

基于生态算法的城市建设用地结构优化

吕涛, 郝泳涛, 王力生

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 借鉴自然生态系统解决优化问题的思想和机制, 提出了“城市土地生态系统”概念, 首先定义城市土地生态系统的结构及其自主进化机理, 然后创建城市土地生态系统自主进化过程的算法模型——城市土地生态系统进化算法(简称城市生态算法), 最后, 构建城市建设用地结构优化数学模型, 并使用城市生态算法进行求解。选取上海市作为算法应用实例, 结果表明城市生态算法能够很好地解决城市建设用地结构优化问题。

关键词: 进化计算; 城市生态算法; 土地结构优化; 城市建设用地; 食物链

中图分类号: TP312

文献标志码: A

Structure Optimization of Urban Development Land Based on Ecological Algorithm

LÜ Tao, HAO Yongtao, WANG Lisheng

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Drawing on the idea and mechanism of natural ecosystem resolving the optimization problem, the concept of “Urban Land Ecosystem” was proposed. Firstly, the structure and the self-evolvement mechanism of urban land ecosystem were defined. Then, the algorithm model of urban ecosystem’s self-evolvement process—Urban Land Ecosystem Evolutionary Algorithm called urban ecological algorithm for short was established. Lastly, the mathematical model of urban development land structure optimization was set up and could be resolved by the urban ecological algorithm. Shanghai’s urban development land structure optimization was selected as the application example. The experimental results show that the urban ecological algorithm could effectively solve the problem of structure optimization of urban development land.

Key words: evolutionary computation; urban ecological

algorithm; land use structure optimization; urban development land; food chain

城市建设用地是城市人群及其各种经济活动借以立足的载体和活动场所, 是城市赖以生存和发展的物质基础^[1]。当前中国城市发展属于以土地换取经济增长的模式^[2], 即城市经济快速发展主要建立在城市建设用地规模快速扩张的基础之上。然而, 城市土地资源是有限的, 随着建设用地需求的逐步增大, 建设用地供需矛盾越来越突出。同时, 建设用地资源分配和利用不合理的情况也比较突出, 城市内拥有大量利用效率低下的土地, 造成土地资源极大浪费^[3]。在中国经济发展进入新常态的背景之下^[4], 城市发展也必须进入新常态。控制建设土地的扩张规模, 盘活现有存量土地, 提高土地利用效率, 是城市发展新常态的重要内容之一。从学术研究角度来讲, 要实现城市发展新常态, 就必须对城市建设用地结构进行优化。

按照《城市用地分类与规划建设用地标准》^[5](GB 50137—2011, 下文简称《2011 城市用地分类标准》), 土地可分为建设用地和非建设用地。非建设用地包括城市内水域、农林用地及其他非建设用地。建设用地包括城乡建设用地、交通水利用地和其他建设用地。其中, 城乡建设用地包括城市建设用地、镇建设用地、乡建设用地、村建设用地和独立建设用地等。城市建设用地又可以划分为居住用地、公共管理与公共服务用地和公用设施用地(合称为公共用地)、商业服务业设施用地(简称为商业用地)、工业用地、物流仓储用地、交通设施用地(简称为交通用地)、绿地等。城市建设用地规模是指城市内各类建设用地面积之和。土地结构(或土地利用结构)指在一定土地面积中各种用地之间的比例关系和空间位

收稿日期: 2015-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(E050604/51075306); 高密度区域智能城镇化协同创新中心种子基金(CIUC20140001); “十二五”国家科技支撑计划(2015BAF10B01)

第一作者: 吕涛(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为人工生命、生态算法。E-mail: superlvtao@163.com

通讯作者: 郝泳涛(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为数据挖掘与算法分析。E-mail: haoyt@vip.sina.com

置关系,其中各种用地之间的比例关系称为土地的数量结构,各种用地之间的空间位置关系称为空间结构.土地结构优化也可以称为土地资源优化配置或土地资源优化利用等.

关于土地利用结构优化的研究很早就已经开始,但在20世纪70年代中后期才得到快速发展,并逐渐转向定量化和模型化,而且采用算法进行求解,以期获得更科学的结果^[6].土地结构优化也从以经济效益为主的单目标优化,逐渐发展为以经济效益、社会效益和生态效益为主的多目标优化.土地结构优化比较常用的模型和方法有:线性规划、多目标规划、遗传算法、群智能算法、灰色线性模型等.不少学者分别使用以上方法和模型,对不同城市和地区的土地结构进行优化,并给出土地结构优化的建议和方案^[7-14].但通过梳理国内外相关文献发现,当前关于土地结构优化的论文,有的是对全部土地(包括建设用地和非建设用地)进行结构优化^[7-10],有的是对城乡建设用地结构进行优化^[6,15],也有一部分是对非建设用地结构进行优化^[16-17],但以城市建设用地结构优化为研究对象的论文却很少.尤其是伴随着新标准《2011城市用地分类标准》的出台,城市用地分类进行了较大调整,不少研究论文提出的结构优化方法,在新标准下已经不再适用.以城市全部土地为研究对象进行结构优化,由于研究对象领域范围过大,城市建设用地只是作为研究对象的一个“子类”参与土地结构优化,其内部结构优化常常被忽略,因此属于粗粒度土地结构优化.面向更小范围、更有针对性的细粒度土地结构优化如城市建设用地结构优化等,也是土地结构优化的重要研究内容,而且对城市土地利用和规划更有实际意义.因此,本文提出一个新的研究课题“城市建设用地结构优化”,并给出一种新的结构优化模型和算法.

城市建设用地结构是指城市内各类建设用地面积与总建设用地面积之间的比例关系和各类建设用地相互之间的空间位置关系.其中各类建设用地面积与总建设用地面积之间的比例关系称为城市建设用地数量结构,各类建设用地之间的空间位置关系称为城市建设用地空间结构.城市建设用地结构优化,就是在城市有限的土地资源、人口资源和城市规划经济目标、社会目标和生态目标的约束条件下,基于城市建设用地效益最大化原则,对城市建设用地结构进行优化,获取建设用地结构最优解.城市建设用地效益最大化原则指的是,要实现建设用地经济效益、社会效益和生态效益三者的均衡发展,即不能

只考虑某一方面的效益,也不可能同时实现三方面效益的最大化,而是根据城市发展方向,选取一项主导性目标,在实现该目标效益值最优的同时兼顾其他目标,并逐步逼近理想目标值.

