耕地资源可持续发展的系统动力学仿真分析

张雪花[1], 滑永胜[1], 韩成吉[1,2]
(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: [目的] 探讨耕地生态修复对粮食产量和土壤重金属含量的影响,为耕地可持续利用提供决策。[方法] 以天津市为例,运用系统动力学方法,构建耕地生态修复系统动力学模型(CLERSD),设置绿色发展策略、可持续发展策略、生态修复 3 种策略下的 6 种情景,对天津市 2016—2030 年不同用地模式下的系统发展趋势进行仿真。[结果] 从长期趋势看,绿色发展策略中,增加化肥农药的使用虽然可以短期增产,但于长期无益,而且还会有较多的耕地由于受损而需要生态修复。可持续发展策略中,增加投资可以提高粮食产量,促进农业可持续发展;而增加污水灌溉,虽然可在短期内更好地满足作物生长用水需求,但长期使用会导致重金属镉的含量上升,使较多的耕地需要转为生态用地;生态修复策略中,种植具有较强金属富集能力的植物,可以使生态用地在较短时内完成对受损耕地的修复,使土壤重金属含量降低、耕地数量增多。[结论] 在农业生产中,可以通过改变农药化肥投入、资金投入、降低污水灌溉和耕地生态修复等措施,维护粮食安全和促进农业绿色可持续发展。

关键词: 耕地; 生态用地; 系统动力学; 重金属
文献标识码: B　　**文章编号**: 1000-288X(2019)03-0144-07　　**中图分类号**: X32, F301.21

文献参数: 张雪花, 滑永胜, 韩成吉. 耕地资源可持续发展的系统动力学仿真分析[J]. 水土保持通报, 2019,39(3):144-150. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.024; Zhang Xuehua, Hua Yongsheng, Han Chengji. System dynamics simulation analysis of sustainable development of cultivated land resource[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(3):144-150.

System Dynamics Simulation Analysis of Sustainable Development of Cultivated Land Resource

Zhang Xuehua[1], Hua Yongsheng[1], Han Chengji[1,2]
(1. *Institute 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: [Objective] The ecological restoration effects of cultivated land on grain yield and soil heavy metal content were explored in order to provide a certain basis for the decision-making of cultivated land sustainable utilization. [Methods] Taking Tianjin City as a case study, a system dynamics model of cultivated land ecological restoration (CLERSD) was constructed by using system dynamics method. Six scenarios were set under of three strategies: green development, sustainable development and ecological restoration strategy. The deployment of cultivated land and ecological land in Tianjin City from 2016 to 2030 was simulated under different land use patterns. [Results] In the green development strategy, although increasing the use of chemical fertilizer and pesticide could increase grain yield in a short time, it was not beneficial in the long term, and more cultivated land would need ecological restoration because of damage. In the strategy of sustainable development, increasing investment could increase grain production and promoted sustainable agricultural development. Increasing sewage irrigation could meet the demand of crop growth water in the short term, but it would lead to the increase of cadmium content, as a result, more arable land would need to be converted to ecological land. In the strategy of ecological restoration, planting the plants with strong

收稿日期:2018-12-19　　**修回日期**:2019-01-13
资助项目:国家社会科学基金项目"基于'全碳'核算的新时代绿色发展评价制度和规划制度研究"(18BJY079)
第一作者:张雪花(1967—),女(汉族),河北省秦皇岛市人,博士,教授,研究生导师,主要研究方向为资源环境经济和复杂系统动力学模拟。Email:xuehua671231@163.com。

metal enrichment ability could rehabilitated the damaged cultivated land in a relatively short time, and reduced the content of heavy metals in soil and increased the area of cultivated land. [Conclusion] In agricultural production, it is possible to maintain food security and sustainable green development of agriculture by changing the input of pesticides, fertilizers and capital investment, reducing sewage irrigation and ecological restoration of cultivated land.

Keywords: cultivated land; ecological land; system dynamics; heavy metal

耕地是人类生存发展的物质基础和条件,生态用地是维持生态平衡、满足人民群众对良好生态环境和美好生活的向往的重要保障。人口数量的增长和社会经济发展的需要导致耕地资源数量日益趋紧,而不合理的耕作方式是导致耕地退化的重要原因,在严重影响粮食有效供给的同时[1-2],也给环境承载带来了巨大的压力。科学推进污染耕地轮作休耕制度,通过耕地与生态用地之间的转换,以生态修复促耕地休养,不仅对推动耕地资源永续利用、保障粮食安全具有重要战略意义,将耕地转换为生态用地也将惠及全民。

