中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于SD的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选——以天津市为例

韩成吉，张雪花，滑永胜

引用本文:
韩成吉, 张雪花, 滑永胜. 基于SD的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选——以天津市为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 391–404.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180661

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄骅市未利用地开发适宜性分区研究

Regionalization of suitable development of unutilized lands in Huanghua City

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 604–615 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170583

基于生态位理论的厦门市耕地数量演变及驱动力研究

Evolution and driving forces of cultivated land quantity in Xiamen City using niche theory

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 941–950 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181032

天山北坡经济带宜耕未利用地开发潜力分区及评价——以新疆阜康市为例

Evaluation of potential of unused land exploitation in Northern Tianshan Mountain Economic Belt— A case study of Fukang City

中国生态农业学报. 2016, 24(6): 819–828 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151169

粮食安全视角下的环京津地区耕地生态补偿量化研究

Quantitative study on cultivated land ecological compensation in the area around Beijing and Tianjin from the perspective of grain security

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1052–1059 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161080

基于二分类Logistic回归模型的太行山丘陵区县域耕地资源潜力估算

Estimation of arable land resources potential in hilly area of Taihang Mountain based on binary Logistic regression model

中国生态农业学报. 2017, 25(4): 490–497 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160778

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 3 月 第 27 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2019, 27(3): 391−404

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180661

韩成吉, 张雪花, 滑永胜. 基于 SD 的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选——以天津市为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 391−404

HAN C J, ZHANG X H, HUA Y S. Development of strategies for joint allocation of cultivated land and ecological land in Tianjin based on system dynamics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 391−404

基于 SD 的耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选*

——以天津市为例

韩成吉[1,2], 张雪花[1**], 滑永胜[1]

(1. 天津工业大学环境经济研究所 天津 300387; 2. 中国农业科学院农业经济与发展研究所 北京 100081)

摘 要: 以复杂系统模拟为手段, 以生态与经济双赢为目标, 进行耕地与生态用地的联合调配策略的设计、仿真与优选, 旨在通过两种土地的合理调配, 在保障粮食安全前提下, 以生态修复促超负荷耕地休养。在人口、经济、耕地和生态用地各子系统及其要素分析的基础上, 以耕地污染严重、后备用地紧缺、地处《全国主体功能区规划》中的优化开发区域——天津市为例, 建立耕地与生态用地联合调配的系统动力学模型(Tianjin System Dynamic, TSD)并进行有效性检验。结果显示, 模型具有较好的稳定性, 而且仿真值与实际值误差<5%, 因此模型有效。在确定模型有效之后, 应用 TSD 模型模拟不同策略下的天津市 2016—2025 年耕地与生态用地联合调配结果。本文设置了两种与系统惯性发展相比较的调配策略——耕地资源省域内调配策略和耕地资源跨省域调配策略, 并对上述 3 种情景分别进行仿真。结果显示: 1)按当前的惯性趋势发展, 2025 年受损耕地可以得到修复, 耕地数量能够满足耕地红线要求, 生态安全也能够得到保障, 但是耕地产出压力会突破警戒阈值, 因此存在潜在的粮食危机; 2)耕地与生态用地省内调配情景下, 虽然可以降低耕地的产出压力, 但生态安全有所减损, 而且耕地产出压力仍高于警戒阈值; 3)允许耕地跨省域调配情景下, 耕地产出压力可以降低到警戒值之下, 而且生态安全能够得到更好的保障。比较 3 种仿真结果可知, 允许耕地跨省域占补情景下的耕地与生态用地联合调配效果最好, 可以使耕地与生态用地联合调配更灵活, 更好地保障生态安全和粮食安全。以上说明本文所构建的 TSD 模型进行耕地与生态用地联合调配研究是有效的, 一方面可以为耕地与生态用地联合调配策略的优选提供支撑, 另一方面为后备耕地紧缺的优化开发地区确定跨省域占补数量提供科学依据。

关键词: 耕地; 生态用地; 土地修复; 系统动力学; 调配策略; 天津市

中图分类号: F301.21; N941.3; X196 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)03-0391-14

Development of strategies for joint allocation of cultivated land and ecological land in Tianjin based on system dynamics*

HAN Chengji[1,2], ZHANG Xuehua[1**], HUA Yongsheng[1]

(1. Department of Environmental Economics, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Tianjin was prioritized as a functional development region in China, but its cultivated land is seriously polluted and ex-

* 国家社会科学基金项目(18BJY079)和天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5038)资助

** 通信作者: 张雪花, 主要研究方向为资源环境经济与农业生态系统。E-mail: xuehua671231@163.com
韩成吉, 主要研究方向为农业资源与环境经济。E-mail: chengji_han@sina.com

收稿日期: 2018-07-13 接受日期: 2018-10-22

* This study was supported by the National Social Science Foundation of China (18BJY079) and the Training Plan for Innovation Teams in Tianjin Colleges and Universities (TD13-5038).

** Corresponding author, E-mail: xuehua671231@163.com

Received Jul. 13, 2018; accepted Oct. 22, 2018

hausted. This study adopted complex systems modeling to develop a land allocation strategy that allows food production to be secured and land recuperated in Tianjin, where is an optimum development area in the National Main Functional Areas Planning with seriously polluted cultivated land and scarcely reserved land resources. Upon analyzing the subsystems of population, economy, and cultivated land and ecological land, a restoration model, named Tianjin System Dynamics (TSD), was developed to optimize joint allocation of cultivated land and ecological land. Validity test showed that the model had a good stability and the prediction error was < 5%. The model was then used to simulate land allocation between cultivated land and ecological land from 2016 to 2025 for Tianjin under the following strategies: inertial, in-provincial allocation, and inter-provincial allocation of cultivated land resources. The analysis showed that, with the current practice, damaged cultivated land could still be repaired, but only by 2025. Cultivated land could then still be maintained above the red line minimum, and the land ecology could still be preserved. However, food production might not be secured, as the productivity of cultivated land would be pressed to drop to the threshold. The in-provincial allocation of cultivated land resources would alleviate the pressure on cultivated land while still maintaining production above the threshold, but the ecological security of the land would be impaired, the output pressure of cultivated land still be higher than the warning threshold. In contrast, the scenario of the inter-provincial allocation of cultivated land resources could minimize land pressure to below the warning value, and improve land ecological security as a result of its flexibility. The TSD model developed optimized allocation between cultivated land and ecological land for Tianjin, and could be used for land restoration planning for other regions that are lacking in land reserve.

Keywords: Cultivated land; Ecological land; Land restoration; System dynamics; Allocation strategy; Tianjin City

我国城镇化的推进给耕地资源带来了巨大的压力[1]，导致耕地数量和质量都面临着严重的下滑问题，人口密集的经济发达地区尤其如此。据统计，我国耕地退化面积占耕地总面积的 40%以上[2]，退耕转生(耕地退出转为生态用地)是提高耕地自我修复能力的关键切入点[3]，也是维护地区生态安全的重要举措。由于我国人口数量长期处于稳中有增态势，退耕转生有可能影响到农民生计[4]、基本农田保护[5]甚至粮食安全[6-7]，如何更好地协调生态安全与粮食安全的问题，成为政府和学者共同关注的热点。国内外学者从耕地和生态用地规划及退耕转生方面进行深入研究。

耕地规划方面，刘莉等[8]应用多目标规划方法研究丘陵区耕地优化配置问题，目标设计较为周全，涉及经济、社会和环境效益等多个方面，但其约束条件设定均为绝对量，这种设计方式很难反映耕地的真实需求。龚媛等[9]以常州市为例，以人均粮食需求量作为耕地需求量判定的基准开展研究。然而，有些地区并不具备产粮优势，我国的粮食供给政策并非区域内自给自足，而是全国一盘棋制度，因此以人均粮食需求量为硬约束来确定耕地资源需求量的作法过于片面。洪鸿加等[10]以长沙市为研究对象，应用系统动力学方法(SD，System Dynamics)进行耕地发展趋势的预测，并利用多目标规划模型进行耕地资源的优化配置，但其预测时段过短(仅 3 年)，也没有考虑跨区域调配的情况。此外，高星等[11]和方婷婷等[12]从占补平衡的角度测算不同地区后备土地资源用于耕地开发的适宜规模。但也有学者对占补平衡的方法提出质疑，他们认为这种方法没有考虑区域间经济和资源禀赋的差异[13-14]。

生态用地规划方面，曲艺等[15]和张颖等[16]采用碳氧平衡方法进行规划水平年区域生态用地量测算，但其中固碳释氧系数只是参考平均经验值，因此测算结果的准确性有待完善。此外也有学者[17-19]依据生态绿当量的概念，确定最优的生态用地规模。

退耕转生方面，杨波等[20]和白玮等[21]遵循“以粮为纲”和区域内调配的既定模式，分别以人均最低粮食消费量和最小人均耕地面积为硬约束，测算生态退耕区的退耕转生规模。事实上，退耕转生是一个涉及经济、社会和资源环境的复杂系统，仅以粮食需求为约束来探讨可控变量对退耕转生系统的作用过于片面。

