

对中国混凝土废弃物总量的预测与估值

Jianguang Shi, Yuezhou Xu

Department of Civil Engineering, Xiamen University, Fujian 361005, China

Received 7 October 2005; received in revised form 13 March 2006; accepted 15 March 2006

Available online 16 May 2006

摘要: 随着中国经济的快速发展,其资源短缺和环境污染已经变得越来越严重。作为主要产业之一,建筑业消耗大量的自然资源,同时也造成许多土木工程浪费(下文简称CEW)。对这些已经浪费的土木工程进行回收利用不仅能有效解决环境污染问题,而且能大大减少对自然资源的消耗。为了对混凝土废弃物有一定的认识,这篇论文根据每年的水泥生产和建筑面积分别地对混凝土废弃物的数量进行了估算,基于水泥生产的这个方法适用于估算混凝土废弃物的总量,基于建筑面积的那个方法可以用于估算在建筑中混凝土废弃物的总量。混凝土废弃物未来的总量也可以预测。用已建立的灰色预测模型来估量未来的建筑面积,而且能用国内生产总值时间预测方法系列来估量未来的水泥生产,此方法也用于估算碎石发展的速率。结果表明,中国混凝土废弃物的总量于2000年达到了8800万公吨,而且未来每年的增长率会达到8%以上。

关键词: 土木工程废弃物 混凝土废弃物 估值 预测

1. 引言

建筑业是中国主要产业之一,其投资在2003年达到了33447亿元人民币,这占了房地产总投资的60.2%(中国国家数据局,2004),在建筑业所消耗的材料总量将近所有行业所消耗的材料的一半(Zhan, 2004)。最近几年里,由于快速的城市化和城市重建所导致的大规模地搞建筑和建筑物拆迁,土木工程废弃物量已达到了城市总废弃物量的30–40%。材料的巨大消耗和丢弃与可持续发展不相协调,使环境条件恶化,也加重了资源的负担。因此,对土木工程废弃物的最大化利用或回收是必然的选择。为了对土木工程废弃物或是混凝土废弃物进行量化预测和估值,已经提出了些许方法,例如:基于建筑面积的方法(Hsiao et al., 2002; Fatta et al., 2003),基于建筑投资的方法(Yost and Halstea, 1996)和基于人口的方法。事实上,混凝土废弃物的总量与混凝土产量或水泥生产有关,楼房建设和拆除也会产生混凝土废弃物。这篇论文分别根据往年每年的水泥生产和建筑面积尝试着对混凝土废弃物总量做出一个好的估量,然后预测混凝土废弃物的增长趋势,这一预测方法依据国内生产总值时间预测方法系列,其是用来估量未来的水泥生产和建筑面积的。

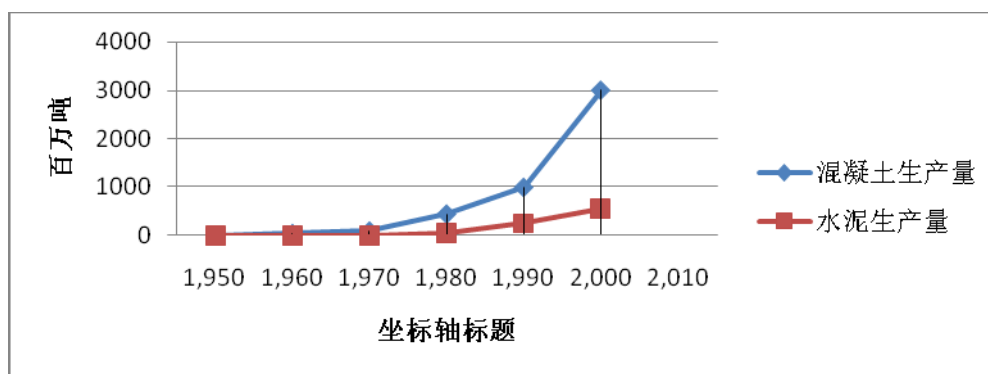
2. 混凝土废弃物的估值

2.1 混凝土废弃物的定义以及来源

土木工程废弃物一般是指剩下的泥、残渣、泥浆和其他的丢弃物,这些是建筑公司或私人在建造、拆除、重建和装修时产生的。混凝土废弃物是土木工程废弃物的一部分,而且部分也能作为整体使用,因为它有很好的回收利用功能。混凝土废弃物主要来源于各种各样的楼房或道路拆迁和建设过程。

