# 基于产业结构调整情景下的中国钢铁行业大气污染排放预测*

甄瑞卿[1] 张 红[1] 董广霞[2] 伯 鑫[3,4] 程 刚[5] 郭倩倩[3] 王龙飞[3,4] 赵晓宏[3,4] 李时蓓[3,4]

(1. 北京京诚嘉宇环境科技有限公司,北京 100053; 2. 中国环境监测总站,北京 100012;
3. 环境保护部环境工程评估中心,北京 100012; 4. 环境保护部国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室,北京 100012; 5. 重庆市环境工程评估中心,重庆 401121)

**摘要:** 以钢铁环境统计数据为基础,分析了2012年钢铁行业二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳等排放情况;基于发达国家钢铁产业结构现状,建立了未来我国工业化后的钢铁产业结构优化调整情景,分析钢铁行业大气污染物减排情况。经计算,2012年中国钢铁企业排放二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳分别为191.88万,51.84万,59.14万,15.04亿t,河北省二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳排放量最大,分别占全国总排放量的22.59%、30.35%、35.54%、25.19%;预测产业结构调整后,中国钢铁行业排放二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳排放量分别为16.8万,18.9万,13.86万,6.62亿t,与2012年现状情景相比,分别减少91.24%、63.54%、76.56%、55.98%。

**关键词:** 大气污染;中国;钢铁行业;结构调整;温室气体

DOI: 10.13205/j.hjgc.201706024

## FORECAST ON AIR POLLUTION EMISSION OF CHINA'S STEEL INDUSTRY BASED ON INDUSTRIAL RESTRUCTURING

ZHEN Rui-qing[1], ZHANG Hong[1], DONG Guang-xia[2], BO Xin[3,4], CHENG Gang[5], GUO Qian-qian[3], WANG Long-fei[3,4], ZHAO Xiao-hong[3,4], LI Shi-bei[3,4]

(1. CERI Eco Technology Co., Ltd, Beijing 100053, China; 2. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 3. The Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Beijing 100012, China; 5. Chongqing Environment Engineering Evaluation Center, Chongqing 401121, China)

**Abstract:** Based on the statistical data of steel environment, emission of sulfur dioxide, nitric oxide, smoke and dust, and carbon dioxide from steel industry in 2012 was analyzed; based on the status of steel industrial structure in developed countries, the optimization and adjustment of China's steel industrial structure after industrialization were planned, and reduction of air pollutants in steel industry was analyzed. After calculation, China's enterprises emitted 1.9188 million tons of sulfur dioxides, 0.5184 million tons of nitric oxides, 0.5914 million tons of smoke and dust, and 1.504 billion tons of carbon dioxides in 2012, and most of them were emitted by Hebei Province, respectively accounting for 22.59%, 30.35%, 35.54% and 25.19% of total national emissions; after adjustment of industrial structure, those emitted by China's steel industry were 0.168 million tons, 0.189 million tons, 0.1386 million tons, and 0.662 billion tons, respectively reducing by 91.24%, 63.54%, 76.56%, and 55.98% compared with 2012.

**Keywords:** air pollution; China; iron & steel industry; structural adjustment; greenhouse gas

* 环境保护部基金课题(1441402450017-2);国家重点实验室开放基金课题(16K01ESPCT)。

**收稿日期:** 2016-09-05

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

## 0　引　言

钢铁行业是国民经济发展的基础行业之一，中国钢铁产量自 1997 年起一直排名世界第一，2012 年中国大陆粗钢产量为 7.16 亿 t[1]，占世界粗钢总量的 46.3%，钢铁行业也是大气污染治理、产业结构调整重点关注对象之一。发达国家钢铁行业主要以短流程电炉炼钢为主，而中国以长流程高炉转炉炼钢为主[2-10]，炼铁前段流程(烧结、高炉等)是钢铁行业大气污染物主要排放环节，产生的二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘等大气污染物分别占钢铁行业排放总量的 81.6%、61.4%、66.7%，存在能耗高、污染物排放量大等问题[10-14]。中国钢铁行业大气污染物排放量与其巨大的产量密切相关，而关于未来钢铁行业大气污染排放的研究较少，相关研究主要集中在钢铁行业污染产生机理、污染防治、排放因子、未来产量预测等[14-23]，张艳飞等[24]基于人均钢消费量、人均 GDP 等，预测 2040 年粗钢产量为 6.28 亿 t; 吴文东等[25]基于不同模型组合预测，2020 年粗钢产量为 6.59 亿 t。已有排放清单研究主要集中在重点行业大气污染物历史趋势排放研究，均未系统分析我国钢铁行业结构优化调整情景下的大气污染物排放情况。