我国是个缺水国家，人均水资源量不足世界平均水平的 1/4，而且有许多地区低于全国的平均水平。自 20 世纪 50 年代，我国这些缺水地区就已开始污灌，污水灌溉导致的土壤污染形势严峻。2014 年的《全国土壤污染状况调查公报》显示，在调查的 55 个污水灌溉区中，有 39 个存在土壤污染。如何使受损土地得到有效修复，为社会经济发展提供可持续支撑，已成为这类地区土地系统合理开发利用所面临的主要矛盾之一。

受耕地红线的约束，为了实现耕地保有量平衡，有些地区不得不采用人工介入为主的方式进行受损耕地修复，成本高，后效性差。2017 年底，国土资源部发布了《关于改进管理方式切实落实耕地占补平衡的通知》，对耕地占补平衡有了新的政策和安排，明确提出要建立以数量为基础、产能为核心的占补

新机制。2018 年 3 月, 国务院办公厅颁布了《跨省域补充耕地国家统筹管理办法》, 明确提出允许耕地不足的省域通过补偿跨省域补充耕地资金的形式, 占用耕地富足省域的耕地指标。新办法的出台使受损耕地修复方式增加了一个新的选项, 也更加灵活。如何在新增选项后有序而且高效地实现受损耕地的修复, 是当前急需解决的问题。

面对新的形势, 本文以现有研究为基础, 运用系统动力学分析与模拟方法, 尝试在以下几个方面进行突破: 首先, 在研究视角上, 弥补大多数既有文献仅从单一要素出发(如粮食需求)设置土地规划硬约束的不足, 从系统全局研究耕地与生态用地调配, 将耕地系统、生态用地系统和社会经济系统纳入一个分析框架。这一研究特别适合于东部经济优先发展区, 因为这类地区没有粮食生产的比较优势, 仅以粮食需求为约束确定耕地面积既不符合经济原则, 也不符合生态原则。第二, 在研究模式上, 弥补既有研究大多局限于区域内部调配的僵硬模式的不足, 依据《跨省域补充耕地国家统筹管理办法》精神, 开展跨区域耕地占补情景下的生态用地与耕地联合调配研究, 以更好地体现区域间经济差异和资源禀赋的差异。

系统动力学(SD)是系统科学的一个分支, 是由麻省理工大学 Forrester 教授在 1956 年提出的一种系统仿真方法, 发展至今它已经成为一门跨越自然科学和社会科学的交叉学科。系统动力学对研究对象的理解来源于系统行为与内在机制之间的关联, 并通过数学建模、模型改善和模拟运行逐步挖掘导致系统状态变量发生变化的因果[22], 预测其发展趋势。系统动力学模型作为一种综合的仿真模型, 已较为广泛地应用于土地利用研究, 主要从 3 个方向进行: 1)对某个地区或城市土地利用结构的仿真[23-25], 为合理利用土地和制定科学的管理方案提供决策支持, 但目前这类研究较多关注土地的集约利用和城镇化建设, 对于粮食安全约束和生态安全对生态用地的需求考虑不周[26-27]; 2)对地区土地整治的仿真[28-30], 预估土地整治后的经济效益、社会效益和土地质量, 目前这类研究较多关注实施效果的评价, 而对生态效应评价涉及较少, 也没有将评价结果应用于土地规划和联合调配决策中[31-32]; 3)对于退耕转生的动态进行仿真[33-34], 这类研究较多从自然立地条件的角度, 模拟不同立地类型退耕还林的适宜模式, 而从联合调配和系统整体视角开展的研究并不多见[35]。虽然上述研究存在不足, 但都从不同角度为耕地与生态用地联合调配的系统动力学模型构建提供了借鉴和方法学支持。

本文以系统学方法为基础, 应用计算机仿真技术, 将人口、经济、耕地和生态用地 4 个子系统整合为一个耕地与生态用地联合调配系统, 并以耕地污染严重、后备用地紧缺和地处《全国主体功能区规划》中的优化开发区域——天津市为研究区域, 通过系统仿真, 分析耕地与生态用地之间的交互影响和可能的调控, 预判不同情景的调控效果, 一方面为耕地与生态用地联合调配策略的优选提供支撑, 另一方面为东部经济优先发展区的跨省域占补数量的确定提供科学依据。

1　研究区概况及数据来源

1.1　研究区概况

天津市下辖 16 个区, 地处华北平原地区的东北部, 在海河流域下游, 是环渤海湾的中心城市, 其地理坐标为 116°43′~118°04′E, 38°34′~40°15′N, 陆域面积 1.19 万 km^2。其年平均气温 11.3~12.8 ℃, 年平均降水量 520~660 mm, 年日照时数为 2 500~2 900 h, 热量条件可满足作物两年 3 熟的需要。

天津市土壤形成多为河流沉积物, 质地黏重, 有不同程度的盐碱化, 大部分土壤含盐量在 0.2%~0.4%, 最高可达 4.7%[36], 且土壤肥力差, 地力评价等级在 7~10 等。此外, 天津市水资源也极度稀缺。在紧张的缺水情势下, 早年农业采用污灌, 导致近 1/3 的耕地资源被污染[37], 而且为了保证粮食产量, 稳定种植面积, 被污染的土地得不到及时修复。

与相邻地区相比, 天津市耕地资源紧缺, 可供开垦的后备资源严重不足。天津市现有耕地 44 万 hm^2, 较规划 2020 年的耕地保有线仅多 0.2 万 hm^2, 且可供开垦的未利用土地接近枯竭。截止到 2016 年, 天津市未利用土地仅存 165 km^2, 占全市总面积的 7%; 而与之相邻的北京市未利用土地存量为 2 215 km^2, 占北京面积的 12%; 河北省存量为 39 670 km^2, 占河北总面积的 21%。此外, 天津市在《全国主体功能区规划》中被列为优化开发区, 其人口密度和经济密度在我国大陆各省份中排名前三, 人均 GDP 更是占居首位。相对较差的自然条件和高密度高强度的社会经济开发现状, 使得天津不具备产粮优势, 且受损耕地又亟待修复, 需要进行粮食安全与生态安全双控的耕地与生态用地联合调配。

1.2　数据来源

本文建立的耕地与生态用地联合调配系统动力学

(SD)模型涉及人口结构、农业投入产出、耕地规模和生态用地规模等, 数据来源于天津市 2006—2017 年统计年鉴、中国科学院中国农业资源信息系统、农业农村部农作物数据库和自然资源部土地调查成果共享应用服务平台等。

2 研究方法

2.1 调配门槛设置

调配门槛设置对调配策略研究很重要, 本文从土地负荷、耕地压力指数和生态绿当量 3 个方面进行调配门槛的设置考量。

2.1.1 土地负荷

关于土地负荷, 粮食单产是衡量耕地是否超负荷的最简明的评判标准。根据农业农村部耕地地力等级划分标准, 结合天津市的实际情况, 雷平[38]认为当粮食单产小于 7~10 级地力平均产出标准时, 应退减耕地, 转为生态修复; 生态修复后, 当粮食单产能够大于平均产出标准时, 可以重新作为整理复垦开发补充耕地。

按照 NY/T309—1996 标准, 天津市地力评价等级为 7~10 级, 对应平均产量水平为 3.8 $t\cdot hm^{-2}$, 当粮食单产小于该产量水平时, 应退耕还生; 当土地肥力恢复自然生产能力, 即产量水平大于该产出标准, 可以作为复垦补充耕地。

2.1.2 耕地压力指数

耕地压力指数也是评判粮食安全与否的重要指标之一, 通常认为[39-40]该指数小于 1(实际人均耕地面积大于最小人均耕地面积)时处于粮食安全状态, 可以进一步推进生态退耕, 而大于 1(实际人均耕地面积小于最小人均耕地面积)时应警惕粮食危机, 缩减退耕规模。也有学者提出[41], 耕地压力应根据不同地区的经济结构和土地利用结构分区划分耕地的压力警戒阈值, 东部城市化、工业化地区以 2.0 为警戒值, 而中部粮食主产区及西部人均耕地资源丰富地区以 1.0 为警戒值较为适合。耕地压力指数计算公式如下:

$$K=S_{\min}/S_{\mathrm{a}}=[\beta\times G/(P\times Q\times k)]/S_{\mathrm{a}} \tag{1}$$

式中: K 为耕地压力指数, $S_{\min}$ 为最小人均耕地面积($hm^2\cdot$人$^{-1}$), S_{a} 为实际人均耕地面积, β 为粮食自给率(%), G 为人均粮食需求量($t\cdot$人$^{-1}$), P 为粮食单产($t\cdot hm^{-2}$), Q 为粮食播种面积占农作物面积比重(%), k 为复种指数(%)。

