

中国村镇生活垃圾特性及处理现状

李 丹¹, 陈冠益^{1,2*}, 马文超¹, 段 宁^{1,3*} (1.天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2.西藏大学理学院, 西藏 拉萨 850012); 3.中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要: 为了系统充分了解现阶段我国村镇生活垃圾特性、处理模式及方式, 概述了全国各区域村镇生活垃圾特征, 介绍了村镇生活垃圾的处理现状, 包括收运、分类回收、处理模式以及处置方式. 以青岛农村地区为例, 分析了垃圾产量主要相关因素影响程度大小, 并预测了垃圾产量. 可为各地村镇生活垃圾的特性分析及处理方式选用提供一定的支撑.

关键词: 村镇生活垃圾; 产量组成; 回收转运; 处理现状

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2018)11-4187-11

Characteristics and treatment status of rural solid waste in China. LI Dan¹, CHEN Guan-yi^{1,2*}, MA Wen-chao¹, DUAN Ning^{1,3*} (1.School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2.School of Sciences, Tibet University, Lhasa 850000, China; 3.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2018,38(11): 4187~4197

Abstract: In order to have a comprehensive acknowledgement of rural solid waste (RSW), including its characteristics, disposal modes and treatments in China recent years. This paper summarizes the characteristics of RSW generation in China, its components, and analyzes influencing factors in detail. Also the treatment of RSW was introduced, including its collection, transfer, disposal, and management. RSW in Qingdao City was taken as an example, giving a degree of influences effecting RSW generation and making a prediction of RSW there. Lastly, suggestions regarding the issues towards the treatment of RSW were proposed.

Key words: rural solid waste; generation and components; collection and transfer; disposal status

近年来,我国村镇生活垃圾年产量已超一亿吨,且逐年激增,引发日益关切的环境污染问题^[1].村镇生活垃圾的堆积占用农业用地,危害生态环境与周边居民健康.受地域、气候及经济发展水平等因素的影响,各地区村镇生活垃圾的特征有所不同.目前我国 40%左右的建制村缺失垃圾收集处理设施,亟待加大处理控制力度.综合考量区域地理气候、社会经济发展水平、居民生活习惯及现有工艺技术,合理统筹规划,多层次优化管理措施与处理技术.

村镇生活垃圾的治理是改善农村地区生态环境的重要组成部分.我国村镇分布较广,村镇生活垃圾具有极强的地域性,不同区域垃圾的治理需因地制宜.目前村镇生活垃圾统计性数据相对较少,文章多以介绍某一区域的垃圾特性、转运及处理模式为主,缺少对于全国各区的统计.

本文系统性地介绍了各地村镇生活垃圾的特征、现有的处理模式及处置方式,大多数地区人均日产量为 0.7~1.1kg/(人·d),处理方式随地区地域特点及经济发展水平有所不同.以具体地区为例,对其垃圾产量影响因素进行分析及预测,得出各因素对产

量影响程度的大小,为村镇生活垃圾的治理提供一定的数据基础.

1 中国村镇生活垃圾的特征

村镇生活垃圾通常指在日常生活或为日常生活提供服务活动产生的固体废物^[2].我国村镇生活垃圾组分主要为有机垃圾[40%~50%(wt),食品垃圾、作物秸秆树叶],无机垃圾[20%~40%(wt),灰渣、砖石].

1.1 村镇生活垃圾的产量

2016 年底,全国县城 1537 个^[3],建成生活垃圾无害化处理场(厂)1273 座,生活垃圾无害化处理率 85.22%^[4].卫生部有关数据显示,村镇两级居住社区人均每日生活垃圾产生量分别为 0.5~1.0kg/(人·d)、0.4~0.9kg/(人·d)^[5].韩志勇等^[2]通过实地走访与文献调研的方式,依次采用全国村镇生活垃圾产率中位值、各省产量加和计算得出,2014 年我国村镇生活

收稿日期: 2018-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(51676138,51878557);国家重点研发计划(2017YFC0703101);天津市自然科学基金资助(16JCZDJC396000)

* 责任作者: 陈冠益, 教授, chen@tju.edu.cn, 段宁, 院士, ningduan@craes.org.cn

垃圾产量 1.16,1.48 亿 t.估算结果与同年住建部提出的 1.10 亿 t 产量相当^[6],但较《国家农村环境污染保护规划》(2007~2020)^[6]中 2.80 亿 t 的年产量有所差异.针对各地村镇生活垃圾产量已开展诸多研究,但因所选区域及采用方法的局限性,所得数据普适性不理想^[1,7-8].

表 1 为各省市村镇生活垃圾产生率之间的情况

对比.从中可知,不同地区村镇生活垃圾人均日产量浮动范围较大,整体看,受社会经济发展水平、燃料结构及居民生活习惯等因素的影响,各省(市)、自治区村镇生活垃圾人均产生量呈现南高北低、东高西低的特点,中东部经济较发达地区村镇生活垃圾产生量较西部经济欠发达地区高.

表 1 各村镇生活垃圾人均日产生量
Table 1 RSW generation rate across China

序号	调研地区	年份	调研形式	村镇人均日产生量[kg/(人·d)]	数据来源
1	北京	2008	抽样调查、问卷调查	0.73~1.50	[23]
		2009	抽样调查	0.38	[24]
		2015~2016	抽样调查	0.67	[25]
2	天津	2009	问卷调查	0.768	[26]
		2011	抽样调查	0.75	[27]
		2012	抽样调查	0.8~1.5	[28]
3	河北	2009	问卷调查	0.5	[29]
		2010	抽样调查	1.13	[1, 30]
		2015~2016	抽样调查	0.57	[25]
4	山西	2010	抽样调查	1.0	[31]
		2015~2016	抽样调查	0.44	[25]
5	内蒙古	2015~2016	抽样调查	0.54	[25]
6	辽宁	2010	抽样调查	0.7~1.0	[32]
		2011	抽样调查	0.74~1.27	[33]
		2013	抽样调查	0.94	[16]
		2014	抽样调查	0.8~1.1	[34]
7	吉林	2010	抽样调查	1.25	[1, 30]
		2010	入户调查	1.17	[22]
8	黑龙江	2008	抽样调查	0.46	[35]
		2011	抽样调查	0.31~0.44	[36]
9	上海	2015~2016	抽样调查	0.67	[25]
10	江苏	2014	抽样调查	0.912	[37]
11	浙江	2008	问卷调查	0.9	[17]
		2008	抽样调查	0.48	[38]
		2009	抽样调查	0.7	[39]
		2010	抽样调查	0.83	[1, 30]
		2015~2016	抽样调查	0.52	[25]
12	安徽	2010	抽样调查	0.75	[1, 30]
		2012	抽样调查	0.67	[40]
		2015~2016	抽样调查	0.97	[25]
13	福建	2013	抽样调查	0.82	[41]
		2015~2016	抽样调查	0.65	[25]
14	江西	2010	入户调查、问卷调查	0.4	[42]
		2013	抽样调查	0.18~0.47	[43]
15	山东	2010	抽样调查	0.91	[44]
		2011	抽样调查	0.81~0.993	[45]
16	河南	2015~2016	抽样调查	0.26	[25]
17	湖北	2015~2016	抽样调查	0.8	[25]
18	湖南	2010	入户调查、问卷调查	0.32~0.41	[46]
18	湖南	2015~2016	抽样调查	0.52	[25]
19	广东	2010	抽样调查	0.974	[20]
		2011	抽样调查	0.73	[47]

