

中国北方农牧交错区水资源承载力动态仿真研究

——以内蒙古通辽市科尔沁区为例

徐冬平^{1,2,3}, 赵波⁴, 李同昇¹, 杨军辉⁵, 朱记伟^{2,3}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 西安理工大学 教务处, 陕西 西安 710048; 5. 西安外国语大学 旅游学院, 陕西 西安 710128)

摘要: [目的] 分析农牧交错区水资源承载力的动态变化规律, 为同类地区的可持续发展提供有益的理论参考。[方法] 以内蒙古自治区通辽市科尔沁区作为农牧交错区典型案例地, 运用系统动力学方法, 建立科尔沁区有限水资源支撑下的“社会—经济—生态”协同发展的仿真模型, 并根据农牧交错地区以及科尔沁区社会经济发展的特点, 提出区域“社会—经济—生态”协同发展的自然增长模式、第一产业现代化模式、第二产业主导模式、第三产业引领模式、循环经济发展模式这 5 种理论模式。[结果] 在系统动力学仿真的基础上, 运用遗传投影寻踪法对仿真结果进行优选, 认为循环经济发展模式是水资源承载力最优的发展模式。[结论] (1) 合理调配农、牧比例关系是节约农牧交错地区有限水资源的关键举措; (2) 农牧交错地区致力发展传统产业或将陷入水资源匮乏的窘境; (3) 发展循环经济是提高农牧交错地区水资源承载力的有效途径; (4) 全面开展农牧交错区的水资源承载力研究是增强区域可持续发展能力的保障。

关键词: 农牧交错区; 水资源; 承载力; 动态仿真; 科尔沁区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0262-08

中图分类号: K901, TV211.1

文献参数: 徐冬平, 李同昇, 赵波, 等: 中国北方农牧交错区水资源承载力动态仿真研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 262-269. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 046; Xu Dongping, Zhao Bo, Li Tongsheng, et al. Dynamic simulation of carrying capacity of water resources in agro-pastoral ecotone in Northern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 262-269. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 01. 046

Dynamic Simulation of Carrying Capacity of Water Resources in Agro-pastoral Ecotone in Northern China

—A Case Study at Horqin District, Tongliao City in Inner Mongolia

XU Dongping^{1,2,3}, ZHAO Bo⁴, LI Tongsheng¹, YANG Junhui⁵, ZHU Jiwei^{2,3}

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in the Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 4. Academic Affairs Office, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 5. School of Tourism, Xi'an International Studies University, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The dynamic changes of water resource carrying capacity in agro-pastoral ecotone is analyzed, which will provide a theoretical reference for the sustainable development of the similar areas. [Methods] The study selects the Horqin District, Tongliao City in Inner Mongolia as a case study area, which is characterized with typical characteristics of agro-pastoral ecotone. Through the method of system dynamics simulation, we established the system dynamic model for the coordinated development of “society-economy-ecology” based on the limited water resources in Horqin District. Meanwhile, according to the char-

收稿日期: 2016-05-26

修回日期: 2016-06-07

资助项目: 水利部公益项目“半干旱区水循环与水生态安全关键技术研究”(201501031); 国家自然科学基金项目“面向生态城市的水土资源利用格局变化机制及适应性调控研究”(51479160)

第一作者: 徐冬平(1978—), 男(汉族), 吉林省松原市人, 博士研究生, 副教授, 主要从事区域规划与循环经济研究。E-mail: 379821411@qq.com.

通讯作者: 李同昇(1960—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事经济地理与区域发展研究。E-mail: leetang@nwu.edu.cn.

acteristics of agro-pastoral ecotone and social economic development in Horqin District, five theoretical models of regional “society-economy-ecology” coordinated development were put forward, including natural growth model, primary industry-modernization model, secondary industry-dominated model, tertiary industry-led model and recycling economic development model. [Results] On the basis of system dynamic simulation, we used genetic projection pursuit method to optimize the simulation results, and found that the recycling economic development model was the model with optimal water resources carrying capacity. [Conclusion] (1) The proper arrangement of agricultural and pastoral proportion is a key to saving limited water resources in agro-pastoral ecotone; (2) The development of traditional industries in agro-pastoral ecotone would cause water resources scarcity; (3) Recycling economy is an effective way to improve the carrying capacity of water resources in agro-pastoral ecotone; (4) The increasing investment on researches on the carrying capacity of water resources in agro-pastoral ecotone will help to provide the support for regional sustainable development.

