

矿区可持续发展系统动力学模拟与调控

汤万金¹, 高 林¹, 吴 刚¹, 李祥仪²

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态开放研究室, 北京 100080; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 矿区是由资源、环境、经济和社会等子系统构成的复杂系统。矿区的可持续发展依赖于矿区各子系统的合理结构和发展模式以及人们对系统的有效调控。将可持续发展思想与动力学模拟方法相结合, 在系统地分析矿区 REES 系统结构的基础上, 构建了矿区 REES 系统动力学模型, 并以铁法矿区为例论述了矿区 REES 系统的模拟和调控等有关问题。

关键词: 矿区; 可持续发展; 动态模拟; 调控模式

Simulation and adjustment of system dynamics on sustainable development in the mining area

TANG Wan-Jin¹, GAO Lin¹, WU Gang¹, LI Xiang-Yi² (1. Department of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The mining area is a complex system composed of the subsystems such as resource, environment, economy and society, etc. Sustainability in the mining area depends upon the reasonable structure and development model of each subsystem and their effective adjustment. In this paper, the concept of sustainability and the method of dynamic simulation were combined. The systems dynamics model for REES (resource, environment, economic and society) was built. Researches on problems about simulation and adjustment, based on the systematic analysis of the structure for REES, were conducted on the case of Tiefa Mining Area.

Key words: mining area; sustainable development; dynamic simulation; adjustive model

文章编号: 1000-0933(2000)01-0020-08 中图分类号: X22 文献标识码: A

矿区资源、环境、经济和社会系统是由资源、环境、经济和社会等子系统通过相互作用、相互影响和相互制约关系而构成紧密相连的统一体, 人们简称其为矿区 REES 系统。

尽管区域(地区)可持续发展的结构调控和功能优化已引起了人们的普遍关注^[1~3], 一般系统动力学的发展也为区域(地区)的系统优化调控提供了基本方法^[4~6], 但是, 一方面从区域(地区)可持续发展实践的需要来看, 尤其从区域(地区)可持续发展动力学角度考虑, 还需做大量的应用研究; 另一方面, 矿区可持续发展又有别于其他区域(地区), 有其特殊的规律性。因此, 本文结合可持续发展思想和动力学模拟方法, 研究矿区 REES 系统的模拟和调控问题。

1 矿区 REES 系统结构及模型子系统分析

把矿区发展的过程划分为 3 个发展阶段, 即矿区形成阶段、矿区发展阶段和矿区转产阶段。这是矿区发展过程中所特有的、不同于其他地区的特殊规律, 而且在不同阶段表现为不同的特点。这里以铁法矿区为例重点研究矿区发展阶段的发展策略。

矿区 REES 系统构成要素涉及到资源、环境、经济和社会等各子系统, 具体可分为人口、土地、水资源、矿产资源储量、矿产资源开采、矿产品深加工、非矿产业、农业、环保产业、环境污染、矿区收入等 11 个子系统, 它们之间相互联系、相互影响, 构成了具有多重反馈的因果关系回路。

1.1 人口子系统

社会发展的最终目标是满足人类的各种需求,提高人类的生活质量。但人口的数量和质量,一方面是社会、经济发展的激励因素,另一方面,如果人口基数过大,素质低下,又是社会经济发展和环境改善的重要制约因素。只有人口的发展同资源的承载能力、环境保护和社会经济发展相互协调,才能实现提高人们生活质量这一目标。因此,该子系统所体现的是它自身的状态变化以及通过技术因子与社会经济、资源环境等因素间的内在联系。作为一个重要的状态变量进入整个大系统,它深刻影响着全区的经济发展和资源利用,同时,又受制于人口政策和环境质量。另外,在模型中还考虑了人口的资源属性,通过社会劳动力与各产业部门连接。

1.2 矿产资源储量及开采子系统

这里主要考察矿产资源开采对矿产资源的消耗以及矿产资源储量的减少对矿产资源开采系统的影响。着重从资金和劳动力两因素考察,把投资作为矿产资源开采系统的外部因素,把劳动力作为内部循环作用因素,二者结合作为投入共同影响系统的产出。根据柯布-道格拉斯生产函数原理,表示投入因素与产出的转换机制。同时,矿产资源开采是整个矿区经济系统的驱动部门,通过驱动矿区产业的变化影响矿区 REES 系统中各相关因素的连锁反应,从而促使矿区向均衡的方向发展。

