

# 建筑工程主体施工阶段二氧化碳排放研究

赵 平, 马宏飞, 王 冲, 张东海

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 随着城镇化进程的不断加速, 建筑工程在全国能源消耗和碳排放量所占比例不断上升, 对环境的影响程度也逐渐加大. 本文利用系统动力学, 将建筑工程项目主体结构施工阶段划分为 5 个不同的子系统, 利用系统动力学软件 Vensim 分析主体结构施工阶段二氧化碳的排放量, 并确定环境影响的主要子系统, 为今后在实施绿色施工时, 有针对性的改进工作提供了有效依据. 经过分析比较得出, 商品混凝土工程排放二氧化碳所占比重最大, 其次依次为模板工程、钢筋工程、运输工程、脚手架工程.

**关键词:** 系统动力学; 主体结构施工阶段; Vensim; 二氧化碳排放量

**中图分类号:** X831; TU198+.6 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0800-05

据分析中国统计年鉴的数据可得, 2009 年至 2011 年, 中国建筑业房屋建筑施工总面积连续两年保持约 20% 的增速, 2011 年房屋建筑施工面积达 85.18 亿  $\text{m}^2$ .<sup>[1]</sup> 房屋建筑形成至报废的全过程, 对地区、区域乃至全球生态环境、资源消耗、人体健康等都造成了很大的影响. 2010 年中国在气候变化方面的损失为 720 亿美元, 其中碳排放造成的损失为 710 亿美元. 因而针对施工过程二氧化碳排放的研究, 可以为有效降低施工过程对环境的影响提供有效指导.

目前碳排放的计算方法主要有实测法、物料衡算法、排放系数法、模型法 4 种<sup>[2]</sup>, 其中排放系数法应用较多. 李兵等根据碳足迹评价标准, 首次提出了基于 BIM 及相关软件的建筑施工碳排放测算模型<sup>[3]</sup>, 但是并未确定影响碳排放量的关键分项工程. 于萍等根据全生命周期理论得出, 住宅建筑在运行维护和物化阶段建筑物碳排放对环境的负面影响较大<sup>[4]</sup>. 本文在研究二氧化碳排放量时, 首次将建筑工程施工阶段划分为 5 个主要子系统, 根据产生二氧化碳排放的各个因素, 有针对性的构建各子系统的二氧化碳排放量公式, 并未完全照搬已有的研究成果. 同时, 本文也首次将系统动力学软件应用在二氧化碳排放的计算模型中, 极大方便了计算过程.

系统动力学 (System Dynamics) 的出现始于 1956 年, 其创始人美国麻省理工学院的福瑞斯特 (Jay W. Forrester) 教授. 如今, 系统动力学已经被广泛运用到可持续发展、城市规划、科技管理和国家发展等众多领域<sup>[5]</sup>. 王雪娜分析了系统动力学、系统思考及系统仿真的机制及其先进性, 指出了其在能源类碳源排放量测算问题中应用的必要性和可行性<sup>[6]</sup>. 卢梅等针对影响工程项目三大目标实现的各项因素, 建立了系统动力学模型, 并提出了模糊控制方法在目标控制中的应用<sup>[7]</sup>. 本文基于系统动力学理论和方法, 构建建筑工程主体施工阶段二氧化碳排放量研究模型, 并借助系统动力学软件 Vensim 进行计算机模拟, 确定了主要的影响子系统.

## 1 建筑工程主体施工阶段二氧化碳排放量研究模型

本文所指的施工阶段二氧化碳排放量, 不仅包括施工过程中电能消耗、水资源消耗、油耗等产生的排放量, 同时将施工阶段所使用的材料, 在生产以及场内运输过程中排放的二氧化碳计入其中, 但是不考虑桩基工程、二次结构及装饰装修工程的二氧化碳排放量.

### 1.1 二氧化碳排放量模型的构建

根据建筑工程施工阶段施工工序内容, 可以将主体结构施工系统划分为钢筋工程、模板工程、混凝土工程、脚手架工程和运输工程五个子系统. 分别对各子系统进行二氧化碳排放量研究, 进而综合为整个主体施工阶段的二氧化碳排放量.

所构建的主体结构施工阶段二氧化碳排放量分析模型如图 1 所示.