在保障耕地质量方面,国家层面做出了许多努力。为改善农用地土壤环境,管控农用地土壤污染风险,2018 年 6 月,生态环境部制定了《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,对农用地土壤污染风险筛选值和管制进行规定,其中包括农用地土壤中镉、汞、砷、铅和铬的风险管控。现有研究表明,在农用地受重金属污染中,耕地污染较为严重(耕地土壤点位超标率 19.4%,土壤总超标率 16.1%)[3]。其中,在农用地重金属污染修复中,植物重金属修复技术具有费用低、护表土和减少水土流失的作用,是最清洁的土壤重金属污染修复技术之一[4]。目前,可以用于植物重金属修复技术的植物有紫松国菊[5]、竹类植物[6]、紫花苜蓿[7]、刺儿菜[8]、桑树[9]、印度芥菜[10]、蜈蚣草[11]等,即当耕地受重金属污染时,可采用绿色植物种植的方式对其进行修复。

耕地作为一大社会生态复合系统存在于人们的生产生活中,将系统动力学方法运用在土地利用方面研究成果丰富,但尚存在一些不足。姜秋香等[12]运用系统动力学研究黑龙江省水土保障风险评价,但污溉风险没有纳入评价指标中;胡玉玺等[13]利用系统动力学研究湿地生态—经济—社会复合系统,但没有考虑湿地与耕地之间的可能转换;涂小松等[14]运用系统动力学研究江苏省土地资源优化配置与土壤质量调控,但并未将土壤重金属含量作为土壤质量的衡量指标;李梦娜等[15]在对土地整理项目效益后评价中,忽略了耕地与生态用地之间的转换带来的效益;胡宗楠等[16]在对土地利用结构多情景中得到,忽略生态用地可以促进耕地的保护;宋蕾等[17]在长寿区耕地资源变化的研究中,未考虑重金属引起耕地质量的变化;洪鸿加等[18]在耕地资源的优化配置研究中,未考虑土壤重金属含量对粮食安全的影响。可以看出系统动力学已经广泛应用于土地利用研究,但关于耕地与生态用地联合调配问题的研究较少。其次,系统动力学方法作为一种有效的仿真方法在农用地土壤重金植物修复方面的还未见报导。

本文拟以天津市为例,运用系统动力学方法构建耕地生态修复系统动力学仿真模型,探讨绿色发展策略、可持续发展策略、生态修复策略 3 种类型 6 种情景下的耕地、生态用地、粮食产量和土壤重金属含量等相关因素的变化趋势,以期通过模拟未来耕地、生态用地、粮食产量和土壤重金属含量发展情景,为粮食安全和耕地可持续利用综合决策提供参考依据。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

天津市地处华北平原北部、海河下游,东临渤海、北依燕山,地势呈北部高东南低,是环渤海经济中心,其位于 38°34′—40°15′N,116°43′—118°04′E,总面积 11 916.85 km^2,耕地 4 369.26 km^2,占总面积的 36.7%。天津市属于温带半湿润季风性气候,四季分明,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季干旱降水稀少,年均降水量在 360～970 mm 之间;年平均气温约为 14 ℃,7 月最热,月平均气温为 28 ℃;1 月最冷,月平均温度为 −2 ℃。2016 年,天津人口有 1.56×10^7 人,GDP 1.79×10^{10} 元。其中第一产业 2.20×10^{10} 元,占 GDP 总量的 1.23%。

天津市作为中国重要中心城市、超大城市,人口密度 1 328 人/km^2,高于全国人口密度 144 人/km^2,保持有效的农业生产,对维持社会稳定有极大的作用。在对天津农业用地的调查中发现,重金属镉对农用地污染较为严重[19-20]。天津市属资源型缺水城市,人均水资源量仅为全国水平的 5.10%,农业生产中不得不引污水灌溉,早在 1958 年就利用污水进行农田灌溉,距今已有 60 a 余历史,现污水灌溉面积达 2.34×10^5 hm^2,占天津市耕地面积的 50%,其中在

污水灌溉区，重金属镉、锌、汞含量较高[21-22]。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；还有部分耕地长期单一种植，土地综合肥力下降，产出能力持续降低。面对以上危机情况，亟须开展耕地与生态用地联合调配的方法研究，以生态修复恢复受损耕地的自然生产力，同时使其发挥生态服务功能，改善城市生态系统，保障生态安全。

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，天津仅是污灌受损地区之一。因此，科学解决天津市耕地由于污灌而受损的问题，对上述土壤污染地区具有一定的借鉴意义。

1.2 数据来源

本文建立耕地生态修复系统动力学模型，数据来源于 2006—2017 年《天津统计年鉴》《天津水资源公报》《中国统计年鉴》和土地调查成果共享应用服务平台以及其他研究成果等。

2 系统动力学模型构建

2.1 系统边界

模型的空间边界为天津市；时间跨度为 2006—2030 年，其中 2016 年为基期年，2030 年为规划水平年，时间步长为 1 a。主要历史数据时段为 2006—2016 年，数据内容主要涉及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。