续表 1

序号	调研地区	年份	调研形式	村镇人均日产生量[kg/(人·d)]	数据来源
20	广西	2009	入户调查	0.12~0.26	[48]
		2010	入户调查、问卷调查	0.16	[42]
		2012	抽样调查	0.617	[49]
21	海南	2008~2009	入户调查、问卷调查	0.227	[50]
		2010	问卷调查	0.273~1.055	[51]
22	重庆	2010	入户调查、问卷调查	0.328	[52,53]
		2015~2016	抽样调查	0.46	[25]
23	四川	2010	问卷调查	0.62	[54]
		2012	抽样调查	0.568	[55]
		2014	入户调查、问卷调查	0.227	[56]
24	贵州	2010	抽样调查	0.6~1.2	[57]
25	云南	2010	抽样调查	0.58	[1, 21]
26	西藏	2012	抽样调查	0.085	[58]
27	陕西	2012	入户调查、问卷调查	0.44	[59]
		2012	入户调查、问卷调查	0.66	[60]
28	甘肃	2012	入户调查	0.5	[61]
		2015~2016	抽样调查	0.66	[25]
29	青海	2003	入户调查、问卷调查	0.2~1.5	[62]
30	宁夏	—	—	—	—
31	新疆	2009	问卷调查	1.5~1.8	[63]

同地区村镇生活垃圾产量与农户类型(纯农户、农业兼业户、非农兼业户及非农户)、生活燃料来源、人均年收入及养殖类型有关^[9].人口多、人均收入高及旅游型村镇生活垃圾人均产生量较大^[10~11],使用煤作为主要燃料的农户垃圾产量低于未采用煤作为燃料的农户,纯农户及养殖类型的农户可自行消纳部分垃圾^[12~14].另外,村镇生活垃圾产量受时节影响较为严重,辽宁^[15~16]、浙江^[17~18]、广东^[19~20]及云南^[21~22]同年不同月份的生活垃圾产量有较大的波动,农忙时期因喷洒农药故而农业废弃瓶等废弃物较多,农闲时期外出打

工人员相对较多致使生活垃圾产量相对较少.

图 1 中为 2015~2016 年我国部分省(市)城市与村镇生活垃圾人均日产生量的对照.由于中国城乡二元经济结构导致村镇区域社会经济发展水平普遍低于城市,村镇居民日常崇尚节俭、有多种垃圾处理利用途径,村镇生活垃圾人均日产量普遍低于其对应城市.中部地区如山东、河北等省份农村地区因人口密度大、城乡一体化村镇数量多,导致村镇生活垃圾人均日产量与城市人均日产量接近甚至反超.

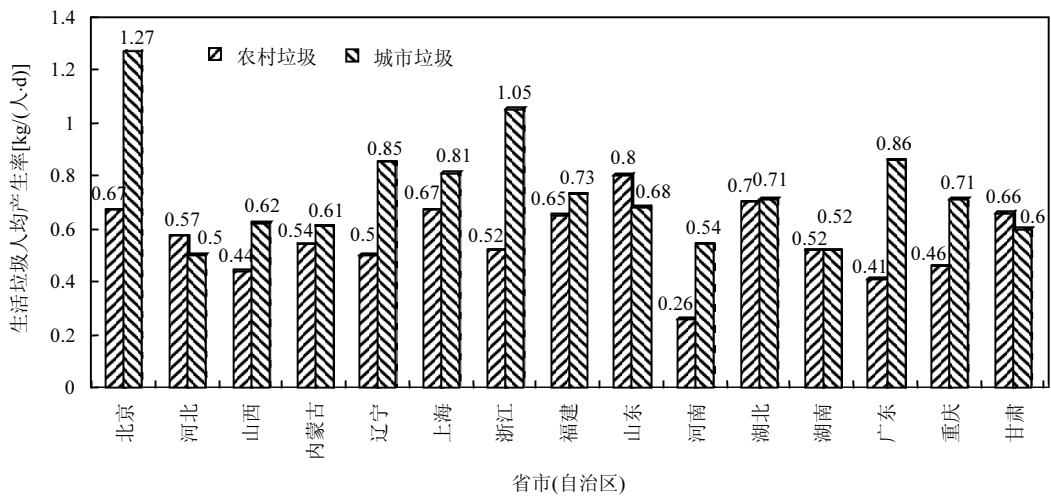


图 1 2015~2016 年中国部分省(市)所辖城市与村镇生活垃圾人均日产量对照

Fig.1 The comparison of RSW and MSW generation rates in some provinces/cities

辽宁选取 2014 年数据;因目前无关于各省市(自治区)城市生活垃圾总量的统计数据,故采用统计年鉴中的生活垃圾清运总量作为各地的生活垃圾总量

1.2 各地村镇生活垃圾的组成

我国 7 个地区村镇生活垃圾典型组分的组成特点如图 2 所示.村镇生活垃圾主要由厨余类与灰土类垃圾组成;南方厨余垃圾占比高于北方地区,且南方地区垃圾含水率较高;纸类、橡塑类含量呈由南向北递减的趋势,其中南方橡塑类含量高于全国平均水平,东部地区高于西部地区;灰土类含量呈现明显的由北向南递减的趋势;另外,西北及东北地区的金属含量明显高于其他地区,华东地区的木竹及砖瓦陶瓷类废弃物含量远超于其他地区.以上现象与各区域特色及产业结构极为相关,西北及东北仍有大部分地区采用煤作为主要燃料,使得废物中金属含量较高,山东、安徽、江苏及浙江等省份园林业发达,同时村镇居民乐于使用竹木质家具,江西、福建等地陶瓷产业相对兴盛,产生更多的陶瓷类垃圾.

不同地区村镇与对应城市的生活垃圾组成同样存在差异,对比情况如表 2 所示.各地区村镇生活垃圾组成相差较大,相同行政区域城市与村镇生活垃圾组分差异相对略小.村镇生活垃圾中,厨余组分、玻璃、金属及灰土砖瓦陶瓷类惰性组分的占比高于城市生活垃圾;中东部沿海经济发达区域的村镇地区,其纸类、橡塑类及纺织类的组分占比接近甚

至高于其在城市生活垃圾中的占比;边陲地区如海南、西藏等,因特殊的地理气候条件,村镇生活垃圾的组成特点独特,其中西藏地区由于特有的生态环境、人文环境和社会经济发展特点,具有独属于该区域的城市、村镇生活垃圾组成的特点.