本研究以 2012 年中国钢铁环境统计数据为基础，从生产工序入手，分析现状情景下钢铁行业 $SO_2$、$NO_x$、烟粉尘等大气污染物排放情况，并基于发达国家钢铁产业结构现状，设计未来中国钢铁行业结构从长流程高炉转炉炼钢升级到短流程电炉炼钢为主优化调整情景，最终预测未来中国钢铁行业大气污染物排放量，为钢铁行业供给侧改革、化解产能等提供基础数据支持。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区域与基础数据

本研究排放清单数据主要来自于 2012 年环境统计数据，污染因子为 $SO_2$、$NO_x$、烟粉尘、二氧化碳，基准年为 2012 年，区域以中国大陆所有省市为研究对象(香港、澳门特别行政区、台湾省以及西藏自治区暂不考虑)，包括了区域内所有长短流程的钢铁企业。

### 1.2　计算方法

#### 1.2.1　现状排放量计算

采取自下而上方法，逐个企业来计算各个省钢铁行业的大气污染物排放量，计算公式见式(1)：

$$Q_{r,i} = \sum Q_{r,i,j} \tag{1}$$

式中: $Q$ 表示污染物的排放量，环境统计排放量数据，t; $r$ 代表污染物的种类; $i$ 表示省份; $j$ 代表企业。其中二氧化碳排放量为各省的粗钢产量乘以排放因子($CO_2$ 为 2.1 t/t 钢)[26-27]。

#### 1.2.2　未来排放量计算

本研究假设未来中国钢铁行业产业结构调整情况下，各工序排放水平均达到当前一级清洁生产指标[28-29]，钢铁行业大气污染物排放量计算公式见式(2)：

$$Q_r = E_a \times F_{a,r} + E_b \times F_{b,r} \tag{2}$$

式中: $Q_r$ 代表未来中国钢铁行业污染物 $r$ 排放量，t; $E_a$ 代表未来中国转炉钢产量，t; $F_{a,r}$ 代表《钢铁行业清洁生产评价指标体系》一级清洁生产指标，即二氧化硫吨钢产量为 0.8 kg，氮氧化物吨钢产量为 0.9 kg，颗粒物吨钢产量为 0.6 kg，二氧化碳吨钢产量为2.1 t; $E_b$ 代表未来中国电炉钢产量，t; $F_{b,r}$ 代表《清洁生产标准 钢铁行业(炼钢)》一级清洁生产指标，即烟粉尘吨钢产量为 0.06 kg，二氧化碳吨钢产量为 1.05 t[27-28]。

## 2　结果与讨论

### 2.1　排放现状分析

#### 2.1.1　中国钢铁现状分析

2012 年中国粗钢产量为 7.16 亿 t，进口量为 0.1366 亿 t，出口量为 0.5573 亿 t，人口 13.54 亿人，人均粗钢消费量约 497.73 kg/(人·a)，钢铁企业共有 1058 家(图 1)，主要为长流程(焦化、烧结、球团、高炉、转炉、电炉、轧钢等)，生产设备数量为焦炉 265 座、烧结机 1 088 台、球团机 631 台、高炉 1 249 座、转炉 791 座、电炉 400 座。



图 1　2012 年我国钢铁企业分布

Fig. 1　Distribution map of China's steel enterprises in 2012

根据公式(1)计算得出各省排放情况(见表 1)，2012 年中国钢铁企业排放二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳分别为 191.88 万，51.84 万，59.14 万，

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

15.04 亿 t。从区域分布来看，钢铁企业数量最为集中的省份是河北省、山西省、辽宁省，其中河北省有钢铁企业 230 家、山西省有钢铁企业 140 家、辽宁省有钢铁企业 80 家；二氧化硫、氮氧化物排放量最大的 3 个省份均为河北省、山西省、山东省，烟粉尘排放量最大的 3 个省份为河北省、山西省、辽宁省，二氧化碳排放量最大的 3 个省份为河北省、江苏省、山东省。河北省二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳排放量分别占全国总排放量的 22.59%、30.35%、35.54%、25.19%。