1.3 环境污染子系统

通过研究工业生产引起的废水排放、废气排放和固体废物积累的增长与控制的变化情况,以 1990 年环境状态为基准,借以间接反映环境质量的变化趋势。

1.4 水与土地资源子系统

我国众多矿区在发展过程中,常常受到水资源和土地资源不足的影响和制约。因此,模型以可利用水资源总量及耕地总量作为状态变量,通过多种辅助变量与各经济、人口子块接口,以表达水资源和土地资源与经济、人口间的动态制约关系。同时,通过水循环利用与净化以及自然补给,用来反映水资源系统的自然、人工过程。

1.5 环保子系统

随着社会进步,环保作为一个独立的产业已越来越受到人们的重视。目前,在我国各矿区、特别是新建矿区环境保护已作为一个必不可少的环节。因此,本模型把环保单独作为一个子系统,通过辅助变量和技术因子,反映环保子系统对矿区环境控制以及经济发展的作用。

1.6 其他产业子系统

具体指农业、矿产品深加工、非矿产业组成的子系统。着重从资金和劳动力两个因素考察。通过二者结合作为投入共同影响各子系统的产出。同时,根据各子系统的投入产出关系以及作为矿区发展驱动部门的矿产资源开采子系统,在矿区发展各阶段的状况,选择优先和重点扶持的产业,以保证矿区持续、稳定、健康的发展。

1.7 矿区收入子系统

着重考虑与多个子块联系密切的两个变量,即总利润和总投资。总利润作为矿区各产业利润之和,来源于各产业部门,是矿区内部投资和偿还贷款的来源。矿区总投资包括内部投资和外部投资,分别投入到矿区经济和环境等子系统,成为连结和影响各子系统的重要控制因子。投资总量变化和结构调整将导致整个系统发生变化,进一步影响新的投资水平和结构。

根据上述各子系统及其联系,构造了矿区 REES 系统动力学模型,其流程图如图 1 所示。作为模型定量表达的具体框架。

2 矿区 REES 系统动力学方程的建立

根据矿区 REES 系统动力学流程图,全面调查和搜集了铁法矿区 1990 年以来的有关资料,具体分析了各子块的变量联系方式,并借鉴已有研究中成熟公式及参数,建立了该系统的动力学方程。系统中的参数主要通过**平方数据**法确定。