在利用计算机进行模拟分析时, 首先利用 Vensim 软件中的 “Model” (模型) 功能键, 确定所建模型的初始运行时间、终止时间、步长及时间单位等, 接着在 Vensim 窗口中依次选择系统中的各个变量, 点

击“Equation”(方程式)功能键,在出现的窗口中输入方程式或常数.完成所有变量赋值后,运用“Run a Simulation”(执行模拟)功能键运行模型.最后,利用分析工具栏中的“Table Time Down”(直向表格)功能键,便可计算出各子系统的二氧化碳排放量,从而确定主要的影响子系统.

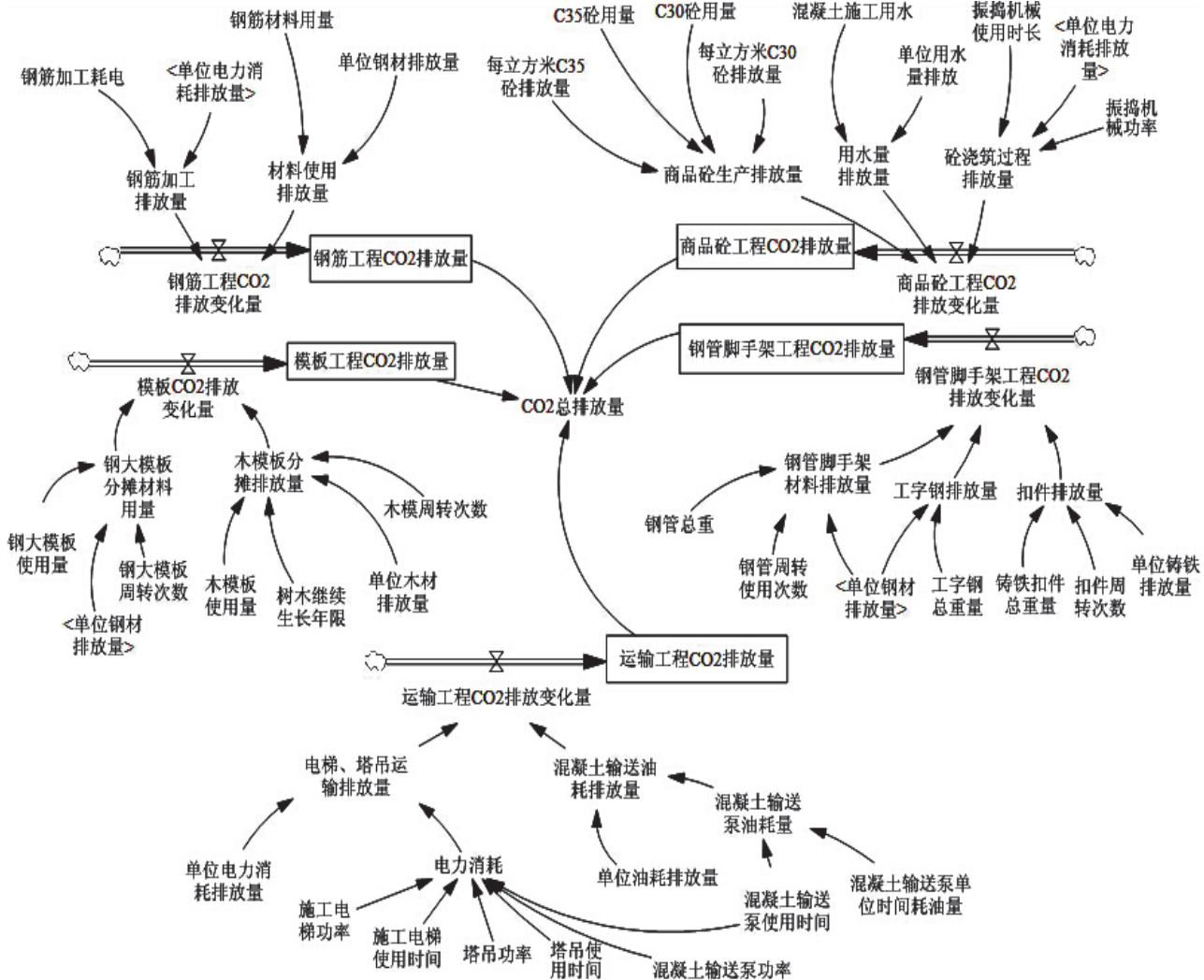


图 1 主体结构施工阶段二氧化碳排放量分析模型

Fig.1 Analytical model of carbon dioxide emissions of the main structure under construction

