

海岸带土地利用变化多情景模拟 ——以山东海岸带为例

宋百媛^{1,2,3,4}, 侯西勇^{1,3,4}, 王晓利^{1,3,4}, 刘玉斌^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 4 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 海岸带土地利用长时间序列多情景模拟, 对海岸带综合管理和可持续发展有重要指导意义。以山东海岸带为例, 构建山东海岸带土地利用需求系统动力学(SD)模型, 设置 SSP1-RCP2.6(A-可持续发展路径)、SSP2-RCP4.5(B-经济社会适中发展路径)、SSP3-RCP4.5(C-逆全球化的区域竞争路径)三种情景, 模拟至 2100 年土地利用需求, 进而使用 FLUS 模型模拟近期(2030 年)、中期(2050 年)和远期(2100 年)的土地利用空间分布。结果表明: (1) 情景 A 人口较少、城镇化率高、经济发展水平较高, 情景 B 各因素发展趋势适中, 情景 C 人口数量较多、城镇化率较低、经济发展水平较低。(2) 至 2100 年各地类的需求面积变化曲线表现出显著的情景差异及类型差异; 情景 A 经济社会发展对土地资源的依赖性较小; 情景 B 对主要地类的面积需求在三种情景中处于中等水平; 情景 C 经济社会发展对生活、生产用地需求突出, 建设用地面积增长趋势强劲。(3) 至 2100 年三种情景土地利用的格局—过程差异显著, 情景 A 主要地类趋向于集中分布, 建设用地在近、中期将延续扩张趋势, 但滨海湿地能够得到有效的保护; 情景 B 海岸带区域建设用地和人工湿地的扩张及林草地的萎缩趋势均较显著; 情景 C 建设用地扩张最显著, 人工湿地与耕地有向海扩张的趋势, 滨海湿地显著萎缩。研究结果可为海岸带管理长远的战略决策制定提供科学支持。

关键词: 土地利用; 情景分析; 系统动力学; 海岸带

中图分类号: P748 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)01-0022-12

DOI: 10.11759/hyhx20201118002

海岸带是陆地和海洋交互作用强烈的过渡地带, 是具有独特的陆、海属性的动态而复杂的自然体系, 也是空间开发利用最密集、资源环境压力最突出和各类矛盾问题最集中的复杂系统^[1-2]。改革开放四十余年, 中国经历了快速的城镇化与工业化发展, 尤其是人口和产业稠密的海岸带区域, 高强度的人类活动导致显著的土地利用变化过程, 土地资源面临巨大的压力和挑战^[3-4]。进入 21 世纪, 随着经济社会发展与生态环境保护对空间的需求发生变化, 海岸带土地利用/覆被变化将展现出新的特征、趋势及内涵机制。

伴随信息科学技术的发展, 土地利用变化研究的广度、深度日益扩展, 土地利用/覆被变化时空过程监测、情景模拟与动力学机制的理解已经成为科研前沿^[5]。土地利用变化模型是土地利用变化研究的重要工具^[6], 但目前的土地利用模拟研究技术主要基于历史及当前土地变化规律, 以时间为变化引导,

预测未来某一时间点或时期的土地覆盖数量及空间变化^[7], 模拟的时间尺度以未来 5—20 年为主^[8-10], 难以反映长期趋势和特征。因此, 构建深入反映土地动力机制的长时间序列模拟模型, 可以对区域土地利用有更长远的趋势模拟和判断。

大多数土地利用变化模拟模型由土地需求模拟与空间模拟两部分组成。系统动力学(System Dynamic,

收稿日期: 2020-11-18; 修回日期: 2021-05-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205)、国家自然科学基金项目(41901133)、山东省海岸带环境过程重点实验室开放基金项目(2019SDHADKFFJ04)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA19060205; National Natural Science Foundation of China, No. 41901133; Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, YICCAS, No. 2019SDHADKFFJ04]

作者简介: 宋百媛(1995—), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要开展海岸带土地利用变化监测与模拟方面研究, E-mail: bysong@yic.ac.cn; 侯西勇, 通信作者, 研究员, 主要从事海岸带资源环境遥感、海岸带生态风险评估等方面的研究, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

简称 SD)是土地利用需求数量模拟的常用方法,国内外学者针对不同的研究区域和目的,构建土地利用变化 SD 模型^[11-13]。FLUS 模型可以得到较好的空间模拟结果,其基于轮盘赌的地类选择机制不但能同时模拟多种地类的变化,而且使得非主导地类也有机会被分配至元胞上,因而,模型能反映真实土地利用变化中的不确定性以及模拟跳跃式土地利用变化情形^[14]。将 SD 自上而下的数量模拟与 FLUS 自下而上的空间模拟相结合,能够深刻揭示土地利用变化的时空特征及内在机制。本文拟探究海岸带土地利用动力学机制,进行长时期情景模拟,主要将人口、城市化、经济发展以及国际环境等因素的未来长期发展态势纳入土地利用变化的动力学机制。具体以山东海岸带为例,基于共享社会经济发展路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)与 IPCC 第五次评估报告采用的典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)组合情景,构建山东海岸带土地利用需求模拟系统动力学模型,进行至本世纪末长时间序列多情景模拟,并使用 FLUS 模型进行近期(2030 年)、中期(2050 年)和远期(2100 年)多情景的空间模拟,以期为海岸带区域中长期的战略决策制定提供科学支持。

1 研究区概况

山东省海岸带地处 115°45'E—122°49'E、34°23'E—38°32'N 之间,濒临渤海、黄海,属于温带季风气候。本文以陆城市级行政边界和海域-10 m 等深线确定研究区边界,包括滨州、德州、东营、潍坊、烟台、威海、青岛、日照和临沂以及-10 m 等深线覆盖的浅海水域,其中,临沂虽未直接靠海但辖区距离海岸线较近,受海域影响较大,因此也划入研究区范围(图 1)。研究区面积约 11.62 万 km²,是我国华东地区重要的城市密集区之一,与韩国、朝鲜、日本距离较近,经济发展水平较高,产业基础雄厚,人口稠密,人类活动强烈。研究区处于海陆交互的过渡地带,分布着山地、丘陵、河谷、平原、海湾、河口三角洲、滩涂、岛屿等地貌,土地类型多样,土地利用/覆被变化特征复杂。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

