

# 滨海城市土地利用变化对陆地生态系统 服务价值与储碳的影响

——以辽宁省大连市为例

李源<sup>1</sup>, 李发祥<sup>1</sup>, 梁金水<sup>1</sup>, 李田慧<sup>1</sup>, 刘长发<sup>1,2</sup>

(1.大连海洋大学, 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023;

2.辽宁省高校近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** [目的] 生态系统服务价值(ESV)是评估区域土地利用变化是否科学的重要手段之一,关系地区可持续发展。评估滨海城市 ESV 和陆地碳储存(TCS)变化,为辽宁省大连市经济发展与生态系统服务价值调控提供依据。[方法] 利用 2000—2020 年 5 期土地利用数据和相关数据,基于土地动态度、当量因子法、土地转移矩阵、ESV 贡献率、TCS 和主成分分析法,计算大连市土地利用变化动态及其对 ESV, TCS 和陆地碳储存价值(TCSV)的影响。[结果] ①在空间分布上,大连市建设用地主要侵占西南部沿海地区的耕地和林地。②2000—2020 年的 4 个时间阶段,大连市生态系统服务价值呈现先降后升,持续加剧下降的发展趋势;耕地面积减少,建设用地面积增长对生态系统服务功能保持造成直接影响。③2000—2020 年的 4 个时间阶段,大连市 TCS 和 TCSV 呈现先升后降,持续加剧下降的发展趋势;林地面积减少直接影响 TCS 功能的保持。④2000—2020 年大连市土地利用转移矩阵中,以耕地、林地、草地转出,建设用地转入为主;造成不同地类的生态系统服务贡献差异,贡献度大小顺序为耕地、林地、湿地、水域、草地和未利用地。⑤2000—2020 年大连市的 ESV, TCS 变化主要受经济增长,三大产业结构调整 and 城镇化水平发展影响。[结论] 从大连市经济发展,ESV 提升,TCS 能力提升和可持续发展角度出发,需要着重关注滨海岸线建设用地扩张与生态用地和农业用地的冲突问题,加强对北部林草生态用地的保护,加快滨海地带生态环境修复工作,提升生态用地的碳封存能力,避免建设用地无限制盲目扩张。

**关键词:** 滨海城市; 生态系统服务价值; 陆地碳储量; 自然经济价值; 主成分分析法; 辽宁省大连市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)05-0330-13

**中图分类号:** X826, X82, K928.5

**文献参数:** 李源, 李发祥, 梁金水, 等.滨海城市土地利用变化对陆地生态系统服务价值与储碳的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 330-342. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.039; Li Yuan, Li Faxiang, Liang Jinshui, et al. Effects of land use change on terrestrial ecosystem service value and carbon storage in Dalian City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 330-342.

## Effects of Land Use Change on Terrestrial Ecosystem Service Value and Carbon Storage in Dalian City

Li Yuan<sup>1</sup>, Li Faxiang<sup>1</sup>, Liang Jinshui<sup>1</sup>, Li Tianhui<sup>1</sup>, Liu Changfa<sup>1,2</sup>

(1.College of Marine Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China;

2.Key Laboratory of Offshore Marine Environmental Research of Liaoning High Education, Dalian, Liaoning 116023, China)

**Abstract:** [Objective] Ecosystem services value (ESV) is one of the important measures used to evaluate whether regional land use change is scientific. ESV is related to regional sustainable development. ESV and terrestrial carbon storage (TCS) changes in coastal cities were evaluated in order to provide a basis for economic development and ESV regulation in Dalian City, Liaoning Province. [Methods] Five periods of land use data and related data from 2000 to 2020 were analyzed in this study. Land dynamics, the equivalent factor method, a land transfer matrix, ESV contribution rate, TCS, and principal component analysis were used to

收稿日期: 2023-04-19

修回日期: 2023-06-19

资助项目: 海洋公益性行业科研专项“典型海湾受损生境修复生态工程和效果评价技术集成与示范”(201305043); 辽宁省高校优秀科技人才支持计划(LR2013035)

第一作者: 李源(1995—), 男(汉族), 广西壮族自治区河池市人, 硕士研究生, 主要从事生态资产研究。Email: Dlouly5205@163.com。

通信作者: 刘长发(1964—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 教授, 主要从事污染物环境生物地球化学过程与控制研究。Email: liucf@dlou.edu.cn。

calculate the land use change dynamics in Dalian City and their impacts on ESV, TCS, and terrestrial carbon storage value (TCSV). [Results] ① Construction land in Dalian City mainly encroached on farmland and forest land in the southwestern coastal area. ② During the four time periods from 2000 to 2020, ESV in Dalian City initially decreased and then increased, and the decline continued to intensify. The decrease in arable land area and the increase in construction land area had a direct impact on the maintenance of ecosystem service functions. ③ During the four time periods from 2000 to 2020, TCS and TCSV in Dalian City initially increased and then decreased, and the decline continued to intensify. The reduction of forest area directly affected the maintenance of TCS function. ④ In the land use transfer matrix for Dalian City from 2000 to 2020, farmland, forest land, and grassland were mainly transferred out, while construction land was mainly transferred in. The contribution of ecosystem services varied among different land use types, with contributions ranging from cultivated land, forest land, wetlands, water bodies, grasslands, and unused land. ⑤ The changes in ESV and TCS in Dalian City from 2000 to 2020 were mainly influenced by economic growth, adjustments to the three major industrial structures, and the development of urbanization level. [Conclusion] From the perspective of economic development, ESV improvement, TCS capacity improvement, and sustainable development in Dalian City, it is necessary to focus on the conflict between the expansion of coastal construction land and ecological and agricultural land, strengthen the protection of northern forest and grass ecological land, accelerate the ecological environment restoration work in coastal areas, enhance the carbon sequestration capacity of ecological land, and avoid unrestricted blind expansion of construction land.