2.2 混凝土废弃物的估值方法

有两种方法可以用来估算混凝土废弃物的总量,均分别基于往年每年的水泥生产和建筑面积。水泥是混凝土的必要成分,所以混凝土的总量可以通过统计水泥生产而估算得出。混凝土结构某天会被拆除,那么之前的混凝土就是混凝土废弃物的基本来源。混凝土废弃物总量也能通过建筑物拆迁面积和建筑物建设面积而计算得出,此方法既简单又方便。混凝土废弃物来源于某些大城市或区域,由于水泥来源的复杂性,要估算一座城市或一个区域的水泥总量是很难的。几乎所有的混凝土废弃物都来源于建筑物建造和拆迁,因此,运用基于建筑物面积的方法来估算城市混凝土废弃物总量将会是非常有效的。



(图 1) 中国水泥和混凝土生产量曲线图

2.3 混凝土废弃物：基于水泥的估值方法

1950 年以来每年的水泥生产量如图 1 所示（中国国家数据局，2004, 2003）。2000 年以前用以制作混凝土的水泥量约占水泥总产量的 50%，此后约占 60%。其他水泥用于生产沙团，那是运用于大批建构和装修的（Wu and Wen, 2004）。如果混凝土是根据以下比率来混合的话：水泥：水：总计=1.2:0.8:8，那么 1950 年以来每年的混凝土产量就如图 1 所示。

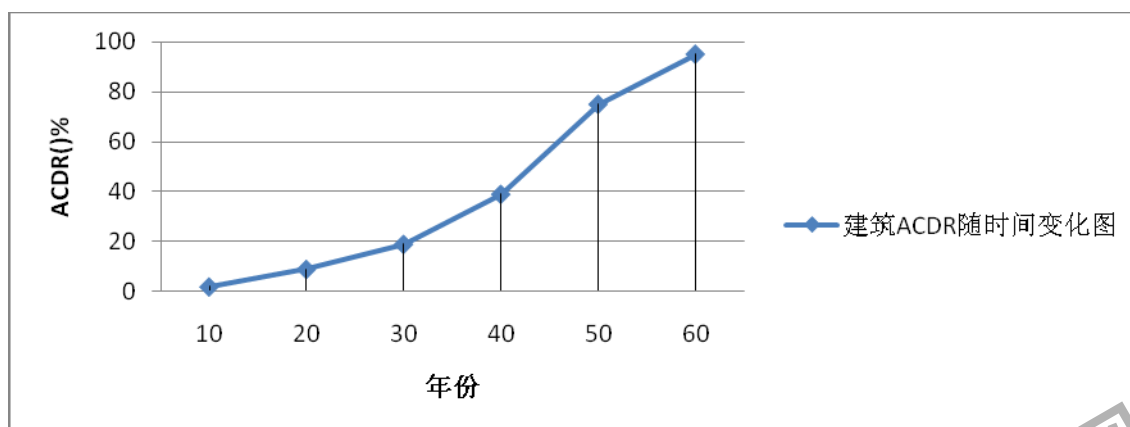
中国住房计划使用期是 50 年，但是由于过去建筑水平低下，经济快速发展，城市化膨胀和大量移民的迁入，可知中国住房的真正使用期不到 50 年（Niu, 2004）。从调查研究住房的拆迁率（鉴于其建成时间）和考虑到中国住房的实际情况，住房累计拆迁率如图 2 所示。住房每年的拆迁率根据住房累计拆迁率计算得出并于图 3 所示。

