

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.05

基于系统动力学的西安市复合生态系统情景分析

陈媛媛, 朱记伟, 周蓓, 解建仓

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为提高城市发展中水土资源的可持续利用,以西安市为例,基于系统动力学方法(SD)和复合生态系统理论,构建了“社会-经济-水资源-土地资源-生态环境”的城市复合生态系统模型,通过设置经济优先、环境保护和协调发展3种情景,分析对比了不同情景下2004-2025年西安市复合生态系统的变化趋势,并对协调发展方案下的水土资源利用、经济社会发展以及生态环境状况进行了仿真分析。结果表明:协调发展型方案是西安市水土资源利用的最优方案;2017年以后,西安市还将长期面临缺水且供水缺口较大,需要区外调水、新建水源工程才能满足市区用水需求;西安市建设用地面积将逐年增加,2025年将增至914.70 km²,耕地面积仍将逐年减少,2025年将减少至21.85 × 10⁴ hm²;可通过推进节水型城市建设,推行土地集约化利用,发展第三产业、控制人口增长等措施,对西安市的水土资源开发利用进行调控。该研究可为城市水资源和土地资源的综合规划以及高效利用提供依据。

关键词: 系统动力学; 城市复合生态系统; 水土资源; 情景分析; 西安市

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)06-0031-10

Scenario analysis of complex ecosystem of Xi'an city based on system dynamics

CHEN Yuanyuan, ZHU Jiwei, ZHOU Bei

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to improve the sustainable use of water and land resources in urban development, this study took Xi'an City as an example to construct the urban complex ecosystem model of "Social - Economic - Water resources - Land resources - Ecological environment", based on the system dynamics method (SD) and compound ecosystem theory. By setting up three scenarios of economic priority, environmental protection and coordinated development, we analyzed and contrasted the trend of complex ecosystem in Xi'an from 2004 to 2025 under different scenarios. Moreover, the simulation analysis of the land and water resources utilization, economic and social development, and the ecological environment under the coordinated development program was conducted. The results showed that: the coordinated development scheme is the best plan for the utilization of water and land resources in Xi'an. After 2017, Xi'an will still face water shortage for a long time, and the water supply gap is large. In order to meet the urban water demand, it is very necessary to transfer water from other regions and to build new water source project. The area of construction land in Xi'an will increase year by year, and will increase to 914.70 km² in 2025. The area of cultivated land will still be reduced year by year, and it will be reduced to 21.8546 × 10⁴ hm² in 2025. By promoting the construction of the water-saving city, carrying out the intensive use of the land, developing the third industry and controlling the population growth, we can control the utilization of water and land resources in Xi'an. This study provides a basis for comprehensive planning and efficient utilization of urban water resources and land resources.

Key words: system dynamics; urban complex ecosystem; water and land resource; scenario analysis; Xi'an City

收稿日期:2018-06-29; 修回日期:2018-09-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401409); 国家自然科学基金项目(51479160、71774132)

作者简介:陈媛媛(1993-),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事区域经济与水资源管理研究。

通讯作者:朱记伟(1982-),男,山东日照人,博士,教授,博士生导师,主要从事区域经济与水资源管理研究工作。

1 研究背景

随着城市化进程的推进,人类活动的范围、强度、频率都不断增加,城市复合生态系统在提供基础资源和承载这些效应的同时,自身的结构和面貌也发生着巨大的改变,并面临过渡开发导致系统失衡甚至崩溃的境地,如何保持城市水土资源的可持续发展,并协调其与社会、经济、环境的关系,逐步成为城市发展面临的一个重要问题^[1]。随着系统动力学(system dynamics,简称SD)的发展,其定性定量相结合、研究对象开放、应用简单、模拟功能强大、可处理高阶及非线性时变问题的特征逐渐引起了学者们的重视。李华^[2]结合崇明岛的复合生态系统特征,采用系统动力学方法,建立了复合生态系统仿真模型,评价了不同方案的实施影响。Wang Changhai等^[3]根据对北京市湿地水资源系统的分析,基于系统动力学建立了北京市水资源承载力模型,模拟了2006-2030年北京市人口、经济、水资源供给和需求的变化趋势以及水环境的压力。Fu Qiang等^[4]也基于系统动力学理论,以2010年度佳木斯水资源利用状况为基准,依据城市水资源供需结构和区域地理特征,建立了城市水资源的可持续利用模型,模拟了佳木斯短期、中期和长期的水资源供需状况和变化趋势。上述研究已经考虑了社会、经济因素的影响,并且使资源利用和生态环境变化得到了量化,但是仍存在研究区域过小、可推广性不强,同时只考虑单一资源利用的问题,这使得该类模型还不能够全面地反映城市化进程中城市水土资源利用与其他各要素的耦合关系。基于此,本文以西安市为例,结合城市水土资源的综合利用及其各要素的耦合关系建立复合生态系统模型,采用SD方法动态模拟3种不同情景下城市复合生态系统的发展变化,以期在城市水土资源规划和管理调控提供决策依据。

2 研究区概况

西安市是陕西省的省会城市,地处东经 $107^{\circ}40' \sim 109^{\circ}49'$,北纬 $33^{\circ}39' \sim 34^{\circ}45'$,土地面积总计为 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$,建成区面积 565.75 km^2 ,包括莲湖、新城、碑林、雁塔等10区3县,如图1所示。西安市三面环山,东南部较高、西部较低,多年平均降水量 744 mm 。至2016年底,西安市总人口(户籍人口)共计 824.93×10^4 人,城镇人口共计 552.21×10^4 ;区域国内生产总值(GDP)为 6282.65×10^8 元、第一、二、三产业约占当年生产总值的3.7%、35%、61.3%。近年

来,随着经济社会的快速发展,大批人才和项目落户西安,西安的区位优势逐步体现,加之“十九大”报告中提出的抢抓“一带一路”机遇,全面深化改革的政策导向,使得西安市成为西北地区人口总量较多、经济发展较快、现代化程度较高的西部经济重镇。



