



长江上游船舶大型化对典型污染排放的影响*

李文杰¹, 杨 宁², 杜洪波¹, 万 宇¹, 杨胜发¹, 肖 毅¹

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 长江上游船舶大型化趋势明显, 评估其对典型污染排放的影响对航道建设规划具有重要意义。收集计算长江上游船舶吨位、船舶交通流、船舶燃油消耗及典型污染物排放等数据, 分析了长江上游船舶大型化对典型污染物排放的综合影响。结果表明: 1) 2008—2019 年长江上游三省一市船舶平均吨位从 249 t 增加到 874 t, 船舶流量显著减小, 货运量显著增加。2) 上游航道等级由Ⅳ级提升至Ⅲ级, 理想状态下船舶单位周转量典型大气污染排放减少 31.2%。3) 水路货运周转量增加导致船舶污染总排放增加, 但基于船舶平均吨位大型化计算, 2008—2019 年水路运输替代陆路运输的污染物减排量约 190 万 t, 较船舶平均吨位不变状态下的污染减排量增长约 7.7%。4) 建议提升长江上游航道等级至Ⅱ级, 进一步推动船舶大型化发展, 相对于Ⅲ级航道船舶单位周转量典型大气污染排放可减少 36.4%, 促进交通运输行业实现“碳中和”目标。

关键词: 船舶大型化; 船舶流量; 污染排放; 长江上游

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0100-06

Impact of ship enlargement on typical pollution emissions in the upper Yangtze River

LI Wen-jie¹, YANG Ning², DU Hong-bo¹, WAN Yu¹, YANG Sheng-fa¹, XIAO Yi¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Considering the growing enlargement trend of ships in the upper Yangtze River, it is of great significance for waterway construction planning to assess the impact of this trend on typical pollution emissions. Therefore, we collect and calculate the data on the tonnage, traffic flow, fuel consumption, and typical pollutant emissions of ships in the upper Yangtze River and analyze the comprehensive impact of ship enlargement on typical pollutant emissions. The results are shown as follows: 1) The average tonnage of ships in three provinces and one city of the upper Yangtze River increased from 249 to 874 tons from 2008 to 2019, with a significant decrease in the traffic flow and a significant increase in the freight volume. 2) The waterway class of the upper Yangtze River has upgraded from Class IV to Class III, and the typical air pollution emissions per unit turnover of ships in ideal conditions have been reduced by 31.2%. 3) The increase in waterway freight turnover leads to the growth in total pollution emissions from ships, but the calculations on the average tonnage of enlarged ships show that the waterway transport from 2008 to 2019, a replacement for land transport, lessens the pollution emissions by about 1.9 million tons, which registers a growth rate of 7.7% in pollution emission reduction compared to that on the average tonnage of ships in a constant state. 4) It is proposed to upgrade the waterway class of the upper Yangtze River to Class II and further promote the development of ship enlargement. In this way, the typical air pollution emissions per unit turnover of ships can be reduced by 36.4% relative to the Class III waterway, which can facilitate the transport industry to achieve the goal of “carbon neutrality.”

Keywords: ship enlargement; ship traffic flow; pollution emission; upper Yangtze River

收稿日期: 2021-04-18

***基金项目:** 国家自然科学基金项目(52079013)

作者简介: 李文杰(1984—), 男, 教授, 博士, 从事航道水沙运动基础理论及航道治理研究。

国家提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现“碳中和”。长江航道作为沟通中国东中西部地区的运输大动脉, 是构建长江经济带综合立体交通走廊的主骨架, 在航运方面具有独特优势和巨大发展潜力^[1]。长江上游水运发展迅速, 航道通过能力^[2]提高, 船舶也逐渐朝着大型化^[3]、标准化^[4]方向发展。大型船舶凭借优良的规模经济效益、能源效益而受到航运市场的青睐, 但社会对船舶污染排放的重视也不断加大。目前, 船舶大型化带来的污染排放影响尚不明确, 对船舶污染排放的研究侧重于港口^[5-8]、城市^[9-10]区域的排放清单及污染特征研究, 部分学者对船舶污染排放扩散模拟^[11]、空间分布规律^[12]和防治措施^[13]也提出了分析与建议, 但总体而言, 鲜有文献对船舶大型化带来的典型污染排放影响进行系统研究。

