● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.07.013

铸造废砂资源化利用现状与发展建议——以宁波市为例

张胜权[1],高 欣[2],温小栋[1],冯 蕾[1],李丹妮[1]
(1.宁波工程学院 建筑与交通工程学院,浙江 宁波 315211;2.宁波交投资源有限公司,浙江 宁波 315000)

摘 要:随着铸造业的发展,铸造废砂排放日益增多,现有堆存处理不仅占用大量土地,还带来了严重的环境污染问题。本文从铸造废砂行业发展背景、资源化利用途径及其存在的问题入手,对宁波市铸造废砂的现状进行分析,针对铸造废砂排放量巨大、成分复杂、资源化利用低及监管效能低下等特点提出相应的发展建议,即:通过"强链、延链与补链"方式,建立多产业协同的铸造废砂循环利用系统,使"绿色+"成为新的经济增长点;结合"数字赋能"发展趋势,搭建铸造废砂数据库和信息共享服务系统,提高监管效能并服务产业,全链条提升废砂资源化利用率。

关键词:铸造废砂;资源化利用;建议;数字赋能
中图分类号:TG221 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2022)07-0554-05

Present Situation and Development Proposals of the Resource Utilization of Foundry Waste Sand——Taking Ningbo as an Example

ZHANG Shengquan[1], GAO Xin[2], WEN Xiaodong[1], FENG Lei[1], LI Danni[1]
(1. School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Jiaotou Resources Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: With the development of foundry industry, the discharge of foundry waste sand is increasing day by day. The existing stockpiling treatment not only takes up a lot of land, but also brings serious environmental pollution. In this paper, starting with the development background of foundry waste sand industry, the way of resource utilization and existing problems, the present situation of foundry waste sand in Ningbo was analyzed. In view of the characteristics of foundry waste sand, such as huge discharge, complex composition, low resource utilization and low supervision efficiency, the corresponding development suggestions are put forward, that is, through "strong chain, extended chain and complementary chain" mode, to establish a multi-industry collaborative foundry waste sand recycling system, and make "green +" become a new economic growth point; combined with the development trend of "digital empowerment", the foundry waste sand database and information sharing service system are set up to improve the supervision efficiency and serve the industry, and improve the utilization rate of waste sand resources in the whole chain.

Key words: foundry waste sand; resource utilization; suggestion; digital empowerment

铸造工业是我国的基础工业之一。近年来,我国铸造工业发展较快,2020 年各类铸件累计产量 4 935 万吨[1],成为世界生产铸件的第一大国。我国铸造行业的特点是规模小、铸造企业多、工艺装备水平落后,尤其环保设备不完善,铸件生产过程中不可避免的产生大量的铸造废旧砂。宁波市作为"中国压铸产业基地",2020 年全市有铸造企业 240 余家,总设计产能规模约 140 万吨,从业人员达 2.5 万余人,企业工业销售产值近 200 亿,为宁波市的社会经济发展做出了贡献。然而铸造企业在生产过程中排放出大量铸造废旧砂,因其成分复杂,综合资源化利用低,往往简单堆存处理,带来了资源浪费和环境污染问题。本文全面了解了宁波市铸造废砂资源化利用现状及存在的问题,结合产业发展并提出相关建议,以促进宁波铸造工业的可持续发展。

1 宁波市铸造废旧砂现状

1.1 铸造业基本情况

本次对铸造企业进行调研,结果表明宁波市铸

收稿日期:2022-03-21
基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(201811058006);宁波市科技局重大重点项目(2017C510007)
作者简介:张胜权(2002—),本科生.研究方向:绿色建筑材料研究.Email: ecobmlab@163.com
通讯作者:温小栋(1976—),博士,教授.研究方向:绿色建筑材料研究.Email: wenxiaodong8@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

