1111.8	1999.1
2011	558.9	463.9	1173.8	2196.6
2012	639.9	483.4	1250.1	2373.4
2013	949.2	442.5	1121.6	2513.3
2014	1037.1	545.1	1267.5	2849.7
2015	936.3	572.2	1342.9	2851.4
2020	1314.5	769.5	1633.2	3717.2
2025	1765.6	1006.7	1992.6	4764.9
2030	2274.6	1274.8	2402.4	5951.8

考虑 GDP 增长的不确定性,设定 2016~2030 年 AGR 有 $\pm 0.5\%$ 的浮动区间,测算得到 2020、2025 和 2030 年中国水路运输业燃油消耗量分别为 3628.3~3807.8,4540.7~4998.8,5537.7~6394.2 万 t,相应的将导致燃油消耗量年均增长率有 $\pm 0.3\%$ 的浮动。2001~2030 年中国会一直处于中高速发展阶段,作为一种最节能的运输方式,水路运输在经济社会发展中必然发挥着举足轻重的作用,中国水路运输业能耗总量也将随之呈逐年增长趋势。因此,整个行业仍需要不断通过加强技术革新、优化船队结构和运力分配、精细化船队管理等措施促进中国水路运输业节能降耗。

## 2.2 中国水路运输业废气排放量

表 4 为中国水路运输业 CO<sub>2</sub> 排放量。周玲玲

等<sup>[11]</sup>测算得到 2010 年中国国际海运 CO<sub>2</sub> 排放量为 3159.2 万 t;顾伟红<sup>[10]</sup>采用 2 种模型测算得到 2010 年中国国际海运 CO<sub>2</sub> 排放量为 3771 和 3569 万 t;而本文测算得到 2010 年中国远洋货运 CO<sub>2</sub> 排放量为 3462.1 万 t,介于周玲玲等<sup>[11]</sup>和顾伟红等<sup>[10]</sup>的测算结果之间。

表 4 2001~2030 年中国水路运输业 CO<sub>2</sub> 排放量(万 t)Table 4 CO<sub>2</sub> emissions of water-borne transportation in China from 2001 to 2030 ( $10^4$ t)

年份	$E_{CO_2,内河}$	$E_{CO_2,沿海}$	$E_{CO_2,远洋}$	$E_{CO_2,水路运输}$
2001	402.9	323.4	1756.9	2483.2
2002	473.7	367.5	1870.6	2711.8
2003	528.1	398.2	1889.1	2815.4
2004	664.1	582.5	2688.1	3934.7
2005	785.7	696.6	3161.5	4643.8
2006	890.7	797.5	3435.7	5123.9
2007	1029.3	956.5	3865.8	5851.6
2008	1189.3	1031.3	2553.9	4774.5
2009	1306.0	1024.9	3023.2	5354.1
2010	1535.7	1271.4	3462.1	6269.2
2011	1792.0	1444.5	3655.2	6891.7
2012	2051.6	1505.4	3892.5	7449.5
2013	3043.2	1378.0	3492.6	7913.8
2014	3325.0	1697.4	3946.9	8969.3
2015	3001.9	1781.6	4181.9	8965.4
2020	4214.2	2396.1	5086.0	11696.3
2025	5660.7	3134.6	6204.9	15000.2
2030	7292.4	3969.7	7481.1	18743.2

针对 2020 和 2030 年中国远洋货运 CO<sub>2</sub> 排放量的测算值要高于周玲玲等<sup>[11]</sup>的预测值,可能是由于周玲玲等<sup>[11]</sup>选定的计算基准年的平均单船装机功率偏低、而能效进步的设定又过于乐观所致。目前中国水路运输业废气排放现状及趋势预测方面的研究较少,测算结果难以进行系统的比较,但和相关文献研究结论的对比发现,本文测算结果一定程度上还是可靠的。

通过与 IMO 第 2 次和第 3 次温室气体排放研究报告的对比发现,2001~2012 年,中国水路运输业 CO<sub>2</sub> 排放量占世界航运排放量的比重由 3.2%逐渐增长至 7.8%;其中远洋运输 CO<sub>2</sub> 排放量占比由 2.2%增长至 4.1%。根据 IMO 第 3 次温室气体研究报告,考虑不同的全球经济增长、船队