表 1 2012 年各省份钢铁污染物排放量

Table 1 Emission of pollutants from steel industry in each province in 2012

| 省份 | $SO_2$ 排放量/万 t | 占 $SO_2$ 总排放量占比/% | $NO_x$ 排放量/万 t | 占 $NO_x$ 总排放量占比/% | 烟粉尘排放量/万 t | 占烟粉尘总排放量占比/% | $CO_2$ 排放量/亿 t | 占 $CO_2$ 总排放量占比/% | 企业数量/个 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 河北省 | 43.35 | 22.592 | 15.735 | 30.352 | 21.014 | 35.535 | 3.790 | 25.188 | 230 |
| 山西省 | 12.458 | 6.493 | 2.998 | 5.783 | 7.868 | 13.305 | 0.830 | 5.513 | 140 |
| 辽宁省 | 8.934 | 4.656 | 3.916 | 7.554 | 4.292 | 7.258 | 1.087 | 7.225 | 80 |
| 江苏省 | 9.248 | 4.820 | 4.441 | 8.567 | 4.009 | 6.779 | 1.558 | 10.355 | 68 |
| 山东省 | 11.515 | 6.001 | 4.794 | 9.248 | 1.875 | 3.171 | 1.251 | 8.314 | 60 |
| 湖南省 | 3.388 | 1.766 | 1.048 | 2.022 | 1.8 | 3.044 | 0.353 | 2.344 | 49 |
| 云南省 | 7.494 | 3.906 | 1.048 | 2.022 | 1.758 | 2.973 | 0.321 | 2.131 | 47 |
| 新疆维吾尔自治区 | 6.66 | 3.471 | 1.164 | 2.245 | 1.62 | 2.739 | 0.239 | 1.588 | 47 |
| 四川省 | 9.117 | 4.751 | 1.098 | 2.118 | 1.289 | 2.180 | 0.352 | 2.337 | 35 |
| 湖北省 | 7.056 | 3.677 | 1.729 | 3.335 | 1.103 | 1.865 | 0.589 | 3.917 | 34 |
| 安徽省 | 3.451 | 1.799 | 0.798 | 1.539 | 1.051 | 1.777 | 0.451 | 2.996 | 32 |
| 河南省 | 10.583 | 5.515 | 1.474 | 2.843 | 0.939 | 1.588 | 0.465 | 3.092 | 32 |
| 内蒙古自治区 | 11.267 | 5.872 | 1.259 | 2.429 | 0.937 | 1.584 | 0.364 | 2.420 | 30 |
| 浙江省 | 2.776 | 1.447 | 0.48 | 0.926 | 0.849 | 1.436 | 0.274 | 1.822 | 24 |
| 广东省 | 3.002 | 1.565 | 0.675 | 1.302 | 0.795 | 1.344 | 0.258 | 1.714 | 23 |
| 福建省 | 4.947 | 2.578 | 1.002 | 1.933 | 0.79 | 1.336 | 0.277 | 1.840 | 21 |
| 江西省 | 10.569 | 5.508 | 1.593 | 3.073 | 0.784 | 1.326 | 0.450 | 2.988 | 20 |
| 甘肃省 | 3.921 | 2.043 | 0.49 | 0.945 | 0.781 | 1.321 | 0.170 | 1.131 | 11 |
| 贵州省 | 1.776 | 0.926 | 0.187 | 0.361 | 0.776 | 1.312 | 0.112 | 0.741 | 12 |
| 天津市 | 2.367 | 1.234 | 1.154 | 2.226 | 0.718 | 1.214 | 0.446 | 2.965 | 11 |
| 黑龙江省 | 2.132 | 1.111 | 0.446 | 0.860 | 0.665 | 1.125 | 0.146 | 0.974 | 10 |
| 上海市 | 1.623 | 0.846 | 1.062 | 2.049 | 0.61 | 1.032 | 0.414 | 2.751 | 7 |
| 吉林省 | 4.29 | 2.236 | 0.961 | 1.854 | 0.603 | 1.020 | 0.247 | 1.639 | 8 |
| 广西壮族自治区 | 2.444 | 1.274 | 0.899 | 1.734 | 0.541 | 0.915 | 0.281 | 1.867 | 8 |
| 陕西省 | 3.508 | 1.828 | 0.588 | 1.134 | 0.378 | 0.639 | 0.174 | 1.157 | 7 |
| 宁夏回族自治区 | 0.695 | 0.362 | 0.133 | 0.257 | 0.313 | 0.529 | 0.005 | 0.030 | 5 |
| 青海省 | 0.785 | 0.409 | 0.036 | 0.069 | 0.31 | 0.524 | 0.030 | 0.197 | 4 |
| 北京市 | 0.001 | 0.001 | 0.023 | 0.044 | 0.003 | 0.005 | 0.001 | 0.004 | 1 |
| 重庆市 | 2.52 | 1.313 | 0.608 | 1.173 | 0.665 | 1.125 | 0.115 | 0.761 | 1 |
| 海南省 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0 | 0.000 | 0 | 0.000 | 1 |
| 全国 | 191.879 | 100.000 | 51.841 | 100.000 | 59.136 | 100.000 | 15.047 | 100.000 | 1 058 |