考虑到天津市位于“东部建设占用—农业结构调整”双重压力地带[42], 以及天津市农业占比较小的经济结构特征, 本文取 2.0 作为粮食安全的警戒值, 即耕地压力指数小于 2 为粮食安全, 大于 2 有潜在的粮食危机。

2.1.3 生态绿当量

除耕地压力指数之外, 还可以用生态绿当量作为确保生态安全的评判标准, 大于 1 意味着满足生态标准, 小于 1 则意味着绿当量不足以承载人类活动, 生态退耕和整理复垦补充规模需进一步调整[43]。设区域土地总面积为 $S_{总}$, 区域最佳林地覆盖率为 R, 按最佳林地覆盖率要求的区域林地面积为 $S_{林}$, 区域实际林地面积为 $S_{实}$, i 类生态用地的面积为 S_i, 绿当量为 g_i(其中, 林地为 1, 水域及湿地 0.83, 草地为 0.71), 则生态绿当量计算过程如下。

1)确定区域最佳林地覆盖率:

$$R=(P\times S_i)/(W\times S_{总})\times 100\% \tag{2}$$

式中: P 为一年内日最大降水量($t\cdot hm^{-2}$), S_i 为生态用地面积(hm^2), W 为林地土壤单位面积饱和蓄水能力($t\cdot hm^{-2}$)。

2)计算最佳林地覆盖率 R 要求下的林地面积, 设其对应的绿当量为 1, 则有:

$$S_{林}=S_{总}\times R \tag{3}$$

3)计算区域实际林地的生态绿当量($x_{林}$):

$$x_{林}=S_{实}/S_{林} \tag{4}$$

4)计算得到区域总绿当量(x):

$$x=x_{林}+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{S_i\times g_i}{S_{林}}\times 100\%\right) \tag{5}$$

计算出总绿当量的结果, 通过比较总绿当量和 1 的大小, 衡量生态用地是否满足要求, 即生态绿当量大于 1 为生态安全, 小于 1 为生态危机。

2.2 系统模型构建

2.2.1 建模目的、模型边界与假设

利用系统动力学方法, 在粮食安全与生态安全双控的视角下, 建立天津市耕地与生态用地联合调配系统动力学模型, 仿真不同情景下的耕地与生态用地调配结果, 探寻耕地与生态用地的交互关系以及优化策略。

模型的空间边界为天津市, 时间跨度为 2006—2025 年, 其中 2016 年为基期年, 时间步长为 1 年。主要历史数据时段为 2006—2016 年, 数据内容包括影响生态退耕规模的人口结构、经济状况、耕地规模和生态用地规模等。

合理的假设可以简化模型, 以突出主要研究问题。针对本研究的内容与目标, 提出如下假设: 1)耕地不具备生态服务功能, 因为在耕作生产过程中, 为了使作物更好地生长, 必须不断地施肥、施药, 结

果使土壤板结, 地力下降, 流入水体后对水资源产生严重污染, 严重破坏了自然生态系统正常的食物链, 产生严重的生态负作用, 所以假设耕地不具备生态服务功能; 2)假设建设用地面积不变(在没有约束的情况下, 建设用地会不断扩张, 因此这种假设在没有政策规制的情况下是很难实现的), 耕地越多, 生态用地就越少, 不合理的耕地利用方式会导致耕地质量下降, 影响粮食安全和生态安全, 同时《全国主体功能区规划》也为这一假设提供了现实支持, 《规划》确定的重要目标就是优化空间结构, 对国土开发强度(<3.91%)、城市空间(<1.065×10^5 km^2)、农村居民点占地(<1.6×10^5 km^2)和建设用地占用耕地等(<3×10^4 km^2)都做出了约束。

本研究根据天津市历史统计数据以及未来发展方向, 确定模型的参数, 并运用 Vensim-PLE 软件进行系统仿真。仿真目标: 1)模拟天津市 2016—2025 年耕地与生态用地联合调配系统主要变量动态变化趋势; 2)调节模型的决策变量, 进行政策模拟, 预测不同政策情景对生态规模变化的影响。

2.2.2　系统结构分析

耕地与生态用地联合调配系统主要由人口子系统、经济子系统、耕地子系统以及生态用地子系统组成。各子系统之间以及子系统内部要素之间存在相互联系, 子系统之间的主要关系如图 1 所示。

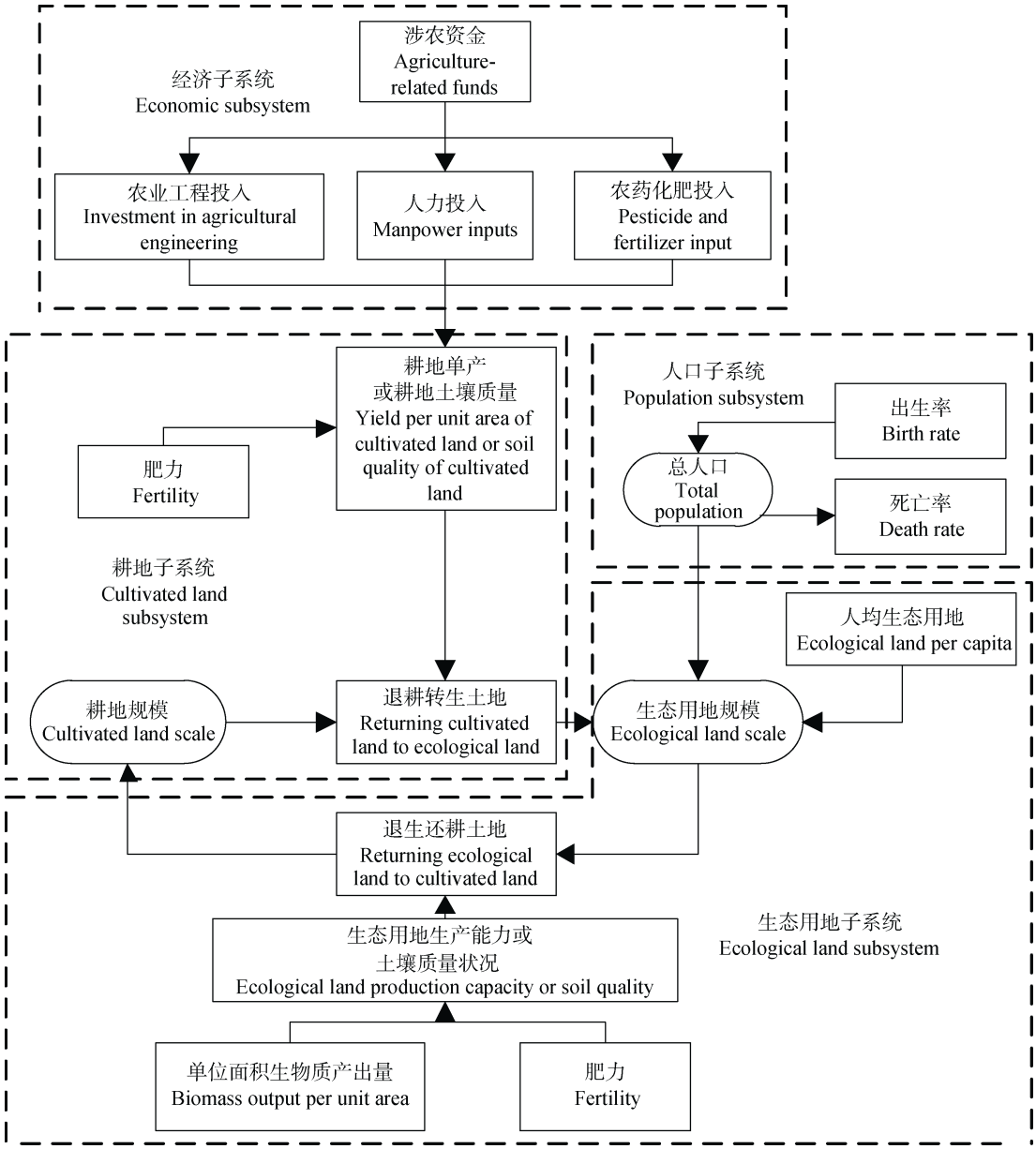

图 1　耕地与生态用地联合调配系统的各子系统相互关系图

Fig. 1　Relationship among subsystems of the joint allocation system of cultivated land and ecological land

2.2.3 模型建立与模拟

本文根据系统结构、反馈机制以及反馈回路，构建描述耕地与生态用地联合调配系统的相关方程，采用逻辑函数、经验系数法、线性回归法、表函数法等确定模型参数值，并建立系统流程图。运用 Vensim-PLE，不断调整修正耕地与生态用地联合调配系统动力学模型，使模拟结果接近天津市的社会经济现状。之后，通过改变模型中决策变量的值，进行多情景方案的天津市耕地与生态用地联合调配仿真模拟。