发展和运输需求情景,相比于 2012 年,不同预测情景下测算得到 2020 和 2030 年世界航运 CO<sub>2</sub> 排放量平均增长率为 7%和 29%。据此推算,到 2020 和 2030 年,中国水路运输业 CO<sub>2</sub> 排放量占世界航运排放量的比重将分别增长至 11.5%和 15.3%;其中远洋运输 CO<sub>2</sub> 排放量占世界航运排放量比重分别为 5.0%和 6.1%。因此,到 2020 和 2030 年,根据 IMO 市场减排机制对国际航行船舶的“非歧视性原则”,未来中国远洋货运将承担巨大的节能减排压力。另外,中国内河和沿海货运增长速度更快,船舶对中国境内大气环境污染的压力将进一步增大。因此,为了实现中国的减排承诺,水路运输业任重道远。

表 5 为中国水路运输业大气污染物排放量。由表 4、表 5 可知,21 世纪初的 30 年间(2001~2030 年),中国水路运输业 NO<sub>x</sub>、CO、NMVOC、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 PM 排放量分别为 6769.3,296.8,278.8,290879.8,1610.3,262.7 万 t。2001 年,中国水路运输业 NO<sub>x</sub>、CO、NMVOC、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 PM 排放量占世界航运排放量的比重在 3.2%~3.4%之间,此后呈逐渐上升趋势,到 2012 年,各废气排放量占比在 7.0%~10.0%之间。2030 年之前中国经济将持续保持中高速增长,水路运输业也将持续快速增长,且其增长速度将远高于世界同期平均水平。因此,截止 2030 年,中国水路运输业废气排放量占世界航运废气排放量的比重将进一步升高。

对 2001~2030 年中国水路运输业不同运输类型废气排放量发展趋势的测算表明:水路运输业 NO<sub>x</sub> 排放量呈逐年增加趋势,年均增长率为 6.6%;其中内河货运、沿海货运及远洋货运 NO<sub>x</sub> 排放量年均增长率分别为 10.2%、8.7%和 4.8%。水路运输业 CO<sub>2</sub> 排放量呈逐年增加趋势,年均增长率为 7.2%;其中内河货运、沿海货运及远洋货运 CO<sub>2</sub> 排放量年均增长率分别为 10.5%、9.0%和 5.1%。因 IMO 两次研究报告对 CO 排放因子取值差异较大,导致 2007 年前后 CO 排放量出现较大波动。MARPOL 公约对 2020 年 1 月 1 日之后船用燃油硫含量严格限制在 0.5%以下,因此,与硫含量密切相关的 SO<sub>2</sub> 和 PM 排放量自 2020 年之后显著下降。2020~2030 年,中国水路运输业

SO<sub>2</sub> 和 PM 年均排放量分别为 12.4,4.9 万 t。

表 5 2001~2030 年中国水路运输业废气排放量(万 t)

Table 5 Air pollutant emissions of water-borne transportation in China from 2001 to 2030 (10<sup>4</sup>t)

年份	$E_{NO_x}$	$E_{CO}$	$E_{NMVOC}$	$E_{SO_2}$	$E_{PM}$
2001	63.6	5.9	1.9	37.2	4.6
2002	69.1	6.4	2.1	40.1	5.0
2003	71.4	6.6	2.2	41.1	5.1
2004	100.5	9.3	3.0	58.5	7.2
2005	118.6	10.9	3.5	69.0	8.5
2006	130.6	12.1	3.9	75.8	9.4
2007	149.0	13.8	4.5	86.4	10.7
2008	122.4	4.2	4.7	57.4	8.4
2009	137.5	4.7	5.3	64.8	9.5
2010	161.0	5.5	6.2	75.7	11.1
2011	176.0	6.1	6.8	81.7	12.0
2012	189.2	6.6	7.3	86.6	12.8
2013	193.0	7.0	7.7	79.1	11.9
2014	219.9	7.9	8.8	91.5	13.7
2015	222.8	7.9	8.8	96.3	14.4
2020	287.9	10.3	11.4	9.7	3.8
2025	325.8	13.2	14.7	12.4	4.9
2030	405.1	16.5	18.3	15.5	6.1