1.2 各子系统二氧化碳排放量分析

1.2.1 模板工程系统

目前建筑行业普遍使用的模板主要是钢模板和木模板,塑料模板和铝模板也在不断的推广中.其中,钢模板的使用面积占总量不到 1/4,而木模板使用面积达到 75%以上<sup>[8]</sup>.因为模板系统在使用阶段对环境的影响很小,所以将生产模板所产生的碳排放量作为施工阶段对环境影响的考虑因素.钢模板二氧化碳排放量计算公式为:  $E = Q \cdot K / n$ , 其中:  $E$  为二氧化碳排放量 (g);  $Q$  为每千克钢材二氧化碳总排放量 (g);  $K$  为钢材总重 (kg);  $n$  为钢模板周转使用次数.每千克钢材二氧化碳排放量  $Q$  为 410 g<sup>[9]</sup>,结合施工过程中模板使用的总重量  $K$ ,得出总的二氧化碳排放量,再根据钢模板的周转使用次数  $n$ ,将总的二氧化碳排放量进行平均,从而计算出钢模板使用一次的二氧化碳排放量.在计算木模板二氧化碳排放量时,因为无法计算使用木材对环境排放的二氧化碳的量,所以可以将这一部分木材本应吸收的二氧化碳量,作为其对环境的影响加以考虑.木模板二氧化碳排放量计算方法为:根据模板的木材使用量,再结合木材吸收二氧化碳量,就可计算出每年木模板本应吸收的二氧化碳的量,再乘以一定的年限即可,本文取为 20 年,同时考虑到木模板的周转次数,一般取 8 次<sup>[8]</sup>.据专家测定,森林每生长 1 m<sup>3</sup> 木材大约可以吸收 1.83 t 二氧化碳.

1.2.2 钢筋工程系统

钢筋工程系统包括钢筋的存储、加工、绑扎、焊接、回收利用等.钢筋加工流程为:除锈—调整调直—切断—弯曲成型.所使用到的机器有调直机、切断机和弯曲机,焊接过程需要使用电焊机,加工及焊接

过程二氧化碳排放计算方法为： $E = a \sum_{i=1}^{n=4} t_i p_i m_i$ ，其中： $E$  为二氧化碳排放量（kg）； $a$  为燃煤产生每千瓦时电能所排放的二氧化碳量（kg）； $i=1,2,3,4$ ，分别表示调直机、切断机、弯曲机和电焊机； $t_i$  为相应机器在整个施工阶段的工作总时长（h）； $p_i$  为相应机器的功率（kW）； $m_i$  表示相应机器的数量。

与模板一样，将钢筋生产阶段的二氧化碳排放量计入施工阶段。在进行钢筋工程施工时，要精确计算钢筋需求量，降低损失率，将损耗率控制在 2% 以下。要做好钢筋的回收使用，例如将回收中质量合格的钢筋当做马凳和墙体定位筋等。

1.2.3 混凝土工程系统

混凝土工程包括运输、浇筑、振捣、养护。普通混凝土划分为十四个等级，生产不同等级的混凝土所排放的二氧化碳也不一样，王帅详细分析了生产六个等级的混凝土对环境的影响，可作为参考<sup>[10]</sup>。在施工阶段，主要考虑混凝土的浇筑、振捣和养护过程对环境的影响。在浇筑过程中使用的机械包括：混凝土输送泵、振动器。根据机械的功率、使用时长即可计算出耗电量，继而可得出二氧化碳排放量。严格控制冲洗混凝土输送泵用水量和养护过程中用水量，并做好记录统计。根据消耗每立方米水资源所排放的二氧化碳，便可计算总的排放量。