图1 西安市地理区位图

随着近年来城市化进程的推进,西安市水土资源开发利用出现了各种问题,生态环境也随之出现恶化趋势,主要体现在:(1)区域水资源需求量逐年增大,但由于地处西北地区,研究区水资源供应不足,长期面临不同程度的缺水;(2)城市建设用地面积迅速增大,但是土地利用效率不高,部分区域土地利用结构不甚合理;(3)研究区内固废、垃圾、污水排放量逐年增多,生态环境保护面临较大压力;(4)城市总人口不断增加,加剧了相关资源的供需矛盾和环境压力。研究区复合生态系统的特征可以概括为:影响因素的复杂性、资源合理开发利用的不确定性和生态环境的脆弱性。

3 模型构建

3.1 建模方法

系统动力学于1956年由Forrester教授首次提出,是系统科学理论与计算机仿真紧密结合、研究系统反馈结构与行为的一门科学^[5]。它主要以反馈理论、控制理论、信息论、非线性理论和大系统理论为基础,将定性定量分析相结合,以计算机仿真技术为手段,从微观结构入手建立模型,构造系统的基本结构,进而模拟、分析系统的动态行为^[6-7]。故此,系统动力学模型可作为实际系统,特别是社会、经济、生态复杂大系统的“实验室”。

由于城市复合生态系统是一个高阶、复杂、开放的大系统,涉及的问题和指标都相当多,为使模型更加准确高效地反映问题,同时考虑到数据海量收集的困难,在建模时设定了3个原则:(1)明确问题;(2)抓住关键指标;(3)剔除不具有动态特性的部分。

3.2 模型结构

城市复合生态系统是一个以人为中心,高度开放的、功能不完善且受人类控制的社会 - 经济 - 自然复合生态系统,其系统组成要素的数量众多,系统以及要素间的联系也非常复杂,而且还涉及政策的影响^[8],因此,本文基于系统动力学理论,借助 Vensim 软件,以城市化和传统行业经济发展为驱动因素,以水土资源开发利用及生态环境影响为限制因素,进行模型识别。将城市复合生态系统划分为“社会(Sociology) - 经济(Economy) - 水资源(Water resources) - 土地资源(Land resources) - 生态环境(Ecological environment)”5 个子系统,各子系统之间相互影响、相互制约,如图 2 所示。

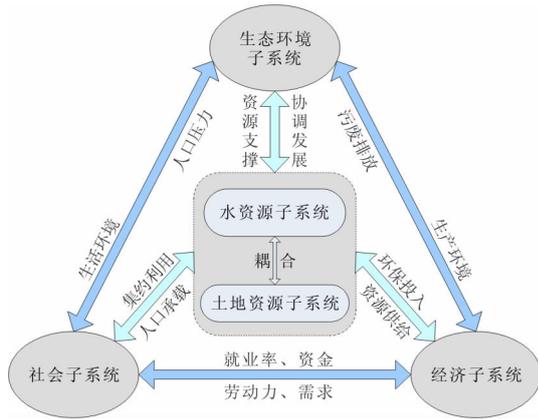


图 2 城市复合生态系统

3.3 子系统构成

3.3.1 水资源子系统 该子系统主要研究在不同经济、社会水平下,供水量与需求量的变化趋势及其对社会发展水平、经济、土地利用和生态环境的影响。该子系统主要由区域的供水总量、年需水总量和缺水程度等要素构成,其中需水总量主要包括农业用水、生活用水、工业用水等^[9],主要分析研究区的主要供用水情况及其对其他系统的影响。其主要方程式为:

$$\text{供水总量} = \text{WITH LOOKUP}(\text{Time}, ((2004, 0) - (2025, 100000)), (2004, 36092), (2005, 35776), (2006, 28762), (2007, 32959), (2008, 36471), (2009, 38307), (2010, 41089), (2011, 38934), (2012, 45791.8), (2013, 51372.1), (2014, 53799), (2015, 56055.3), (2020, 65000), (2025, 70000))) \quad (1)$$

$$\text{年需水总量} = \text{农业需水量} + \text{工业需水量} + \text{生态需水量} + \text{生活需水量} \quad (2)$$

$$\text{缺水程度} = \text{IF THEN ELSE}(\text{水资源供需差} \geq 0, \text{水}$$

$$\text{资源供需差} / \text{年供水总量}) \quad (3)$$

3.3.2 土地资源子系统 该子系统与水资源系统相对应,主要研究不同经济社会发展水平下,各类型土地利用结构的变化,同时分析其对城市经济社会发展、水资源利用和生态环境的影响。该子系统主要由耕地面积、建设用地面积、绿地面积^[10]等要素构成,主要分析研究区城市土地利用的变化情况,特别是耕地与建设用地的此消彼长的关系。其主要方程式为:

$$\text{耕地面积} = \text{INTEG}(\text{耕地年减少量}, 404.87) \quad (4)$$

$$\text{建设用地面积} = \text{INTEG}(\text{建设用地年增长量}, 28000) \quad (5)$$

$$\text{绿地面积} = \text{NTEG}(\text{IF THEN ELSE}(\text{绿地面积} > 25000, 100, \text{绿地年增加量}), 3646.8) \quad (6)$$

3.3.3 生态环境子系统 该子系统主要研究一定的社会经济水平和水土资源条件下,生态环境的主要污染状况以及由此造成的经济损失。该子系统主要由工业固体废弃物排放量、生活垃圾产生量、城市污水处理费用^[11]、经济损失等要素构成,主要分析研究区污染物排放与控制的情况。其主要方程式为:

$$\text{固体废弃物排放量} = \text{工业固体废弃物产生量} \times (1 - \text{工业固体废弃物综合利用率}) \quad (7)$$

$$\text{生活垃圾产生量} = \text{人均生活垃圾产生量} \times \text{总人口} \quad (8)$$

$$\text{城市污水处理费用} = 1.4 \times (\text{城镇生活污水排放量} + \text{工业废水排放量}) / 10 / \text{城市污水排放当量值} \quad (9)$$

$$\text{经济损失} = \text{城市污水处理费用} + \text{工业固体排污费} / 10000 + \text{生活垃圾处理费用} / 10000 + \text{农业缺水经济损失} + \text{工业缺水经济损失} \quad (10)$$