造件类型主要分为黑色金属铸件和有色金属铸件，其中，有色金属铸件生产成为宁波市铸造工业的一大特点，主要以生产发动机壳体、变速箱等压铸件为主，大部分企业生产规模较小。其次，宁波市块状经济特征明显，从地区分布看，宁波铸造企业主要分布在鄞州、慈溪、北仑、奉化、象山等地。铸铁件的生产主要集中在鄞州、奉化、慈溪、象山，鄞州的东吴、奉化的尚田以生产球墨铸铁和灰铸铁为主。慈溪市的铸铁件产品主要为生产动力与泵阀类铸铁件；象山的铸铁件产品主要为风电铸件、发动机的缸体、抽盖等，且产业集聚性强，铸造模具发达。北仑主要以铝合金压铸件生产为主，其产值占全国压铸模具总产值的50%以上；精密铸钢件产业主要集中在鄞州、奉化等地区，其中鄞州的云龙被称为“精铸之乡”，是宁波精密铸造的发源地。不同地区规模以上企业的分布情况及年产量如图1~2所示。

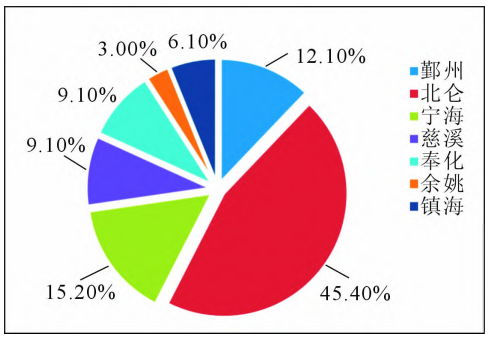

图1　宁波市不同地区规模以上铸造企业分布

Fig.1　Distribution of foundries above designated size in different regions of Ningbo

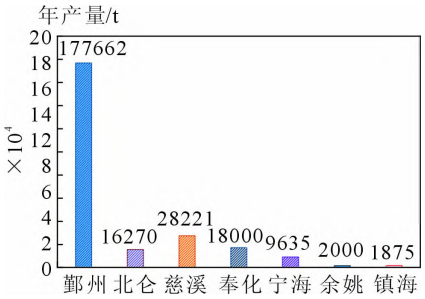

图2　宁波市不同地区规模以上铸造企业年产量

Fig.2　Annual output of foundries above designated size in different regions of Ningbo

铸铁件年产在5 000 t以上的企业占企业总数的11%，铸件产量占总产量的73%；铸钢件年产在3 000 t以上的企业占企业总数的17.3%，铸件产量占总产量的49.7%；铝合金压铸件年产在1 000 t以上的企业占企业总数的14%，铸件产量占总产量的63.2%，如图3所示。

宁波市铸造企业使用的铸造型砂主要包括黏土砂、水玻璃砂和树脂砂等，其中小型压铸件企业以黏土砂为主、铸铁件企业以树脂砂为主(如图4

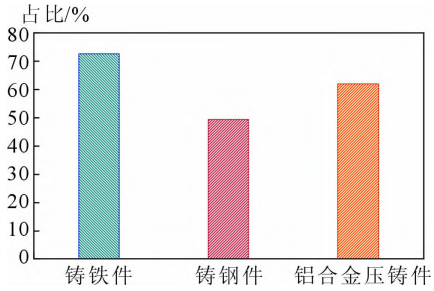

图3　宁波市规模以上企业不同铸件产量占比情况

Fig.3　Proportion of output of different castings of enterprises above designated size in Ningbo

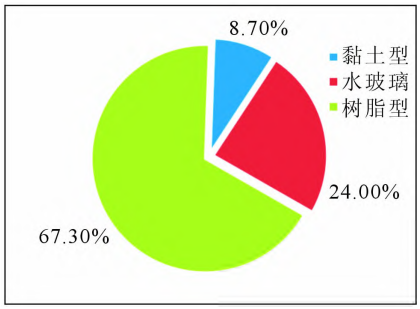

图4　宁波市规模以上铸造企业不同铸造型砂的使用比例

Fig.4　The proportion of different foundry sands used in foundry above designated size in Ningbo