本文旨在分析长江上游船舶吨位、船舶交通流、船舶燃油消耗及典型污染物排放等, 研究长江上游船舶大型化趋势对典型污染物排放的综合影响, 以期对未来阶段的航道建设规划提供参考, 以保证发挥航运经济效益的同时能够促进绿色航运可持续发展。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

1) 2008—2019 年长江上游朝天门、江津大桥、万州长江二桥、巫山长江大桥观测断面日均船舶流量来源于重庆海事局, 用于分析船舶交通流量变化。

2) 2008—2019 年重庆、四川、贵州、云南的船舶数量、净载质量、水路货运量、水运货物周转量来源于中国统计年鉴, 用于分析船舶大型化发展趋势等。

3) 100~5 000 t 船舶主机功率来源于川江及其支流、三峡库区的干散货船舶数据^[14-15], 用于计算不同船型单位时间基本燃油消耗量、船舶营运燃油消耗率。

4) 船舶典型污染物类型来源于《非道路移动源

大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》, 典型污染物排放因子来源于中国船舶大气污染物排放清单报告^[16], 用于计算船舶典型污染物排放量。

1.2 研究方法

由于国家统计局暂无直接数据表明船舶平均吨位变化, 将其定义为净载质量与船舶数量二者的比值。

理论状态下, 主机功率 P 与船舶航速 S 的 3 次方成正比关系^[17-18], 则主机功率可以表示为:

$$P=cS^3 \tag{1}$$

式中: P 为主机在常用工况下的功率(kW); S 为船舶航速(km/h); c 是常数, 由船舶计算实例取 0.067^[19]。

本文参考 GB/T 7187.2—2010《运输船舶燃油消耗量第 2 部分: 内河船舶计算方法》^[19], 通过不同吨位船舶主机功率估算其单位时间基本燃油消耗量、船舶营运燃油消耗率, 计算公式如下:

$$Q=\alpha Pg \tag{2}$$

$$R=\frac{Q}{MS} \tag{3}$$

式中: Q 为单位时间基本燃油消耗量(kg/h); α 为主机基本耗油系数, 干散货船取 0.73; g 为主机在常用工况下的耗油率($\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), 取 0.216; R 为船舶营运燃油消耗率($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$); M 为船舶满载运量(t)。

船舶排放的典型大气污染物主要包括 NO_x 、 CO 、 HC 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 , 基于船舶燃料消耗计算船舶大气污染物排放量^[20]。假定发动机设备保持在正常工作状态, 计算公式如下:

$$W=R\cdot EF \tag{4}$$

式中: W 为船舶单位周转量典型大气污染物排放量($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$); EF 为船舶单位燃料典型大气污染物排放因子($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2 船舶大型化趋势分析