3.3.4 经济子系统 该子系统主要研究城市经济发展与水土资源开发利用的关系,分析经济增长对水土资源开发带来的影响以及有限的水土资源对城市经济发展方向的限制和引导。该子系统主要由区域国内生产总值(简称 GDP 总量)、三产 GDP、净 GDP 等要素组成,主要分析研究区的城市经济发展状况,其主要方程式为:

$$\text{GDP 总量} = \text{INTEG}(\text{GDP 年增长量}, 1102.39) \quad (11)$$

$$\text{三产 GDP} = \text{INTEG}(\text{三产年增长量}, 565.26) \quad (12)$$

$$\text{净 GDP} = \text{GDP 总量} - \text{经济损失} \quad (13)$$

3.3.5 社会子系统 该子系统选取粮食生产、人口增长情况以及城镇化水平为主要因素来反映城市社会发展水平,通过分析这些因素的变化趋势,研究城市社会发展对经济、水土资源利用以及生态环境的影响。该子系统主要由总人口、城市化率、粮食单产等要素组成。主要分析研究区社会发展的基本情

况,特别是人口和城市化率增长对系统其他因素的影响。其主要方程式为:

$$\text{总人口} = \text{INTEG}(\text{人口年增长量}, 725.01) \quad (14)$$

$$\text{城市化率} = \text{INTEG}(\text{城市化率年增加量}, 0.4393) \quad (15)$$

$$\text{粮食单产} = \text{INTEG}(\text{粮食单产年增加量}, 310) \quad (16)$$

3.4 建立系统模型

结合研究区的区位特征,通过分析各要素之间的反馈关系,建立各子系统之间的联系,同时,由于系统涉及的因素纷繁复杂,为了反映研究区在水土资源开发利用过程中的主要问题,仅选择对城市复合生态系统有重要影响的核心因子建立系统模型。借助 Vensim 软件,构建城市复合生态系统开发利用流程图,如图 3 所示。

3.5 模型识别与检验

本文仿真系统的空间边界划分以研究区辖区内的 10 区 3 县的外包络线为准,时间边界为 2004 - 2025 年,其中 2004 - 2015 年为历史数据的拟合时段,2016 - 2025 年为模型的仿真预测时段,时间步长设定为 1 a,由于系统涉及多个速率变量的计算,结合 2016 年的部分历史数据,只能得出 2015 年的增长率,所以仍将 2016 年作为仿真时段进行预测。本文资料主要来自于《西安统计年鉴(2004 - 2017)》。以 2004 年为基准年,对时段 2004 - 2015 年的历史数据进行模拟,并与历史数据系列进行对比,以总人口、GDP、耕地面积为例,分析其与真实值的误差,如表 1 所示。