### 3 结论

3.1 目前的统计数据使得现阶段还难以应用基于燃油消耗或基于做功的方法对中国水路运输业废气排放进行测算,而基于运输周转量的自下而上方法能够有效利用现有统计数据。中国内河、沿海和远洋货运周转量与中国 GDP 之间表现出了明显相关性,通过对 GDP 增长的假设可以预测得到未来一段时间内的水路运输周转量,进而开展中国水路运输业能源消耗和废气排放预测。相关测算方法和结果可为中国交通运输行业节能减排措施的制定提供参考。

3.2 2001 年,中国水路运输业燃油消耗量为 790.9 万 t,占世界航运燃油消耗量的 3.2%; 2012 年,中国水路运输业燃油消耗量为 2373.4 万 t,占世界航运燃油消耗量的 7.9%。2001~2030 年,中国水路运输业燃油消耗量呈逐年增长趋势,年均增长率为 7.2%;2030 年,中国水路运输业燃油消耗量将达到 5951.8 万 t。

3.3 2001 年,中国水路运输业  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NMVOC}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}$  排放量分别为 63.6, 5.9, 1.9, 2483.2, 37.2, 4.6 万 t; 2030 年,中国水路运输业  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NMVOC}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}$  排放量将分别为 405.1, 16.5, 18.3, 18743.2, 15.5, 6.1 万 t。2001 年,中国船队  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NMVOC}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}$  排放量占世界航运排放量的比重均在 3.2%~3.4% 左右,此后呈逐渐上升趋势,到 2012 年,各废气排放量占比在 7.0%~10.0% 之间。2001~2012 年,中国水路运输业  $\text{CO}_2$  排放量占世界航运排放量的比重由 3.2% 逐渐增长至 7.8%; 到 2020 年和 2030 年,中国水路运输业  $\text{CO}_2$  排放量占世界航运排放量的比重将分别增长至 11.5% 和 15.3%。

3.4 2001~2030 年,中国水路运输  $\text{NO}_x$  排放量呈逐年增加趋势,年均增长率为 6.6%; 其中内河货运、沿海货运及远洋货运  $\text{NO}_x$  排放量年均增长率分别为 10.2%、8.7% 和 4.8%。水路运输业  $\text{CO}_2$  排放量呈逐年增加趋势,年均增长率为 7.2%; 其中内河货运、沿海货运及远洋货运  $\text{CO}_2$  排放量年均增长率分别为 10.5%、9.0% 和 5.1%。因 MARPOL 公约对国际船用燃油硫含量的限制,与硫含量密切相关的  $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}$  排放量自 2020 年之后显著下降。