Keywords: agro-pastoral transitional zone; water resources; carrying capacity; dynamic simulation; Horqin District

水资源的承载能力关系到地区和谐、稳定的发展,历来受到众多学者的关注。进入 21 世纪以来,随着地区经济社会快速发展,水资源迅速成为影响区域可持续发展的重要战略资源,尤其在北方水资源匮乏地区地区,水资源决定着地方发展的未来。

自 20 世纪 80 年代施雅风提出水资源承载力概念以来,中国学者针对这一问题进行了大量的探索。21 世纪初期,关于水资源承载力的研究主要集中在宏观尺度,并取得了丰硕的研究成果,夏军等^[1]利用区域水循环模拟探索了区域水资源承载力的量化研究方法;徐中民等^[2-3]利用多目标情景分析模型,对黑河流域水资源承载力进行了研究;王浩等^[4]建立了水资源承载力的指标体系、边界条件以及计算流程,探究了西北内陆干旱区水资源承载能力;闵庆文等^[5]从水资源生态系统管理视角出发,提出水资源生态安全理论,并以西北地区为例研究了水资源安全与生态系统的互动机制,刘佳骏等^[6]对中国水资源承载力进行了综合评价研究,上述成果为水资源承载力的进一步研究奠定了坚实的理论基础。近年来大量学者在宏观尺度研究的基础上,逐步在中观尺度上开展了关于水资源承载力的实证研究,卜楠楠等^[7]开展了省域范围的水资源承载力研究;董雯等^[8]、曾浩等^[9]等开展了流域区域的水资源承载力研究。曾现进等^[10]、陈威等^[11]、宰松梅等^[12]、马峰等^[13]开展了市域水资源承载力研究;田静宜等^[14]、马金珠等^[15]开展了干旱地区的水资源承载力研究。

纵观众多的研究成果,关于中国北方农牧交错地区水资源承载力的研究成果较少。中国北方农牧交错地区地理位置特殊,属于干旱地区向湿润地区过渡地带,水资源匮乏,生态环境敏感,近年的多起环境事件(如沙尘暴)均与农牧交错区过度开发水资源而引起

的环境破坏有着较大干系。长期以来中国北方农牧交错区过度开发农业生产,“积极”的承担起粮食生产基地的功能,这不仅消耗了大量的宝贵水资源,而且造成了农牧比例关系失衡,这种过分消耗有限水资源的生产方式,不但会降低其水资源固有的承载能力,并且为由破坏性开发水资源而引发的生态灾难埋下了隐患。

本文拟基于农牧交错地区农、牧业交杂发展的社会背景下,研究有限水资源的合理承载能力,描述水资源与社会经济发展之间的互动关系,优化水资源的配置结构,揭示水资源约束下的区域发展的动态过程,对促进区域高质量可持续发展显得尤为重要。本文拟构建农牧交错地区系统动力学仿真模型,并以内蒙古自治区通辽市科尔沁区为例,分析农牧交错区水资源承载力的动态变化规律,为同类地区的可持续发展提供有益的理论参考。

1 研究区概况

通辽市科尔沁区地处内蒙古自治区东部,位于北纬 $43^{\circ}22'$ — $43^{\circ}58'$,东经 $121^{\circ}42'$ — $123^{\circ}02'$,行政区域面积为 $3\,212\text{ km}^2$,2013 年总人口为 75.63 万人。目前,科尔沁区水资源总量为 $9.0 \times 10^8\text{ m}^3$,可利用水资源总量为 $6.5 \times 10^8\text{ m}^3$,可利用水资源在各生产部门的配置极不均衡,农业生产用水占 72%,二、三产业及生活用水部门分用余下水量,由于农业生产效率低下且占用水资源比例较多,导致目前科尔沁区水资源的承载力水平较低,2014 年单方水资源仅承载 91.15 元产值,仅为发达国家的 1/20 左右。

通过将科尔沁区与北方农牧交错地区进行对比(表 1),发现二者社会经济发展状况具有极大的相似性,虽然科区第二产业增长速度略高于北方农牧交错

区的平均水平,但是二者社会经济综合发展水平大致相仿,科尔沁区能够作为北方农牧交错地区的典型地区,具有研究的代表性。深入研究科尔沁区水资源承

载能力,可为北方农牧交错地区提高水资源承载力、涵养水源、保护生态环境、促进经济社会的可持续发展,提供有益的理论 and 实践依据。

表 1 科尔沁区与北方农牧交错区社会经济发展对比

区域	人口密度/ (人·km ⁻²)	城镇化率/ %	人均 GDP (万元/人)	产业结构	二产增 长速度/ %	农业用 水比例/ %	农业用 水效率/ (元·m ⁻³)	总用水 效率/ (元·m ⁻³)	生态用 水比例/ %
科尔沁区	235	44	6.58	10:61:29	11.2	72	11.2	82.4	34
北方农牧交错区	121	39	2.54	13:59:28	8.5	76	9.8	67.5	32