(1) 土地利用数据:利用文献[3]和[15]的研究成果,将其重分类为耕地、林地、草地、建设用地、内陆水体、滨海湿地、浅海水域、人工湿地和未利用地 9 个地类。

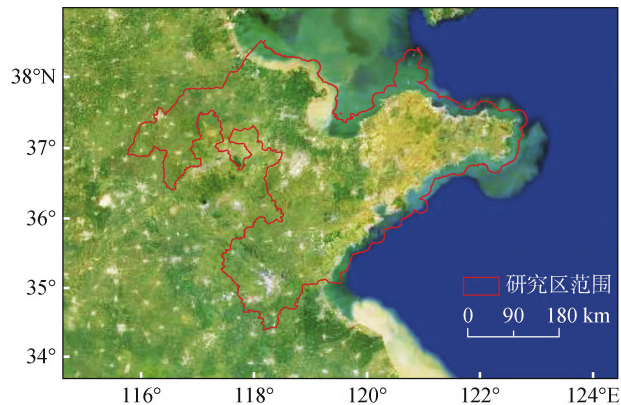


图 1 山东海岸带的位置、范围与概貌

Fig. 1 Location, scope, and general appearance of the Shandong coastal zone

(2) 土地利用变化驱动因子数据:根据已有研究的经验总结^[16-17]和研究区实际及数据可获取性,选取 8 个驱动力因子,数据源及其处理如表 1 所示。其中,未来时期(2030—2100 年)气温、降水数据是利用 SimCLIM 模型,基于 CMIP5 的 44 个全球气候模式在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下预估得到,气候数据的预估结果采用多模型集合的平均值^[18];利用国家气象局气象信息中心提供的 1996—2018 年的地面气象站观测数据对气候模型的预估能力进行评估,结果表明模型预估效果比较理想。空间数据均采用行列一致的空间分辨率为 100 m×100 m 的栅格数据,并统一为 Albers 投影。

(3) 社会经济数据:历史时期人口、经济、固定资产等社会经济数据来源于山东省及各地级市 2000—2015 年统计年鉴、统计公报。未来人口、城镇化率模拟数据源自 Chen 等的研究成果^[19],该研究根据 1995—2015 年各省历史城镇化率对各省的 S 型函数进行修正,并对今后各省的城镇化水平进行 SSPs 多情景预测,得到至 2100 年各省城镇化率预测数据;进而,基于 SSPs 和 RCPs 情景框架,通过递归多维模型预测人口,得到至 2100 年 SSP-RCP 情景矩阵下的未来年度人口网格数据。文本从 15 种情景组合中选用 SSP1-RCP2.6、SSP2-RCP4.5、SSP3-RCP4.5 三种情景,通过裁剪、统计计算得到研究区所需的人口数量及城镇化率数据。未来 GDP 情景分析数据来源于姜彤等人的研究成果^[20],该数据集基于中国历次人口和经济普查及逐年统计年鉴,使用柯布道格拉斯(Cobb-Douglas)经济预测模型,依据 SSPs 框架情景,获得至 2100 年中国 31 个

表 1 驱动力因子数据来源与处理

Tab. 1 Source and processing of driving force factor data

数据	来源	处理
气温	气候模型预估数据	空间插值
降水	气候模型预估数据	空间插值
高程、坡度	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)GDEM V2 30m 分辨率 DEM 数据	进行表面分析生成坡度
到交通道路距离	国道、高速公路、铁路数据	进行欧氏距离分析
到河渠距离	基于 2015 年土地利用数据提取河渠数据	进行欧氏距离分析
到城镇距离	基于 2015 年土地利用数据提取城镇建设用地数据	进行欧氏距离分析
到海岸线距离	大陆海岸线数据是在文献[21]中 2014 年数据基础上更新获得 2015 年数据	进行欧氏距离分析

省(区、市)GDP 模拟数据库;本研究假设未来时期山东海岸带区域 GDP 占全省的比例保持不变(2000—2015 年间占比变化很小),与 SSP1、SSP2、SSP3 情景下的山东省 GDP 模拟结果相乘,得到至 2100 年山东海岸带 GDP 多情景数据。

2.2 研究方法

本研究主要包括经济社会发展情景设置、土地

需求多情景 SD 模型、土地利用 FLUS 空间模拟三部分。在对山东海岸带区域进行宏观情景发展路径设定的基础上,构建土地利用需求模拟系统动力学模型,进行至 2100 年的年尺度土地需求多情景模拟,并针对近期(2030 年)、中期(2050 年)和远期(2100 年),使用 FLUS 模型进行多情景空间模拟,技术路线如图 2 所示。

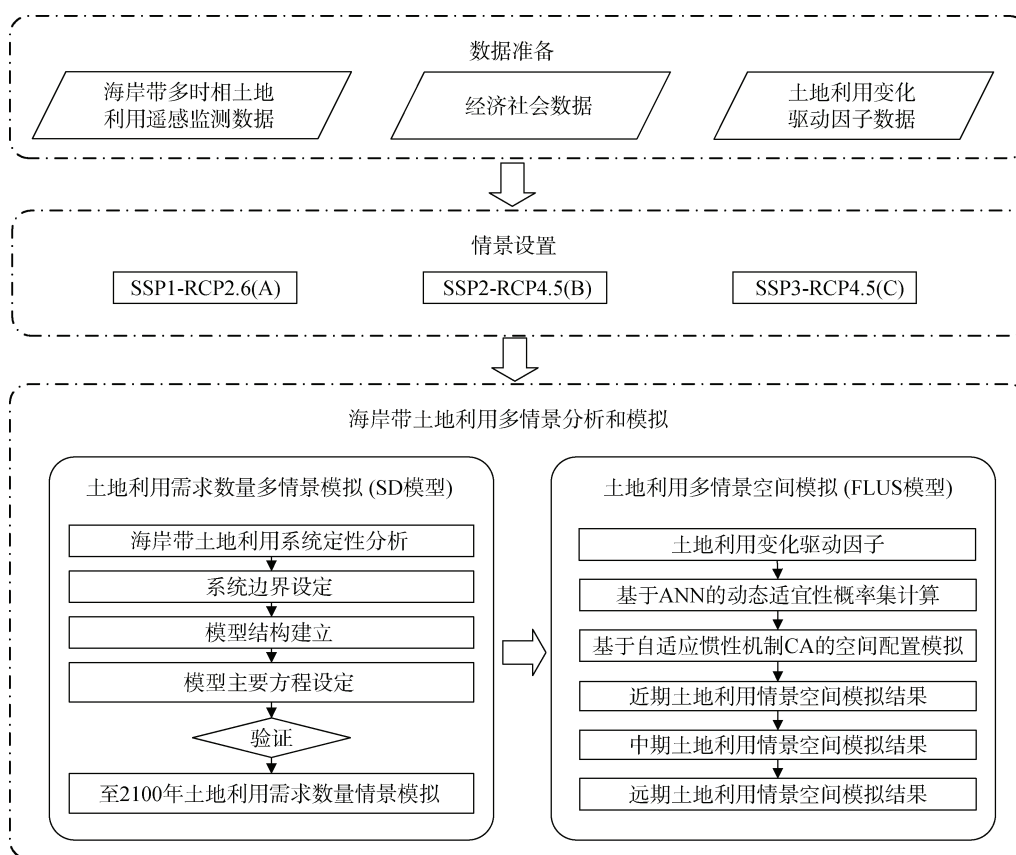


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical route

2.2.1 经济社会发展情景设置

情景分析是一种系统地、创造性地针对研究对

象设置系列情景来思考未来的方法^[22]。海岸带长时间尺度土地利用变化具有显著的系统性、复杂性和

不确定性,因此,情景分析是一种行之有效的研究方法。IPCC 提出一套由社会经济情景和气候情景共同构成的情景框架^[23],其中,社会经济情景由共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)表示,气候情景由典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)表示。SSPs 可以描述具有不同适应和减缓挑战的未来社会经济状况,共设计 5 种,分别是 SSP1 可持续路径、SSP2 中间路径、SSP3 区域竞争路径、SSP4 不均衡路径和 SSP5 化石燃料为主发展路径^[24]。本文重点参照 Chen 等(2020)和姜彤等(2018)的研究成果,构建未来山东海岸带区域经济社会发展情景,假定该区域未来发展基调以可持续发展为主,但也会受到全球竞争外在因素影响,因此选择 SSP1-RCP2.6(A-可持续发展路径)、SSP2-RCP4.5(B-经济社会适中发展路径)和 SSP3-RCP4.5(C-逆全球化的区域竞争路径)三种情景。