**Keywords:** coastal city; ecosystem service value; terrestrial carbon stocks; natural economic value; principal component analysis; Dalian City, Liaoning Province

土地利用动态变化与土地覆被度变化(LULC)是影响全球生态变化的要素之一<sup>[1]</sup>,是全球环境物理化学变化的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>。土地资源是人类生存和发展的物质基础<sup>[4]</sup>,第二次工业革命之后土地利用变化速率加剧<sup>[5]</sup>,土地资源在人与自然相互耦合的作用下,引起陆地生态系统结构和功能的变化<sup>[6-7]</sup>,引起生态系统自然资本存量与自然资本流量价值的变化<sup>[8-12]</sup>。滨海地区<sup>[13]</sup>以丰富的海陆资源为依托,推动滨海城市经济迅速发展,推动滨海地区不同地类之间的转换速率加快,引起生态系统服务价值和陆地碳储量不断变化,对滨海城市造成了较大的生态安全胁迫<sup>[4-15]</sup>。因此,基于滨海城市生态安全问题的科学研究,有利于推动和落实滨海城市经济建设与生态安全可持续发展战略的实施。

在 1997 年 Costanza<sup>[16]</sup> 提出生态服务价值(ESV)评估原理及方法以后,被各国学者广泛运用<sup>[17-19]</sup>,中国学者也在积极探索适用于中国的生态系统服务价值评估方法<sup>[20-22]</sup>,其中,谢高地等<sup>[23]</sup>在 Costanza 的研究基础上,创建中国陆地生态系统价值当量表<sup>[24]</sup>,被国内学者在不同研究尺度下用于评估各类生态系统服务价值<sup>[15,25-27]</sup>。土地利用覆被变化是影响陆地碳储量变化的原因之一<sup>[28]</sup>,人类活动被认为是导致土地利用转换,影响陆地碳储量变化的主要原因之一<sup>[29]</sup>,估算陆地碳储量变化科学规划土地资源,对陆地碳储存量及生态系统服务的可持续发

展具有重要意义<sup>[30-31]</sup>。InVEST 模型被世界各国学者用于估算陆地生态系统碳储量,研究陆地碳储存空间分布格局变化<sup>[32-33]</sup>,分析陆地碳储量的空间分布规律,已有学者在海岸带<sup>[34]</sup>,高原<sup>[35]</sup>、流域<sup>[36]</sup>和城市等<sup>[37]</sup>区域开展对陆地碳储量的研究,为生态环境保护,土地资源发展规划提供科学依据。

滨海地带开发受自然资源分布和海岸线变化等因素制约,存在着海陆统筹、城乡统筹、域区协同不足等问题<sup>[38]</sup>。辽宁省大连市是东北沿海重要的港口中心城市,地处东北亚经济圈是重要的进出口贸易城市。截至 2020 年大连市总人口为  $7.45 \times 10^6$  人, GDP 为  $7.00 \times 10^{11}$  元。因此本文以大连市为例,综合前人研究结果依托 GIS 技术,数学方法,探究大连市土地利用类型变化与生态系统服务价值,陆地碳储之间的关系,以期全面了解大连市 ESV 和陆地碳储存(TCS)时空变化的过程与机制,积极响应国家碳中和,低碳、绿色的发展理念,在此基础上对大连市土地利用现状进行优化配置,以期对大连市经济发展与生态系统服务价值调控提供依据,实现可持续化发展。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

大连市位于辽东半岛南端,北纬  $38^{\circ}$ — $40^{\circ}$ ,东经  $120^{\circ}$ — $123^{\circ}$ ,属北半球暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温  $10^{\circ}\text{C}$  左右,年降雨量在  $550\sim 800\text{ mm}$

之间。陆地面积 12 574 km<sup>2</sup>,海岸线长 2 211 km<sup>2</sup>,大陆岸线 1 371 km<sup>2</sup>,岛屿岸线 840 km<sup>2</sup>。大连市相邻黄海,渤海,地貌为中央高向东西两侧递减,呈山地丘陵半岛地貌特征。

### 1.2 数据来源

大连市 2000—2020 年 5 期 30 m×30 m 土地利用栅格数据来源中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),高程数据 DEM 来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m,社会经济数据,自然数据来自辽宁省统计年鉴和大连市统计年鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用变化动态

基于 ArcGIS 10.5 对大连市 2000—2020 年 5 期土地利用进行分析,探讨大连市土地利用变化对大连市土地利用动态变化,生态系统服务价、陆地碳储存和碳储存价值量的影响。

2.1.1 单一土地动态度 反映土地利用类型动态和变化剧烈程度的单一土地动态度计算公式为:

$$Y = \frac{V_b - V_a}{V_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:Y 为研究时段内某种土地利用类型动态度;V<sub>a</sub>,V<sub>b</sub> 分别为研究初期与研究末期某种土地利用类型的面积;T 为研究时段。

2.1.2 土地综合动态度 反映受经济发展影响的整体土地利用变化程度的综合土地动态度计算公式如下:

$$L = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \Delta V_{ji}}{2 \sum_{i=1}^n V_j} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中:L 为研究区在某一时间段的综合土地利用动态度;V<sub>j</sub> 为监测起始时间第 j 类土地利用类型面积;ΔV<sub>ji</sub> 为监测时段内第 j 类土地利用类型转为非 j 类土地利用类型面积的绝对值;T 为监测时段长度。当 T 的时段设定为年时,L 的值就是该研究区土地利用年变化率。

2.1.3 土地利用转移变化 反映研究期间各类土地利用类型转移状况的转移矩阵公式为:

$$F_{cl} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{s1} & F_{s2} & \cdots & F_{sn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:F 表示面积;s 表示土地类型的数目;c,l 分别代表研究区域开始和结束时的各种土地类型。

### 2.2 生态系统服务价值

依据谢高地等<sup>[23]</sup>编制的中国生态系统服务价值当量表,大连市生态系统服务因子当量计算标准见表 1,其计算公式为:

$$K_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \times \frac{s_i y_i z_i}{W} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

