

# 基于遗传算法的智能作曲技术研究

曹西征, 张爱丽, 徐久成

CAO Xi-zheng, ZHANG Ai-li, XU Jiu-cheng

河南师范大学 计算机与信息技术学院, 河南 新乡 453007

School of Computer and Information Technology, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China

E-mail: caoxizheng@126.com

CAO Xi-zheng, ZHANG Ai-li, XU Jiu-cheng. Intelligent music composition technology research based on genetic algorithm. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(32): 206-209.

**Abstract:** In order to compose music intelligently by genetic algorithm, the concrete question that how to create the music note sequences and the audio frequency file by the computer automatically is discussed. The initial groups of music paragraph are produced by the computer in terms of the pre-established parameters, the fitness function values are from the marks to the music paragraphs by manual work. The rules of the selection, crossover and mutation are set respectively. The unstable problem of the duration sum of the music notes in every bar in music during the evolutionary is solved by the duration correction, so the music notes are created by the computer. The audio frequency file is built by the method of modeling and coding. The vibration model expresses the relation among the amplitude, the frequency and the duration. In this model, the frequency value is from the frequency mapped by the pitch component and the duration value is from the time mapped by the duration component in the coding of music notes. So the wave form audio frequency file is built in terms of the vibration model and the digital audio frequency technology, and the transferring from the music notes to the audio frequency file is finished. Compared with the computer music in MIDI form currently, the computer music in WAVE form is abundant, flexible and steady. The experiment shows that the music created by the method of the interactive genetic algorithm can meet the emotional expressing requirements and the aesthetic standards of some people on the whole. And it is of important scientific significance for the development of the computer music technology.

**Key words:** genetic algorithm; intelligent composition; music note sequences; audio frequency file; computer music technology

**摘 要:** 为了利用遗传算法进行智能作曲, 对由计算机自动生成音符序列和音频文件的具体问题进行了讨论。计算机根据预先设定的参数生成初始乐段群体, 将对各乐段的人工评估结果作为适应度函数值, 分别设定选择、交换和突变规则, 通过时值修正来解决进化过程中乐曲每小节各音符的时值之和的不稳定问题, 完成了音符序列的计算机生成问题。音频文件的产生通过建模和编码的方法实现。建立表示振幅与频率、时值之间关系的振动模型, 其频率因子和时值因子分别取自音符编码中音高分量所映射的频率值和时值分量所映射的时间, 根据此模型, 结合数字音频技术, 最终生成 WAV 音频文件, 从而完成了音符到音频文件的转换。与目前 MIDI 形态的计算机音乐相比, WAV 形态的计算机音乐具有很强的丰富性、灵活性和稳定性。实验表明, 利用这种交互式遗传算法所创作的乐曲能基本满足部分人的情感表达需要和审美标准, 对促进计算机音乐技术的发展有重要的科学意义。

**关键词:** 遗传算法; 智能作曲; 音符序列; 音频文件; 计算机音乐技术

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.32.062 **文章编号:** 1002-8331(2008)32-0206-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

## 1 引言

算法作曲作为计算机音乐技术最终目标<sup>[1]</sup>之一, 是试图使用某个形式化的过程, 以使人在利用计算机进行音乐创作时介入程度达到最小的研究<sup>[2]</sup>。目前在算法作曲方面的主要技术有: 马尔科夫转换表、人工神经网络、音乐文法和遗传算法<sup>[3]</sup>等, 各种算法各有其自身的优点和存在的问题。本文主要讨论遗传算法。

遗传算法作为一种全局优化搜索算法, 以其简单通用、鲁

棒性强、适合于并行处理<sup>[4]</sup>等优点, 使其得到普遍应用, 这些优点启发人们将其应用于乐曲创作。在作曲过程中将初始乐曲进行编码, 用适应度函数来衡量进化结果, 采用交换、变异等算子对乐曲进行“进化”, 如此不断进行直到找到最优解为止。但适应度函数往往是很难准确定义的<sup>[2]</sup>, 因此出现了让人代替适应度函数来直接评估染色体的一种方法, 即交互式遗传算法 IGA。此方面比较有代表性的系统和研究包括: Biles 构造的一个被