#### 参考文献:

- [1] 中国交通运输部.公路水路交通节能中长期规划纲要[EB/OL].北京:交通运输部,2008-11-04 [2015-05-15]. [http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/zhengwugonggao/jiaotongbu/guihuatongji/200811/t20081104\\_533449.html](http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/zhengwugonggao/jiaotongbu/guihuatongji/200811/t20081104_533449.html).
- [2] International Maritime Organization (IMO). Reduction of GHG emissions from ships. Third IMO GHG Study 2014 - Final Report [R]. London: International Maritime Organization, 2014.
- [3] 中国交通运输部.公路水路交通运输行业发展统计公报(2001~2014)[EB/OL].北京:交通运输部,2001-2014 [2015-05-15].[http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/tongjigongbao/fenxi\\_gongbao/hangyegongbao/201104/t20110428\\_937558.html](http://www.moc.gov.cn/zhuzhan/tongjigongbao/fenxi_gongbao/hangyegongbao/201104/t20110428_937558.html).
- [4] 刘建翠.中国交通运输部部门节能潜力和碳排放预测[J].资源科学,2011,33(4):640-646.
- [5] 贾顺平,彭宏勤,刘爽,等.交通运输与能源消耗相关研究综述[J].交通运输系统工程与信息,2009,9(3):6-16.
- [6] 欧阳斌,凤振华,李奎奎,等.交通运输能耗与碳排放测算评价方法及应用——以江苏省为例[J].软科学,2015,29(1):139-144.
- [7] 魏庆琦,肖伟.1989~2009 年间中国交通运输能耗变化关键驱动因素分解研究[J].科技管理研究,2013,(8):112-117.
- [8] 周伟,米红.中国能源消费排放的  $\text{CO}_2$  测算[J].中国环境科学,2010,30(8):1142-1148.
- [9] 翟君,冯立岩,王猛,等.气体燃料发动机发展对中国温室气体减排贡献的生命周期分析[J].中国环境科学,2015,35(1):62-71.
- [10] 顾伟红,徐瑞华.中国国际海运船队温室气体排放测算研究[J].中国造船,2013,206(3):169-176.
- [11] 周玲玲,顾阿伦,叶薇倩,等.中国未来国际海运  $\text{CO}_2$  排放量预测[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(8):1125-1129.
- [12] Ng S K W, Loh C, Lin C, et al. Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta [J]. Atmospheric Environment, 2013,76:102-112.
- [13] 林楚彬,赵黛青,蔡国田,等.广东货船水运的温室气体排放和低碳发展对策[J].环境科学研究,2013,26(12):1340-1348.
- [14] 叶斯琪,郑君瑜,潘月云,等.广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究[J].环境科学学报,2014,34(3):537-547.
- [15] 伏晴艳,沈寅,张健.上海港船舶大气污染物排放清单研究[J].安全与环境学报,2012,12(5):57-64.
- [16] Yau P S, Lee S C, Corbett J J, et al. Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong [J]. Science of the Total Environment, 2012,431:299-306.
- [17] 邢辉,段树林,黄连忠,等.基于 AIS 数据的渤海湾地区海运排放测算[J].中国环境科学,2016,36(3):953-960.
- [18] 政府间气候变化专门委员会(IPCC).2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. 2006[2015-10-15]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [19] 政府间气候变化专门委员会(IPCC).Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories [EB/OL]. 2000[2015-10-15]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/index.html>.
- [20] International Maritime Organization (IMO). Second IMO GHG Study 2009 [R]. London: International Maritime Organization, 2009.
- [21] Miola A, Ciuffo B. Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources [J]. Atmospheric Environment, 2011,45:2242-2251.
- [22] Eyring V, Isaksen I S A, Bernsten T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping [J]. Atmospheric Environment, 2010,44:4735-4771.
- [23] Endresen Ø, Sørgård E, Behrens H L, et al. A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions [J]. Journal of Geophysical Research, 2007,112(D12301):1-17.
- [24] Eyring V, Köhler H W, Aardenne J, et al. Emissions from

- international shipping: 1the last 50years [J]. Journal of Geophysical Research, 2005,110(D17305):1-12.
- [25] Paxian A, Eyring V, Beer W, et al. Present-day and future global bottom-up ship emission inventories including polar routes [J]. Environmental Science and Technology, 2010,44 (4):1333-1339.
- [26] Schrooten L, Vliieger I D, Panis L I, et al. Emissions of maritime transport: A European reference system [J]. Science of the Total Environment, 2009,408:318-323.
- [27] Schrooten L, Vliieger I D, Panis L I, et al. Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory,an activity-based emission model [J]. Atmospheric Environment, 2008,42:667-676.
- [28] Goldsworthy L, Goldsworthy B. Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data -An Australian case study [J]. Environmental Modelling & Software, 2015,63:45-60.
- [29] Winther M, Christensen J H, Plejdrup M S, et al. Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data [J]. Atmospheric Environment, 2014,91:1-14.
- [30] Corbett J J, Lack D A, Winebrake J J, et al. Arctic shipping emissions inventories and future scenarios [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010,10:9689-9704.
- [31] 王亚洁.基于系统动力学的中国综合交通能耗情景分析 [D].北京:北京交通大学,2014.
- [32] 中国国家统计局.中国统计年鉴(2000~2014 年)[EB/OL].北京:国家统计局. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015-08-15>.
- 作者简介:** 邢 辉(1980-),男,湖北浠水人,副教授,大连海事大学博士研究生,主要从事船舶柴油机动装置排放测试与评价方面的研究.发表论文 30 余篇.

## 《中国环境科学》获评“2014 中国最具国际影响力学术期刊”

2014 年 12 月,中国环境科学学会主办的《中国环境科学》被评为“2014 中国最具国际影响力学术期刊”。

“中国最具国际影响力学术期刊”是《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、清华大学图书馆、中国学术国际评价研究中心对我国 5600 余种中外文学术期刊,根据总被引频次、影响因子、被引半衰期等计算出的国际影响力综合评价指标 CI 进行排序,遴选出的排名前 5%的期刊.获评“中国最具国际影响力学术期刊”的科技类期刊共 175 种.

自 2012 年开始此项评选以来,《中国环境科学》已连续 3 年获此殊荣.

《中国环境科学》编辑部