式中:K<sub>a</sub> 为单位农田生态系统提供食物生产功能的价值(元/km<sup>2</sup>);y<sub>i</sub> 为 i 种粮食作物的平均价格(元/t);z<sub>i</sub> 为 i 种粮食作物单产(t/km<sup>2</sup>);i 为作物种类;W 为粮食作物总面积;s<sub>i</sub> 为 i 种粮食作物面积(km<sup>2</sup>)。

$$G_{esv} = \sum K_z \times E_c \quad (5)$$

$$G_d = \sum K_z \times E_{dk} \quad (6)$$

式中:G<sub>esv</sub>,G<sub>d</sub> 分别为生态服务总价值和单项价值;E<sub>c</sub> 为生态价值系数;K<sub>z</sub> 为 z 种土地利用类型的面积;E<sub>dk</sub> 为单项服务功能价值系数。

表 1 大连市生态系统服务因子当量数据

Table 1 Equivalent data of ecosystem service factors in Dalian City

服务类型	生态系统分类	耕地	林地	草地	水域	湿地	未利用地	建设用地
供给服务	食物生产	136.85	0.31	0.23	0.8	0.51	0.01	0
	原料生产	0.49	0.71	0.34	0.23	0.5	0.03	0
	水资源供给	-2.61	0.37	0.19	8.29	2.59	0.02	0
调节服务	气体调节	1.78	2.35	1.21	0.77	1.9	0.13	0
	气候调节	0.93	7.03	47.41	2.29	3.6	0.1	0
	净化环境	0.27	1.99	1.053	5.55	3.6	0.41	0
	水文调节	2.99	3.51	2.34	102.24	24.23	0.24	0
支持服务	土壤保持	1.04	2.86	47.34	0.93	2.31	0.15	0
	维持养分循环	0.31	0.22	0.11	0.07	0.18	0.01	0
	生物多样性	0.34	2.6	1.34	2.55	7.87	0.14	0
文化服务	美学景观	0.15	1.14	0.59	1.89	4.73	0.06	0

### 2.3 生态系统服务变化贡献率

反映区域在一定时间段内各种用地对 ESV 变化贡献率,公式为:

$$C_a = \frac{ESV_{id} - ESV_{is}}{ESV_d - ESV_s} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $C_a$  为各类用地生态系统服务贡献率;  $ESV_{is}$  和  $ESV_{id}$  分别为第  $i$  类土地利用类型研究期初和期末的生态系统服务价值;  $ESV_s$  和  $ESV_d$  分别指研究期初和期末生态系统服务价值总值。 $C_a > 0$  时,表示地类变化产生的 ESV 变化与 ESV 总值变化为同向性变动,即该地类的变化对 ESV 变化的影响是正效应; $C_a < 0$  时,则为反向性变动,对 ESV 变化是负面影响。

### 2.4 陆地碳储存量

运用 InVEST 模型碳储存模块计算陆地碳储量,反映陆地碳储量及时空分布特征。依据前人的研究结果<sup>[39]</sup>,本文使用的碳密度参数见表 2。公式为:

$$C_T = \sum_{i=1}^n (C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}) \quad (8)$$

式中: $C_T$  为总碳储存量;  $C_{above}$  为地上生物碳密度;  $C_{below}$  为地下生物碳密度;  $C_{soil}$  为土壤碳密度;  $C_{dead}$  为死亡有机质碳密度。

表 2 大连市陆地碳密度

Table 2 Land carbon density in Dalian City t/hm<sup>2</sup>

土地利用类型	地上生物碳密度	地下生物碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度
1 耕地	4.75	0	33.51	0
2 林地	49.6	24.97	128.67	1.99
3 草地	24.38	19.59	52.29	22.74
4 水域	2.45	0.62	80.11	0.10
5 湿地	28.73	14.39	317.82	2.40
6 建设用地	4.33	2.17	6.37	0.58
7 未利用地	0	0	0	0

### 2.5 陆地碳储存价值量

基于《京都议定书》中预估的 CO<sub>2</sub> 减排的成本约为 150~600 美元/t,参考 2020 年美元兑人民币平均汇率(1 美元=6.9 元),折合人民币 1 035~4 140

元/t。中国造林减排的成本为 2001—2020 年的平均成本 264.2 元/t<sup>[40-41]</sup>,取 CO<sub>2</sub> 减排成本价值的下限与中国造林成本均值,估算出中国单位碳减排经济成本约为 649.6 元/t<sup>[42]</sup>。陆地碳储存价值量公式为:

$$L_{csv} = L_{cs} \times C_{rec} \quad (9)$$

式中: $L_{csv}$  为陆地碳储存价值量;  $L_{cs}$  为陆地碳储存量;  $C_{rec}$  为单位的碳减排经济成本价值。

### 2.6 主成分分析

运用 SPSS 26 对选取的 15 个影响因子,包括道路长度、地方财政收入、年末人口数、人均地 GDP、建成区绿化覆盖面积、农业总产值、道路面积、GDP、工业增加值、社会消费品零售总额、第一产业占 GDP 比例、第二产业占 GDP 比例、第三产业占 GDP 比例、建筑业竣工面积、当年林地增加面积等。在 SPSS 26 运用主成分分析法分析其对 ESV 和 TCS 的影响。在 SPSS 26 软件中对其进行降维因子处理,选择 KMO 和巴特利特球形度检验,选择碎石图,因子的固定数目和载荷图,最后得出因子分析结果。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用动态变化

表 3 为 2000—2020 年大连市单一土地利用覆被变化动态度。2000—2005 年大连市建设用地,未利用地、湿地和水域单一动态变化为正值,建设用地变化最为剧烈地类面积增加最多;耕地,林地和草地单一动态为负值,草地变化最为剧烈。2005—2010 年大连市耕地,建设用地、未利用地、湿地和水域单一动态变化为正值地类面积增加,水域变化最为剧烈,其次是未利用地和建设用地;林地和草地单一动态为负值,草地变化最为剧烈。2010—2015 年大连市建设用地,湿地和水域单一动态变化为正值地类面积增加,建设用地变化最为剧烈;未利用地,耕地、林地和草地单一动态变化为负值,未利用地变化最为剧烈。2015—2020 年大连市草地,水域、建设用地和草地单一动态为正值,草地变化最为剧烈;湿地,耕地和林地单一动态为负值,未利用地无变化。