因此，拆迁的混凝土废弃物总量可以通过以下方程式计算得出：

$$DCD = \sum_{i=1}^n AC_i * ADR_i$$

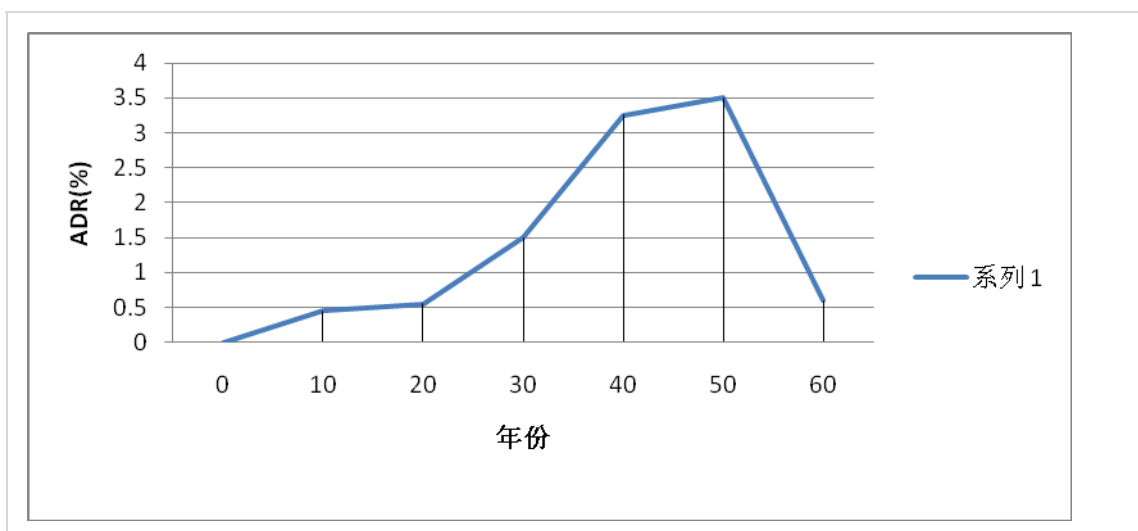
在此方程式里，DCD 就是拆迁的混凝土废弃物总量的简称， AC_i 就是第 i 年年度混凝土产量， ADR_i 就是第 i 年住房年度拆迁率， n 是住房使用期， i 指年份， $i=1-n$ 。

根据调查研究， n 假定为 60 年，那么由方程式（1）得出中国 2004 年的 DCD 就是 14019 万公吨。



(图 2) 建筑 ACDR 随时间变化图

根据调查研究，材料的实际消耗为 2-5%，比建造进程中的理论价值还多。也就是说，这些材料的有效使用率只有 95-98%，剩下的就浪费了。尽管对水泥的控制和管理比其他材料的控制和管理还要严格，水泥的浪费率依然高达 1-4%（Wang and Zhan, 2003）。以 2% 为水泥浪费率的话，建筑物混凝土废弃物总量就可以通过以下方程式计算得出：



(图 3) ADR 随时间变化图

$$CCD = \frac{AOC * WR * PCTC}{PCC}$$

在此方程式里，CCD 是指建筑物混凝土废弃物总量，AOC 指年度水泥产量，WR 指建设过程中水泥浪费率，2%；PCTC 指水泥变成混凝土的百分比，2000 年以前是 50%，此后是 60%；PCC 指混凝土里所含的水泥的百分比，12%。

据方程式（2）得出，中国 2004 年 CCD 是 9700 万公吨。那么，混凝土废弃物（等同于 DCD 和 CCD）总量则为 23719 万公吨，人均混凝土废弃物量为 0.182 公吨。