自然生态系统解决优化问题的能力非常强.自然生态系统通过自身的演化就可以使许多在人类看起来高度复杂的优化问题得到完美解决.本文借鉴自然生态系统解决优化问题的思想和机制,提出“城市土地生态系统”概念.希望通过城市土地生态系统的自主演化,来解决城市建设用地结构优化问题.最后以上海市为例,进行实证应用研究.

1 基于食物链的城市土地生态系统

在城市中,城市土地是城市系统的有机组成部分,所以城市土地可以理解为城市系统的子系统,称为城市土地系统.城市土地系统是由城市各类用地(这些用地实为城市土地系统的子系统)组成的开放系统,并且在其内部各子系统之间时刻伴随着物质、信息和能量的交换.城市土地系统的这种结构和特性与自然生态系统有很大的类似之处.所以,本文引入生态系统理论,把城市土地系统类比成一个生态系统(称为城市土地生态系统)进行研究.在城市土地生态系统中,城市建设用地是这个生态系统的空间范围,城市规划目标是它的外界环境,城市人群、各类建设用地组成这个生态系统的种群,每个种群都有数量、时间和空间等属性.城市土地生态系统处于平衡状态时的城市建设用地结构,就是城市建设用地在当前外界环境条件下的最优化结构.在正常情况下,城市土地生态系统处于平衡状态.当外界环境发生变化时,在城市土地生态系统内,各个种群基于食物链关系进行自主演化,使整个生态系统能够继续保持平衡.所以,城市土地生态系统演化的过程就是城市建设用地结构优化的过程.由于每个种群都有数量属性和空间属性,所以种群进化完成之后,基于种群数量和空间属性可以获得城市建设用地数量和空间结构的最优解,这样城市建设用地结构优化问题便可以得到解决.由于该研究课题范围比较复杂,限于论文篇幅,本文只研究城市建设用地数量结构优化问题.

1.1 城市土地生态系统的结构

城市土地生态系统主要由外界环境、种群和食物3个基本元素组成.

(1) 外界环境.城市规划目标决定城市的发展

方向,也决定着城市建设用地结构优化方向,所以城市规划目标就是城市土地生态系统的外界环境.城市规划目标包含经济目标、社会目标和生态目标 3 个方面.定义 T_{GDP} 表示城市规划经济目标, T_{Eco} 表示城市规划生态目标, T_{Soc} 表示城市规划社会目标.关于经济目标可以用 GDP 来量化,但是社会目标和生态目标,由于目前国内外还没有一个统一的评价标准体系,因此它们难以具体量化.本文提出一种新的社会目标和生态目标评价标准,如表 1 所示.

表 1 将社会目标和生态目标各划分为 6 个级别,并定义每个级别的区间范围.其中, $T_{Soc}^{(Min)}$ 和 $T_{Soc}^{(Max)}$ 分别表示该区间范围的社会效益最小值和最大值, $T_{Eco}^{(Min)}$ 和 $T_{Eco}^{(Max)}$ 分别表示该区间范围的生态效

益最小值和最大值.举例来说,根据表 1 假定城市规划的生态目标为“基本平衡”,社会目标为“良好”,则: $T_{Eco}^{(Min)} = 60, T_{Eco}^{(Max)} = 75; T_{Soc}^{(Min)} = 75, T_{Soc}^{(Max)} = 85$.

表 1 社会目标、生态目标的 6 个级别

Tab.1 Six levels of social goal and ecological goal

社会目标	建设用地社会效益值	生态目标	建设用地生态效益值
非常差	[0, 40)	失衡	[0, 30)
很差	[40, 50)	严重不平衡	[30, 45)
差	[50, 60)	不平衡	[45, 60)
一般	[60, 75)	基本平衡	[60, 75)
良好	[75, 85)	平衡	[75, 85)
优秀	[85, 100]	完美	[85, 100]

(2) 种群.城市土地生态系统的种群定义如表 2 所示.

表 2 种群定义

Tab.2 Population definition

种群行为	种群分割	种群属性
居住用地种群 工业用地种群 商业用地种群 物流仓储用地种群 交通用地种群 公共用地种群 绿地种群	建设用地面积、单位面积承载人口数量、单位面积经济效益、单位面积社会效益、单位面积生态效益、建设用地面积上限、建设用地面积下限以及时间属性	可以改变种群属性的各种行为,如:寻找食物、消耗食物、生产食物等
城市人群	城市人群	城市可用建设用地资源、城市可用人口资源、建设用地经济效益、建设用地社会效益、建设用地生态效益以及时间属性

(3) 食物.在城市土地生态系统中,食物是由土地资源、人口资源、经济效益、社会效益和生态效益 5 个基本结构元素组成的多维数据.用符号 Food 来表示食物, $Food = \{Land, Peo, GDP, Soc, Eco\}$,其中 Land 表示土地资源, Peo 表示人口资源, GDP 表示经济效益, Soc 表示社会效益, Eco 表示生态效益.食物按照结构成分的不同,可以分为初级食物 ($Food^{(1)}$) 和高级食物 ($Food^{(2)}$).其中,初级食物主要由土地资源、人口资源组成,其他属性值为 0;高级食物主要由经济效益、社会效益和生态效益组成,其他属性值为 0.所以,初级食物和高级食物可以分别简化为: $Food^{(1)} = \{Land, Peo\}, Food^{(2)} = \{GDP, Soc, Eco\}$.