情景 A: 是一种以人为本的绿色道路,实现 RCP2.6 辐射强迫目标。人口增长较慢,生育率低、死亡率低、教育程度高,人口迁移适度,城镇化率高。长期经济增长放缓,部分资金会投入到生态环境保护上,湿地保护强度高。在高教育水平加上可持续发展带动下科技进步将较为显著。资源节约型生活方式下土地节约集约利用程度高,人均建设用地低。可持续发展需要充足粮食保障作为支撑,因此设置较高的耕地保护强度。

情景 B: 发展路径趋于温和,历史过程得以维持

和延续的特征突出,实现 RCP4.5 辐射强迫目标。在该发展路径下各发展指标主要为中值状态或保持现状。

情景 C: 实现 RCP4.5 辐射强迫目标。人口增长较快,生育政策全面开放,教育卫生投资较低,导致高死亡率、受教育程度较低,人口流动减少,城镇化率相对较低。经济社会发展会受到国际竞争摩擦的影响,形成低经济增长模式。土地集中利用和城市更新需要较高的投资成本,低经济增长模式难以支持大面积的土地更新以及生态用地的保护与恢复。并且,为增强区域竞争而对建设用地有较高的需求量。

情景变量分为主导变量与趋势变量(表 2)。其中,(1)主导变量的未来发展趋势如图 3 所示。人口数量增长速度放缓,至 2030 年左右达到峰值,之后开始下降,2050 年左右三种情景之间人口的差异开始显著增大;城市化进程将继续推进,到 2030 年左右城镇化率增速开始放缓,到 2050 年左右我国建成社会主义现代化国家,城镇化率开始趋于稳定,其中 SSP1 情景的城镇化率最先达到 70%;经济发展趋势也是在上升一段时期后开始趋于稳定,SSP2 情景的 GDP 将于 2040s 开始与 SSP1 情景拉开距离,但在末期赶上 SSP1。三种情景之间相比,人口与经济发展趋势相近,但亦存在显著差异;SSP1 情景人口少,城镇化率高,经济发展好;SSP2 情景各因素发展趋势适中;SSP3 情景人口数量多,城镇化率较低,经济发展较低。(2)趋势变量是对不同情景发展路径的趋势假设,本文设置高、中、低三种模式。

表 2 情景参数设置

Tab. 2 Parameter settings of different scenarios

情景变量		情景 A	情景 B	情景 C
主导变量	人口	低	中	高
	经济	较高经济增长	经济增长放缓	低经济增长
	城镇化率	高	中	低
趋势变量	科技进步	高: 粮食单产增长率到 2030(2050)、低: 粮食单产增长率到 2030(2050)、中: 粮食单产增长率到 2030(2050)、2100)年提高到 2%(2.5%、3%) 2100)年提高到 1.9%(2.1%、2.5%) 2100)年提高到 2%(2.3%、2.6%)		
趋势变量	人均城镇建设 用地面积	低: 211.61 m ²	中: 264.51 m ²	高: 290.96 m ²
	城市土地集约 利用强度	高: 0.10	中: 0.05	低: 0.01
	耕地保护强度	高	中	低
	湿地保护强度	高	中	低

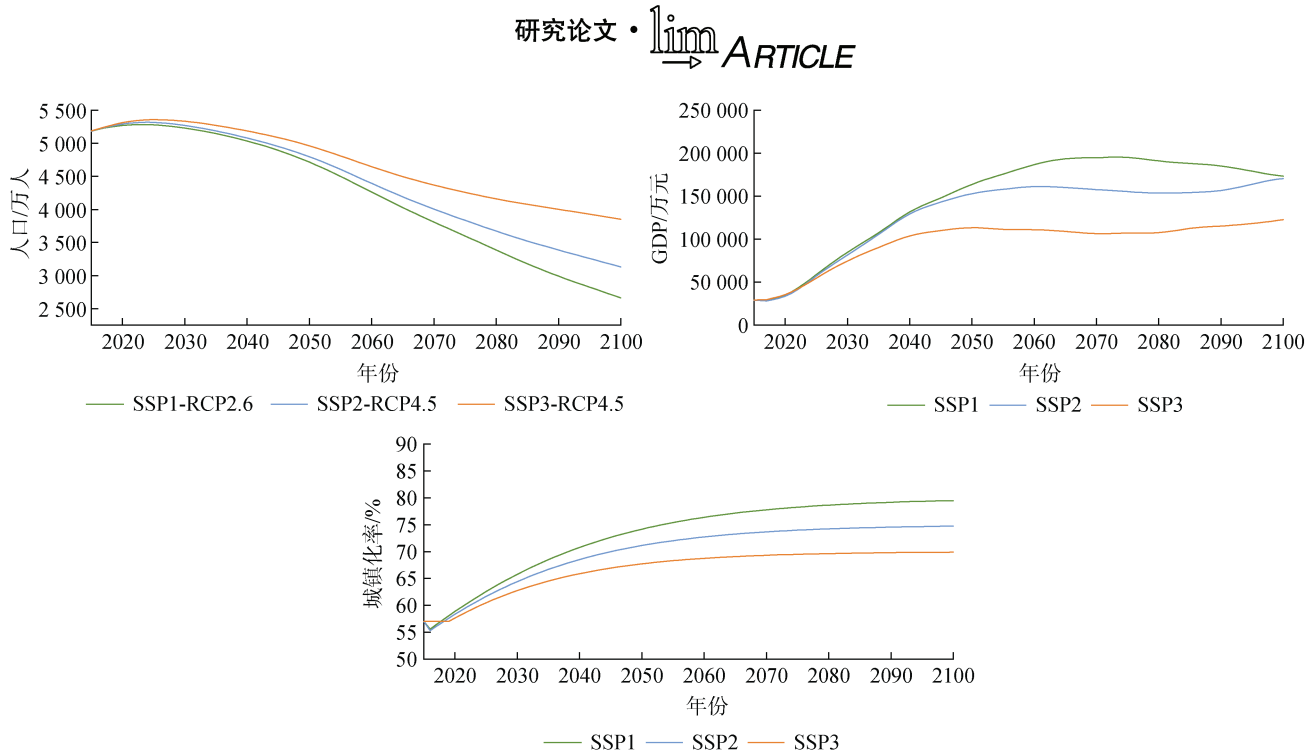


图3 人口、GDP、城镇化率未来趋势
Fig. 3 Future trend of the population, urbanization rate, and GDP