基金项目: 河南师范大学引进博士科研启动基金(No.0716)。

作者简介: 曹西征(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为计算机音乐技术, 多媒体技术; 张爱丽(1966-), 女, 副教授, 研究方向为软件工程, 无线电技术; 徐久成(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为人工智能, 数据挖掘。

收稿日期: 2008-04-01

修回日期: 2008-05-03

称为“GenJam”的交互式即兴演奏系统<sup>[5]</sup>。Unemi 用模拟繁殖的方法开发了一个音乐作曲工具 SBEAT<sup>[6]</sup>。Unhera M 和 Onisawa T 研发的音乐作曲系统<sup>[7]</sup>,允许无音乐技能的人介入其作曲系统来创作音乐,而且所生成的旋律长度可达 16 小节。因此国外在这方面的研究比较活跃,但还存在许多技术难题(见文献[2])有待于进一步攻关。

然而在中国,计算机作曲系统的研发几乎是空白<sup>[2]</sup>,算法作曲技术的基本理论还非常薄弱,因此建立有中国民族特色的计算机作曲系统是目前亟待解决的问题。人机交互可以使得音乐进化过程变得更有效、更实用,同时保证最终的作品的质量,以进化出更容易为人们所接受,或者说更“感兴趣”的音乐。本文主要讨论交互式遗传算法在乐曲创作中的编码、适应度函数以及进化涉及到的具体实际问题。

## 2 初始群体的生成

初始群体的来源有两种方式:一是采用已有的乐段;二是利用计算机自动生成乐段。第一种方式中,现有的乐段基本上是比较成熟的音乐,因此再进行逐代演化的意义不大。这里主要讨论第二种方式。

乐段是音乐作品中表现完整乐思或相对完整乐思的最小结构,因此可将一个乐段视为一个染色体,乐段中音符视为基因,这样最优解即为最具有表现力的乐段。由计算机自动生成的初始群体是多个乐段,本文实验中乐段数目为 20。为了保证遗传操作能够顺利进行,初始群体的生成不能完全的随机,需要设定一定规则。下面介绍乐段生成的过程。

### 2.1 交互设定乐曲参数

如调号(1=C,1=G 等)、拍号(如 2/4,4/4,6/8 等)、调式(调式体系是音乐语言的音高关系方面的体系<sup>[8]</sup>,如大调式、小调式、民族调式等)、小节个数。

### 2.2 由乐曲参数自动生成乐曲

参数的处理方法如下:

调号:根据下面表 3 的编码,作用于公式(2)中  $P$  参数中的  $M$  因子。

拍号:作用于公式(2)中的  $A$  参数,例如 2/4,强弱规律为“强,弱”,则第一拍  $A$  可取 25 000(如果数字量化位数为 16),第二拍  $A$  可取 20 000。

调式:作用于乐段终止音,大调式一般终止于主音 1 上,小调式一般终止于主音 6 上。

小节数:作用于数组的长度。

根据设定的乐曲参数自动生成 20 个乐段,继而进入交互式评判阶段。

## 3 适应度函数的定义

适应度函数值来自于人工的评估分数值。为了使生成的音乐能够符合大多数人的审美习惯,乐段的评估需要多个不同类型的人群的联合参与,但考虑实际的可操作性,这里只取三个小组,分别为专业组、对口组、非对口组。专业组是指从事音乐作曲的专业人士。对口组是指该乐段的情感抒发所直接面向的群体,例如《当兵的人》的对口组是兵营战士,《农民工之歌》的对口组是农民工,对口群体往往能够与歌曲产生情感的共鸣。非对口组是指对口组外的群体。

考虑到评估分数的合理性,专业组、对口组和非对口组的

分值权重分别取为 45%、40%、15%。因此第个乐段的最后评估分数值可表示为:

$$F(i)=45\%R_m+40\%R_f+15\%R_u \quad (1)$$

式(1)中, $R_m$ 、 $R_f$ 、 $R_u$  分别为专业组、对口组和非对口组的评估分数值。 $F(i)$ 的值作为乐段个体的适应度值,参与遗传操作。

## 4 选择、交换与突变

### 4.1 复制对象的选择

根据公式(1),可计算出有  $n$  个乐段群体的第  $i$  个乐段个体的适应度函数值  $F(i)$ ,列于表 1 中。分别计算到第  $i$  个乐段适应度的累计值  $S(i)$ ,同样列于表 1 中。

