中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统研究*

伯　鑫[1,2,3]　甄瑞卿[4]　屈加豹[2,5]　赵晓宏[2,3]　田　军[6]　张　红[4]　李冬滢[7]　周北海[1#]

(1.北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;2.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012;
3.国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室,北京 100012;4.北京京诚嘉宇环境科技有限公司,北京 100053;
5.河北科技大学环境科学与工程学院,河北　石家庄 050018;
6.南京大学环境规划设计研究院有限公司,江苏　南京 210093;7.北京博世科环保科技有限公司,北京 100012)

摘要　针对目前钢铁行业大气污染物清单编制和管理过程中存在的问题和需求,利用全国污染源排放在线监测(CEMS)数据、环境影响评价数据、环境统计数据、污染源普查数据等资料,建立了基于生产工艺的全国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统,实现了排放清单的动态化管理和编制等功能。以山东省为例,验证了系统清单生成、输出等功能,结果显示 2012 年山东省钢铁企业 SO_2、NO_x、烟粉尘排放量分别为 15.23 万、18.16 万、8.97 万 t,其中烧结和高炉工艺是主要排污环节;从空间分布来看,莱芜、日照两市的钢铁企业污染排放量最大,SO_2、NO_x、烟粉尘排放量合计占山东省排放总量的 50%左右。

关键词　钢铁行业　工艺分析　排放清单　管理系统

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.05.023

Study on the management system of atmospheric pollutant emission inventory for steel industry of China　*BO Xin*[1,2,3], *ZHEN Ruiqing*[4], *QU Jiabao*[2,5], *ZHAO Xiaohong*[2,3], *TIAN Jun*[6], *ZHANG Hong*[4], *LI Dongwei*[7], *ZHOU Beihai*[1].
(1. *School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083; 2. *The Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing* 100012; 3. *State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Beijing* 100012; 4. *CERI eco Technology Co., Ltd., Beijing* 100053; 5. *College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei* 050018; 6. *Academy of Environmental Planning & Design Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing Jiangsu* 210093; 7. *Beijing Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing* 100012)

Abstract: In consideration of the current difficulties and demands existing in the preparation and management of atmospheric pollutant emission inventory, a manufacturing processes based atmospheric pollutant emission inventory management system was established for the steel industry of China. The management system applying the data from national pollution source continuous emission monitoring system (CEMS), environmental impact assessment reports, environmental statistics and pollution source census results, which could achieved the functions of dynamic management and compile of pollutant emission inventory. Then Shandong Province was taken as an example to inspect the established system. The results indicated that in 2012, the total SO_2, NO_x and dust emissions of Shandong Province were 152 300, 181 600, 89 700 t, respectively; sintering and blast contributed most emission among all the production processes; the spatial distributing suggested that steel plants in Laiwu and Rizhao discharged most of atmospheric pollutant, the emission of SO_2, NO_x and dust accounted for about half of the total emission of Shandong Province.

Keywords: steel industry; process analysis; emission inventory; management system

我国是钢铁生产大国,自 1996 年起我国钢铁产量一直稳居世界首位[1]。随着钢铁产量的增加,我国钢铁行业大气污染物排放量也呈现逐年增长的趋势。2009 年,钢铁行业烟粉尘排放量占全国工业烟粉尘排放量的比例由 2005 年的 11.6%上升至 13.3%。面对日益突出的大气污染问题,钢铁行业已成为了区域联防联控、限产限排等的焦点行业之一。开展全国钢铁行业排放清单研究,将有助于推动钢铁全行业的节能减排及环境管理政策制定。

国内外学者对钢铁行业污染排放清单开展了大量研究。伯鑫等[2]以钢铁行业调研资料、企业在线监测数据、污染源调查数据等为基础,自下而上建立

第一作者:伯　鑫,男,1983 年生,博士,高级工程师,主要从事大气环境质量模拟、排放清单研究。# 通讯作者。
*国家环保公益性行业科研专项(No.201509010);国家重点实验室开放基金资助项目(No.16K01ESPCT)。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了基于工艺的京津冀地区钢铁行业排放清单；王堃等[3]根据全国钢铁工业年鉴等统计资料，自上而下建立了2011年中国钢铁行业重金属排放清单；很多研究机构还针对不同区域和行业（水泥、火电、交通等）建立了相应的排放清单[4-23]。目前，关于大气排放清单管理系统方面的研究较为缺乏，大部分排放清单数据来源、数据格式、编制方法存在差异，难以实现对清单数据的统一管理、计算处理以及结果输出等功能[24-26]。