2.2.2 土地需求多情景 SD 模型

针对未来时期经济社会发展的三种情景,利用SD模型建立未来时期的土地需求模拟模型。土地利用系统是由人口、经济、土地、生态环境等多因素驱动的具有一定演化规律的复杂高阶系统^[25],通过构建土地利用SD模型,探索和理解社会经济以及政策等因素引起土地利用需求变化的特征与机制,进而实现对未来土地需求的模拟。

在模型中,人口和经济作为宏观主导因素,显著影响各地类的需求量及变化过程;固定资产和各类产业的投资比例在一定程度上反映了政府的政策方向,在系统中将其看作政策调控;人均城镇建设用地面积、城市土地集约利用强度、科技进步、湿地保护强度、耕地保护强度视为未来时期各地类的定性趋势变量,对应三种情景分别设置高中低三种趋势模式,使用可以构造变量之间非线性关系的表函数来表达定量关系^[26];海岸带土地利用类型及其变化过程复杂多样,不可能完全展现全部变化过程,而且并非每一种过程都具有稳定的系统性变化模式,因此,一方面,将部分模式简化为2000—2015年变化均量,另一方面,将未利用地视为调控地类,以保持区域总面积的恒定。

经过反复调试和不断优化,得到山东海岸带土地利用需求变化系统动力学模型(图4),模型中所定

义的变量关系较为合理,能够比较准确地反映海岸带土地利用的系统结构与作用机制,利用该模型得到2015年土地利用模拟值,将其与基于遥感技术的观测值进行对比,表明,除了作为总面积“调节器”的未利用地之外,其余8个地类的误差绝对值均小于5%(表3),参照Wang et al.的研究^[27]认为误差可以接受,模型有效。在此基础上,以2015年为模拟基期,模拟获得至2100年三种情景逐年的土地利用需求时间序列数据。

2.2.3 FLUS 模型

FLUS模型是用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化,获得未来时期土地利用空间分布情景的模型。FLUS模型基于神经网络的出现概率(probability-of-occurrence)计算模块使用ANN方法训练和评估每个栅格土地利用类型发生的概率^[28],并对传统的元胞自动机(CA)模型进行较大改进,基于自适应惯性机制的CA空间模拟模块进行用地空间配置,采用基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,能有效处理多种土地利用类型在自然因素与人类活动共同影响下发生相互转化时的不确定性与复杂性,具有较高的模拟精度并能获得与现实土地利用分布非常相似的结果^[29]。基于自适应惯性机制的CA对邻域影响的计算公式为:

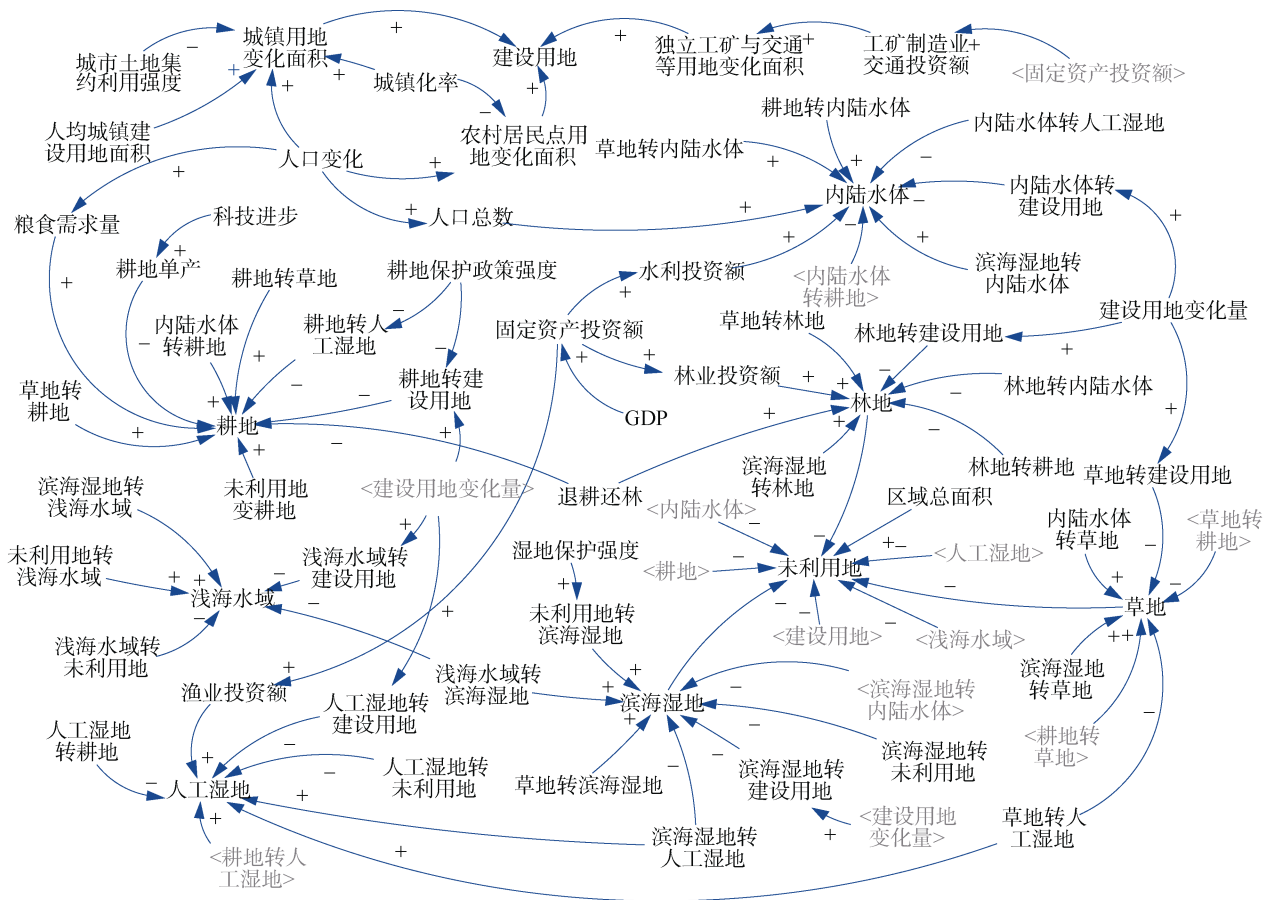


图 4 山东海岸带土地利用系统动力学因果关系图

Fig. 4 Causality diagram of the land-use system dynamics in the Shandong coastal zone

