

黄河三角洲—莱州湾海岸带土地利用变化特征及多情景分析

宋百媛^{1,2,3}, 侯西勇^{1,3}, 刘玉斌^{1,2,3}

(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)

摘要: 针对自然因素和人文因素耦合影响显著并发生显著变化的黄河三角洲—莱州湾海岸带区域, 基于 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年土地利用数据, 分析土地利用的变化特征, 并对 2025 年土地利用进行多情景分析与模拟。结果表明: (1)黄河三角洲—莱州湾海岸带土地利用类型以耕地为主, 湿地类型多样、分布广泛, 由海向陆大体呈现“浅海水域→滨海湿地→人工湿地→陆域多类型混合区域”的格局特征; (2)2000—2015 年间建设用地和人工湿地显著增加, 而其他类型则显著减少, 但区域层面土地利用变化速度和强度逐渐降低的趋势和特征显著; (3)土地利用类型间的转移呈现由自然型和生态型地类向人工型地类转变以及土地利用程度逐渐增高的趋势; (4)至 2025 年土地利用多情景分析结果显示, 趋势延续(Business as Usual, BAU)情景中自然型地类向人工型地类的转变仍较剧烈, 但显著低于经济社会发展(Social and Economic Development, SED)情景, 生态保护优先(Ecological Protection Priority, EPP)情景通过充分挖掘未利用地的资源优势, 较好地促进了发展与保护之间的平衡; (5)建议加强天然湿地保护, 重视未利用地资源的高效利用, 促进海岸带生态保护和经济社会发展。

关键词: 土地利用变化; 情景分析; 黄河三角洲; 莱州湾; 海岸带

中图分类号: P748 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)10-0024-11

DOI: 10.11759/hyhx20181007002

土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)是人类社会经济活动行为与自然生态过程交互和链接的纽带, 直接反映人类活动与自然环境的相互作用强度与影响特征^[1-2]。国际全球环境变化人文因素计划(International Human Dimensions Programme, IHDP)和国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)于 1995 年联合提出了 LUCC 计划, 成为土地利用/覆被变化研究领域的历史性转折点; 于 2006 年提出的全球土地计划(Global Land Plan, GLP)将 LUCC 研究推进入快速发展阶段。在国际综合评估中, LUCC 研究可概括为变化过程、变化驱动力机制和模型开发与应用 3 个核心问题^[3-4]。其中, 土地利用变化过程监测是 LUCC 研究的基础, 多是基于连续的多期土地利用数据, 分析区域土地利用变化的特征与机制; 土地利用变化情景分析和模拟则是 LUCC 研究的热点, 国内外学者根据研究的需要选用不同的模型对流域、矿区、城市等类型区域的土地利用变化进行模拟, 常用的方法有马尔可夫(Markov)模型、系统动力学(Systems Dynamics, SD)模型、元胞自动机(cellular automata,

CA)模型、土地利用转化及其效应(conversion of land use and its effects, CLUE)模型、多智能体(Multi-agent System, MAS)模型以及混合模型等^[5-8]。

随着人类活动与自然环境之间相互作用的加剧, 越来越多的研究聚焦于人地关系矛盾尖锐、生态环境脆弱、人口与城市化快速发展的地区^[9]。海岸带是陆地和海洋之间的过渡地带, 是典型的生态交错带和脆弱区, 也是开发利用强度最高的区域之一^[10]。在我国, 主要是 20 世纪 90 年代以来, 随着社会经济持续快速发展, 沿海区域率先进入快速城市化和工业

收稿日期: 2018-10-07; 修回日期: 2019-01-02

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-STZ-ZDTP-023); 中国科学院烟台海岸带研究所自主部署项目(YICY755011031, YICY755021012); 国家自然科学基金项目(31461143032)

[Foundation: Science and Technology Service Network Initiative (STS) Project of the Chinese Academy of Sciences, No. KFJ-STZ-ZDTP-023; The Self-deployment project of Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, No. YICY755011031, No. YICY755021012; National Natural Science Foundation of China, No. 31461143032]

作者简介: 宋百媛(1995-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为海岸带土地利用变化监测与模拟、海岸带脆弱性评价, E-mail: bysong@yic.ac.cn; 侯西勇, 通信作者, 研究员, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

化阶段^[11], 与此相应, 海岸带土地利用呈现出新的变化特征和趋势, 因而成为新时期区域发展研究的重要部分。黄河三角洲—莱州湾海岸带区域包含河口三角洲和海湾海岸带 2 大地貌类型, 在长期的海陆交互作用基础上, 加上经济快速发展的刺激, 致使土地利用类型复杂多样、变化迅速, 是海岸带土地利用变化研究的代表性和热点区域。已有很多学者针对黄河三角洲和莱州湾区域的土地利用/覆盖变化开展了研究, 例如: 叶庆华等对黄河三角洲土地利用时空进行复合变化图谱分析^[12]; 张成扬和赵智杰对黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素进行了定量分析^[13]; 张宝雷等基于复杂网络对黄河三角洲进行土地利用变化过程研究^[14]; 齐善忠和蔡文华对莱州湾海岸带土地利用变化及环境灾害进行了研究^[15]等。这些研究较好地揭示了黄河三角洲、莱州湾海岸带土地利用变化的历史特征和基本规律, 揭示并指出建设用地面积和比例快速增加、自然湿地有增有减但总面积和比例不断减少是土地利用/覆盖变化的最基本特征, 河口三角洲发育、工业化、城市化、围填海和农业发展等是土地利用变化的主要原因, 但将黄河三角洲和莱州湾海岸带作为一个整体并对该区域土地利用演化过程及未来趋势进行分析和模拟的研究则未见报道, 因此, 在前人研究进展的基础上, 本文将黄河三角洲和莱州湾海岸带作为一个整体, 强调陆海兼顾基于遥感技术监测土地利用变化的历史特征, 并利用 Markov 方法和基于 CA 技术的未来土地利用模拟(Future Land Use Simulation, FLUS)模型对土地利用的未来变化趋势进行多情景分析和模拟, 以期对黄河三角洲—莱州湾海岸带区域土地资源的可持续利用及海岸带综合管理决策提供科学依据。