鉴于此，本研究基于全国污染源排放在线监测系统（CEMS）、环境影响评价（简称环评）、环境统计（简称环统）、污染源普查（简称污普）、环保设施等原始数据，通过数据清洗、算法设计、系统开发等，建立了基于工艺的中国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统，实现了对钢铁行业不同口径大气污染物排放数据的统一管理。

1　研究方法

1.1　技术方案

根据钢铁行业调研资料，钢铁行业涉及大气污染物排放的具体环节有焦炉、烧结、球团、高炉、转炉、电炉、轧钢等，主要污染因子为SO_2、NO_x、烟粉尘，本次研究涉及区域包括全国31个省、直辖市及自治区，香港、澳门以及台湾等地区暂不考虑。

由于原始数据的来源、格式、质量、字段均存在较大差异，原始数据不能直接用于排放清单的编制。针对上述问题，本研究设计了排放清单管理系统开发的技术方案：（1）通过对不同口径排放数据（异构数据源）的调研和分析，提出排放清单数据的清洗处理方法，设计排放清单标准数据结构，并完成数据预处理；（2）根据标准数据结构，构建排放数据库，实现数据库端算法开发，完成排放清单数据库的构建，为全国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统的开发提供数据支撑；（3）基于排放清单数据库开发数据引擎和接口，实现排放清单数据的管理、运算和清单生成，构建排放数据管理模块、数据检验提取模块、排放清单生成模块和可视化模块；（4）结合用户管理与权限分配功能开发，完成排放清单管理系统的开发工作，具备数据发布及数据接口功能。

清单计算流程见图1（鉴于污普数据的起始时间为2007年，暂不将污普数据用于污染物排放量计算）。本研究综合考虑了CEMS、环评、环统等原始数据的特点，首先在排放数据管理模块中，以钢铁企业的CEMS原始数据为基础，内置了钢铁行业不同工艺排放参数的取值范围和统计指标，建立了一套数据质量控制系统，对不同口径原始数据（环评、CEMS、环统等）开展海量数据清洗处理优化，剔除相关异常值，得到对应口径的优化数据；在数据检验提取模块中，根据环统数据、排放因子库，采用排放因子法计算得到基于环统数据的钢铁行业大气污染物排放数据。采用在线监测法获得基于CEMS数据的钢铁行业大气污染物排放数据，采用污染源调查法获得基于环评数据的钢铁行业大气污染物排放数据。此后，在排放清单生成模块中，采用优选方案，对上述获取的钢铁行业大气污染物排放数据进行优化整合，优选方案逻辑为：优先考虑CEMS数据，其次考虑采用环评数据补充，最后采用排放因子法对无CEMS数据以及环评资料的企业进行补充计算，从而获得全国钢铁行业大气污染物排放清单，在系统的可视化模块中进行展示。

可见，排放清单管理系统具体功能模块包括排放数据管理模块、数据检验提取模块、排放清单生成模块、可视化模块等。其中，数据检验提取模块、排放清单生成模块、排放数据管理模块等采用客户端/服务器端（C/S）架构，便于线下操作；可视化模块采用了浏览器/服务器（B/S）架构，便于线上展示。

1.2　排放数据管理模块

排放数据管理模块主要包括环统原始数据总览模块、环评原始数据总览模块、环评原始数据录入模块、CEMS原始数据总览模块、环保设施原始数据总览模块等。

在原始数据总览模块中，用户可对导入的环统、环评、CEMS、环保设施等原始数据进行总览、查询、维护；在环评原始数据录入模块中，用户可录入、更新钢铁企业环评报告书中的排放数据信息等，可录入的具体内容包括环评企业名称、建设状态、报告书编号、污染源排口编号、污染源排口名称、污染物浓度、污染物排放量、烟囱参数、产能产量、工序名称、环保设施等。