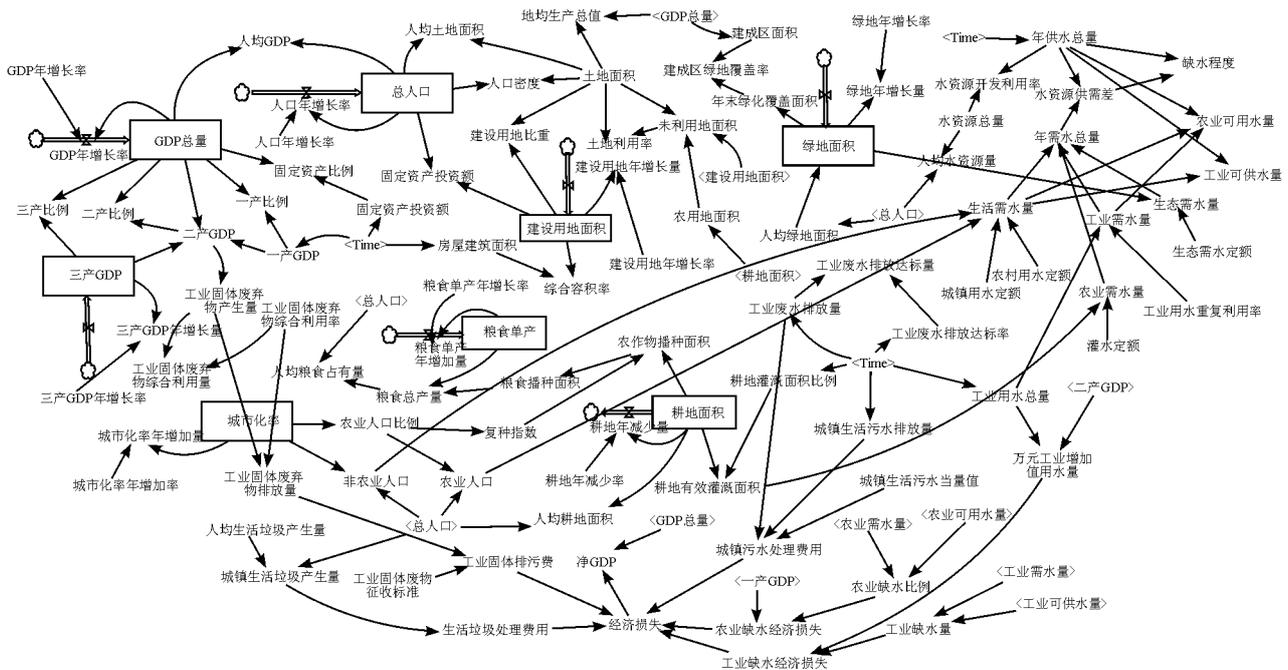


图 3 城市复合生态系统开发利用流程图

表 1 系统模型检验

年份	总人口/(10 ⁴ 人)			GDP 总量/(10 ⁸ 元)			耕地面积/(10 ⁴ 亩)		
	真实值	模拟值	误差/%	真实值	模拟值	误差/%	真实值	模拟值	误差/%
2004	725.01	725.010	0.00	1102.39	1102.39	0.00	404.87	404.850	0.00
2005	741.73	733.710	-1.08	1313.93	1313.94	0.00	400.17	400.802	0.16
2006	753.11	742.515	-1.41	1538.94	1539.02	0.01	395.79	396.794	0.25
2007	764.25	751.425	-1.68	1856.63	1856.67	0.00	391.77	392.826	0.27
2008	772.30	760.442	-1.54	2318.14	2318.05	0.00	390.77	388.898	-0.48
2009	781.67	769.567	-1.55	2724.88	2724.87	0.00	387.89	385.008	-0.74
2010	782.73	778.802	-0.50	3242.86	3242.87	0.00	383.32	381.159	-0.56
2011	791.83	788.148	-0.46	3869.84	3869.71	0.00	377.10	377.346	0.07
2012	795.98	797.605	0.20	4394.47	4394.06	-0.01	369.91	373.574	0.99
2013	806.93	807.177	0.03	4924.97	4924.42	-0.01	366.23	369.837	0.98
2014	815.29	816.863	0.19	5492.64	5492.21	-0.01	360.73	366.140	1.50
2015	815.66	826.665	1.35	5801.20	5800.87	-0.01	356.89	362.478	1.57

由表1可知,2004-2015年,总人口、耕地面积的统计数据与其模拟数据的相对误差很小,均小于1.7%,而GDP总量与其真实值的相对误差极小,3个指标均满足拟合误差小于5%^[12]的要求。这说明该模型能够较好地对实际情况进行模拟,能够获得比较客观、准确的定量关系。

4 SD 仿真及情景分析

4.1 仿真方案的设定

本文利用Vensim软件自带的simsetup灵敏度分析功能,对模型中多个常量(如GDP增长率、人口增长率等)参数进行灵敏度分析,对比各参数在自

身增加5%、减少5%时引起的相应变化量,将影响较大或者经分析比较重要的参数确定为敏感性指标。在灵敏度分析的基础上,结合研究区规划的一些具体要求,将GDP年增长率、三产GDP年增长率、人口增长率、城镇化率年增长率、绿地面积年增加率、建设用地面积增长率、耕地年减少率、城镇人均用水定额、工业用水重复利用率、工业固体废弃物综合利用率作为关键性指标。

根据文献[13-14]和专家的分析建议,结合研究区水土资源利用现状和对各个子系统的分析考察,对上述10个指标取值进行不同的组合,形成3个方案,如表2所示。

表2 3种方案的指标及其取值

指标类型	现状方案(2015年)	经济优先型(方案一)	环境保护型(方案二)	协调发展型(方案三)
GDP年增长率	0.0823	0.2486	0.1153	0.1641
三产GDP年增长率	0.1145	0.2515	0.1273	0.1778
人口增长率	0.0114	0.0230	0.0052	0.0109
城市化率年增长率	0.0001	0.0325	0.0061	0.0150
绿地年增加率	0.0933	0.0655	0.2708	0.1205
建设用地年增长率	0.0553	0.0822	0.0380	0.0580
耕地年减少率	0.0280	0.0283	0.0074	0.0100
城镇每人每日用水定额/L	187	225	178	180
工业用水重复利用率	0.7404	0.6529	0.7681	0.7000
工业固体废弃物综合利用率	0.9082	0.8531	0.9805	0.9414

经济优先型(方案一):主要以经济发展为优先,GDP年增长率、三产GDP年增长率、人口增长率、耕地减少率、城镇人均用水定额等指标取近10年最大值;城镇化率年增长率、建设用地年增长率根据近10年历史值取较大值;绿地年增加率、工业用水重复利用率、工业固体废弃物综合利用率则根据近10年历史最小值取较小值。

环境保护型(方案二):主要以环境保护为优先,GDP年增长率、三产GDP年增长率、人口增长率、城镇化率年增长率、建设用地年增长率、耕地减少率、城镇人均用水定额取近10年较小值(因最小值过小,与实际不符,比选的意义不大);绿地年增加率、工业用水重复利用率、工业固体废弃物综合利用率取近年来较大值。

协调发展型(方案三):兼顾社会、经济的发展,水土资源的合理开发以及城市发展与生态环境的和谐统一,各指标取值主要根据近10年的平均值并结合发展趋势适当选取。同时,由于耕地涉及粮食安

全和社会稳定,为了尽可能保护现有耕地,将耕地面积年减少率取较小值。

4.2 仿真结果及方案比选

由于系统在给定参数后,针对各方案各有一系列仿真结果,为了便于方案比较,结合城市复合生态系统的指标构成,挑选有代表性的8个指标进行对比分析。各方案指标的仿真结果对比如图4所示。

由图4(a)可知,经济优先型方案(方案一)经济效益最大,协调发展方案(方案三)次之,环境保护型方案(方案二)较小,现状方案最小。同时,由《西安市统计年鉴》可知,2015、2016年西安市GDP总值分别为 5801.2×10^8 、 6282.65×10^8 元(近几年增长率偏低),方案一明显偏大,且增长较快,方案二和现状方案明显偏小,且增长较慢,故方案三比较合理。

由图4(b)可知,经济优先型方案(方案一)总人口最大,现状方案次之,协调发展型方案(方案三)较现状方案略微偏小,环境保护型方案(方案

二)最小。2015、2016年西安市总人口数量分别为 815.66×10^4 、 824.936×10^4 (近几年增长率偏低),方案一明显偏大,且增长较快,方案二明显偏小,且增长较慢,故现状方案和方案三比较合理。

由图4(c)可知,经济优先型方案(方案一)建设用地面积最大,协调发展型方案(方案三)次之,现状方案较协调发展方案略微偏小,环境保护型方案(方案二)最小。同时,由2015、2016年西安市建设用地面积为 536.1 、 565.75 km^2 ,方案一明显偏大,且增长较快;现状方案、方案三比较接近实际值(方案三更接近一些);方案二明显偏小,增长更慢。另外,《西安城市总体规划(2008-2020年)》要求:至2020年,全市城镇建设用地规模控制在 865 km^2 以内,故现状方案、方案三比较合理。