1.2 城市土地生态系统的自主进化机理

在城市土地生态系统中,各个种群基于食物关系形成一条食物链.首先定义各个种群在食物链中扮演的角色:①生产者.城市人群是城市土地生态系统的生产者,其将城市土地资源和人口资源转换为初级食物供其他种群消费.②消费者.除了城市人群以外的其他种群都是消费者,如“居住用地种群”、

“绿地种群”等.消费者的食物是初级食物.消费者经过分解者的分解作用可以间接产生高级食物.③分解者.城市人群也是城市土地生态系统的分解者,其食物为高级食物.在城市中,城市各类建设用地本身并不能带来任何效益,但是各类建设用地在城市人群的作用可以产生大量经济效益、社会效益和生态效益,这些效益最终服务于城市人群.所以,在城市土地生态系统中,城市人群既是生产者也是分解者.城市土地生态系统的食物链如图 1 所示.

从图 1 可以看出,城市土地生态系统的食物链关系为:①城市人群.将城市土地资源和人口资源转换成初级食物,并传递给下一级种群.②居住用地.消耗部分初级食物,包括初级食物中的全部人口资源,同时产生高级食物.最后将剩余初级食物传递给下一级种群.③工业用地、商业用地和物流仓储用地.消耗部分初级食物,同时产生以经济效益为主的高级食物.最后将剩余初级食物传递给下一级种群.④公共用地和交通用地.消耗部分初级食物,同时产生以社会效益为主的高级食物.最后将剩余初级食物传递给下一级种群.⑤绿地和交通用地.消耗剩余

初级食物,同时产生以生态效益为主的高级食物. ⑥ 城市人群. 作为分解者辅助消费者生产高级食物,同时作为生产者又消耗掉所有高级食物. 至此,一个封闭的食物链关系便形成. 外界环境发生变化时,食物链中的各个种群伴随着食物的流动会自组织、自适应地进化,直到城市土地生态系统进入平衡状态进化才停止. 这就是城市土地生态系统能够自主进化以维持平衡状态的机理.

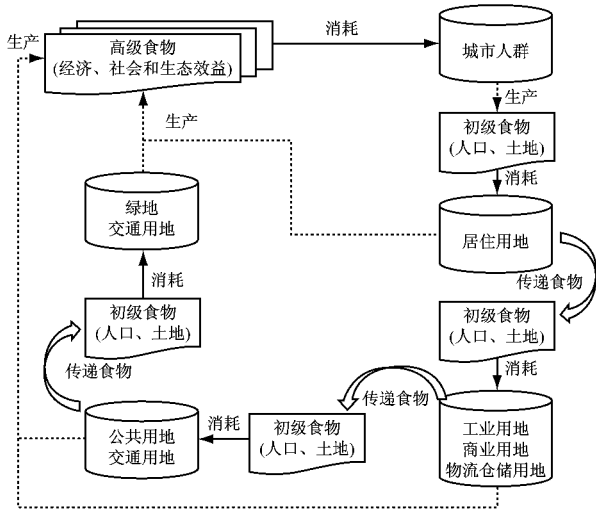


图 1 城市土地生态系统中的食物链
Fig.1 Food chain of urban land ecosystem

2 城市建设用地结构优化建模及求解

2.1 城市建设用地结构优化数学模型

设 P 表示一个消费者种群, $P_i (i \in \mathbf{N})$ 表示第 i 个种群, $A_j^{(P_i)} (i \leq 7, j \leq 8)$ 表示第 i 个种群的第 j 个属性. 假设 $A_1^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的建设用地面积, $A_2^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的单位面积承载人口数量, $A_3^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的单位面积经济效益值, $A_4^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的单位面积社会效益, $A_5^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的单位面积生态效益, $A_6^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的建设用地面积上限, $A_7^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的建设用地面积下限, $A_8^{(P_i)}$ 表示种群 P_i 的时间属性. 同时, 令 P_1 表示居住用地, P_2 表示工业用地, P_3 表示商业用地, P_4 表示物流仓储用地, P_5 表示交通用地, P_6 表示公共用地, P_7 表示绿地.

(1) 城市土地生态系统的适应度函数, 用来评价城市土地生态系统进化的结果, 所以它也是城市土地生态系统的评估模型. 基于这个模型, 可以对城市建设用地结构现状进行评估. 定义 F_{GDP} 、 F_{Eco} 和 F_{Soc} 分别表示消费者种群生产的经济效益值、生态效

益值和社会效益值, F_{Peo} 和 F_{Land} 分别表示消费者种群消耗的人口资源和土地资源. 适应度函数如下所示:

$$\text{Fit}(F_{GDP}, F_{Eco}, F_{Soc}, F_{Peo}, F_{Land}) = \begin{cases} F_{GDP} = \sum_{i=1}^n A_1^{(P_i)} A_3^{(P_i)}, & n = 7 \\ F_{Soc} = \sum_{i=1}^n A_1^{(P_i)} A_4^{(P_i)} / F_{Land}, & n = 7 \\ F_{Eco} = \sum_{i=1}^n A_1^{(P_i)} A_5^{(P_i)} / F_{Land}, & n = 7 \\ F_{Peo} = \sum_{i=1}^n A_1^{(P_i)} A_2^{(P_i)}, & n = 7 \\ F_{Land} = \sum_{i=1}^n A_1^{(P_i)}, & n = 7 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 城市土地生态系统进化的目标函数, 也是城市建设用地结构优化的数学模型. 在本文中, 城市建设用地效益最大化原则指的是以城市经济效益为主导性目标, 在实现经济效益最优的同时, 尽可能提高社会效益值和生态效益值. 目标函数如下所示:

$$\begin{aligned} & \text{subject to: } \max(F_{Eco}, F_{Soc}) \\ & \text{s. t. } L_{Land} \geq F_{Land}, L_{Peo} \geq F_{Peo}, T_{GDP} = F_{GDP} \\ & T_{Eco}^{(Min)} \leq F_{Eco} < T_{Eco}^{(Max)}, T_{Soc}^{(Min)} \leq F_{Soc} < T_{Soc}^{(Max)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, L_{Peo} 表示城市可用人口资源, L_{Land} 表示城市可用建设用地资源.