2 研究方法

2.1 系统动力学方法

系统动力学^[16-17]方法在处理具有非线性、时变性、多重反馈等特点的“资源承载—社会发展”问题时具有独特的优势,与信息熵法^[18]、模糊评价法^[19]、主成分分析法^[20]等方法相比,系统动力学方法能够较好地反映经济、社会、生态等子系统及其构成要素之间非线性的反馈关系,模拟不同发展情景下的需水诉求。本文以水资源作为承载农牧交错地区经济社会发展的制约性资源条件,建立“水资源—社会经济系统”的动态响应关系^[21],提出农牧交错区经济发展的“自然增长模式”、“第一产业现代化”、“第二产业主导模式”、“第三产业引领模式”、“循环经济模式”等模式,找寻最适合的农牧交错地区水资源条件的经济发展模式,为广大农牧交错地区在有限水资源条件下实现可持续发展提供理论依据。

2.2 研究边界

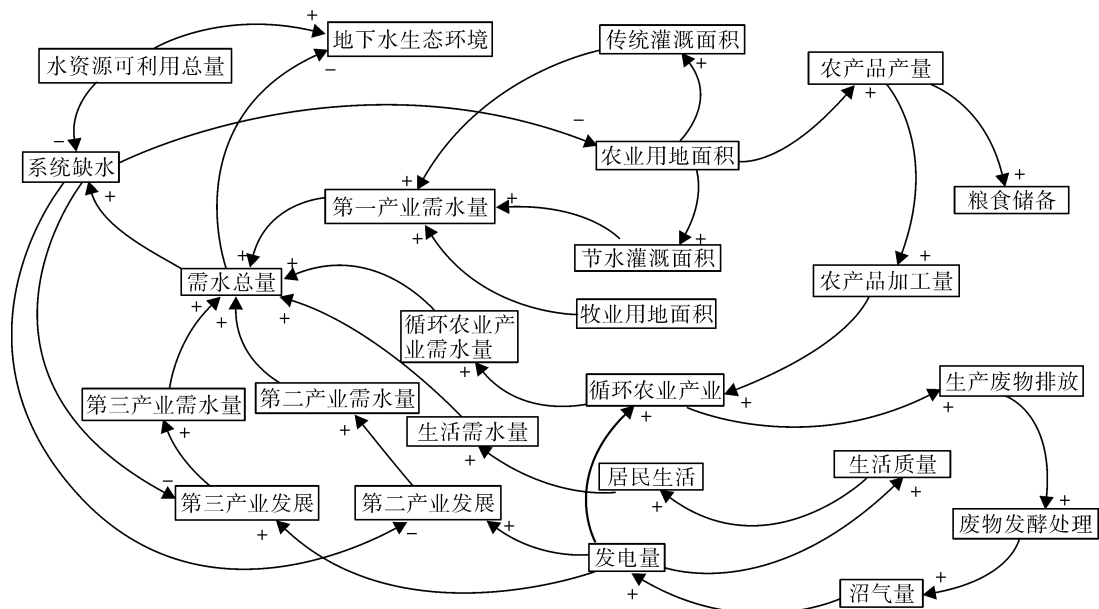
本文以 2014 年为现状年,建立通辽科尔沁区水

资源承载力的系统动力学仿真模型,模拟科尔沁区的 2014—2030 年的水资源承载力状况以及社会经济系统的运行状态,模型主要包括水资源供给子系统、社会经济发展子系统、循环经济发展子系统、地下水生态环境子系统。

系统动力学建模所需的数据资料包括水资源供给资料、社会经济运行数据、地下水环境资料等,所需数据主要来源为通辽市统计年鉴(2005—2015)、通辽水利公报(2010—2015)以及作者在通辽市调研期间获得的第一手资料。

2.3 系统动力学模型

本文以 Vensim DSS 为仿真平台,建立了农牧交错地区的系统动力学仿真模型,主要利用第一、二、三产业用水反馈回路、生活用水反馈回路以及循环产业用水反馈回路等 5 条主要的反馈回路刻画了模型的系统关系。第一、二、三产业用水反馈回路见图 1,系统动力学模型图如图 2 所示。囿于篇幅关系,本文以第一产业用水反馈回路为例,阐明系统动力学反馈回路关系。