2.1 船舶平均吨位

长江上游地区主要涉及重庆、云南、贵州、四川三省一市, 对该地区 2008—2019 年船舶总数量、总载质量统计分析并计算平均吨位, 见图 1。

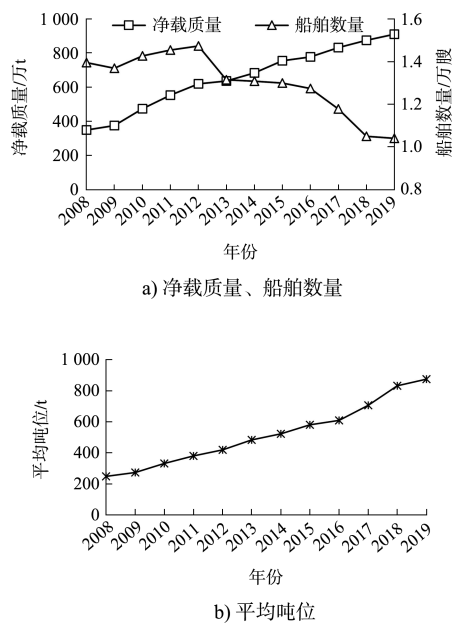


图 1 长江上游船舶运力总量变化

2008—2019 年期间长江上游船舶净载质量从 348 万 t 增加到 910 万 t，年均递增率 9.12%；船舶总数量从 1.39 万艘下降到 1.04 万艘，年均递减率 2.62%；船舶平均吨位从 249 t 增加到 874 t，年均递增率 12.06%。船舶平均吨位主要与净载质量和船舶数量有关，上游船舶净载质量逐年增加，而船舶总数量降低，船舶大型化趋势明显。

需要注意的是，随着 2011 年 12 月上游宜宾—泸州段二期航道整治工程竣工验收，长江干线航道全部建成Ⅲ级以上高等级航道，主要货运船舶的平均吨位在 1 000 t 以上，见表 1^[21]。而本文船舶包含了岷江、嘉陵江等支流数据，导致船舶平均吨位相对长江干线较小。

表 1 内河 I—IV 级航道可通航船舶吨级				
航道等级	I	II	III	IV
船舶吨级/t	3 000	2 000	1 000	500

2.2 船舶流量变化

随着长江上游船舶大型化发展，航道断面船舶流量和水运总量也发生变化，图 2 为长江上游典型断面日均船舶流量随水运总量的变化。

2008—2019 年上游水运总量从 1.12 亿 t 增加到 3.04 亿 t，年均递增率 9%；江津观测断面日平

均流量从 178 艘次减少到 42 艘次，流量日均递减率 12%，巫山观测断面日平均流量从 217 艘次减少到 193 艘次，流量日均递减率 1%。船舶流量记录中包含货船、客船等，不同观测断面各船舶种类比例不一致，如 2019 年江津大桥、巫山长江大桥、朝天门、万州长江二桥观测断面货船比例分别为 90%、68%、65%、44%。货船比例越大的观测断面，船舶流量下降越显著，朝天门和万州观测断面由于旅游船比例较大，总船舶流量基本保持稳定但近年亦有降低趋势。

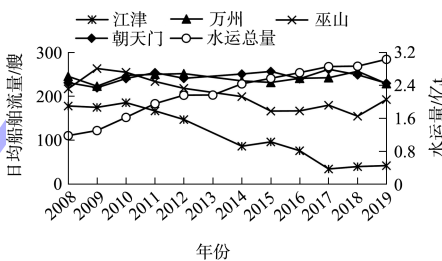


图 2 长江上游典型断面日均船舶流量及水运总量

大型船舶装载量比中小型船舶更大，能有效减少总航行周次，长江上游航道船舶流量逐渐减少。在长江上游水运量不断增加的情况下，船舶流量依旧减少，表明船舶大型化趋势显著。

3 船舶污染排放

3.1 船舶营运燃油消耗率

长江航道以货物运输为主，基于 100~5 000 t 干散货船主机功率资料，采用公式(1)~(3)估算各船型单位时间基本燃油消耗量、船舶营运燃油消耗率，见表 2。结果表明，大型船舶对于单个往返航次来说，越大的船舶燃料消耗量越多，但船舶营运燃油消耗率随着船舶吨位增加逐渐减小。以Ⅳ级航道 500 t 船舶为基准，Ⅲ级航道 1 000 t 船舶营运燃油消耗率为 500 t 船舶的 69.9%，Ⅱ级航道 2 000 t 船舶营运燃油消耗率为 500 t 船舶的 41.8%。因此，航道等级提升后，运输相同货物周转量，船舶大型化有益于降低船舶油耗，货物周转量越大，大型船舶燃油节省的优势越大。

表 2 船舶燃油消耗值

船舶吨位/t	每小时基本燃油消耗量/(kg·h ⁻¹)	船舶营运燃油消耗率/(g·t ⁻¹ ·km ⁻¹)
100	22.02	17.25
500	45.73	5.62
800	59.92	4.20
1 000	75.69	3.93
2 000	99.34	2.35
3 000	132.45	1.90
4 000	162.41	1.63
5 000	198.68	1.50