2.1 利用系统历史统计资料作算术平均值

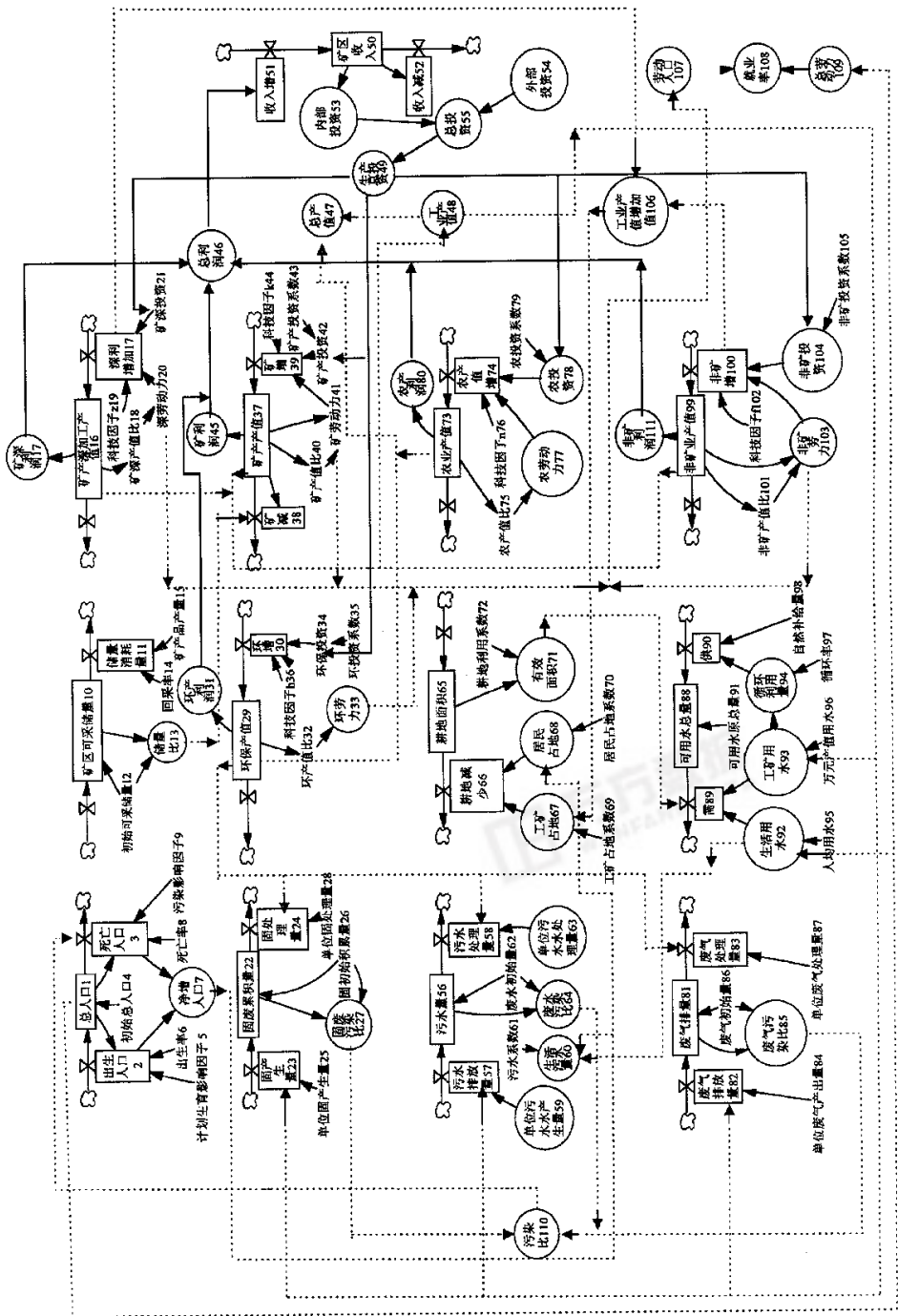


图 1 矿区 REES 系统 SD 模型流程图

Fig. 1 Flow chart of systems dynamics for REES in mining areas

* 1 Total population; 2 Birth population; 3 Death population; 4 Original total population; 5 Birth influence factor; 6 Birth rate; 7 Net increasing population; 8 Death rate; 9 Pollution influence factor; 10 Recoverable reserves in mining area; 11 Reserves consumption; 12 Original recoverable extraction; 13 Reserves ratio; 14 Extraction rate; 15 Mineral resource reserves; 16 Mineral resource intensive processing output value; 17 Intensive processing profit; 18 The output value ratio of mining depth; 19 Scientific factor z ; 20 Intensive processing labor; 21 Mining intensive processing investment; 22 Solid waste accumulation; 23 Solid waste production; 24 Solid waste dispose; 25 Per unit of solid waste production; 26 Original solid waste accumulation; 27 Solid waste pollution ratio; 28 Solid waste dispose of per unit; 29 Environmental protection production; 30 Environmental protection production; 31 Environmental protection profit; 32 Environmental protection production ratio; 33 Environmental protection labor; 34 Environmental protection investment; 35 Environmental protection investment factor; 36 Scientific factor h ; 37 Mining production; 38 Mining production decrease per year; 39 Mining production increase per year; 40 Mining production ratio; 41 Mining labor; 42 Mining investment; 43 Mining investment factor; 44 Scientific factor k ; 45 Mining profit; 46 Gross profit; 47 Gross production; 48 Industrial production; 49 Total produce investment; 50 Total income in mining area; 51 Income increase in mining area; 52 Income decrease in mining area; 53 Internal investment; 54 External investment; 55 Total investment; 56 Waste water; 57 Discharging waste water; 58 Waste water dispose; 59 The waste-water production of per unit; 60 The production of municipal waste-water of per unit; 61 The waste-water production coefficient; 62 Initial waste water; 63 The dispose waste-water of per unit; 64 Waste-water pollution ratio; 65 Farm area in mine area; 66 Farm decrease; 67 Covering area of mine and industry; 68 Covering area of resident; 69 Covering area coefficient of mine and industry; 70 Resident covering area coefficient; 71 Efficient farm area; 72 Farm utility coefficient; 73 Agriculture production; 74 Agriculture production increase; 75 Agriculture production ratio; 76 Scientific factor n ; 77 Agriculture labor; 78 Agriculture investment; 79 Agriculture investment coefficient; 80 Agricultural production profit; 81 Discharging waste gas; 82 The increase of discharging waste-gas of year; 83 Waste-gas dispose; 84 Waste-gas production of per unit; 85 Waste pollution ratio; 86 Initial waste-gas; 87 Waste-gas dispose of per unit; 88 Total utilizable water; 89 Needful water in mine area of year; 90 Providing water in mining area of year; 91 Available water at initialization; 92 Municipal water; 93 Mine and industry water; 94 Water recycling utility; 95 Useful water of apiece; 96 Consume water of production value in per 10000 yuan; 97 Recycling rate; 98 Natural supply of water; 99 Non-mine production; 100 Non-mine production increase; 101 Non-mine production ratio; 102 Scientific factor f ; 103 Non-mine labor; 104 Non-mining investment; 105 Non-mining investment coefficient; 106 Industrial production increase; 107 Labor population; 108 Employment rate; 109 Total labor; 110 Pollution ratio.