2.2 系统结构及反馈分析

本文以耕地与生态用地联合调配所构建的社会、经济、资源和环境复杂系统内各要素间的相互关系为出发点，进行系统多重反馈结构分析。

其中，资源子系统主要研究在污水灌溉影响下，耕地土壤资源的重金属随时间的变化。当其达到标准限制时，依据土壤植物修复理论，将耕地转成植物高富集的生态用地；当耕地产量低于基础地力水平时，转成生态用地作为休耕模式；当耕地资源较少或粮食产量较低时，把土壤重金属含量符合生产标准且能够达到一定粮食单产的生态用地转成耕地。

社会子系统主要研究随着时间的推移，总人口数量的变化对农业人口的投入、对粮食的需求、对生态环境的需求以及对耕地的影响。例如，人口数量的增大会增加耕地及生态环境的压力。

经济子系统主要研究地区经济量变化及其对农业的不同方式的投入可能产生的影响。经济投入量可以促进农业发展，但如果过量投入农药、化肥则会危害农业发展。环境子系统主要研究长时间的耕作对土壤环境和耕地产出的影响以及污水灌溉对土壤重金属含量的影响。

上述要素间的多重反馈因果回路如图 1 所示。

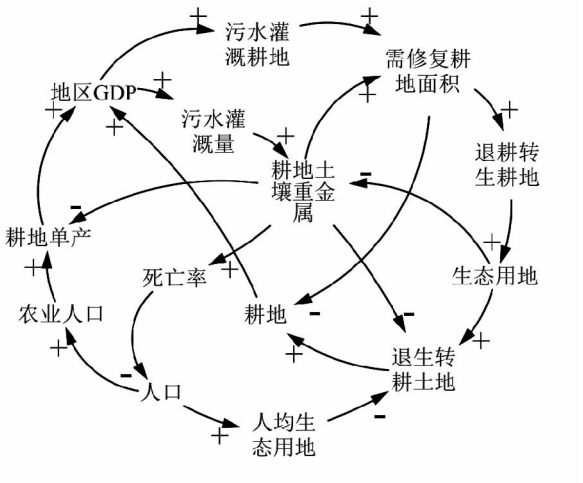


图 1 耕地与生态用地调配系统因果反馈图

图 1 系统中的主要反馈回路有：①耕地→地区 GDP→污水灌溉量→耕地土壤重金属→退生转耕土地→耕地；②生态用地→退生转耕土地→耕地→地区 GDP→污水灌溉耕地→需修复耕地面积→退耕转生耕地→生态用地；③负反馈，耕地土壤重金属→需修复耕地面积→退耕转生耕地→生态用地→耕地土壤重金属；④耕地土壤重金属→耕地单产→地区 GDP→污水灌溉量→耕地土壤重金属；⑤耕地→地区 GDP→污水灌溉量→耕地土壤重金属→死亡率→人口→人均生态用地→退生转耕土地→耕地；⑥地区 GDP→污水灌溉量→耕地土壤重金属→需修复耕地面积→耕地→地区 GDP；⑦人口→农业人口→耕地单产→地区 GDP→污水灌溉量→耕地土壤重金属→死亡率→人口；⑧生态用地→退生转耕土地→耕地→地区 GDP→污水灌溉量→耕地土壤重金属→需修复耕地面积→退耕转生耕地→生态用地；⑨需修复耕地面积→耕地→地区 GDP→污水灌溉耕地→需修复耕地面积。

正反馈可以使回路中变量的偏离增强，负反馈使回路中变量趋于稳定。上述反馈回路中，①，③，④，⑥，⑦和⑨为负反馈，②，⑤和⑧为正反馈。反馈回路①，⑤和⑨表明，耕地的增加会使农业产值增加，带动地区 GDP 的增长，随着社会经济的发展，较多的污水灌溉到耕地，增加耕地土壤重金属的含量，为维护农产品的安全以及人类健康，需要将这些耕地退出农业生产，转换为生态用地；反馈回路②，③，④和⑧表明，生态用地的增加，改善原有耕地土壤环境，在不改变原有生态环境的条件下，增加耕地面积，提高耕地单位产量，进而促进地区产值的增长；反馈回路⑥和⑦

表明,土壤重金属含量的增长,增大人口死亡率,减少农业人口投入,降低耕地单产,进而抑制地区经济的发展。

2.3　模型构建

在耕地与生态用地系统结构和反馈分析的基础上,充分考虑资源、环境、经济、社会的相互关系以及相互影响,依据相关分析法、趋势法、模糊综合评判法等,以 2006 年为起始年,以 2030 年为规划水平年,在 Vensim-DSS 平台上建立耕地与生态用地联合调配系统模型。在模型中共有 75 个变量,其中有 6 个水平变量,10 个速率变量,37 个辅助变量和 22 个常量,主要方程如下:

(1) 人口= INTEG(净迁入人口+出生人口-死亡人口,1 075)