2.2 城市生态算法

城市土地生态系统自主进化的过程, 就是城市建设用地结构优化的过程. 为了更好地描述城市土地生态系统进化过程, 本文从算法角度出发, 对城市土地生态系统的自主进化过程进行建模, 并把这个算法模型称为城市生态算法. 城市生态算法流程如图 2 所示.

2.2.1 定义城市土地生态系统进化的目标函数, 并初始化所有种群

城市土地生态系统进化的目标函数, 如式(2)所示. 种群初始化结果, 如式(3)所示. 记初级食物中未分配的食物(即剩余食物)为 $Food_{left}^{(1)}$, 则

$$\begin{cases} A_1^{(P_1)} = L_{Land} A_7^{(P_1)}, A_1^{(P_2)} = L_{Land} A_7^{(P_2)} \\ A_1^{(P_3)} = L_{Land} A_7^{(P_3)}, A_1^{(P_4)} = L_{Land} A_7^{(P_4)} \\ A_1^{(P_5)} = L_{Land} A_7^{(P_5)}, A_1^{(P_6)} = L_{Land} A_7^{(P_6)} \\ A_1^{(P_7)} = L_{Land} A_7^{(P_7)} \\ Food^{(1)}(Land, Peo) = \begin{cases} Food^{(1)}(Land) = L_{Land} \\ Food^{(1)}(Peo) = L_{Peo} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

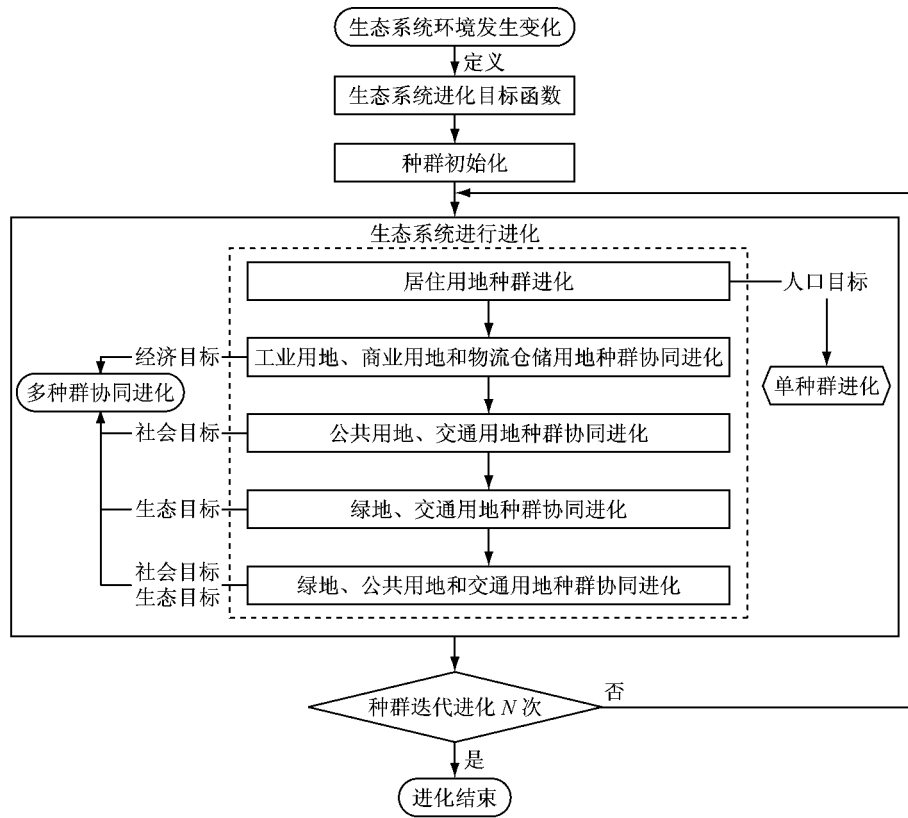


图 2 城市生态算法流程

Fig.2 Flow chart of urban ecological algorithm

$$\text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}, \text{Peo}) = \begin{cases} \text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}) = L_{\text{Land}} - \sum_{i=1}^7 A_1^{(P_i)} \\ \text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Peo}) = L_{\text{Peo}} - \sum_{i=1}^7 A_1^{(P_i)} A_2^{(P_i)} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 居住用地种群进化

居住用地种群进化的目标是满足城市人群的居住需求,所以它的适应度函数为 F_{Peo} ,进化过程如式(5)所示,进化终止条件为 $F_{\text{Peo}} = L_{\text{Peo}}$.

$$A_1^{(P_1)} = \begin{cases} A_1^{(P_1)} - (F_{\text{Peo}} - L_{\text{Peo}}) / A_2^{(P_1)}, & F_{\text{Peo}} > L_{\text{Peo}} \\ A_1^{(P_1)} + (F_{\text{Peo}} - L_{\text{Peo}}) / A_2^{(P_1)}, & F_{\text{Peo}} \leq L_{\text{Peo}} \end{cases} \quad (5)$$

2.2.3 工业用地、商业用地和物流仓储用地种群协同进化

这 3 个种群通过协同进化来完成城市规划的经济目标.协同进化的适应度函数为 F_{GDP} ,原理为:以各个种群的 $A_3^{(P_i)}$ 为权重,不断调整 $A_1^{(P_i)}$ 属性,直到 F_{GDP} 基本等于 T_{GDP} (即 $|(F_{\text{GDP}} - T_{\text{GDP}}) / T_{\text{GDP}}| \leq 0.01\%$) 为止.具体协同进化过程为:

(1) 记需要调整的建设用地面积为 ΔS (一般情况下可令 $\Delta S = 1$), P_2, P_3 和 P_4 需要调整的建设用地分别为 $\Delta S_{P_2}, \Delta S_{P_3}$ 和 ΔS_{P_4} ,如下所示:

$$\begin{cases} \Delta S_{P_2} = \Delta S A_3^{(P_2)} / (A_3^{(P_2)} + A_3^{(P_3)} + A_3^{(P_4)}) \\ \Delta S_{P_3} = \Delta S A_3^{(P_3)} / (A_3^{(P_2)} + A_3^{(P_3)} + A_3^{(P_4)}) \\ \Delta S_{P_4} = \Delta S A_3^{(P_4)} / (A_3^{(P_2)} + A_3^{(P_3)} + A_3^{(P_4)}) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 如果种群 P_i 符合种群进化终止条件,种群停止进化,如下所示:

$$\Delta S_{P_i} = \begin{cases} 0, & A_1^{(P_i)} \geq A_6^{(P_i)} F_{\text{Land}} \\ 0, & |(F_{\text{GDP}} - T_{\text{GDP}}) / T_{\text{GDP}}| \leq 0.01\% \end{cases} \quad (7)$$