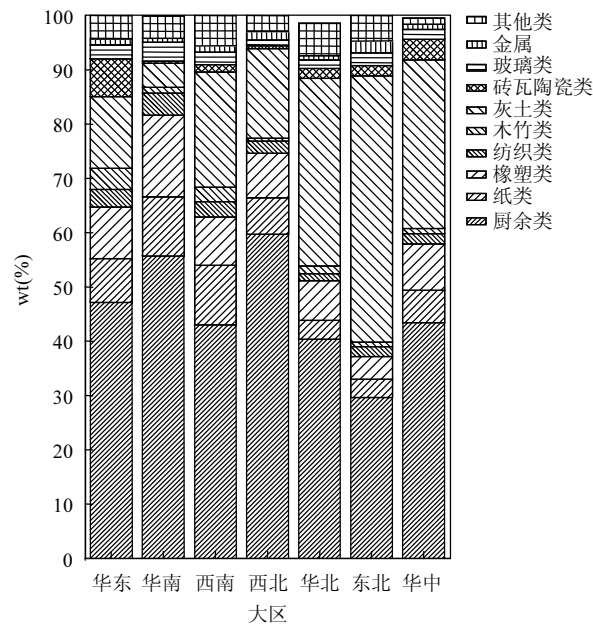


图 2 中国各大区村镇生活垃圾典型组分的分布
Fig.2 Components of RSW typical components distributions in different regions of China

表 2 部分农村与城市的生活垃圾成分对比
Table 2 Composition of solid waste in some rural areas and cities

地区	类别	厨余类	纸类	橡塑类	纺织类	木竹类	灰土类	砖瓦陶瓷类	玻璃类	金属类	其他类
北京	市区 ^[78]	53.96	17.64	18.67	1.55	3.08	2.15	0.57	2.07	0.26	0.05
	农村 ^[79]	26.28	3.94	5.48	1.16	3.05	57.47	1.5	0.9	0.16	0.06
沈阳	市区 ^[64]	59.77	7.85	12.85	3.61	2.52	2.23	3.11	5.40	2.01	0.64
	农村 ^[65]	4.43	0.08	0.14	0.13	0.19	94.00	0.03	0.97	0.03	0
上海	市区 ^[66]	72.49	6.01	13.79	2.14	1.88	0	0.28	3.09	0.24	0.09
	农村 ^[67]	50.00	2.00	5.00	5.00	10.00	3.00	15.00	15.00	0	0
杭州	市区 ^[68]	61.52	7.18	14.52	2.01	1.31	9.13	1.49	1.94	0.81	0.12
	农村 ^[69]	43.71	8.13	14.48	3.73	4.10	11.98	5.46	4.69	0.62	3.07
合肥	市区 ^[40]	48.33	13.08	20.19	3.38	3.37	4.94	3.25	2.66	0.82	0
	农村 ^[40]	28.26	17.85	23.65	2.59	5.74	13.72	5.93	2.13	0.14	0
青岛	市区 ^[70]	69.00	9.50	8.40	3.00	0.30	6.30	0.30	2.20	0.90	0.10
	农村 ^[71]	32.80	3.20	5.40	1.30	0.90	39.20	14.50	2.30	0.20	0.20
海南白沙黎族自治县	城区 ^[72]	47.44	5.94	12.46	1.92	0	0	6.53	2.84	2.56	20.31
	农村 ^[72]	54.12	10.76	10.10	0.18	2.98	0	2.08	5.00	0.53	14.53
四川泸州	市区 ^[73]	59.60	10.30	16.80	1.80	2.87	5.50	0	1.60	1.53	0.00
	农村 ^[56]	57.55	8.35	8.30	0.47	6.95	7.31	0.50	2.55	0.67	7.38
拉萨	市内 ^[74]	20.45	23.74	14.84	4.50	2.76	22.83	0.00	4.73	5.12	1.03
	农村 ^[58]	12.77	10.73	20.77	5.91	10.26	33.12	2.04	1.83	1.54	1.02

除了以上产量、组成等特征外,村镇生活垃圾平均容重为 256.25kg/m³,垃圾湿基低位热值平均值为

3611kJ/kg(北方村镇生活垃圾热值高于南方地区^[75]),有机质含量可达(49.04±10.49)wt%,碳氮比为

43:1,碳磷比为 144:1^[76-77].村镇生活垃圾重金属 Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn 含量分别为(0.74±0.48)、(21.80±17.61)、(3.36±11.01)、(108.63±84.01)、(36.83±10.91)、(80.09±42.24)mg/kg,与国内相关标准相比 Cd、Hg 超标^[78].

综上可知,我国村镇生活垃圾具有极强的地域性、明显的分散性,且区别于其各自对应的城市生活垃圾.若机械地将城市生活垃圾的管理方式、处理技术手段用于村镇生活垃圾不是最佳方式,应充分考

虑村镇生活垃圾的特点对其进行处理.

2 中国村镇生活垃圾处理现状

2.1 村镇生活垃圾的收运及分类回收现状

2.1.1 村镇生活垃圾的收运现状 村镇生活垃圾收运系统由收集、清运、转运环节构成,收集和中转运输部分构成了生活垃圾的转运系统.现有的转运系统模式有直运模式、中转模式及组合模式,表 3 中列出了各转运模式的特点及部分运行地区.

表 3 村镇生活垃圾转运模式及其特点、适用地区
Table 3 Characteristics and application zones of different RSW transfer modes

模式	转运特点	适用地区	实例
直运	设立“村收集站”,直接将农村生活垃圾收集后从村级收集站运到市级填埋场	县城面积小,垃圾量小	四川眉州丹棱
中转	减少“村收集站”,设立“镇转运站” 统一中转运输后到垃圾焚烧厂	垃圾量大 经济发达的县市	江苏苏州太仓
组合	组合模式,既有“村收集站” 又有“镇转运站”	地域面积较大 垃圾量较大的县市	安徽滁州市

对于村镇生活垃圾转运模式的选择,除了结合县市自身特点,综合考虑地域范围、人口分布、垃圾量以及交通情况等在内的因素外,还需做全面的经济指标测算(建设投资及运行成本等)^[37].混合处理生活垃圾的前提下,集中处理县级及以上行政区范围的生活垃圾虽有利于控制环境影响,但运输和转运费用过高;对于垃圾密度低或经济承受力弱的区域,高成本的投入、运行及维护不利于村镇生活垃圾处理技术的推广.村镇县组合处理模式虽可有效协调处理过程中环境与经济影响,但技术路线仍需提升优化^[79].

各地村镇生活垃圾转运方式不尽相同,以上海为例,上海市郊镇区垃圾收集点(站)的设置类型和指标要求等与市区基本一致,参照上海市地方标准执行,市郊村镇已建成生活垃圾收运系统,村庄垃圾全部实现清运^[80];同时新型模式也有提出,如一种新型的城乡一体化收运模式,配套采用“就地消化垃圾+外运垃圾”处理方式、“分散+集中处理半径”转运方式^[81],流程见图 3,该模式在实现村镇生活垃圾城乡一体化收运的基础上,将各方消耗及对环境的危害降到最低.

2.1.2 村镇生活垃圾的分类回收现状 现阶段我国村镇生活垃圾终端处理手段主要为简易焚烧和简单填埋,较低的垃圾分类水平导致末端处理效果不佳^[82].王涛等^[43]经过取样调研分析得知,江西省赣州市东江源区农村生活垃圾以厨余类垃圾为主(占垃圾≥60wt%,主要成分为有机垃圾),混合垃圾平均热值为 2329kJ/kg,不适合直接焚烧处理,需对其分类之后再集中处理;周宁县面临着同样的问题,生活垃圾可焚烧成分(木屑、塑像、纺织品和纸类)约占 13wt%,厨余、果皮等腐殖性有机物成分约占 21wt%,县城现阶段焖烧炉焚烧的效果并不理想^[83].