这类参数有:平均出生率(0.033),平均死亡率(0.00631),生活污水占生活用水比例(0.085),万元工业产值耗水量(0.01325 万 t/万元),亩耕地年用水量(150t/666.7m²·a),人均生活用水量(17t/人·a),矿产资源采收率(0.4239),矿产资源开采投资系数(0.85),矿产品深加工投资系数(0.0234),农业投资系数(0.0064),环保投资系数(0.0162),非矿业投资系数(0.043)。

2.2 根据参数性质,选定不同类型的公式或不同的预测方法按比例推算

主要采用自适应过滤预测模型和灰色 GM(1,1)模型。这类参数有:计划生育影响因子/生育指数(0.8941/2.0,0.745/1.5,0.681/1.0),工矿占地系数(0.201),居民占地系数(0.1801),工业用水循环利用(0.37),矿产品年产量,矿产品深加工、矿产资源开采和环保业的产值利润影响因子等。

2.3 回归法确定参数

用一元线性回归确定社会劳动力、城镇人口与总人口关系;污水产生量、有害废气产生量和固体废渣产生量与工业总产值关系;以及污水治理量、有害废气治理量和固体废渣治理量与环保产值关系。

用一元回归数据确定了矿产资源可采储量对矿产资源开采产值影响技术因子,矿产资源开采产值、矿产品深加工产值、环保产值、农业产值和非矿业产值对劳动力影响技术因子,以及污染对死亡率影响技

术因子。

用多元回归确定矿产资源开采产值、矿产品深加工产值、环保产值、农业产值和非矿业产值与投资及劳动力投入产出关系。

各状态变量的初始值以 1990 年的数值为基准。其中,工业污水和有害气体由于受资料限制取 1990 排放量的累积值。

3 矿区 REES 系统动力学模型的检验

模型是客观事物本质或某些重要特征的概括与抽象。一个较完备的矿区发展模型应能较好地体现矿区发展的本质特征或某些主要特征。因此,应对建立的矿区 REES 系统动力学模型进行检验。从所建立的矿区 REES 系统动力学模型来看,首先,它是建立在对我国众多矿区进行全面分析的基础上,并针对应用矿区的具体情况,进行了必要的调整。同时,采用辅助预测模型确定有关的参数;其次利用 Vensim PLE 软件提供的真实性检验(reality check)方法,对所建立的矿区 REES 系统动力学模型正确性进行了检验,检验结果完全满足要求;最后,通过模型运行后得到的各个变量时间序列数据与实际系统的实际情况对照,进一步对所建立的模型的正确性进行验证。检验的结果表明所建立的矿区 REES 系统动力学模型是正确的。

4 铁法矿区的可持续发展模式与调控

4.1 矿区发展模式的调控试验

矿区发展模式优选的总目标是:节约资源、保护环境、社会稳定、经济持续稳定发展。然而矿区的发展状况实际上要受到多种因素的综合影响,因此,综合考虑各单项因素对整个系统动态行为的影响比仅仅进行单项因素的实验更具有价值。然而,由于各单项因素的组合方案有很多,因此,不可能将所有可能的方案均进行试验,所以这里在单项试验的基础上,经过反复试验筛选出 5 个有代表性的调控试验模式,作为发展模式优选的参照基准。根据控制参量的确定原则及有关制约因素的讨论,本研究选择了生育指数、生产性投资系数、投资比、占地系数、煤炭资源采收率、水资源利用率、人均用水量等八项指标作为控制参量,进行调控试验。各控制参量的调整情况如表 1 所示。

