

建筑废弃物资源化环境效益分析:以重庆为例

刘婷婷*¹ 张 劼¹ 胡鸣明^{2,3}

(1. 安徽新华学院土木与环境工程学院, 安徽合肥 230088; 2. 重庆大学建设管理与房地产学院, 重庆 400045; 3. 莱顿大学环境科学研究所, 荷兰莱顿 2333CC)

【摘要】为了向政府提供可以提升建筑废弃物资源化环境效益的有利政策,以促进建筑废弃物资源化的可持续发展,本文从系统角度,应用系统动力学通过文献分析、实地调研、调查问卷等方法对建筑废弃物资源化的环境效益进行建模和模拟仿真。通过对环境效益模型进行情景分析,得出当非法排放单位罚款在 50~60 元/t,单位填埋收费取 30 元/t 左右,建筑废弃物到资源化处置中心距离在 15~25km 左右,资源化的单位补贴额为 25 元/t 左右时,可以使环境效益处于较优状态。同时政府应提高建筑废弃物相关法律法规的完善程度、培养相关人员的现场回收意识、促进相关科研研发,以期促进建筑废弃物资源化的环境效益。

【关键词】建筑废弃物;资源化;环境效益;系统动力学;情景分析

【中图分类号】X32

【文献标识码】A

【文章编号】1000-6923(2018)10-3853-15

我国建筑业在带动国民经济发展的同时产生大量建筑废弃物,当前对建筑废弃物进行资源化处置,在妥善处置建筑废弃物同时再利用以节约自然资源已经成为共识。从国内的相关研究来看,对于建筑废弃物的研究很少涉及到建筑废弃物综合处置的环境效益,即使有也只是对设计阶段的建筑废弃物的减量化环境效益进行评估,没有考虑到将建筑废弃物进行资源化生成再生产品后的环境效益^[1-3]。王地春等^[4]以废旧黏土砖为例,通过生命周期评价(LCA)理论对其资源化再生利用的环境影响进行分析,但只针对废旧黏土砖,研究范围较小。王波^[5]基于生命周期评价方法对深圳市建筑垃圾处理模式进行研究,以深圳市塘朗山建筑垃圾产业园为例,得出对建筑废弃物进行资源化产生的环境效益远远大于直接填埋,同时与填埋相比每年可节约大量的资金;朱海滨^[6]基于生命周期评价(LCA)的分析方法对建筑废弃物资源化项目的环境效益进行了测算,但没有对整个系统进行动态地分析,同时,由于研究以深圳市塘朗山建筑垃圾产业园为例,不具有普适性。丁志坤等^[7]基于系统动力学对建筑废弃物减量化管理的环境效益进行了评估,但只是针对源头减量化行为态度等因素对减量化影响的分析,没有涉及到建筑废弃物再利用的过程。国外学者对建筑废弃物的研究也从未停止,Peng 等^[8]和 Ling 等^[9]认为对废弃物减量化后对建筑废弃物最佳的处理方式就是资源化再生利用。很多学者提出要对建筑废弃物实行填埋收费计划,Hao 等^[10]认为填埋收费计划不仅可以促进建筑废弃物的减量化,同时也可以促进建筑废弃物的再利用和资源化。这些研究虽然表明了对建筑废弃物实行填埋收费的可行性,但只是定性研究,没有涉及有关具体的收费金额制定的研究。对于资源化利用的优越性,很多学者也做了相关研究,Begum 等^[11]用统计学的方法对马来西亚的建筑废弃物的回收进行成本收益分析并证实了其可行性,同时也表明了对环境保护的积极作用,但没有对环境的影响进行量化的分析。Duran 等^[12]开发了一个模型来评估采用资源税和政府补贴方式下对建筑废弃物回收市场活力的影响,但是仅仅是静态的评估。Calvo 等^[13]根据经济激励描述了一个建筑废弃物管理体系,运用系统动力学^[14]设计了仿真模型,通过评估奖励和税收惩罚的潜在影响来分析政府在何种程度上影响了企业的建筑废弃物管理行为,但也只是从经济效益的角度,没有考虑到环境效益。

收稿日期: 2018-06-30

基金项目: 2017 年度安徽高校自然科学研究项目(KJ2017A615)

作者简介: 刘婷婷(1992-),女,河北秦皇岛人,硕士,主要研究方向为建筑废弃物与可持续建设. 发表论文 1 篇。

*责任作者: 助教,945950519@qq.com

从实践经验来看,建筑废弃物的管理是一个系统,需要从系统角度分析各影响要素间复杂的关系,不能脱离整个系统单独考虑某一部分。当前学者已经针对建筑废弃物资源化整个阶段的动态经济效益进行了分析^[15-17],但是由于建筑废弃物资源化产业目前正处在起步阶段,目前仅有基于生命周期评价(LCA)的分析方法对建筑废弃物的环境效益进行的测算,而且只是静态分析,没有将建筑废弃物资源化作为一个动态的系统来考虑,没有具体针对建筑废弃物资源化整个阶段动态的环境效益进行分析的研究,也没有对当前一些有利于促进建筑废弃物资源化的对策进行量化,故本文从系统角度对建筑废弃物资源化的环境效益进行模拟分析,并通过分析调控相关要素后引起的环境效益的变化,得到影响系统发展的显著要素及该影响要素的最佳状态,为政府提供可以促进建筑废弃物资源化的合理性、可行性建议。

1 建筑废弃物资源化系统

通过对我国建筑废弃物资源化现状的了解,在总结资源化发展共性的同时结合相关文献以及在重庆市的实地调研与访谈中了解到的重庆市建筑废弃物资源化现状,根据重庆市的实际情况确定研究的系统。

建筑废弃物处理的全过程包括建筑废弃物的产生阶段、处置阶段、资源化产品生产阶段以及销售阶段,以建筑废弃物的资源化为核心,具体的系统如图1所示。

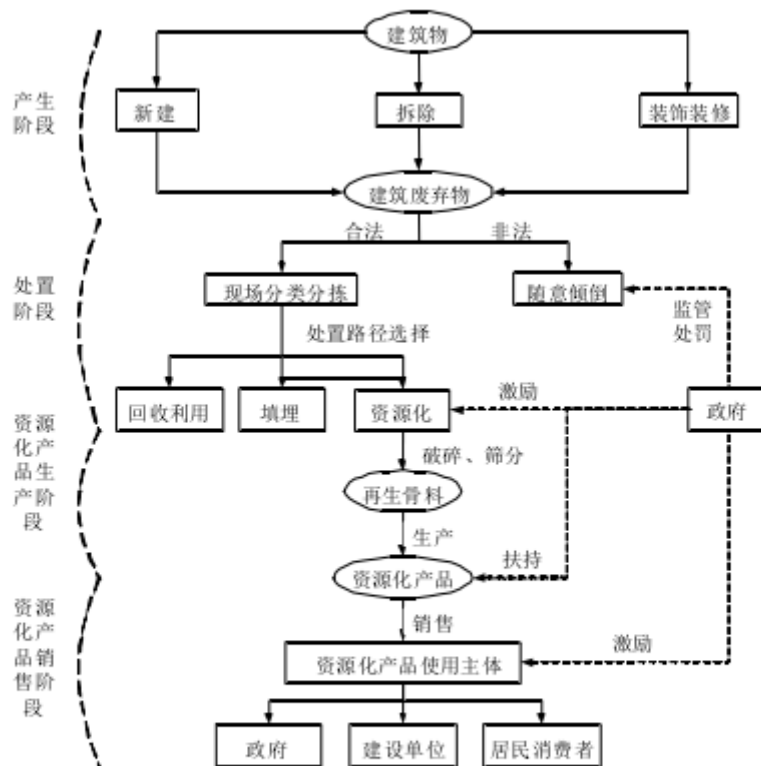


图1 建筑废弃物处理系统

Fig.1 System diagram of construction and demolition waste disposal

2 环境系统构成要素分析

2.1 能源消耗

在运输、使用机械设备时都会消耗能源。具体包括非法运输、填埋运输、资源化运输时运输车辆消耗的燃油能源,分类分拣时机械设备消耗的燃油和电能,填埋建筑废弃物时机械消耗的燃油和电能,以及生产资源化产品时生产设备消耗的燃油和电能。同时,对建筑废弃物进行现场回收利用节约了运输建筑废弃物的能源消耗,资源化企业无需采购原材料也节约了运输的能源消耗。