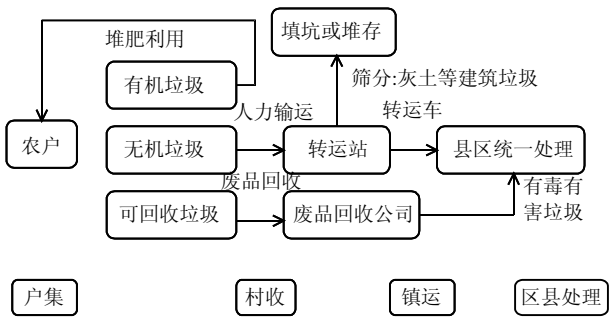


图 3 城乡一体化收运流程
Fig.3 Collection and transportation of solid wastes using urban-rural integration mode

戴迎春调研分析得知^[84]:上海城镇一体型村镇与市区生活垃圾组成相近,上海市垃圾分类工作的四分类标准适用于村镇.调查村镇住户环保意识较强、垃圾分类参与意愿较高.可设立湿垃圾处置设施,减少外运量就地处理;沈文玺等^[85]通过走访浙江省安吉县 12 个村镇发现,当地居民虽环保认知程度较高,但受主客观因素的影响,日常生活垃圾循环利用的人数极为有限.因此提出在现有的管控机制上,加大网络媒体等宣传力度,就妨碍因素针对性进行解决,以期居民可自主参与垃圾减量化,建议鼓励非政府组织机构参与垃圾减量处理工作.

对长沙及周边农村地区生活垃圾分类成效和经济效益的分析:源头二次分类、一次分类分别可减少 85.9wt%与 38.89wt%的有机垃圾,源头二次分类方式优于源头一次分类方式,分类投放收集后的二次分类使终端处理的垃圾量减小 30wt%以上^[86].结合存在的问题及现状可知,加强村镇住户的环保意识

识迫在眉睫,针对垃圾分类要加强宣传及科普力度,协调各方组织机构加强村镇生活垃圾的分类,加强回收及后续终端处理.

2.2 村镇生活垃圾现阶段的处理模式及处置方式

2.2.1 村镇生活垃圾的处理模式 目前,我国应用的村镇生活垃圾处理模式大体分为 3 类:城乡一体化、城乡协同以及城乡分别处理.

城乡一体化处理模式即集中处理,表现为“村收集、镇运输、县处理”,也称为“全集中”模式,在县一级设施处理处置收集的村镇垃圾,焚烧或填埋是主要的终端处理手段,城乡协同处理模式在县、镇和村同时建有生活垃圾处理设施,生活垃圾分类后分别在县、镇和村进行处理处置.城乡分别处理模式则是县、镇和村分别建有完全独立或半独立的设施进行生活垃圾的处理,其中完全独立处理的方式即是“全分散”模式.3 种处理模式物流特征及各级政区处理功能如表 4 所示.

表 4 村镇生活垃圾处理模式和村、镇及各政区的处理功能
Table 4 The disposal modes of RSW and the roles of village, town and county

处理模式	物流特征	规模	政区与处理功能		
			村庄	镇(乡)	县或以上政区
城乡一体	全集中	规模化集中处理设施	收集-清运	收集-清运-转运	收集-清运-处理
	全分散		收集-处理	收集-处理	收集-清运-处理
城乡分别	镇县集中	规模化集中处理设施,小规模处理设施	收集-处理	收集-转运	收集-清运-处理
	镇县分别集中		收集-清运	收集-处理	收集-清运-处理
	镇县局部协同		收集-处理	收集-处理-转运	收集-清运-处理
城乡协同	村镇县协同	规模化集中处理设施,小规模处理设施	收集-处理-清运	收集-处理-转运	收集-清运-处理

注:城乡分别处理模式中镇级处理设施规模<50t/d,村级处理设施规模<10t/d;城乡协同处理模式中镇、村两级单位处理设施仅处理分类垃圾(可降解组分和无机组分)^[87].

城乡分别处理模式中的“全分散”模式可实现生活垃圾收集和就地处理的直接衔接,成本低适用于远郊及偏远村镇,但因处理规模有限一般难达到无害化处理标准.对于城乡一体处理模式存在的缺陷已有大量文献分析,问题之一集中在村镇生活垃圾中可降解组分(厨余垃圾及农林废弃物等)的回收利用上,厨余垃圾及农林废弃物等可就近处理,而城乡一体化处理模式则将可降解组分长途运输到某一聚集点后再进行处置,过程中难免造成资源浪费及二次污染^[88],不利于实现低成本低污染低能耗处理村镇生活垃圾;出于集中处理对收运条件、成本的高要求,对经济欠发达的农村而言具有不小的局限性.综合考虑环境、管理和经济投入,农村生活垃圾

处理的重点集中在镇级行政单位更为合理.

2.2.2 村镇生活垃圾的处理处置方式 目前我国多数村镇对垃圾定期收集、清运,但过程仍有待规范.东西部地区垃圾非规范化处理的村镇分别占 20.83%和 45.24%,东北地区未规范化处理村镇的比例更是高达 87.5%.资金紧缺、收运成本高、管理体系不完善等原因导致现阶段就地简易填埋、露天焚烧等非正规化方式仍是处理处置垃圾的主流手段,同时城乡转嫁型垃圾也给村镇生活垃圾的终端处理方式带来一定的挑战.

针对现阶段处理模式及管理方式手段存在的问题,各地机构学者提出了不同的解决方案:

辽阳市村镇生活垃圾治理体系包括生活垃圾

分拣投放系统、生活垃圾收集系统、生活垃圾转运系统和生活垃圾处理系统.从当地村镇生活垃圾的特点出发,结合环境卫生设施布局,提出构建“一心、七片、多点”的村镇生活垃圾治理体系结构^[34].

基于我国村镇生活垃圾组成的特点,何晶晶等^[5]提出了“分类分散处理与集中处置结合”的技术路线,总量 60%~80%(wt)的垃圾可就地处理,以此降低处理总成本、提高无害化水平.加速推进我国村镇生活垃圾处理技术规范,推广全过程专业化运营模式,加强垃圾处理过程物流管理等.

侯世游^[89]认为村镇生活垃圾处理应充分利用环境巨大的自净能力,就近最大量分类处理垃圾,将需要集中收运处理的垃圾量降到最低点,最大程度降低村镇生活垃圾处理的费用.提出了村镇生活垃圾三次分化处理的处理模式:第一级分化-村镇居民生活垃圾成分的分类收集与处理;第二级分化-专门处理大规模和成分单一的垃圾,分化对象主要为乡镇街道、大规模养殖场和乡村各类型企业;第三级分化-根据有机垃圾的特点进行针对性处理.高意等^[31]结合陕西省隆坊镇现状特点,提出了村镇处理结合,以村级单位初步处理达到垃圾的减量化、资源化,再通过镇级单位处理实现无害化处理.

村镇生活垃圾的终端处理方式,有关于生物及热转化等处理技术的研究.

李世贵等^[46]以湖南省长沙县和安徽省巢湖市等地近郊农村的可降解类生活垃圾为实验对象,制作出有机质含量高于国标的有机肥,提出将就地处理手段结合转运处理模式作为我国南方农村生活垃圾处理的潜在性方式;李志龙等^[90]选取来自 12 个省市(包括东部 4 个省市、中部 4 个省、西部 2 个省市及东北 2 个省)的 36 个村镇的生活垃圾进行分析,结果表明只有 Hg 和 Cd 含量超标,村镇生活垃圾具有很好的堆肥潜力;周文敏^[91]采用静态厌氧快速稳定技术研究了村镇生活垃圾的厌氧填埋,探究了复合填料层对生活垃圾渗滤液中的挥发性脂肪酸(VFA)的缓冲效能,研究结果证实静态厌氧快速稳定技术可用于村镇生活垃圾填埋.