各发展模式的试验结果选择了有代表性的 6 个变量,其结果如图 2~图 7 所示。

4.1.1 农业发展模式 所谓农业发展模式这里是指在保证矿区现阶段煤炭生产的条件下,把农业(包括种植业和养殖业)作为矿区发展的另一个经济增长点。为此,对控制参量进行了如下调整试验,在投资比例中提高了农业投资系数,生产性投资系数提高了 2 个百分点。把生育指数确定为 1.5 胎,发展农业的目的之一是吸纳矿区的剩余劳动力以及企业的闲置人员,所以劳动力因素不会对农业生产产生制约作用;在保证耕地方面一是通过减少居民、工矿企业占地来实现;另外也可以采用购买、租赁区外耕地的方式。通过提高工业(主要是矿业)水资源利用效率,来保证农业用水。调整后的试验结果表明:农业总产值有了较大的增长,10a 增长了 65576.73 万元。在资源环境方面,耕地总量下降速度减缓,对生态环境的影响较自然演化模式略有改善,只有水资源消耗增大。从社会经济总体水平看,矿区就业率有了明显的提高;矿区总产值与自然演化模式相比,有一定程度的提高,但提高的幅度不十分明显,这说明靠发展农业可以维持资源环境现状,也可以解决矿区剩余劳动力,但对全区经济增长的带动作用不明显。

4.1.2 煤炭深加工模式 该发展模式是把煤炭深加工作为除原煤生产以外的主要经济增长点,以改变矿区产品结构单一的弊端。为此,设计了煤炭深加工发展模式,对控制参量进行了如下调整:由于发展煤炭深加工需要投入较多的资金,所以一方面将生产性投资系数增大到 0.96,另一方面加大了煤炭深加工投资在矿区生产性投资中的比重;同时,考虑到随着煤炭深加工规模的扩大,需要占用一定量的土地,所以将工矿占地系数由原来的 0.201 提高到 0.250,以保证生产的顺利进行;另外,将生育指数确定为 1.5,适当降低人口数量,以降低消费和扩大积累能力;最后提高了工业用水利用率,来改善矿区居民用水的困难局面。在此方案下,煤炭深加工产值比自然演化模式净增 18693 万元,矿区总产值也有一定的增长,特别是矿区利润有明显的提高,提高了工业用水利用率,水资源没有减少,但耕地面积明显减少,到 2000 年减少到 9831hm²。由此可见,煤炭深加工对于改善矿区经济有一定的作用,但是煤炭、土地等资源对其今后的发展

必然起到瓶颈作用,因此,其生产规模应进行适当的控制。

4.1.3 资源环境保护模式 矿区煤炭资源的开发,促进了矿区社会经济的发展,但是对资源环境的破坏已成为当前面临的一大问题。为了实现节约资源、保护环境这一目标,应对下列控制参量进行了调整:考虑到人口增长过快对资源环境的压力,把生育指数降为 1.0;在投资比例分配上,适当减小消耗资源多、污染严重的生产部门的投资系数,增加环保投资,提高煤炭资源采收率和水资源利用率,土地资源的分配也从集约利用考虑而调整有关参数。调整后的试验结果变化显著。反映环境破坏程度的污染比增长幅度大为降低,可用水总量不但能满足生产的需要,而且可以进一步提高全区居民的用水标准,改善居民用水困难的状况;耕地面积的减少也有所减缓;煤炭资源损失浪费也得到了一定程度地抑制。这种模式最大的弊端是只有保护没有发展,尽管也使矿区总产值、利润等指标略有增加,但增加的幅度大为降低,使其很难适应人口增长和消费水平的提高。