2.2 温室气体排放

消耗能源的过程中必然会排放温室气体。具体包括非法运输、填埋运输、资源化运输中由于消耗能源而排放的温室气体,分类分拣以及填埋过程中由于使用机械设备消耗燃油和电能而排放的温室气体,资源化企业用于生产资源化产品的生产设备消耗燃油和电能而排放的温室气体。同时,由于无需将现场回收利用的建筑废弃物运出而避免了由于运输排放的温室气体,资源化企业通过使用建筑废弃物作为原材料而避免了采购原材料过程中由于运输而排放的温室气体。

2.3 土地损失

土地损失主要是指非法倾倒建筑废弃物和填埋建筑废弃物时因占用土地而造成的土地损失,土地由于被建筑废弃物堆放而丧失了其他的功能。通过回收利用以及资源化建筑废弃物可以避免土地被建筑废弃物占用,从而节约土地。

2.4 资源节约

回收利用建筑废弃物可以将金属、木材等建筑废弃物二次利用,从而节约了资源。对建筑废弃物进行资源化利用,将其作为生产建材的原材料,也可以节约资源。

文中对建筑废弃物处理系统的环境影响分析主要从能源消耗、温室气体排放、土地损失以及资源节约四个方面进行考虑,建筑废弃物处理系统的其他环境影响在文中暂不作研究。

3 建筑废弃物资源化系统发展要素分析

通过图 1 中对建筑废弃物现状及问题的了解,结合相关文献以及实地调研、专家访谈对重庆市建筑废弃物资源化的政策影响因素进行选取,然后邀请重庆市环卫控股(集团)有限公司、重庆建工第三建设有限责任公司和重庆市墙体协会业内专家对这些要素中容易混淆和不易理解的要素进行反馈,根据反馈信息进行修改;最后邀请重庆大学长期从事建筑废弃物管理研究的专家对修改后的要素进行审核,得到 10 个要素,如表 1 所示。

表 1 影响系统发展的要素及来源
Table 1 Factors and sources of system affecting development

序号	系统发展要素	解释	来源
1	设立和完善建筑废弃物处理的相关法规	从法规层面加大对非法排放建筑废弃物的约束力度,明确违法行为及其后果.	[18-21]
2	加强政府的监管力度	对建筑废弃物的处置过程进行监管,尤其对非法排放的建筑废弃物做到及时发现、及时惩处、及时治理.	[3,18,22]
3	增加非法排放建筑废弃物的处罚力度	增加对建筑废弃物非法排放的罚款额度及应承担的后果.	专家访谈
4	适当增加单位填埋收费	增加建筑废弃物进入填埋场的入场费用.	[22-25]
5	培养施工部门现场的回收利用意识	政府部门对施工企业进行培训及宣传,使其了解对建筑废弃物进行现场回收利用的好处,增强现场回收利用意识.	专家访谈
6	合理规划资源化处置中心布点	政府为资源化企业选址的时候应在整个区域内合理规划布点,为建筑废弃物的运输创造便利条件.	[18,22,26,27]
7	政府对资源化企业进行经济补贴	根据资源化企业处理建筑废弃物的量进行补贴有利于提高资源化企业的积极性.	[19,23,28]
8	加大科研研发力度	政府鼓励科研单位、资源化企业的科研部门以及高校科研机构研发出更加先进、效率更高的建筑废弃物处理设备、技术,开发出更加多样化的产品.	[19,22,24,29]
9	制定资源化产品质量标准和认证制度	政府科研部门根据资源化产品的种类以及用途,对再生产品的质量进行规定和划分,建立行业质量标准和认证制度,使资源化产品更加规范化、统一化.	[22,24,30]
10	资源化产品公众形象推广	通过政府部门对公众进行建筑废弃物资源化产品的宣传、建立示范工程等消除公众疑虑,鼓励更多地使用资源化产品.	[19,21-24,30]

4 环境效益模型

4.1 基本方法

4.1.1 因果关系图

因果关系图是用来描述系统中各要素之间相互逻辑关系的图形。因果关系链的正、负分别代表两个变量之间的正向促进作用和负向抑制作用。

4.1.2 流图

流图是反映系统要素的性质和整体结构的图形。为了表示出系统中变量间的区别,用不同的图形符号代表不同类别的变量,之后用带箭头的线将它们连接起来,形成系统的流图。

4.1.3 方程

方程用来对系统中要素之间的关系进行局部量化。系统动力学的模型中,主要包括三种方程:描述状态变量变化规律的水平方程,描述速率变量变化规律的速率方程,以及描述辅助变量变化规律的辅助方程。

4.1.4 仿真平台

仿真平台是系统动力学模型输入到计算机中进行仿真模拟和变量调控的计算机软件环境。利用仿真平台可以通过调控不同的变量、以及不同的调控程度达到研究不同政策方案的目的。Vensim 仿真平台是目前的研究中应用最广泛的仿真平台之一,本研究的模拟仿真分析就是基于 Vensim 软件进行的。

4.2 环境效益因果关系图

以建筑废弃物资源化的过程中涉及到的建筑废弃物产生、回收、循环利用,生产销售再生产品的过程为框架,根据环境效益评价指标(能源消耗、温室气体排放[31]、土地损失、资源节约)反推出组成各个指标的中间变量,以及影响中间变量的因素,以环境效益指标、中间变量和影响中间变量的因素组成环境效益模型中的变量。针对建筑废弃物处置系统对环境产生影响的各个因素的因果关系,绘制环境系统的因果关系图,如图 2 所示。图中“CDW”代表建筑废弃物,带“+”号的箭头表示正因果链,起促进作用;带“-”号的箭头表示负因果链,起抑制作用。

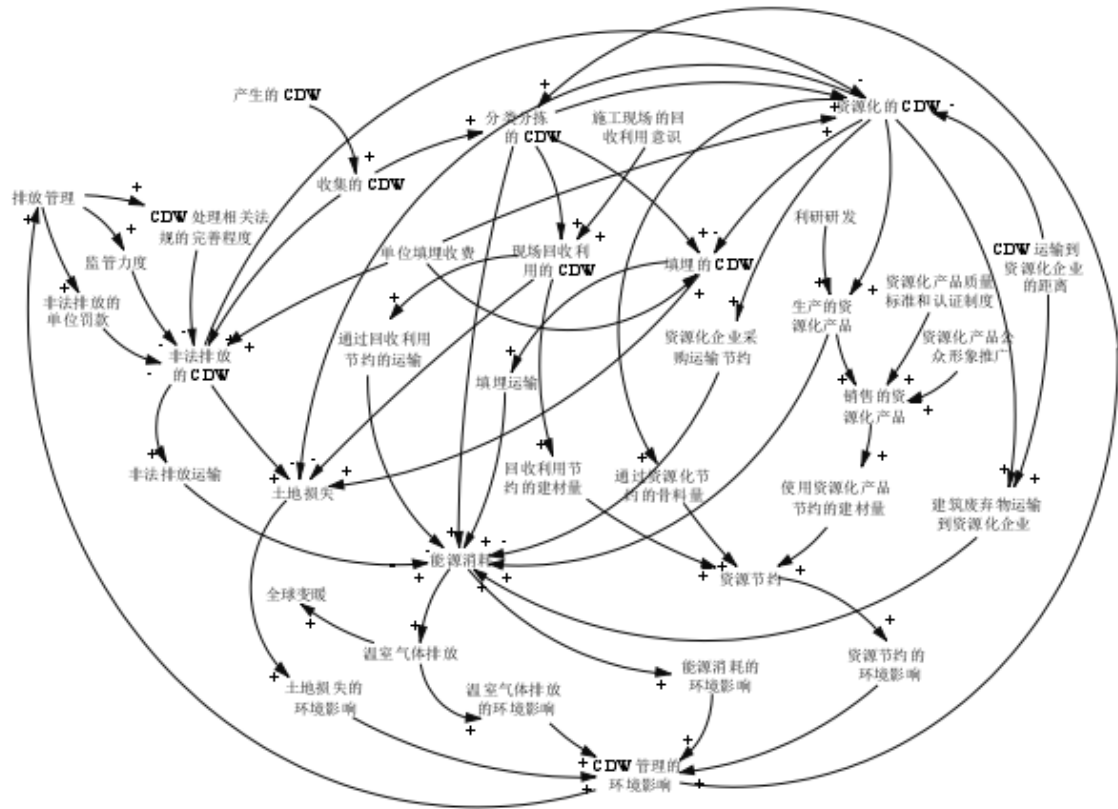


图 2 环境效益因果关系
Fig.2 Causality diagram of environmental benefits

图 2 中展现的几条主要的因果回路如下:

①非法排放管理→+(非法排放的单位罚款, 监管力度, 建筑废弃物处理相关法规的完善程度)→-非法排放的建筑废弃物→+非法排放运输→+能源消耗→+(能源消耗的环境影响, 温室气体排放→+温室气体排放的环境影响)→+建筑废弃物管理的环境影响→+非法排放管理