(2) 污水排放量= 地区 GDP×单位 GDP 污水排放量

(3) 灌溉污水耕地土壤重金属变化= 污水灌溉量/33000×污水重金属浓度×1000×0.000 2

(4) 生态用地= INTEG(增加生态用地-减少生态用地,25 133)

(5) 耕地= INTEG(增加耕地-减少耕地,437 200)

(6) 耕地单产= 农业劳动力增产系数×农业劳动力投入+农业基础设施投入×农业基础设施投入增产系数+农药投入×农药投入增产系数×农药投入调整系数 +化肥投入×化肥投入增产系数×化肥投入调整系数+调整单产

(7) 耕地土壤重金属含量= INTEG(耕地土壤重金属增加,2.37)

(8) 转生土壤重金属减少= 植物修复重金属富集率×转生土壤重金属含量

(9) 需修复耕地系数= IF THEN ELSE(耕地单产>=3 800,IF THEN ELSE(耕地土壤重金属含量>=3,1,0),污水灌溉修复影响调整系数×耕地单产修复影响调整系数)

(10) 需退生还耕土地=IF THEN ELSE(人均生态用地>=最小人均生态用地,IF THEN ELSE(转生土壤重金属含量>=3,0,IF THEN ELSE(耕地红线-耕地>=0,耕地红线-耕地,0)),0)

耕地与生态用地联合调配系统流图如图 2。

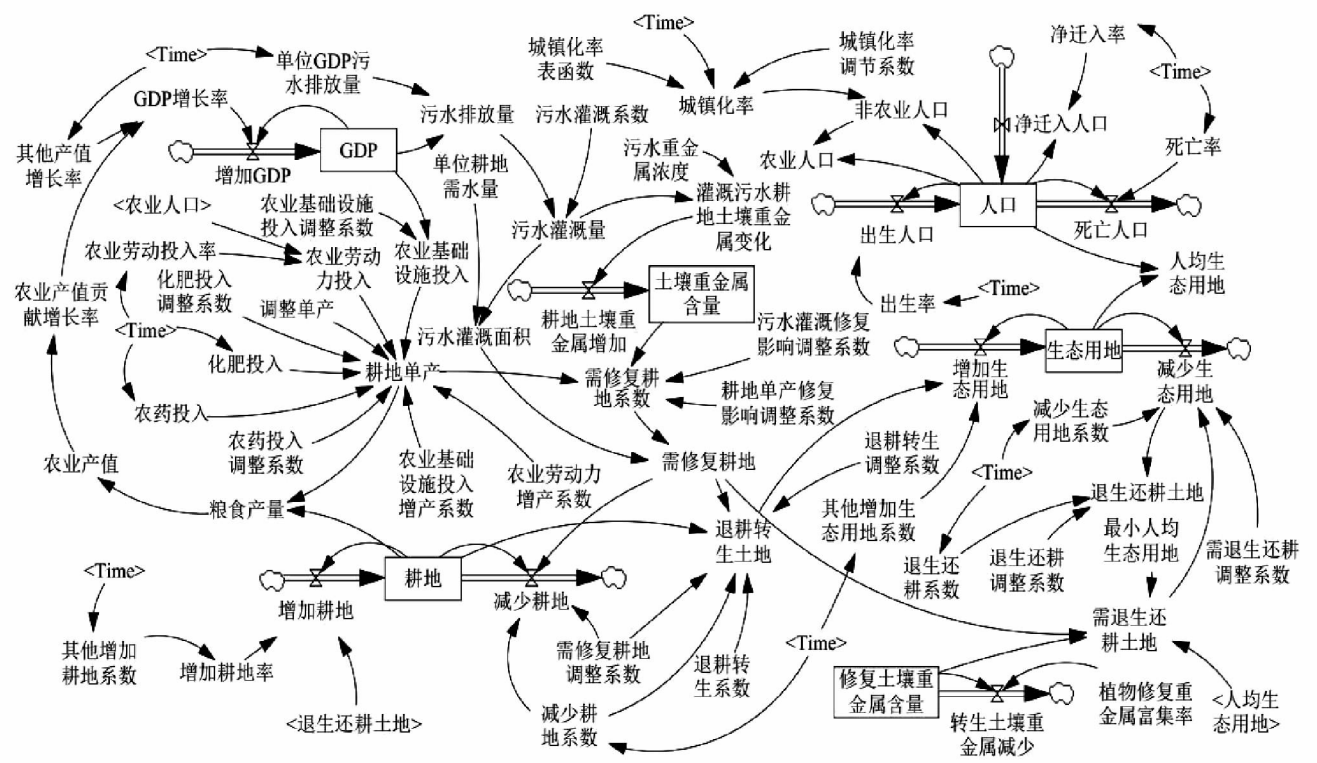


图 2　耕地生态修复系统动力学流图

2.4　模型检验

系统动力学模型建立之后,需要进行模型的有效性检验,检验仿真模拟结果是否能够较为准确地描述现状并解决研究问题[23]。判断构建的系统动力学模型是否是具有现实性及对历史问题的再现,需要对历史问题进行检验。本文历史性检验以 2006—2016 年为检验时间,选取主要状态变量耕地、生态用地和人口作为历史检验指标,检验结果如表 1 所示。