注:“+”表示正反馈关系;“-”表示负反馈关系。

图 1 农牧交错区水资源承载力系统动力学因果关系

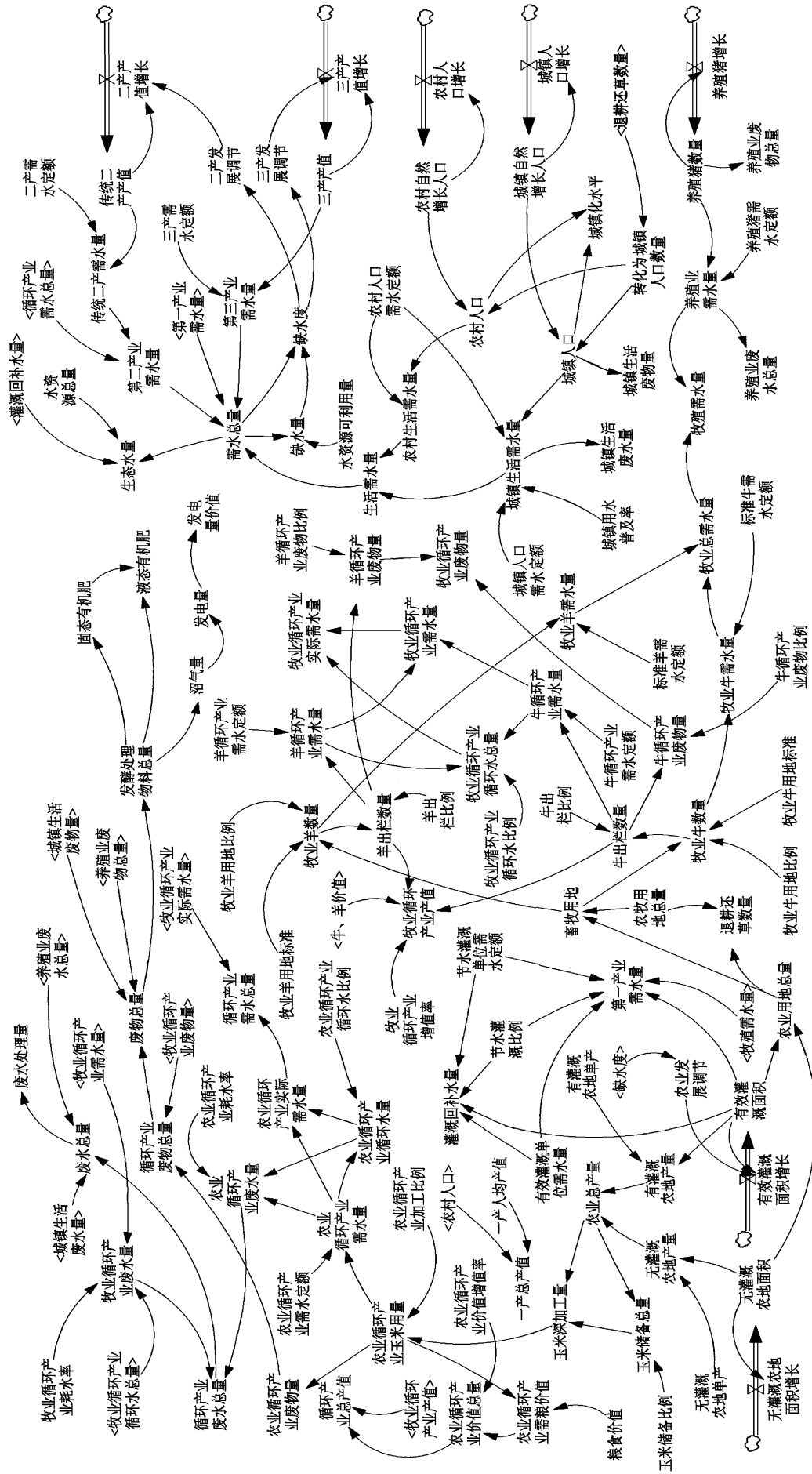


图 2 农牧交错区水资源承载力系统动力学模型

第一产业用水反馈回路包涵的因果关系如下:

- ① 农业用地面积⁺→农产品产量⁺→农产品加工量⁺→循环农业产业⁺→循环农业产业需水⁺→总需水量⁺→系统缺水⁺→第一产业发展调节⁻→农业用地面积; ② 农业用地面积⁺→农产品产量⁺→粮食产量; ③ 农业用地面积⁺→节水灌溉面积(传统灌溉面积)⁺→农业需水量⁺→需水总量⁺→系统缺水⁺→农业发展调节⁻→农业用地面积; ④ 农业用地面积⁺→节水灌溉面积(传统灌溉面积)⁺→农业需水量⁺→需水总量⁻→地下水生态环境。

2.5 模型检验

系统动力学模型建成后需要对其可靠性进行检验,目前系统动力学模型可靠性的检验方法大概有

12种^[22],目前比较常用的方法包括敏感性系数法、极端情景检测、量纲一致性检测、结构行为检测、历史数据检验,本研究采用敏感系数法对模型进行双重有效性检验,以验证模型的可靠性。

选择城镇人口增长速度、有效灌溉面积增速、二产增长速度、养殖猪增长率、节水灌溉农地比例、城镇用水普及率、有效灌溉单位需水量、农、牧业用地之比等变量作为输入参数,选择城镇化水率、GDP 总量、需水量、缺水度、总用水效率、生态用水量等指标作为输出变量,对模型进行敏感性检验,结果见表 2。结果显示 8 项重要的指标对输出的变量灵敏度最大为 0.638 2,平均小于 0.2,认为模型比较稳定,可以用来进行仿真模拟和情景分析。

表 2 科尔沁区水资源承载力系统动力学模型灵敏度检验结果

变量	城镇化率	GDP 总量	需水量	缺水度	总用水效率	生态用水量	平均值
城镇人口增长速度	0.638 2	0.089 2	0.025 7	0.003 2	0.005 4	0.000 8	0.127 1
有效灌溉面积增速	0.009 8	0.021 4	0.362 4	0.418 0	0.002 4	0.154 3	0.161 4
二产增长速度	0.263 1	0.430 2	0.014 5	0.300 1	0.041 5	0.002 8	0.175 4
养殖猪增长率	0	0.001 1	0.000 2	0	0.000 4	0	0.000 3
节水灌溉农地比例	0.000 8	0.005 1	0.047 1	0.006 7	0.000 3	0.023 1	0.013 9
城镇用水普及率	0.092 0	0	0.000 3	0.000 9	0	0.001 0	0.015 7
有效灌溉单位需水量 ^①	0	0	0.092 1	0.081 3	0.009 9	0.000 9	0.030 7
农、牧业用地之比	0	0.003 9	0.061 0	0.012 0	0.124 0	0.004 9	0.034 3

注:①有效灌溉单位需水量中单位采用公顷为计量单位。

3 仿真研究

3.1 情景方案设计

本文设计的情景发展模式主要为自然增长模式、第一产业现代化、第二产业主导模式、第三产业引领模式、循环经济发展模式,其中前 4 种模式属传统发展模式。

(1) 自然增长模式。任何地区社会经济的发展都保持着一定程度的稳定状态,这种稳定状态一般称为自然增长状态。本文利用 2005—2010 年的科尔沁区社会经济的历史数据,采取灰色模型预测的方法、回归分析法、指数平滑法等建立各指标基于历史数据的趋势关系,这些指标主要分为 4 大类,主要包括社会发展类指标、经济发展类指标、生态环境类指标以及水资源支撑类指标,将各指标按照历史趋势确定的量化关系输入系统动力学模型,系统模拟行为表达的结果即为科尔沁区自然发展状态的仿真结果。

(2) 第一产业现代化。科尔沁区的第一产业部门发展属于重要的发展部门,以种、养殖业发展为主,

2014 年第一产业产值占总 GDP 的 9.66%,用水量占可利用水量 70.99%,用水效率极低,说明水资源对农业生产的承载力水平较低^[23]。本文响应十八届五中全会关于加快农业现代化的发展理念,提出科尔沁区第一产业现代化的发展模式,即在自然增长模式的基础上,加大对农业发展的扶持力度,保持农业耕地面积匀速增长,大力发展现代化农业,提高节水农业的面积比例,至 2020 年全部完成农业灌溉的节水改造,这对节约农业生产用水^[24],进而改善科尔沁农牧交错地区的地下水生态环境具有重要的意义。

(3) 第二产业主导模式。以工业为主体的第二产业部门在科区经济社会发展中具有举足轻重的地位,其 2014 年总产值占 GDP 总量为 61.27%,用水量占总供水量 19.92%,用水效率为第一产业部门的 22.6 倍。为保证第二产业的主导地位,本文提出第二产业主导的发展模式^[25],即在自然增长模式的基础上,稳步加大对工业发展部门的扶持力度,提高其用水保证率和固定资产投资保证率,提高其增长速度。第二产业主导模式确立了第二产业重点发展地