所示)。

然而，砂型铸造会产生大量的铸造废砂，按每生产1 t铸件约产生0.7~1 t的铸造废砂[2]，在如此庞大的生产规模下宁波市预计铸造废砂排放量在140万吨以上。

1.2　铸造废旧砂性质与危害

1.2.1　铸造废旧砂性质

铸造行业在铸造过程中，预先将铸造砂、黏结剂与辅助材料等进行混砂用于造型或制芯，经过浇注、凝固冷却、落砂，最后取出铸件毛坯，同步产生旧砂，所余旧砂中性状改变不大的散砂在此进入混砂环节，发生固化、结块的旧砂不能直接回用，大多企业直接抛弃，成为了铸造废旧砂[3]。铸造废旧砂的主要成分为硅砂、黏结剂、辅助材料、热解残余物及经浇注带入的重金属污染物，但工艺不同得到的铸造废旧砂，其组成也不同，如表1所示。

表1　不同铸造废砂组成[3]

Tab.1　Component of foundry waste sand[3]

类型	组成
黏土型铸造废旧砂	硅砂，未反应的黏土和各类添加剂(膨润土、煤粉等)，烧结的死黏土、经浇注(高温反应)后产物
水玻璃铸造废旧砂	硅砂，已固化的水玻璃黏结剂，经浇注(高温反应)后产物
树脂型铸造废旧砂	硅砂，未反应和反应到不同阶段的树脂及各类有机添加物，经浇注(高温反应)后产物

为进一步了解宁波市的废砂情况，本文对铸造厂提供的铸造废旧砂A(黏土型)、B(树脂型)及C(水

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

玻璃型)进行化学成分分析,如表 2 所示。

表 2 铸造废旧砂的化学成分 w/%
Tab.2 Chemical composition of foundry waste sand

化学成分	A	B	C	化学成分	A	B	C
SiO_2	69.160	96.200	96.210	TiO_2	0.260	-	-
CaO	10.710	0.130	1.020	Cl^-	0.250	0.004	0.267
Al_2O_3	6.290	1.160	3.180	Mn_2O_3	0.020	0.175	-
Fe_2O_3	2.890	0.370	1.760	SrO	0.074	0.030	-
K_2O	2.070	0.380	1.210	NiO	0.007	0.040	-
SO_3	0.810	0.030	0.012	ZnO	0.006	0.003	0.009
MgO	0.770	0.110	0.610	CuO	0.005	0.002	-
Na_2O	0.540	0.160	0.921	LOI	6.780	2.150	1.620

由表可知,铸造废旧砂的基本化学成分为:SiO_2、CaO 及 Al_2O_3,含有丰富的硅砂资源,但废砂中也含有一些来源于金属铸件铸造伴生的微量重金属。此外,废砂的成分也不是一成不变的,它随铸造工艺的不同而不同,如:黏土型铸造废砂中 SiO_2 含量低于树脂型及水玻璃型铸造废砂,CaO、Al_2O_3、K_2O、MgO、SO_3 及烧失量大于树脂型及水玻璃型铸造废砂;水玻璃型铸造废砂的重金属种类与含量少于黏土型及树脂型铸造废砂。这主要是由于黏土型铸造砂采用的黏结剂是膨润土、黏土及少量水泥,另外为改善铸件表面质量,会加入煤粉,因而 CaO、Al_2O_3、K_2O、MgO 及 SO_3 等含量更高,未燃尽的煤粉致使废砂烧失量增大;其次,水玻璃铸造砂中金属铸件为普通碳钢类,所以重金属含量与种类相对少。同时需要注意的是,沿海地区河砂资源缺乏而海砂资源丰富,铸造企业往往采用海砂作为铸造砂的原砂,导致铸造废旧砂中含有高氯离子含量,这是不同于内地城市铸造废旧砂的一个特点。

1.2.2 铸造废旧砂危害

由上述铸造废旧砂化学成分可知,铸造废旧砂任意堆存不仅造成资源浪费且易带来环境问题。当前,宁波大量的铸造废砂长期堆存不仅占用大量土地,而且在外界环境作用下,其有害成分浸出会对大气、土壤及地下水产生“二次污染”。

(1)大气污染 铸造废旧砂对大气产生的污染主要为:一方面,铸造废旧砂中含有一些细小颗粒会随风扩散到大气中形成扬尘,成为 PM2.5 的重要来源[4];另一方面,铸造废旧砂中残余了相当量的煤粉、黏结剂等有机污染物[5],在自然环境作用下会释放出大量的 SO_2、VO_X、NO_X 等大气污染排放物。