2.4 混凝土废弃物：基于建筑面积的估值方法

当基于建筑面积来估算混凝土废弃物总量时，我们可以采取以下步骤：

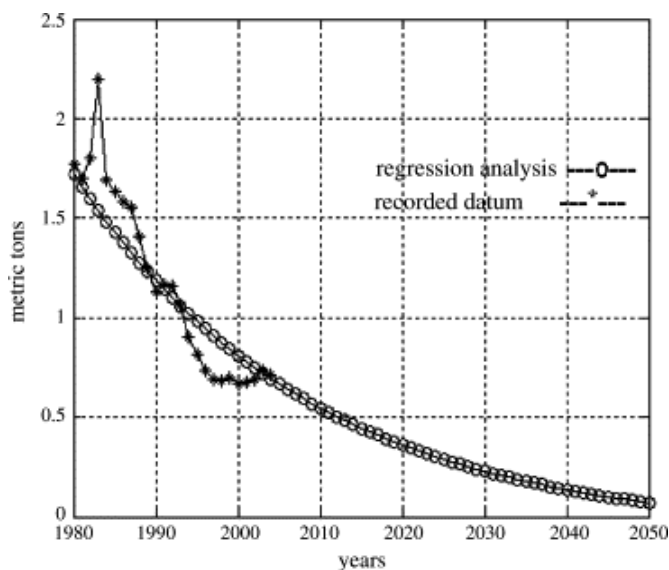
- 决定拆除和建设的比率（RDC）。RDC 定义为拆除面积和建房面积的比率。RDC 随着城市的快速膨胀而有所降低，但是在经济平稳时期它会有所提高，此时城市膨胀速度放缓并且建筑业转向重建而非建造新楼房。根据 1996 年至 2003 年的统计数据，中国 RDC 约为 0.16。
- 用 RDC 计算拆除面积。2003 年建筑面积为 202643 万平方米，而拆除面积预计为 32423 万平方米。
- 估算 DCD, CCD 和 CD（即混凝土废弃物）。从拆除和建设的惯例得知，当拆除 1 平方米的建筑面积时会产生 0.7 立方米的废弃物，当建设 100 平方米的建筑面积时会产生 3 立方米的废弃物（Wang and Zhao, 2003）。建设和拆除所产生的废弃物的平均密度为 1.8 公吨/立方米。从而，2003 年拆除所产生的废弃物量为 40853 万公吨。混凝土废弃物量占城市拆除废弃物量的 53%（Yang and Wang, 2004）。因为县级地区和老楼房很少使用混凝土，在拆除废弃物里混凝土废弃物量只占 40%，所以，2003 年 DCD 总量为 16341 万公吨。2003 年有 21 亿平方米的新建筑面积，于是此时建筑废弃物量为 11340 万公吨，当建筑废弃物含有 17.5% 的混凝土废弃物时（Yang and Wang, 2004），此时 CCD 则为 1985 万公吨。
- 把 CCD 和 DCD 加之一起以得混凝土废弃物总量。中国在 2003 年的 CD 量为 18326 万公吨，那么人均 CD 量为 0.14 公吨。