### 2.1.2 发达国家钢铁现状分析

2010 年，发达国家钢铁比为 0.3327～0.7451，我国铁钢比为 0.9440，除中国外的世界平均铁钢比为 0.5734[30]。英国、法国、美国等先进工业化国家，粗钢消费量峰期(1960—1980 年)达 400～500 kg/(人·a)，后平台期(1980 年之后)呈缓慢下降态势，目前消费量已降至约 200 kg/(人·a)[24]。

## 2.2 未来排放分析

### 2.2.1 钢铁产量预测

2012 年全国粗钢产量为 7.16 亿 t，接近饱和水平，钢消费水平约 497.73 kg/(人·a)。根据表 2 的国家统计局数据，1998—2015 年累计粗钢产量约 80 亿 t，按废钢循环动态平衡的观念，钢铁产品约 10～20 年转化为废钢，根据 17 年折旧计算(1998—2015 年)，由此产生的废钢量将达到 4.7 亿 t/a，按照 50% 的废钢回收利用率，可利用废钢约 2.35 亿 t/a。

根据美国等发达国家钢铁工业产业生命周期，预测未来我国步入发达国家后，粗钢年产量会趋于稳定，但钢铁产业结构、生产工艺将发生较大变化，产业结构由产品同质化、低端化升级到产品专业化、品牌

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

表 2　1998—2015 年我国粗钢产量统计表

Table 2　Output statistics of China's crude steel from 1998 to 2015

| 年份 | 钢铁产量/亿 t | 年份 | 钢铁产量/亿 t | 年份 | 钢铁产量/亿 t |
|---|---|---|---|---|---|
| 1998 | 1.1559 | 2004 | 2.8291 | 2010 | 6.3723 |
| 1999 | 1.2426 | 2005 | 3.5324 | 2011 | 6.8528 |
| 2000 | 1.2850 | 2006 | 4.1915 | 2012 | 7.2388 |
| 2001 | 1.5163 | 2007 | 4.8929 | 2013 | 8.1314 |
| 2002 | 1.8236 | 2008 | 5.0306 | 2014 | 8.2231 |
| 2003 | 2.2234 | 2009 | 5.7218 | 2015 | 8.0380 |

化，生产工艺由长流程高炉转炉炼钢为主升级到短流程电炉炼钢为主。基于发达国家粗钢消费量现状，假设未来我国人均粗钢消费量约 300 kg/(人·a)，人口按 14 亿人计算，需年产粗钢 4.2 亿 t，其中转炉钢、电炉钢产量均为 2.1 亿 t(长流程、短流程产量各占 50%)，年可利用废钢 2.35 亿 t 可满足炼钢需求。

### 2.2.2　污染物排放量预测

基于未来我国钢铁产业结构调整情景，采用公式(2)可以计算得出中国钢铁企业二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳排放量分别为 16.8 万，18.9 万，13.86 万，6.62 亿 t，与 2012 年现状情景相比，二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳排放量分别减少 91.24%、63.54%、76.56%、55.98%。其中，转炉钢生产过程产生二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳分别为 16.8 万，18.9 万，12.6 万，4.41 亿 t，电炉钢生产过程烟粉尘、二氧化碳分别为排放 1.26 万，2.21 亿 t。

## 2.3　建　议

### 2.3.1　完善废钢铁产业支撑体系

电炉大规模取代转炉的工艺革新短期内很难实现，目前拥有短流程电炉炼钢工艺的钢厂从降低成本角度考虑，更倾向使用铁水或炼钢生铁，我国废钢单耗未随废钢积蓄量同步增加。对于用于电炉炼钢的废钢，不能单纯强调精料或低成本，而是要通过延伸废钢资源管理，调整废钢入炉结构，降低铁矿石消耗，提高转炉的废钢应用比，提高炼钢综合效益。