表 1 个体选择表

乐段个体 $i$	1	2	...	$n$
适应度 $F(i)$	$F(1)$	$F(2)$	...	$F(n)$
适应度累计值 $S(i)$	$F(1)$	$\sum_{i=1}^2 F(i)$	...	$\sum_{i=1}^n F(i)$
随机数 $R(i)$	$R(1)$	$R(2)$	...	$R(n)$
被选中的个体	$S(i)' \geq R(1)$ 对应的 $i$	$S(i)' \geq R(2)$ 对应的 $i$	...	$S(i)' \geq R(n)$ 对应的 $i$

在  $\left[0, \sum_{i=1}^n F(i)\right]$  区间内产生均匀分布的随机数  $R(i)$ 。依次

用每一个  $S(i)$  和某一个  $R(i)$  相比较,第一个出现  $S(i)$  大于或等于  $R(i)$  的个体  $i$  被选为复制对象。记第一个出现  $S(i)$  大于或等于  $R(i)$  的累计值为  $S(i)'$ ,则被选中的个体如表 1。

### 4.2 交换规则

乐段的编码是一组由三位数字、逗号或句号组成的序列。数字的前两位为音级,第三位为时值。逗号表示音符间隔符(或叫音符结束符),句号表示一个小节的结束符。因此交叉时主要是音级或时值的交换。

交换概率一般取 0.25~0.75,本文实验中取 0.6。

交换的方式有三种:仅音级的交换,仅时值的交换,音级和时值的同时交换。

对于仅音级的交换,交换点的起始位置是数字的第一位,结束位置是数字的第二位。对于仅时值的交换,交换点的起始位置是数字的第三位,结束位置也是数字的第三位。对于音级和时值的同时交换,交换点的起始位置是数字的第一位,结束位置是数字的第三位。

因此交换能够完成的前提是起始位置落在数字的第一位或第三位。如果起始位置落在第一位,则结束位置是落在第二位还是第三位是随机的;如果起始位置落在第三位,则结束位置也必须落在第三位。

### 4.3 时值的修正

在拍号一定的情况下,一首乐曲每小节中各音符的时值之和往往是固定的,如 2/4,每小节有 2 拍。但是交换操作过程中,由于随机性,会造成交换后的音符比原来音符在时值上的偏大或者偏小,这样一小节的时值也会大于或小于正常值。这往往是不允许的。因此需要对音符时值进行修正,步骤如下:

(1)提取一个小节中各音符的时值分量,即数字的第三位,进行时值求和,以拍为单位。

(2)设每小节的标准总拍数为  $B$ ,进化后的实际总拍数为  $B'$ 。比较  $B'$  与  $B$  大小,如果两者相等,则不作修正。若两者不等,则下面修正方法:

①如果  $B' > B$ , 则需要压缩时值。设待压缩音符的时值为  $d$ 。压缩方法如下:

如果  $d > B' - B$ , 则只需压缩  $d$ , 使  $d = B' - B$  即可; 如果  $d < B' - B$ , 则需要删除该音符, 再继续找下一个待压缩的音符, 依次执行同样的操作, 最终使压缩后一小节时值等于标准时值  $B$ 。

下面讨论寻找待压缩或删除音符的顺序。

首先考虑不稳定音符, 因为一般来说不稳定音在乐曲中不会持续较长的时间, 而且其重要性也不及稳定音。在大调式中, 稳定音为 1(主音)、3(中音)、5(属音), 不稳定音级为 2(上主音)、4(下属音)、6(下中音)、7(导音)。在小调式中, 稳定音为 6(主音)、1(中音)、3(属音), 不稳定音级为 7(上主音)、2(下属音)、4(下中音)、5(导音)。因此, 在大调式中, 可取压缩或删除顺序为 7、6、4、2; 小调式中, 可取压缩或删除顺序为 5、4、2、7。如果本小节没有不稳定音, 则可适当考虑稳定音, 但不能删除主音。其压缩或删除顺序: 大调式为 5、3, 小调式为 3、1。