注: +为正相关, -为负相关, <***>为影子变量

表 3 山东海岸带土地利用系统动力学模型校验

Tab. 3 Verification of the dynamic model of the land-use system in the Shandong coastal zone

土地利用类型	2015 年观测值/km ²	2015 年模拟值/km ²	误差/%
耕地	59 152.50	59 430.00	0.469 1
林地	6 220.18	6 181.00	-0.629 9
草地	8 507.00	8 739.00	2.727 2
建设用地	14 004.55	13 330.00	-4.816 7
内陆水体	3 263.07	3 320.00	1.744 7
滨海湿地	1 503.22	1 516.00	0.850 2
浅海水域	19 527.05	19 730.00	1.039 3
人工湿地	2 948.79	3 074.17	4.251 9
未利用地	1 098.01	904.20	-17.651 0

$$\Omega_{p,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k, \quad (1)$$

式中, t 表示时间, p 为元胞单元, k 为用地类型, $\Omega_{p,k}^t$ 表示邻域影响程度, $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示在上一

次迭代结束后第 $N \times N$ 的 Moore 邻域窗口内 k 种地类的栅格总数, w_k 为邻域作用的权重。

自适应惯性系数用于判断特定土地利用类型的发展趋势与实际需求是否存在较大差距, 如存在, 则在下一次迭代中调整该土地利用的发展趋势, 从

而动态控制该土地利用类型的数量^[29], 其表达式为:

$$I_k^t = \begin{cases} I_k^{t-1} & \text{if } |D_k^{t-2}| \geq |D_k^{t-1}| \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & \text{if } 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1}, \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & \text{if } D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, I_k^t 表示 k 种地类在 t 时刻的自适应惯性系数, D_k^{t-1} 、 D_k^{t-2} 分别为 $t-1$ 、 $t-2$ 时刻第 k 种用地类型的栅格数与需求数量之差。

运用 FLUS 模型模拟至 2100 年山东海岸带土地利用空间分布, 区分近期(至 2030 年)、中期(2031~2050 年)和远期(2051~2100 年)3 个时间阶段, 逐渐放宽地类转换系数。选取均匀采样模式, 基于基期(2015 年)土地利用数据和土地利用变化驱动因子数据, 将各因素进行归一化, 提取 0.1% 的栅格样本进行 ANN 训练及适宜性概率计算。基于 2015 年土地利用现状数据计算近期(至 2030 年)模型模拟所需的适宜性概率集, 模拟获得 2030 年土地利用空间分布数据; 基于 2030 年模拟结果计算中期(2031~2050 年)模型模拟所需的适宜性概率集, 模拟获得 2050 年土地利用空间分布数据; 依次类推, 计算远期(2051~2100 年)模型模拟所需的适宜性概率集并得到 2100 年土地利用空间分布数据。

3 结果分析

3.1 土地需求发展态势

山东海岸带土地需求多情景模拟结果如图 5 所示。整体上, 三种情景之间, 尤其是情景 B 与情景 C 之间, 各地类的需求面积变化趋势较为相近, 近期将延续当前土地利用变化趋势, 中期之后差异逐渐增大。

地类之间相比, 面积需求变化趋势差异显著。耕地面积近期大幅度减少, 长期则呈现为缓慢减少。林地面积呈增加趋势, 较大可能性以经济林和果园增加为主, 情景 A 增加幅度最大。草地面积先下降后上升, 但 2015—2100 年间 3 种情景均为净减少。建设用地面积在情景 A 将显著减少, 在情景 B 保持稳定状态, 在情景 C 则呈现小幅增加趋势。内陆水体面积三种情景均为显著减少趋势。滨海湿地面积整体呈现近期下降、中远期上升的趋势。滨海湿地具有很高的生态服务价值^[30], 在应对海平面上升、抵御自然灾害方面作用突出, 是可持续发展路径值得重

点保护和修复的地类; 在不考虑海平面上升的情况下, 社会经济发展的承载空间会继续向海拓展, 因此, 浅海水域面积呈下降趋势; 居民生活质量的不断提高, 对海水养殖业的需求有很大上升空间, 因此, 人工湿地需求面积总体呈上升趋势。

3.2 土地利用多情景空间模拟结果

运用 FLUS 模型得到 2030、2050 和 2100 年多情景土地利用空间分布结果(图 6), 统计土地利用结构(表 4), 将其与土地需求 SD 模型的模拟值(图 5)相比较, 耕地、林地、草地、建设用地、内陆水体、浅海水域相差 1.5% 以内, 滨海湿地与人工湿地相差在 9.6% 以内, 表明 FLUS 模型的模拟效果总体很好。

3.2.1 情景 A: 可持续发展路径

经济社会发展对土地资源的依赖性较小, 土地利用变化主要反映生态地类的保护与恢复, 主要地类逐渐集中分布。近、中期建设用地仍需扩张, 到 2050 年扩张到 14 520.10 km², 以城市为中心扩张, 相近的城市逐渐聚合为一体; 远期, 随着城镇化率的提高, 土地集约利用加上社会经济发展低空间需求, 建设用地中的农村居民点减少, 海岸线附近的建设用地有修复为湿地的趋势。到 2100 年, 林地、草地、湿地有相应的扩张趋势, 林地在陆域扩张明显, 草地主要在莱州湾东部有扩张趋势, 滨海湿地空间分布由破碎化向恢复和扩大的趋势发展; 集中发展海水养殖等产业可有效促进滨海湿地保护与修复, 提升海岸带的防灾减灾能力。

3.2.2 情景 B: 经济社会适中发展路径

经济社会发展对土地资源的需求适中, 各地类需求面积在三种情景中基本处于中间位置。与情景 A 相比, 建设用地和滨海湿地的面积变化差异显著, 到 2100 年建设用地需求面积将增至 16 152.90 km², 滨海湿地面积仅增至 1 599.33 km²。远期, 黄河三角洲继续逐渐向海扩张, 建设用地及人工湿地的面积增加, 岛屿空间开发比较明显, 靠近海岸线的林草地逐渐萎缩, 海陆交互地带的未利用地比较多。

3.2.3 情景 C: 逆全球化的区域竞争路径

全球经济社会摩擦严重, 带来的高度竞争反映到土地利用系统, 将加大土地利用程度以及建设用地面积的显著增长。到 2100 年建设用地面积将增至 17 114.80 km², 在东部沿海地区的扩张尤为明显。林地、草地、内陆水体、滨海湿地等地类的面积存量明显低于情景 A 和 B; 人工湿地与耕地向海扩张趋势明显, 也表明情景 C 的人地冲突在三种情景中最为严重。