1 研究区域概况

黄河三角洲—莱州湾海岸带地处渤海南部、山东半岛北部(图 1), 包括黄河三角洲和莱州湾海岸带 2 个地貌单元, 介于 117°52′~120°74′E、36°28′~38°28′N。西北部为黄河三角洲, 自 1855 年黄河改道以来快速淤积, 河口湿地面积不断增加, 成为世界上增长最快的三角洲; 东南部为莱州湾海岸带, 有支脉河、小清河、弥河、白浪河、虞河、潍河、胶莱河等注入, 海湾东部濒临胶东半岛西北部山地, 沿其山前堆积平原发育砂质海岸。黄河三角洲—莱州湾海岸带处于海陆交互的生态过渡带, 生态环境较为脆弱, 抗干

扰能力弱, 存在咸水倒灌、海岸侵蚀、盐碱化、风暴潮等灾害。本文以陆城市县行政边界和海域-6 m 等深线确定研究区的边界, 包括无棣县、沾化县、河口区、利津县、垦利县、东营市辖区、广饶县、寿光市、潍坊市辖区、昌邑市、平度市、莱州市、招远市和龙口市以及-6 m 等深线覆盖的浅海水域, 总面积约 2.86 万 km²。该区域涉及黄河三角洲高效生态经济区和山东半岛蓝色经济区 2 大战略规划, 经济快速发展, 人口不断增加, 工农业较为发达, 人类活动越来越强烈。

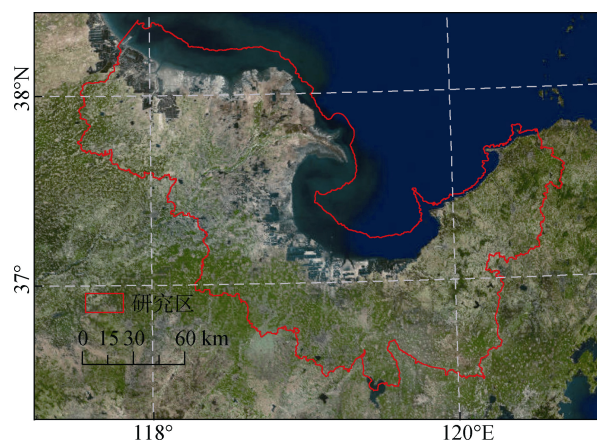


图 1 黄河三角洲—莱州湾海岸带的位置、范围与概貌
Fig.1 Location, boundary, and overview of the Yellow River Delta and Laizhou Bay coastal zone

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

基于 2000 年 1:10 万中国土地利用数据库^[2]和 Landsat TM 卫星影像, 通过分类系统调整和图斑修改, 获得 2000 年中国海岸带土地利用数据, 进而, 通过动态更新依次获得 2005 年、2010 年和 2015 年中国海岸带土地利用数据^[16-17]。该数据集将海岸带土地利用分为 8 个一级类型、24 个二级类型^[18], 从中提取黄河三角洲—莱州湾海岸带区域 4 个年份的数据用于本研究; 为便于研究以及突出区域特征, 将数据重分类为耕地、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共 9 个类型。土地利用分布与变化受到多重因素的驱动和影响, 根据已有研究的经验总结^[19-20]和研究区实际及数据可获取性, 情景分析与模拟选取 6 个驱动力因子, 数据源及其处理如表 1 所示。

表 1 驱动力因子数据来源与处理

Tab.1 Data source and processing method of driving forces

驱动力因子	来源	处理
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、铁路矢量图	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	中国海岸线数据 ^[21]	进行欧氏距离分析

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化幅度

土地利用变化幅度主要反映不同土地利用类型面积总量的变化^[22], 表达式为:

$$R = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, R 表示研究时段内某一地类变化幅度; S_1 、 S_2 分别表示时段初期及末期某一土地利用类型面积。

2.2.2 土地利用变化速率

以单一土地利用动态度定量表示一定时间范围内某种土地利用类型变化的速度^[23]。正值表示该土地利用类型面积增加, 反之则减小; 具体衡量时使用绝对值, 绝对值越高, 表明该土地利用类型转换数量多, 变化相对剧烈, 反之则相对稳定。表达式为:

$$V = R \times \frac{1}{T}, \quad (2)$$

式中, V 表示研究时段内某一地类动态度; T 表示研究时段。

2.2.3 土地利用程度综合指数

土地利用程度综合指数反映土地利用的广度和深度, 用于定量表征土地利用的集约化水平。将土地利用程度按照土地自然综合体在社会因素影响下的状态分为 1 级(未利用地、浅海水域)、2 级(林地、草地、内陆水体、滨海湿地)、3 级(耕地、人工湿地)和 4 级(建设用地)4 种土地利用级别, 分别赋予 1、2、3、4 不同的分级指数, 并以土地利用类型面积比例作为权重, 加和得到 100~400 之间连续分布的土地利用程度综合指数, 体现人与自然交互的综合效应^[24], 表达式为:

$$I = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i, I \in [100, 400], \quad (3)$$

式中, I 为土地利用程度综合指数; A_i 为第 i 级土地利用程度分级的分级指数; C_i 为第 i 级土地利用程度分级的面积百分比; n 为土地利用程度的分级数。

