

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.005

基于可持续发展理念的通辽市农牧发展格局优化研究

徐冬平^{1,2}, 薛小杰¹, 朱记伟¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;
2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: 作为北方农牧交错区生态脆弱区的典型代表地区,通辽市长期的农业发展政策导致农、牧业格局失调,其不良结果主要表现为灌溉农业种植产业比例过高,导致大量水资源消耗在低效的农业种植部门,致使二、三产业的发展以及生态环境无水可用,限制了其它产业部门以及区域总体发展。本文利用系统动力学仿真方法模拟“高农发展格局”、“偏农发展格局”、“低农发展格局”、“偏牧发展格局”、“高牧发展格局”等农牧发展格局下的通辽市社会经济发展状态,并利用遗传投影寻踪的方法对模拟结果进行优选。得到如下结论:1)农牧发展格局是影响农牧交错地区可持续发展的重要因素;2)通辽市当前的农牧发展格局不能支撑未来的可持续发展;3)通辽市实现可持续发展必然要改变当前的农牧发展格局;4)本研究可为农牧交错地区实现可持续发展提供有益的借鉴。

关键词: 通辽市;农牧发展格局;可持续发展;系统动力学

中图分类号: K901 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)03-0276-06

Optimization of the development pattern of agriculture and animal husbandry in Tongliao based on the idea of sustainable development

XU Dongping^{1,2}, XUE Xiaojie¹, ZHU Jiwei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in the Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: As a typical ecologically vulnerable area of the farming-pasturing interlaced areas in the northern China, Tongliao has been practicing long-term agricultural development policies, leading to the imbalance of agricultural and pastoral pattern. The main consequence of this situation is the too high proportion of irrigation farming industry, resulting in a lot of water resources consumed in the inefficient agricultural farming sector and insufficient water for the development of the secondary industry and the tertiary industry as well as the ecological environment, and thus the development of other industrial sectors and the overall region was restricted. In this paper, the simulation method of system dynamics is used to simulate the social and economic development status of Tongliao under different agricultural and pastoral land use patterns, including “intensive-agriculture development pattern”, “agriculture-focused development pattern”, “low-agriculture development pattern”, “pasture-focused development pattern” and “intensive-pasture development pattern”. Besides, the genetic projection pursuit method was adopted to optimize the simulation results. The conclusions are as follows: 1) the agricultural and pastoral development pattern is the key factor influencing the sustainable development of the farming-pasturing interlaced area; 2) the current agricultural and pastoral development pattern of Tongliao cannot support the sustainable development of the city; 3) optimizing the current agricultural and pastoral development pattern of Tongliao is an indispensable step for achieving the sustainable development of the city; 4) this study can provide reference for achieving the sustainable development of the farming-pasturing interlaced area.

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 国家水利部公益资助项目(201501031);国家自然科学基金资助项目(51479160)

作者简介: 徐冬平,男,副教授,研究方向为人文地理与区域可持续发展研究。E-mail:379821411@qq.com

Key words: Tongliao; agriculture and animal husbandry pattern; sustainable development; system dynamics

我国北方农牧交错地区是典型的生态过渡区,对我国中、东部生态安全发挥着重要的屏障作用^[1]。自20世纪80年代以来,以灌溉农业为标志的区域经济开发产生了一系列影响重大的水土资源与生态安全问题:农牧业发展失衡、地表水枯竭、地下水位下降、草原萎缩、沙地裸露,使这里成为风沙、扬尘等灾害天气的源头,直接威胁到我国广大北方地区的生态安全。水资源匮乏是约束农牧交错地区经济社会发展和生态安全的核心问题^[2],这主要是由于农牧交错地区大多采取农业优先的发展战略,重点扶持种植农业的发展,这种农业优先的发展战略在上世纪80年代国家优先发展粮食产业的背景下是无可厚非的。时至今日,灌溉农业过度地消耗了农牧交错地区大量宝贵的水资源,部分地区农业用水占水资源总量的85%以上,这直接影响到了二、三产业的用水保障,限制了二、三产业的发展。同时,过度的农业用水消耗挤占了生态环境用水,致使大多数农牧交错地区的生态环境恶化,生态问题日益严重^[3]。在这种背景下,如何确定农牧交错地区农牧发展格局,就成为确保水资源在农牧交错地区社会经济各部门内合理配置、保障地区的可持续发展的科学问题。