3. 混凝土废弃物量的预测

3.1 基于水泥的预测

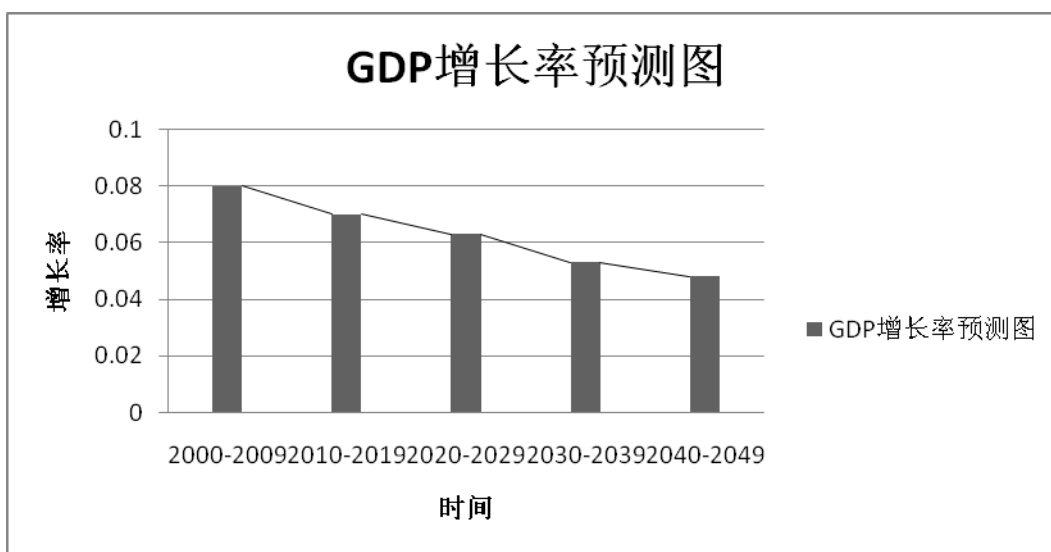
国内生产总值直接反映了一个国家经济发展的整体形势，而水泥是国家经济发展的主要

物质。

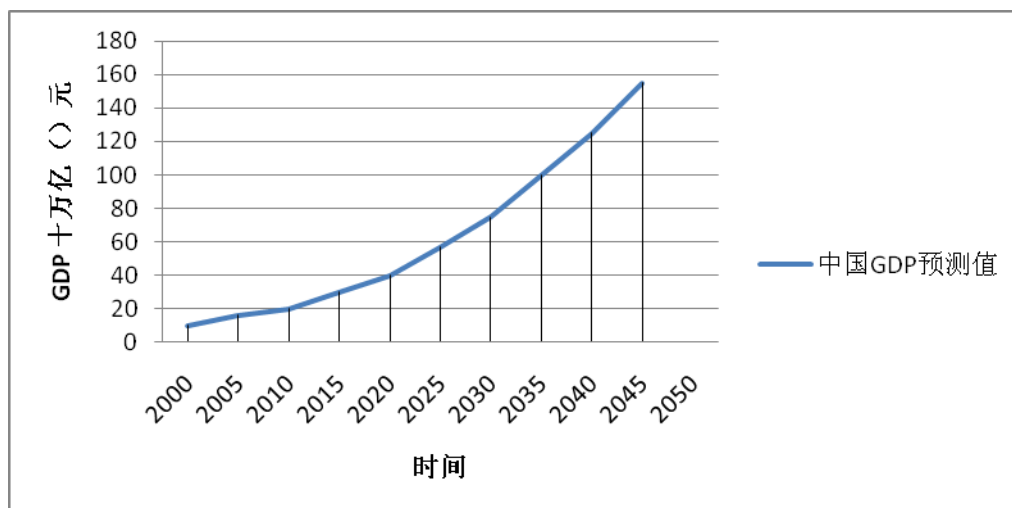


(图 4)

因此，国内生产总值能与水泥的消费达成一致。根据西方发达国家的大量研究发现，在经济发展的初级阶段，随着国内生产总值的提高，水泥消费也剧增。但是在人均国内生产总值提高的某一点上，水泥消费量会停止增长甚至有所降低 (Yang and Wang, 2004)。中国每 1 万人国内生产总值的水泥消费量是可以预测的，即根据 1982 年至 2004 年的消费数据记录使用逆行分析法便可。如图 4 所示。