2.3 耕地与生态用地联合调配系统动力学(TSD)模型

在耕地与生态用地联合调配的系统动力学模型中，主要是描述人口结构、农业经济产出、耕地规模及生态用地规模的内在联系，进而模拟未来生态退耕的发展趋势及相互间的动态变化。因此，在进行耕地与生态用地联合调配动态仿真时，将系统划分为人口、经济、耕地和生态用地四大子系统。其系统整体因果关系如图 2 所示。

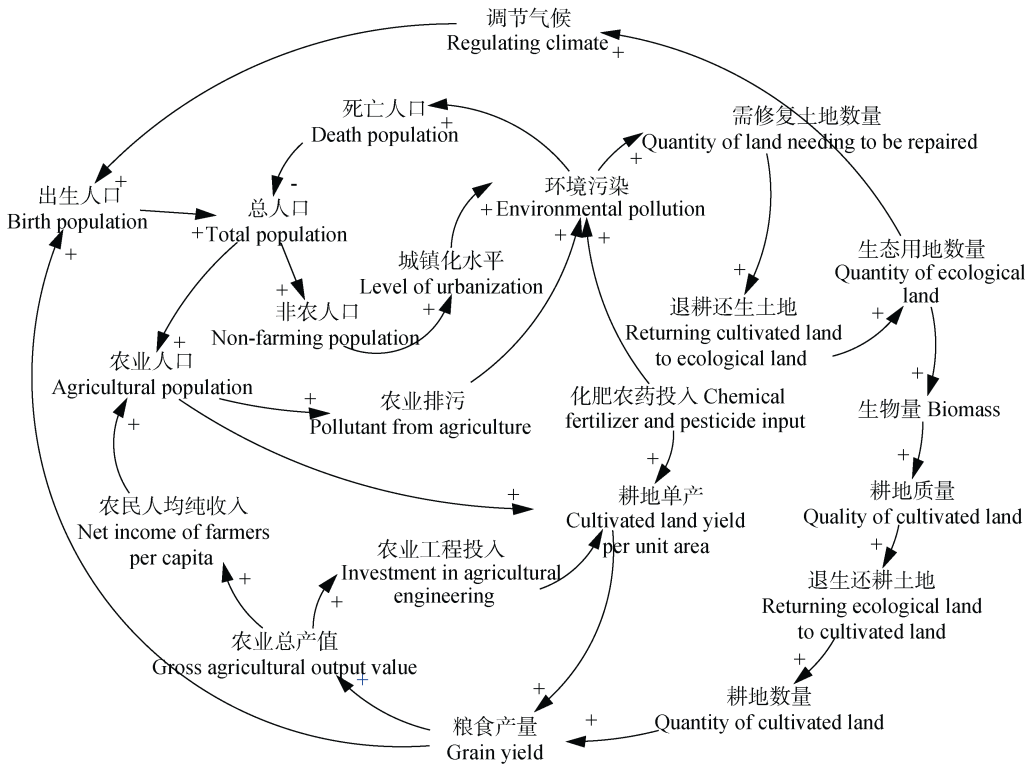

图 2 天津市耕地与生态用地联合调配系统(TSD)的系统因果关系图

Fig. 2 System causality diagram of joint allocation system of cultivated land and ecological land of Tianjin (TSD)

+表示正效应, –表示负效应。+ shows positive effect, – shows negative effect.

模型主要因果关系有：1)总人口增加→非农人口增加→城镇化水平推进→污染加剧→死亡人口增多→总人口减少；2)总人口增加→农业人口增加→农业排污增多→污染加剧→死亡人口增多→总人口减少；3)人口增加→人类活动→污染加剧→需修复耕地数量增加→生态用地数量增加→耕地质量提高→耕地数量增加→粮食产量提高→人口增加；4)人口增加→人类活动→污染加剧→需修复耕地数量增加→生态用地数量增加→调节气候→人口增加；5)农业人口增加→投入劳动力导致单产增加→农业总产值增加→农民收入增加→吸引更多农业人口；6)农业总产值增加→农业工程投入增加→粮食单产增加→农业总产值增加。其中 1)和 2)为负反馈回路，3)、4)、5)和 6)为正反馈回路。正反馈回路的作用是使回路中的变量偏离增强，而负反馈回路的作用则力图使控制变量趋于稳定[44]。

系统动力学模型的存量流量图通过数学方程将各个子系统以及子系统内部因素有机结合起来，将研究对象置于系统之中，使得研究结果准确率更高。本文通过对因果关系图的适当拓展与延伸，得到图 3 所示的耕地与生态用地联合调配系统的存量流量图。限于篇幅，列出部分主要模型系统方程：

总人口=INTEG[(出生人口+机械增长人口–死亡人口)×生态宜居决定系数,1 075×POWER(10, 4)] (6)

生态宜居决定系数=IF THEN ELSE(生态绿当量≥1, 10.37, 0.9) (7)

生态绿当量(Dmnl)=林地/{[1 923×(林地+水域及湿

地+草地)]/(2 500×119 170)×119 170}+(水域及湿地×0.83)/{[1 923×(林地+水域及湿地+草地)]/(2 500×119 170)×119 170}+(草地×0.71)/[1 923×(林地+水域及湿地+草地)]/(2 500×119 170)×119 170}　(8)

退耕转生土地(hm^2)=需修复耕地×粮食安全决定系数×生态安全决定系数×耕地产出决定系数　(9)

粮食安全决定系数=IF THEN ELSE(耕地压力指数≥2, 0.9 , 1)　(10)

耕地压力指数(Dmnl)=最小人均耕地面积/实际人均耕地面积　(11)

最小人均耕地面积(hm^2·人$^{-1}$)=粮食自给率×[人均粮食需求量/(粮食单产×粮食作物播种面积占耕地面积的比例×复种指数)]　(12)

已修复耕地(hm^2)=需修复耕地×生态修复决定系数×肥力恢复决定系数　(13)

肥力恢复决定系数=IF THEN ELSE(粮食单产≥3 800, 1, 0.9)　(14)

粮食单产($t·hm^{-2}$)=WITH LOOKUP (单位面积农业投入, {[(0, 0)–(100 000, 10)], (5 241.33, 4.99), (5 242.47, 5.04), (12 694.6, 5.07), (25 143.5, 5.1), (30 588.9, 5.12), (36 773.9, 5.25), (36 773.9, 5.25), (45 587.1, 5.21), (48 370,5.01), (67 358, 5.19), (80 937.7, 5.5) }　(15)

耕地面积(hm^2)=INTEG[增加耕地–减少耕地, 414.5× POWER(10, 3)]　(16)

2.4　情景模拟

为进一步调节天津市耕地和生态用地之间的相互作用关系，进而保障区域粮食安全与生态安全，在对耕地与生态用地系统模型中各主要变量进行仿真的基础上，通过对模型的初始值、参数、方程式等重新设置，仿真耕地与生态用地在不同情景下的