当前,农牧交错地区的可持续发展问题是学者们关注的重点,张军涛等^[4]通过农牧交错地区的阜新、通辽、赤峰等典型地进行研究,表明资源与环境状况是影响区域可持续发展的关键因素;许尔琪等^[5]以县域为单位评价了生态脆弱区土地可持续性;王晓君等^[6]模拟了农牧交错地区在不同经济政策的优化调控和生态建设的可持续发展情况,提出了轮牧生产为农牧交错地区有效的生态建设和经济增长手段;胡兵辉等^[7]、刘军会等^[8]对北方农牧交错区的可持续发展结构和发展战略进行了细致研究;金鑫^[9]对制约通辽市农牧交错地区农村可持续导致的因素进行了分析;刘海云等^[10]从生态退耕角度分析了农牧交错带耕地利用的可持续性。

通过综述研究发现,农牧交错地区的可持续发展问题受到众多学者的关注,但是目前学者们关注的重点主要集中在脆弱性、水资源、土地资源的影响以及可持续发展战略等方面研究,对影响农牧交错地区可持续发展的重要问题——农、牧用地比例关系方面涉猎较少。因此,本文选取通辽市作为研究农牧交错地区的典型案例地,主要研究通辽市社会经济在不同农、牧用地的比例下的发展状况,综合研

究适合通辽市可持续发展的农牧发展格局,这不但能够提升通辽市可持续发展能力,而且为广大农牧交错地区进行农牧用地配置、实现可持续发展提供可借鉴的理论和实践。

1 研究区域概况

通辽市位于内蒙古自治区东部,是内蒙古自治区东部和东北地区西部最大的交通枢纽城市(见图1),被自治区政府定位为省域副中心城市。通辽市属温带大陆性气候,年平均气温 $0\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $350\sim 400\text{ mm}$,蒸发量是降水量的5倍左右。近年来,受干旱气候影响,通辽境内辽河、新开河、教来河常年断流,70多座中小型水库干涸,局部地下水位下降,区域水资源呈现超采态势。

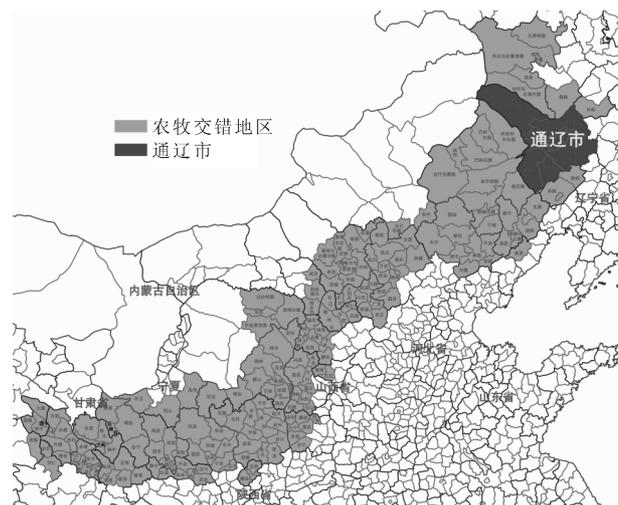


图1 通辽市在北方农牧交错区位置图
Fig. 1 The location of Tongliao in the north agro-pastoral transitional zone

通过对2001—2015年通辽市统计年鉴、2010—2015年通辽市水利公报进行分析,发现2014年通辽市的产业结构为 $14:58:28$,第一产业比重依然比较大,产业结构有待升级;通辽综合用水效率为 $63.6\text{ 元}/\text{m}^3$,其中农业用水效率为 $11\text{ 元}/\text{m}^3$,工业用水效率为 $410\text{ 元}/\text{m}^3$,均远低于国家平均水平;通辽市的水资源主要为地下水,既有资料表明目前通辽市地下水资源已呈超采状态,地下水生态环境已遭到不同程度的破坏。这说明通辽市社会经济系统目前的发展是一种不可持续的发展,其原因主要是农牧用地发展不均衡而导致水资源在一、二、三产业部门之间的分配不均衡。目前,通辽市农业用地与牧业用地的比例为 $1:2.39$,农业用地面积约为