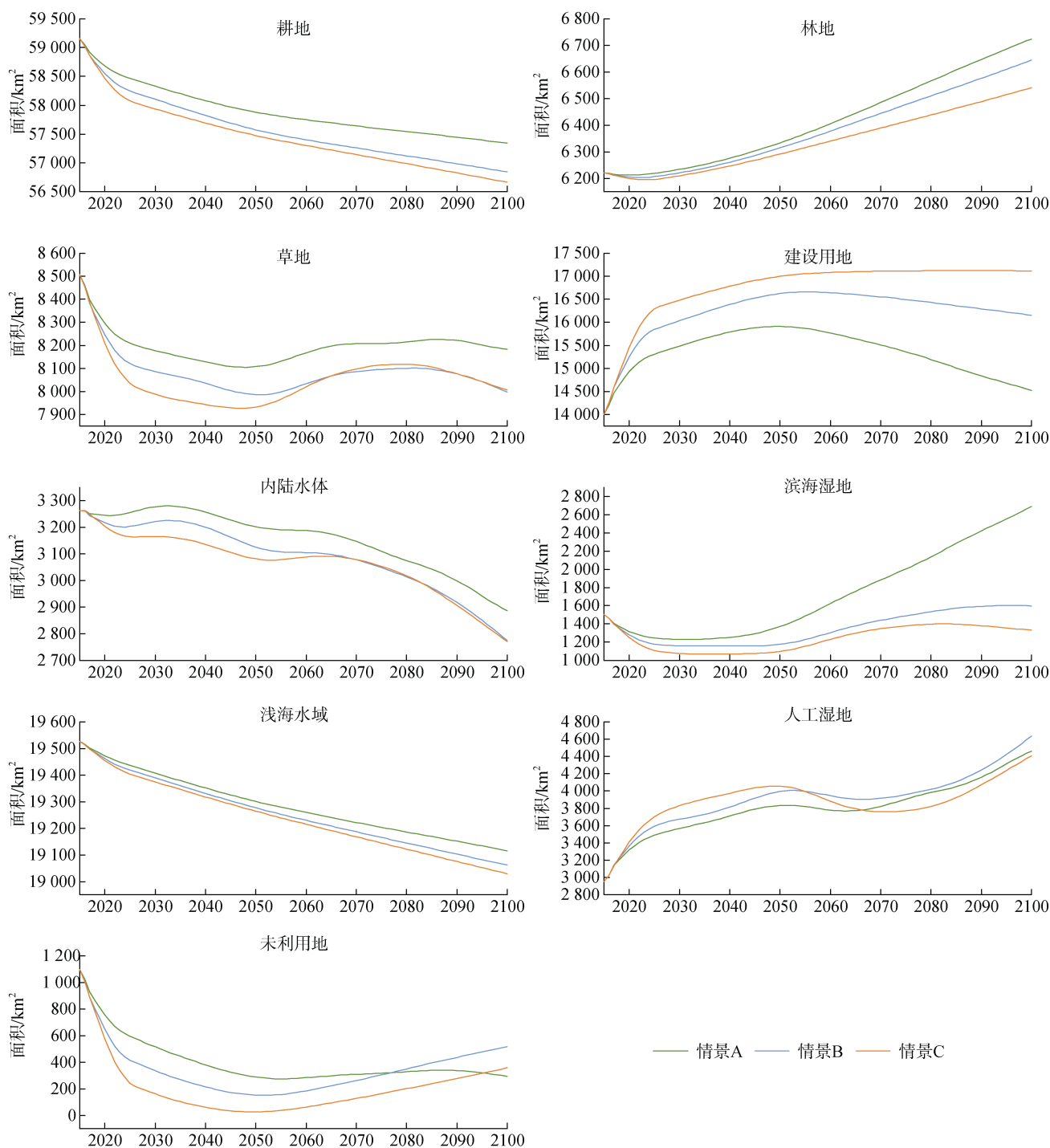


图5 山东海岸带土地需求情景模拟结果

Fig. 5 Simulation results of the land demand in the Shandong coastal zone

4 结论与讨论

针对山东海岸带区域,在对未来经济社会发展长期态势进行分析和情景设定的基础上,建立土地利用变化分析和模拟的SD-FLUS模型,自上

而下的面积需求预测与自下而上的空间模拟相结合,得到至2100年多情景土地需求时间序列模拟结果,以及近期(2030年)、中期(2050年)、远期(2100年)土地利用空间分布模拟结果。主要结论如下:

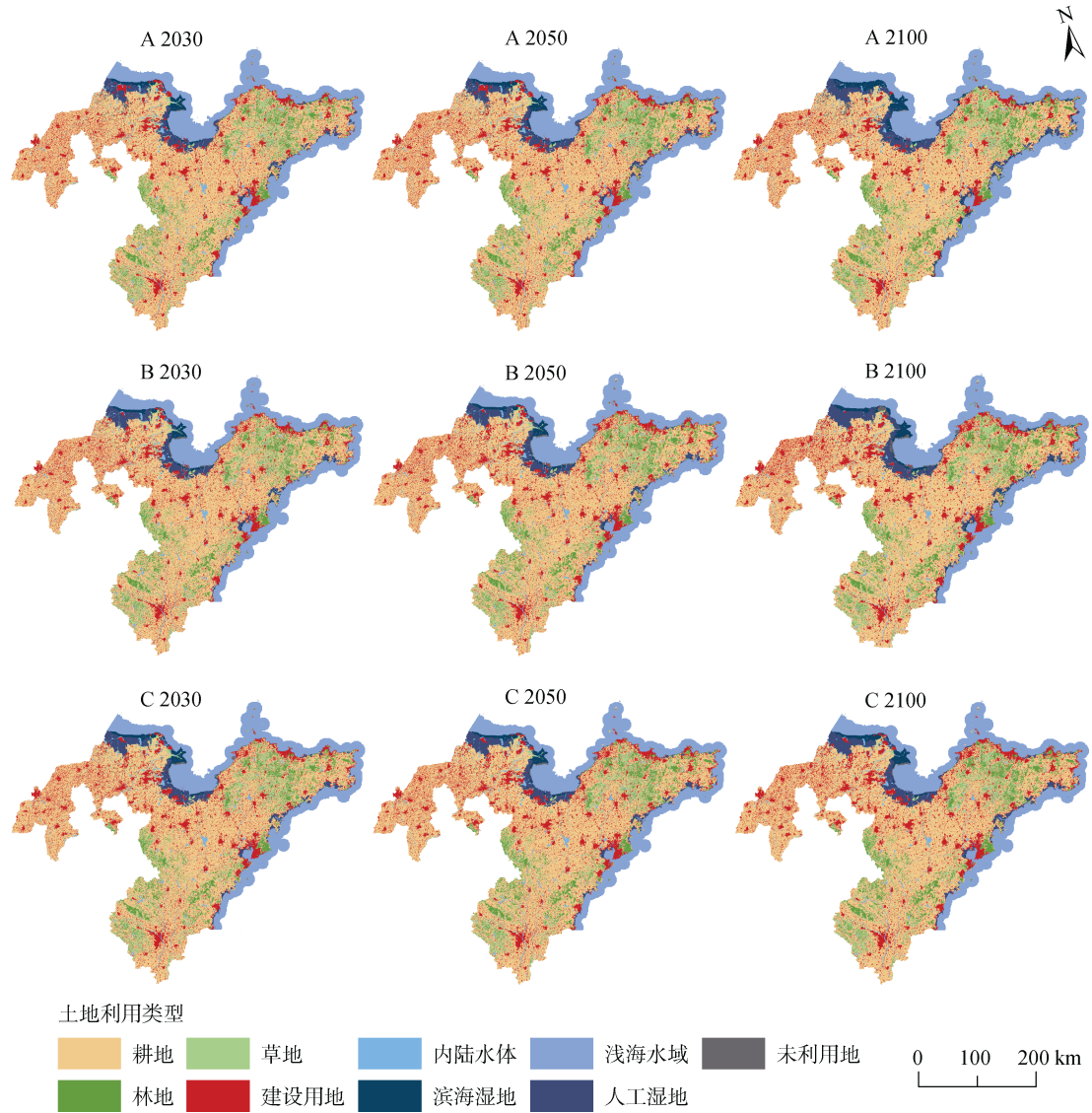


图 6 近、中、远期土地利用多情景空间格局模拟结果

Fig. 6 Simulation results of the multi-scenario spatial pattern of the near, medium, and long-term land use

表 4 山东海岸带近、中、远期土地利用结构多情景模拟结果

Tab. 4 Simulation results of near, medium, and long-term land use structure in the Shandong coastal zone

地类	2015 年/km ²	2030 年/km ²			2050 年/km ²			2100 年/km ²		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
耕地	59 152.50	58 240.00	58 100.00	57 940.00	57 820.00	57 570.00	57 470.00	57 400.00	56 840.00	56 660.00
林地	6 220.18	6 234.00	6 220.00	6 210.00	6 332.31	6 277.08	6 281.65	6 724.00	6 643.98	6 541.00
草地	8 507.00	8 177.00	8 086.00	7 987.00	8 107.00	7 986.00	7 932.00	8 183.81	7 996.00	8 006.00
建设用地	14 004.55	15 710.00	15 868.40	16 316.42	16 020.00	16 620.00	17 000.00	14 120.00	16 150.00	17 110.00
内陆水体	3 263.07	3 270.00	3 222.00	3 166.00	3 199.00	3 127.00	3 082.00	2 901.00	2 775.00	2 771.00
滨海湿地	1 503.22	1 217.00	1 160.00	1 076.00	1 342.38	1 177.00	1 099.00	2 478.81	1 599.00	1 275.06
浅海水域	19 527.05	19 400.00	19 448.16	19 370.00	19 389.87	19 428.91	19 264.60	19 421.51	19 068.65	19 308.55
人工湿地	2 948.79	3 536.07	3 674.55	3 830.90	3 748.51	3 740.98	3 940.01	4 464.30	4 634.24	4 403.29
未利用地	1 098.01	440.30	445.26	328.05	265.30	297.40	155.11	530.94	517.50	149.47

(1) 情景 A、B、C 的人口与经济发展趋势相近, 但亦存在显著差异。情景 A 人口较少, 城市化及经济发展水平较高; 情景 B 各因素发展趋势适中; 情景 C 人口数量多, 城市化和经济发展水平较低。

(2) 三种情景各地类需求面积变化趋势, 近期差异较小, 将延续以往的土地利用变化特征, 中期之后不同情景之间土地利用变化的差异将明显增强。情景 B 与情景 C 的变化趋势更为接近。情景 A 经济社会发展对土地资源的依赖性较小, 有助于各种生态型地类的保护与恢复; 情景 B 经济社会发展对土地资源的需求在三种情景中处于中间位置; 情景 C 经济社会发展对生活、生产用地的需求显著, 建设用地面积增长最多, 滨海湿地面积萎缩趋势显著。

(3) 近期、中期、远期土地利用空间分布模拟结果显示, 情景 A 地类趋向集中分布和格局优化的态势显著, 情景 B 黄河三角洲继续扩张、建设用地及人工湿地扩展、海岸带林草地萎缩、岛屿开发的趋势比较明显, 情景 C 建设用地向外围扩张、人工湿地与耕地向海扩张的趋势均较为显著。

对山东海岸带土地利用进行长时期的情景分析和模拟, 虽然多情景之间存在较为明显的差异, 但整体来看, 土地利用需求仍将持续, 三生(生产、生活、生态)空间向海拓展趋势仍较为显著, 如果考虑未来海平面上升带来的土地淹没风险将有加剧趋势, 则未来时期海岸带区域的人地矛盾将会更加突出。为此, 针对山东海岸带区域, 未来时期, 建议进行近、中、远期战略规划, 近期资源环境约束问题仍较突出, 平衡和协调生态保护与经济社会发展之间在土地利用方面的竞争关系至关重要; 中期土地利用变化幅度减缓, 但土地冲突问题尚未消除, 宜进一步优化土地利用结构和格局以及完善陆海统筹等相关政策; 远期, 应高瞻远瞩, 重点考虑由于人口、经济和社会重大转型而引发的土地利用结构转型问题, 将更多的土地转向生态空间, 提升海岸带生态系统服务功能, 应对不断加剧的海岸带灾害风险。

参考文献:

[1] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
LUO Yongming. Sustainability associated coastal eco-environmental problems and coastal science development in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1133-1142.

[2] RAMESH R, CHEN Z, CUMMINS V, et al. Land-ocean interactions in the coastal zone: Past, present & future[J]. Anthropocene, 2015, 12: 85-98.

[3] 侯西勇, 邸向红, 侯婉, 等. 中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1478-1488.
HOU Xiyong, DI Xianghong, HOU Wan, et al. Accuracy evaluation of land use mapping using remote sensing techniques in coastal zone of China[J]. Journal of Geoinformation Science, 2018, 20(10): 1478-1488.

[4] 邹利林, 刘彦随, 王永生. 中国土地利用冲突研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2): 298-309.
ZOU Lilin, LIU Yansui, WANG Yongsheng. Research progress and prospect of land-use conflicts in China[J]. Progress in Geography, 2020, 39(2): 298-309.

[5] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
LIU Jiyuan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802.

[6] 杨微石, 戴尔阜, 郑度, 等. 基于多主体模型的典型区域退耕还林工程实施空间模拟[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1983-1995.
YANG Weishi, DAI Erfu, ZHENG Du, et al. Spatial simulation of "Grain to Green Program" implementation in a typical region based on agent-based model[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1983-1995.

[7] 范树平, 程从坤, 刘友兆, 等. 中国土地利用/土地覆盖研究综述与展望[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(2): 94-101.
FAN Shuping, CHENG Congkun, LIU Youzhao, et al. Review and prospect on land use /cover research in China[J]. Areal Research and Development, 2017, 36(2): 94-101.

[8] 张世伟, 魏璐瑶, 金星星, 等. 基于 FLUS-UGB 的县域土地利用模拟及城镇开发边界划定研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1848-1859.
ZHANG Shiwei, WEI Luyao, JIN Xingxing, et al. The land use simulation and delimitation of urban development boundary in county area based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(9): 1848-1859.