2.2.4 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵来源于系统分析中对系统状

态与状态转移的定量描述^[25], 在土地利用变化分析中被广泛使用, 可以直接反映出土地的来源与去向, 全面显示区域土地利用的变化特征, 表达式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, P_{ij} 为状态转移矩阵, 矩阵元素是土地利用转移面积或转移比例。

2.2.5 Markov 模型

Markov 过程是一种具有“无后效性”的特殊随机运动过程^[26]。Markov 模型是一种基于转移概率的数学统计模型, 土地利用的动态演化过程具有较明显的马尔科夫性质, 因而可以利用土地利用类型的转移概率来对土地利用的面积进行预测^[27]。设 S_t 是一随机过程, 将某一时刻的土地利用类型对应于 Markov 过程的可能状态, 土地利用类型之间相互转换的面积比例作为转移概率。其公式为:

$$S_{t+1} = P_{ij} \cdot S_t, \quad (5)$$

式中, S_t 、 S_{t+1} 分别为 t 、 $t+1$ 时刻的系统状态; P_{ij} 为转移概率矩阵。

2.2.6 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以及未来土地利用情景的模型^[28]。该模型源自 CA, 但做了较大的改进: 采用能够有效处理非线性关系的神经网络算法(Artificial Neural Network, ANN)从一期土地利用数据与包含人为活动与自然效应的多种驱动力因子获取各类用地类型的适宜性概率。ANN 的优点是特别适用于模拟复杂的非线性系统, 显著优于多准则判断等传统分析方法^[29]; 从一期土地利用分布数据中采样, 能较好的避免误差传递的发生^[30]; 基于 CA 模型进行用地空间配置, 模拟过程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作用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且能获得与

现实土地利用分布非常相似的结果^[31]。模型具体使用 BP-ANN 方法,是一种多层前馈神经网络,分为输入层、隐藏层和输出层 3 层,用于训练和评估每个栅格土地利用类型发生的概率^[32]。

基于自适应惯性机制的元胞自动机,对邻域影响的计算公式为:

$$\mathcal{Q}_{p,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k, \quad (6)$$

式中, $\mathcal{Q}_{p,k}^t$ 表示邻域影响程度, $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示在 $N \times N$ 的 Moore 邻域窗口,上一次迭代结束后第 k 种地类的栅格总数, w_k 为各类用地的邻域作用的权重。

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^[31],其表达式为:

$$I_k^t = \begin{cases} I_k^{t-1} & \text{if } |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & \text{if } 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & \text{if } D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases}, \quad (7)$$

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。

2.2.7 情景分析与模拟

情景分析是对未来态势进行探测的常用方法,考虑多方面的因素从而预测多种可能情景,提供更加科学的参考依据^[33]。根据研究区土地利用和经济社会发展的现状特征,设置趋势延续(Business as Usual, BAU)、经济社会发展(Social and Economic

Development, SED)和生态保护优先(Ecological Protection Priority, EPP)三种情景,将目标年份设定为 2025 年,利用 2005—2015 年间的转移概率矩阵,基于 Markov 数学方法实现 3 种情景的总量计算:直接预测得到 BAU 情景,修改转移概率矩阵和地类转换限制矩阵,进而预测得到 SED 和 EPP 情景。多情景空间模拟使用 FLUS 模型,选取均匀采样模式,基于 2015 年土地利用现状和土地利用变化驱动因子,将各因素进行归一化,提取 0.1% 的栅格样本进行 ANN 样本训练及适应性概率计算。

3 结果与分析

3.1 土地利用数量变化特征

统计 4 个年份的土地利用面积,如表 2 所示;以 2015 年为例展示土地利用的宏观格局特征,如图 2 所示;土地利用面积净变化及变化速率特征分别如表 3、图 3 所示。

由表 2 和图 3 可知,黄河三角洲—莱州湾海岸带区域土地利用类型丰富:主要类型是耕地,约占 50%;其次为建设用地,占 12.53%,与耕地镶嵌,分布较为离散;浅海水域面积位列第 3,占 11.60%;人工湿地的面积比例为 8.55%,主要连片分布在海岸带区域;草地面积比例是 5.19%,主要分布于黄河三角洲及东部山地区域;滨海湿地、内陆水体、林地和未利用地的面积比例较小,林地主要分布在东南部山地,未利用地主要分布在沿海区域,包括盐碱地、沼泽地等。黄河三角洲—莱州湾海岸带土地利用由海向陆总体呈现出由“浅海水域→滨海湿地→人工湿地→陆域多类型混合区域”过渡的宏观格局特征。

表 2 土地利用数量结构特征

Tab.2 Characteristics of land-use structure

代码	类型	面积/km ²				面积比例/%			
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
1	耕地	14 374.72	14 749.27	14 208.27	14 097.26	50.30	51.61	49.72	49.33
2	林地	580.22	592.65	570.96	564.28	2.03	2.07	2.00	1.97
3	草地	2 238.03	1 693.83	1 544.07	1 481.92	7.83	5.93	5.40	5.19
4	建设用地	2 397.31	2 626.25	3 277.60	3 582.02	8.39	9.19	11.47	12.53
5	内陆水体	1 213.81	1 099.97	997.41	1 147.39	4.25	3.85	3.49	4.01
6	滨海湿地	1 990.61	1 678.74	1 311.64	1 221.30	6.97	5.87	4.59	4.27
7	浅海水域	3 569.07	3 499.01	3 455.63	3 315.43	12.49	12.24	12.09	11.60
8	人工湿地	1 278.04	1 916.34	2 396.82	2 444.16	4.47	6.71	8.39	8.55
9	未利用地	935.84	721.58	815.24	723.89	3.27	2.52	2.85	2.53