表 1 铁法矿区发展模式的调控参量

Table 1 Adjusting parameter of development model in Tiefa mining areas

发展模式	生育指数	生产性投资系数	投资比例	占地系数	煤炭回收率	水资源利用率	人均用水
Development model	Child-bearing index	Production investment coefficient	(煤:深:农:非:环) ^① Investment rate	(工矿:居民) ^② Covering area coefficient	Rate of coal recovery	Water resource utility rate	Demand of water per capital
自然演化模式 ^③	2.0	0.94	90.5 : 2.498 : 0.682 : 4.62 : 1.72	0.201 : 0.01801	0.42	0.37;119.25	17
农业发展模式 ^④	1.5	0.96	88.6 : 2.5 : 4.0 : 2.9 : 2.0	0.15 : 0.01	0.42	0.47;90	37
煤炭深加工模式 ^⑤	1.5	0.96	8.6 : 5.0 : 1.682 : 2.718 : 2.0	0.25 : 0.01801	0.42	0.57;119.25	37
资源环境保护模式 ^⑥	1.0	0.94	90.5 : 1.0 : 1.0 : 2.5 : 5.0	0.15 : 0.010	0.52	0.57;90	30
可持续发展模式 ^⑦	1.0	0.96	88.6 : 2.5 : 2.5 : 3.4 : 3.0	0.15 : 0.010	0.52	0.57;90	40

①:表中的投资比例为煤炭开采业:煤炭深加工业:农业:非煤产业:环保产业。investment rate mean coal-mining; coal intensive processing; agriculture; non-coal industry; environmental protection industry,②Factories and mining;resident,③Natural evolution model,④Agricultural, development model,⑤Coal intensive processing model,⑥Resource environmental protection model⑦Sustainable model

4.1.4 矿区可持续发展模式 上述几种发展模式均存在一些问题,如自然演化模式不仅使经济发展缓慢,而且资源浪费严重,污染和破坏了生态环境,社会效益、经济效益和生态效益均较差;而农业发展模式和煤炭深加工发展模式,虽然经济发展得到了一定程度地提高,社会和经济效益较好,但资源浪费严重,生态效益较差;资源环境保护发展模式,虽然节约了资源,保护了环境,生态效益大为提高,但经济发展过于缓慢。针对这些问题,基于矿区资源、环境、经济与社会协调发展的思想,既要加快经济和社会的发展,又要保护资源和环境。为此,全面调整了以下参量:第一,人口生育指数保持最低值,以减少对矿区资源和环境的压力;第二,为了加速矿区经济发展,把生产性投资系数加大到试验的最大值,以保证生产资金的需要;第三,在保证新井和改扩建矿井所需资金的基础上,为了减少工业生产对资源和环境的压力,适当提高对环保和农业部门的投资,同时,提高煤炭资源的采收率;第四,为了使耕地面积的减少有所减缓,降低了工矿企业和居民占地系数;第五,为了提高矿区居民的生活质量,改变矿工居民用水困难局面,提高了工矿企业的水资源利用率,用以提高矿区居民的用水量。最后得出一种协调型的可持续发展模式。各发展模式的主要变量的对比情况如图 2~图 7 所示。

从该模式中可以看出,人口增长减缓,矿区的就业率一直保持较高的水平。煤炭资源可采储量 2000 年减少到 9568 万 t,比自然演化型节约 5468 万 t,耕地面积比自然演化型少占用 1061hm²,可用水总量在不开发新水源的情况下满足了矿区生产和生活的需要,并且居民用水困难局面有所改善。污染比自然演化模式低,说明对生态环境的污染有所减轻。矿区总产值也取得了持续的增长,而且这种增长是建立在资源环境承载能力上的,又与人口增长相适应的经济发展速度。总之,可持续发展模式吸收了前几种发展模式的优点,缓和了各种模式中的矛盾,使铁矿区资源、环境、经济与社会的发展相互协调,是一种较为理想的模式(具体的调控对策请参见文献^[7])。

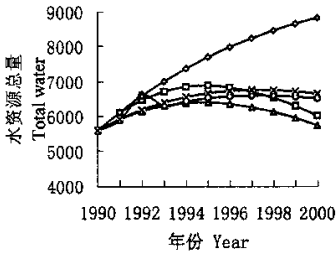


图 2 矿区水资源总量对比

Fig. 2 The contrast of total water resource

- 自然演化模式 Nature evolutive model
- △—农业发展模式 Agricultural development model
- 煤炭深加工模式 Coal intensive processing model
- ◇—环境保护模式 Environment protection model
- ×—可持续发展模式 Sustainable development model

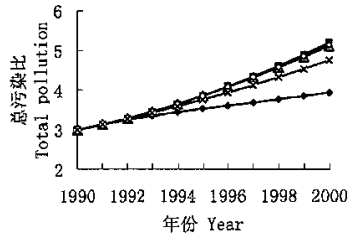


图 3 矿区总污染比对比

Fig. 3 The contrast of total pollution in mining areas

- 自然演化模式 Nature evolutive model
- △—农业发展模式 Agricultural development model
- 煤炭深加工模式 Coal intensive processing model
- ◇—环境保护模式 Environment protection model
- ×—可持续发展模式 Sustainable development model