表 1 耕地生态修复系统动力学模型(CLERSD)历史性检验结果

年份	耕地面积			生态用地面积			人口数量		
	历史值/hm^2	仿真值/hm^2	误差/%	历史值/hm^2	仿真值/hm^2	误差/%	历史值/10^4 人	仿真值/10^4 人	误差/%
2006	445 255	445 255	0.000	—	—	—	1 075	1 075	0.000
2007	443 690	443 711	−0.005	—	—	—	1 115	1 113	0.191
2008	441 090	441 105	−0.003	—	—	—	1 176	1 166	0.879
2009	447 177	447 197	−0.004	388 800	388 772	0.007	1 228	1 236	−0.570
2010	443 704	443 758	−0.012	385 333	385 302	0.008	1 299	1 297	0.169
2011	440 746	440 805	−0.013	382 200	382 163	0.010	1 355	1 350	0.351
2012	439 278	439 318	−0.009	378 267	378 259	0.002	1 413	1 408	0.364
2013	439 278	439 311	−0.008	373 667	373 632	0.009	1 472	1 473	−0.046
2014	438 310	438 358	−0.011	371 400	371 356	0.012	1 517	1 523	−0.406
2015	437 182	437 220	−0.009	369 333	369 286	0.013	1 547	1 556	−0.608
2016	436 924	436 952	−0.006	366 867	366 783	0.023	1 562	1 572	−0.636

由表 1 可知,上述所有状态变量的最大相对误差为 0.879%<1%,即误差允许范围内[17],说明所建模型有效,能够很好的模拟所研究的对象系统。

3 模型仿真

耕地的产量和质量都会影响地区粮食安全,它们分别从数量和质量上对粮食安全产生影响。本文从农业投入、环保、生态等 3 项策略出发,对耕地与生态用地联合调配进行模拟仿真,以了解不同联合调配策略对耕地与生态用地的影响和作用效果。模拟方法是在其他策略不变的情况下,改变其中一项策略。在天津市基本情况分析的基础上,本文设置 3 种策略 6 种情景,分别为绿色发展策略、可持续发展策略和生态修复策略。依据不同情景,对 2016 年至 2030 年天津市耕地与生态用地进行仿真,对比分析不同情景下耕地、生态用地、粮食产量和土壤重金属含量的变化趋势,据此提出耕地与生态用地联合调配的合理建议。

3.1 绿色发展策略分析

绿色作为实现“十三五”发展目标的 5 大基本发展理念之一,给各行各业的发展提供了发展方向。农业是社会发展的基础行业,对农业的适度投入会增加粮食产量,但如果农药及化肥过量投入,可能会产生短期的增产效果,但长期使用则会影响土地利用的可持续性,还会影响人体健康。例如,化肥和农药的过度施用会造成土壤板结,长期使用农药残留高的食物会对人体健康产生影响。

因此,本文将化肥和农药的投入作为调控因子,来考察粮食产量和耕地单产的变化趋势(表 2)。为了考查不同施用情况的影响差异,此处设置两种情景,情景一为大量使用农药化肥模式,情景二为适度使用农药化肥模式,仿真结果如图 3 所示。