3.2 船舶单位周转量典型大气污染物排放

船舶排放的大气污染物主要来源于燃料消耗, 燃料消耗越多, 污染排放越大。内河船舶主要使用普通柴油, 结合船舶大气污染物排放因子(表 3), 通过船舶消耗的燃料量计算各船型单位周转量典型污染物的排放量, 见图 3。

表 3 船舶典型大气污染物排放因子

种类	污染物排放因子/(g·kg ⁻¹)	
	柴油	燃料油
CO	23.80	7.40
HC	6.19	2.70
NO _x	47.60	79.30
PM10	3.81	6.20
PM2.5	3.65	5.60
SO ₂	0.35	27.00

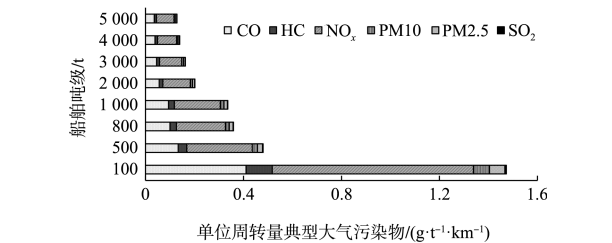


图 3 船舶单位周转量典型大气污染物排放

图 3 表明, 无论何种污染物, 越大吨位船舶的单位货物周转量典型污染排放量越小。自上游干线航道等级由Ⅳ级升至Ⅲ级, 理想状态下船舶单位周转量典型大气污染物排放由 500 t 船舶的 0.48 g/(t·km) 降至 1 000 t 船舶的 0.33 g/(t·km), 减少了 31.2%。同时Ⅱ级航道 2 000 吨级船舶相对于Ⅲ级航道船舶单位周转量污染排放更低, 为

0.21 g/(t·km), 在Ⅲ级航道排放基础上降低 36.4%。船舶大型化可有效减少燃油消耗, 降低船舶单位周转量污染排放。

3.3 船舶典型大气污染物总排放

由于船舶污染排放采用了标准船型, 基于平均吨位计算长江上游污染排放可能有一定误差, 但可反映基本的变化趋势。基于 100~5 000 t 船舶单位周转量典型大气污染物排放量数据进行曲线拟合, 其拟合系数为 0.99, 效果较好, 见图 4。将上游船舶平均吨位代入拟合公式得到 2008—2019 年船舶单位周转量典型大气污染物排放量, 并结合上游水运货物周转量得到船舶典型大气污染物总排放, 见图 5。

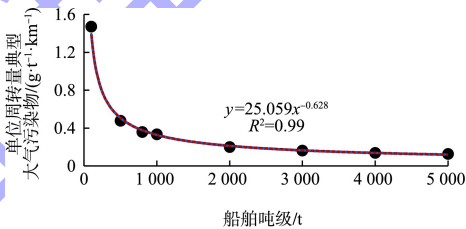


图 4 单位周转量典型大气污染物与船舶吨位关系

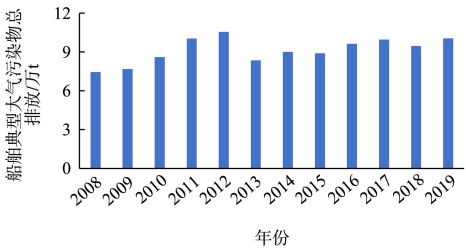


图 5 船舶典型大气污染物总排放

由图 5 可得, 长江上游船舶典型大气污染物总排放由 2008 年 7.44 万 t 增长至 2019 年 10.05 万 t, 年均递增率 2.8%。上游水运货物周转量增加导致污染排放增加, 但此部分增量不采用水路运输, 由公路或者铁路运输将会产生更大的污染排放。水运每吨公里污染排放量是铁路的 1/1.2、公路的 1/15^[22], 以 2008 年水运货物周转量为基准, 标准状态代表上游船舶吨位保持 2008 年水准不变, 据此算出标准状态、船舶大型化两种情况下水路运输替代公路和铁路运输减少的污染物排放量见表 4。