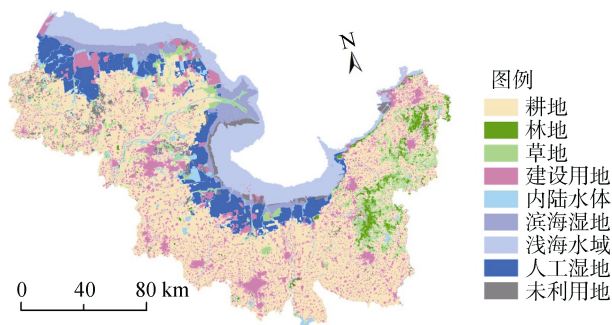


图2 土地利用的宏观格局(2015年)
Fig.2 Spatial pattern of land use in 2015

由表3、图3可以看出,建设用地区和人工湿地面积净增加趋势显著,相反,草地和滨海湿地面积净减少趋势显著,这表明黄河三角洲-莱州湾海岸带

区域的城镇化、工业化以及养殖业等处于快速发展的过程中。各地类变化幅度的绝对值介于 0.78%~49.94%之间,类型间的差异性以及时间阶段的差异性均较为显著:2000—2005 年,人工湿地增长和草地减少最显著;人工湿地的变化幅度高达 49.94%,变化速率为 9.99%,而草地则分别为-24.32%和-4.86%;2005—2010 年,建设用地和人工湿地的增长幅度在 25%左右,而滨海湿地的减少幅度则高达 21.87%;2010—2015 年,建设用地和内陆水体分别增加了 9.29%和 15.04%,而滨海湿地和未利用地则分别减少了 6.89%和 11.21%。综合三个时段,人工湿地和建设用地增长幅度大,相反,草地、滨海湿地和未利用地减少幅度大。

表3 土地利用变化的速率特征
Tab.3 Rate of land-use change

代码	土地 利用类型	变化幅度 $R/\%$				动态度 $V/\%$			
		2000—2005	2005—2010	2010—2015	2000—2015	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2000—2015
1	耕地	2.61	-3.67	-0.78	-1.93	0.52	-0.73	-0.16	-0.13
2	林地	2.14	-3.66	-1.17	-2.75	0.43	-0.73	-0.23	-0.18
3	草地	-24.32	-8.84	-4.03	-33.78	-4.86	-1.77	-0.81	-2.25
4	建设用地	9.55	24.8	9.29	49.42	1.91	4.96	1.86	3.29
5	内陆水体	-9.38	-9.32	15.04	-5.47	-1.88	-1.86	3.01	-0.36
6	滨海湿地	-15.67	-21.87	-6.89	-38.65	-3.13	-4.37	-1.38	-2.58
7	浅海水域	-1.96	-1.24	-4.06	-7.11	-0.39	-0.25	-0.81	-0.47
8	人工湿地	49.94	25.07	1.98	91.24	9.99	5.01	0.4	6.08
9	未利用地	-22.89	12.98	-11.21	-22.65	-4.58	2.6	-2.24	-1.51

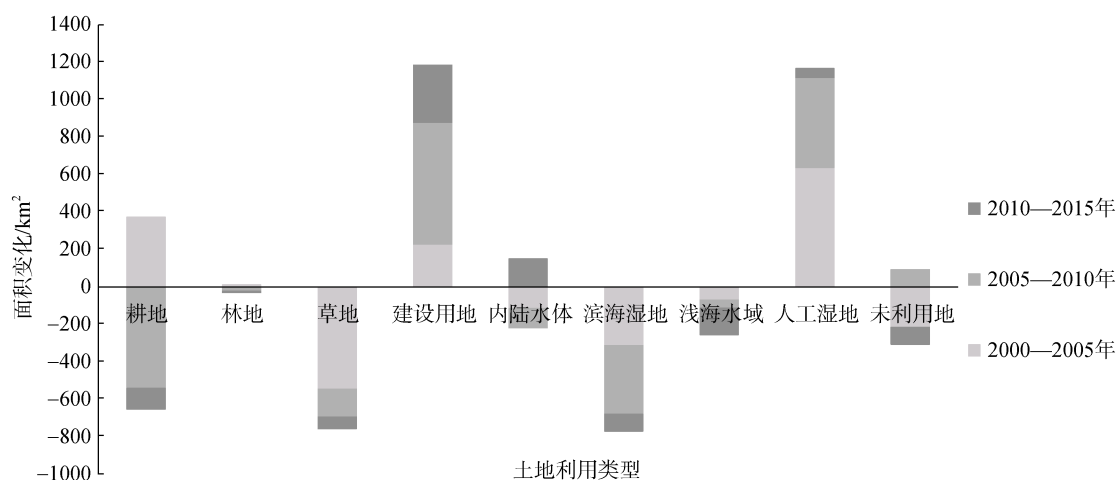


图3 土地利用面积净变化
Fig.3 Net change in land use between 2000 and 2015

各个地类不同时段的变化趋势差异显著:耕地和林地第1时段内小幅增加,后2个时段内则小幅

度减少;草地持续减少,变化幅度由 24.32%降低至 4.03%;建设用地持续扩张,变化幅度在 9%~25%;

内陆水体在前 2 个时段以 9% 的幅度缩减,但在第 3 时段扩增了 15.04%;滨海湿地面积减少的幅度在 6.89%~21.87%;浅海水域 15 a 间持续小幅度缩减;人工湿地在第 1 时段变化幅度为 49.94%,第 2 时段降为 25.07%,第 3 时段骤降至 1.98%,表明前 2 个阶段是海岸带盐业和养殖业大发展的时期。综合各地类近 15 a 的变化幅度,耕地、林地和浅海水域变化幅度相对较小,而其他地类较为剧烈;3 个时段相比,第 1 时段整体的变化幅度较为剧烈,后 2 个时段则逐渐降低,土地利用趋于稳定。