由图4(d)可知,环境保护型方案(方案二)人均耕地面积最大,协调发展型方案(方案三)次之,现状方案较小,经济优先型方案(方案一)最小。同时,由2015、2016年西安市人均耕地面积分别为 0.0292 、 0.0280 hm^2 ,方案一和现状方案明显偏小,且减小较快;方案二较实际值偏大,而方案三比较接近实际值,故方案三比较合理。

由图4(e)可知,环境保护型方案(方案二)人均绿地面积最大,协调发展型方案(方案三)次之,现状方案较协调发展方案整体略微偏小,经济优先型方案(方案一)最小。方案一由于过分追求GDP产值及经济发展,将绿地年增长率设置为 0.06552 ,绿地面积增长缓慢,人口还随之上升,所以该方案人均绿地面积较低,2015、2016年人均约为 8 m^2 左右。方案二人均绿地面积基本都在 32 m^2 左右,这是因为在计算绿地面积时,考虑到城市绿地面积不可能无限增长,同时结合西安市的区位条件,为绿地面积设置了上限面积 25000 hm^2 ,这之后绿地面积只能小幅增长,且该方案中绿地面积年增加率取近年来最大值 0.2708 ,所以绿地面积很快达到了约束上限,导致人均绿地面积基本保持不变。据统计分析,同类城市人均绿地面积一般为 15 m^2 ,且结合西安市的绿化现状及《西安城市总体规划(2008-2020年)》要求:至2020年,人均公共绿地面积应达到 20 m^2 以上,故现状方案和方案三比较符合西安市城市绿化发展的实际情况。

由图4(f)可知,经济优先型方案(方案一)年需水总量最大,环境保护型方案(方案二)和协调发展方案(方案三)次之,现状方案最小。由于方案一过分追求GDP产值及经济发展,工业产值迅速增大,

工业用水量不断增加,加之人口快速增长引起的生活需水量大幅增加,使得该方案年需水量明显高于其他3个方案。现状方案由于城市化率年增长率是历年来最低值 0.0001 ,而且伴有耕地年减少率与历年来最大值 0.02827 非常接近,考虑到城市的发展以及农业一直是关中地区的用水大户,故此方案年需水量明显偏小,也不符合实际情况。方案二和方案三年需水量比较接近,且在研究时段后期方案二的年需水量增长幅度很小。因此,将方案二和方案三作为备选方案。

根据图4(g)中的缺水程度可知,各方案在全部时段内均存在缺水。其中,方案一的缺水程度明显高于其他方案,这是由经济高速发展和人口快速增长带来的工业、生活需水量猛增引起的,且缺水程度还在不断加重。现状方案缺水程度最轻,但却是以牺牲城市发展和耕地面积为代价的,且缺水程度在预测时段基本保持不变。方案二和方案三缺水程度相近,方案三在预测时段后期缺水程度略微低于方案二,因此,方案二和方案三都比较合理。

由图4(h)可知,经济优先型方案(方案一)年经济损失最大,协调发展型方案(方案三)次之,现状方案和保护型方案(方案二)最小。方案一由于过分追求经济增长,导致固体排污费用、污水处理费用和缺水经济损失大幅增长,因此总经济损失明显高于其他方案。现状方案与方案二、方案三的年经济损失非常接近,其中方案三略微高于前两个方案。因此,将现状方案、方案二和方案三均作为备选方案。

对各方案的合理性分析进行汇总,如表3所示。

综上所述,经济优先型方案(方案一)过分追求GDP产值及经济发展,忽略了社会发展、水土资源的承载能力以及生态环境的保护,使得社会发展很不协调、水土资源大量低效利用、生态环境恶化,导致城市呈现短暂的、不可逆的、爆发式的发展,这也是当前许多城市已经体现出来的问题。因此,不推荐该方案。

环境保护型方案(方案二)虽然在有些方面表现得还不错,但更多是表现在一些绿化、环境、水土资源使用方面,而这些方面的优势其实是一种间接的优势,需要依托城市经济和社会发展来体现,离开了经济、社会发展,环境效益似乎也很难体现出来。因此,不推荐该方案。现状方案在其他方面尚佳,但其城市化率年减少率是历年来最低值,同时耕地减少速率也是历年来最快,因此,该方案也不能够作为

城市可持续发展的备选方案。

协调发展方案(方案三)兼顾了城市发展的各个方面,将社会经济发展与水土资源的高效利用、生态环境的协调统一联系起来,兼顾了经济、人口增长和环境,较好地实现了对各方利益的协调平衡和统筹规划,因此,推荐使用该方案。