②如果  $B' < B$ , 则需要增加时值。增加的音符取为主音, 大调式取 1, 小调式取 6, 放在该小节的最后, 其时值取为  $B - B'$ 。

4.4 突变规则

突变概率通常较小, 一般取 0.001~0.01, 本文实验中取 0.008。对哪个音符突变是随机的, 突变方式采用音级和时值的同时突变。对时值突变没有约束规则, 因为在突变范围内时值的任何一种形式都是可以接受的, 但对音级的突变需要加约束规则, 这是因为单声部乐曲中相邻两个音符的音程一般不会超过 8 度, 因此在音级突变时要考虑相邻前后音符的音级, 规则如下。

记待突变音符音级为  $S_x$ , 突变后的音级为  $S'_x$ 。与  $S_x$  相邻的前面音级为  $S_b$ , 比  $S_b$  低 8 度的音为  $S_{b-8}$ , 比  $S_b$  高 8 度的音为  $S_{b+8}$ 。与  $S_x$  相邻的后面音级为  $S_a$ , 比  $S_a$  低 8 度的音为  $S_{a-8}$ , 比  $S_a$  高 8 度的音为  $S_{a+8}$ 。则在计算  $S'_x$  的音级范围时, 针对  $S_b$  与  $S_a$  音级高低, 结果有三种情况:

- (1)如果  $S_b = S_a$ , 则  $S'_x \in [S_{b-8}, S_{b+8}]$ 。
  - (2)如果  $S_b > S_a$ , 则  $S'_x \in [S_{b-8}, S_{a+8}]$ 。
  - (3)如果  $S_b < S_a$ , 则  $S'_x \in [S_{a-8}, S_{b+8}]$ 。
- 这样就保证了突变后的音符的音级与前后的音符在音程上不会超过 8 度。

5 音符的编码

5.1 音级的编码

将低音 1 编码为 01, 中音 1 编码为 08, 高音 7 编码为 21, 音级从低到高编码值依次增加 1, 如表 2 的部分音级编码, 偏移半音数是指偏移中音 1 的半音个数, 它是音级编码的函数, 如  $O(12)=7$ 。

表 2 部分音级编码表								
简谱音级	1	2	3	4	5	6	7	
音级编码 $S$	08	09	10	11	12	13	14	
偏移半音数 $O(S)$	0	2	4	5	7	9	11	

5.2 调号的编码

将调号为 1=C 的编码为 00, 其余调号的编码值以一个半音为分辨率依次递增 1, 编码如表 3。

5.3 音名的编码

将  $c^1$  的编码为 00, 其余音的编码值以一个半音为分辨率依次递增或递减 1, 编码如表 4。

表 3 调号编码表						
调号	1=C	1= $\sharp C(^bD)$	1=D	1= $\sharp E$	1=E	1=F
调号编码 $M$	00	01	02	03	04	05
调号	1= $\flat F(^bC)$	1=G	1= $\sharp A$	1=A	1= $\sharp B$	1=B(^bC)
调号编码 $M$	06	07	08	09	10	11

表 4 部分音名编码表												
音名	c	$\sharp c$	d	$\sharp d$	e	f	$\sharp f$	g	$\sharp g$	a	$\sharp a$	b
编码 $P$	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
音名	$c^1$	$\sharp c^1$	$d^1$	$\sharp d^1$	$e^1$	$f^1$	$\sharp f^1$	$g^1$	$\sharp g^1$	$a^1$	$\sharp a^1$	$b^1$
编码 $P$	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
音名	$c^2$	$\sharp c^2$	$d^2$	$\sharp d^2$	$e^2$	$f^2$	$\sharp f^2$	$g^2$	$\sharp g^2$	$a^2$	$\sharp a^2$	$b^2$
编码 $P$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

5.4 音符时值的编码

随着时值的增加编码值增大, 如表 5。拍数(以 4 分音符为 1 拍)是时值编码的函数, 如  $B(7)=2$ 。

表 5 时值编码表										
简谱	$\underline{\underline{5}}$	$\underline{\underline{5}}$	$\underline{\underline{5}}$	$\underline{\underline{5}}$	$\underline{\underline{5}}$	5	5 $\cdot$	5 $-\cdot$	5 $---$	5 $---$
编码 $D$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
拍数 $B(D)$	0.125	0.25	0.375	0.5	0.75	1	1.5	2	3	4