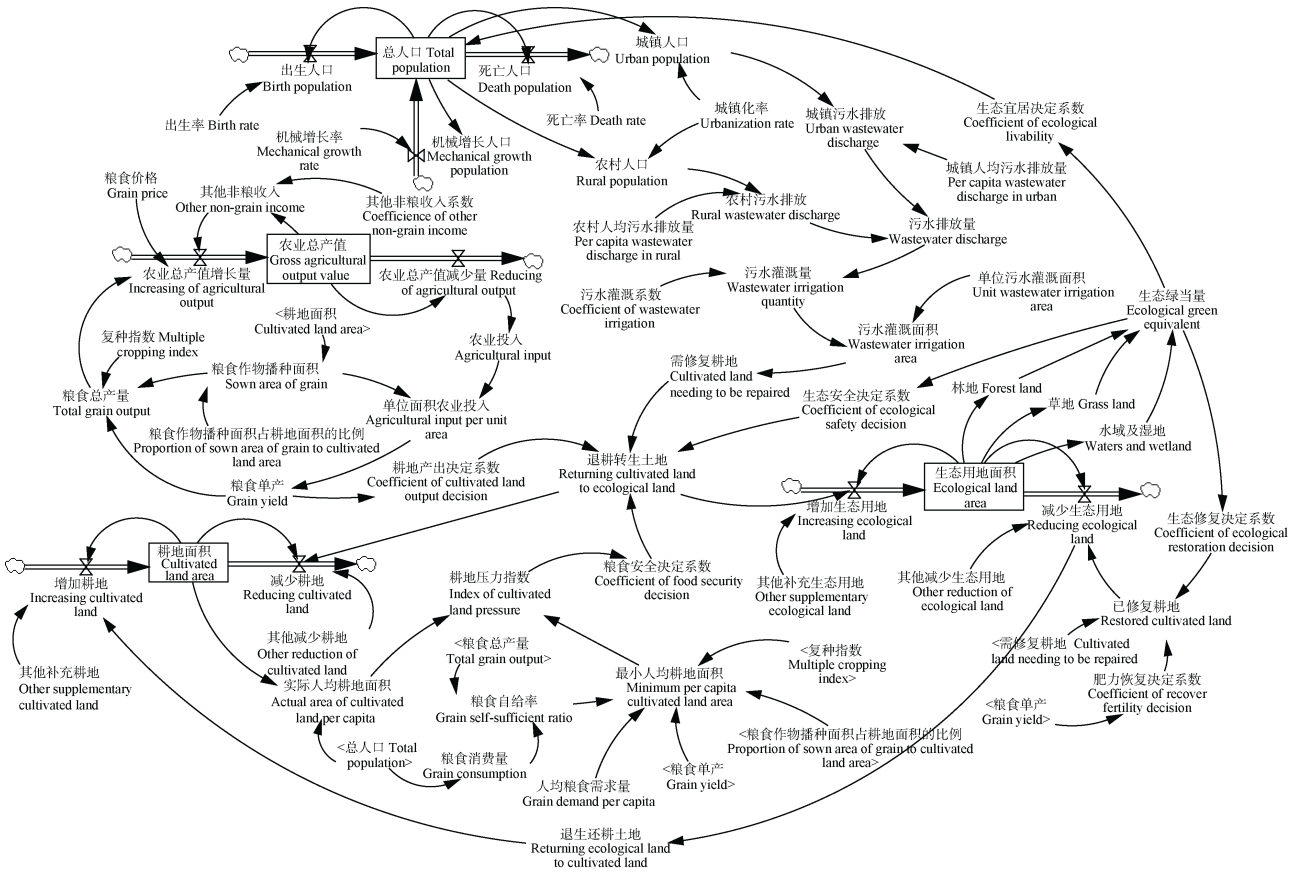

图 3　天津市耕地与生态用地联合调配系统(TSD)流图

Fig. 3　Flow diagram of joint allocation system of cultivated land and ecological land of Tianjin (TSD)

在系统结构中对于决策变量(被解释变量)粮食单产，认为其受到农机投入、劳动力投入、化肥施用量和农药使用量 4 个解释变量的影响，在没有完备的经验系数的情况下，拟运用 C-D 生产函数回归系统参数，但是回归结果不理想，存在严重多重共线性，经逐步回归后，只有农机投入显著性较好，在这种情况下，简化模型结构，仅以农业固定资产投入表征农业投入。In the system structure, the grain output of decision variables (explanatory variables) is affected by four explanatory variables of agricultural machinery input, labor input, fertilizer application and pesticide use. With the absence of a complete empirical coefficient, the C-D production function is used to regress the system parameters. But the regression results are not ideal with a serious multiple collinearity. After stepwise regression, only the agricultural machinery investment is better. In this case, the model structure is simplified and the agricultural investment is represented by the investment of agricultural fixed assets.

动态变化。为此，本研究设置与系统惯性发展相比较的两种调配策略——耕地资源省域内调配策略和耕地资源跨省域调配策略，并对惯性发展趋势和两种调配策略分别进情景仿真，对应的情景设置如表 1 所示。其中，情景 1 表示模型各初始参数不变的惯性发展趋势，情景 2 表示耕地与生态用地只能在省内进行联合调配的策略，情景 3 表示可以进行跨省域耕地占补的耕地与生态用地联合调配策略。

表 1 耕地与生态用地联合调控系统模型仿真情景设置

Table 1 Scenarios design of simulation of joint allocation system of cultivated land and ecological land of Tianjin

情景名称 Scenario name	情景特点 Scenario characteristics	模型调整 Model adjustment
情景 1 Scenario 1	现状趋势发展型 Current trend development	模型原始数据，各变量不变 Model raw data, the variables are unchanged.
情景 2 Scenario 2	耕地资源省内调配 In-provincial allocation of cultivated land resources	提高退生转耕速率，加大整理复垦开发补充耕地力度，以扩大人均耕地面积 Increasing the rate of returning cultivated land, the intensity of rehabilitation and reclamation, and the area of cultivated land per capita
情景 3 Scenario 3	耕地资源跨省调配 Inter-provincial allocation of cultivated land resources	加入跨省域补充耕地外生变量，在保证生态安全的基础上，提高复垦速率，一部分耕地由生态修复补充，另一部分则跨省调配 Adding cross-provincial supplementary cultivated land exogenous variables. On the basis of ensuring ecological security, improving the reclamation rate. Part of the cultivated land is supplemented by ecological restoration, and the other part is inter-provincial allocation.

3 模型运行与仿真

3.1 系统动力学模型运行检验

直观检验：主要检验模型在外观上与实际系统是否相像，参数是否具有可靠性。经检验，建立的模型符合要求。

运行检验：运行 Vensim-PLE 中的工具“Units Check”与“Check Model”，得到“Units are A. O K.”与“Model is OK.”模型通过了运行检验。

历史性检验：将 2006—2016 年的历史数据代入模型进行模拟验证，本文从系统中选取耕地面积、生态用地面积和总人口为检验变量，将模型测算出的模拟值与历史数据相比较，进行模型历史性检验。模拟 TIME STEP 为 1 年，设置 INITIAL TIME 为 2006 年，FINAL TIME 为 2016 年，结果见表 2。

表 2 天津市耕地与生态用地联合调配系统(TSD)主要变量的历史性检验

Table 2 Historical test of main variables of the joint allocation system of cultivated land and ecological land of Tianjin (TSD)

年份 Year	耕地面积 Cultivated area			生态用地面积 Ecological land area			总人口 Total population		
	实际值 Actual value (10^4 hm^2)	模拟值 Simulation value (10^4 hm^2)	误差 Error (%)	实际值 Actual value (10^4 hm^2)	模拟值 Simulation value (10^4 hm^2)	误差 Error (%)	实际值 Actual value (10^4 people)	模拟值 Simulation value (10^4 people)	误差 Error (%)
2006	41.45	41.45	0	—	—	—	1 075.00	1 075.00	0
2007	40.60	41.46	2.12	—	—	—	1 115.00	1 116.25	0.11
2008	40.44	41.41	2.39	—	—	—	1 176.00	1 159.08	–1.44
2009	40.26	41.28	2.54	33.40	33.91	1.54	1 228.16	1 203.55	–2.00
2010	39.88	41.08	3.02	33.63	34.23	1.78	1 299.29	1 249.73	–3.81
2011	39.65	40.89	3.12	33.84	34.55	2.10	1 354.58	1 297.68	–4.20
2012	39.54	40.69	2.91	34.08	34.87	2.33	1 413.15	1 347.47	–4.65
2013	39.25	40.49	3.17	34.53	35.20	1.94	1 472.21	1 399.17	–4.96
2014	38.88	40.30	3.65	34.92	35.53	1.75	1 516.81	1 452.85	–4.22
2015	38.96	40.10	2.93	35.21	35.87	1.86	1 546.95	1 508.60	–2.48
2016	39.08	39.91	2.12	35.54	36.20	1.87	1 562.12	1 566.48	0.28

缺失 2009 年以前的生态用地数据。There is a lack of ecological land data before 2009.

由表 2 可知，模型仿真值与历史值之间的相对误差最高值为 4.96%(<5%)，在误差允许范围内[44]，表明该 TSD 模型真实性检验效果良好。

稳健性检验：模型的稳定性检验是模型真实可靠的必备条件。有效的系统模型行为应当对大部分参数的变化不敏感，这主要是因为系统的行为模式是由模型内部主导反馈回路所决定的，非主导回路上的参数变化不会对系统的行为产生太大影响。本

研究选取耕地面积作为测试变量, 设置时间步长分别为 3 个月(TIME STEP=0.25)、6 个月(TIME STEP=0.5)、12 个月(TIME STEP=1), 以此观测在不同时间步长下参数的变化趋势。

从图 4 可以看出, 改变模型的仿真步长, 耕地面积的变化趋势几乎重合, 并没有因为参数值的改变而发生明显变化, 也即参数值的变化并没有引起模型行为发生根本性变化, 说明模型具有一定的稳定性。

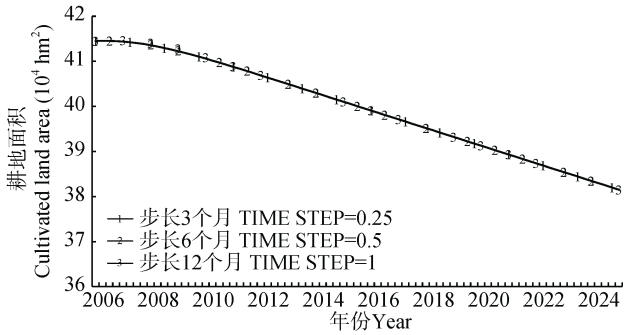

图 4　2006—2025 年不同时间步长下天津市耕地面积的仿真结果

Fig. 4　Simulation results of cultivated land area in Tianjin under different time steps from 2006 to 2025

The time steps of TIME STEP=0.25, TIME STEP=0.5 and TIME STEP=1 are 3, 6 and 12 months, respectively.