计算各个年份的土地利用程度综合指数,由于 1 级地类(未利用地、浅海水域)和 2 级地类(林地、草地、内陆水体、滨海湿地)面积总体减少,3 级地类(耕地、人工湿地)和 4 级地类(建设用地)面积总体增加,2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年土地利用程度综合指数分别为 255.79、261.93、266.10、268.82,呈较为显著的递增趋势。

3.2 土地利用面积转移特征

2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年

三个时段的土地利用面积转移矩阵如表 4 所示。各个时段耕地主要转变为建设用地,而其获得补充的主要来源有草地、内陆水体和未利用地。林地与草地互换以及向耕地、建设用地的转变较为显著,但不同阶段的转换方向及规模差异较大。草地主要转为耕地、人工湿地,其获得补充的主要来源是耕地、内陆水体、滨海湿地和未利用地。建设用地和人工湿地的扩张显著,前者主要占用耕地、滨海湿地和人工湿地,后者主要占用滨海湿地。内陆水体在第 1 时段大量变为人工湿地,后 2 个时段主要转变为耕地、草地、人工湿地和建设用地。滨海湿地大量转为人工湿地和建设用地。浅海水域在前 2 个时段主要转变为滨海湿地(河口沉积、水域变浅),在第 3 时段主要转变为建设用地、滨海湿地和未利用地。上述不同地类之间相互转移的可能性及规模特征体现了自然-经济社会耦合系统对土地利用变化的影响和制约,总体上,受经济发展驱动,土地利用转移呈现出由自然类型转向人工类型以及人工化程度和集约化水平梯级递升的特征。

表 4 土地利用转移矩阵(单位: km²)

Tab.4 Transitional matrix of land use (unit: km²)

		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	未利用地
2005 年										
2000 年	耕地	14 117.74	2.56	9.44	157.60	21.55	0.00	0.00	65.72	0.12
	林地	5.37	572.07	0.00	1.90	0.65	0.09	0.00	0.10	0.03
	草地	413.07	16.76	1 618.44	12.58	59.39	20.61	0.00	87.79	9.40
	建设用地	0.02	0.00	0.23	2 368.09	0.00	0.31	0.01	26.48	2.17
	内陆水体	48.65	0.28	4.05	26.78	980.67	11.87	0.00	138.40	3.10
	滨海湿地	2.00	0.86	51.15	15.50	13.57	1 591.81	0.20	279.30	36.21
	浅海水域	0.00	0.00	0.00	15.21	2.14	52.32	3 498.77	0.63	0.00
	人工湿地	6.84	0.00	1.71	20.92	4.68	0.25	0.00	1 240.65	2.98
	未利用地	155.58	0.12	8.81	7.67	17.32	1.48	0.02	77.27	667.57
2010 年										
2005 年	耕地	13 983.23	11.95	42.22	396.68	93.44	2.30	0.03	211.38	8.03
	林地	5.60	549.95	15.83	14.20	3.25	3.49	0.00	0.29	0.04
	草地	78.68	6.27	1386.70	57.61	32.51	44.68	0.01	57.45	29.94
	建设用地	20.70	1.15	18.26	2 542.11	5.99	5.85	0.06	22.28	9.84
	内陆水体	98.82	0.40	45.45	47.00	792.26	14.77	0.00	70.33	30.94
	滨海湿地	1.95	1.03	21.05	137.87	39.72	1 201.59	0.13	101.69	173.72
	浅海水域	0.04	0.06	0.00	8.33	0.95	18.61	3 455.33	5.46	10.24
	人工湿地	6.54	0.11	5.31	29.29	7.19	3.68	0.03	1859.57	4.60
	未利用地	12.71	0.03	9.25	44.51	22.10	16.66	0.05	68.38	547.89

续表

	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	未利用地
2015 年									
耕地	13 985.87	0.00	0.68	120.92	34.76	0.00	0.02	64.30	1.73
林地	0.19	563.99	0.00	5.74	1.02	0.00	0.02	0.00	0.00
草地	21.57	0.00	1 446.38	16.41	22.70	8.96		24.95	3.09
建设用地	7.44	0.00	0.56	3 163.49	44.60	4.77	0.17	56.55	0.00
2010 年 内陆水体	7.53	0.00	7.86	5.48	958.21	7.61	0.00	8.42	2.30
滨海湿地	0.00	0.00	2.36	1.28	52.24	1 144.46	2.42	97.80	11.08
浅海水域	0.17	0.00		42.62		36.21	3 312.75	6.02	57.87
人工湿地	23.53		8.32	166.04	15.79	0.81	0.01	2 156.13	26.17
未利用地	50.95	0.29	15.75	60.03	18.06	18.48	0.04	29.98	621.65

3.3 土地利用多情景模拟

至 2025 年土地利用多情景分析与模拟的结果如表 5 和图 4 所示。

3.3.1 BAU 情景

在 BAU 情景下直接基于 2005—2015 年土地利

用概率转移矩阵建立 Markov 模型, 所以延续 2005—2015 年的驱动力和驱动机制, 模拟结果表明: 与 2015 年相比, 至 2025 年耕地、林地、草地和湿地的减少态势以及建设用地和人工湿地的扩张态势较为显著, 土地利用程度综合指数将达到 275.08, 土地利用的破碎化程度也将愈加显著。