②非法排放管理→+(非法排放的单位罚款, 监管力度, 建筑废弃物处理相关法规的完善程度)→-非法排放的建筑废弃物→+土地损失→+土地损失的环境影响→+建筑废弃物管理的环境影响→+非法排放管理

③分类分拣的建筑废弃物→+现场回收利用的建筑废弃物→+通过回收利用节约的运输→-能源消耗→+(能源消耗的环境影响, 温室气体排放→+温室气体排放的环境影响)→+建筑废弃物管理的环境影响→+分类分拣的建筑废弃物

④分类分拣的建筑废弃物→+(现场回收利用的建筑废弃物, 资源化的建筑废弃物)→+资源节约→+资源节约的环境影响→+建筑废弃物管理的环境影响→+分类分拣的建筑废弃物

⑤分类分拣的建筑废弃物→+资源化的建筑废弃物→-填埋的建筑废弃物→+土地损失→+土地损失的环境影响→+建筑废弃物管理的环境影响→+分类分拣的建筑废弃物

⑥填埋的建筑废弃物→+填埋运输→+能源消耗→+(能源消耗的环境影响, 温室气体排放→+温室气体排放的环境影响)→+建筑废弃物管理的环境影响→+非法排放管理→+(非法排放的单位罚款, 监管力度, 建筑废弃物处理相关法规的完善程度)→-非法排放的建筑废弃物→-资源化的建筑废弃物→-填埋的建筑废弃物

⑦资源化的建筑废弃物→+生产的资源化产品→+资源节约→+资源节约的环境影响→+建筑废弃物管理的环境影响→+分类分拣的建筑废弃物→+资源化的建筑废弃物

⑧资源化的建筑废弃物→+资源化企业采购运输节约→-能源消耗→+(能源消耗的环境影响, 温室气体排放→+温室气体排放的环境影响)→+建筑废弃物管理的环境影响→+非法排放管理→+(非法排放的单位罚款, 监管力度, 建筑废弃物处理相关法规的完善程度)→-非法排放的建筑废弃物→-资源化的建筑废弃物

⑨资源化的建筑废弃物→+(生产的资源化产品, 建筑废弃物运输到资源化企业资源化的建筑废弃物)→+能源消耗→+(能源消耗的环境影响, 温室气体排放→+温室气体排放的环境影响)→+建筑废弃物管理的环境影响→+非法排放管理→+(非法排放的单位罚款, 监管力度, 建筑废弃物处理相关法规的完善程度)→-非法排放的建筑废弃物→-资源化的建筑废弃物

4.3 环境效益流图

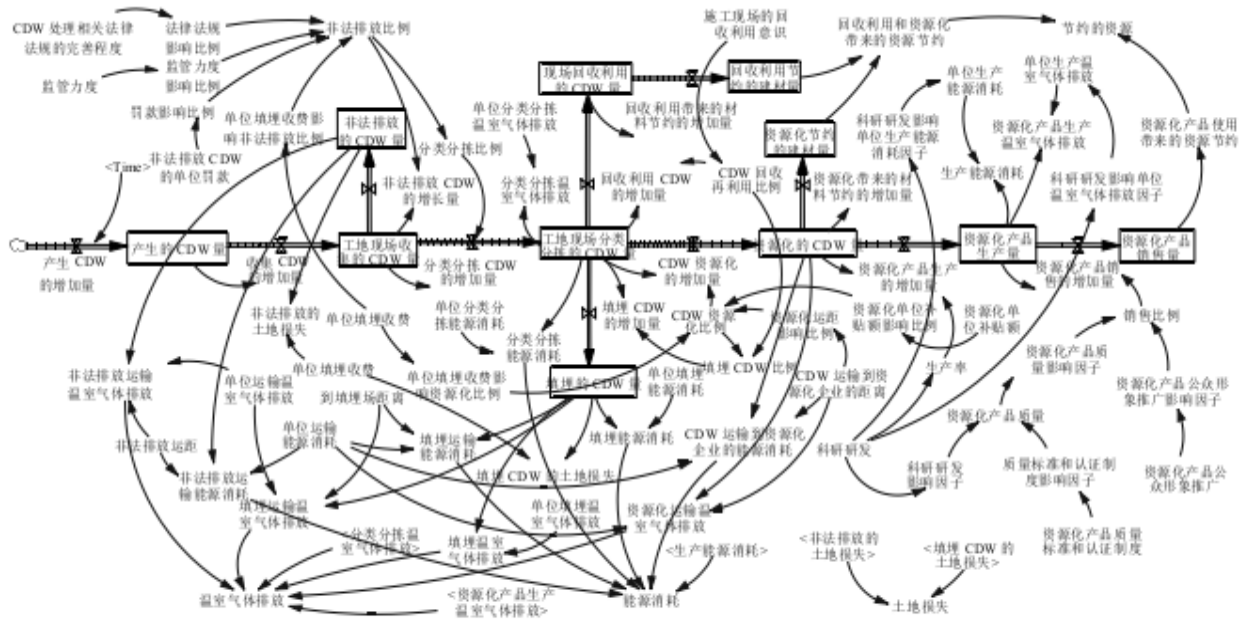


图3 环境效益流

Fig 3 Flow diagram of environmental benefits

根据环境系统因果关系图中各变量的关系, 绘制环境系统流图, 如图3所示, 图3中CDW代表建筑废弃物, 阴影部分的变量表示在该图中出现过。构建的环境系统模型中包含状态变量11个, 速率变量11个, 辅助变量(包括系统内部自带的时间变量)49个, 常量15个, 具体如表2所示。

表 2 环境效益模型变量参数表

Table 2 Variable parameter table of environmental benefit model

序号	变量名称	变量类型	变量单位	序号	变量名称	变量类型	变量单位
1	CDW 处理相关法律法规的完善程度	辅助变量	Dmm1	44	单位生产能源消耗	常量	kgce/t
2	法律法规影响比例	辅助变量	Dmm1	45	单位填埋收费资源化影响比例	辅助变量	Dmm1
3	监管力度	辅助变量	Dmm1	46	分类分拣比例	辅助变量	t
4	监管力度影响比例	辅助变量	Dmm1	47	分类分拣 CDW 的增加量	速率变量	t
5	非法排放 CDW 的单位罚款	常量	元/t	48	工地现场分类分拣的 CDW 量	状态变量	Dmm1
6	罚款影响比例	辅助变量	Dmm1	49	单位分类分拣温室气体排放	常量	kg/t
7	单位填埋收费	常量	元/t	50	分类分拣温室气体排放	辅助变量	kg
8	单位填埋收费影响非法排放比例	辅助变量	Dmm1	51	单位分类分拣能源消耗	常量	kgce/t
9	非法排放比例	辅助变量	Dmm1	52	分类分拣能源消耗	辅助变量	kgce
10	产生 CDW 的增加量	速率变量	t	53	施工现场的回收利用意识	辅助变量	Dmm1
11	产生的 CDW 量	状态变量	t	54	CDW 回收再利用比例	辅助变量	t
12	收集 CDW 的增加量	速率变量	t	55	回收利用 CDW 的增加量	速率变量	t
13	工地现场收集的 CDW 量	状态变量	t	56	现场回收利用的 CDW 量	状态变量	t
14	非法排放 CDW 的增加量	速率变量	t	57	回收利用节约的土地损失	辅助变量	m ³
15	非法排放的 CDW 量	状态变量	t	58	回收利用带来的材料节约的增加量	速率变量	t
16	非法排放运距	常量	km	59	回收利用节约的材料量	状态变量	km
17	单位运输温室气体排放	常量	kg/(t·km)	60	填埋 CDW 的增加量	速率变量	t
18	非法排放运输温室气体排放	辅助变量	kg	61	填埋的 CDW 量	状态变量	t
19	单位运输能源消耗	常量	kgce/(t·km)	62	填埋 CDW 比例	辅助变量	km
20	非法运输能源消耗	辅助变量	kgce	63	到填埋场距离	常量	t
21	单位土地损失	常量	m ³ /t	64	填埋运输能源消耗	辅助变量	kgce
22	非法排放的土地损失	辅助变量	m ³	65	填埋运输温室气体排放	辅助变量	kg
23	填埋 CDW 的土地损失	辅助变量	m ³	66	生产能源消耗	辅助变量	kgce
24	单位填埋能源消耗	常量	kgce/t	67	单位生产温室气体排放	常量	kg/t
25	填埋能源消耗	辅助变量	kgce	68	资源化产品生产温室气体排放	辅助变量	kg
26	单位填埋温室气体排放	常量	kg/t	69	资源化单位补贴额	常量	Dmm1
27	填埋温室气体排放	辅助变量	kg	70	资源化单位补贴额影响比例	辅助变量	Dmm1
28	CDW 运输到资源化企业的距离	常量	Dmm1	71	科研研发影响因子	辅助变量	Dmm1
29	资源化运距影响比例	辅助变量	Dmm1	72	资源化产品质量标准和认证制度	辅助变量	Dmm1
30	CDW 资源化比例	辅助变量	Dmm1	73	质量标准和认证制度影响因子	辅助变量	Dmm1
31	CDW 资源化的增加量	速率变量	t	74	资源化产品质量	辅助变量	Dmm1
32	资源化的 CDW 量	状态变量	t	75	资源化产品质量影响因子	辅助变量	Dmm1
33	CDW 运输到资源化企业的能源消耗	辅助变量	kgce	76	资源化产品公众形象推广	辅助变量	Dmm1
34	资源化运输温室气体排放	辅助变量	kg	77	资源化产品公众形象推广影响因子	辅助变量	Dmm1
35	资源化带来的材料节约的增加量	速率变量	t	78	销售比例	辅助变量	t
36	资源化节约的建材量	状态变量	t	79	资源化产品销售的增加量	速率变量	t
37	回收利用和资源化带来的资源节约	辅助变量	t	80	资源化产品销售量	状态变量	t
38	科研研发	辅助变量	Dmm1	81	资源化产品使用带来的资源节约	辅助变量	t
39	科研研发影响单位生产能源消耗因子	辅助变量	Dmm1	82	节约的资源	辅助变量	t
40	科研研发影响单位温室气体排放因子	辅助变量	Dmm1	83	温室气体排放	辅助变量	kg
41	生产率	辅助变量	t	84	能源消耗	辅助变量	kgce
42	资源化产品生产的增加量	速率变量	t	85	土地损失	辅助变量	m ³
43	资源化产品生产量	状态变量	元/t	86	Time	辅助变量	年