历史性检验和稳定性检验结果显示, 本文所建立的 TSD 模型可以用于现实系统的模拟。

3.2　模型仿真和结果分析

根据本文的研究目的, 运用计算机模拟技术对模型中的耕地面积、生态用地面积、耕地压力指数、生态绿当量和粮食单产等主要变量进行仿真, 仿真时间为 2016—2025 年, 步距为 1 a, 初始仿真年为 2016 年, 各变量的初始值也选取 2016 年的数值。运行模型, 得到仿真结果如表 3。

表 3 显示, 天津市未来总人口呈刚性递增趋势, 到 2025 年将达 2.198×10^7 人, 与文献[45-46]的结论一致; 耕地面积呈递减趋势, 到 2025 年将减少到 3.815×10^5 hm^2, 但这一数值仍大于 3.340×10^5 hm^2 的耕地保有量[47]; 生态退耕规模稳步提升, 到 2025 年将达 3.590×10^4 hm^2, 与此同时, 生态用地面积和生态绿当量同步呈递增趋势, 到 2025 年生态用地面积将达 3.942×10^5 hm^2, 高于天津市规划的 2.980×10^5 hm^2 生态用地面积[48], 且生态绿当量将达 1.51>1, 充分满足人类生活所需的生态绿当量。经生态修复后的复垦耕地数量呈递增趋势, 整体规模和生态退耕规模大体一致, 到 2025 年将增加到 3.570×10^4 hm^2; 粮食单产稳步提升, 到 2025 年达 5.32 t·hm^{-2}, 说明耕地的生态修复效果显著, 在其他情况不变的情况下, 耕地的地力水平得以提升; 农业总产值并未因耕地减少而下降, 到 2025 年将增加到 2.262×10^{10} 元; 人均耕地面积呈下降趋势, 到 2025 年减少到 0.02 hm^2, 小于警戒值 0.075 2 hm^2[41]; 耕地压力指数始终大于 1 且不断上升, 实际上朱红波等[49]曾测算早在 2004 年天津的耕地压力指数为 1.104 1, 已大于 1, 而薛磊[50]曾计算的天津的耕地压力指数在 2009 年已经为 1.638, 而本研究预测到 2025 年将达 6.69, 表明实际人均耕地面积将严重小于最小人均耕地面

表 3　2016—2025 年天津市耕地与生态用地联合调配系统(TSD)的主要变量的仿真结果

Table 3　Simulation results of main variables of the joint allocation system of cultivated land and ecological land in Tianjin (TSD) from 2016 to 2025

年份 Year	总人口 Total population (10^4 people)	耕地面积 Cultivated area (10^4 hm^2)	生态退耕规模 Ecological returning scale (10^4 hm^2)	生态用地 Ecological land (10^4 hm^2)	生态绿当量 Ecological green equivalent	退耕还生土地 Returning farmland to ecological land (10^4 hm^2)	粮食单产 Grain yield (t·hm^{-2})	农业总产值 Agriculture GDP (10^8 ¥)	人均耕地面积 Cultivated area per cap. (hm^2)	耕地压力指数 Cultivated land pressure index
2016	1 566.48	39.91	2.56	36.20	1.40	2.54	5.18	213.94	0.03	3.28
2017	1 626.59	39.71	2.66	36.55	1.42	2.64	5.19	216.81	0.02	3.56
2018	1 689.00	39.52	2.76	36.89	1.43	2.74	5.21	219.10	0.02	3.84
2019	1 753.80	39.32	2.86	37.24	1.44	2.85	5.24	220.99	0.02	4.14
2020	1 821.09	39.13	2.97	37.59	1.45	2.96	5.25	222.52	0.02	4.48
2021	1 890.97	38.93	3.09	37.95	1.46	3.07	5.27	223.74	0.02	4.85
2022	1 963.52	38.74	3.21	38.31	1.47	3.19	5.29	224.68	0.02	5.25
2023	2 038.86	38.54	3.33	38.68	1.49	3.31	5.30	225.38	0.02	5.69
2024	2 117.09	38.35	3.46	39.05	1.50	3.44	5.31	225.87	0.02	6.17
2025	2 198.32	38.15	3.59	39.42	1.51	3.57	5.32	226.16	0.02	6.69

积，未来可能存在粮食安全风险。文献[41]认为，当某地耕地压力指数≥2.0 时，认定其为强力约束区域，必须对其耕地数量进行严格约束管理。

耕地压力指数取决于实际人均耕地面积和最小人均耕地面积这两个变量，结合图 3 发现，耕地压力指数不断变大的主要原因有：1)耕地面积大量减少。根据分析，天津市每年新增的耕地面积远不及减少的面积，总面积一直呈下降趋势。一方面，总面积的下降导致人均耕地面积变小；另一方面，耕地面积减少又引起粮食播种面积减少，从而间接提高了耕地压力指数。2)总人口不断增加。在耕地面积逐年减少的情况下，人口规模却在不断扩大，在两者相逆的作用力下，最终导致并加剧了实际人均耕地面积的减少。3)复种指数难以提高，粮食单产增长受到限制。受科学技术和生物学的限制，复种指数提高和粮食单产增长都受到了限制，加上天津市粮食播种面积的不断下降，粮食缺口不断加大，耕地压力扩大是必然结果。

3.3 耕地与生态用地联合调配的不同情景仿真

以 2016 年为规划基准年，2025 年为规划水平年，应用 TSD 模型仿真系统惯性(情景 1)、耕地资源省内调配(情景 2)、耕地资源跨省调配(情景 3)3 种发展模式，得到的仿真结果见图 5。

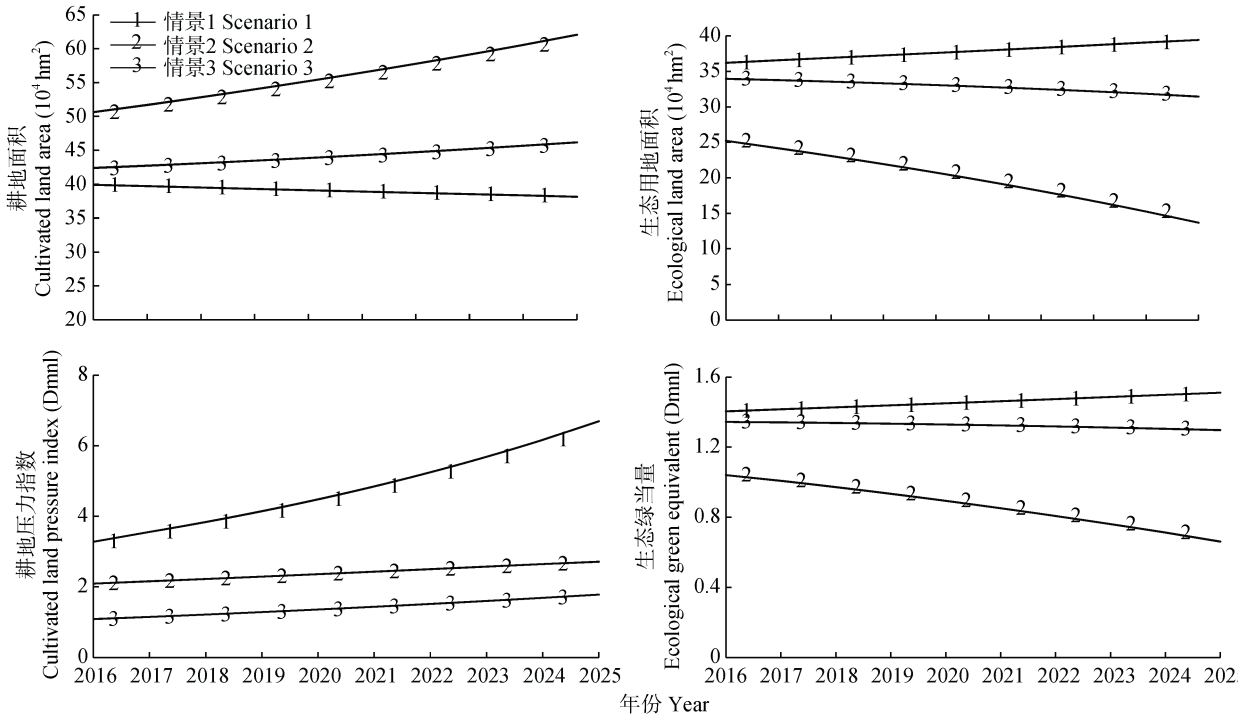

图 5 2016—2025 年不同情景下天津市耕地面积、生态用地面积、耕地压力指数与生态绿当量的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of cultivated land area, ecological land area, cultivated land pressure index and ecological green equivalent in Tianjin from 2016 to 2025 under different scenarios

情景 1：系统惯性；情景 2：耕地资源省内调配；情景 3：耕地资源跨省调配。Scenario 1: current trend development; Scenario 2: in-provincial allocation of cultivated land resources; Scenario 3: inter-provincial allocation of cultivated land resources.