表 5 至 2025 年土地利用多情景结构特征

Tab.5 Structural characteristics of land-use scenarios by 2025

代码	类型	面积/km ²				面积比例/%			
		BAU	SED	EPP	2015 年	BAU	SED	EPP	2015 年
1	耕地	13 493.06	12 986.17	13 836.90	14 097.26	47.21	45.44	48.42	49.33
2	林地	537.15	542.79	576.87	564.28	1.88	1.90	2.02	1.97
3	草地	1 321.25	1 254.27	1 434.58	1 481.92	4.62	4.39	5.02	5.19
4	建设用地	4 464.09	4 961.77	4 275.61	3 582.02	15.62	17.36	14.96	12.53
5	内陆水体	1 161.56	1 106.17	1 307.65	1 147.39	4.06	3.87	4.58	4.01
6	滨海湿地	925.65	912.69	1 222.82	1 221.30	3.24	3.19	4.28	4.27
7	浅海水域	3 140.97	3 140.85	3 166.15	3 315.43	10.99	10.99	11.08	11.60
8	人工湿地	2 854.79	31 18.99	2 472.27	2 444.16	9.99	10.91	8.65	8.55
9	未利用地	679.11	553.94	284.80	723.89	2.38	1.94	1.00	2.53

3.3.2 SED 情景

该情景以持续满足快速的经济社会增长对土地资源的需求为基本特征, 其转移概率矩阵是对 2005—2015 年转移概率矩阵进行一定的修改而获得: 提高耕地转为建设用地和人工湿地的概率以及草地转为建设用地的概率; 降低林地转向草地的概率; 限制建设用地转变为其他类型; 提高滨海湿地转为人工湿地、建设用地的概率; 提高未利用地转为人工湿地的概率。模拟结果表明: 至 2025 年, 建设用地和人工湿地将大幅扩张, 滨海湿地则大幅缩减, 与 2015 年现状相比, 3 种类型的变化率分别达 38.52%、27.61%和-25.27%; 格局方面, 沿海区域土地利用的

人工化和破碎化特征极为显著; 土地利用程度综合指数将达到 278.15, 在 3 种情景中是最高的, 而且比 2015 年高出 3.47%。

3.3.3 EPP 情景

该情景以减缓自然型地类转向人工型地类、保证生态用地的面积、优化生态结构为导向, 其转移概率矩阵是对 2005—2015 年转移概率矩阵进行如下修改而获得: 耕地转为林地的概率加倍, 转向建设用地的概率减半; 林地转向耕地和草地的概率减半, 且限制转为建设用地和人工湿地; 草地转向耕地和建设用地的概率减半, 转为林地的概率加倍, 限制转为人工湿地; 限制建设用地转为其他地类; 内陆

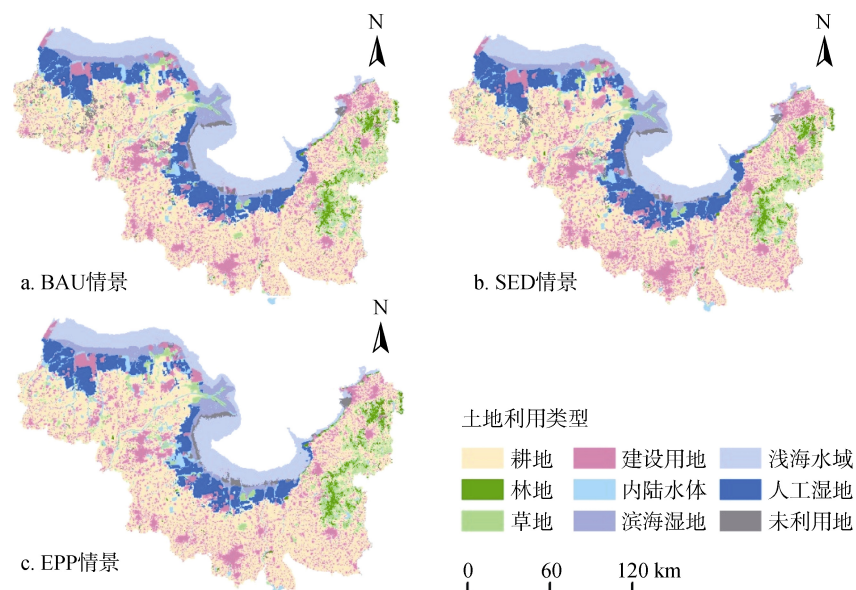


图 4 至 2025 年土地利用多情景格局特征
Fig.4 Spatial patterns of land-use scenarios by 2025

水体转为草地的概率减半, 限制转为建设用地; 滨海湿地不得转为建设用地和人工湿地; 浅海水域转为建设用地的概率减半; 人工湿地转为草地、浅海水域和湿地的概率加倍; 未利用地转出概率加倍。模拟结果表明: 该情景下, 至 2025 年土地利用相对于前两种情景变化幅度较小, 草地、林地、湿地等生态用地面积萎缩的速率明显减缓, 未利用地得到较高度度的开发利用, 土地利用程度综合指数为 274.92; 总体上, 该情景较好地达到了生态保护的目标。

4 结论与讨论

利用遥感技术、土地利用变化指数模型等方法, 对黄河三角洲—莱州湾海岸带 2000—2015 年间的土地利用变化进行定量分析, 进而, 利用 Markov 方法和 FLUS 模型对至 2025 年的土地利用结构和格局进行多情景分析与模拟。主要结论如下:

(1) 黄河三角洲—莱州湾海岸带区域耕地面积最大, 其次是浅海水域、湿地(内陆水体、滨海湿地、人工湿地)以及建设用地; 由海向陆土地利用总体呈现出由“浅海水域→滨海湿地→人工湿地→陆域多类型混合区域”过渡的宏观格局特征。

(2) 2000—2015 年, 耕地、林地、草地、湿地等生态型地类的面积和占比显著减少, 而建设用地和人工湿地的面积与占比则显著增加, 土地利用的集约化水平和土地利用程度综合指数不断提高; 三个 5 a 时段土地利用变化的数量特征、主导类型、变化

速率等存在较大差异, 区域整体土地利用的变化幅度逐渐降低, 表明土地利用变化的驱动因素和驱动机制存在一定的阶段性特征, 各种规划和管控性政策措施的作用显现, 尤其是在研究期末, 大规模围填海等发展趋势已经明显“降温”。