### 2.3.2　开展中国钢铁行业减排策略评估

目前我国钢铁行业需进一步削减钢铁行业大气污染物排放量，并自下而上建立我国最新的基于工序的钢铁行业大气排放清单，对我国钢铁企业大气排放达标情况、排放水平、环保措施、环保投入等多方面综合分析，结合钢铁企业绿色转型、化解产能等政策要求，制定我国钢铁企业减排策略并开展预测评估。

## 3　结　论

1) 本研究分析了 2012 年中国钢铁企业排放情况，其中二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳分别为 191.88 万，51.84 万，59.14 万，15.04 亿 t，从区域分布来看，河北省钢铁企业数量以及污染物排放量均排全国首位。

2) 基于发达国家粗钢消费量现状，预测我国产业结构调整后，转炉钢、电炉钢产量均为 2.1 亿 t，排放二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、二氧化碳排放量分别为 16.8 万，18.9 万，13.86 万，6.62 亿 t，与 2012 年现状情景相比，分别减少 91.24%、63.54%、76.56%、55.98%。

## 参考文献


[1] 工业和信息化部原材料工业司. 钢铁产业发展报告 2013 [M]. 北京：冶金工业出版社，2013：300-320.

[2] 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.

[3] 汪旭颖，燕丽，雷宇. 浅谈我国钢铁行业的颗粒物排放及控制 [J]. 环境与可持续发展，2014，39(5)：21-25.

[4] 毛峰，王华聪，孟庆文. 大型钢铁企业尘污染总量控制优化 [J]. 环境科学，1999(4)：101-104.

[5] 高芯蕊，王安建. 基于"S"规律的中国钢需求预测 [J]. 地球学报，2010，31(5)：645-652.

[6] 陈新良. 钢铁产能过剩分析 [J]. 中国经济报告，2013(4)：66-69.

[7] 冯梅，陈鹏. 中国钢铁产业产能过剩程度的量化分析与预警 [J]. 中国软科学，2013(5)：110-116.

[8] 王曼，肖燕. 浅谈我国钢铁行业的产能过剩问题 [J]. 北方经贸，2010(4)：12-13.

[9] 李士琦，李京社，朱荣，等. 我国电炉炼钢发展雏议 [C] // 中国金属学会特钢冶炼学术委员会，全国大电炉协调组，莱芜钢铁股份有限公司特钢厂. 中国金属学会特钢分会，特钢冶炼学术委员会 2009 年会论文集，2009.

[10] 傅杰，朱荣，李晶. 我国电炉炼钢的发展现状与前景 [J]. 冶金管理，2006(8)：20-23.

[11] 柳克勋，王林森. 短流程钢铁企业发展循环经济的模式 [J]. 再生资源与循环经济，2010，3(1)：4-9，18.

[12] 夏银凤，苍大强，宋阳升，等. 长流程钢铁企业能耗预测模型的开发与验证 [C] // 全国冶金自动化信息网 2014 年会论文集. 全国冶金自动化信息网《冶金自动化》杂志社，2014.

[13] 柳克勋，王林森. 长流程钢铁企业发展循环经济的模式 [J]. 再生资源与循环经济，2009，2(7)：3-9.

[14] 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.


(下转第 179 页)

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

用,故可以作为植物吸收降解多环芳烃菲的强化剂。

## 参考文献


[1] Tao S, Cui Y H, Xu F L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin [J]. Science of the Total Environment, 2004, 320(1): 11-24.

[2] Xu S Y, Chen Y X, Wu W X, et al. Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation [J]. Science of the Total Environment, 2006, 363(1/3): 206-215.

[3] 徐圣友, 陈英旭, 林琦,等. 玉米对土壤中菲芘修复作用的初步研究 [J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 226-232.

[4] Saifullah, Meers E, Qadir M, et al. EDTA-assisted Pb phytoextraction [J]. Chemosphere, 2009, 74(10): 1279-1291.

[5] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 65-72.

[6] 林淑芬, 李辉信, 胡锋. 蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响 [J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 911-918.

[7] 罗琼, 何录秋, 杨文淼. 油葵修复重金属污染农田研究进展 [J]. 现代农业科技, 2016(5): 225-226.

[8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.

[9] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法 [J]. 土壤通报,1980(5): 37-38.