对图 5 分析比较得出：情景 1，在耕地递减趋势不变的情况下，到 2025 年，天津市的耕地压力指数突破 6，数值远大于 1，表示实际人均耕地面积严重小于最小人均耕地面积，耕地承受着巨大的粮食需求压力。情景 2，耕地与生态用地省内联合调配策略下，耕地面积呈递增趋势，虽然 2025 年耕地压力指数仍小于 2.5，但已十分接近文献[41]的警戒值；而且这种策略下发展牺牲了生态安全，生态用地面积击穿生态红线，生态绿当量小于 1，生态环境状况不能满足人类正常生活。情景 3，耕地与生态用地跨省域联合调配策略下，虽然耕地面积小于情景 1，但耕地压力指数却是 3 种情景中最小，小于警戒值 2.0；而且这种策略下发展生态绿当量没有出现大幅度下降，始终大于 1，生态服务功能可以满足所需，此时耕地面积 4.619×10^5 hm²，其中跨省调配面积 0.480×10^4 hm²，补偿资金 3.33×10^8 元，生态用地面积 3.145×10^5 hm²；生态退耕面积 3.590×10^4 hm²，复垦面积 4.270×10^4 hm²。

4 讨论与结论

本文以天津市为研究区，应用系统动力学方法进行耕地与生态用地联合调配策略仿真与优选，研

究结果显示:

1)从系统全局出发, 将耕地安全、生态用地安全、社会发展需求和经济成本纳入一个整体框架进行耕地与生态用地联合调配研究, 较之从单一要素出发(如粮食需求)设置硬约束, 可以更好地兼顾系统多方面需求与安全保障, 以其为基础所构建的 SD 模型可以更为准确地仿真现实系统。

2)2018 年初出台的《跨省域补充耕地国家统筹管理办法》, 可以使耕地与生态用地联合调配的方式更为灵活有效, 对于不具备产粮优势和土地受污染严重的地区尤其如此。跨区域联合调配方式较之原有的只允许区域内占补的僵硬模式, 可以使各地区依据自身的经济水平和资源禀赋更为科学高效地设计和实施粮食安全和生态安全的双保障策略, 更好地保障大尺度(跨区域)的粮食安全和生态安全。

3)系统动力学模型可以解决耕地与生态用地联合调配复杂系统的仿真与策略优选问题, 通过仿真及其结果的比较, 可以帮助研究者或决策者选出优化策略(包括调配模式以及耕地与生态用地在区域内或区域间的联合调配数量), 为新形式下耕地与生态用地联合调配科学规划提供方法支持。

系统动力学模型有社会经济复杂系统实验室之美誉, 因此应用系统动力学模型进行策略仿真和优选必须面对真实系统。本文以天津市为例开展耕地与生态用地联系调配策略研究, 案例区的基本特点为地处《全国主体功能区规划》中的优化开发区域, 而且耕地污染严重、后备用地紧缺、不具备产粮优势, 因此本文所构建的 SD 模型框架对于具备上述特点的地区是适用的, 如果用在其他地区, 则需要对模型结构及反馈关系进行相应调整。

此外, 由于《跨省域补充耕地国家统筹管理办法》2018 年 4 月才出台, 而且跨省域占补指标需要向中央申请批复后才可以执行, 因此跨省域联合调配方案尚没有可以查询的具体实施结果。任何一种新的方法和模型必须经过实践检验才能证明完全有效, 本文所构建的 TSD 模型也存在这样问题, 从理论上说该模型是有效的, 但由于跨省域联合调配系统是个新系统, 因此 TSD 模型还需要依据实践结果不断丰富和完善, 需要持续跟踪和研究。

参考文献 References

[1] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 8–14
XU M G, LU C A, ZHANG W J, et al. Situation of the quality of arable land in china and improvement strategy[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(7): 8–14

[2] 李慧. 不能让“红线”里的 18 亿亩耕地丧失质量[N]. 光明日报, 2014-11-06(10)
LI H. Can’t let the 1.8 billion mu of cultivated land in the “red line” lose quality[N]. Guangming Daily, 2014-11-06(10)

[3] 范金梅. 生态型土地整治大有可为[J]. 中国土地, 2017, (3): 13–15
FAN J M. Ecological land remediation is promising[J]. China Land, 2017, (3): 13–15

[4] 马忠玉, 宋乃平, 郭颖. 中国退耕还林政策评估研究[J]. 宁夏社会科学, 2006, (4): 61–65
MA Z Y, SONG N P, GUO Y. Evaluating research on the Chinese policy of reverting cultivated land to forests[J]. Social Sciences in Ningxia, 2006, (4): 61–65

[5] 谢晨, 王佳男, 彭伟, 等. 新一轮退耕还林还草工程: 政策改进与执行智慧——基于 2015 年退耕还林社会经济效益监测结果的分析[J]. 林业经济, 2016, 38(3): 43–51
XIE C, WANG J N, PENG W, et al. The new round of CCFP: Policy improvement and implementation wisdom — Based on the results of social and economic benefit inventory of CCFP in 2015[J]. Forestry Economics, 2016, 38(3): 43–51

[6] 李富程, 刘影, 樊敏, 等. 岷江上游干旱河谷区退耕还林还草的社会经济影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 295–301
LI F C, LIU Y, FAN M, et al. Impacts of cultivated land conversion on social-economic changes in arid valley from the upper reaches of Min River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 295–301

[7] 国家统计局课题调研组. 退耕还林对西部地区粮食生产及供求的影响[J]. 管理世界, 2004, (11): 97–100
Subject Investigation & Study Group. The impact of ‘Farmland Re-turning into Forest’ upon grain production, supply and demand in West China[J]. Management World, 2004, (11): 97–100

[8] 刘莉, 魏晋, 高雪松, 等. 四川丘陵区耕地资源优化配置研究——以泸县为例[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21): 13148–13150
LIU L, WEI J, GAO X S, et al. Study on optimal allocation of arable land in hilly area of Sichuan Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(21): 13148–13150

[9] 龚媛, 李飞雪, 王丽妍, 等. 耕地空间优化配置研究——以常州市新北区为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 199–205
GONG Y, LI F X, WANG L Y, et al. Studies on spatial optimization allocation of cultivated land — Taking Xinbei District, Changzhou City as the example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 199–205

[10] 洪鸿加, 彭晓春, 陈志良, 等. SD-MOP 整合模型在长沙市耕地资源优化配置中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(S1): 34–39
HONG H J, PENG X C, CHEN Z L, et al. Application of SD-MOP integrated model in optimal allocation of arable land in Changsha[J]. Resources and Environment in the

Yangtze Basin, 2010, 19(S1): 34–39

[11] 高星, 吴克宁, 郧文聚, 等. 县域耕地后备资源与规划期内数量质量并重的占补平衡分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 213–219
GAO X, WU K N, YUN W J, et al. Analysis on county based reserved resource for cultivated land and quality-quantity requisition-compensation balance in planning period[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 213–219

[12] 方婷婷, 程久苗, 费罗成, 等. 新形势下芜湖市耕地后备资源调查与开发利用研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(2): 177–185
FANG T T, CHENG J M, FEI L C, et al. Analysis of the investigation and utilization of reserved resources of cultivated land in Wuhu under the new situation[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(2): 177–185

[13] 张琳, 张凤荣, 薛永森, 等. 中国各省耕地数量占补平衡趋势预测[J]. 资源科学, 2007, 29(6): 114–119
ZHANG L, ZHANG F R, XUE Y S, et al. Forecasting the balance between occupation and complementarity of cultivated land by provinces in China[J]. Resources Science, 2007, 29(6): 114–119

[14] 许丽丽, 李宝林, 袁烨城, 等. 2000—2010 年中国耕地变化与耕地占补平衡政策效果分析[J]. 资源科学, 2015, 37(8): 1543–1551
XU L L, LI B L, YUAN Y C, et al. Changes in China's cultivated land and the evaluation of land requisition-compensation balance policy from 2000 to 2010[J]. Resources Science, 2015, 37(8): 1543–1551

[15] 曲艺, 舒帮荣, 欧名豪, 等. 基于生态用地约束的土地利用数量结构优化[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(1): 155–161
QU Y, SHU B R, OU M H, et al. Optimization of land use quantity structure based on ecological land constraints[J]. China Population Resources and Environment, 2013, 23(1): 155–161

[16] 张颖, 王群, 李边疆, 等. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究[J]. 中国土地科学, 2007, 21(6): 23–28
ZHANG Y, WANG Q, LI B J, et al. Study on forecasting ecological land demand with carbon-oxygen balance method[J]. China Land Science, 2007, 21(6): 23–28

[17] 罗志军, 张军. 生态绿当量及其在土地利用结构优化中的应用——以江西省新建县为例[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(5): 851–856
LUO Z J, ZHANG J. Ecological green equivalent and its application to land use structure optimization — A case study of Xinjian County[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007, 29(5): 851–856