(3) 土地利用多情景分析与模拟结果表明, 至 2025 年, 土地利用仍以耕地、建设用地和浅海水域为主, 建设用地和人工湿地的扩张仍然较为显著, 但不同情景的扩张强度及途径有较大的差异: BAU 情景和 SED 情景之间的共性较为显著, 但 SED 情景的变化强度和速率等更为显著, 因而也对应最高的土地利用程度综合指数; EPP 情景充分发掘了区域丰富的未利用地资源的潜力和优势, 同时强调了建设用地的优化利用, 因而耕地、草地、林地、湿地等生态型用地的萎缩程度在 3 种情景中是最低的, 总体上较好的促进了生态保护和经济发展之间的平衡。

黄河三角洲—莱州湾海岸带是中国海岸带中非常具有典型性和代表性的区域, 主要是 20 世纪 90 年代以来, 该区域城镇化、工业化以及农业现代化的进程加快, 加之气候变化、海平面上升、海咸水入侵等自然因素的影响, 海岸带土地利用进入快速和急剧变化的时期, 突出表现为耕地大量流失、建设用地急剧扩张、大规模围填海以及湿地资源锐减等特征。而且, 进入 21 世纪以来, 经济发展等人类活动因素的影响在广度和深度上均愈来愈显著, 已逐渐成为黄河三角洲—莱州湾海岸带土地利用变化的主控因

素: 海岸带优越的地理区位吸引着大量人口、产业在此聚集, 集聚效应导致土地资源配置和需求急剧上升, 需要大量新增土地作为人口容纳和产业发展的承载空间, 主要通过大量占用耕地和生态用地而得到满足, 但由于严格的耕地占补平衡政策的约束作用, 又刺激了大量滨海湿地资源的开垦和占用; 而且, 沿海居民生活水平提高、海洋经济发展迅速、产业结构调整等也大大推动了海岸带区域的围填海热潮、房地产业和旅游业的发展, 从而进一步加剧湿地资源的流失和破坏。

黄河三角洲—莱州湾海岸带在土地利用变化过程中, 资源环境约束问题逐渐显现, 尤其是自然岸线和湿地破坏所带来的一系列环境和生态效应问题, 生态保护和经济社会发展之间的矛盾日趋尖锐。这种问题及趋势在我国其他海岸带区域也较显著, 因此, 中央及地方相关政府部门也通过出台有针对性的政策法规等途径加强对沿海区域的管控, 例如, 2016年6月国家海洋局印发《关于全面建立实施海洋生态红线制度的意见》, 2018年7月国务院印发《关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》等, 这些政策的严厉性大大超出了以往, 有望在海岸带生态保护方面取得显著的成效。未来时期, 针对海岸带区域, 建议重视陆海统筹、城乡统筹原则, 进一步优化土地利用结构和格局, 充分挖掘未利用土地的资源优势, 尤其是前期大规模围填海阶段已经成陆但尚处于闲置状态的土地资源, 合理划分生产、生活和生态空间, 分类开发和管控, 有效促进经济发展和生态保护之间的协调与平衡。

参考文献:

- [1] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. PNAS, 2013, 110(Suppl 1): 3665-3672.
- [2] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
Liu Jiyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3-14.
- [3] Wu Q, Li H Q, Wang R S, et al. Monitoring and predicting land use change in Beijing using remote sensing and GIS[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 78(4): 322-333.
- [4] 许茜, 李奇, 陈懂懂, 等. 三江源土地利用变化特征及因素分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1836-1843.
Xu Qian, Li Qi, Chen Dongdong, et al. The spatial-temporal characteristic of land use change in Sanjiangyuan Region and its effect factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(11): 1836-1843.
- [5] 何丹, 周璟, 高伟, 等. 基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 1095-1105.
He Dan, Zhou Jing, Gao Wei, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in Lake Dianchi Watershed[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1095-1105.
- [6] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 基于 CLUE_S 模型的矿区土地利用变化情景模拟—以徐州市贾汪矿区为例[J]. 热带地理, 2018, 38(2): 274-281.
Li Baojie, Gu Hehe, Ji Yazhou. Simulation of land use change in Coal Mining Area under different scenarios based on the CLUE-S model: a case study of Jiawang Mining Area in Xuzhou City[J]. Tropical Geography, 2018, 38(2): 274-281.
- [7] 杨俊, 裴颖, 席建超, 等. 基于 BDI 决策的 MAS-CA 模型黄海海滨城镇格局模拟研究—以大连金石滩为例[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 410-416.
Yang Jun, Pei Ying, Xi Jianchao, et al. Urban pattern simulation of the Yellow Sea Coast based on BDI decision MAS-CA model: a case study on Jinshitan, Dalian[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(3): 410-416.
- [8] 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 Ying, Chen Yun, Li Jingzhi, 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.
- [9] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河河口镇—潼关区间 1998-2010 年土地利用变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 42-53.
Luo Ya, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan, et al. Land use change in the reach from Hekouzhen to Tongguan of the Yellow River during 1998-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 42-53.
- [10] 侯西勇, 徐新良. 21 世纪初中国海岸带土地利用空间格局特征[J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1370-1379.
Hou Xiyong, Xu Xinliang. Spatial patterns of land use in coastal zones of China in the early 21st century[J]. Geographical Research, 2011, 30(8): 1370-1379.
- [11] 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 Jiuyan, 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.
- [12] 叶庆华, 刘高焕, 田国良, 等. 黄河三角洲土地利用时空复合变化图谱分析[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2004, 34(5): 461-474.
Ye Qinghua, Liu Gaochuan, Tian Guoliang, et al. Analysis of spatial and temporal pattern of land use change in the Yellow River Delta[J]. *Science in China*, 2004, 34(5): 461-474.
- [13] 张成扬, 赵智杰. 近 10 年黄河三角洲土地利用/覆盖时空变化特征与驱动因素定量分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(1): 151-158.
Zhang Chengyang, Zhao Zhijie. Temporal and spatial change of Land use/cover and quantitative analysis on the driving forces in the Yellow River Delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(1): 151-158.
- [14] Zhang Baolei, Yin Le, Zhang Shumin, et al. Assessment on characteristics of LUCC process based on complex network in Modern Yellow River Delta, Shandong Province of China[J]. *Earth Science Informatics*, 2016, 9(1): 83-93.
- [15] 齐善忠, 蔡文华. 莱州湾滨海地区土地利用变化及环境灾害研究[J]. *人民黄河*, 2008(8): 10-11.
Qi Shanzhong, Cai Wenhua. Land use change and environmental disasters in coastal area of Laizhou Bay[J]. *Yellow River*, 2008(8): 10-11.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 邸向红, 侯西勇, 吴莉. 中国海岸带土地利用遥感分类系统研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(3): 463-472.
Di Xianghong, Hou Xiyong, Wu Li. Land use classification system for China's coastal zone based on remote sensing[J]. *Resources Science*, 2014, 36(3): 463-472.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [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, 46(8): 1065-1075.
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, 46(8): 1065-1075.
- [22] 朱会义, 李秀彬, 何书金, 等. 环渤海地区土地利用的时空变化分析[J]. *地理学报*, 2001(3): 253-260.
Zhu Huiyi, Li Xiubin, He Shujin, et al. Spatio-temporal Change of Land Use in Bohai Rim[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001(3): 253-260.
- [23] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 83-89.
Wang Xiulan, Bao Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 83-89.
- [24] 周良勇, 李广雪, 邓声贵, 等. 现代黄河三角洲土地利用变化分析[J]. *海洋地质动态*, 2003(10): 1-4+1.
Zhou Liangyong, Li Guangxue, Deng Shenggui, et al. Changes of land uses in the modern Yellow River Delta[J]. *Marine Geology Letters*, 2003(10): 1-4+1.
- [25] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. *资源科学*, 2010, 32(8): 1544-1550.
Liu Rui, Zhu Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [26] 除多, 张懿锂, 郑度. 拉萨地区土地利用变化情景分析[J]. *地理研究*, 2005(6): 869-877.
Chu Duo, Zhang Yili, Zheng Du. Land use change scenario in Lhasa district using Markov chain model[J]. *Geographical Research*, 2005(6): 869-877.
- [27] 陈永林, 谢炳庚, 钟典, 等. 基于微粒群-马尔科夫复合模型的生态空间预测模拟——以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 55-64.
Chen Yonglin, Xie Binggeng, Zhong Dian, et al. Predictive simulation of ecological space based on a particle swarm optimization-Markov composite model: A case study for Chang-Zhu-Tan urban agglomerations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 55-64.
- [28] Li X, Chen G Z, Liu X P, et al. A new global land- use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5): 1040-1059.
- [29] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. *地理研究*, 2005(1): 19-27.

- Li Xia, Ye Jiaan. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks[J]. *Geographical Research*, 2005(1): 19-27.
- [30] 朱寿红, 舒帮荣, 马晓冬, 等. 基于“反规划”理念及 FLUS 模型的城镇用地增长边界划定研究—以徐州市贾汪区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(5): 80-86+127.
- Zhu Shouhong, Shu Bangrong, Ma Xiaodong, et al. The delimitation of urban growth boundary based on the idea of “anti-planning” and FLUS model: a case study of Jiawang District, Xuzhou City[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2017, 33(5): 80-86+127.
- [31] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [32] 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.
- [33] 郭延凤, 于秀波, 姜鲁光, 等. 基于 CLUE 模型的 2030 年江西省土地利用变化情景分析[J]. *地理研究*, 2012, 31(6): 1016-1028.
- Guo Yanfeng, Yu Xiubo, Jiang Luguang, et al. Scenarios analysis of land use change based on CLUE model in Jiangxi Province by 2030[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(6): 1016-1028.

Land-use change characteristics and scenario analysis in the Yellow River Delta and Laizhou Bay coastal zone

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

(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)

Received: Oct. 7, 2018

Key words: land-use change; scenario analysis; Yellow River Delta; Laizhou Bay; coastal zone

Abstract: This study analyzed the quantitative changes and interconversion of land use based on the land-use data of 2000, 2005, 2010, and 2015 in the Yellow River Delta and Laizhou Bay coastal zone, followed by scenario analysis and simulation of land use in the year 2025. Results showed that (1) Farmland is the primary land-use type in the Yellow River Delta and Laizhou Bay coastal zone; meanwhile, diverse wetland is widely distributed. Land use showed the following transitional characteristics from the sea to the land: shallow water → coastal wetland → manmade wetland → multiple land-mosaicked area. (2) During 2000–2015, the built-up area and manmade wetland expanded abruptly, whereas there was a significant decrease in other types of land use. However, considering the entire region, the speed and intensity of land-use change have been weakened overall. (3) The interconversion of land use was highlighted by transitions from natural or ecological types to artificial types of land use, which significantly increased the regional land-use intensity. (4) According to scenario analysis results, by 2025, a large amount of natural or ecological land will still be utilized and converted into artificial types of land use as determined in the Business as Usual (BAU) and Social and Economic Development (SED) scenarios, whereas the Ecological Protection Priority (EPP) scenario showed that the relation between ecological conservation and economic development will be balanced effectively mainly via completely tapping the values and advantages of unused land. (5) We suggested to attach importance the principle of land-sea coordination, efficient utilization of unused land, and conservation of wetland to promote coastal ecological protection and economic development simultaneously.

(本文编辑: 李晓燕)