5.5 音符的编码

采用四位十进制编码方式, 第一、二位表示音级, 第三位表示时值, 第四位为“,”表示音符间隔, 如果该音符是一小节中最后一个, 则第四位为“。”。其编码格式如表 6。

表 6 音符编码表			
第一位	第二位	第三位	第四位
音级高位	音级低位	时值	, 或。

例如:《红楼梦》中《葬花吟》第一小节, 简谱为:

$\underline{\underline{1\cdot 2}} \quad \underline{\underline{7\ 6}} \quad 3- \quad |$

则由表 2、表 5、表 6 知, 其编码为:084,091,073,063,107。

5.6 音级到数字采样值之间的转换

以“第一国际音高” $a^1=440\text{ Hz}$  为基准, 按照十二平均律, 由公式  $f_2=\sqrt[12]{2}\cdot f_1$  ( $f_1$  和  $f_2$  分别为两个相邻键的基音频率)可推算出  $c\sim b^2$  各音的频率, 部分音名的频率如表 7。

表 7 部分音名的频率表												
音名	$c^1$	$\sharp c^1$	$d^1$	$\sharp d^1$	$e^1$	$f^1$	$\sharp f^1$	$g^1$	$\sharp g^1$	$a^1$	$\sharp a^1$	$b^1$
频率	262	277	294	311	330	349	370	392	415	440	466	494

WAV 数字音频文件格式中第  $i$  个采样值  $A(i)$  可表示为:

$A(i)=e^{-i/F}s\cdot A\sin[2\pi F(P)\cdot i/F_s] \quad i\in[0,60B(D)F_s/B_0]$  (2)

式(2)即为振动模型, 其中  $F_s$  为数字音频采样频率, 它的常见标准有 11.025 kHz、22.05 kHz、44.1 kHz、48 kHz,  $F_s$  越高, 声音保真度就越高, 产生数据量也越多<sup>[9]</sup>。本文中综合考虑保真度和数据量, 取 44.1 kHz。 $e^{-i/F}s$  为声音衰减因子。  $F(P)$  为  $P$  的基音频率,  $P=M+O(S)$ ; 当  $S=0$  时, 表示休止符, 此时  $F(P)=0$ 。  $B_0$  为每分钟播放的拍数。

6 实验

下面以一小段歌曲的创作过程为例, 说明本智能作曲方法



的具体应用。

## 6.1 选择歌词

采用人工写作,下面是一小段抒发科研工作者情感的歌词:

多少个日日夜夜,我一直都在思索,思索着你那美丽的远方,美丽的远方。

下面将采用遗传算法,通过交互评估的方法为上面的歌词谱曲。

## 6.2 为歌词自动谱曲

### 6.2.1 乐段参数的设定

调号:  $1 = {}^b E$ ; 拍号: 4/4; 小节数: 13; 数字采样频率:  $F_s = 44.1 \text{ kHz}$ ; 量化位数: 16 位。

### 6.2.2 乐段参数的处理

以占据在某小节中第二拍位置的四分音符 5 为例,说明处理过程。

调号: 由表 3 知,  $1 = {}^b E$  的编码为  $M=03$ , 由表 2 知音级 5 对应的  $S=12$ ,  $O(S)=7$ , 所以  $P=03+7=10$ , 查表 4、表 7 得  $F(P)=466$ 。

拍号: 对于 4/4, 强弱规律为“强, 弱, 次强, 弱”, 第二拍是弱拍, 对于量化位数为 16 的数字音频格式来说, 振幅  $A$  的取值在  $-32\ 768 \sim 32\ 767$  之间, 因此对应第二拍可取  $A=20\ 000$ 。所以由公式(2)可计算出音符时值内的每一个采样值, 如第 5 000 个采样值为  $-15\ 400$ 。

### 6.2.3 适应度函数值的获取

评估分数来源于三组: 专业组、科研组和非科研组, 分值权重分别取为 45%、40%、15%。满分为 10, 因此某乐段个体的最后评估分数值可由公式(1)来计算。评估过程中, 打分标准之一是基于歌词内容的基调, 朝着歌词表现的方向来评估, 以获取较快的遗传速度。