1.3　数据检验提取模块

数据检验提取模块包括环统排放运算模型参数维护（排放因子）、环统原始数据检验、CEMS原始数据检验、环评原始数据检验、环保设施原始数据检验、污普原始数据检验、数据提取（第一步计算）共7大模块（见图2）。在环统排放运算模型参数维护（排放因子）模块中，用户可更新、修正排放因子参数信息；在环统、CEMS、环评、污普等原始数据检验模块中，用户可更新、修正钢铁原始排放信息；在环保设施原始数据检验模块中，用户可更新、修正钢铁企

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

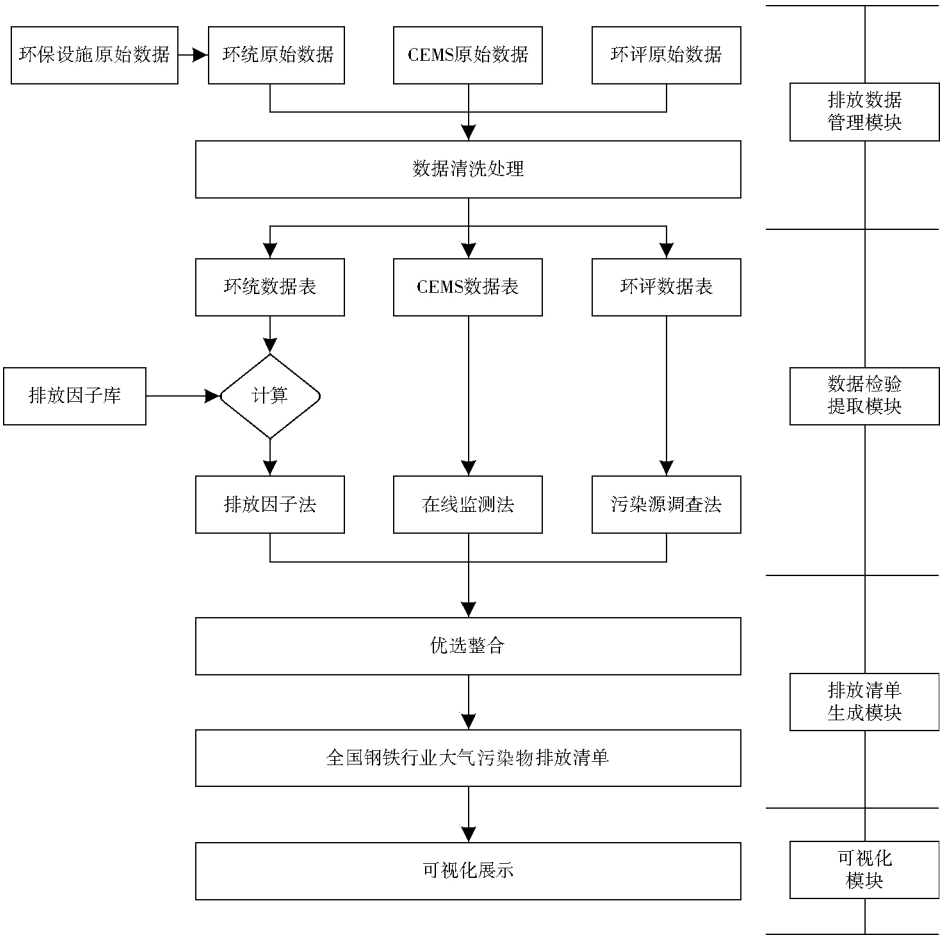


图 1　清单计算生成流程

Fig.1　Calculation and preparation of the inventory



图 2　数据检验提取模块

Fig.2　Module of data validations and extraction

业中环保设施信息(脱硫、脱硝、除尘等);而数据提取(第一步计算)模块的功能是在完成对排放因子参数维护以及与对原始数据检验后,提取所有相关数据,为下一步的清单生成做准备。