注:Dmm1为无量纲。

5 重庆市建筑废弃物资源化环境效益模拟仿真与情景分析

5.1 模型参数估计与检验

5.1.1 主要模型参数的估计基于现有数据的可得性, 为方便实地调研, 收集相关数据, 以重庆市主城 9 区年建筑废弃物的产生量为依据, 对构建的系统动力学模型从 2016 年到 2030 年进行模拟, 进而分析得出各个影响因素对经济效益和环境效益的不同影响。模型中参数的确定方法主要分为三类, 第一类是根据现状调研和相关资料收集得到可以量化的数据, 第二类是根据一定的量

化规则,通过问卷调查、专家访谈等对定性的参数进行量化估计,第三类是根据系统动力学软件中的函数对因素间的定性关系进行量化估计,具体如下:

①第一类量化数据

根据现状调研得到的问卷和文献分析对重庆市建筑废弃物处置的相关数据进行收集,得到模型中参数的初始值,如表3所示,录入 Vensim 软件的参数设置中。

表3 建筑废弃物处置相关参数
Table 3 Related parameters of construction and demolition waste disposal

变量名称	变量取值	单位	依据
到填埋场距离	20	km	依据重庆市已经建成的填埋场的实际情况调研以及《重庆市主城区建筑垃圾消纳场布点规划》
非法倾倒运距	5	km	石世英等的研究 ^[23]
到资源化企业距离	35	km	依据调研结果取均值进行假设
非法排放 CDW 的单位罚款	30	元/t	依据实际情况进行假设
回收利用材料节约的采购运距	15	km	依据调研结果取均值进行假设
资源化节约的采购运距	25	km	依据调研结果取均值进行假设
资源化单位补贴额	5	元/t	目前资源化补贴实际实施情况并不是很好,所以暂取 5 元/t
非法排放比例	0.18	Dum1	专家访谈
回收利用比例	0.04	Dum1	专家访谈
资源化比例	0.15	Dum1	专家访谈
填埋比例	0.81	Dum1	专家访谈
单位土地损失	0.68	m ² /t	根据李政道的研究 ^[6] 换算得到,建筑废弃物的密度按 1.47t/m ³ 计
单位运输能源消耗	0.05	kgce/(t·km)	消耗的燃油按柴油计,根据朱海滨的研究 ^[6] 换算得到
单位运输温室气体排放	0.1346	kg/(t·km)	根据朱海滨的研究 ^[6] 得到
单位分类分拣能源消耗	1.799	kgce/t	消耗的燃油按柴油计,根据朱海滨的研究 ^[6] 换算得到
单位分类分拣温室气体排放	4.5	kg/t	根据朱海滨的研究 ^[6] 得到
单位生产能源消耗	4.683	kgce/t	消耗的燃油按柴油计,根据朱海滨的研究 ^[6] 换算得到
单位生产温室气体排放	10.87	kg/t	根据朱海滨的研究 ^[6] 得到
单位填埋能源消耗	5.125	kgce/t	消耗的燃油按柴油计,根据朱海滨的研究 ^[6] 换算得到
单位填埋温室气体排放	13.76	kg/t	根据朱海滨的研究 ^[6] 得到

②第二类量化数据

模型中有一些定性变量的具体数值无法直接得到,所以依据王家远提供的方法[2, 16],对其进行量化。本研究采取问卷调查的方法获取相关的数据,问卷包含两部分:第一部分是调研者的单位、职位、工作年限等基本情况,第二部分是调查者结合重庆市的现状对给出的变量进行评分,对于某一变量的赋值为 $S_j(0 \leq S_j \leq 5 \text{ 且为整数})$ 。2017年3月到6月,对重庆市环境卫生管理局、重庆市环卫控股(集团)有限公司、重庆建工第三建设有限责任公司、重庆市墙体协会业内专家以及重庆大学长期从事建筑废弃物管理研究的专家发放问卷进行调研,使其对表4中这七个因素进行量化。最后共收回17份访谈问卷,均为有效问卷。根据访谈与问卷调研结果,进行数据处理。运用公式1计算每个变量的指标值。

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^{17} S_{ij}}{17 \times 5} \times 100 (i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 17) \quad (1)$$

式中:Wi 代表第 i 个变量的指标值;Sij 代表第 j 个被调查者对第 i 个因素给出的评分最后,得到模型中常变量的初始值,如表 4 所示,录入 Vensim 软件的参数设置中。

表 4 定性变量的量化取值
Table 4 Quantitative value of qualitative variables

序号	变量名称	取值
1	建筑废弃物处理的相关法规的完善程度	34
2	政府的监管力度	27
3	施工现场的回收利用意识	46
4	科研研发力度	38
5	资源化产品质量标准和认证制度	21
6	资源化产品公众形象推广	25
7	资源化产品质量	56

③第三类量化数据

一些变量间的关系可以用系统动力学软件中的特有函数进行表示,本研究用表函数来定量描述变量间的复杂关系。表函数是用图表来确定两个变量之间函数关系的方法,特别是可以用来表述两个变量之间的非线性关系,所以应用广泛。

以研究中建筑废弃物产生量与时间之间的关系为例,构建表函数。由于目前没有权威的资料对重庆市建筑废弃物年产生量进行统计,所以研究中采用的数据通过有效估计和灰色模型预测得到。根据贾顺的研究[19],依据重庆市主城 9 区 1995~2015 年建筑废弃物的年产量,运用灰色系统理论预测,将得出的结果与真实数据进行比较,预测值与真实值相差极小,所以该模型可以用来模拟建筑废弃物产生量的趋势。所以,运用该模型对 2010 年到 2030 年重庆市主城区的建筑废弃物年产量进行预测。根据灰色系统理论预测,得出的计算式为:

$$\hat{x}^{(1)}(k-1994) = 2044.4724e^{0.135575(k-1995)} - 1880.572377 \quad (2)$$

式中:k=2010,2016,……,2030.