11 260 km²,为保证如此规模种植农业的有效产量,通辽市水资源总量的 85%消耗于此,而其产值仅占 GDP 总量的 8%;第一产业的其它部门、第二、三产业等生产部门以及城乡生活部门共同分配其余 15%的水量,这种不均衡且效率低的水资源利用方式决定了通辽市未来社会经济系统运转中必然潜伏着危机。

2 研究方法

2.1 系统动力学方法

系统动力学^[11-12]方法在处理具有非线性、时变性、多重反馈等特点的“区域社会可持续发展”问题时具有独特的优势,与模糊评价法^[13]、主成分分析法^[14]、信息熵法^[15]等方法相比,系统动力学方法能够较好地反映系统内部各要素之间非线性的反馈关系。本文以农牧用地分配格局作为影响通辽市社会经济发展的重要条件,建立“水资源-社会经济系统”

的动态仿真模型,提出通辽市社会经济发展的“高农发展格局”、“偏农发展格局”、“低农发展格局”、“偏牧发展格局”、“高牧发展格局”等农牧发展格局,并对其进行系统动力学仿真研究,找寻最适合的通辽市社会经济可持续发展的农牧发展格局,为与通辽具有相似资源条件的广大农牧交错地区实现可持续发展提供理论依据。

2.2 系统动力学模型

本文以 Vensim DSS 为仿真平台,建立的通辽市社会经济系统动力学模型是一个由多个子系统构成的具有动态性、区域性、有限性等特点的复杂动态仿真系统,主要包括水资源支撑子系统、社会发展子系统、经济发展子系统、地下水生态环境子系统等,其中各子系统嵌套次级系统,如经济发展子系统中嵌套第一、二、三产业发展子系统,系统动力学仿真模型结构图详见图 2。

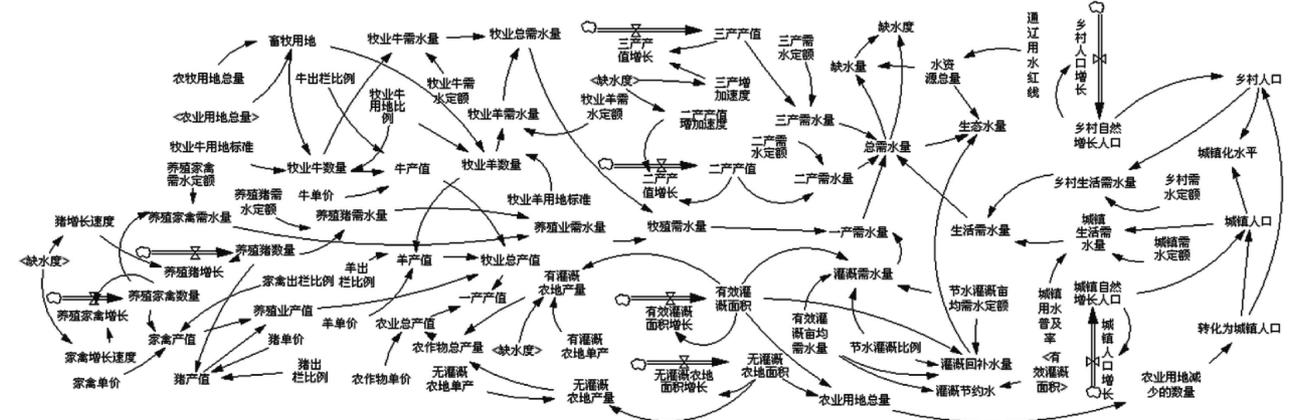


图 2 通辽市社会经济系统动力学模型
Fig. 2 Social economic system dynamics model of Tongliao

3 仿真及结果分析

3.1 情景方案设计

本文设计的通辽市社会经济发展农牧用地布局情景模式主要为“高农发展格局”、“偏农发展格局”、“低农发展格局”、“偏牧发展格局”、“高牧发展格局”。①高农发展格局:采取“优农抑牧”的发展战略,不断改造适宜种植的牧业用地,逐渐减少牧业发展用地,至 2030 年农业用地与牧业用地比例为 1:1;②偏农发展格局:采取“农牧兼顾、农业优先”的发展战略,适度将牧业用地改造为高产农田,至 2030 年农业用地与牧业用地比例为 1:3,这种发展格局也是当前通辽市采用的发展格局;③低农发展格局:采取“兼农兼牧”的发展战略,适当的将不适宜农业种植的用地逐渐“退耕还草”,至 2030 年农业用地与牧业用地比例为 1:5;④偏牧发展格局:采取“兼农优牧”的发展战略,大量的将不适于农业种植的旱作耕