遗传 7 代后的乐段的乐谱如图 1, 对应乐段的 WAV 声音波形, 如图 2。



图 1 遗传 7 代后的乐段乐谱

## 7 总结

本文讨论了如何由计算机来自动生成音符序列和如何将音符转换为音频文件的具体问题。第一问题采用了遗传算法,

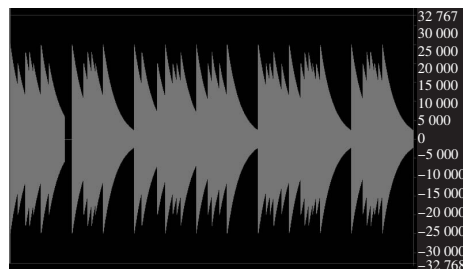


图 2 对应乐段的波形图

初始群体的生成受到参数的约束, 解决了计算机过度的随机造成的难以进化到最优的基本问题。然后通过人工评估的方法, 通过多代遗传, 最终完成了相对成熟的乐曲, 其中比较关键的是适应度函数值的获取问题, 评估的分数代表了乐曲进化的方向。第二问题也可以称为音响的生成问题, 本文是在 VC++ 平台下, 对音名、调号、音级、时值和音符等常用的音乐元素进行了编码, 采用了 WAV 数字波形音频文件格式, 完成了乐谱到数字音频文件的映射。目前在计算机音乐领域, 相对比较成熟的技术是 MIDI 技术, 而针对 WAV 格式的音乐文件的分析研究较少<sup>[10]</sup>。

然而, 采用这种交互式遗传算法的问题是作曲过程中需要评估人群一次次地不厌其烦地进行评价, 使得乐曲的产生具有较大的主观性。因此, 自动评估系统的研发是下一步的研究目标。

## 参考文献:

- [1] 刘侠. 音乐的计算机模拟生成研究[D]. 苏州大学, 2004: 1-2.
- [2] 冯寅, 周昌乐. 算法作曲的研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(2): 209-215.
- [3] 崔嘉, 刘弘. 遗传算法在计算机辅助创新作曲中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(3): 198-201.
- [4] 王耀南. 智能信息处理技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 238.
- [5] Biles J A. GenJam in transition: From genetic jammer to generative jammer[EB/OL]. [2002]. <http://www.generativeart.com/papersGA2002/8.pdf>.
- [6] Unemi T. A tool for multi-part music composition by simulated breeding[M]//Gedau A. Artificial Life VIII. Cambridge: MIT Press, 2002: 410-413.
- [7] Unehara M, Onisawa T. Construction of music composition system with interactive genetic algorithm[EB/OL]. [2003]. [http://www.idem-employee.id.tue.nl/g.w.m.rauterberg/conferences/CD\\_doNotOpen/ADC/final\\_paper/549.pdf](http://www.idem-employee.id.tue.nl/g.w.m.rauterberg/conferences/CD_doNotOpen/ADC/final_paper/549.pdf).
- [8] 杨儒怀. 音乐的分析与创作[M]. 北京: 人民音乐出版社, 2003: 30.
- [9] 郑阿奇, 刘毅. 多媒体实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 17.
- [10] 余立功, 卜佳俊, 陈纯. 计算机音乐研究初探[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(4): 66-68.

(上接 205 页)

- [7] 杨卫华, 李树文, 赵秀娟, 等. 基于 GIS 的水资源管理系统的开发和应用[J]. 水文, 2005, 25(2): 29-32.
- [8] 曹瑜, 胡光道. 地理信息系统在国内外应用现状[J]. 计算机与现代化, 2004(3): 1-4.
- [9] 柯健, 李超. 基于 DEA 聚类分析的中国各地区资源、环境与经济协调发展研究[J]. 中国软科学, 2005(2): 144-148.
- [10] 杨世琦, 王国升. 区域生态经济系统协调评价研究[J]. 农业现代化

研究, 2005(4): 298-301.

- [11] Despetakis K A, Fish A C. Energy in a regional economy: A computable general equilibrium model for California[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1988(15): 313-330.
- [12] Ikeda S. Economic-ecological models in a regional setting[M]. Sakura: University of Isikuba, 1984.
- [13] 秦大河, 张坤民, 牛文元. 中国人口资源环境与可持续发展[M]. 北京: 新华出版社, 2002.