表 3 大连市单一土地类型利用动态度

Table 3 Dynamic degree of single land type utilization in Dalian City

年份	土地类型利用动态度						
	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
2000—2005	-0.12	-0.01	-0.73	0.01	0.91	1.31	1.76
2005—2010	0.20	-1.96	-2.65	65.78	1.22	8.55	15.26
2010—2015	-0.76	-0.34	-2.86	0.88	0.64	4.61	-7.22
2015—2020	-0.06	-0.04	1.47	0.02	-1.06	0.69	0.00
2000—2020	-0.75	-2.31	-4.62	69.67	1.68	18.72	4.51

2000—2020 年大连市水域,建设用地和未利用地单一动态度为正值,地类面积增长;草地,林地和耕地单一动态度为负值,地类面积减少。可知,2000—2020 年大连市土地利用单一动态度变化,由农业用地和生态用地转换为建设用地和其他地类。

表 4 为 2000—2020 年大连市土地利用综合动态度。在研究期间大连市土地利用综合动态度为 1.50。2000—2005 年大连市土地利用综合动态度为 0.12 与 2015—2020 年持平,表明 2015—2020 年大连市土地利用综合动态度有所下降。2005—2010 年大连市土地利用综合动态度为 0.88,为研究期间大连市土地利用年变化率最高阶段。2010—2015 年大连市土地利用综合动态度为 0.55,相对于上一阶段有所下降。可知,大连市的土地利用年变化率,逐步地下降趋向于稳定的发展态势。

### 3.2 土地利用变化

图 1 为 2000—2020 年大连市各地类土地利用变

化。大连市总面积 12 872.80 km<sup>2</sup>,2000 年耕地,林地、草地、水域、湿地、建设用地和未利用地面积分别占 45.07%,37.82%,1.55%,0.10%,7.27%,8.15% 和 0.03%。2020 年大连市各地类比例分别为 42.46%,32.74%,1.17%,0.44%,7.72%,15.45% 和 0.03%。在近 20 a 中,大连市耕地面积减少 217.04 km<sup>2</sup>(下降 2.61%),林地面积减少 562.90 km<sup>2</sup>(下降 5.09%),草地面积减少 46.26 km<sup>2</sup>(下降 0.38%)。建设用地面积增加 982.25 km<sup>2</sup>(提高 7.29%),湿地面积增加 78.85 km<sup>2</sup>(提高 0.44%),水系面积增加 44.68 km<sup>2</sup>(提高 0.34%),未利用地面积增加 0.78 km<sup>2</sup>(提高了 0.01%)。

表 4 大连市土地综合土地利用动态度

Table 4 Dynamic degree of comprehensive land use in Dalian City

年份	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2000—2020
动态度	0.12	0.88	0.55	0.12	1.50