地进行“退耕还草”,至 2030 年农业用地与牧业用地比例为 1:7;⑤高牧发展格局:采取“抑农优牧”的发展战略,大量的将不适于农业种植的旱作耕地以及部分低产的灌溉耕地进行“退耕还草”,至 2030 年农业用地与牧业用地比例为 1:9。

3.2 系统动力学仿真结果

通过运行系统动力学模型,分别得到通辽市社会经济系统 2013—2030 年间的城镇化率、GDP 总量、GDP 增速、产业结构、人均 GDP、总需水量、缺水度、用水综合效率、生态水量、生态环境用地占比、人均环境用地、人均生态水量等指标的仿真结果,其中表 1 给出 2030 年各指标的仿真结果,图 3 给出通辽市社会经济系统 5 种农牧用地布局 2013—2030 年的仿真趋势图。

仿真结果表明,社会发展状况的城镇化率指标从“高农发展格局”至“高牧发展格局”依次提高,由于“高农发展格局”采取了“优农抑牧”的发展战略,

使得农业劳动力大量增加,甚至出现了城镇化水平倒退的不合理现象,而“高牧发展模式”解放了大量农业劳动力,促进了城镇化水平的发展;代表经济发展水平的 GDP 总量、GDP 增速、产业结构、人均 GDP 等指标从“高农发展格局”至“高牧发展格局”依次提高,这主要是由于“高牧发展格局”的农业用水大幅度减少,将节约的水资源用于发展用水效率较高的第二、三产业,直接带动了通辽经济的发展;代表系统水资源支撑能力的总需水量、缺水度、用水综合效率等指标从“高农发展格局”至“高牧发展格

局”效果逐渐改善,其中由于“高农发展格局”超出通辽水资源的支撑能力范围,其总需水量、缺水度等指标远远高于其它用地格局;代表生态系统的生态水量、生态环境用地占比、人均环境用地、人均生态水量等指标从“低农发展格局”至“高牧发展格局”都呈现出微降趋势,但在 2024 年前后趋于稳定,说明这三种农牧发展格局虽然在发展经济过程中较少幅度的损害了生态环境质量,且逐渐趋于平稳和改善,较“偏农”和“高农”两种发展格局尤其是“高农”格局来说,是生态环境保护的较大进步。

表 1 通辽市社会经济系统动力学仿真结果表(2030 年)

Tab.1 The social and economic system dynamics simulation results of Tongliao (2030)

不同农牧发展格局	城镇化率/%	GDP 总量/亿元	GDP 增速/%	产业结构	人均 GDP/(万元/人)	总需水量/亿 m ³	缺水度/%	生态水量/亿 m ³	用水综合效率/(元/m ³)	生态环境用地占比/%	人均环境用地/(hm ² /人)	人均生态水量/(m ³ /人)
高农格局	19.0	333.9	3.8	13:56:31	9.5	55.7	44.2	-11.4	60.0	67.9	1.1	-323
偏农格局	54.8	425.9	5.3	10:56:34	12.1	34.9	11.1	8.5	122.0	83.9	1.4	241.4
低农格局	66.7	623.0	7.6	6:55:39	17.7	31.9	2.6	11.3	195.6	89.2	1.5	320.0
偏牧格局	72.7	761.0	8.9	5:54:41	21.6	31.0	0.2	12.0	245.1	91.9	1.6	339.0
高牧格局	76.3	910.3	10.1	4:53:43	25.8	32.0	3.1	10.9	284.2	93.5	1.6	308.6