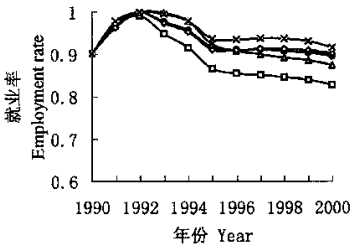


图 4 矿区就业率对比

Fig. 4 The contrast of take up an occupation ratio in mining areas

- 自然演化模式 Nature evolutive model
- △—农业发展模式 Agricultural development model
- 煤炭深加工模式 Coal intensive processing model
- ◇—环境保护模式 Environment protection model
- ×—可持续发展模式 Sustainable development model

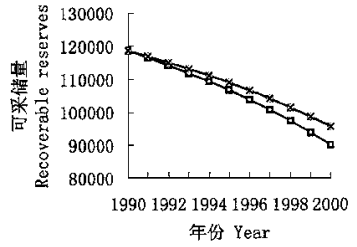


图 5 矿区可采储量对比

Fig. 5 The contrast of exploitation reserves in mining areas

- 自然演化模式 Nature evolutive model
- △—农业发展模式 Agricultural development model
- 煤炭深加工模式 Coal intensive processing model
- ◇—环境保护模式 Environment protection model
- ×—可持续发展模式 Sustainable development model

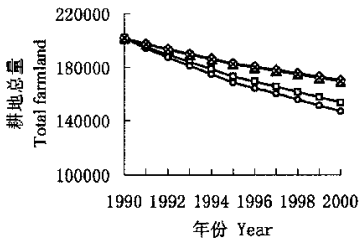


图 6 矿区耕地总量对比

Fig. 6 The contrast of total infield in mining areas

- 自然演化模式 Nature evolutive model
- △—农业发展模式 Agricultural development model
- 煤炭深加工模式 Coal intensive processing model
- ◇—环境保护模式 Environment protection model
- ×—可持续发展模式 Sustainable development model

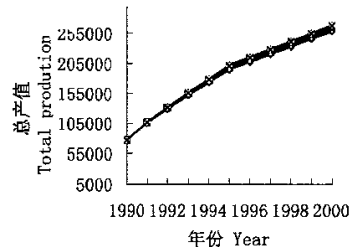


图 7 矿区总产值对比

Fig. 7 The contrast of total production value in mining areas

- 自然演化模式 Nature evolutive model
- △—农业发展模式 Agricultural development model
- 煤炭深加工模式 Coal intensive processing model
- ◇—环境保护模式 Environment protection model
- ×—可持续发展模式 Sustainable development model

5 结论

矿区 REES 系统是一类具有多级界面结构和非线性作用机制的复杂系统。其发展过程是正反馈机制与负反馈机制交互作用的结果。矿区 REES 系统的动态过程模拟是实施矿区可持续发展调控的基础和前提。铁法矿区系统动态模拟实例是在自然演化模式的基础上,通过单项因素分析,提出了多种试验发展模式,最后综合提炼出一个协调型的可持续发展模式。试验结果表明,铁法矿区近几年的发展过程正逐渐偏离自然演化模式,并转向可持续发展的模式,调控的作用日益明显。但从另一方面出现的新问题则还需要不断接受反馈和修正调控参量,以增强调控的针对性和有效性。

参考文献

- [1] 陈传康,牛文元. 人地系统优化原理及区域发展模式的研究. 地球科学信息,1988,(6):41~43.
- [2] 黄裕婕,黄际民. 区域 PRED 系统发展的滚动模型建立方法的探讨. 系统工程理论与实践,1996,(8):103~108.
- [3] 张志强. 区域可持续发展的理论与方法. 中国人口·资源与环境,1994,4(3):19~25.
- [4] Jay W. Forrester. 论系统动力学建模. 系统工程,1987, 5(3):32~39.
- [5] 王冀藩. 系统动力学. 北京:清华大学出版社,1994:48~66.
- [6] 王冀藩. 系统动力学理论与方法的新进展. 系统工程理论方法应用,1995,4(2):6~12.
- [7] 汤万金. 矿区可持续发展的评价. 北京科技大学学报,1999,21(2):8~13.