表 4 2008—2019 年水路运输替代公路、铁路运输的典型大气污染物减排量

年份	船舶平均吨位/t	水运周转量增量/(亿 t·km)	标准状态/万 t	船舶大型化/万 t
2008	249	0	0	0
2009	275	103	11.4	11.5
2010	332	354	39.4	40.3
2011	380	692	77.0	79.6
2012	420	874	97.3	101.1
2013	484	555	61.7	64.7
2014	523	766	85.2	89.7
2015	581	835	92.9	98.3
2016	610	1 011	112.5	119.3
2017	706	1 260	140.2	149.7
2018	832	1 373	152.8	164.2
2019	874	1 588	176.7	190.3

由表 4 可得，公路、铁路运输产生的污染排放远大于水路运输，随着周转量增量增加，水路运输替代公路、铁路运输，典型大气污染物减排量增大。同时相对于标准状态，船舶大型化下的污染减排量更大，如 2019 年标准状态替代公路、铁路运输减排量 176.7 万 t，船舶大型化替代公路、铁路运输减排量 190.3 万 t，减排量增长 7.7%。

对全社会而言，未来我国交通运输需求将持续高速增长，水路货运量仍将保持快速发展。上游干线航道等级由Ⅳ级升至Ⅲ级，航道承载力增加，通航船舶吨位逐渐增大并趋近 1 000 吨级，船舶大型化可使水路运输替代公路、铁路运输的污染物减排效果更加明显，积极推动货运物流低碳化，实现交通运输绿色发展。

4 结论

1)2008—2018 年长江上游三省一市船舶平均吨位由 249 t 增加到 832 t，船舶大型化趋势日益明显。大型船舶能够有效地减少总航行周次，上游船舶流量缓慢减少。

2)长江上游航道等级逐步提升，由Ⅳ级提升至Ⅲ级航道，理想状态下船舶营运燃油消耗率为 500 t 船舶的 69.9%，船舶单位周转量典型大气污染排放由 0.48 g/(t·km)降至 0.33 g/(t·km)，排放降低约 31.2%。长江航道作为能源、原材料和

外贸运输的主要通道，货运需求较大，船舶大型化降低单位周转量污染排放可大大减少水路运输污染排放，有利于航运业的绿色发展。

3)以 2008 年长江上游水运货物周转量为基准，2019 年标准状态替代公路、铁路减排量 176.7 万 t，船舶大型化替代公路、铁路减排量 190.3 万 t。对于上游地区总货运量增加，航道等级提升，船舶大型化可进一步增大水路运输替代公路、铁路运输的污染减排量，降低全社会污染物排放总量。

为进一步实现“碳中和”目标，建议提升上游航道等级至Ⅱ级，提高航道承载力，积极推进船舶大型化、标准化，降低船舶营运燃油消耗率，船舶单位周转量典型大气污染排放相对于Ⅲ级航道可减少 36.4%。同时，需持续综合采取技术、经济等措施，引导或限期淘汰存量低质量和低标准船舶，可加速运力结构优化，并为新建高质量船舶发展腾出空间。本文以船舶主机功率计算船舶燃油消耗，缺乏辅机燃油消耗部分；计算船舶大气污染排放量，部分参数采用了经验值，但不影响总体结论。下一步研究中可考虑其他方法并引入更多分析对象，以更加明晰船舶大型化对污染物排放的具体影响。

参考文献：

[1] 刘怀汉,杨胜发,曹民雄.长江黄金航道整治技术研究构想与展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):17-27.

[2] 李文杰,李伟明,杨胜发,等.航道承载力内涵及评价方法研究—以长江上游航道为例[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(10):74-80.

[3] 杨秋平,宁涛,杜立达.船舶大型化极限问题研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(7):40-46.

[4] 唐冠军,赵洪祥,甘明玉.关于长江干线船型标准化的思考[J].水运工程,2005(1):38-44.