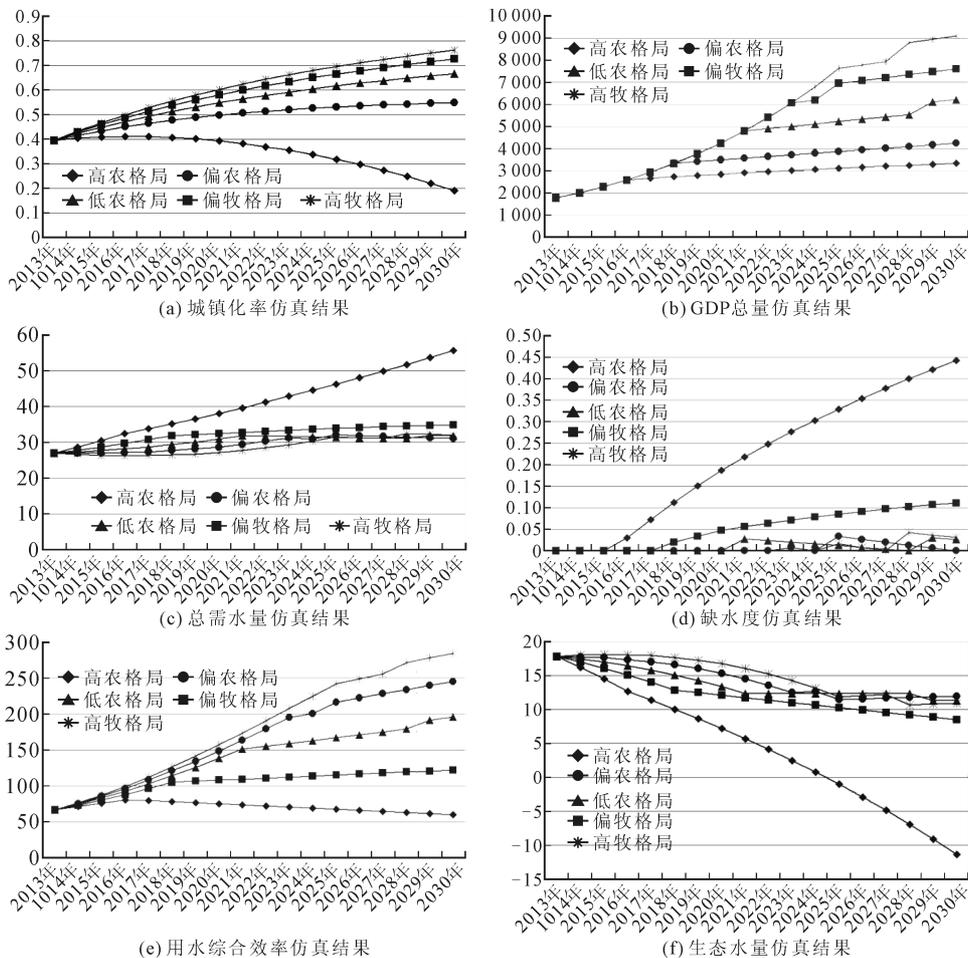


图 3 通辽市社会经济系统动力学仿真结果图

Fig.3 The social and economic system dynamics simulation results of Tongliao

3.3 方案优选

通过运行系统动力学模型,可得到“高农发展格

局”、“偏农发展格局”、“低农发展格局”、“偏牧发展格局”、“高牧发展格局”等 5 种农牧发展格局的仿真

结果,并通过遗传投影寻踪法对仿真结果进行优选^[16]。选定种群个数为1 000,交叉概率为0.5,变异概率为0.05,迭代次数为200次,投影方向的初值区间为[0,1],经过计算后,优化的目标函数最优值为4.987 6,各方案2030年的投影值: $Z_{(2030)} = (0.302\ 1, 0.319\ 4, 1.989\ 5, 2.434\ 7, 3.291\ 6)$,通过将2030年的投影值平均后得到各方案平均投影值为 $Z(i) = (0.333\ 25, 0.489\ 67, 2.185\ 72, 2.446\ 58, 3.600\ 14)$,由此得到各方案的优劣排序依次为:高农发展格局<偏农发展格局<低农发展格局<偏牧发展格局<高牧发展格局,故理想的模式为高牧发展格局。但是综合考虑到通辽市社会经济系统中,种植业在一定阶段内还占有重要的地位和作用、第二产业和第三产业发展基础薄弱,采取高牧发展格局过多地削弱种植业、过快发展第二、第三产业不符合通辽市的社会经济发展现实,故建议选择比较缓和的低农发展格局。由于低农发展格局的城镇化率、GDP增速、产业结构、总用水效率、生态用水量、人均GDP、人均生态用地等指标比较符合目前我国社会经济大环境,有实现的可能;兼顾未来的发展,通辽市在中远期可采取偏牧发展格局。本文推荐通辽市近期采取低农发展格局,中远期采取偏牧发展格局。