冯庆革等^[92]提出一种水泥窑协同处置新模式,将村镇生活垃圾处理后随三次风直接喷入分解炉,在 80t/d 的掺烧范围内,村镇生活垃圾对水泥窑工况、水泥熟料品质以及窑尾污染物排放的影响不明

显,可以实现生活垃圾的减量化、无害化及资源化;韦超等^[93]通过回转窑对福建村镇垃圾进行热解气化处理,在过量空气系数为 0.4、空气预热温度为 500℃的实验条件下,热解气化效率达到最大值、焦油产量最小、底渣和飞灰中重金属及二噁英含量均低于国家排放标准.

我国大部分地区村镇垃圾量小、分散,决定了其处理技术及设施投入不能过大、运行维护不能复杂.在环保标准愈发严格的形势下,村镇垃圾的处理不能采用城市大规模垃圾焚烧技术.垃圾焚烧技术投入大、运行维护复杂、成本高.成熟的垃圾焚烧技术一般适合 800t/d 的处理量,即使考虑技术发展与适应性降低规模,处理量也在 500t/d 左右,否则单位垃圾的处理成本高,难以承受.热解气化技术是在缺氧还原气氛中将大分子的化合物裂解生成小分子的过程,烟气处理系统较简略,二噁英、脱硝处理过程大幅度简化,硫化物、氯化物的腐蚀及处理相对简单,具有小规模处理的技术特色与优势,因此在严格环保要求下,进行小中规模的生活垃圾处理具有成本上的显著优势.此外,我国现行的村镇生活垃圾收运体系、处理模式、处置方式均较为单一,缺少针对区域特色设立的独有体系,加之居民环保意识有待提高、各组织机构发挥作用有限,对于村镇生活垃圾处理,包括收运、处理、管理均有很大的提升空间.

3 村镇生活垃圾主要影响因素分析及产量预测

随着环境库兹涅茨曲线理论(EKC 曲线理论)被运用到城市垃圾排放的研究中^[94-97],我国城市生活垃圾排放量与收入水平间被认为存在倒 U 关系^[98-101].对于村镇生活垃圾排放量与村镇经济发展水平之间的关系,Huang 等^[1]预测符合 EKC 曲线理论,即村镇生活垃圾排放量与人均收入之间呈现倒 U 曲线的关系,拐点出现在人均纯收入 1.75 万元/a 时,以此可知当前我国村镇生活垃圾的产生量仍处于上升阶段.

如本文第二部分所述,村镇生活垃圾总量及组成受地域、城乡差异、居民生活习惯等影响.此外,人口密度、居民人均收入、村镇基础建设投资以及居民受教育水平等均发挥着不同程度的作用^[102].由于个体因素无法做定量化研究,因此采用可定量化的因素分析其对村镇生活垃圾产量的影响,并预测

村镇生活垃圾的产量^[103].村镇生活垃圾产量与其影响因素之间存在不确定性和模糊性,这两点符合灰色数据特征,灰色关联度恰好可以较好地度量各个因素之间的关联程度^[104].因此,采用灰色关联分析与 BP 神经网络组合的方式来预测青岛市村镇生活垃圾产量.

3.1 村镇生活垃圾主要影响因素灰色关联分析

对于影响村镇生活垃圾产量的各影响因子,难以确定因子间的数量关系、系统的主要因子和次要因子,这类问题在数学上称之为灰色系统,是概率统计与模糊数学所不能解决的部分^[105-106].在灰色系统中分析各个因素的主次(影响程度大小),常借力于灰色关联分析.

在此采用灰色关联分析完成对村镇生活垃圾排放量影响因素的分析,选取青岛地区 2000~2011 年的人口数、农村居民人均生活消费支出、农村居民人均居住面积以及农作物播种面积作为输入向量,人均垃圾产量作为特征因素进行分析.对指标数据的无量纲化采用初值化法,将灰色关联度

的分辨系数取为 0.5,具体计算结果见表 5.

对于村镇生活垃圾排放量而言,选取的几个影响因素中,灰色关联度大小均大于 0.5,对应的灰色关联度大小排序为:农作物播种面积($r_4=0.89$)>人口数($r_1=0.81$)>农村居民人均居住面积($r_3=0.62$)>农村居民人均生活消费支出($r_2=0.59$).其中农作物播种面积影响程度最大的原因为:村镇生活垃圾中除了自行消纳的部分外,还包括来源于农业生产过程如大棚所用塑料膜、喷洒农药遗留废弃瓶等,随着现代农业技术设备的推进,先进的技术设备势必带来大量的废弃物;居民人均生活消费支出所对应灰色关联度相对较小,原因有村镇生活垃圾现阶段较少,村镇居民环保意识较弱.

3.2 BP 神经网络预测村镇生活垃圾产生量

人工神经网络由许多相互联系的相似处理单元(神经元)组成.人工神经网络结构如图 4 所示,它由输入层、隐含层、输出层组成.每层有多个节点(即神经元),每个箭头带有一定的连接权值,层内各神经元之间无连接^[107].

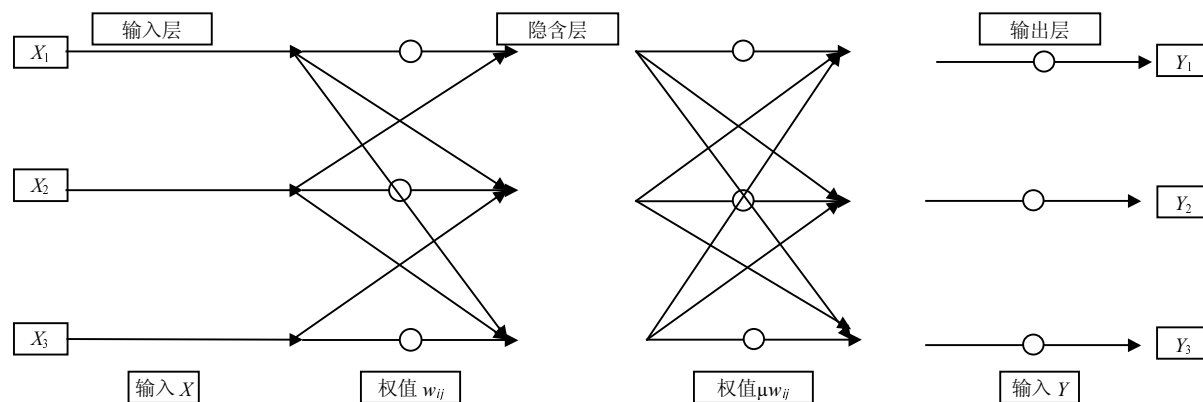


图 4 人工神经网络示意

Fig.4 Diagram of artificial neural network

本文建立的是以时间序列为基础的 BP 神经网络模型.BP 算法分两步进行,即正向传播和反向传播^[108].结合上述灰色关联度与 BP 神经网络组合来预测青岛市村镇生活垃圾产生量.

由于输入向量的数据具有不同的量纲,对预测模型的输入向量和输出向量进行归一化处理^[109].预测的是青岛市 2020 年村镇生活垃圾排放量,结合青岛市“十三五”期间的规划,确定输入向量的大小.网络的初步结构设定为 1 个输入单元、1 个隐含层、1 个输出单元,输入、输出变量均为城市生活垃圾清

运量.本文所要建立的时间序列模型是输入单元和输出单元均为 1 的特殊模型,且输出变量与输入变量的关系比较复杂,因此可适当增加隐含层的神经元数.隐含层神经元作用函数为 tansig 函数,输出层神经元作用函数为 purelin 线性函数,网络训练函数为动态自适应学习率的贝叶斯正则化算法 trainbr 函数^[110].通过多次训练及调整,最终确定隐含层为 5 个隐层节点.用 trainbr 训练函数得到的网络对青岛村镇生活垃圾产量进行预测,结果见表 5.