1.2.4 脚手架工程系统

脚手架按照所用材料的种类可以分为：木脚手架、竹脚手架和钢管脚手架，在高层建筑中，使用钢管脚手架较为普遍，因而主要考虑使用此种脚手架对环境的二氧化碳排放影响。同样将生产过程的二氧化碳排放计入施工阶段。计算方法为： $E=(L \cdot A \cdot Q_1 + M \cdot E_a \cdot E_b)/n$ ，其中： $L$  为钢管总长（m）； $A$  为钢管规格（kg/m）； $n$  为钢管、铸铁周转使用次数（取 50 次）； $Q_1$  为每千克钢材二氧化碳总排放量（g）； $M$  为扣件的总重量（t）； $E_a$  为每吨铸铁的标准煤耗，根据国家铸造协会的统计数据，中国铸铁业平均能耗为 800 kgce/t； $E_b$  为每千克标准煤的二氧化碳排放量 2.46 kg<sup>[11]</sup>。

1.2.5 运输工程系统

运输工程系统主要考虑施工材料场内的垂直运输，统计垂直运输机械的电能消耗和原油消耗，即可得出相应二氧化碳的排放量。变量取值如表 1 所示<sup>[8-10]</sup>。

表 1 变量取值表  
Tab.1 Variable values

变量名称	变量取值	变量名称	变量取值
每千克钢材CO <sub>2</sub> 排放量	0.410 kg	每立方米自来水CO <sub>2</sub> 排放量	0.213 kg
每千瓦时电CO <sub>2</sub> 排放量	1.063 kg	每立方米木材可吸收CO <sub>2</sub> 量	1 830 kg
每升柴油CO <sub>2</sub> 排放量	2.655 kg	每立方米混凝土CO <sub>2</sub> 排放量	C30 254.5 kg C35 268.1 kg
木模板周转次数	8 次	全钢大模板周转次数	600 次

注：C35 混凝土每立方米二氧化碳排放量根据 C30 和 C40 排放量运用插值法估算。  
燃烧一吨柴油产生二氧化碳 3.16 t，一吨柴油约为 1 190 L，则消耗每升柴油产生 2.655 kg 的二氧化碳。

2 实例分析

2.1 案例概况

西安市某栋高层住宅，总建筑面积 21 757 m<sup>2</sup>，地上 18 层，地下 1 层，建筑高度为 58 m，主体为钢筋混凝土剪力墙结构，工期为 352 d，其中从地下室到主体结构完工耗时 85 d，近似记为 6 个月，材料耗用情况如表 2 所示。

2.2 模拟结果及分析

该模型包含五个子系统，由于篇幅有限，仅以商品混凝土工程CO<sub>2</sub>排放子系统为例进行简单的分析。在 Vensim 窗口中选择“商品砼工程CO<sub>2</sub>排放变化量”变量，用鼠标双击该变量使之成为工作变量，再点击分析工具栏中的“Causes Tree”（因果树图）按钮，便可得到如图 2 所示的因果树图，从中可以较为清晰的了解该子系统的影响因素，再点击“Equations”（方程式）键，利用方程式编辑器来建立编辑模块方程式，如图 3 所示。其他变量依此操作逐步进行确定，最后点击工具列中的“Run a Simulation”（执行模拟）便可得出相应的结果。

商品混凝土工程CO<sub>2</sub>排放子系统状态变量和速率变量的计算方程如下：

状态变量方程:

商品砼工程CO<sub>2</sub>排放量=商品砼过去时刻排放量+商品砼过去至当前时刻排放变化量

(1)

速率变量方程:

商品砼工程CO<sub>2</sub>排放变化量=商品砼生产排放量+用水量排放量+砼浇筑过程排放量

(2)

表 2 材料耗用

Tab.2 Material consumption			
项目	耗用量	项目	耗用量
钢筋	1 256 t	混凝土施工用水	4 429 m <sup>3</sup>
C30 混凝土	5 373 m <sup>3</sup>	木材	165 m <sup>3</sup>
C35 混凝土	5 427 m <sup>3</sup>	扣件 (铸铁)	19.8 t
钢管	96 t	全钢大模板	63.45 t
工字钢	5 t		