(2)土壤与水体污染 铸造废旧砂中残留的有害成分经过雨水冲刷和浸泡下进入土壤和水体。铸造废旧砂的 pH 值通常呈碱性,但呋喃树脂类废砂在造型过程中使用了酸性固化剂导致土壤污染,水体呈酸性[5],同时铸造废旧砂中重金属及有机污染物从固相迁移、渗透进入土壤、地下水,对其产生污染,如:东风汽车公司襄樊基地废砂场浸出液 As 含量为 0.62 mg/L,超过国家一级排放标准[6]。

(3)占用土地资源 当前,铸造废旧砂采用露天堆放或填埋在远离居民区的废山中的处理方式,存在土地负担力度大且企业缺乏管理规划等问题,会造成严重的土地污染。

2 资源化利用途径及存在问题

面对铸造废砂大量堆存所造成的资源浪费和环境污染,国内外业界、学界开始重视铸造废砂资源化利用。国家先后制定出台了《中华人民共和国清洁化生产促进法》、《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等法律法规及指导性文件,同时,铸造行业正提倡绿色铸造。铸造废砂资源化利用的初期,主要侧重于对废砂简单处理后按一定比例替代新砂,配成造型砂,但循环使用几次后仍采用堆存;现阶段,侧重于高附加值利用,最主要的应用领域有制造玻璃、筑路材料、再生砖、混凝土及硅酸盐水泥等,如图 5 所示。

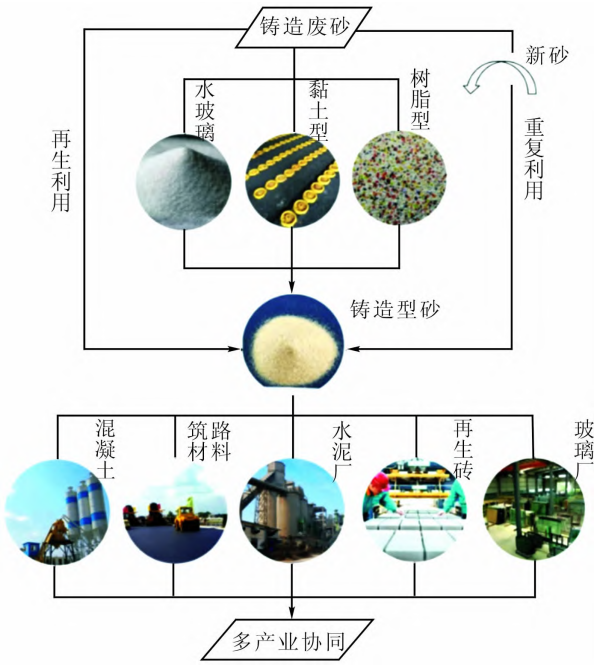

图 5 铸造废砂的再生利用
Fig.5 Recycling of waste foundry sand

2.1 资源化利用途径

(1)制备玻璃材料 以铸造废砂为原料,加入黏土、粉煤灰等,经过高温烧结制备出玻璃基复合材料[7],在烧结过程中,铸造废砂可抑制玻璃的变形,当烧结温度升高后,铸造废砂的强化效果更加明显。

(2)制备筑路材料 将铸造废砂用于筑路材料

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是宁波市现在处理铸造废砂最常用的方法，也是近两年来比较热门的研究方向之一。如，将铸造废旧砂代替15%以内的天然骨料，然后与天然骨料一起添加到热熔沥青之中制备沥青混合料，或将铸造废旧砂部分取代0.075~0.600 mm的天然砂制备水泥稳定基层，提高了废砂的利用价值[8-9]。如果要提高废旧砂的取代率，则要求将废砂进行干燥处理，对表面附着包覆层清理，以及控制残余煤粉含量，否则力学性能、水稳定性等性能会明显下降；另外还需注意，将铸造废砂制备路基时，需要控制铸造废砂中膨润土黏粒的含量，使其不具有膨胀性，以保证路基体积稳定性。