位,将削弱对第一产业部门用水及投资保证,促使部分低效灌溉耕地转化为牧业用地。由于牧业生产不需要大量抽取地下水进行灌溉,这在一定程度上缓解了地下水环境的生态压力。

(4) 第三产业引领模式。以服务业为主导的第三产业部门是科区经济社会发展可持续发展的有力保障,其 2014 年总产值占 GDP 总量为 29.07%,用水量仅占总供水量 1.92%,目前是科区社会发展用水效率最高的生产部门。本文在自然发展模式的基础上,提出第三产业引领模式来实现科区水资源匮乏条件下的可持续发展。由于第三产业发展的水资源高效率特性,可在促进经济社会稳定发展的同时,减少大量水资源的消耗,这对降低地下水生态环境压力大有裨益。

(5) 循环经济发展模式。目前,循环经济在通辽科尔沁区的社会经济发展过程中还属于新兴事物,本文借鉴发达地区的发展经验,认为在水资源缺乏的区发展循环经济产业必将会起到带动经济发展、促进社

会进步、提高水资源效率、降低水资源消耗、改善生态环境等一系列的良性效应。囿于科尔沁区资源条件的限制,发展循环经济应立足于资源条件相对丰足的玉米循环产业、农牧循环产业等,以科尔沁玉米为原材料的循环产业为例,如玉米→玉米淀粉淀粉→变性淀粉→酶制品→其他系类衍生产品,玉米秸秆→木质素→纤维素→醇类其他系类衍生产品,玉米芯→糠醛→糠醇→纺织、塑料、军工、航天等系列衍生产品。按照国内外发展循环经济的成果经验,建设科区循环产业部门会延长农业部门产业链条,促进工业部门内部协调发展,实现废物循环利用,提高区域资源承载力,促进科尔沁区的可持续发展。

3.2 仿真结果优选

分别运行上述 5 种发展模式的系统动力学模型,得到科尔沁区水资源承载力 2014—2030 年的仿真结果。表 3 列出 2020 年和 2030 年 2 个特征年的仿真结果。为避免主观遴选的影响,本文选取遗传投影寻踪法对仿真结果进行优选。

表 3 科尔沁区水资源承载力系统动力学仿真结果

发展模式	2020 年仿真结果					2030 年仿真结果				
	自增模式	一现模式	二主模式	三引模式	循经模式	自增模式	一现模式	二主模式	三引模式	循经模式
总人口/万人	82.6	82.6	82.6	82.6	82.6	89.8	89.8	89.8	89.8	89.8
城镇化率/%	51	45	55	56	61	56	51	63	65	71
GDP 总量/亿元	1005	1027	1028	988	1328	2144	2035	2361	2302	2560
人均生产总值(万元/人)	12.2	12.4	12.4	12.0	16.1	23.9	22.7	26.3	25.6	28.5
一产产值/亿元	108	134	113	111	109	173	237	186	181	118
二产产值/亿元	567	554	577	560	898	1224	1054	1367	1136	1618
三产产值/亿元	338	338	338	316	320	775	744	808	985	822
需水总量/ $10^8 m^3$	7.04	8.23	6.83	6.83	6.77	8.93	11.2	9.04	8.42	7.22
一产需水量/ $10^8 m^3$	4.29	5.53	4.03	4.10	3.78	3.47	6.41	2.99	3.13	2.58
二产需水量/ $10^8 m^3$	2.29	2.24	2.33	2.26	2.48	4.65	4.01	5.19	4.32	3.47
三产需水量/ $10^8 m^3$	0.25	0.25	0.25	0.23	0.28	0.50	0.48	0.53	0.64	0.82
生态用水量/ $10^8 m^3$	3.33	2.27	3.52	3.53	3.56	1.19	-0.96	1.06	1.68	2.86
总用水效率/(元· m^{-3})	143	125	150	145	196	240	182	261	273	354
缺水度/%	0	8.9	0	0	0	16	33	17	11	0

注:自增模式:自然增长模式;一现模式:第一产业现代化;二主模式:第二产业主导模式;三引模式:第三产业引领模式;循经模式:循环经济发展模式。

本文利用 Matlab 完成上述 5 种方案的遗传投影寻踪的计算分析,选定种群个数为 1000,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 5.897 2,各方案 2020,2030 年的投影值: $Z_{2020} = (0.367 5, 0.342 2, 2.003 1, 2.415 1, 3.462 7)$,