4 结 论

1) 农牧发展格局是影响农牧交错地区可持续发展的重要因素。通过通辽市研究案例表明,不同的农牧发展格局对水资源匮乏的通辽市的可持续发展有巨大影响,通过调整农、牧用地的增减,形成适宜的农牧发展格局,是通辽市实现可持续发展的重要途径。

2) 通辽市当前的农牧发展格局不能支撑未来的可持续发展。通过系统动力学仿真结果表明,偏农发展格局(即通辽市当前农牧发展格局)在社会发展、经济增长、水资源支撑、生态环境等各方面均表现出不可持续的发展趋势,说明通辽市当前的农牧发展格局不能支撑未来的可持续发展。

3) 通辽市实现可持续发展必然要改变当前的农牧发展格局。通过系统动力学仿真和方案优选发现,高牧的发展格局是通辽市未来可选择的最优农牧发展格局,但是考虑到通辽市当前的经济技术条件,不适于过大幅度的改变发展农牧关系,应当循序渐进,在近期采取低农的发展格局,中远期向偏牧发展格局过渡,逐渐改善不可持续的状态。

4) 丰富了北方农牧交错地区的可持续发展的理论和实践。通辽市是北方农牧交错地区的典型代表,通过对通辽市农牧发展格局的仿真研究,得出

“高农发展格局”、“偏农发展格局”、“低农发展格局”、“偏牧发展格局”、“高牧发展格局”等农牧发展格局对通辽市可持续发展的影响效果,可为农牧交错地区实现可持续发展提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 刘洪来,王艺萌,窦潇,等. 农牧交错带研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4420-4425.
LIU Honglai, WANG Yimeng, DOU Xiao, et al. Progress and perspective of agro-pasturage ecotone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4420-4425.
- [2] 薛建明. “人-地”关系可持续的理性思考 [J]. 生产力研究, 2007, (22): 3-5.
- [3] 刘明. 农业产业化: 理论依据与可持续发展分析 [J]. 生产力研究, 2015, (5): 38-45.
- [4] 张军涛,傅小锋. 东北农牧交错生态脆弱区可持续发展研究 [J]. 中国人口资源与环境, 2005, 15(5): 58-62.
ZHANG Juntao, FU Xiaofeng. Research on the sustainable development of the vulnerable eco-regions [J]. China Population Resources and Environment, 2005, 15(5): 58-62.
- [5] 许尔琪,张红旗. 中国生态脆弱区土地可持续利用评价研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(3): 1-6.
XU Erqi, ZHANG Hongqi. Research on the evaluation of land use sustainability in ecologically fragile region in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2012, 33(3): 1-6.
- [6] 王晓君,周立华,石敏俊. 农牧交错带沙漠化逆转区禁牧政策下农村经济可持续发展研究——以宁夏盐池县为例 [J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2166-2173.
WANG Xiaojun, ZHOU Lihua, SHI Minjun. Sustainable development of a rural economy under grazing prohibition in a desertification control region and agro-pastoral transitional zone [J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2166-2173.
- [7] 胡兵辉,廖允成,王克勤,等. 北方农牧交错带县域典型农业生态系统结构的对比演变 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 35-39.
HU Binghui, LIAO Yuncheng, WANG Keqin, et al. The comparison and evolution of agroecosystem structure in representative counties of the farming-pastoral ecotones in north China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(2): 35-39.
- [8] 刘军会,高吉喜,韩永伟,等. 北方农牧交错带可持续发展战略与对策 [J]. 中国发展, 2008, 8(2): 89-94.
LIU Huijun, GAO Jixi, HAN Yongwei, et al. Strategy and countermeasure for sustainable development northern agriculture-pasturage ecotone [J]. China Development, 2008, 8(2): 89-94.
- [9] 金鑫. 农牧交错生态脆弱区农村可持续发展制约因素分析——以通辽市为例 [J]. 前沿, 2013, (22): 77-79.
- [10] 刘海云,李志远. 从退耕还林政策与土地征用政策之比较论退耕还林政策的可持续性 [J]. 生产力研究,