(3)制备再生砖　宁波市内主要以黏土类铸造废砂为主，将其与炉渣做成混合物代替30%原料制作再生砖，与原有红砖相比，铸造废砂基再生砖的物理性能相差不大；也有研究人员提出利用水玻璃型或黏土型铸造废砂制备蒸压砖，但未经表面处理的树脂型铸造废砂不能直接作为蒸压砖的原料[10-11]。

(4)制备混凝土　鉴于天然河砂资源缺乏，研究人员提出采用铸造废砂替代细集料的方式用于制备现浇混凝土和混凝土预制构件[12-13]，但是由于宁波铸造废旧砂的原砂可能会采用海砂，导致废砂氯离子含量超标，不能直接用于钢筋混凝土制备，需要进行氯离子净化或采用氯离子固化技术。

(5)制备硅酸盐水泥　由于铸造废旧砂富含SiO_2、Al_2O_3，可将其替代砂岩，用作水泥生产的校正原料；同时充分利用水泥窑系统高温、长流程、微负压和碱性环境等工艺特点，固化铸造废砂中的重金属、彻底分解有害有机成分，得到无害化、资源化利用。山西中条山新型建材有限公司、日照中联水泥有限公司均开展了铸造废砂替代全部砂岩进行生料配料煅烧硅酸盐水泥熟料的工作，结果表明，煅烧过程中各工艺参数正常，头、尾煤用量、系统结皮状况及烟气排放等均未发生明显变化，出窑熟料质量略有提高，符合国家标准要求[14-16]。

2.2　存在的问题

近几年政府加大企业环保准入的限制，使得企业的环保意识不断提高，同时，社会对可持续发展的呼声也越来越高，在铸造废砂处理应用中直接填埋丢弃的行为逐渐减少，但还存在一些问题：

(1)铸造行业固废管理机制欠佳　首先，铸造废砂行业管理起步晚，管理体制、资源综合利用激励机制不完善，对废砂污染认识及资源化综合利用投入不足。其二，大多数铸造企业还是粗放型生产，仅进行最简单的铸造废砂处理利用，或将铸造废砂混入生活垃圾进行处理、露天堆存，或由固废处理企业及其下游企业完成废砂处理，导致铸造废砂综合利用程度低、再利用产品附加价值不高。最后，铸造企业规模较小、项目布局较散，导致监管较难。

(2)铸造废砂再生技术水平不足　虽然铸造废砂再生设备不断更新，但很多企业的机械化、自动化水平比较低，核心部件的国产化水平较低，环保配套能力有限，且中小型企业受资金限制，设备老旧，与系统化、智能化及绿色化的发展趋势不匹配；其二，不同工艺所形成的铸造废砂，其成分各不相同，对应的利用途径各有不同，导致资源化利用难度增大，处理流程复杂，易影响产品使用性能；最后，铸造废砂资源化利用途径单一、利用率低。因此需大幅度的利用铸造废砂，即提高综合利用率及利用量，便于应对废砂产量庞大的局面，需突破现有的粗放简单的利用模式，寻找出经济、技术可行且可规模化利用的方式以激发企业对其资源化利用的积极性。

3　观点与建议

(1)转变发展观念，构建绿色产业经济增长点　应转变传统发展观念，提高铸造行业的环保和节约资源意识，将铸造废砂资源化利用作为保护环境和解决资源紧张的重要途径之一，倡导绿色铸造、清洁循环理论，使“绿色+”成为新的经济增长点。

(2)以数字化赋能，提高监管效能并服务产业　针对监管困难的问题，建立铸造废砂数据库和信息共享服务系统，如实记录产生铸造废砂的前端铸造工艺、种类、数量、化学成分、流向、贮存、利用等信息，并实现全过程数据共享、信息互联，从而可通过大数据分析，智能化预警和追溯管理，从源头上推动铸造废砂规范化管理，也可为铸造废砂资源化利用提供相应的数据服务。