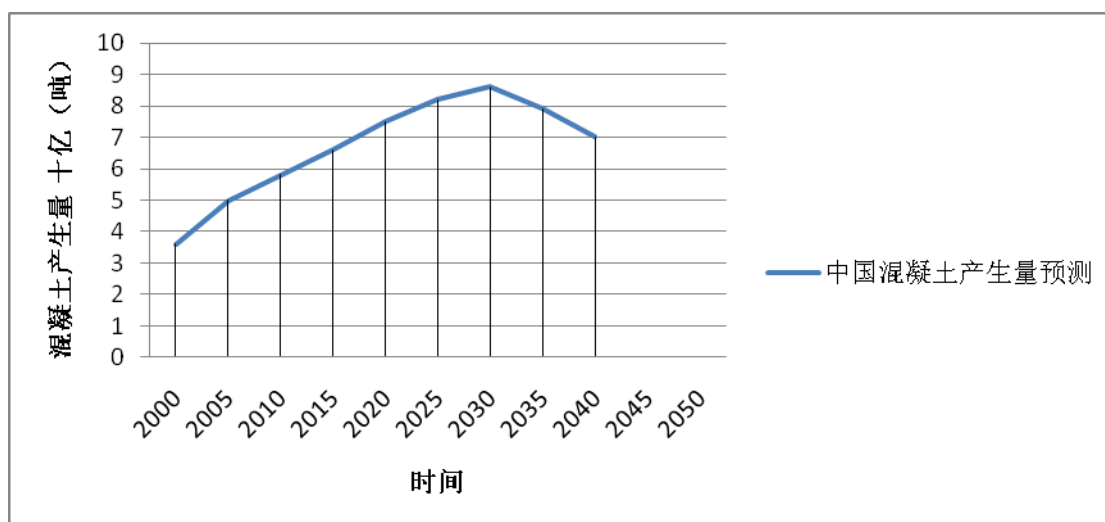


(图 5) 中国 GDP 增长率预测图

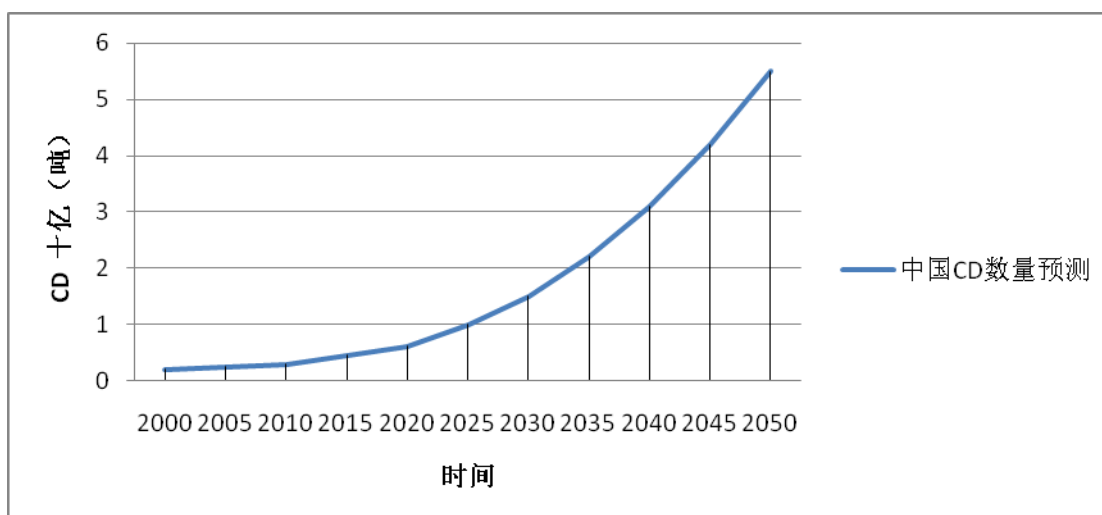


(图6)

基于图5所示预测出的2000年至2050年国内生产总值比率(Wang et al., 2003), 可以预测出中国到2050年的国内生产总值, 如图6所示, 那么水泥未来产量同样可以预测, 因此, 如果混凝土的构成比例是: 水泥: 水: 总体=1.2:0.8:8, 而且水泥的60%用于制作混凝土的话, 也可以估算出混凝土的产量, 如图7所示。



(图7) 中国混凝土产生量预测



(图 8) 中国 CD 数量预测

根据图 3 的拆除率可以得出到 2050 年为止混凝土废弃物的年度总量，如图 8 所示。由此得知，混凝土废弃物总量于 2030 年将达到 15 亿公吨，于 2050 年达到 53.7 亿公吨。

3.2 基于建筑面积的预测

基于建筑面积的预测方法第一步是估量建筑面积。在“缺乏数据”和“信息不确定”的情况下，灰色理论非常适合于模拟 (Deng, 2002)。灰色预测理论用于建立 GM (1, 1) 模型预测建筑面积，然后用方程式 (3) 算出拆除面积，最后得出混凝土废弃物总量。

3.2.1 建筑面积的灰色预测

运用灰色理论根据以下步骤做相应预测：

(1) 原始数据

以时间为依据，从 1993 年至 2003 年每年完成的建筑面积以十亿为单位排列如下：

$$X^{(0)}(t) = \{12.2, 14.4, 14.6, 16.3, 16.6, 17.1, 18.7, 18.2, 18.3, 19.7, 20.3\}$$

(2) 一次累加原始排列数据

这一步的目的在于为预测模型提供中间信息和降低原始数据的随机性。

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

$$X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), X^{(1)}(3), \dots, X^{(1)}(n)\}$$

有：

$$X^{(1)}(t) = \sum_{k=1}^t X^{(0)}(k) \quad t=1, 2, 3, \dots, n$$

(3) 计算 B 和 YN 的方程式

$$B = \begin{pmatrix} -1/2(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -1/2(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -1/2(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{pmatrix}$$

$$Y_N = \{x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), \dots, x^{(0)}(n)\}^T$$

(4) 计算参数排列 $P = \begin{pmatrix} a \\ u \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ ，并且确认 a 是否在 $[-2, 2]$ 的范围里。

(5) 把灰色参数放入时间微分式里:

$$\frac{dx^{(1)}}{d_t} + ax^{(1)} = u$$

微分式的独立解决式是:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} + \frac{u}{a}$$

(6) 检查结果精确度

比较剩余误差是 $e^{(0)}(k)$:

$$e^{(0)}(k) = \frac{\hat{x}^{(0)}(k) - x^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \times 100\%$$

平均剩余误差是 $e^{(0)}(avg)$:

$$e^{(0)}(avg) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |e^{(0)}(k)|$$