[5] 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.

[6] YANG D Q,KWAN S H,LU T,et al.An emission inventory of marine vessels in Shanghai in 2003 [J]. Environmental science and technology,2007(42):5183-5190.

[7] XIAO Q,LI M,LIU H,et al.Characteristics of marine shipping

emissions at berth: profiles for particulate matter and volatile organic compounds[J]. Atmospheric chemistry & physics, 2018, 18(13): 9527-9545.

[8] ZHOU Y, WANG Z H, PEI C L, et al. Source-oriented characterization of single particles from in-port ship emissions in Guangzhou, China[J]. Science of the total environment, 2020(724): 138179.

[9] 黄渤, 王敏玲, 陈倩, 等. 烟台市船舶排放特征及对空气质量的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(4): 98-108.

[10] 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.

[11] 柳娟, 谢文彬, 陈举涛. 港口航行船舶大气污染物排放扩散模拟[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(6): 1016-1024.

[12] 张安民, 刘禹, 张殿君, 等. 基于 GIS 的天津港船舶大气污染空间分布规律[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(6): 622-626.

[13] 吴飏. 三峡库区船舶污染及综合防治对策研究[J]. 长江流域资源与环境, 2000(4): 487-490.

[14] 张珍强, 王斌. 乌江 100 吨级船舶技术改造初探[J]. 珠

江水运, 2002(2): 36-37.

[15] 交通运输部水运局. 川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列(2010 年修订版)[R]. 北京: 交通运输部水运局, 2010.

[16] 环境保护部机动车排污监控中心. 中国船舶大气污染物排放清单报告[R]. 北京: 环境保护部机动车排污监控中心, 2017.

[17] 许欢, 刘伟, 张爽. 低碳经济下船舶航行速度选择[J]. 中国航海, 2012, 35(2): 98-101.

[18] 杜亮. 内河船舶营运航速选择的探讨[J]. 中国水运, 2014(12): 72-73.

[19] 长江航运科学研究院. 运输船舶燃油消耗量第 2 部分: 内河船舶计算方法: GB/T 7187.2—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[20] 蔡薇. 船舶大气污染排放量的计算方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(4): 485-487.

[21] 内河通航标准: GB50139-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014

[22] 冯宏琳, 张艺, 韩兆星, 等. 长江干线水运量和承载能力研究[J]. 水运工程, 2020(4): 70-73.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 86 页)

3) 该系统实现多点择优寻源补水, 降低了电能消耗, 以检测煤炭含水率为基础对煤堆表面进行准确的补水作业, 减少了水资源浪费。

4) 该水幕系统可实现大行走范围内的煤垛表面全覆盖均匀洒水, 堆场单机移动洒水结合堆场喷枪洒水、防风网共同使用的环保新技术为有效控制煤炭堆场粉尘扩散起到良好的工程示范作用, 对煤港粉尘治理设备升级起到有力的推动作用。

5) 堆场智能水幕系统的应用表明, 采用单机移动洒水技术实现了露天堆场煤堆表面的精准高效洒水作业, 节约了宝贵的水资源, 实现自动化堆场移动洒水, 减少了设备维护量和人员劳动强度, 具有较大的工程应用价值。

参考文献:

[1] 陶鹏, 王丹. 露天煤炭堆场防风抑尘集成技术研究[J]. 水运工程, 2011(9): 159-161, 164.

[2] 丛晓春, 陈志龙, 詹水芬. 露天煤场静态起尘量的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 849-853.

[3] 汪大春. 黄骅港粉尘治理技术研究[J]. 神华科技, 2017, 15(5): 89-92.

[4] 袁源. 煤炭含水率检测及洒水系统[J]. 港口科技, 2017(11): 27-31.

[5] 曹伯航. 散货堆场洒水控制系统的应用与实现[J]. 水运工程, 2013(10): 259-262.

[6] 王永兴. 曹妃甸港智能洒水控制系统设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.

(本文编辑 郭雪珍)