结合灰色关联分析和 BP 神经网络预测可知,

2020 年青岛村镇生活垃圾产量将达到 1.186kg/(人·d), 接近城市生活垃圾产量,以青岛为例辐射全国各省市村镇,我国村镇生活垃圾仍处于强烈增长阶段,村镇生活垃圾带来的农村环境污染问题依旧是环保工作的重点,可知加强村镇生活垃圾处理十分重要。

表 5 青岛村镇生活垃圾影响因素灰色分析及产量预测
Table 5 The analysis of influencing factors for RSW generation and amount prediction in Qingdao

年份	人均垃圾 产量[kg/ (人·d)]	人口数 (万人)	农村居民人 均生活消费 支出(元)	农村居民 人均居住 面积(m ²)	农作物播 种面积 (×10 ⁴ hm ²)
2000	0.58	472.05	2380	25.88	76.47
2001	0.60	472.89	2618	26.59	73.69
2002	0.65	473.91	2820	27.00	72.32
2003	0.70	473.91	2988	27.00	67.82
2004	0.72	472.72	3353	27.99	71.33
2005	0.75	475.48	3737	29.54	75.02
2006	0.80	478.38	4203	30.82	74.86
2007	0.76	482.44	4736	30.95	72.79
2008	0.78	485.31	5303	30.73	74.09
2009	0.83	487.45	5832	31.39	75.00
2010	0.91	488.14	6662	30.97	75.39
2011	0.99	488.46	7661	31.73	75.70
灰色关联度		$r_1=0.81$	$r_2=0.59$	$r_3=0.62$	$r_4=0.89$
2020(预测)	1.186	500.00	18847.88	39.00	78.40

结合前文各地村镇生活垃圾人均日产量、组成的差异以及灰色关联分析结果,除了地域、气候差异,地区人口密度、经济发展水平以及环保类基础设施投入对村镇生活垃圾产量、组成同样影响较深.BP 神经网络预测我国村镇生活垃圾产量处于增长极端,而目前村镇生活垃圾回收、转运、处理及管理系统有待健全,对于各区域的村镇生活垃圾需要采取针对性地处理处置方式。

4 现阶段村镇生活垃圾处理存在的问题与建议

我国出台了一系列农村环境治理方面的法律法规:2015 年“水十条”要求到 2020 年新增完成环境综合整治的建制村 13 万个;《关于全面推进农村垃圾治理的指导意见》中提出到 2020 年全国 90% 以上的村庄生活垃圾得到有效治理;《全国农村环境综合整治“十三五”规划》提出,到 2020 年,新增完成环境综合整治的建制村 13 万个,累积达到全国建制村总数的三分之一以上。

村镇生活垃圾治理工作仍有一些突出问题,为

推动村镇生活垃圾的处理,可集中解决如下几个方面的问题:资源投入、环保意识及技术方法,技术方法包括技术方法选择、实施及管理。

针对这些问题,可从以下方面突破:

(1)充分调研各地现有垃圾堆积量,因地制宜进行转运、处理;

(2)加强教育培训,完善激励奖励机制,着重发展源头分类,全面推进垃圾分类;

(3)完善村镇生活垃圾清运设施和服务,建立高效的清运体系,优化垃圾转运体系;

(4)全面发展垃圾末端回收利用体系,选择合适的垃圾治理模式,加大研发具有村镇垃圾特色的终端处置技术;

(5)针对村镇生活垃圾收运及处置特点,建立村镇生活垃圾环境管理技术体系,建立生活垃圾治理设施投资运营长效机制;

5 结论

本文系统介绍了我国各地区村镇生活垃圾的特性,概述了当前村镇生活垃圾收运、分类回收现状以及处理模式和处置方式,结合青岛农村地区生活垃圾产量影响因素分析及预测,列出现阶段村镇生活垃圾处理存在的问题并给出建议.我国村镇地区面广跨度大,村镇生活垃圾具有明显的分散性、极强的地域性,大部分区域人均日产量 0.7~1.1kg/(人·d),且日渐增长;村镇生活垃圾组分区别于城市垃圾,整体以餐厨垃圾、灰土、木竹为主,南方垃圾水分较高,经济发达地区橡塑类垃圾组分含量较高;村镇生活垃圾的处理模式主要以城乡一体、城乡分别及城乡协同为主,基于各地村镇生活垃圾的特点,其处理方式及采用的末端处置方式有所区别.建设美丽乡村、改善农村环境的重中之重是加大村镇生活垃圾的治理力度,村镇生活垃圾的产量仍在急剧上升,其收运、分类、回收以及后续的处理模式、处理方式均需多层次综合性地进行考量。

参考文献:

[1] Huang K, Wang J, Bai J, et al. Domestic solid waste discharge and its determinants in rural China [J]. China Agricultural Economic Review, 2013,5(4):512-525.
[2] 韩智勇,费勇强,刘 丹,等.中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议 [J]. 农业工程学报, 2017,(15):1-14.
[3] 国家统计局.2016 年中国统计年鉴 [M]. 2017.