精确度是 p^0 :

$$p^0 = (100 - e^{(0)}(avg))\%$$

使用现有的原始数据和运用上述的方法, 年度建筑面积预测模型 GM (1, 1) 可以建立如下:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 394.08e^{-0.0363k} - 381.88 \quad (3)$$

通过方程式 (3) 预测出的 1993 年至 2025 年建筑面积如表格 1 和表格 2 所示, 平均剩余误差 $e^{(0)}(avg)$ 是 0.84%, 精确度 p^0 是 99.16%。

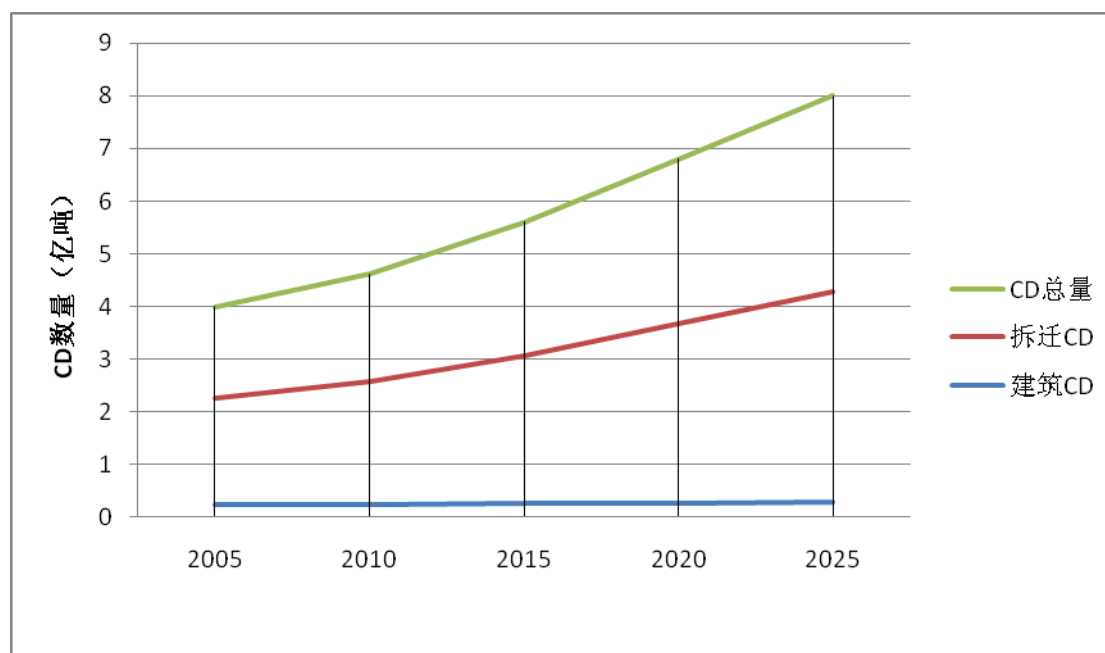
GM(1, 1) 预测结果 (表一)

年份	预测累计值 $\hat{x}^{(2)}(t+1)$	区域	原始建筑	残余误差
1993	12.2	12.2	地区	0
1994	26.6225	14.7143	14.42	2.0236
1995	41.1825	15.2581	14.56	4.7947
1996	57.4825	15.822	16.3	-2.9328
1997	74.0825	16.4066	16.6	-1.1648
1998	91.1825	17.0129	17.1	-0.5091
1999	109.8825	17.6416	18.7	-5.6596
2000	128.0825	18.2936	18.2	0.5142
2001	146.3825	18.9696	18.3	3.659
2002	166.0825	19.6706	19.7	-0.1492
2003	186.3825	20.3975	20.3	0.4804

GM(1, 1) 预测结果 (表 2)

年份	预测累计值 $\hat{x}^{(2)}(t+1)$	年度建设地区预测 (十亿平方米)
2004	20.75404	

2005	22.94733	2.19329
2006	25.22168	2.27434
2007	27.58007	2.35839
2008	30.02561	2.44554
2009	32.56153	2.53592
2010	35.19116	2.62963
2011	37.91797	2.72681
2012	40.74554	2.82757
2013	43.67761	2.93206
2014	46.71802	3.04042
2015	49.8708	3.15277
2016	53.14008	
2025	88.57222	4.53199
2026	93.27169	
2027	98.14482	