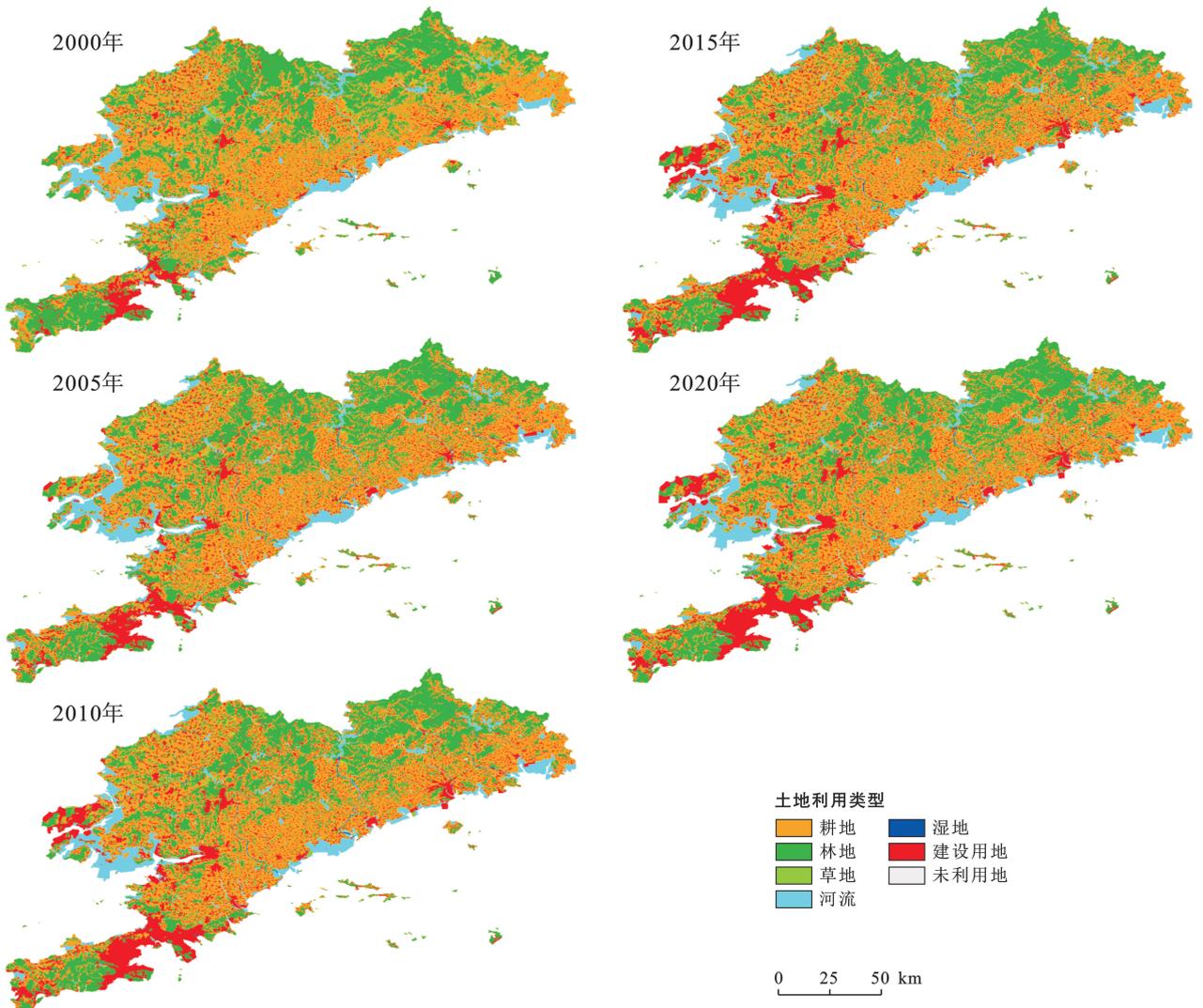


图 1 2000—2020 年大连市土地利用变化

Fig.1 Land use change in Dalian City from 2000 to 2020

从大连市不同地类面积增加或减少的空间位置来看,大连市建设用地面积增长主要聚集在沙河口区,甘井子区、西岗区旅顺口区西南部,瓦房店市西部和庄河市沿海地带,建设用地增长地区区位优势明显。但大连市建设用地面积的增加,造成了耕地,林地和草地面积的减少,对大连市沿海地带的生态系统服务功能和陆地碳储量保持造成不利影响。大连市西北部和东北部内陆地区各个地类变化相对较小,生态系统服务功能和陆地碳储存功能相对稳定。

图 2 为大连市 2000—2020 年各地类之间的转移变化。大连市近 20 a 转出最多的地类是林地,转化为耕地、建设用地和草地,分别转出 735.47,302.49,57.35 km<sup>2</sup>,造成陆地碳储量下降。耕地主要转出为建设用地、林地、湿地和草地,分别转出 655.51,434.53,81.80,39.78 km<sup>2</sup>,造成生态系统服务功能下降。建设用地主要由耕地,林地、湿地和草地转入,分别转入 655.51,302.49,163.21,21.22 km<sup>2</sup>,建设用地侵占耕地与生态用地,对生态系统服务功能和陆地碳储保持产生消极影响。

2000—2005 年大连市建设用地面积增加 55.56 km<sup>2</sup>,主要由耕地、湿地和草地分别减少 36.17,10.90,7.33 km<sup>2</sup>。在此期间林地面积无变化有利于陆地碳储量的保持,其他地类转换为建设用地导致生态系统服务功能下降。2005—2010 年建设用地面积增加 454.73 km<sup>2</sup>,耕地面积增加 54.65 km<sup>2</sup>,水域面积增加 43.14 km<sup>2</sup>;林地、湿地和草地分别减少 479.93,49.97,25.50 km<sup>2</sup>。在此期间林地面积减少陆地碳储量下降;其他地类转换为耕地和水域,生态系统服务功能上升有利于生境质量提升。

2010—2015 年建设用地面积增加 340.71 km<sup>2</sup>,耕地、林地和湿地分别减少 216.87,69.79,30.10 km<sup>2</sup>。农业用地和生态用地转换为建设用地,导致大连市陆地碳储量和生态系统服务功能下降。2015—2020 年建设用地面积增加 73.11 km<sup>2</sup>,草地面积增加 10.54 km<sup>2</sup>,湿地减少 56.18 km<sup>2</sup>,耕地减少 17.65 km<sup>2</sup>。在此期间建设用地面积增长放缓,农业用地转出放缓,有利于减缓生态系统服务功能与陆地碳储量下降。