- [4] 住房和城乡建设部.2016 年城乡建设统计公报 [J]. 中国勘察设计, 2017,(9):8-14.
- [5] 何品晶,张春燕,杨娜,等.我国村镇生活垃圾处理现状与技术路线探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2010,(11):2049-2054.
- [6] 国家环境保护总局.全国农村环境污染防治规划纲要(2007-2020) [R]. 2007.
- [7] Ye C, Qin P. Provision of Residential solid waste management service in rural China [J]. China & World Economy, 2008,(5): 118-128.
- [8] 李颖,许少华.我国农村生活垃圾现状及对策 [J]. 建设科技, 2007,(7):62-63.
- [9] Abdul M A, Samieifard R, Zade M J G. Rural solid waste management [J]. International Journal of Environmental Research, 2008,2(4):425-430.
- [10] 王成妹,刘文华,舒坦.拉萨市旅游景区旅游垃圾处理研究 [J]. 旅游纵览(下半月), 2014,(5):154-155.
- [11] 郑玉涛,王晓燕,尹洁,等.水源保护区不同类型村庄生活垃圾产生特征分析 [J]. 农业环境科学学报, 2008,(4):1450-1454.
- [12] 黄佑坤.农村固废处置问题的分析 [J]. 低碳世界, 2017,(8):5.
- [13] Madadian E, Amiri L, Abdoli M A, et al. Energy production from solid waste in rural areas of Tehran Province by anaerobic digestion:.. Proceedings of the 6th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Shanghai [C]. 2012.
- [14] 赵阳.大连涉农地区生活垃圾调查及处理规划研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [15] 王爽,曹忠君.乡镇生活垃圾综合利用处理 [J]. 新农业, 2013,(11):55.
- [16] 王翎均,梁成华,王军,等.辽宁省农村生活垃圾现状及处置对策研究 [J]. 浙江农业科学, 2014,(7):1072-1075.
- [17] 戴晓霞.发达地区农村居民生活垃圾管理支付意愿研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [18] 颜芳,屠翰.临安市横路乡生活垃圾调查及无害化处理技术 [J]. 现代农业科技, 2012,(17):349-350.
- [19] 李政,伊剑峰.基于可持续视角的垃圾回收物流研究—以英德市农村为例 [J]. 物流技术, 2013,(9):153-156.
- [20] 高海硕,陈桂葵,黎华寿,等.广东省农村垃圾产生特征及处理方式的调查分析 [J]. 农业环境科学学报, 2012,(7):1445-1452.
- [21] 黄开兴,王金霞,白军飞,等.农村生活固体垃圾排放及其治理对策分析 [J]. 中国软科学, 2012,(9):72-79.
- [22] 李玉敏,白军飞,王金霞,等.农村居民生活固体垃圾排放及影响因素 [J]. 中国人口.资源与环境, 2012,(10):63-68.
- [23] 冯庆,王晓燕,王连荣.水源保护区农村生活污染排放特征研究 [J]. 安徽农业科学, 2009,(24):11681-11685.
- [24] 陈仪,夏立江,于晓勇,等.不同类型农村住户生活垃圾特征识别 [J]. 农业环境科学学报, 2010,(4):773-778.
- [25] 李志龙.我国典型村镇生活垃圾产生特征及处置模式研究 [D]. 南昌:南昌大学, 2016.
- [26] 任蓉.城郊农村生活垃圾收集现状分析及对策研究 [D]. 天津:天津大学, 2011.
- [27] 李妍,何宗均,赵琳娜,等.奖励措施对农村地区开展垃圾分类的作用 [J]. 安徽农业科学, 2012,(19):10255-10257.
- [28] 陈杉.农村有机垃圾微生物处理技术在天津市的应用 [J]. 天津农林科技, 2012,(3):28-29.
- [29] 丁森林,王洁,郭洪生.河北省农村生活废弃物处理现状及模式研究 [J]. 安徽农业科学, 2010,(34):19471-19473.
- [30] 黄开兴,王金霞,白军飞,等.农村生活固体垃圾排放及其治理对策分析 [J]. 中国软科学, 2012,(9):72-79.
- [31] 高意,马俊杰.黄土高原地区村镇生活垃圾处理研究—以陕西省隆坊镇为例 [J]. 安徽农业科学, 2011,(28):17389-17391.
- [32] 田雷,黄展.清原县农村生活垃圾现状调查与治理对策 [J]. 民营科技, 2011,(8):182.
- [33] 满国红,任飞荣.辽宁省乡镇及农村居民生活垃圾现状调查 [J]. 环境卫生工程, 2013,(1):44-45.
- [34] 刘成海,尹海东,李伟.市域村镇生活垃圾治理专项规划探析——以辽宁省辽阳市为例 [J]. 规划师, 2015,(7):117-123.
- [35] 李娜,丛日凤.浅谈宁安市农村垃圾污染现状与防治对策 [J]. 环境科学与管理, 2009,(7):10-13.
- [36] 王志国.基于 GIS 技术的农村生活垃圾收集布点方法研究 [D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2013.
- [37] 中国城市建设研究院环境卫生工程技术研究中心.不同地区农村生活垃圾转运的典型模式 [J]. 城乡建设, 2015,(1):17.
- [38] 陈昆柏,何闪英,冯华军.浙江省农村生活垃圾特性研究 [J]. 能源工程, 2010,(1):39-43.
- [39] 张明玉.苕溪流域农村生活垃圾产源特征及堆肥化研究 [D]. 郑州:河南工业大学, 2010.
- [40] 邴常远,吴东彪,白玉方,等.流域农村生活垃圾收运、处理模式探析研究——以巢湖流域为例 [J]. 环境科学与管理, 2014,(9):67-71.
- [41] 卢翠英,林在生,詹小海,等.福建省农村居民生活垃圾处置方式相关因素调查 [J]. 预防医学论坛, 2014,(11):825-827.
- [42] 丁逸宁,何国伟,容素玲,等.农村生活垃圾的处理与处置对策研究 [J]. 广东农业科学, 2011,(17):136-137.
- [43] 王涛,史晓燕,刘足根,等.东江源沿江村镇生活垃圾物理特性分析 [J]. 农业资源与环境学报, 2014,(3):285-289.
- [44] 孟凡彤.基于养殖业发展的农村生活垃圾收运模式研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [45] 张华伟.山东省农村生活垃圾处理现状及对策研究 [J]. 中国高新技术企业, 2012,(24):105-107.
- [46] 李世贵,郭海,徐小峰,等.南方城市近郊农村生活垃圾现状调查与处理模式研究 [J]. 农业环境与发展, 2012,(2):61-64.
- [47] 吴和岩,张建鹏,潘尚霞,等.2011 年广东省农村垃圾和污水现状调查 [J]. 环境与健康杂志, 2012,(3):251-253.
- [48] 陈志明,谢鸿,林华,等.广西区农村生活垃圾产排污系数研究 [J]. 大众科技, 2013,(2):43-45.
- [49] 梁厚宽.新时期广西农村生活垃圾资源化利用探索 [J]. 广西城镇建设, 2013,(7):121-124.
- [50] 张静,仲胜,邵立明,等.海南省琼海市农村生活垃圾产生特征及就地处理实践 [J]. 农业环境科学学报, 2009,(11):2422-2427.
- [51] 赖志勇.南沙新区农村生活垃圾管理研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- [52] 卢金涛,彭乾皓,彭绪亚.三峡库区农村生活垃圾现状调查及处理对策分析——以垫江县长大村为例 [J]. 三峡环境与生态, 2012,(3):3-7.
- [53] 卢金涛.农村生活污水与垃圾调查及其处理技术选择 [D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [54] 李华,蒋溢,李辉.三台县农村生活垃圾现状调查与处理模式探讨 [J]. 安徽农业科学, 2010,(29):16385-16387.
- [55] 严勃,蒋宇.浅析成都市农村生活垃圾分类收运处理的试点经验 [J]. 四川环境, 2014,(6):130-134.
- [56] 韩智勇,施国中,谢燕华,等.四川省农村固体废弃物的处理现状、特性与农民环保意识分析 [J]. 环境污染与防治, 2015,(5):96-102.
- [57] 董俐,周海燕.贵州村镇生活垃圾收运模式选择——以青岩古镇为例 [J]. 西部大开发:中旬刊, 2011,(9):6-7,9.
- [58] 韩智勇,旦增,孔垂雪.青藏高原农村固体废物处理现状与分析——以川藏 5 个村为例 [J]. 农业环境科学学报, 2014,(3):451-457.
- [59] 赵晶薇,赵蕊,何艳芬,等.基于“3R”原则的农村生活垃圾处理模式探讨 [J]. 中国人口.资源与环境, 2014,(S2):263-266.
- [60] 王莎,马俊杰,赵丹,等.农村生活垃圾问题及其污染防治对策 [J]. 山东农业科学, 2014,(1):148-151.