4.3 研究区各子系统的仿真预测及调控

经过情景分析,采用协调发展型方案(方案三)对研究区水土资源利用、经济社会发展以及生态环境状况进行仿真预测。

首先,分析水土资源面临的状态和开发利用的途径,如图 5 所示。

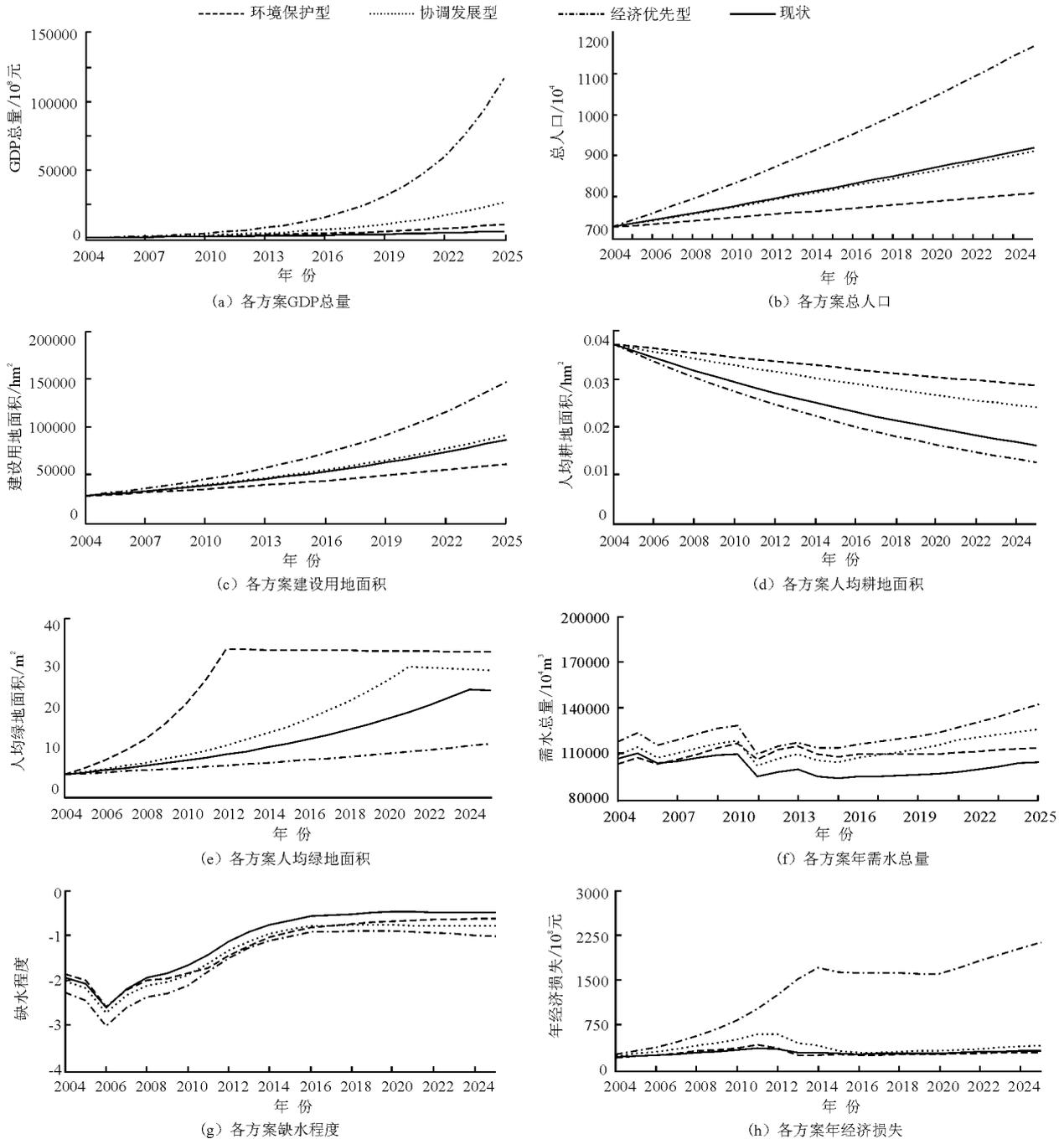


图 4 研究区各方案 8 指标仿真对比图

由图 5(a)可知,2004 至 2025 年,西安市将一直处于水资源短缺状态,并且缺水程度随着时间的推移还将有所加重。一方面,年需水总量稳中有升,

2015 年之前的历史数据部分,2006 和 2011 年都有波动(工业用水量波动引起的),但总体呈现稳定态势;另一方面,年供水总量在不考虑外区域调水的情

况下,供水能力基本稳定且稍有增长。总的来讲,年供水总量相对年需水量整体偏低,供水缺口还比较大,使得西安市一直处于缺水状态。要满足西安市不断增长的用水需求,就需要大幅提升西安市的供水能力,通过区外调水工程、水源工程的修建,来逐步缓解和满足西安市的用水需求。同时,应加大社会节水力度,调整产业结构,避免高耗水性工业企业落户西安,并提升工业技术水平,提高工业用水重复利用率和工业万元增加值 GDP 用水量。

由图 5(b)可知,随着城市经济社会的发展、人口的增长,建设用地面积逐渐增加(2025 年,914.70 km²),绿地面积也随着人们对景观环境需求的提升而逐步增加(2025 年,256.30 km²),但是耕地面积

不断减少(2025 年,327.82 万亩)。建设用地面积的迅速增加与耕地面积的大幅减少说明,土地利用的集约化程度可能不高,土地利用的效率也不太高。当耕地面积无法再减少时(触及耕地面积红线时),区域土地面积有限,建设用地无法通过低成本获得更多的土地资源,此时,建设用地会通过衡量经济成本,看是否需要采取集约利用的方式提高土地的利用效率,因此,该阶段对于土地资源的利用还处在发展探索阶段,土地资源利用的结构和程度还有待进一步优化。西安市应适当推广土地集约化利用,来提高城市土地资源利用的效率。

其次,在上述水土资源利用变化趋势下,对城市社会经济发展状况进行预测和分析,如图 6 所示。

表 3 各方案合理性比选

方案名称	合理性比选因素							
	GDP 总量	总人口	建设用地面积	人均耕地面积	人均绿地面积	年需水总量	缺水程度	经济损失
现状方案	-	√	√	-	√	-	-	√
经济优先型方案(方案一)	-	-	-	-	-	-	-	-
环境保护型方案(方案二)	-	-	-	-	-	√	√	√
协调发展型方案(方案三)	√	√	√	√	√	√	√	√

注:“√”表示方案合理,可以接受;“-”表示方案不合理,不推荐。

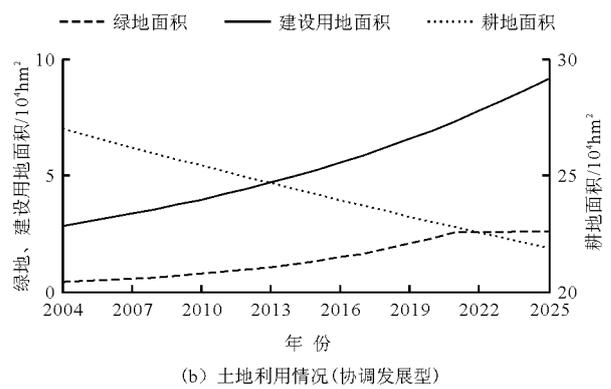
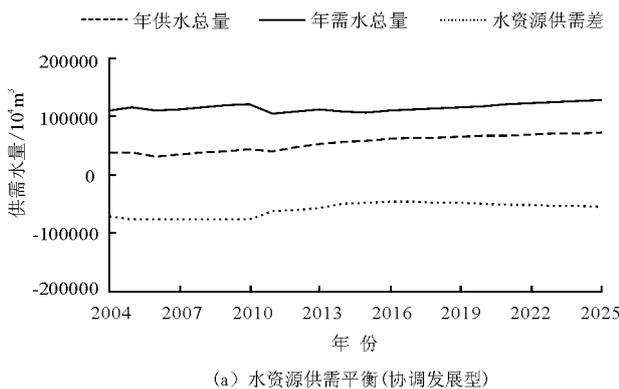