[10] 袁馨, 魏世强, 潘声旺. 苏丹草对土壤中菲芘的修复作用 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1410-1415.

[11] 贾婵, 呼世斌, 张春慧,等. 苏丹草对镉-芘复合污染土壤的修复作用 [J]. 农业环境科学学报, 2014(6): 1139-1145.

[12] 陈楠, 陈光梅. 可分解垃圾回收利用项目的投资分析 [J]. 科技创业月刊, 2011, 24(9): 29-31.

[13] 范淑秀, 李培军, 巩宗强,等. 苜蓿对多环芳烃菲污染土壤的修复作用研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2080-2084.

[14] Arnot J A, Gobas F A. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms [J]. Environmental Reviews, 2006, 14(4): 257-297.

[15] Gianfreda L, Antonietta R M, Piotrowska A, et al. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: Intensive agricultural practices and organic pollution [J]. Science of the Total Environment, 2005, 341(1/3): 265-79.

[16] 王正贵, 封超年, 郭文善,等. 除草剂异丙隆对麦田土壤微生物数量及酶活性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2010(5): 688-691.

[17] Lionetto M G, Caricato R, Giordano M E, et al. Integrated use of biomarkers (acetylcholinesterase and antioxidant enzymes activities) in *Mytilus galloprovincialis* and *Mullus barbatus* in an Italian coastal marine area. [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(3): 324-30.

[19] 王洪, 李海波, 孙铁珩,等. 生物修复 PAHs 污染土壤对酶活性的影响 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 691-695.



第一作者: 刘晋波(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤中有机污染物的植物修复。377976541@qq.com

通信作者: 呼世斌(1955-), 男, 博士, 教授, 主要从事废水处理与资源清洁利用工作。hushibin2003@nwsuaf.edu.cn


(上接第 117 页)


[15] 毛显强, 曾桉, 刘胜强,等. 钢铁行业技术减排措施硫、氮、碳协同控制效应评价研究 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1253-1260.

[16] 马丁, 陈文颖. 中国钢铁行业技术减排的协同效益分析 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 298-303.

[17] 郑瑞芳, 郭秀君, 田明华. 对未来我国钢材需求的预测 [J]. 国际商务. 对外经济贸易大学学报, 2007(2): 54-60.

[18] 王礼. 中国对钢铁资源的长期需求预测 [J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1129-1133.

[19] Yin X, Chen W. Trends and development of steel demand in China: A bottom-up analysis [J]. Resources Policy, 2013, 38(4): 407-415.

[20] Xuan Y, Yue Q. Forecast of steel demand and the availability of depreciated steel scrap in China [J]. Resources Conservation and Recycling, 2016, 109: 1-12.

[21] Warell L. Trends and developments in long-term steel demand-The intensity-of-use hypothesis revisited [J]. Resources Policy, 2014, 39: 134-143.

[22] 马力. 我国钢材消费市场的需求结构分析 [J]. 冶金信息导刊, 2006(3): 26-28.

[23] 龙宝林, 叶锦华. 我国钢铁及铁矿石需求预测 [J]. 中国矿业, 2010, 19(11): 4-6.

[24] 张艳飞, 陈其慎, 于汶加,等. 2015—2040 年全球铁矿石供需趋势分析 [J]. 资源科学, 2015, 37(5): 921-932.

[25] 吴文东, 吴刚, 魏一鸣,等. 基于相关系数的钢材需求量组合预测 [J]. 中国管理科学, 2008(增刊 1): 45-49.

[26] 吴建常. 电弧炉炼钢的技术进展 [C] //2010 年特钢年会论文集中国钢铁工业协会, 2010.

[27] 韩颖, 李廉水, 孙宁. 中国钢铁工业二氧化碳排放研究 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2011, 3(1): 53-57.

[28] 国家发展改革委, 环境保护部, 工业和信息化部. 钢铁行业清洁生产评价指标体系 [R]. 北京, 2014: 4-21.

[29] HJ/T 428—2008 清洁生产标准钢铁行业(炼钢) [S].

[30] 王维兴. 钢铁工业能耗现状和节能潜力分析 [J]. 中国钢铁业, 2011(4): 19-22.



第一作者: 甄瑞卿(1980-), 男, 硕士, 主要从事钢铁行业高阶段设计、环境影响评价工作。

通信作者: 伯鑫(1983-), 男, 高工, 博士研究生, 主要研究方向为排放清单及大气污染模拟。boxinet@gmail.com


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