- 2007,(7): 27-29.
- [11] 王西琴, 高伟, 曾勇. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1352-1360.
WANG Xiqin, GAO Wei, ZENG Yong. Methods and case study on water ecological carrying capacity using SD model [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(5): 1352-1360.
- [12] MARTIN DE W, Douglas J C. Improved decision-making on irrigation farming in arid zones using a system dynamics model [J]. South African Journal of Science, 2013, 109(11-12): 78-85.
- [13] 邢军, 孙立波. 基于因子分析与模糊综合评判方法的水资源承载力评价 [J]. 节水灌溉, 2014,(4): 52-55.
XING Jun, SUN Libo. Evaluation of water resources carrying capacity based on factor analysis and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Water Saving Irrigation, 2014(4): 52-55.
- [14] 桓颖, 张文静, 王楠. 基于主成分分析的吉林西部地区农业水资源承载力评价 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(9): 11-16.
HENG Ying, ZHANG Wenjing, WANG Nan. Assessment of the carrying capacity of agricultural water resources in western region of Jilin based on principal component analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(9): 11-16.
- [15] 刘晓君, 付汉良. 基于变权信息熵改进 TOPSIS 法的水资源承载力评价——以陕西省地级城市为例 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 187-191.
LIU Xiaojun, FU Hanliang. Evaluation on water resources carrying capacity based on varibale-weight and entropy-weight methods with improved TOPSIS—A case study of prefecture cities in Shaanxi province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 187-191.
- [16] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(责任编辑 王绪迪)

(上接第 269 页)

- [21] WALLIN K. Master curve analysis of the “Euro” fracture toughness dataset [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(4): 451-481.
- [22] 姜凯华, 刘长军, 李培宁. 直接由 $K_{IC}/K_{IA} \sim (T-RT-NDT)$ 的实测数据统计分析反应堆压力容器用钢断裂韧性值的概率分布 [J]. 压力容器, 2012, 29(3): 6-11.
JIANG Kaihua, LIU Changjun, LI Peining. Statistical analysis of the probability distribution of the fracture toughness value of reactor pressure vessel using directly measured data from $K_{IC}/K_{IA} \sim (T-RT-NDT)$ [J]. Pressure Vessel, 2012, 29(3): 6-11.
- [23] DOCTOR S R, SCHUSTER G J, SIMONEN F A. Density and distribution of fabrication flaws in the Shoreham reactor vessel [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3995: 512-522.
- [24] CRONVALLO, SIMOLA K, MÄNNISTÖ I, et al. A study on the effect of flaw detection probability assumptions on risk reduction achieved by non-destructive inspection [J]. Reliability Engineering System Safety, 2012, 105(6): 90-96.
- [25] 贡金鑫, 陈晓宝, 赵国藩. 结构可靠度计算的 Gauss-Hermite 积分方法 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11): 1625-1629.
GONG Jinxin, CHEN Xiaobao, ZHAO Guofan. Gauss-Hermite integral method for structural reliability calculation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(11): 1625-1629.
- [26] 张凯, 李刚. 基于改进降维法的可靠度分析 [J]. 计算力学学报, 2011, 28(2): 187-192.
ZHANG Kai, LI Gang. Reliability analysis based on improved reduced dimension method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(2): 187-192.
- [27] GUPTA S, MANOHAR C S. An improved response surface method for the determination of failure probability and importance measures [J]. Structural Safety, 2004, 26(2): 123-139.
- [28] ZHAO Y G, ONO T. A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM) [J]. Structural Safety, 1999, 21(2): 95-112.
- [29] RAHMAN S, XU H. A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 393-408.
- [30] BUCHER C, MOST T. A comparison of approximate response functions in structural reliability analysis [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2008, 23(2): 154-163.
- [31] CHEN G, DAI S. Study on the reliability assessment methodology for pressure vessels containing defects [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 1996, 69(3): 273-277.
- [32] SONG S, LU Z, QIAO H. Subset simulation for structural reliability sensitivity analysis [J]. Reliability Engineering System Safety, 2009, 94(2): 658-665.
- [33] RUBINSTEIN R Y. Simulation and the Monte-Carlo method [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
(责任编辑 周 蓓)