[9] HASAN S, SHI W, ZHU X, et al. Future simulation of land use changes in rapidly urbanizing south China based on land change modeler and remote sensing data[J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4350.

[10] 单泳敏, 王海军, 张彬, 等. 顾及土地生态安全的环鄱阳湖城市群土地利用情景模拟[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 543-556.
SHAN Luyi, WANG Haijun, ZHANG Bin, et al. Land use simulation of the city clusters around poyang lake

- based on land ecological security assessment[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3): 543-556.
- [11] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模拟研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2005, 5: 464-473.
HE Chunyang, SHI Peijun, CHEN Jin, et al. Land use scenario model based on system dynamics model and cellular automata model[J]. *Science in China*, 2005, 5: 464-473.
- [12] 许联芳, 张海波, 张明阳, 等. 南方丘陵山地带土壤保持功能及其经济价值时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(9): 1599-1605.
XU Lianfang, ZHANG Haibo, ZHANG Mingyang, et al. Spatial-temporal variation characteristics of the soil conservation function and its economic value in the southern hill and mountain area, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(9): 1599-1605.
- [13] 金宇宏, 王海军, 贾克敬, 等. 基于系统动力学的中国土地利用系统健康评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1064-1074.
JIN Yuhong, WANG Haijun, JIA Kejing, et al. Evaluation of China's land use system health based on system dynamics[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5): 1064-1074.
- [14] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 等. 纳入空间自相关的FLUS模型在土地利用变化多情景模拟中的应用[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 531-542.
ZHANG Jingdu, MEI Zhixiong, LV Jiahui, et al. Simulating multiple land use scenarios based on the FLUS model considering spatial autocorrelation[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3): 531-542.
- [15] DI X H, HOU X Y, WANG Y D, et al. Spatial-temporal characteristics of land use intensity of coastal zone in China during 2000–2010[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(1): 51-61.
- [16] VAKHSHOORI V, ZARE M. Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods[J]. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2016, 7(5): 1731-1752.
- [17] 苏红帆, 侯西勇, 邸向红. 北部湾沿海土地利用变化时空特征及情景分析[J]. *海洋科学*, 2016, 40(9): 107-116.
SU Hongfan, HOU Xiyong, DI Xianghong. Spatio-temporal characteristics and scenario analysis of land-use change in the Beibu Gulf Economic Rim coastal area, China[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(9): 107-116.
- [18] BARROS C B, STOCKER V, QIN D, et al. IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [19] CHEN Y D, GUO F, WANG J C, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 83.
- [20] 姜彤, 赵晶, 曹丽格, 等. 共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(1): 50-58.
JIANG Tong, ZHAO Jing, CAO Lige, et al. Projection of national and provincial economy under the shared socioeconomic pathways in China[J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2018, 14(1): 50-58.
- [21] 侯西勇, 毋亭, 侯婉, 等. 20世纪40年代初以来中国大陆海岸线变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 59(9): 1791-1802.
HOU Xiyong, WU Ting, HOU Wan, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1791-1802.
- [22] CARPENTER S R, BENNETT E M, PETERSON G D. Scenarios for Ecosystem Services: An Overview[J]. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 29.
- [23] VAN VUUREN D P, RIAHI K, MOSS R, et al. A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. 2012, 22(1): 21-35.
- [24] 翁宇威, 蔡闻佳, 王灿. 共享社会经济路径(SSPs)的应用与展望[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 215-222.
WENG Yuwei, CAI Wenjia, WANG Can. The application and future directions of the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2020, 16(2): 215-222.
- [25] 钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. *系统动力学(第二版)*[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
ZHONG Yongguang, JIA Xiaojing, QIAN Ying, et al. *System Dynamics(the second edition)*[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [26] 陶在朴. *系统动力学入门*[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2018.
TAO ZaiPu. *Introduction to system dynamics*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2018.
- [27] WANG Y C, SHEN J K, YAN W T, et al. Backcasting approach with multi-scenario simulation for assessing effects of land use policy using GeoSOS-FLUS software[J]. *Methodsx*, 2019, 6: 1384-1397.
- [28] 付玲, 胡业翠, 郑新奇. 基于BP神经网络的城市增长边界预测——以北京市为例[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(2): 22-30.
FU Ling, HU Yecui, ZHENG Xinqi. The prediction of urban growth boundary based on BP artificial neural networks: an application to Beijing[J]. *China Land Sciences*, 2016, 30(2): 22-30.
- [29] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simu-

lation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.

[30] 刘玉斌, 李宝泉, 王玉珏, 等. 基于生态系统服务价值的莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性评价[J]. *生态*

学报, 2019, 39(20): 7514-7524.

LIU Y B, LI B Q, WANG Y J, et al. Evaluation of ecological connectivity in the coastal zone of Laizhou Bay- Yellow River Delta based on ecosystem service value[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7514-7524.

Multi-scenario simulation of land use change in coastal zones —A case study of Shandong coastal zone

SONG Bai-yuan^{1, 2, 3, 4}, HOU Xi-yong^{1, 3, 4}, WANG Xiao-li^{1, 3, 4}, LIU Yu-bin^{1, 2, 3, 4}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 4. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Received: Nov. 18, 2020

Key words: land use; scenario analysis; system dynamic; coastal zone

Abstract: Long-term series scenario to simulate coastal land use have important guiding significance for integrated coastal management and sustainable development. Based on three scenarios, namely, SSP1-RCP2.6 (A-Sustainability Path), SSP2-RCP4.5 (B-Middle of the Economic and Social Development Path), and SSP3-RCP4.5 (C-Inverse Globalization of Regional Rivalry Path), a system dynamics (SD) model of land use demand in the coastal zone of Shandong province to 2100 was established. The FLUS model is then used to simulate the recent (2030), medium (2050), and long-term (2100) land use spatial distribution. Results show the following: (1) scenario A has a small population, a high level of urbanization, and a high level of economic development. Meanwhile, scenario B has a moderate development trend of various factors, and scenario C has a large population, a low level of urbanization, and a low level of economic development. (2) By 2100, the demand area change curves of different regions show significant situational differences and type differences. Scenario A is less dependent on land resources for economic and social development. The area demand of the main ground class in scenario B is at a medium level in three scenarios. In scenario C, economic and social development has a prominent demand for land for living and production, and the area of the construction land has a strong growth trend. (3) By 2100, there are significant differences in land use patterns and processes among the three scenarios. Scenario A tends to have a centralized distribution. The construction land will continue to expand in the near- and medium-term, but coastal wetlands can be effectively protected. For scenario B, the expansion of the construction land, the constructed wetland, and the shrinking trend of forest and grassland in the coastal zone are significant. Scenario C has the most significant expansion of the construction land. The constructed wetland and cultivated land tend to expand to the sea, while the coastal wetland shrinks significantly. Research results can provide scientific support for coastal zone management to make long-term strategic decisions.

(本文编辑: 康亦兼)