1.4　排放清单生成模块

用户在完成数据提取(第一步计算)的基础上,开展清单数据的优选与生成,以企业为单位,对不同口径数据进行优选工作(剔除重复排口信息、剔除质量较差数据等),并利用优选后的数据编制计算企业不同工序的最终排放量,并按用户需求,输出不同年份不同区域的钢铁企业名称、排口编号、工序、工艺、脱硫设备、污染物排放量等数据。

1.5　可视化模块

可视化模块具备数据可视化输出功能,用户可根据地理位置或者企业名称来查询钢铁企业的环统、环评、CEMS 等相关信息,具体可查询每个企业的名称、经纬度、地址、清单排放量、环评报告书、环统信息、在线监测信息等,并对排放污染物、清单年份、不同地理尺度(省、市、网格等)的数据进行多方式输出。

2　案例研究

2.1　研究区域与对象

为验证本系统清单生成、输出、管理等功能,本研究以 2012 年山东省钢铁行业为例,采用全国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统,计算山东省钢铁行业大气污染物排放清单,并定量分析了山东省钢铁企业排放SO_2、NO_x、烟粉尘的情况。2012年

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　2012 年山东省钢铁行业不同工艺污染物排放量

Table 1　Emissions of pollutant discharged in different processes during steel production of Shandong Province in 2012

项目	SO_2		NO_x		烟粉尘	
	排放量/万 t	占比/%	排放量/万 t	占比/%	排放量/万 t	占比/%
焦化	1.48	9.72	0.79	4.35	0.26	2.90
烧结	11.57	75.97	13.27	73.09	4.97	55.38
球团	1.46	9.59	0.71	3.91	0.89	9.92
高炉	0.27	1.77	2.43	13.38	1.36	15.15
转炉	0.04	0.26	0.08	0.42	1.35	15.04
电炉	0	0	0	0	0.11	1.23
轧钢	0.41	2.69	0.88	4.85	0.03	0.38
合计	15.23	100.00	18.16	100.00	8.97	100.00

表 2　山东省各城市钢铁污染物排放量

Table 2　Emission of steel plants in each city of Shandong Province

项目	SO_2		NO_x		烟粉尘		企业数量
	排放量/万 t	占比/%	排放量/万 t	占比/%	排放量/万 t	占比/%	
济南市	2.73	17.93	2.47	13.6	0.85	9.48	4
青岛市	227.69×10^{-3}	1.50	145.59×10^{-2}	8.02	203.88×10^{-2}	22.73	1
淄博市	0.78	5.12	1.58	8.70	0.57	6.35	13
烟台市	0.16×10^{-2}	0.11×10^{-1}	0.88×10^{-2}	0.05	0.60×10^{-2}	0.67×10^{-1}	3
潍坊市	0.29	1.90	0.80	4.41	0.23	2.56	3
泰安市	0.85×10^{-1}	0.56	0.89×10^{-1}	0.49	0.12	1.34	1
威海市	0.15×10^{-1}	0.98×10^{-1}	0.42×10^{-1}	0.23	0.14×10^{-1}	0.16	1
日照市	4.41	28.96	5.89	32.43	1.76	19.62	1
莱芜市	4.85	31.84	3.31	18.23	2.52	28.09	20
临沂市	0.75	4.92	0.78	4.30	0.32	3.57	9
德州市	0.72	4.73	0.93	5.12	0.31	3.46	1
聊城市	0.71×10^{-3}	0.46×10^{-2}	0.43×10^{-2}	0.02	0.12×10^{-2}	0.13×10^{-1}	2
滨州市	0.37	2.43	0.80	4.41	0.23	2.56	2

山东省钢铁企业共 61 家，其中具有在线监测系统的钢铁企业 7 家、环评审批企业 6 家、已纳入环统企业 60 家。

2.2　结果与讨论

2.2.1　不同工艺污染物排放量

根据系统输出结果，2012 年山东省钢铁行业不同工艺污染物排放量见表 1。2012 年山东省钢铁企业共排放 SO_2、NO_x、烟粉尘 15.23 万、18.16 万、8.97万 t。烧结工艺污染物排放量最大，SO_2、NO_x、烟粉尘排放量分别达 11.57 万、13.27 万、4.97 万 t，在山东省钢铁行业 SO_2、NO_x、烟粉尘总排放量中的占比分别为 75.97%、73.09%、55.38%。高炉工艺的污染物排放量也较高，SO_2、NO_x、烟粉尘排放量分别达 0.27 万、2.43 万、1.36 万 t，在山东省钢铁行业 SO_2、NO_x、烟粉尘总排放量中的占比分别为 1.77%、13.38%、15.15%。综合看来，烧结和高炉工艺是山东省钢铁行业大气污染物的主要排放环节，两者排放之和分别占 SO_2、NO_x、烟粉尘总排放量的 77.74%、86.47%、70.53%。