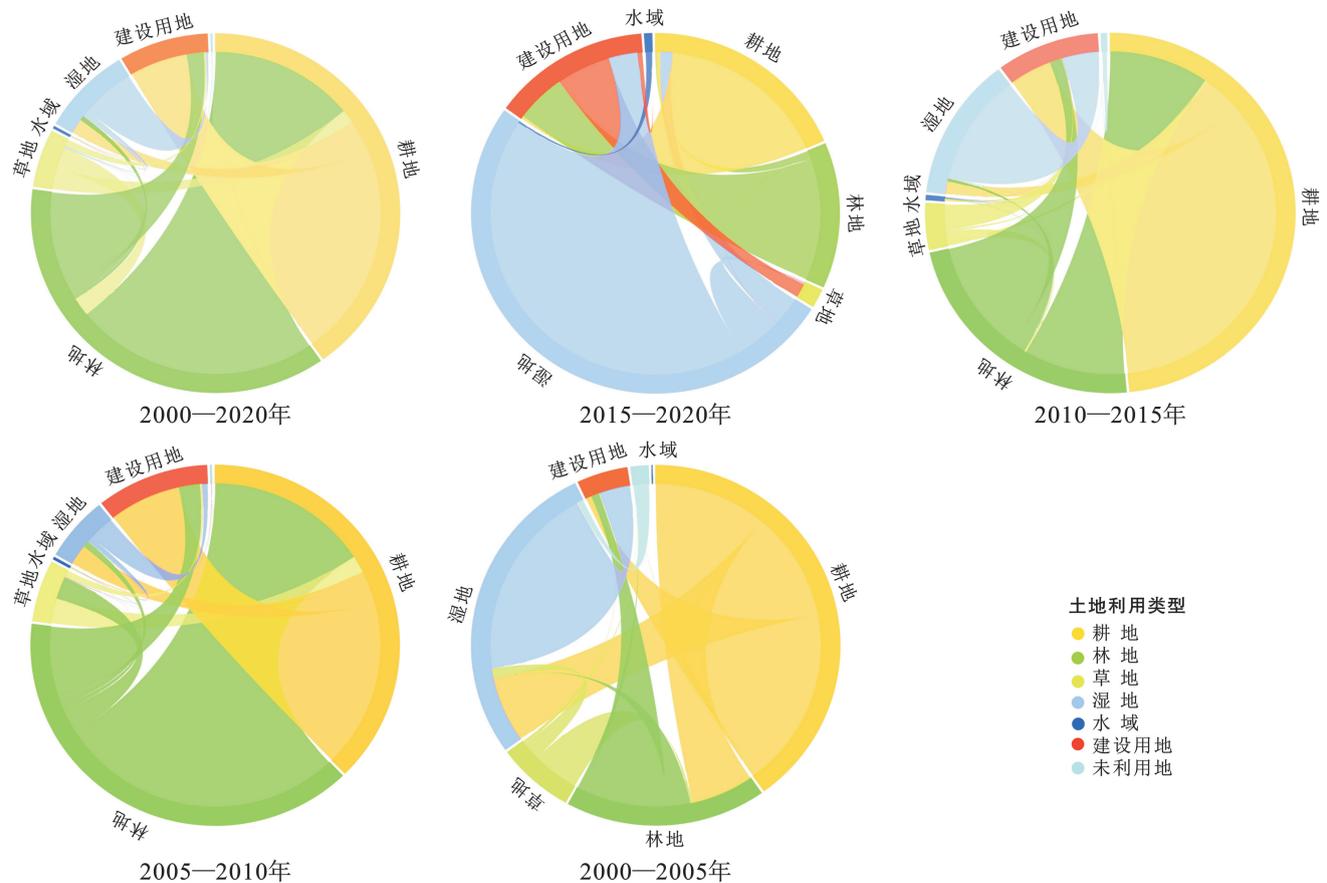


图 2 大连市土地利用变化和弦图

Fig.2 Chord chart of land use change in Dalian City

### 3.3 生态系统服务价值

图 3 为大连市 ESV 变化。2000—2020 年 ESV 总量为  $7.69 \times 10^7$  元;不同地类 ESV 价值贡献比例分别为:耕地 81.74%,林地 10.54%,湿地 5.26%,草地 1.76%,水域和未利用地分别占 0.49% 和 0.20%。在各时间节点上 ESV 分别为  $1.56 \times 10^7$ ,  $1.55 \times 10^7$ ,  $1.56 \times 10^7$ ,  $1.51 \times 10^7$ ,  $1.50 \times 10^7$  元;在 2000—2020 年的 4 个时间阶段中,大连市生态系统价值量呈现先降低后提升,再加剧下降的发展态势。其中供给服务,调节服务、支持服务和文化服务在不同的时间阶段变化不同。

2000—2005 年大连市生态系统服务价值减少  $5.59 \times 10^4$  元,主要是供给服务减少  $7.28 \times 10^4$  元,调节服务、支持服务和文化服务增长;生态系统服务价值量变化不大。2005—2010 年大连市生态系统服务价值增长  $5.36 \times 10^4$  元,供给服务增加  $1.17 \times 10^5$  元;调节服务、支持服务和文化服务分别减少  $1.54 \times 10^4$ ,  $4.55 \times 10^4$ , 250 元,大连市生态系统服务价值量变化轻微,但供给服务加速下降。2010—2015 年大连市生态系统服务价值下降  $5.10 \times 10^5$  元,供给服务减少  $4.57 \times 10^5$  元、调节服务减少  $3.05 \times 10^4$  元、支持服务减少  $2.32 \times 10^4$  元,文化服务增长 800 元。大连市生态系统服务价值加剧下降,供给服务下降剧烈,调节服务和支持服务也呈现了加剧下降的态势,文化服务有所提升。2015—2020 年大连市生态系统服务价值下降  $6.92 \times 10^4$  元,供给服务减少  $4.57 \times 10^5$  元、调节服务减少  $3.05 \times 10^4$  元、支持服务减少  $2.32 \times 10^4$  元,文化服务增长 800 元;大连市生态系统服务价值量下降态势减缓,生态系统服务功能提升。

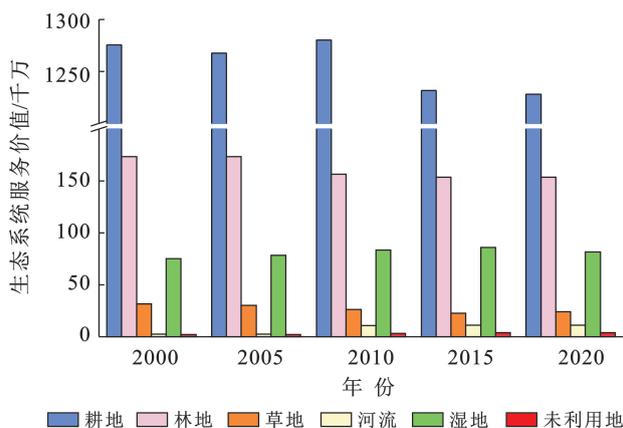


图 3 2000—2020 年大连市各类用地生态系统服务价值

Fig.3 Value of various land use ecosystem services in Dalian City from 2000 to 2020

### 3.4 生态系统服务价值贡献率

表 5 为 2000—2020 年大连市生态系统服务贡献率。2000—2005 年大连市生态系统服务贡献率分别由耕地,草地和林地支撑,湿地和未利用地下降,耕地贡献率最大。2005—2010 年大连市耕地生态系统服务贡献率提升至 2.32,水域,湿地和未利用地贡献率分别为 1.52,0.89,0.18。林地和草地生态系统服务贡献率减少,林地生态系统服务贡献率剧烈下降。2010—2015 年大连市耕地生态系统服务贡献率为 0.95,林地和草地贡献率分别为 0.05,0.07;湿地和水域的生态系统服务贡献率下降。2015—2020 年大连市耕地生态系统服务贡献率为 0.56,林地和湿地贡献率 0.05,0.66;草地和未利用地生态系统服务贡献率下降。2000—2020 年大连市各类用地贡献率分别为耕地 0.82,林地 0.35 和草地 0.13 未利用地,湿地和水系贡献率为负值。大连市耕地生态系统服务价值主要由耕地,林地、草地和未利用地贡献。

表 5 大连市各类用地生态系统服务贡献率

Table 5 Contribution rate of various land use ecosystem services in Dalian City %

时间段	地生态系统服务贡献率					
	耕地	林地	草地	水域	湿地	未利用地
2000—2005 年	1.42	0.01	0.21	0.00	-0.61	-0.02
2005—2010 年	2.32	-3.17	-0.75	1.52	0.89	0.18
2010—2015 年	0.95	0.05	0.07	-0.01	-0.05	0.00
2015—2020 年	0.56	0.05	-0.24	0.00	0.66	-0.02
2000—2020 年	0.82	0.35	0.13	-0.15	-0.11	-0.03