根据式 2 预测 2010 年到 2030 年重庆市主城 9 区的建筑废弃物年产量如表 5 所示。

表 5 2010~2030 年建筑废弃物预测年产量
 Table 5 Estimated annual output of construction and demolition waste from 2010 to 2030

年份	$k-1995$	$f^{(1)}(k-1994)$	预测值(万吨)
2010	15	13742.7490	1980.8236
2011	16	16011.1785	2268.4294
2012	17	18608.9727	2597.7942
2013	18	21583.9539	2974.9812
2014	19	24990.8877	3406.9338
2015	20	28892.4916	3901.6039
2016	21	33360.5892	4468.0976
2017	22	38477.4325	5116.8433
2018	23	44337.2163	5859.7838
2019	24	51047.8120	6710.5956
2020	25	58732.7531	7684.9411
2021	26	67533.5099	8800.7568
2022	27	77612.0932	10078.5834
2023	28	89154.0374	11541.9441
2024	29	102371.8150	13217.7776
2025	30	117508.7490	15136.9340
2026	31	134843.4913	17334.7423
2027	32	154695.1530	19851.6617
2028	33	177429.1783	22734.0253
2029	34	203464.0723	26034.8940
2030	35	233279.1049	29815.0326

将年份和年建筑废弃物产量的预测值输入到 Vensim PLE 软件的表函数操作界面中, 如图 4 所示。

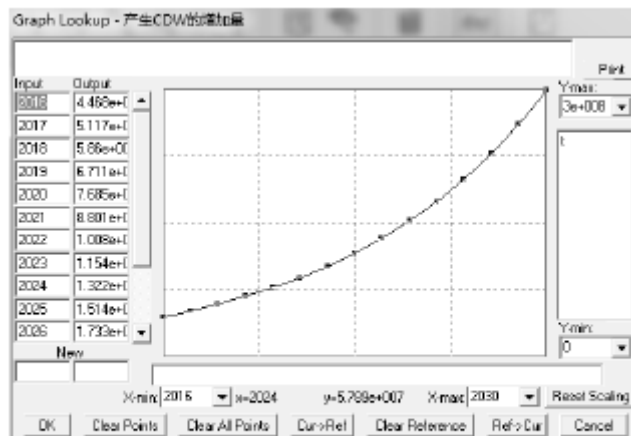


图 4 Vensim PLE 的表函数操作界面
 Fig.4 Table function operation interface of Vensim PLE

研究中根据上述表函数的方法量化的变量如表 6 所示, 同理, 将它们之间的变量关系输入到 Vensim PLE 软件的表函数操作界面中。

表 6 表函数量化的变量及其产生影响的变量
Table 6 Variables quantized by table functions and the variables that affect them

表函数量化的变量	影响变量
法规影响非法排放比例	CDW 处理相关法规的完善程度
监管力度影响非法排放比例	监管力度
罚款影响非法排放比例	非法排放 CDW 的单位罚款
单位填埋收费影响非法排放比例	单位填埋收费
单位填埋收费资源化影响比例	单位填埋收费
CDW 回收再利用比例	施工现场的回收利用意识
资源化产品生产率	科研研发
科研研发影响单位生产能源消耗因子	科研研发
科研研发影响单位温室气体排放因子	科研研发
质量标准 and 认证制度影响因子	资源化产品质量标准和认证制度
资源化产品公众形象推广影响因子	资源化产品公众形象推广
科研研发影响因子	科研研发
资源化产品质量影响因子	资源化产品质量
资源化运距影响比例	CDW 运输到资源化企业的距离
资源化单位补贴额影响比例	资源化单位补贴额

综上,已经在系统动力学模型中完成了对上述 3 类数据的量化和线性关系的确定。

5. 1. 2 模型主要方程

①能源消耗主要方程

能源消耗=CDW 运输到资源化企业的能源消耗+分类分拣能源消耗+填埋运输能源消耗+生产能源消耗+非法运输能源消耗+填埋能源消耗

CDW 运输到资源化企业的能源消耗=CDW 运输到资源化企业的距离×单位运输能源消耗×资源化的 CDW 量

分类分拣能源消耗=单位分类分拣能源消耗×工地现场分类分拣的 CDW 量

填埋运输能源消耗=填埋场距离×单位运输能源消耗×填埋的 CDW 量

生产能源消耗=单位生产能源消耗×资源化产品生产量

非法运输能源消耗=单位运输能源消耗×非法排放的 CDW 量×非法排放运距

填埋能源消耗=单位填埋能源消耗×填埋的 CDW 量

②温室气体排放主要方程

温室气体排放=分类分拣温室气体排放+填埋运输温室气体排放+资源化产品生产温室气体排放+资源化运输温室气体排放+非法运输温室气体排放+填埋温室气体排放

分类分拣温室气体排放=单位分类分拣温室气体排放×工地现场分类分拣的 CDW 量

填埋温室气体排放=单位填埋温室气体排放×填埋的 CDW 量

填埋运输温室气体排放=到填埋场距离×单位运输温室气体排放×填埋的 CDW 量

资源化运输温室气体排放=CDW 运输到资源化企业的距离×单位运输能源消耗×资源化的 CDW 量

资源化产品生产温室气体排放=单位生产温室气体排放×资源化产品生产量

非法运输温室气体排放=单位运输温室气体排放×非法排放的 CDW 量×非法排放运距

③土地损失主要方程

土地损失=填埋 CDW 的土地损失+非法排放的土地损失

填埋 CDW 的土地损失=填埋的 CDW 量×单位土地损失

回收利用和资源化带来的资源节约=回收利用节约的建材量+资源化节约的建材量

非法排放的土地损失=非法排放的 CDW 量×单位土地损失

④资源节约主要方程

资源节约=回收利用和资源化带来的资源节约+资源化产品使用带来的资源节约

5. 1. 3 模型检验

模型检验是构建系统动力学模型的一个必不可少的环节,模型检验是为了验证模型与真实系统的一致性,保证模型的适用性,最终得到与真实系统高度一致的模型。模型检验主要包括模型边界测试、量纲一致性检验、模型结构测试、参数估计测试以及极端情况测试[32]。经检验,本例构建模型均通过了以上测试。

5. 2 模拟仿真结果及分析

根据研究建立的建筑废弃物处置的经济系统、环境系统模型,以及确定的各变量的初始值、参数值和数量关系,运用 Vensim 软件进行系统仿真,模拟当前政策形势不变的情况下重庆市 2016 年到 2030 年建筑废弃物处置的经济效益和环境效益。模型中,产生的建筑废弃物的量、工地现场收集的建筑废弃物的量、非法排放的建筑废弃物的量、工地现场分类分拣的建筑废弃物的量、现场回收利用的建筑废弃物的量、填埋的建筑废弃物的量、回收利用节约的建材量、资源化节约的建材量、资源化产品生产量、资源化产品销售量的初始值均为 0。

对建筑废弃物处理的环境系统进行仿真,选取重庆市建筑废弃物处理产生的能源消耗、温室气体排放、土地损失以及资源节约四个指标作为资源化对建筑废弃物处理环境系统影响的评价标准。得到预测的 2016~2030 年重庆市建筑废弃物处理能源消耗、温室气体排放、土地损失以及资源节约值,如图 5~图 8 所示。

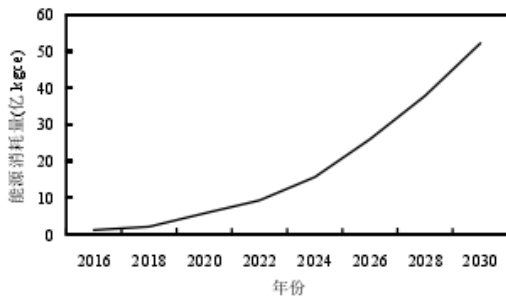


图5 建筑废弃物处理系统的能源消耗

Fig.5 Energy consumption in construction and demolition waste disposal system

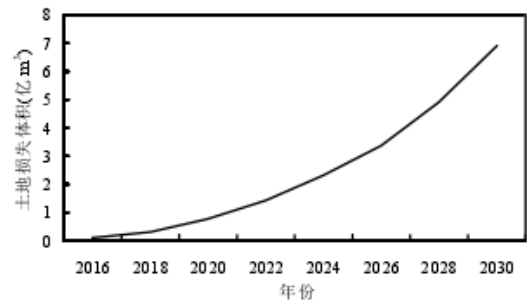


图7 建筑废弃物处理系统的土地损失

Fig.7 Land loss of construction and demolition waste disposal system

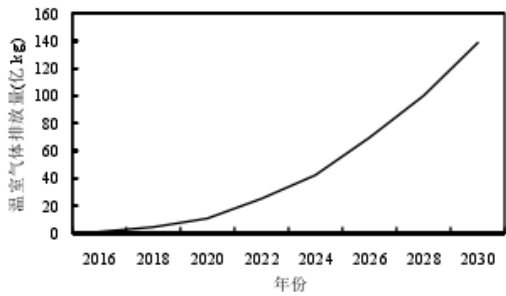


图6 建筑废弃物处理系统的温室气体排放

Fig.6 Greenhouse gas emissions of construction and demolition waste disposal system