(3) 根据 F_{GDP} 和 T_{GDP} 之间的大小关系,种群协同进化有 2 种模式,如下所示:

$$\begin{cases} \text{s. t. } F_{\text{GDP}} \geq T_{\text{GDP}} \\ A_1^{(P_2)} = A_1^{(P_2)} - \Delta S_{P_2} \\ A_1^{(P_3)} = A_1^{(P_3)} - \Delta S_{P_3} \\ A_1^{(P_4)} = A_1^{(P_4)} - \Delta S_{P_4} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \text{s. t. } F_{\text{GDP}} < T_{\text{GDP}} \\ A_1^{(P_2)} = A_1^{(P_2)} + \Delta S_{P_2} \\ A_1^{(P_3)} = A_1^{(P_3)} + \Delta S_{P_3} \\ A_1^{(P_4)} = A_1^{(P_4)} + \Delta S_{P_4} \end{cases} \quad (9)$$

(4) 种群完成一次协同进化之后,若符合协同进化终止条件,则进化停止;否则转向过程(1)继续进化.协同进化终止条件为 $\sum_{i=2}^4 \Delta S_{P_i} = 0$.

2.2.4 交通用地、公共用地种群协同进化

这2个种群通过协同进化来完成城市规划的社会目标.协同进化的适应度函数为 F_{Soc} ,原理为:以各个种群的 $A_i^{(P_i)}$ 为权重,不断调整 $A_1^{(P_i)}$ 属性,直到 $T_{\text{Soc}}^{(\text{Min})} \leq F_{\text{Soc}} < T_{\text{Soc}}^{(\text{Max})}$.具体协同进化过程为:

(1) 记需要调整的建设用地面积为 ΔS , P_5 和 P_6 需要调整的建设用地分别为 ΔS_{P_5} 和 ΔS_{P_6} ,如式(10)所示.若 $\text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}) \leq 0$,直接转向式(7).

$$\begin{cases} \Delta S_{P_5} = \Delta S A_4^{(P_5)} / (A_4^{(P_5)} + A_4^{(P_6)}) \\ \Delta S_{P_6} = \Delta S A_4^{(P_6)} / (A_4^{(P_5)} + A_4^{(P_6)}) \end{cases} \quad (10)$$

(2) 如果种群 P_i 符合种群进化终止条件,种群停止进化,如下所示:

$$\Delta S_{P_i} = \begin{cases} 0, & A_1^{(P_i)} \geq A_6^{(P_i)} F_{\text{Land}} \\ 0, & T_{\text{Soc}}^{(\text{Min})} \leq F_{\text{Soc}} < T_{\text{Soc}}^{(\text{Max})} \end{cases} \quad (11)$$

(3) 根据 F_{Soc} 和 T_{Soc} 之间的大小关系,种群协同进化有2种模式,如下所示:

$$\begin{cases} \text{s. t. } F_{\text{Soc}} \geq T_{\text{Soc}}^{(\text{Max})} \\ A_1^{(P_5)} = A_1^{(P_5)} - \Delta S_{P_5} \\ A_1^{(P_6)} = A_1^{(P_6)} - \Delta S_{P_6} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \text{s. t. } F_{\text{Soc}} < T_{\text{Soc}}^{(\text{Min})} \\ A_1^{(P_5)} = A_1^{(P_5)} + \Delta S_{P_5} \\ A_1^{(P_6)} = A_1^{(P_6)} + \Delta S_{P_6} \end{cases} \quad (13)$$

(4) 种群完成一次协同进化之后,若符合协同进化终止条件,则进化停止;否则转向过程(1)继续进化.协同进化终止条件为 $\sum_{i=6}^7 \Delta S_{P_i} = 0$.

2.2.5 绿地、交通用地种群协同进化

这2个种群通过协同进化来完成城市规划的生态目标.适应度函数为 F_{Eco} ,原理为:以各个种群的 $A_5^{(P_i)}$ 为权重,不断调整 $A_1^{(P_i)}$ 属性,直到 $T_{\text{Eco}}^{(\text{Min})} \leq F_{\text{Eco}} < T_{\text{Eco}}^{(\text{Max})}$.具体协同进化过程如下所示:

(1) 记需要调整的建设用地面积为 ΔS , P_5 和 P_7 需要调整的建设用地分别为 ΔS_{P_5} 和 ΔS_{P_7} ,如式(14)所示.若 $\text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}) \leq 0$,直接转向第2.2.7节.

$$\begin{cases} \Delta S_{P_5} = \Delta S A_5^{(P_5)} / (A_5^{(P_5)} + A_5^{(P_7)}) \\ \Delta S_{P_7} = \Delta S A_5^{(P_7)} / (A_5^{(P_5)} + A_5^{(P_7)}) \end{cases} \quad (14)$$

(2) 如果种群 P_i 符合种群进化终止条件,种群停止进化,如下所示:

$$\Delta S_{P_i} = \begin{cases} 0, & A_1^{(P_i)} \geq A_6^{(P_i)} F_{\text{Land}} \\ 0, & T_{\text{Eco}}^{(\text{Min})} \leq F_{\text{Eco}} < T_{\text{Eco}}^{(\text{Max})} \end{cases} \quad (15)$$

(3) 根据 F_{Eco} 和 T_{Eco} 之间的大小关系,种群协同进化有2种模式,如下所示:

$$\begin{cases} \text{s. t. } F_{\text{Eco}} \geq T_{\text{Eco}}^{(\text{Max})} \\ A_1^{(P_5)} = A_1^{(P_5)} - \Delta S_{P_5} \\ A_1^{(P_7)} = A_1^{(P_7)} - \Delta S_{P_7} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \text{s. t. } F_{\text{Eco}} < T_{\text{Eco}}^{(\text{Min})} \\ A_1^{(P_5)} = A_1^{(P_5)} + \Delta S_{P_5} \\ A_1^{(P_7)} = A_1^{(P_7)} + \Delta S_{P_7} \end{cases} \quad (17)$$

(4) 种群完成一次协同进化之后,若符合协同进化终止条件,则进化停止;否则转向过程(1)继续进化.协同进化终止条件为 $\Delta S_{P_5} + \Delta S_{P_7} = 0$.