- [61] 赵培强,管东红,王伟红.甘肃省陇南灾区农村生活垃圾处置及管理模式探讨 [J]. 绿色科技, 2013,(7):223-225.
- [62] 王俊起,王友斌,李筱翠,等.乡镇生活垃圾与生活污水排放及处理现状 [J]. 中国卫生工程学, 2004,(4):12-15.
- [63] 王 新,周朝君,潘 璟,等.“十二五”时期新疆城镇生活垃圾处理设施规划建设需求分析:建设安全,让生活更美好 [C]//首届中国中西部地区土木建筑学术年会,郑州: 2011.
- [64] 马铮铮.沈阳市生活垃圾调查及处置方式研究 [J]. 环境卫生工程, 2010,(2):13-14.
- [65] 李 悦.沈阳市典型农村生活垃圾状况调查及污染防治研究 [J]. 安徽农业科学, 2007,(12):3626-3647.
- [66] 贾 悦,董晓丹,夏苏湘,等.上海市分类垃圾理化特性分析及处置方式探讨 [J]. 绿色科技, 2013,(8):236-238.
- [67] 程 远.中国农村环境保护与垃圾处置经济学研究 [D]. 上海:复旦大学, 2004.
- [68] 倪 娜,洪国才.杭州市城市生活垃圾物理化学特性及处置对策 [J]. 环境卫生工程, 2005,(5):31-32.
- [69] 屠 翰,虞益江,竺 强.序批式干态水解-液态产沼工艺在农村有机生活垃圾处理中的应用 [J]. 农业环境与发展, 2013,(4):87-90.
- [70] 卞荣星,孙英杰,李卫华,等.农村生活垃圾产生特性及处理处置对策研究 [J]. 环境工程, 2014,(12):100-102.
- [71] 曲旭朝.青岛市生活垃圾处理系统生命周期评价研究 [D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.
- [72] 杨水文.海南省松涛水库流域生活垃圾污染特性研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [73] 王 林,徐丽萍.泸州市生活垃圾特性及可气化性分析 [J]. 四川化工, 2015,(1):54-56.
- [74] 旦 增,韩智勇.青藏高原地区旱季城市生活垃圾特性研究 [J]. 中国沼气, 2012,(6):33-36.
- [75] 晏卓逸,岳 波,高 红,等.我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 [J]. 环境科学, 2017,(7):3078-3084.
- [76] 岳 波,张志彬,黄启飞,等.我国 6 个典型村镇生活垃圾的理化特性研究 [J]. 环境工程, 2014,(7):105-110.
- [77] 王瑜堂,岳 波,吴小卉,等.中国村镇生活垃圾的养分与重金属含量特征及其农用潜力分析 [J]. 环境工程, 2017,(7):136-140.
- [78] 王瑜堂,张 军,岳 波,等.村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析 [J]. 农业环境科学学报, 2017,36(8):1634-1639.
- [79] 何晶晶,章 骅,吕 凡,等.村镇生活垃圾处理模式及技术路线探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2014,(3):409-414.
- [80] 谭和平,胡建平,吴冰思,等.上海村镇生活垃圾分类收集模式与配套设施设置初探 [J]. 环境卫生工程, 2015,(5):57-59.
- [81] 聂小琴,屈志云,白冰杰,等.村镇垃圾收运/处理模式新探索 [J]. 环境卫生工程, 2017,(3):16-18.
- [82] Zeng C, Niu D, Li H, et al. Public perceptions and economic values of source-separated collection of rural solid waste: A pilot study in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016,107:166-173.
- [83] 陈 君.周宁县咸村镇生活垃圾处理方式浅析 [J]. 化学工程与装备, 2016,(6):294-296.
- [84] 戴迎春.村镇生活垃圾源头分类减量模式探讨—以上海市为例 [J]. 环境卫生工程, 2017,(1):57-61.
- [85] 沈文玺,陈永杏.村镇生活垃圾减量化管理机制研究—以对浙江省安吉县的调研为例 [J]. 农业展望, 2014,10(12):60-64.
- [86] 刘子琳,吴根义,罗惠莉,等.源头分类对农村生活垃圾就地处理的影响研究 [J]. 环境卫生工程, 2018,(1):70-72.
- [87] 邵立明,吕 凡,章 骅.村镇垃圾治理模式与规范的现状及展望 [J]. 小城镇建设, 2016,(8):12-15.
- [88] He P J. Municipal solid waste in rural areas of developing country: do we need special treatment mode? [J]. Waste Management, 2012,32(7):1289.
- [89] 侯世游.村镇生活垃圾处理模式研究 [J]. 江西化工, 2014,(1):156-160.
- [90] 李志龙,岳 波,弓晓峰,等.我国典型村镇春季生活垃圾的理化特性对比 [J]. 环境工程学报, 2017,(3):1787-1794.
- [91] 周文敏.村镇生活垃圾静态厌氧快速稳定技术研究 [D]. 南京:南京大学, 2011.
- [92] 冯庆革,杨宏斌,李晓辉,等.水泥窑协同处置村镇生活垃圾的一种新模式 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016,41(5):1696-1701.
- [93] 韦 超,夏训峰,王京刚,等.回转窑热解气化炉处理生活垃圾特性 [J]. 环境科学研究, 2017,(9):1471-1478.
- [94] Kuznets S. Economic growth and income inequality [J]. American Economic Review, 1955,45(1):1-28.
- [95] Bruyn S M D. The environmental Kuznets curve hypothesis [M]. Springer Netherlands, 2000.
- [96] Andersen F M, Larsen H, Skovgaard M, et al. A European model for waste and material flows [J]. Resources Conservation & Recycling, 2007,49(4):421-435.
- [97] Ichinose D, Yamamoto M, Yoshida Y. Reexamining the waste-income relationship [J]. Grips Discussion Papers, 2011:10.
- [98] 杨 凯,叶 茂,徐启新.上海城市废弃物增长的环境库兹涅茨特征研究 [J]. 地理研究, 2003,(1):60-66.
- [99] Song T, Zheng T, Tong L. An empirical test of the environmental Kuznets curve in China: A panel cointegration approach [J]. China Economic Review, 2008,19(3):381-392.
- [100] Zeng C, Niu D, Zhao Y. A comprehensive overview of rural solid waste management in China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2015, 9(6):949-961.
- [101] 廖传惠.中国城市生活垃圾 EKC 曲线特征及其成因分析 [J]. 城市发展研究, 2013,(12):143-146.
- [102] 康 洁,郭 蓓.西安生活垃圾排放量影响因素分析及灰色预测研究 [J]. 环境科学与管理, 2011,(12):51-53.
- [103] 巩雪松,李海红,杨仲成.陕西关中农村生活垃圾产量的预测 [J]. 西安工程大学学报, 2010,(1):97-100.
- [104] 高会苗,戴铁军,高晓龙.北京城市生活垃圾产生量的影响因素研究及预测 [J]. 环境卫生工程, 2014,22(1):24-28.
- [105] Deng J L. Introduction to grey system theory [J]. Sci-Tech Information Services, 1989,1(1):1-24.
- [106] Kayacan E, Ulutas B, Kaynak O. Grey system theory-based models in time series prediction [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(2):1784-1789.
- [107] Qu S, Sun Z, Fan H, et al. BP neural network for the prediction of urban building energy consumption based on matlab and its application [C]// International Conference on Computer Modeling & Simulation. IEEE Computer Society, 2010:263-267.
- [108] 胡金滨,唐旭清.人工神经网络的 BP 算法及其应用 [J]. 信息技术, 2004,28(4):1-4.
- [109] 陈 荣,徐用懋.多层前向网络的研究—遗传 BP 算法和结构优化策略 [J]. 自动化学报, 1997,23(1):43-49.
- [110] Yi J, Wang Q, Zhao D, et al. BP neural network prediction-based variable-period sampling approach for networked control systems [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007,185(2):976-988.

作者简介: 李 丹(1991-),女,黑龙江齐齐哈尔人,在读博士生,研究方向为固体废物处理与利用。