2.2.2　污染物排放的空间分布

根据系统输出结果，山东省各城市钢铁污染物排放量见表 2。由表 2 可见，莱芜市和日照市的钢铁企业污染物排放量最大，SO_2 排放量分别为 4.85 万、4.41 万 t，NO_x 排放量分别为 3.31 万、5.89 万 t，烟粉尘排放量分别为 2.52 万、1.76 万 t。两市 SO_2、NO_x、烟粉尘排放量合计占山东省钢铁企业污染物总排放量的 50%左右。

3　结　论

基于全国 CEMS 数据、环评、环统、污普等数据，建立了基于工艺的全国钢铁行业大气污染物排放清单管理系统，解决了钢铁行业不同口径数据难以管理、计算复杂等问题，提高了钢铁行业大气污染物排放清单的编制效率。通过该系统获取了 2012 年山东省钢铁企业不同工艺的大气污染物排放清单及山东省钢铁企业大气污染物排放的空间分布，实现了不同口径大气排放数据的统一管理。

（致谢：感谢环境保护部环境监察局为本研究提供污染源在线监测资料！）

参考文献：

[1]　郭振中，许晓丹.中国控制钢铁产能的政策演进阶段分析[J].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

材料与冶金学报,2014,13(2):108-111.
[2] 伯鑫,赵春丽,吴铁,等.京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究[J].中国环境科学,2015,35(8):2554-2560.
[3] 王堃,滑申冰,田贺忠,等.2011 年中国钢铁行业典型有害重金属大气排放清单[J].中国环境科学,2015,35(10):2934-2938.
[4] TIAN Yihui,ZHU Qinghua,GENG Yong.An analysis of energy-related greenhouse gas emissions in the Chinese iron and steel industry[J].Energy Policy,2013,56(2):352-361.
[5] RAN Jing,CHENG J C P,GAN V J L,et al.Comparison of greenhouse gas emission accounting methods for steel production in China[J].Journal of Cleaner Production,2014,83:165-172.
[6] HUANG Tao,TIAN Chongguo,ZHANG Kai,et al.Gridded atmospheric emission inventory of 2,3,7,8-TCDD in China [J].Atmospheric Environment,2015,108:41-48.
[7] 雷宇,贺克斌,张强,等.基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J].环境科学,2008,29(8):2366-2371.
[8] 马杰,朱云,王亚杰,等.广东省工业点源大气汞排放清单更新研究[J].环境科学学报,2013,33(9):2369-2377.
[9] 何敏,王幸锐,韩丽.四川省大气固定污染源排放清单及特征[J].环境科学学报,2013,33(11):3127-3137.
[10] NURROHIM A,SAKUGAWA H.A fuel-based inventory of NO_x and SO_2 emissions from manufacturing industries in Hiroshima Prefecture,Japan[J].Applied Energy,2004,78(4):355-369.
[11] FAUSER P,ILLERUP J B.Danish emission inventory for solvents used in industries and households[J].Atmospheric Environment,2008,42(34):7947-7953.
[12] ALYUZ U,ALP K.Emission inventory of primary air pollutants in 2010 from industrial processes in Turkey[J].Science of the Total Environment,2014,488/489:369-381.
[13] REIDY B,DÄMMGEN U,MISSELBROOK T H,et al.Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in Europe:liquid manure systems[J].Atmospheric Environment,2008,42(14):3452-3464.
[14] REIDY B,WEBB J,DÖHLER H,et al.Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in europe:litter-based manure systems[J].Atmospheric Environment,2009,43(9):1632-1640.
[15] CASTELÁN ORTEGA O A,KU VERA J C,ESTRADA FLORES J G.Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico[J].Atmosfera,2014,27(2):185-191.
[16] KIM B Y,FLEMING G G,LEE J J,et al.System for assessing Aviation's Global Emissions (SAGE),Part 1:model description and inventory results[J].Transportation Research Part D Transport & Environment,2007,12(5):325-346.
[17] BORGE R,LUMBRERAS J,RODRÍGUEZ E.Development of a high-resolution emission inventory for Spain using the SMOKE modelling system:a case study for the years 2000 and 2010[J].Environmental Modelling & Software,2008,23(8):1026-1044.
[18] SADAVARTE P,VENKATARAMAN C.Trends in multi-pollutant emissions from a technology-linked inventory for India:Ⅰ.Industry and transport sectors[J].Atmospheric Environment,2014,99:353-364.
[19] PANDEY A,SADAVARTE P,RAO A B,et al.Trends in multi-pollutant emissions from a technology-linked inventory for India:Ⅱ.Residential,agricultural and informal industry sectors[J].Atmospheric Environment,2014,99:341-352.
[20] ARRIAGA COLINA J L,WEST J J,SOSA G,et al.Measurements of VOCs in Mexico City (1992-2001) and evaluation of VOCs and CO in the emissions inventory[J].Atmospheric Environment,2004,38(16):2523-2533.
[21] CHEN C M.The emission inventory of PCDD/PCDF in Taiwan[J].Chemosphere,2004,54(10):1413-1420.
[22] YU Lei,ZHANG Qiang,NIELSEN C,et al.An inventory of primary air pollutants and CO_2,emissions from cement production in China,1990-2020[J].Atmospheric Environment,2011,45(1):147-154.
[23] ZHAO Yu,WANG Shuxiao,DUAN Lei,et al.Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China:current status and future prediction[J].Atmospheric Environment,2008,42(36):8442-8452.
[24] 伯鑫,何友江,商国栋,等.基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用[J].环境工程,2014,32(8):105-108.
[25] WINIWARTER W,SCHIMAK G.Environmental software systems for emission inventories[J].Environmental Modelling & Software,2005,20(12):1469-1477.
[26] SYMEONIDIS P,ZIOMAS I,PROYOU A.Development of an emission inventory system from transport in Greece[J].Environmental Modelling & Software,2004,19(4):413-421.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2016-09-20)