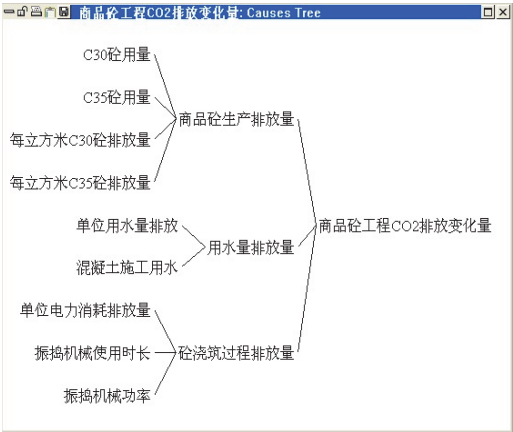


图 2 因果树  
Fig.2 Causes tree



图 3 方程式编辑器  
Fig.3 Equation editor

本案例的持续时间为 6 个月, 计每段时间间隔为 1 个月, 为了便于统计最终结果, 可以在主体结构施工结束后, 将各项消耗汇总输入模型, 再将商品砼工程CO<sub>2</sub>排放变化量除以六, 即认为每月的输入量相等, 那么商品砼工程CO<sub>2</sub>排放量就会呈现线性增长, 如图 4 所示.

将各变量的数值输入模型, 得出相应子系统所排放CO<sub>2</sub>量依次为: 商品混凝土工程子系统排放 2 824 210 kg, 钢筋工程子系统排放 538 463 kg, 模板工程子系统排放 754 918 kg, 钢管脚手架工程子系统排放 3 617 kg, 运输工程子系统排放 95 220 kg. 各部分在CO<sub>2</sub>总排放量中所占比例如图 5 所示.

从图 5 中可以看出, 在主体工程施工阶段商品混凝土工程所排放的CO<sub>2</sub>量所占比重最大, 其次是模板工程和钢筋工程, 而脚手架工程和运输工程排放量所占比重较小. 因而在推行绿色施工时, 要特别注重商品混凝土工程、模板工程及钢筋工程的施工过程, 严格控制材料的投入, 减少材料在使用过程中的损耗率, 大力推广绿色施工材料, 开发绿色替代材料, 减少施工过程对环境的影响.