(图 9) 建筑区域 CD 总量预测

3.2.2 混凝土废弃物总量的预测

RDC=0.16 的话，那么图 9 所预测和显示的便是接下来 20 年的 DCD。考虑到在平均建筑周期后的新建筑面积与已完成的建筑面积密切相关， n 年后的新建筑面积将于 $n+2$ 年后被已完成的建筑面积所取代。因此，CCD 是可以估算出的，中国未来 20 年的混凝土废弃物总量可以通过 DCD 和 CCD 一起预测出来，此在图 9 也有所显示。

4. 讨论

基于年度水泥产量的估算方法主要通过水泥的实际产量和混凝土结构的拆除率来决定，这个方法与混凝土废弃物总量有直接的关联性。但是做出拆除率的决定是艰难的，因为它涉及很多方面的因素。这个方法适用于某个国家估量混凝土废弃物总量。基于建筑面积的方法是间接的，它的精确度取决于拆除和建筑速率，但是这个速率与建筑物的

类型和位置、持续时间、发展需求等等相关，必须积累大量的构造，这个方法适用于某个城市或地区的混凝土废弃物总量估算。

5. 结论

这篇论文为估算中国每年产出的混凝土水泥废弃物总量提供一种方法，即运用逆行方法与水泥产量的相关性、建筑业发展区域和建筑面积的预测方法。

基于水泥产量和建筑面积，可以预测和预估出混凝土废弃物总量；基于水泥产量，2004年的混凝土废弃物总量估算为23719万公吨，人均混凝土废弃量为0.182公吨；基于建筑面积，2003年的混凝土废弃物总量估算为18326万公吨，人均混凝土废弃量为0.14公吨。

为了运用水泥产量预测出混凝土废弃物总量，可以运用国内生产总值时间预测方法系列来估量未来水泥产量。结果显示，混凝土废弃物总量于2010年将达到23900万公吨，于2020年达到63800万公吨，其平均增长率每年为8%以上。

当使用建筑面积来预测混凝土废弃物总量时，可以使用灰色预测理论来估算未来建筑面积，同时也可以用来预测DCD和CCD。结果表明，混凝土废弃物总量于2010年将达到20600万公吨，于2020年达到26400万公吨。尽管与运用水泥产量预测出的结果相比更少了，但是这个增长率还是很高的。

要么基于水泥产量要么基于建筑面积，目前中国产出的混凝土碎石速率是很高的，而且混凝土废弃物总量在未来的20多年里大体上将很有可能持续增长。

因此，是时候回收利用那些具有高回收利用能力的混凝土废弃物。减少对自然资源的使用和对环境的污染，以及促进可持续、和谐社会的发展，这将是一大造福人类的事情。

参考文献:

- Deng J. Basics of Gray theory. Huazhong University of Science and Technology Press; 2002 [in Chinese].
- Fatta D, Papadopoulos A, Avramikos E, Sgourou E, Moustakas K, Kourmoussis F, et al. Generation and management of construction and demolition waste in Greece—an existing challenge. *Resour Conserv Recycl* 2003(40):81–91.
- Hsiao Y, Huang YT, Yu YH, Wernick IK. Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan. *Resour Pol* 2002(28):39–47.
- National Bureau of Statistics of China. Yearbook of China. National Press of statistics of China and The Mineral Industry of China (2003); U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 2003. Available via the web at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/asia.html#ch>.
- National Bureau of Statistics of China. Yearbook of China. National Press of Statistics of China; 2004.
- Niu J. The unendurable 'short' fixed number of year of City house. *China Construction Daily* 2004(November 21) [in Chinese].
- Wang L, Zhao Y. Management and resourcelization of construction waste. Chemical Industry Press; 2003 [in Chinese].
- Wang G, Chen Y, Chen J. Recycling disposal of construction waste. *Environ Sanit Eng* 2003;11(3):152–5.
- Wu X, Wen D. Unprecedented developing year of concrete industry in China. *Concrete* 2004(7):7–11.
- Yang S, Wang G. Inflexion of cement consumption in China. *China Cement* 2004(11):52–5 [in Chinese].
- Yost PA, Halstea JM. A methodology for quantifying the volume of construction waste. *Waste Manage Res* 1996(14):453–61.
- Zhan X. Wall material innovation and energy saving in buildings. In: *Construction wastes—a new recoverable*

resource (part one) no. 3; 2004. p. 50–3.

环卫科技网
www.cn-hw.net