2.2.6 交通用地、公共用地和绿地种群协同进化

协同进化原理为:以各个种群的 $(A_4^{(P_i)} + A_5^{(P_i)})$ 为权重,不断调整 $A_1^{(P_i)}$ 属性,直到 $\text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}) = 0$.具体协同进化过程为:

(1) 记需要调整的建设用地面积为 ΔS (一般情况下可令 $\Delta S = 0.01 \text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land})$), P_5 、 P_6 和 P_7 需要调整的建设用地分别为 ΔS_{P_5} 、 ΔS_{P_6} 和 ΔS_{P_7} .若 $\text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}) > 0$,如式(18)所示;若 $\text{Food}_{\text{left}}^{(1)}(\text{Land}) \leq 0$,直接转向第2.2.7节.

$$\begin{cases} \Delta S_{P_5} = \Delta S (A_4^{(P_5)} + A_5^{(P_5)}) / \sum_{i=5}^7 (A_4^{(P_i)} + A_5^{(P_i)}) \\ \Delta S_{P_6} = \Delta S (A_4^{(P_6)} + A_5^{(P_6)}) / \sum_{i=5}^7 (A_4^{(P_i)} + A_5^{(P_i)}) \\ \Delta S_{P_7} = \Delta S (A_4^{(P_7)} + A_5^{(P_7)}) / \sum_{i=5}^7 (A_4^{(P_i)} + A_5^{(P_i)}) \end{cases} \quad (18)$$

(2) 如果种群 P_i 符合种群进化终止条件,种群停止进化,如下所示:

$$\Delta S_{P_i} = \begin{cases} 0, & (T_{\text{Soc}}^{(\text{Max})} - F_{\text{Soc}}) / T_{\text{Soc}}^{(\text{Max})} \leq 0.01\% \\ 0, & (T_{\text{Eco}}^{(\text{Max})} - F_{\text{Eco}}) / T_{\text{Eco}}^{(\text{Max})} \leq 0.01\% \\ 0, & A_1^{(P_i)} \geq A_6^{(P_i)} F_{\text{Land}} \end{cases} \quad (19)$$

(3) 在 F_{Eco} 和 T_{Eco} 满足约束条件的情况下,种群协同进化过程如下所示:

$$\begin{cases} A_1^{(P_5)} = A_1^{(P_5)} + \Delta S_{P_5} \\ A_1^{(P_6)} = A_1^{(P_6)} + \Delta S_{P_6} \\ A_1^{(P_7)} = A_1^{(P_7)} + \Delta S_{P_7} \end{cases} \quad (20)$$

(4) 种群完成一次协同进化之后,若符合协同进化终止条件,则进化停止;否则,转向过程(1)继续进化.协同进化终止条件为 $\sum_{i=5}^7 \Delta S_{P_i} = 0$.

2.2.7 种群迭代进化,获取最优解

如果种群迭代进化小于 N ($N \geq 50$) 次,转向第2.2.1节继续进化,否则进化终止.种群迭代进化结

束之后,此时可用根据 $Food_{left}^{(1)}(Land)$ 大小对城市建设用地结构优化结果进行评价. 如果 $Food_{left}^{(1)}(Land) < 0$ 表示城市建设用地结构优化没有可行解,原因是城市规划目标设定过高,或城市建设用地资源太少等;如果 $Food_{left}^{(1)}(Land) > 0$ 表示城市建设用地结构优化具有最优解,而且城市可用建设用地资源还有结余;如果 $Food_{left}^{(1)}(Land) = 0$ 表示城市建设用地结构优化具有最优解,而且城市规划目标设定正好.

3 实验与讨论

本文选取上海市进行实例应用研究. 以上海市 2012 年城市建设用地数据作为基础数据,对上海市 2020 年的建设用地结构进行优化. 数据来源为《上海市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》等. 当前关于上海市建设用地开发和利用的现状为:2012 年上海市建设用地面积为 2 904. 25 km², 占市域总面积的 45. 8%, 接近 50% 的生态阈值;同时 2012 年上海市人口规模达 2 380. 34 万人,已非常接近上海市可承载的人口规模极限. 2020 年建设用地规模目标为 3 226 km², 这一数据将被作为上海市未来建设用地的终极规模,不得突破.

3.1 种群属性计算方法

城市土地生态系统中,种群的属性值设置非常关键,它直接影响着整个生态系统的进化过程. 下面将介绍这些种群属性值的计算方法和设定依据.

(1) $A_1^{(P_i)}$ 、 L_{Land} 和 L_{Peo} 可通过查询相关统计资料获得.