表 2 绿色发展调控因子方案

绿色发展情景	农药使用调整系数	化肥施用调整系数
现行政策对比	1.0	1.0
情景一	1.2	1.2
情景二	0.8	0.8

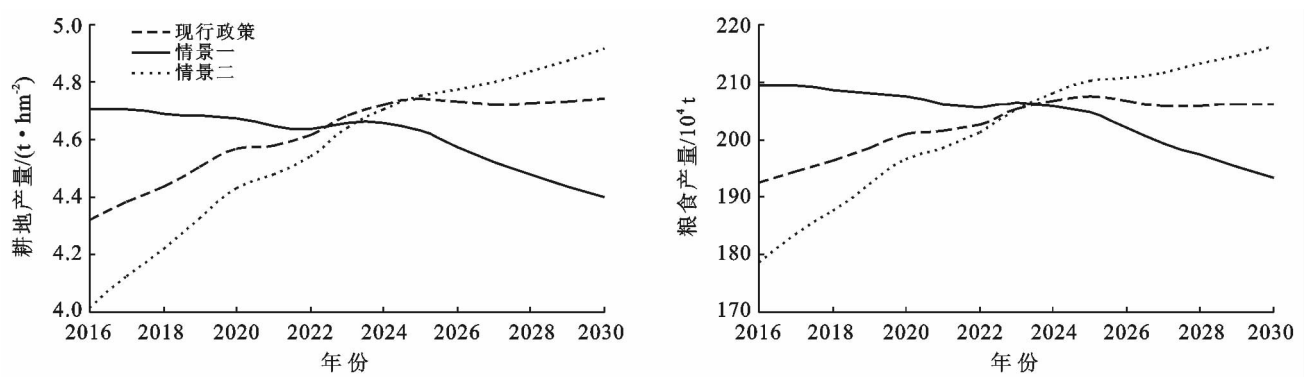


图 3 天津市 2016−2030 年绿色发展策略仿真曲线

由图 3 可知,粮食产量和耕地单产在当前农药化肥投入情况下,均呈现先增长后稳定的趋势。在情景一中,粮食产量先高于现行政策,每年呈减少趋势,大约在 2023 年开始低于现行政策;耕地单产最高,每年呈减少趋势,大约在 2022 年耕地单产低于现行政策。在情景二中,粮食产量低于现行政策和情景一,每年呈增长趋势,大约在 2023 年超过现行政策和情景一,在此后的时间开始缓慢增长并趋于稳定;耕地单产最低每年呈增长趋势,在 2023 年超过情景一和在 2025 年超过现行政策。由此可知,当增加农药化肥的投入使用时,在短期会增加粮食产量和提高粮食单产,随着时间的推移,粮食产量和粮食单产都将降低,即过多的农药化肥投入降低了土地产出能力;当降低农药化肥的投入使用时,粮食产量和粮食单产都较低,但呈增长趋势,最后都将超过现行政策和情景一,即降低农药化肥的使用从长远来看,可以充分发挥土地生产力,减少农药化肥对土壤测破坏。

3.2　可持续发展策略分析

一个行业的发展离不开一定资金的投入使用,对于当前高效农业发展的要求,资金的投入会带动农业发展。另一方面,随着社会经济的发展以及人口的增长、快速的城镇化,会产生大量的污水用于农业灌溉。污水中含有较多植物生长营养物质,但同时也含有较多的污染物质。在天津耕地重金属污染中,最严重是镉污染,它的来源主要就是污水的灌溉。

在其他变量不变的情境下,为使土地资源可持续利用,将农业投资和污水灌溉作为调控目标,来考察耕地土壤重金属含量和粮食产量的变化趋势。为了考察不同投资和污水灌溉率的影响差异,此处设置两种情景,情景三为大量增加农业投资和降低污水灌溉率,情景四为大量增加农业投资和提高污水灌溉率,情景设置如表 3 所示,仿真结果如图 4 所示。

表 3　可持续发展调控因子方案

可持续发展情景	农业投资调整系数	污水灌溉率
现行政策对比	1.0	0.49
情景三	1.4	0.40
情景四	1.4	0.55

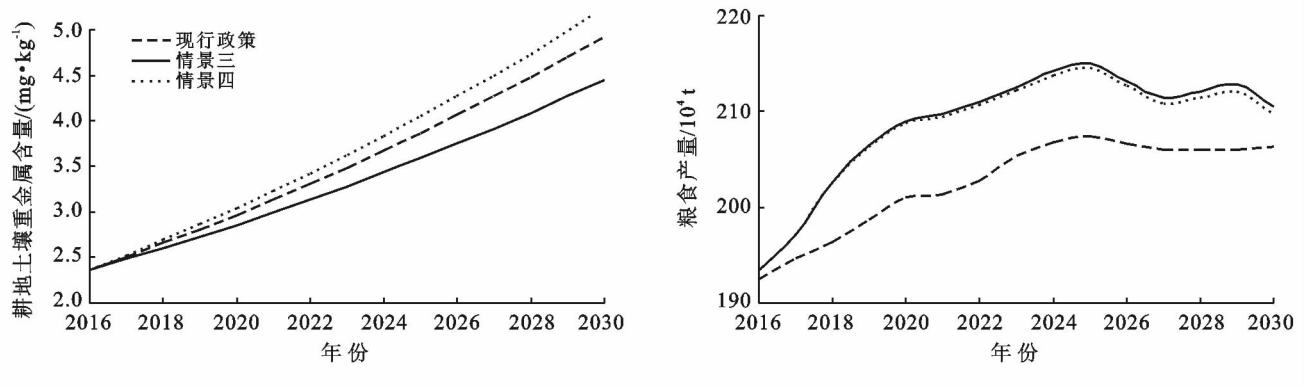


图 4　天津市 2016－2030 年可持续发展策略仿真曲线

由图 4 可知,情景三耕地土壤重金属含量最低、情景四耕地土壤重金属含量最高、现行政策下耕地土壤重金属含量处于两者之间,在这 3 种情景中耕地土壤重金属含量逐年呈现增长。对于粮食产量,情景三和情景四在开始一段时间呈现增长并高于现行政策,情景三和情景四粮食差别很小。由此可知,高的农业投入可以增加粮食产量;对于污水灌溉量对粮食产量的影响较小,但是它增加了耕地中土壤重金属含量,这会污染耕种在土地上的粮食,进而影响本地区居民的身体健康。因此,为保持农业可持续发展要加大农业投资和减少污水对农田的灌溉。