### 3.5 陆地碳储量

图 4 和图 5 为大连市陆地碳储量与碳储量分布图。2000—2020 年 TCS 总量为  $7.82 \times 10^9$  t,研究区在 2000,2005,2010,2015,2020 年的 TCS 分别为  $1.60 \times 10^9$ ,  $1.61 \times 10^9$ ,  $1.55 \times 10^9$ ,  $1.54 \times 10^9$ ,  $1.52 \times 10^9$  t。大连市陆地碳储量主要由林地,湿地和耕地构成,其中林地碳储量  $4.67 \times 10^9$  t(占 59.73%),湿地  $1.83 \times 10^9$  t(占 23.43%),耕地  $1.09 \times 10^9$  t(占 13.99%),建设用地  $1.04 \times 10^8$  t(占 1.34%),草地  $1.02 \times 10^8$  t(占 1.31%),水域  $1.60 \times 10^7$  t(占 21%)。在研究期间其林地、湿地、草地和耕地碳储量在持续下降;建设用地和水域碳储量在逐年增加。

2000—2005 年大连市 TCS 增加  $1.39 \times 10^6$  t,湿地和建设用地分别增长  $1.55 \times 10^6$  t 和  $9.27 \times 10^4$  t;耕地,林地和草地分别减少  $1.38 \times 10^5$ ,  $3.01 \times 10^4$ ,  $8.73 \times 10^4$  t。2005—2010 年大连市 TCS 减少

$6.71 \times 10^6$  t, 林地, 耕地和草地分别减少  $9.79 \times 10^6$  t,  $2.17 \times 10^5$  t 和  $3.04 \times 10^5$  t, 林地碳储存量加剧下降。湿地, 水域和建设用地分别增长  $2.17 \times 10^6$ ,  $3.52 \times 10^5$ ,  $6.43 \times 10^5$  t。

2010—2015 年大连市 TCS 减少  $9.52 \times 10^5$  t, 耕地, 林地和草地分别减少  $8.42 \times 10^5$ ,  $1.55 \times 10^6$ ,  $2.84 \times 10^5$  t; 水域和建设用地和未利用分别增长  $2.00 \times 10^4$ ,  $4.95 \times 10^5$ ,  $1.21 \times 10^6$  t。2015—2020 年大连市 TCS 减少  $2.10 \times 10^6$  t, 耕地, 林地、湿地分别减少  $6.70 \times 10^4$ ,  $1.87 \times 10^5$ ,  $2.06 \times 10^6$  t; 建设用地和草地分别增长  $9.07 \times 10^4$  t 和  $1.25 \times 10^5$  t。可知, 林地是碳储存量最高的, 林地转化为其他地类是导致大连市 TCS 和 TCSV 下降的直接原因。