图 5 研究区水土资源利用动态仿真

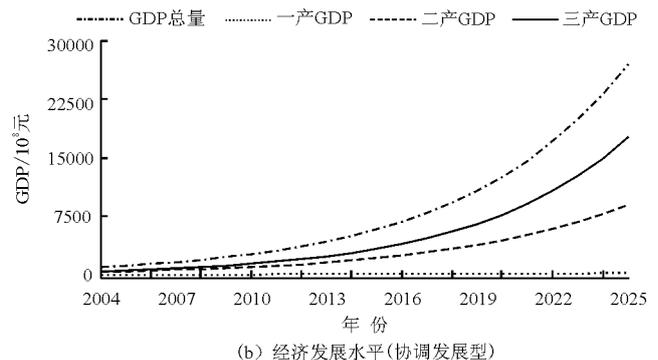
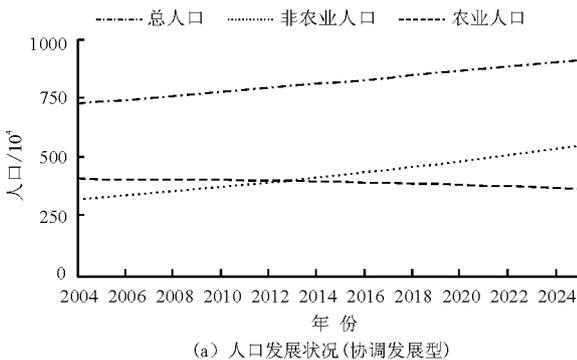
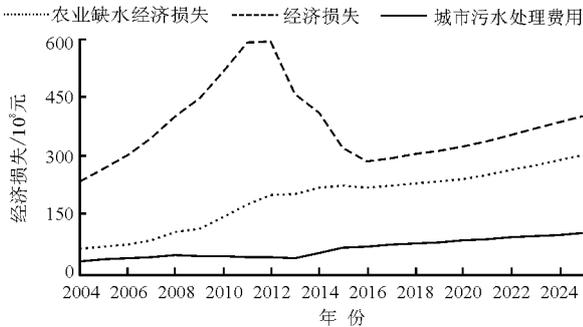


图 6 研究区社会经济发展状况

由图6(a)可以看出,西安市总人口在政策不变的情况下还将持续不断增长,同时,从人口构成来看,城镇人口也将不断增长,而农业人口呈略微下降的趋势。另外,考虑到西安市是“一带一路”政策的中心城市,还将面临政策因素引起的外来人口的大量涌入,因此,预测至2025年,西安市人口将超过千万。

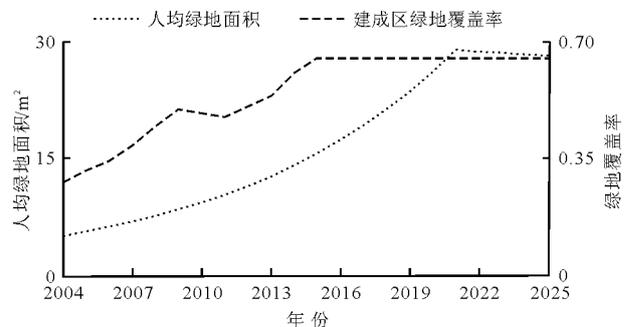
由图6(b)可以看出,西安市GDP总量、第二、



(a) 经济损失状况(协调发展型)

第三产业GDP都将呈不断增长的趋势,其中,第二、第三产业GDP的增长构成GDP总量增长的主要部分,而且第三产业GDP占GDP总量的比例仍将保持最高且不断增长;而一产GDP将基本保持稳定,略有增长。由此可知,发展第三产业在今后仍将是西安市经济发展的重点。

最后,在上述资源条件和社会经济水平下,城市的生态环境情况,如图7所示。



(b) 绿化情况(协调发展型)

图7 研究区生态环境状况

由图7(a)可以看出,西安市的缺水状况将会给农业带来持续增加的经济损失,同时城市污水处理费用也将逐年增高,使得缺水和污染造成的经济损失逐年增加,这说明缺水仍将是西安市面临的主要问题。由图7(b)可以看出,西安市人均绿地面积和建成区绿地覆盖率都将逐年增加,这反映了西安市的生态环境质量将逐步得到提升。

4.4 研究区复合生态系统调控措施

近来,《关中平原城市群发展规划》已获国务院批复,要将西安市作为“一带一路”政策的中心城市之一发展成国际化大都市,发挥其在西部地区的核心引导作用,因此,西安市还将面临经济的高速增长、外来人口大量涌入以及水土资源需求量大幅增长等因素给西安市水土资源开发利用带来的更大压力和挑战。

4.4.1 修建输配水工程,推进节水型城市建设 建设涝河峪口平原水库、库峪水库、梨园坪水库等供水工程,增加西安市的日供水量;加快引汉济渭调水工程、西安输配水工程建设,新建荆峪沟调节水库、白鹿原水厂等配套供水管网建设,增加西安市的调入水量;提升地下水源应急储备能力,建设涝渭三角洲地下水源地工程,新建灞东地下水源地和沣河地下水源地,增加西安市的日供水量。同时,在保证西安市主要河流生态基流的前提下,优化统筹市内外地表水开发利用程度,涵养地下水。