3.3　生态修复策略分析

绿色植物除具有景观功能、进化大气和水土保持等功能外,它还对土壤具有修复作用,比如改善土壤的通气性以及土壤的团粒结构和对土壤重金属污染的修复等。植物对重金属污染土壤的修复技术主要是通过对土壤重金属的稳固和高富集植物对重金属的吸附。这里将植物对土壤重金属的富集率作为调控因子,来考察耕地和生态用地的变化趋势。为考察植物重金属富集率的影响,此处设置情景五为较高植物重金属富集率,情景六为高植物金属富集率,具体设置如表 4 所示,仿真结果如图 5 所示。

表 4　生态修复调控方案

生态修复情景	植物重金属富集率
现行政策对比	0
情景五	0.060
情景六	0.065

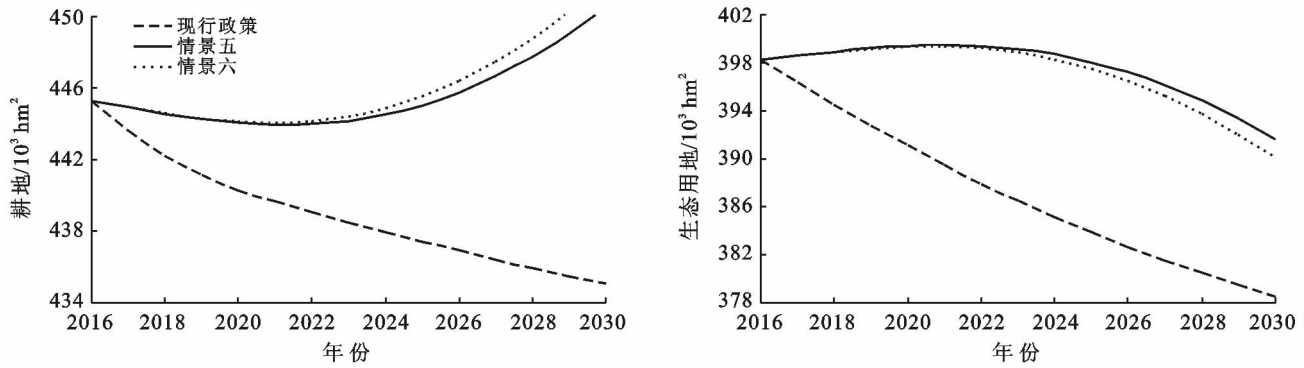


图 5 天津市 2016—2030 年生态修复模拟仿真曲线

由图 5 可以看出,现行政策耕地和生态用地都是在减少,情景五、情景六耕地和生态用地都高于现行政策;对于耕地,情景五低于情景六,情景五和情景六在 2016 年开始一段时间变化较小,此后呈现缓慢增长;对于生态用地,情景五高于情景六,情景五和情景六在 2016 年开始一段时间变化较小,此后呈减少趋势。因此,通过耕地与生态用地的联合调配,利用重金属高富集植物等对耕地的修复作用,可以使耕地得以修复。

4 结 论

本文以耕地与生态用地为研究对象,通过分析耕地与生态用地之间相互作用,建立耕地生态修复系统动力学模型,并通过设置不同的情景模式,以仿真模拟的形式考察耕地与生态用地联合调配策略的改变对耕地和生态用地优化配置的影响作用。研究结果表明:

(1) 在农业绿色发展中,大量增加化肥农药的投入使用,可以增加粮食产量和提高粮食单产,但会降低土地产出能力。降低化肥农药使用,粮食产量和粮食单产都较低并呈增长态势。因此,为保护天津市粮食安全,维护耕地土壤质量,提高农业经济,需要合理的使用化肥农药,以促进本地区农业的绿色发展。

(2) 在可持续发展策略中,农业资金投入的增多会提高粮食产量,可以促进农业的可持续发展。污水灌溉量增多,耕地土壤中重金属 Cd 含量增大,需要进行修复耕地越多。因此,在农田灌溉中,要减少污水灌溉量。

(3) 在生态修复策略中,将耕地转为生态用地,利用植物重金属修复技术,可以降低重金属 Cd 在土壤中的含量。提高植物重金属富集率,可以增加生态用地转为耕地的量,另一方面使更多的耕地以生态修复的形式转为生态用地,以促进耕地的修复。

总的来看,在农业生产中,为维护粮食安全以及农业绿色可持续发展,可以通过改变农药化肥投入、资金投入、降低污水灌溉和耕地生态修复。

[参 考 文 献]

[1] 刘洛,徐新良,刘纪远,等. 1990—2010 年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J]. 地理学报,2014,69(12):1767-1778.