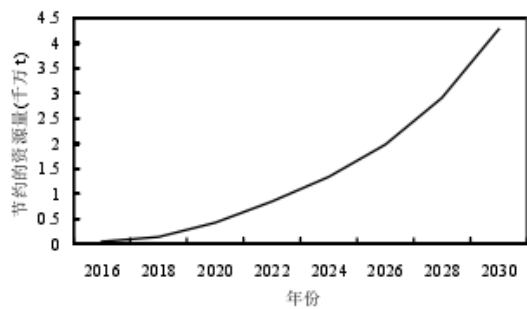


图8 建筑废弃物处理系统的资源节约

Fig.8 Resource conservation of construction and demolition waste disposal system

依据仿真结果可知,若不对建筑废弃物的处置加以控制,即以当前的情况蔓延下去。随着建筑废弃物的增加,2016~2030年重庆市建筑废弃物处理造成的能源消耗、温室气体排放以及土地损失将均以飞快的速度不断增长,对环境产生非常不利的影响,所以当前的建筑废弃物处理方式亟需改进,应尽量采取措施选择对环境影响较小的建筑废弃物处理方式,减少建筑废弃物处置对环境产生的不利影响。如图8所示,建筑废弃物经过处理而使得节约的资源不断增加,这是由于当前建筑废弃物资源化的处理方式虽有待优化,但资源化的过程中仍进行了一些简单的现场回收利用节约了资源,使得资源节约量不断增加。所以可以得到,现场回收利用资源的方式是可取的,应大力促进建筑废弃物的回收利用和资源化以提高环境效益。

5.3 情景分析

5.3.1 可调控因素

将表1识别出的影响系统发展的要素作为可调控因素,分为两类:行为类影响因素(建筑废弃物处理相关法规的完善程度、监管力度、施工现场的回收利用意识、科研研发、资源化产品质量标准和认证制度、资源化产品公众形象推广)和可具体取值类影响因素(非法排放建筑废弃物的单位罚款、单位填埋收费、建筑废弃物运输到资源化企业的距离、资源化单位补贴额)。

5.3.2 单因素调控

单因素调控的目的在于确定各行为类影响因素(建筑废弃物处理相关法规的完善程度、监管力度、施工现场的回收利用意识、科研研发、资源化产品质量标准和认证制度、资源化产品公众形象推广)对资源化环境效益的影响程度,在调控的过程中需要将些影响因素改变相同的比例,即在影响因素变化程度相同的情况下,比较其对结果产生的影响程度的差别。本研究将表4中这

些因素的数值分别增加 40%和 80%(代表相应的政府管理行为的完善程度水平在现有基础上提高 40%和 80%)后,观察其指标值的变化。而对于非法排放建筑废弃物的单位罚款、单位填埋收费、建筑废弃物运输到资源化企业的距离、资源化单位补贴额这些在实际中可以直接取值的影响因素,通过调控得出其对资源化环境效益影响的规律,确定合理的取值。从建筑废弃物管理的环境效益出发,单因素调控过程中选取能源消耗、温室气体排放、土地损失以及节约的资源作为指标。

① 为类影响因素的调控

改变代表建筑废弃物处理相关法规的完善程度的数值,提高其完善程度。由表 4 中得到现行的建筑废弃物处理的相关法规的完善程度的取值为 34,根据上述调控规则,将其数值分别增加 40%和 80%得到法律法规完善程度的取值分别为 48 和 61。将其数值代入模型中,保证其他变量数值均不改变,然后进行系统仿真模拟,与初始情况(建筑废弃物处理的相关法规的完善程度的取值为 34 时)进行对比,得到的结果如图 9~图 12 所示。

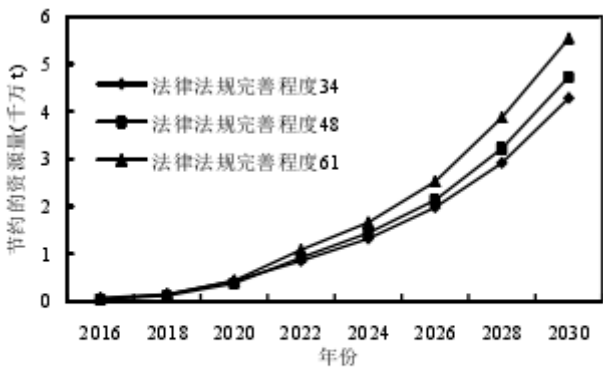


图 9 对法规的完善程度调控得到的资源节约
Fig.9 Resource conservation under different degree of perfection of laws and regulations

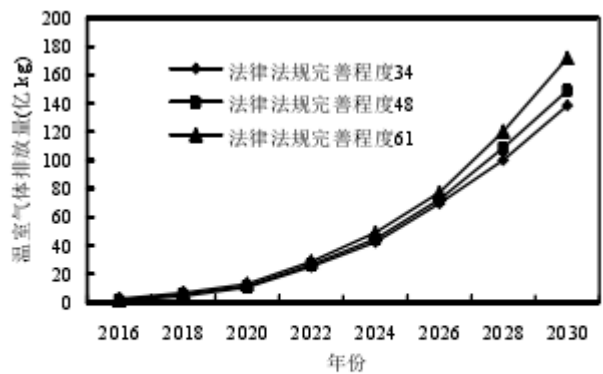


图 11 对法规的完善程度调控得到的温室气体排放
Fig.11 Greenhouse gas emissions under degree of perfection of laws and regulations

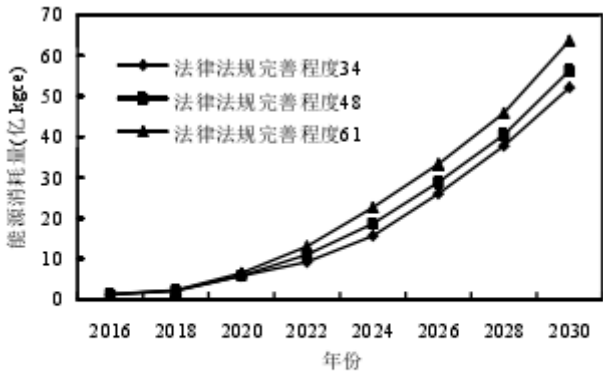


图 10 对法规的完善程度调控得到的能源消耗
Fig.10 Energy consumption under different degree of perfection of laws and regulations

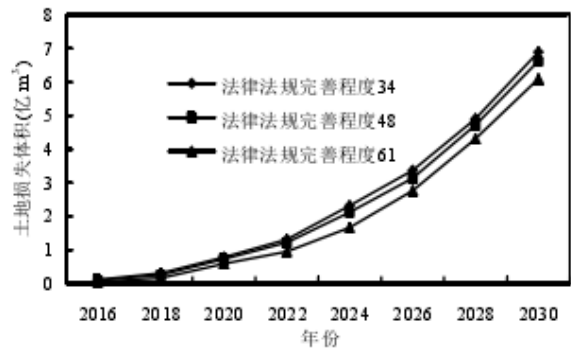


图 12 对法规的完善程度调控得到的土地损失
Fig.12 Land loss under different degree of perfection of laws and regulations

1) 由以上仿真结果可知,能源消耗和温室气体排放在法规完善程度增强的情况下会略有增加,这是因为资源化的建筑废弃物增加,破碎筛分建筑废弃物和生产资源化产品都需要消耗能源,而消耗的这些能源比非法排放建筑废弃物消耗的能源多,所以能源消耗和温室气体排放增加。但是资源化的建筑废弃物量增加减少了土地损失、节约了资源,土地损失随着法规完善程度的增强而减少,通过资源化节约的资源随着法规完善程度的增强而增加。以上的这些指标随着建筑废弃物增强的变化在前几年均不明显,但是随着时间的增加差别逐渐增大。

2) 监管力度对建筑废弃物资源化处理系统的影响规律与法规完善程度的影响相似(表 7)。

3) 改变回收利用意识程度的数值, 其他变量均不变, 然后进行系统仿真模拟, 与初始情况进行对比, 得到的结果与法规的完善程度变化时指标值的变化规律一致(表 7)。

4) 改变科研研发实施情况的数值, 其他变量均不变, 然后进行系统仿真模拟, 与初始情况进行对比, 能源消耗和温室气体排放的数值随着科研研发数值的增加而略微减少, 减少的程度不是很明显。节约的资源随着科研研发的增强而增加。土地损失量没有发生改变(表 7)。

5) 改变资源化产品质量标准和认证制度实施情况的数值, 其他变量均不变, 然后进行系统仿真模拟, 与初始情况进行对比, 能源消耗和温室气体排放的数值随着资源化产品质量标准和认证制度数值的增加而略微减少, 减少的程度不是很明显。节约的资源随之略微增加, 土地损失量没有发生改变(表 7)。