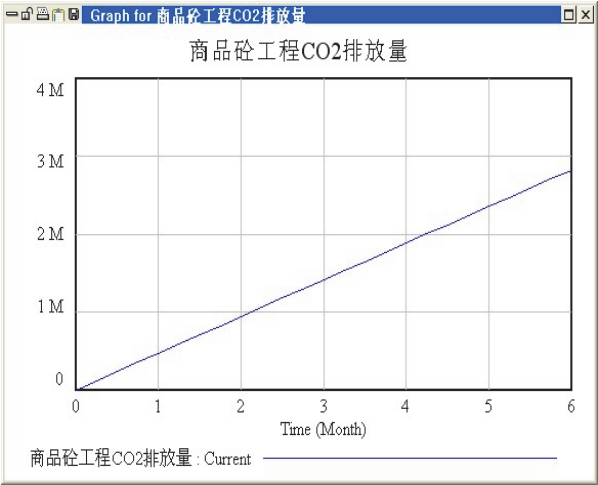


图 4 商品砼CO<sub>2</sub>排放量

Fig.4 Carbon dioxide emissions from commercial concrete

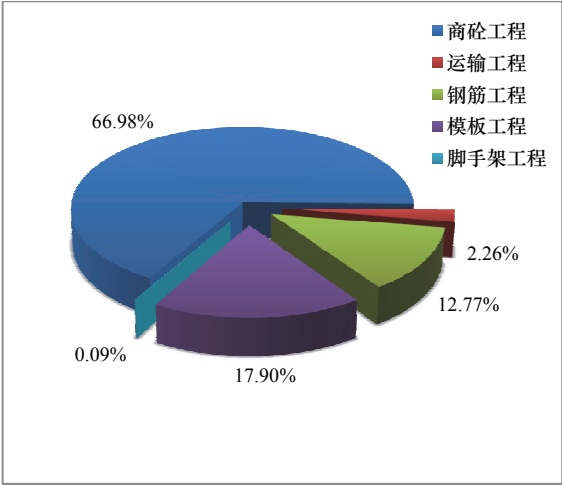


图 5 二氧化碳排放量比例分布

Fig.5 Proportional distribution of carbon dioxide emissions

### 3 结语

在构建二氧化碳排放量分析模型时,本文首次有针对性的分析建筑工程项目主体施工阶段,并将该阶段划分为5个子系统,在计算过程中创新性的引入系统动力学软件,使得繁杂的运算过程简单化.最后,结合实际工程案例,对各变量进行赋值或编辑方程,找出了该阶段影响二氧化碳排放量的主要子系统有三个,分别是:商品混凝土工程、模板工程及钢筋工程.将建筑物物化阶段二氧化碳排放量的主要影响因素具体化,使得有关施工阶段二氧化碳排放量的已有研究成果更加充实,为今后实施绿色施工提供参考.

当然,本文也存在一些不足,如未能对各子系统工程提出相应的替代方案,将不同的方案进行比较,从而找出最优的施工方案,这也是今后继续研究的方向.

### 参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2012[M]. 北京: 统计出版社, 2012.  
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook-2012[M]. Beijing: Statistics Press, 2012.
- [2] 张德英, 张丽霞. 碳源排放量估算办法研究进展[J]. 内蒙古林业科技, 2005(1): 20-23.  
ZHANG Deying, ZHANG Lixia. Progress in estimation method of carbon emission[J]. Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2005(1): 20-23.
- [3] 李兵, 李云霞, 吴斌, 等. 建筑施工碳排放测算模型研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011(2): 5-10.  
LI Bing, LI Yunxia, WU Bin, et al. Research on low-carbon calculation model in building construction stage[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2011(2): 5-10.
- [4] 于萍, 陈效述, 马禄义. 住宅建筑生命周期碳排放研究综述[J]. 建筑科学, 2011, 27(4): 9-12, 35.  
YU Ping, CHEN Xiaoqi, MA Luyi. Review on studies of life cycle carbon emission from residential buildings[J]. Building Science. 2007, 27(4): 9-12, 35.
- [5] 钟晓光. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
ZHONG Xiaoguang. System Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] 王雪娜. 我国能源类碳源排放量估算办法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.  
WANG Xuena. Study on estimation method of carbon emission to energy carbon sources in China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [7] 卢梅, 刘洋, 金婷, 等. 基于SD及模糊控制的工程项目目标管理[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(3): 400-405.  
LU Mei, LIU Yang, JIN Ting, et al. Objective management in the project based on the SD and fuzzy control[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2012, 44(3): 400-405.
- [8] 仇铭华. 我国建筑铝模板产业的崛起对绿色施工的推动作用[J]. 施工技术, 2012, 41(361): 43-47.  
QIU Minghua. Promoting role of aluminum formwork industry rising for green construction in China[J]. Construction Technology, 2012, 41(361): 43-47.
- [9] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.  
YANG Jianxin, XU Cheng, WANG Rusong. Methodology and Application of Life Cycle Assessment[M]. Beijing: Meteorologic Press, 2002.
- [10] 王帅. 商品混凝土生命周期环境影响评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
WANG Shuai. Research on the EIA of ready-mixed concrete during the life cycle[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [11] 汪澜. 水泥生产企业CO<sub>2</sub>排放量的计算[J]. 中国水泥, 2009(11): 21-22.  
WANG Lan. The calculation of carbon dioxide emissions from cement production enterprises[J]. China Cement, 2009(11): 21-22.

## Research on carbon dioxide emissions of the main building at construction stage

ZHAO Ping, MA Hongfei, WANG Chong, ZHANG Donghai

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** With the development of the urbanization process, the constructional engineering's energy consumption and carbon emissions rate is becoming higher and higher and its effects on environment are more and more distinctive. Based on the system dynamics theory, this article divides the constructional engineering program's main structure construction stage into 5 different subsystems, in analyzing carbon dioxide emissions at construction stage with VENSIM and determining the main subsystem that affect the environment. This system provides effective basis for the targeted improvements for the implementation of green construction. As a result, the carbon dioxide emissions of commercial concrete projects accounted for the largest proportion, which is followed by the order of formwork engineering, steel engineering, transportation engineering and scaffold engineering.

**Key words:** system dynamics; main structure construction stage; VENSIM; carbon dioxide emissions

(本文编辑 桂智刚)