[18] 刘艳芳, 明冬萍, 杨建宇. 基于生态绿当量的土地利用结构优化[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2002, 27(5): 493–498
LIU Y F, MING D P, YANG J Y. Optimization of land use structure based on ecological green equivalent[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(5): 493–498

[19] 李建龙, 师学义, 祝宇成. 基于生态绿当量的土地利用结构优化——以晋城市城区为例[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 371–374
LI J L, SHI X Y, ZHU Y C. Optimization of land use structure based on ecological green equivalent — Taking Jincheng City zone as an example[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(5): 371–374

[20] 杨波, 东梅. 灰色预测与适度退耕还林规模的确定[J]. 中国高校科技与产业化: 学术版, 2006, (S3): 218–220
YANG B, DONG M. Grey prediction and determination of the scale of moderate returning farmland to forests[J]. Chinese University Technology Transfer, 2006, (S3): 218–220

[21] 白玮, 郝晋珉, 张秋平, 等. 土地利用总体规划中生态退耕规划标准指标体系构建与应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 72–76
BAI W, HAO J M, ZHANG Q P, et al. Establishment and application of the indicator system for planning standard of ecological restoration in the general land use planning[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 72–76

[22] 张汉雄, 张兴昌, 邵明安. 长城沿线农牧交错带生态环境恢复重建 SD 模型研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1): 173–178
ZHANG H X, ZHANG X C, SHAO M A. The rebuilding and resuming of SD model of the eco-environment in the agriculture and animal husbandry interlock zone along the Great Wall[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(1): 173–178

[23] 熊鹰, 陈云, 李静芝, 等. 基于土地集约利用的长株潭城市群建设用地供需仿真模拟[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 562–577
XIONG Y, CHEN Y, LI J Z, et al. Analog simulation of urban construction land supply and demand based on land intensive use[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 562–577

[24] 蔡炜宇, 刘兆顺. 长春市九台区土地利用系统动力学特征及结构优化[J]. 江西农业学报, 2017, 29(7): 110–116
CAI W Y, LIU Z S. System dynamic characteristics and structural optimization of land use in Jiutai District of Changchun City[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(7): 110–116

[25] 涂小松, 濮励杰, 严祥, 等. 土地资源优化配置与土壤质量调控的系统动力学分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 221–226
TU X S, PU L J, YAN X, et al. Analysis of optimal allocation of land resources and soil quality regulation using system dynamics[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 221–226

[26] 何建华, 王宵君, 杜超, 等. 武汉城市圈土地利用变化系统仿真模拟与驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1270–1278
HE J H, WANG X J, DU C, et al. Simulation of land use change and analysis of driving forces in Wuhan urban agglomeration based on a system dynamic model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1270–1278

[27] 李志, 周生路, 陆长林, 等. 基于系统动力学城市边缘区土

地利用变化模拟与预测——以南京市江宁区为例[J]. 土壤, 2010, 42(2): 314–318
LI Z, ZHOU S L, LU C L, et al. Simulation and prediction of land-use change in urban marginal zone based on system dynamics model — A case study of Jiangning County, Nanjing[J]. Soils, 2010, 42(2): 314–318

[28] 李梦娜, 刘琳, 张永芳, 等. 基于系统动力学的土地整理项目效益后评价[J]. 中国农学通报, 2018, 34(2): 98–106
LI M N, LIU L, ZHANG Y F, et al. Benefit post-evaluation of land consolidation project based on system dynamics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(2): 98–106

[29] 徐霄枭, 项晓敏, 金晓斌, 等. 土地整治项目社会经济影响的系统动力学分析——方法与实证[J]. 中国土地科学, 2015, 29(8): 73–80
XU X X, XIANG X M, JIN X B, et al. System dynamics analysis for the socio-economic impacts of land consolidation: Methodology and empirical study[J]. China Land Sciences, 2015, 29(8): 73–80

[30] 张贞, 高金权, 简广宁, 等. 基于系统动力学的土地质量变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(14): 226–231
ZHANG Z, GAO J Q, JIAN G N, et al. Changes of land quality based on system dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(14): 226–231

[31] 张庶, 金晓斌, 徐霄枭, 等. 基于 SD 和模糊综合评价的土地整治项目社会影响评价[J]. 中国农学通报, 2014, 30(34): 81–88
ZHANG S, JIN X B, XU X X, et al. Social impact assessment of land consolidation project based on system dynamics and fuzzy synthetic evaluation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(34): 81–88

[32] JIN X B, XU X X, XIANG X M, et al. System-dynamic analysis on socio-economic impacts of land consolidation in China[J]. Habitat International, 2016, 56: 166–175

[33] 李世东. 退耕还林效益优化模式系统动力学研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 377–383
LI S D. Study on the optimized model of conversion of farmland to forests using system dynamics[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(3): 377–383

[34] 李世东. 基于SD的退耕还林典型立地优化模式研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 22–28
LI S D. SD-based study of the optimized model of conversion of farmland to forests on typical sites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 22–28

[35] 李世东. 黄土高原沟壑区退耕还林优化模式研究[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 71–78
LI S D. The optimized model for conversion of farmland to forests in the hill-gully subregion of Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(5): 71–78

[36] 张璐, 孙向阳, 尚成海, 等. 天津滨海地区盐碱地改良现状及展望[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 180–185
ZHANG L, SUN X Y, SHANG C H, et al. Review and prospect of improvement present situation on coastal saline-alkali area in Tianjin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(18): 180–185

[37] 王祖伟, 王中良. 天津污灌区重金属污染及土壤修复[M]. 北京: 科学出版社, 2014
WANG Z W, WANG Z L. Heavy Metal Pollution and Soil Remediation in Tianjin Sewage Irrigation Area[M]. Beijing: Science Press, 2014

[38] 雷平. 中国粮食安全的系统评价和实现机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016
LEI P. Systematic appraisal and implementation mechanism research of food security in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016

[39] 成六三, 时伟宇. 退耕对县域耕地压力效应的影响分析研究——以武隆县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(3): 201–206
CHENG L S, SHI W Y. Effects of land conversion projects on the land pressure — Taking Wulong County as a case[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(3): 201–206

[40] TAO J, FU M C, ZHANG D X, et al. System dynamics modeling for the pressure index of cultivated land in China[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2013, 11(2): 1045–1049

[41] 冉清红, 岳云华, 谢德体, 等. 中国分省耕地警戒值区域差异及指示功能研究[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1718–1725
RAN Q H, YUE Y H, XIE D T, et al. Regional differences in alert values of cultivated land and its instruction functions at provincial levels in mainland China[J]. Resources Science, 2010, 32(9): 1718–1725

[42] 孙强, 王乐, 蔡运龙. 基于 SOFM 网络的中国耕地压力综合分区[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(4): 625–631
SUN Q, WANG L, CAI Y L. SOFM network based integrated regionalization of cropland conversion pressures in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(4): 625–631

[43] 赵丹, 李锋, 王如松. 基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6242–6250
ZHAO D, LI F, WANG R S. Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent: A case study in Ningguo City, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6242–6250

[44] 王其藩. 系统动力学[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学社, 1994
WANG Q F. System Dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1994

[45] 温丹辉, 孙振清. 天津区域减排政策经济与排放影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 28–33
WEN D H, SUN Z Q. Influences of climate policies on the regional economy and carbon emissions in Tianjin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(4): 28–33

[46] 陈立新, 王琳. 基于灰色 Verhulst 动态模型的人口预测——以天津为例[J]. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2015, 35(4): 94–96
CHEN L X, WANG L. Prediction of population based on grey Verhulst dynamic model: Case of Tianjin[J]. Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition, 2015, 35(4): 94–96

[47] 自然资源部. 国土资源部关于天津市土地利用总体规划(2006—2020 年)有关指标调整的函[EB/OL]. (2017-06-30). http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201706/t20170630_1523341.htm
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Letter from the Ministry of Land and Resources on the adjustment of relevant indicators for the Tianjin land use master plan (2006–2020)[EB/OL]. (2017-06-30). http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201706/t20170630_1523341.htm

[48] 津台之桥. 天津市生态用地保护红线划定方案[EB/OL]. (2014-01-27). http://www.huaxia.com/jtzq/tjxw/2014/01/3726628.html
Bridge of Jintai. Tianjin ecological land protection red line delineation plan[EB/OL]. (2014-01-27). http://www.huaxia.com/jtzq/tjxw/2014/01/3726628.html

[49] 朱红波, 张安录. 中国耕地压力指数时空规律分析[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 104–108
ZHU H B, ZHANG A L. Analyzing temporal and spatial distribution characteristics of pressure index of cultivated land in China[J]. Resources Science, 2007, 29(2): 104–108

[50] 薛磊. 基于耕地压力指数的粮食安全状况分析——以天津市为例[J]. 青年科学, 2014, (3): 241
XUE L. Analysis of food security based on cropland pressure index — A case of Tianjin[J]. Youth Science, 2014, (3): 241