(2) $A_2^{(P_i)}$ 计算如下所示:

$$\begin{cases} A_2^{(P_1)} = L_{Peo}/A_1^{(P_1)} \\ A_2^{(P_i)} = 0, \quad i \neq 1 \end{cases} \quad (21)$$

(3) 单位面积经济效益值 ($A_3^{(P_i)}$) 属性. 城市建设用地产生的经济效益可以用城市的第二和第三产业的生产总值进行量化. 上海市 2012 年生产总值如表 3 所示. 根据各类建设用地的用途和表 3, 上海市 $A_3^{(P_i)}$ 的计算如式 (22) 所示. 在本文中,假定在经济增长方式转变和土地效益自然增长因素的双重作用下,到 2020 年上海市的 $A_3^{(P_i)}$ 年增长率为 4%.

$$\begin{cases} A_3^{(P_1)} = (I_3^{(6)} + I_2^{(1)} + I_3 \times 5.109\%) / A_1^{(P_1)} \\ A_3^{(P_2)} = I_2^{(2)} / A_1^{(P_2)} \\ A_3^{(P_3)} = (I_3^{(2)} + I_3^{(3)} + I_3^{(4)} + I_3 \times 20\%) / A_1^{(P_3)} \\ A_3^{(P_4)} = I_3^{(1)} \times 20\% / A_1^{(P_4)} \\ A_3^{(P_5)} = I_3^{(1)} \times 80\% / A_1^{(P_5)} \\ A_3^{(P_6)} = I_3 \times 1\% / A_1^{(P_6)} \\ A_3^{(P_7)} = I_3 \times 0.1\% / A_1^{(P_7)} \end{cases} \quad (22)$$

表 3 上海市生产总值

Tab.3 GDP of Shanghai

亿元

指标	2001 年	2010 年	2012 年
城市建设用地经济效益总值(GDP)	5 132. 12	17 051. 83	20 053. 92
第二产业(I_2)	2 403. 18	7 218. 32	7 854. 77
工业($I_2^{(1)}$)	2 166. 74	6 536. 21	7 097. 76
建筑业($I_2^{(2)}$)	236. 44	682. 11	757. 01
第三产业(I_3)	2 728. 94	9 833. 51	12 199. 15
# 交通运输、仓储和邮政业($I_3^{(1)}$)	345. 99	834. 40	895. 31
信息传输、计算机服务和软件业($I_3^{(2)}$)	176. 72	675. 98	918. 83
批发和零售业($I_3^{(3)}$)	555. 06	2 594. 34	3 291. 93
住宿和餐饮业($I_3^{(4)}$)	104. 30	266. 45	298. 40
金融业($I_3^{(5)}$)	529. 26	1 950. 96	2 450. 36
房地产业($I_3^{(6)}$)	328. 59	1 002. 50	1 147. 04

(4) 单位面积社会效益值 ($A_4^{(P_i)}$) 和单位面积生态效益值 ($A_5^{(P_i)}$) 属性. 建设用地的社会效益和生态效益是一个随时间不断变化但变化幅度非常小的变量. 建设用地社会效益和生态效益的定义域如表 4 所示. 本文通过查询现阶段有关上海市生态环境和社会环境的统计资料和评价资料,设定上海市 2012 年各类建设用地的 $A_4^{(P_i)}$ 和 $A_5^{(P_i)}$ 值,如表 4 所示. 在本文中,假定在经济增长方式转变和土地效益自然增长因素的双重作用下,到 2020 年上海市的 $A_4^{(P_i)}$ 和 $A_5^{(P_i)}$ 年增长率为 0. 5%.

表 4 建设用地生态效益变量和社会效益变量的定义域

Tab.4 Domain of ecological variables and social variables

种群	单位面积社会效益 ($A_4^{(P_i)}$)		单位面积生态效益 ($A_5^{(P_i)}$)	
	定义域	上海市	定义域	上海市
P_1	70~95	80	60~90	75. 0
P_2	50~85	70	30~70	50. 0
P_3	60~90	80	55~90	72. 5
P_4	40~80	65	40~70	55. 0
P_5	70~100	90	60~85	70. 0
P_6	95~100	100	85~100	90. 0
P_7	90~100	100	95~100	100. 0

(5) $A_6^{(P_i)}$ 和 $A_7^{(P_i)}$. 基于《2011 城市用地分类标准》推荐的城市建设用地分配比例,种群 P_i 的 $A_6^{(P_i)}$ 和 $A_7^{(P_i)}$ 属性值,如表 5 所示.

3.2 实验及讨论

根据种群属性计算方法,2012 年上海市城市土地生态系统的种群初始属性值如表 6 所示.

(1) 城市建设用地结构评估. 基于表 6,使用城市建设用地结构评估模型(见式(1))对上海市 2012 年建设用地结构进行评估. 评估结果为:经济效益为 20 053. 915 亿元;生态环境为“基本平衡”,生态效益值为 70. 29;社会环境为“良好”,社会效益值为

表 5 城市规划建设用地分类推荐比例

Tab.5 Recommendation rate of urban development land classification

种群	占城市建设用地的比例/%	$A_8^{(P_i)}$	$A_7^{(P_i)}$
P_1	25.0~40.0	0.40	0.25
P_2	15.0~30.0	0.30	0.15
P_3	2.0~10.0	0.10	0.02
P_4	5.0~12.0	0.12	0.05
P_5	10.0~30.0	0.30	0.10
P_6	8.0~15.0	0.15	0.08
P_7	10.0~15.0	0.15	0.10

81.65. 评估结果基本与上海市现状吻合. 这可以证明,表 6 中的种群属性值计算正确,符合上海市实际

表 6 各个种群初始属性值

Tab.6 The initial value of population attributes

种群	$A_1^{(P_i)}/\text{km}^2$	$A_2^{(P_i)}/(\text{万人} \cdot \text{km}^{-2})$	$A_3^{(P_i)}/(\text{万元} \cdot \text{km}^{-2})$	$A_4^{(P_i)}/(\text{分} \cdot \text{km}^{-2})$	$A_5^{(P_i)}/(\text{分} \cdot \text{km}^{-2})$	$A_6^{(P_i)}$	$A_7^{(P_i)}$
P_1	1 065.55	2.233 99	23 718.310 5	80	75.0	0.40	0.25
P_2	736.8	0	96 332.247 6	70	50.0	0.30	0.15
P_3	135.21	0	695 166.777 6	80	72.5	0.10	0.02
P_4	86.29	0	20 751.187 9	65	55.0	0.30	0.10
P_5	414.51	0	17 279.390 1	90	70.0	0.15	0.08
P_6	278.04	0	4 387.552 2	100	90.0	0.12	0.05
P_7	187.85	0	649.409 1	100	100.0	0.15	0.10