(3)通过多产业协同，全链条提升铸造废砂资源化　①政府指导、鼓励企业吸引各方资金，对铸造企业进行技术升级和改造，提高废砂再利用的机械化、自动化及绿色化水平，提高铸造废砂综合利用的经济与社会效益。②学习国外先进的技术和管理体制，加大对企业的环保补贴力度、制定并实施合理的固体废弃物收费制度，健全铸造废砂管理体制、标准体系和资源化利用的激励机制；引导铸造废砂资源化利用产业布局，加大铸造废砂资源化利用的科研和资金投入，研发生产附加价值更高的铸造废砂基产品。③树立“大资源”意识，对铸造废砂资源进行梯级开发，并通过强链、延链、补链，形成铸造废砂-生

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

产铸造型砂–生产水泥，铸造废砂–生产铸造型砂–生产轻集料等多产业协同的良好格局，促进资源、环境的协调发展。

4 结语

为积极响应国家提出的“中国制造2025制造行业蓝图规划”，政府部门通过政策上的引导加以技术上的支持，使铸造行业转变传统发展观念，加大铸造废砂资源化处理的研究投入，在绿色发展上取得更大的突破，使“绿色+”成为新的经济增长点。以数字赋能，建立完备的铸造废砂数据库和信息共享服务系统，以提高政务监管服务效能并服务于相关产业，落实闭环处置精准管理，解决资源化处理流程的复杂问题。通过多产业协同、梯级开发和综合利用的方式，延长产业链，彻底解决目前铸造废砂产品单一，附加值低的问题，实现铸造废砂基产品的多样化、高价值化。

参考文献：

[1] 中国铸造协会. 2018年中国铸件产量数据发布[J]. 铸造设备与工艺，2019(2): 6.

[2] 鲁永杰. 铸造废砂再生处理与节能技术的应用[J]. 铸造，2008, 57(8): 830-833.

[3] 宋安安. 铸造废砂的资源化利用途径及其环境影响[J]. 铸造工程，2020(5): 57-62.

[4] 陈森，周晓明，李靖，等. 固体废物填埋场对环境的影响及治理对策[J]. 环境与发展，2018, 30(8): 30, 32.

[5] 张海凤，王玉珏，王劲璘，等. 铸造废砂的环境毒性研究[J]. 环境科学，2013, 34(3): 1174-1180.

[6] 刘芳佞，陶涛，任一，等. 铸造废砂堆放对地下水的影响预测[J]. 环境科学与技术，2004, 27(Z1): 105-108.

[7] SAVIĆ V, TOPALOVIĆ V, MATIJAŠEVIĆ S, et al. Chemical durability of sintered glass-composite prepared from glass cullet and waste foundry sand[J]. Metallurgical and Materials Engineering, 2020, 27(1): 105-113.

[8] ZHANG Y, SAPPINEN T, KORKIALA-TANTTU L, et al. Investigations into stabilized waste foundry sand for applications in pavement structures[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 170:105585.

[9] 魏连雨，李雪，巨利荣. 铸造废砂对水泥稳定基层强度及耐久性影响[J]. 公路，2017, 62(5): 216-220.

[10] 牟艳秋，巴吾东，刘世森，等. 铸造废砂的再利用[J]. 铸造技术，2010, 31(10): 1358-1360.

[11] ANEKE F I, SHABANGU C. Green-efficient masonry bricks produced from scrap plastic waste and foundry sand[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 14(6): e00515.

[12] VIJAYAKUMAR A, RAJA MURUGADOSS J, PRAVEEN S. Development of sustainable concrete using alternative building materials by replacing industrial waste steel slag for aggregates[J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019, 8(6): 2745-2749.

[13] MUSHTAQ S M, SIDDIQUE R, GOYAL S, et al. Experimental studies and drying shrinkage prediction model for concrete containing waste foundry sand[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2021, 2: 100071.

[14] 李明玲，夏宝林，万新军，等. 铸造水玻璃废砂作水泥混合材的试验研究[J]. 再生资源与循环经济，2009, 2(7): 39-40.

[15] 陈为胜，刘希海，严彬，等. 砂岩翻砂废砂在水泥生料配料中的应用[J]. 水泥工程，2021, 2(5): 16-18, 32.

[16] 管锡珺，夏丽佳，仇模凯，等. 莱阳市某铸造厂污染整改措施分析[J]. 环境保护与循环经济，2018, 38(2): 9-10.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net