(上接第 577 页)

[3] FAIRCHILD R J.The manufacturing sector's environmental motives:a game-theoretic analysis[J].Journal of Business Ethics,2008,79(3):333-344.
[4] 关华,齐卫娜,王胜洲,等.环境污染治理中企业政府间博弈分析[J].经济与管理,2014,30(6):72-75.
[5] 钱忠好,任慧莉.不同利益集团间环境行为选择博弈分析[J].江苏社会科学,2015,36(4):41-49.
[6] 罗富碧,范波,孟卫东.环境规制下企业清洁生产博弈分析[J].现代管理科学,2015,34(4):18-20.
[7] 陶建格,薛惠锋,韩建新,等.环境治理博弈复杂性与演化均衡稳定性分析[J].环境科学与技术,2009,32(7):89-93.
[8] 潘峰,西宝,王琳.基于演化博弈的地方政府环境规制策略分析[J].系统工程理论与实践,2015,35(6):1393-1404.
[9] 何为,温丹辉,孙振清.大气环境治理演化博弈分析[J].城市发展研究,2016,23(1):1-4.
[10] 张雁林,杜建国,金帅.企业环境污染治理中的三方博弈[J].生态经济(中文版),2015,31(4):29-33.
[11] 宋国君,徐莎.论环境政策分析的一般模式[J].环境污染与防治,2010,32(6):81-85.
[12] 郭根龙.国际经济学[M].西安:西安交通大学出版社,2012.
[13] CHEN Y S,LAI S B,WEN C T.The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan[J].Journal of Business Ethics,2006,67(4):331-339.
[14] YALABIK B,FAIRCHILD R J.Customer,regulatory,and competitive pressure as drivers of environmental innovation[J].International Journal of Production Economics,2011,131(2):519-527.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2016-03-21)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net