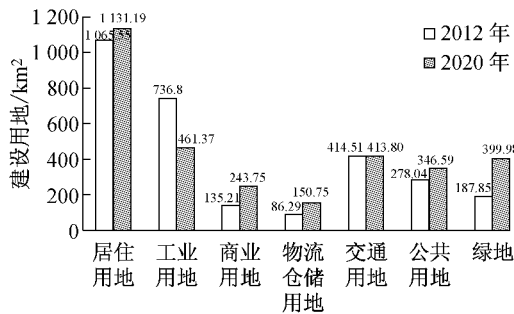


图 3 2012 年与 2020 年建设用地结构对比图

Fig.3 Comparison of urban development land structure between 2010 and 2020 year

从上文优化结果可以看出,相较于上海市 2012 年建设用地结构现状,本文提出的 2020 年建设用地结构优化方案,可以大幅度提高城市生态效益值和社会效益值,并可以减少建设用地新增规模,节约城市建设用地资源,符合上海市在城市发展新常态背景下的城市发展要求. 所以,实验表明本文提出的城市生态算法可以很好地解决城市建设用地结构优化问题.

4 结语

本文提出“城市土地生态系统”概念,并给出通过城市土地生态系统的自主演化来解决城市建设用

情况.

(2) 城市建设用地结构优化. 使用城市生态算法,对上海市 2020 年建设用地结构进行优化. 约束条件为:人口规模,2 527.06 万;建设用地总面积,3 226 km²;经济目标,34 456.37 亿元;生态目标,基本平衡;社会目标,良好,其中经济目标是按 7% 的增长速度,人口规模是按 0.75% 增长速度进行预测获得. 优化结果为: $F_{GDP} = 34 456.20$ 亿元; $F_{Eco} = 74.99$ 分; $F_{Soc} = 84.22$ 分; $Food_{left}^{(L)}(Land) = 78.57 > 0$;建设用地结构如图 3 所示.

地结构优化问题的研究思路. 在对城市土地生态系统的结构和自主进化机理进行研究的基础上,从算法的角度出发,对城市土地生态系统的自主演化过程进行建模,提出“城市生态算法”的概念,并定义城市生态算法的流程图和算法步骤. 定义城市建设用地结构优化数学模型,并使用城市生态算法进行求解. 最后,选取上海市的建设用地结构进行优化,实验证明城市生态算法可以很好地解决建设用地结构优化问题. 论文下一步的研究重点是建立科学的建设用地社会效益和生态效益评估模型.

参考文献:

[1] 李昶. 我国特大城市建设用地变化特征及其影响因素研究 [D]. 重庆:重庆大学,2013.
LI Chang. Study on the changing characteristics and influencing factors of urban development land in megalopolis in China [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[2] 钟大洋,黄贤金,王柏源. 经济增长与建设用地扩张的脱钩分析[J]. 自然资源学报,2010,25(1):18.
ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, WANG Boyuan. On the degrees of decoupling and re-coupling of economic growth and expansion of construction land [J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(1):18.

[3] 孙利. 中国城市建设用地集约利用研究[D]. 福州:福建师范大学,2011.

- SUN Li. Research on intensive use of China's urban construction land [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- [4] 金磊. 中国经济发展新常态研究[J]. 中国工业经济, 2015, 322(1):5.
- JIN Pei. Study on the new normal of Chinese economic development [J]. China Industrial Economics, 2015, 322(1):5.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50137—2011 城市用地分类与规划建设用地标准[S]. 北京:国家质检总局, 2010.
- The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50137—2011 Code for classification of urban land use and planning standards of development land[S]. Beijing: AQSIQ, 2010.
- [6] 刘慧颖. 鄂尔多斯市城乡建设用地优化利用研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2013.
- LIU Huiying. Study on optimal use of urban and rural construction land in Ordos city [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2013.
- [7] 黄海. 土地利用结构多目标优化遗传算法[J]. 山地学报, 2011, 29(6):695.
- HUANG Hai. Multi-objective genetics algorithm for land use structure optimization [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(6):695.
- [8] 李秀霞, 徐龙, 江恩赐. 基于系统动力学的土地利用结构多目标优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16):247.
- LI Xiuxia, XU Long, JIANG Enci. Multi-objective optimization of land use structure in western Jilin Province based on system dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16):247.
- [9] 袁满, 刘耀林, 俞艳. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1):191.
- YUAN Man, LIU Yaolin, YU Yan. Land use optimization allocation based on multi-agent genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1):191.
- [10] 马世发, 何建华. 基于粒子群算法的城镇土地利用空间优化模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):321.
- MA Shifa, HE Jianhua. Model of urban land-use spatial optimization based on particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9):321.
- [11] GAO Qingzhu, KANG Muyi, XU Hongmei, *et al.* Optimization of land use structure and spatial pattern for the semi-arid loess hilly-gully region in China [J]. Catena, 2010, 81(3):196.
- [12] LI Hongqi, GUO Weidong, SUN Guodong, *et al.* A new approach for parameter optimization in land surface model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(5):1056.
- [13] LIU Yaolin, WANG Hua, JI Yingli, *et al.* Land use zoning at the county level based on a multi-objective particle swarm optimization algorithm: a case study from Yicheng, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(8):2801.
- [14] Liu Y L, Tang D W, Kong X S, *et al.* A land-use spatial allocation model based on modified ant colony optimization [J]. International Journal of Environmental Research, 2014, 8(4):1115.
- [15] 芦杰. 城乡建设用地结构优化研究:以永城市为例[D]. 开封:河南大学, 2010.
- LU Jie. Study on optimization of urban-rural construction land: a case study of Yongcheng City [D]. Kaifeng: Henan University, 2010.
- [16] 李晓西. 城市非建设用地格局构建研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2008.
- LI Xiaoxi. Study on the pattern establishing of urban non-constructive land: taking Suzhou as an example [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2008.
- [17] 杨郑鑫. 韩城城市边缘区非城市建设用地研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- YANG Zhengxin. Study on the planning of non-urban land in urban fringe area of Hancheng City [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.