$Z_{2030} = (0.348 1, 0.332 9, 2.121 8, 2.332 4, 3.598 7)$,通过将 2020 年和 2030 年的投影值平均后得到各方案平均投影值为 $Z(i) = (0.357 8, 0.337 55, 2.062 45, 2.373 75, 3.526 2)$ 由此得到各方案的优劣排序依次为:循环经济发展模式>第三产业引领模式>第二产业主导模式>自然增长模式>第一产业现代化,

故推荐模式为循环经济发展模式。

循环经济发展模式下,2030年科尔沁区水资源承载的总人口为89.8万人,城镇化水平为71%,人均生产总值为28.5万元/人,GDP总量为2560亿元,GDP平均增速为9.0%,产业结构为5:63:32。达到上述经济社会发展状况的水资源需求量为 $7.22 \times 10^8 \text{ m}^3$,用水效率为354元/ m^3 。由于循环经济发展模式的用水效率较高,至2030年,科尔沁区水资源供需基本平衡,并没有出现用水缺口,生态用水量也得到了良好的保证。

4 结论

(1) 合理调配农、牧比例关系是节约农牧交错地区有限水资源的关键举措。研究在第一产业现代化、自然增长模式、第二产业主导模式、第三产业引领模式和循环经济发展模式这5种理论模式中依次降低农业用地在社会经济系统中的比例,结果表明虽然农业生产总值在不同程度上降低,但是系统整体的用水效率明显提高,系统的缺水程度有所改善,生态用水也得到有效的补充。这说明在水资源缺乏的农牧交错地区合理降低低效率的农业生产用水比例,是节约地区水资源、提高水资源效率、改善水生态环境的关键举措。

(2) 农牧交错地区致力发展传统产业或将陷入水资源匮乏的窘境。在本文建立的4种传统发展模式,虽然第二产业主导模式和第三产业引领模式的社会经济发展状态较优,但是从整体看,这2种发展模式已经逐渐陷入水资源无以为继的困境,主要表现为第二产业主导模式和第三产业引领模式分别在2025和2026年首次出现缺水的现象,且呈不断扩大趋势,至2030年分别为17%和11%,这将影响社会经济发展的速度和水平。在既有可利用水资源无法满足发展情况下,区域发展往往采取不断挤占生态用水量的不当方式来弥补水资源的不足,必然会导致脆弱的水生态环境发生不可逆转的改变,这种改变或许会是引发农牧交错区生态灾难的开端。因此,在农牧交错地区如果继续大力发展传统产业,而不能大幅度提高水资源的承载质量,将致使区域“社会—经济—生态”复合系统陷入水资源匮乏的窘境。

(3) 发展循环经济是提高农牧交错地区水资源承载力的有效途径。通过对科尔沁区的案例研究表明,在保证率75%的水平年里,循环经济模式下的水资源承载力数量(GDP总量、GDP增速等、生态用水量等)明显高于其它发展模式,且水资源承载质量独树一帜,主要表现为水资源利用效率高出30%~

90%,区域城镇化率高出5%~20%,以及区域发展始终保持不缺水的状态,这是区域水资源承载力水平不断提高和可持续发展能力不断增强的集中体现。因此,发展循环经济是未来实现农牧交错地区实现可持续发展的重要策略。

(4) 全面开展农牧交错区的水资源承载力研究是增强区域可持续发展能力的保障。农牧交错地区水资源承载力的全面研究涉及农牧关系、产业升级、水源地保护以及水生态等方面,涉及面广、问题独特、关系复杂,全面开展研究难度比较大。本文抛砖引玉的研究了提高科尔沁区的水资源承载力的基本问题,主要研究了农牧关系、产业升级和水生态环境问题,但在水环境承载力问题(如污染物排放、水环境容量方面)上还有不足,这是由于农牧地区水环境问题复杂,需要进行更大范围的科研协作和更多学者的通力合作。因此,系统地、全面的开展农牧交错地区的水资源承载力的研究是今后一段时期内需要研究的重要内容。

[参 考 文 献]