6) 改变资源化产品公众形象推广程度的数值, 其他变量均不变, 然后进行系统仿真模拟, 与初始情况进行对比, 能源消耗和温室气体排放的数值随着资源化产品公众形象推广程度数值的增加而略微减少。节约的资源随之略微增加, 土地损失量没有发生改变(表 7)。

根据表 7 中各因素在变化了相同的比例后对指标值变化的影响, 可以得出: 对资源化的建筑废弃物量产生的有利影响最大的因素是法规的完善程度, 其次是政府部门的监管力度; 使节约的资源增长幅度最大的因素是现场建筑废弃物的回收利用意识, 其次是相关法规的完善程度; 使能源消耗减少幅度最大的因素是建筑废弃物的回收利用意识, 其次是科研研发; 对温室气体排放的减少产生最大影响的因素是现场的回收利用意识, 且影响显著, 其次是资源化产品公众形象推广和科研研发; 对土地损失的减少影响显著的因素是法规的完善程度, 其次是回收利用意识和监管力度。根据各因素对指标值影响程度的大小可以分析得出, 重要的影响因素主要为法规的完善程度、建筑废弃物现场回收利用意识以及科研研发这 3 个因素。

表 7 单因素调控下的各指标值(2030 年)
Table 7 The index value under the control of single factor (2030)

影响因素	资源化的 CDW量(万 t)	差值 (万 t)	节约的资源 (万 t)	差值 (t)	能源消耗(亿 kgce)	差值(万 kgce)	温室气体排 放(亿 kg)	差值 (万 kg)	土地损失(万 m ³)	差值 (万 m ³)
初始值	1627	0	4286	0	52.134	0	138.61	0	69049	0
法规的完善 程度	+40%(48) 2154	190 527	4667 5344	382 1058	56.285 53.643	41510 15090	149.60 169.08	109900 304700	66639 62366	-2410 -6683
监管力度	+40%(38) 1777	151	4588	303	55.425	32910	147.33	87200	67138	-1911
	+80%(49) 1947	320	4927	642	59.115	69810	159.09	204800	64995	-4054
回收利用 意识	+40%(64) 1627	0	4682	396	50.561	-15730	134.39	-42200	67303	-1746
	+80%(83) 1627	0	5473	1188	47.416	-47180	125.94	-126700	63812	-5237
科研研发	+40%(53) 1627	0	4536	250	50.920	-12140	138.36	-2500	69049	0
	+80%(68) 1627	0	4987	702	50.805	-13290	138.11	-5000	69049	0
资源化产品 质量标准 和 认证制度	+40%(29) 1627	0	4357	71	52.100	-340	138.53	-800	69049	0
	+80%(38) 1627	0	4433	147	52.064	-700	138.45	-1600	69049	0
资源化产品 公众形象 推广	+40%(35) 1627	0	4578	292	51.997	-1370	138.30	-3100	69049	0
	+80%(45) 1627	0	4808	522	51.889	-2450	138.05	-5600	69049	0

②具体取值类影响因素的调控

1) 对非法排放建筑废弃物的单位罚款的数值进行相同间距差值的改变, 其他变量均不变, 然后进行系统仿真模拟, 与初始情

况进行对比,得到的指标值结果如图 13~图 17 所示。

根据图 13 可知,单位罚款在小于 30 元/t 时,对资源化的建筑废弃物量基本没有影响,随着单位罚款的增加,资源化的建筑废弃物量也随之增加,当单位罚款增加到 50 元/t 时资源化的建筑废弃物量增加的变化量最多,单位罚款增加到 60 元/t 以后,增加的资源化废弃物量逐渐减少。

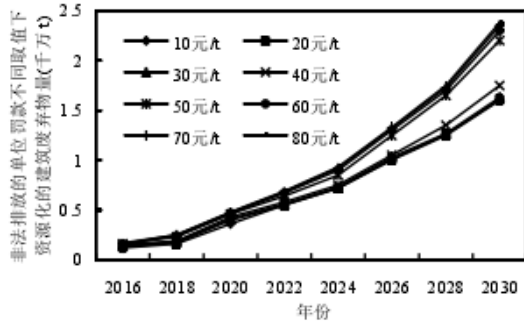


图 13 非法排放的单位罚款调控得到的资源化建筑废弃物量
Fig.13 Recycling quantity of construction and demolition waste under different degree of unit fine of illegal discharge

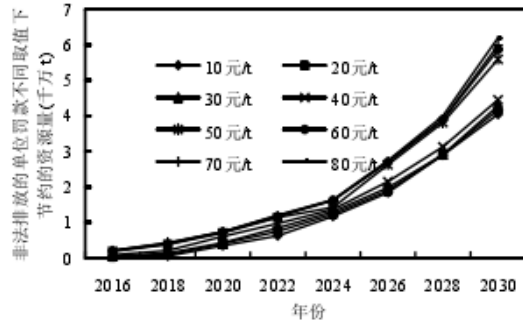


图 14 非法排放的单位罚款调控得到的节约的资源
Fig.14 Resource conservation under different degree of unit fine of illegal discharge

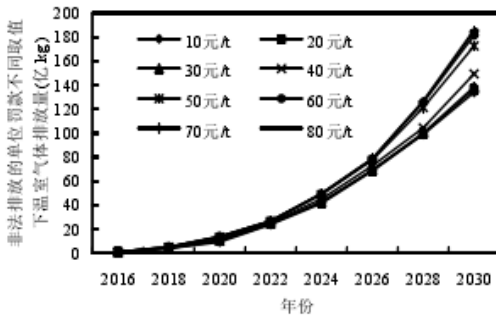


图 15 非法排放的单位罚款调控得到的温室气体排放
Fig.15 Greenhouse gas emissions under different degree of unit fine of illegal discharge

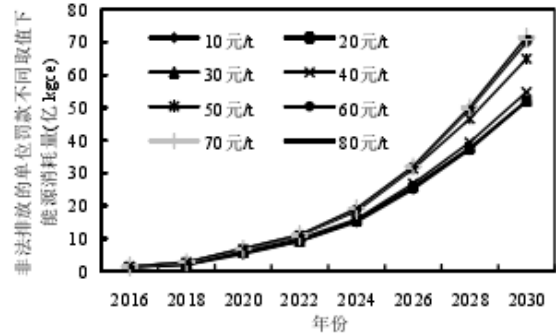


图 16 非法排放的单位罚款调控得到的能源消耗
Fig.16 Energy consumption under different degree of unit fine of illegal discharge

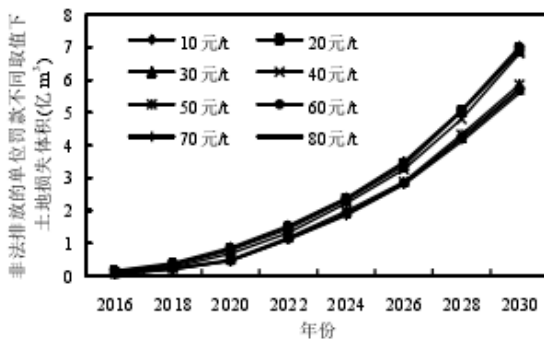


图 17 非法排放的单位罚款调控得到的土地损失
Fig.17 Land loss under different degree of unit fine of illegal discharge

根据图 14 可知,当单位罚款小于 30 元/t 时,节约的资源量与初始值相比没有发生变化,当单位罚款大于 30 元/t 时,节约的资源随着单位罚款的增加而增加,增加的幅度在单位罚款为 50 元/t 时达到最大,当单位罚款大于 60 元/t 时,节约资源的增加量不是很明显,但依然在小幅度增加。

根据图 15 和图 16 可知,温室气体排放量和能源消耗量在单位罚款小于 30 元/t 时,与初始值相比没有发生变化,当单位罚款大于 30 元/t 时,能源消耗量和温室气体排放量随着单位罚款的增加而增加,这是由于单纯的单位罚款的增加会致使填埋的建筑废弃物大量增加,从而增加运输和填埋的能源消耗以及温室气体排放。

根据图 17 可知,由于建筑废弃物的处置而损失的土地量在单位罚款小于 30 元/t 时,与初始值相比没有发生变化,当单位罚款大于 30 元/t 时,损失的土地量随着单位罚款的增加而减少,当单位罚款增加到 50 元/t 时土地损失的减少量变化得最明显,单位罚款增加到 60 元/t 以后,土地损失量虽然也在减少,但不是很明显。