结合西安市的产业情况,通过产业结构调整,逐步建立节水型产业结构体系。大力发展高效灌溉设施,提高灌水效率;通过工业结构调整,引导低耗水、高附加值的工业企业于西安落户。总体来讲,节水型产业结构体系的调整原则是调整一产、优化二产、发展三产^[15]。同时,应在社会生活的各个层面推行节水理念,并结合水价调控政策,通过制定相关节水措施对居民用水习惯进行引导,通过优化城市水资源系统,引进先进的给排水技术,使城市水资源利用更高效、更节约。

4.4.2 推行土地集约化利用 经济的高速发展必然引起城市建设用地面积的大幅增长,同时引起城市土地利用结构的变化,而土地集约化利用能够使土地利用更加高效,并提高经济收益^[16,17]。结合西安市土地利用基本情况,制定出合理的集约化利用措施:针对西安市建设用地增长过快的情况,要对其发展规模和扩张速度进行限制,充分发挥已有建设用地的作用,消耗存量,同时回收闲置用地。这样不但可以减少土地浪费,提高土地利用效率,而且能够迫使土地使用者充分挖掘土地资源的利用潜力,更限度地发挥土地的效益。同时,土地集约利用通过回收闲置用地,提高土地利用等方式,节省了可观的土地资源,保证了土地的供应量,为土地资源的各类利用提供可能。

4.4.3 发展第三产业,控制人口增长 2010年以

来,西安市第三产业产值占比由 53.82% 上升至 59.55% (2015 年),与发达国家相比(超过 70%),西安市的第三产业比例仍然偏低,因此,西安市的经济发展仍将面临产业结构的调整。应结合自己的区位优势,抓住发展机遇,通过产业结构调整,使有限的资源和财力得到重新优化分配,充分挖掘西安市内及周边旅游资源,保证西安市 GDP 的稳步快速增长。至 2015 年,西安市的总人口为 815×10^4 ,常住人口更是达到了 870×10^4 ,过多的人口使得中心城区的各项资源利用趋紧,各项基础设施供应不足,人居环境变差,因此,应结合区域水土资源的承载能力,制定相应的人口政策,对人口迁入和人口增长进行控制,同时,结合各区的实际情况和优势,对人口分布结构进行调整。

5 结 论

(1)结合西安市社会经济现状和水土资源利用情况,基于复合生态系统的概念,以系统动力学为方法,借助 Vensim 软件,建立了城市复合生态系统仿真模型,较为全面的体现了城市复合生态系统的基本特征。

(2)通过选取并分析关键指标的变化,设置了经济优先型、环境保护型和协调发展型 3 种情景,对比分析了各情景下方案的合理性,给出了较优的协调发展方案;并且,协调发展方案的各项指标均与西安市统计年鉴数据较为接近,说明该方案是合理有效的。

(3)根据协调发展方案,对西安市水土资源开发利用、经济社会发展水平以及生态环境状况进行了仿真预测。结果表明:西安市在今后一段时间内,还将面临不同程度的缺水问题,需要区外调水,新建水源工程,才能满足市区的用水需求;西安市的建设用地面积将逐渐增加,至 2025 年将达到 914.7 km^2 ,耕地面积仍将不断减少,至 2025 年将减少至 $21.85 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

(4)结合政策导向,提出了相关的调控措施和建议,即通过修建输配水工程,推进节水型城市建设,推行土地集约化利用,发展第三产业、控制人口增长等措施,实现对西安市水土资源开发利用的调控。

西安市是典型的内陆型城市,水土资源本身相对匮乏,本研究尝试将城市水土资源利用与城市的经济社会发展和生态环境改善进行耦合,获得了较为满意的效果,可为西安市未来水土资源规划的制定提供依据。

参考文献:

- [1] 王如松,欧阳志云. 社会—经济—自然复合生态系统与可持续发展[J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):337-345+403-404+254.
- [2] 李华. 岛屿复合生态系统的动态仿真[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(8):1858-1863.
- [3] WANG Changhai, HOU Yilei, XUE Yongji. Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: Analysis of policy optimization for urban wetland water resources management [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161:1180-1191.
- [4] FU Qiang, LI T X, LIU D, et al. Simulation study of the sustainable utilization of urban water resources based on system dynamics: a case study of Jiamusi [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2016,16(4):980-991.
- [5] 杨巧宁. 基于 SD 模型的山东省水土资源可持续利用模式研究[D]. 济南:山东师范大学,2011.
- [6] 胥卫平,王平乐. 西安市水资源经济系统 SD 模型研究[J]. 人民黄河,2012,34(4):45-47.
- [7] 孙湖燕,孙震. 西安市浐灞生态区绿地系统规划[J]. 南方农业(园林花卉版),2009,3(2):58-61.
- [8] 王俭,韩婧男,胡成,等. 城市复合生态系统共生模型及应用研究[J]. 中国人口资源与环境,2012,22(11):291-296.
- [9] 西安市统计局. 2005-2017 年西安统计年鉴[EB/OL]. [2018-06-20]. http://tjj.xa.gov.cn/ptl/def/def/index_923_6528_ci_trid_4417083.html.
- [10] 滕宇思. 基于系统动力学的西安市土地综合承载力评价与预测研究[D]. 西安:西北工业大学,2016.
- [11] 福州市鼓楼区环保局. 排污费征收标准及计算方法[EB/OL]. (2014-08-14). [2018-06-22]. <http://www.gl.gov.cn/News/ArticleDetail.aspx?articleid=597661>.
- [12] 王玲. 基于系统动力学的区域水土资源复合开发研究[D]. 西安:西安理工大学,2014.
- [13] 李华,蔡永立. 基于 SD 的生态安全指标阈值的确定及应用——以上海崇明岛为例[J]. 生态学报,2010,30(13):3654-3664.
- [14] 张梦婕,官冬杰,苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定[J]. 生态学报,2015,35(4):4880-4890.
- [15] 潘宜,解建仓,汪妮. 城市化进程中水土资源优化配置研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2010.
- [16] 刘戈,汪波. 天津经济技术开发区土地集约利用与经济增长关系[J]. 天津大学学报(社会科学版),2007,9(2):97-101.
- [17] 刘彦随,杨子生. 我国土地资源学研究新进展及其展望[J]. 自然资源学报,2008,23(2):353-360.