[2] 孙秀锋. 中国粮食产销平衡区的粮食安全与耕地保护研究[D]. 重庆:西南大学,2013.

[3] 魏洪斌,罗明,鞠正山,等. 重金属污染农用地风险分区与管控研究[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(2):82-87.

[4] 杨启良,武振中,陈金陵,等. 植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J]. 生态环境学报,2015,24(6):1075-1084.

[5] 张晓庆,徐丽,齐悦,等. 紫松果菊对多环芳烃重污染土壤修复效能[J]. 生态学杂志,2018,37(2):492-497.

[6] 卞方圆,张小平,杨传宝,等. 竹类植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 世界林业研究,2017,30(6):24-28.

[7] 朱剑飞,李铭红,谢佩君,等. 紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对 Cu、Pb 复合污染土壤修复能力的研究[J]. 中国生态农业学报,2018,26(2):303-313.

[8] 罗少辉,王秀英,吴浩,等. 高寒地区刺儿菜对重金属镉污染土壤修复效果研究[J]. 环境污染与防治,2018,40(1):40-43.

[9] 唐翠明,王振江,戴凡炜,等. 桑树在土壤污染和大气污染修复中的应用潜力[J]. 广东蚕业,2014,48(3):38-41.

[10] 陈友媛,卢爽,惠红霞,等. 印度芥菜和香根草对 Pb 污染土壤的修复效能及作用途径[J]. 环境科学研究,2017,30(9):1365-1372.

[11] 米艳华,雷梅,黎其万,等. 滇南矿区重金属污染耕地的植物修复及其健康风险[J]. 生态环境学报,2016,25(5):864-871.

[12] 姜秋香,赵蚰竹,王子龙,等. 基于系统动力学和可变模糊集的水土资源保障风险仿真与评价[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(4):780-792.

(下转第 155 页)

解保水效果随着土层深度和时间而变的情况。在此基础上进行数学模拟可对这一时空变化规律进行定量描述。这样,就可实现对构件保水效果的更为准确的量化评估,还可用于预测应用保水构件对于减少面源污染的贡献。

[参 考 文 献]

[1] 白文波,李茂松,赵虹瑞,等.保水剂对土壤积水入渗特征的影响[J].中国农业科学, 2010,43(24):5055-5062.

[2] 曹远博,王百田,魏婷婷,等.2 种型号保水剂的特性及其应用研究[J].水土保持学报,2014,28(4):283-288.

[3] 黄占斌,孙朋成,钟建,等.高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J].农业工程学报,2016,32(1):125-131.

[4] 黄震,黄占斌,李文颖,等.不同保水剂对土壤水分和氮素保持的比较研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):245-249.

[5] 李世坤,毛小云,廖宗文.复合保水剂的水肥调控模拟及其肥效研究[J]. 水土保持学报,2007,21(4):112-116.

[6] 卢其明,孙克君,邓德安,等.聚合物/膨润土复合材料的水肥调控特性研究[J].水土保持学报,2004,18(4):50-52,112.

[7] 陈晓蓉,刘辉,陈薇,等.几种矿物复合保水剂的保水性能及养分增效研究[J].土壤学报,2012,49(1): 194-197.

[8] 沈筱染,李绍才,孙海龙.氮磷钾在两种基质中的淋溶研究[J].北方园艺,2016(17):179-183.

[9] 陈晓蓉,孙克君,王俊,等.污泥保水功能的研究及应用初报[J].水土保持通报,2011,31(5):200-203,214.

[10] 李佳岭,李龙保,廖宗文,等.保水剂施用层次对草坪生长及土壤水肥的影响[J]. 草业学报,2014,23(4):61-67.

(上接第 150 页)

[13] 胡玉玺,吴晓磊,马世昌,等.湿地“三生”空间耦合的系统动力学模型实证分析:以西溪国家湿地公园为例[J].经济地理,2018,38(7):173-180.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 胡宗楠,李鑫,楼淑瑜,等.基于系统动力学模型的扬州市土地利用结构多情景模拟与实现[J].水土保持通报,2017,37(4):211-218.

[17] 宋蕾,曹银贵,周伟,等.基于 SD 模型的三峡库区快速城镇化地区耕地利用模拟研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):818-827.

[18] 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.

[19] 许萌萌,刘爱风,师荣光,等.天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响[J].环境科学,2018,39(3):1095-1101.

[20] 陈宗娟,张倩,张强,等.天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J].生态与农村环境学报,2015,31(2):166-173.

[21] 孙亚芳,王祖伟,孟伟庆,等.天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价[J].农业环境科学学报,2015,34(4):679-685.

[22] 张磊,张银太.天津:落实“十二五”环保规划建设生态农村[J].环境保护,2012(9):60-62.

[23] 周雄勇,许志端,郁永勤.中国节能减排系统动力学模型及政策优化仿真[J].系统工程理论与实践,2018,38(6):1422-1444.