- [1] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量—水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [2] 徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土,1999,21(2):99-106.
- [3] 徐中民,程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2000,36(2):122-132.
- [4] 王浩,秦大庸,王建华,等. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J]. 自然资源学报,2004,19(2):151-159.
- [5] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3):14-16.
- [6] 刘佳骏,董锁,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258-269.
- [7] 卜楠楠,唐德善,尹笋. 基于AHP法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J]. 水电能源科学,2012,30(3):42-44,41.
- [8] 董雯,刘志辉. 艾比湖流域水资源承载力综合评价[J]. 干旱区地理,2010,33(2):217-223.
- [9] 曾浩,张中旺,孙小舟. 湖北汉江流域水资源承载力研究[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(4):22-25,30.
- [10] 曾现进,李天宏,温晓玲. 基于AHP和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术,2013,36(6):200-205.
- [11] 陈威,周毓. 基于系统动力学仿真模拟评价武汉市水资源承载力[J]. 中国工程科学,2014,16(3):103-107,112.
- [12] 宰松梅,温季,仵峰,等. 河南省新乡市水资源承载力评价研究[J]. 水利学报,2011,42(7):783-788.

- [13] 马峰,王千,蔺文静,等.基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价:以石家庄为例[J].南水北调与水利科技,2012,10(3):62-66.
- [14] 田静宜,王新军.基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究:以甘肃民勤县为例[J].复旦学报:自然科学版,2013,52(1):86-93.
- [15] 马金珠,李相虎,贾新颜.干旱区水资源承载力多目标层次评价[J].干旱区研究,2005,22(1):11-16.
- [16] 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):1352-1359.
- [17] De Wit M, Crookes D J. Improved decision-making on irrigation farming in arid zones using a system dynamics model[J]. South African Journal of Science, 2013, 109(11/12):1-8.
- [18] 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[J].水土保持通报,2015,35(6):34-39.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 陈红蕾,彭开丽,刘超琼,等.基于脱钩理论的建设占用耕地与经济发展关系研究[J].水土保持通报,2016,36(4):333-338.
- [22] 约翰·D·斯特曼.商务动态分析方法:对复杂世界的系统思考与建模[M].朱岩,钟永光,译.北京:清华大学出版社,2008.
- [23] 孙乌仁·图雅,苏根成,迟文峰.农牧交错带耕地数量变化对粮食产量影响的时空关联性[J].水土保持通报,2016,36(3):186-192.
- [24] 高军波,刘彦随,张永显.1990—2012年淮河流域粮食生产的时空演进及驱动机制[J].水土保持通报,2016,36(3):179-185.
- [25] 嵇莹,杨倩,林爱文,等.江汉平原水土资源结构与产能时空分异特征[J].水土保持通报,2016,36(2):320-25.

(上接第 247 页)

[参 考 文 献]

- [1] 钟敦伦,谢洪,韦方强,等.长江上游泥石流综合危险度区划[M].上海:上海科学技术出版社,2010:10-40.
- [2] 胡桂胜,陈宁生,王元欢,等.金沙江白鹤滩水电站坝址施工区泥石流易发性与危险区初步分析[J].地球与环境,2014,42(5):652-657.
- [3] 贺拿,陈宁生,曾梅,等.白鹤滩水电站坝址近场区泥石流临界雨量研究[J].水利学报,2015,46(2):239-248.
- [4] 胡凯衡,葛永刚,崔鹏,等.对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J].山地学报,2010,28(5):628-634.
- [5] 苏鹏程,韦方强,冯汉中,等.“8·13”四川清平群发性泥石流灾害成因及其影响[J].山地学报,2011,29(3):337-347.
- [6] 王兆印,漆力健,王旭昭.消能结构防治泥石流研究:以文家沟为例[J].水利学报,2012,43(3):253-263.
- [7] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards[J]. Natural Hazards, 2011,56(1):19-36.
- [8] 陈晓清,崔鹏,游勇,等.汶川地震区大型泥石流工程防治体系规划方法探索[J].水利学报,2013,44(5):586-594.
- [9] 王念秦,韩波,庞琦,等.泥石流防治工程效果后评价初探[J].工程地质,2015,23(2):219-227.
- [10] 贺拿,陈宁生,朱云华,等.矮子沟泥石流影响因素及运动参数分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):12-16.
- [11] 陈宁生,杨成林,周伟,等.泥石流勘查技术[M].北京:科学出版社,2011:55-60.
- [12] 贾世涛,崔鹏,陈晓清,等.拦沙坝调节泥石流拦挡与输移性能的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2338-2346.
- [13] 连惠邦,柴钊武,柯志宗.梳子坝对土石流之防治效率[J].水土保持研究,2001,8(1):52-59.
- [14] 陈宁生,周海波,卢阳,等.西南山区泥石流防治工程效益浅析[J].成都理工大学学报:自然科学版,2013,40(1):50-59.