综合以上分析,当非法排放的单位罚款小于 30 元/t 时,对建筑废弃物的资源化基本不会产生影响,而非法排放的单位罚款由 30 元/t 开始增加时,对建筑废弃物的资源化量、资源节约量、土地损失量产生有利的影响,但是对资源化企业的利润、能源消耗和温室气体排放产生的影响并不利,所以非法排放单位罚款并不是越大越好。结合以上原因,综合考虑有利效益取得边际效应最大时的单位罚款额,即当非法排放单位罚款在 50 元/t~60 元/t 时,既可以使产生有利变化指标的变化率达到最大值,又不会对其他指标产生较大的不利影响。

2) 同理,对单位填埋收费的数值进行相同间距差值的改变,其他变量均不变,然后进行系统仿真模拟,与初始情况进行对比,得出结论:根据仿真模拟的结果,权衡单位填埋收费对各指标的影响程度,当单位填埋收费取 30 元/t 左右时,产生的经济效益以及环境效益相对处于最佳的状态。

3) 同理,对建筑废弃物运输到资源化企业的距离进行相同间距差值的改变,其他变量均不变,然后进行系统仿真模拟,得到:建筑废弃物运输到资源化企业的距离越小,产生的经济效益和环境效益越好,当运距在 5, 15, 25km 时产生的环境效益明显优于较大运距时的效益,由于运距在 5, 15, 25km 时的指标值差别不是很大,考虑到实际情况,建筑废弃物处置中心距离市中心不宜过近,所以当建筑废弃物到资源化处置中心的距离在 15~25km 左右时,比较合理,且可以对环境效益产生较大的有利影响,所以建筑废弃物到资源化处置中心的距离以 20km 左右为宜。

4) 依据以上的分析方法对资源化单位补贴额进行相同间距差值的改变,其他变量均不变,然后进行系统仿真模拟,与初始情况进行对比,随着资源化单位补贴额的增加,建筑废弃物资源化系统产生的环境效益也不断增加,当资源化单位补贴额大于 25 元/t 时,各个指标的变化幅度不大,甚至有的指标基本不变,所以可以认为当资源化单位补贴额大于 25 元/t 时的经济效益和环境效益基本相同。考虑到财政支出,将资源化的单位补贴额选取为 25 元/t 时比较合理。

6 结论

6.1 对建筑废弃物资源化的系统动力学模型进行仿真模拟,可知:如果按照建筑废弃物当前处置的现状继续发展下去进行预测,能源消耗、温室气体排放、土地损失随着时间的增加不断增加,对环境产生较大的不利影响。所以,当前形势下建筑废弃物的处置情况并不是最佳的状态,需要对其进行调整以促进建筑废弃物的资源化处置和资源化产品的销售,提高环境效益。

6.2 对建筑废弃物资源化的各行为类政策影响因素进行单因素调控,可以得到单一因素值的增加并不都会引起指标值向有利方向发生变化,因为建筑废弃物资源化处置是一个复杂的系统。但通过系统仿真模拟,可以得知:单因素政策调控中,法规的完善程度、建筑废弃物现场回收利用意识以及科研研发这三个因素是行为类影响因素中主要的影响因素。

6.3 通过单因素调控的仿真模拟,综合考虑现实情况与政府的财政支出,可以得出当非法排放单位罚款在 50~60 元/t 时,单位填埋收费取 30 元/t 左右时,建筑废弃物到资源化处置中心的距离在 15~25km 左右时,资源化的单位补贴选取为 25 元/t 左右时,对环境效益产生较大的有利影响,可以使环境效益相对处于较优的状态。

6.4 政府应首先确定对非法排放单位罚款、单位填埋收费、资源化单位补贴额的选取,合理规划资源化处置中心布点,然后优先考虑提高关于建筑废弃物处置相关法规的完善程度、培养相关人员的现场回收利用意识、鼓励科研人员进行相关研发的政策措施以提高建筑废弃物资源化的环境效益,促进可持续发展。

参考文献:

- [1]王家远,袁红平. 基于系统动力学的建筑废料分类分拣管理模型[J]. 进步与对策, 2008, 25(10):74-78.
- [2]王家远,李政道,王西福. 基于系统动力学的建筑废弃物经济成本评估[J]. 建筑经济, 2012, 358(8):95-98.
- [3]李政道. 基于系统动力学的设计阶段建筑废弃物减量化效果评估[D]. 深圳:深圳大学, 2013.
- [4]王地春,张智慧,刘睿劼,等. 建筑固体废弃物治理全生命周期环境影响评价—以废旧粘土砖为例[J]. 工程管理学报, 2013, 27(4):1-5.
- [5]王波. 基于生命周期评价的深圳市建筑垃圾处理模式研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [6]朱海滨. 建筑废弃物资源化项目环境效益测算和经济评价[D]. 深圳:深圳大学, 2015.
- [7]丁志坤,伊桂珍,黄腾跃. 建筑废弃物减量化管理环境效益评估模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1):99-106.
- [8] Peng C L, Scorpio D E, Kibert C J. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations [J]. Construction Management and Economics, 1997, 15(1):49 - 58.
- [9] Ling Y Y, Leo K C. Reusing timber formwork: importance of workmen's efficiency and attitude [J]. Building and Environment, 2000, 35(2):135 - 143.
- [10] Hao J L, Hills M J, Tam V W Y. The effectiveness of Hong Kong's construction waste disposal charging scheme [J]. Waste Management & Research, 2008, 26(6):553-558.
- [11] Begum R, Siwar C, Pereira J J, et al. A benefit-cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimization: the case of Malaysia [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2006, 48(1): 86 - 98.
- [12] Duran X, Lenihan H, O' Regan B. A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 46(3): 302 - 20.

- [13] Calvo N, Varela-Candamio L, Novo-Corti I. A Dynamic Model for Construction and Demolition(C&D) Waste Management in Spain: Driving Policies Based on Economic Incentives and Tax Penalties [J]. SUSTAINABILITY, 2014, 6(1):416-435.
- [14] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2013:3.
- [15] 刘景矿, 王幼松, 张文剑, 等. 基于系统动力学的建筑废弃物管理成本收益分析: 以广州市为例[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6):1480-1490.
- [16] 王家远, 袁红平. 基于系统动力学的建筑废料管理模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7):173-180.
- [17] 刘炳南, 张小娟. 国内城市建筑垃圾资源化的经济效益分析[J]. 生态经济(学术版), 2012, (2):318-320.
- [18] 胡鸣明, 何琼, 石世英, 等. 建筑垃圾管理成本分析——以重庆为例[J]. 建筑经济, 2011, (4):93-97.
- [19] 贾顺. 重庆市建筑垃圾现状分析和综合利用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [20] 吴胜利. 城市化进程中建筑垃圾处理法律制度的完善[J]. 城市发展研究, 2012, (8):120-124.
- [21] 高青松, 胡佳慧. 市场逻辑、政府规制与建筑垃圾资源化研究[J]. 生态经济, 2015, 31(5):83-87.
- [22] 齐丹丹, 胡鸣明, 石世英. 建筑垃圾资源化关键成功因素分析[J]. 建筑技术, 2012, 43(7):601-604.
- [23] 石世英, 胡鸣明, 何琼, 等. 建筑垃圾资源化的长效机制研究: 以重庆为例. 世界科技研究与发展, 2013, 35(3):320-324.
- [24] 高青松, 谢龙. 建筑垃圾资源化产业链关键节点及产业发展驱动力研究[J]. 生态经济, 2014, 30(6):137-141.
- [25] 赵利, 鹿吉祥, 顾洪滨. 建筑垃圾综合治理产业化运作与对策研究[J]. 建筑经济, 2011, 343(5):16-20.
- [26] Zhao W, Leefink R B, Rotter V S. Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China—The case of Chongqing [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(6):377 - 389.
- [27] Anghinolfi D, Paolucci M, Robba M, et al. A dynamic optimization model for solid waste recycling [J]. Waste Management, 2013, 33(2): 287-96.
- [28] 高青松, 雷琼嫦, 何花. 我国建筑垃圾循环利用产业发展迟缓的原因及对策研究[J]. 生态经济, 2012, (12):128-131.
- [29] Lu Weisheng, Yuan Hongping. Exploring critical success factors for waste management in construction projects of China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 55:201-208.
- [30] 林叶, 胡鸣明, 何琼. 信息不对称对建筑废弃物资源化回收产业的影响研究[J]. 建筑经济, 2013, 366(4):91-94.

[31] 金定强, 庄柯, 姚杰, 等. 温室气体减排方法下多电源区域的减排分析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7):2793-2800.

[32] 李旭. 社会系统动力学:政策研究的原理、方法和应用[M]. 上海:复旦大学出版社, 2009.