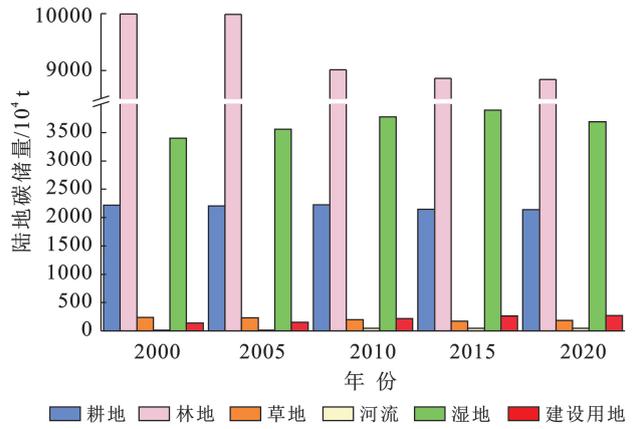


图 4 大连市各类用地碳储量

Fig.4 Carbon storage of various land use types in Dalian City

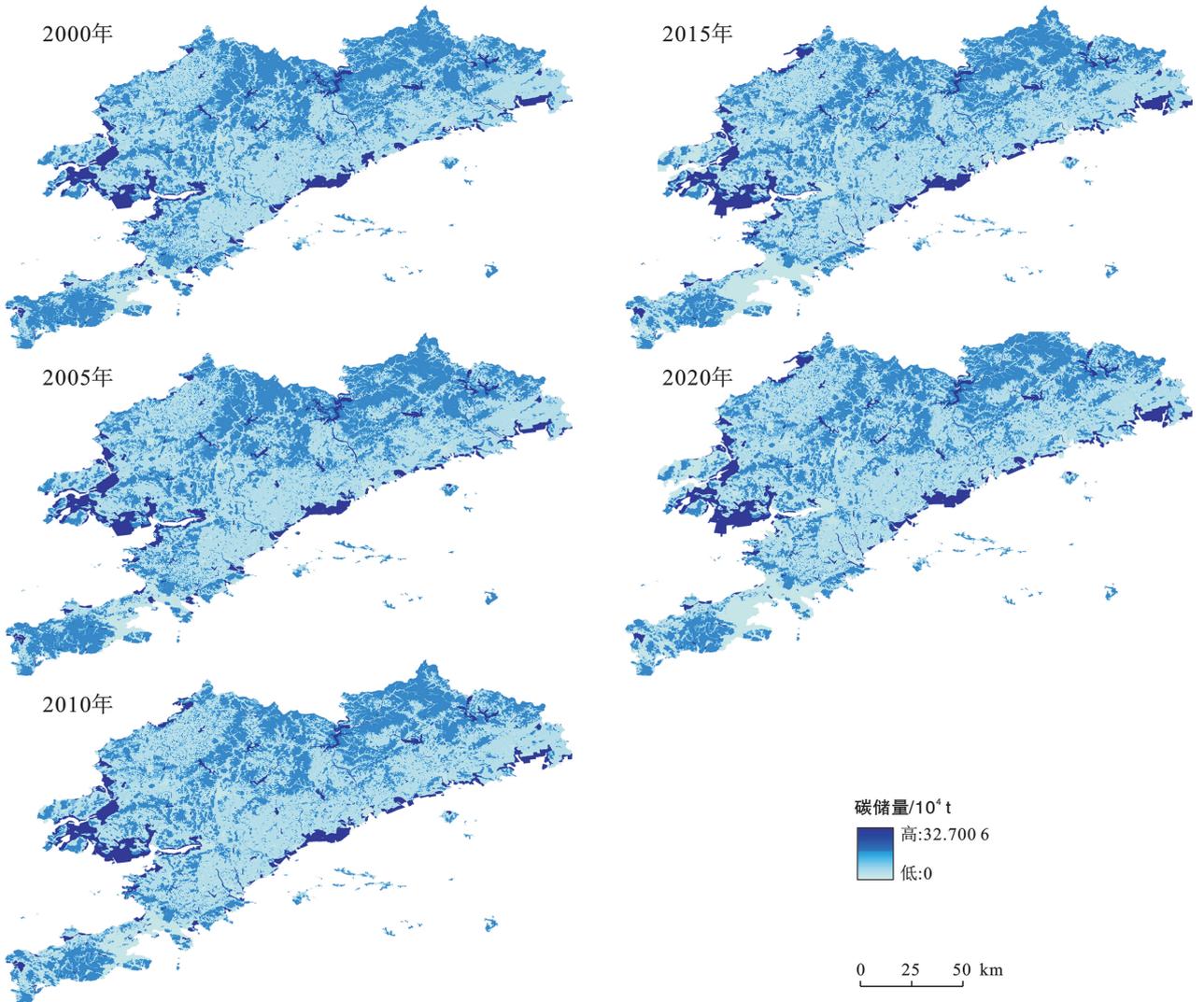


图 5 2000—2020 年大连市碳储量分布

Fig.5 Carbon storage distribution in Dalian City from 2000 to 2020

### 3.6 陆地碳储存价值量

图 6 为大连市不同地类碳储存价值量。2000—

2020 年大连市各类用地 TCSV 总量为  $5.08 \times 10^{11}$  元, 在 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年间其 TCSV 量分别

为  $1.04 \times 10^{11}$ ,  $1.50 \times 10^{11}$ ,  $1.01 \times 10^{11}$ ,  $9.99 \times 10^{10}$ ,  $9.85 \times 10^{10}$  元。林地、湿地、耕地、建设用地、草地和水域分别占 59.73%, 23.43%, 13.99%, 1.34%, 1.31% 和 0.21%。2000—2005 年 TCSV 总量增长  $9.02 \times 10^8$  元, 耕地、林地和草地分别减少了  $9.00 \times 10^7$ ,  $2.00 \times 10^7$ ,  $5.70 \times 10^7$  元; 水域、湿地和建设用地分别增加  $3.00 \times 10^4$ ,  $1.01 \times 10^9$ ,  $6.00 \times 10^7$  元。在此期间 TCSV 处于增长状态。2005—2010 年 TCSV 总量减少  $4.36 \times 10^9$  元, 林地和草地分别减少了  $6.36 \times 10^9$  元和  $1.97 \times 10^8$  元; 耕地、水域、湿地和建设用地分别增加  $1.41 \times 10^8$ ,  $2.28 \times 10^8$ ,  $1.41 \times 10^9$ ,  $4.17 \times 10^8$  元。林地 TCSV 下降超过  $6.00 \times 10^9$  元, 对生态系统服务价值和 TCS 产生不利影响。2010—2015 年 TCSV 总量减少  $6.18 \times 10^8$  元, 耕地、林地和草地分别减少了  $5.47 \times 10^8$ ,  $1.01 \times 10^{10}$ ,  $1.85 \times 10^8$  元; 水域、湿地和建设用地分别增加  $1.30 \times 10^7$ ,  $7.85 \times 10^8$ ,  $3.21 \times 10^8$  元。耕地、林地和草地的 TCSV 下降超过  $1.00 \times 10^8$  元, 对耕地面积的加速转换对生态系统服务价值功能保持产生不利影响, 林地 TCSV 的不断减少造成 TCS 量的不断减少。2015—2020 年 TCSV 总量减少  $1.36 \times 10^9$  元, 耕地、林地和湿地分别减少了  $4.40 \times 10^7$ ,  $1.22 \times 10^8$ ,  $1.34 \times 10^9$  元; 水域、草地和建设用地分别增加  $3.00 \times 10^5$ ,  $8.10 \times 10^7$ ,  $5.90 \times 10^7$  元。耕地和林地的 TCSV 下降态势减缓, 对生态系统服务价值功能和 TCS 保持具有促进作用。

### 3.7 土地资源变化驱动要素

表 6 为大连市主成分分析的 Kmo 和 Bartlett 特检验, 主成分分析的 Kmo 值为  $0.733 > 0.600$ , 表示原有

变量适合做主成分分析; 显著性  $p = 0.000, < 0.050$ , 认为原始变量之间存在相关性, 适合做主成分分析。

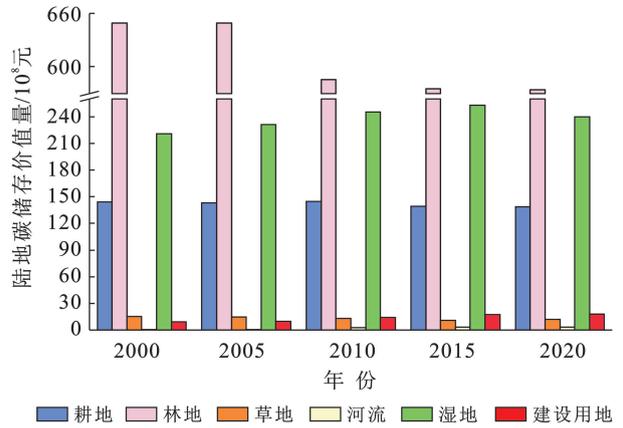


图 6 大连市各类用地碳储存价值量  
Fig.6 Carbon storage value of various land types in Dalian City

表 6 Kmo 和 Bartlett 特检验  
Table 6 Kmo and Bartlett's tests

Kmo 取样適切性量数		0.733
	近似卡方	716.302
巴特利特球形度检验	自由度	105
	显著性 sig.	0

表 7 为大连市主成分分析的总方差解释表, 计算选取了特征值大于 1 的 2 个因子作为主成分, 有 2 个主成分特征值大于 1, 其累计解释率为 87.37% 大于 85.00%, 前 2 个主成分充分替换了原有的 15 个变量, 即提取前 2 个主成分进行指数计算。

表 7 主成分总方差解释

Table 7 Interpretation of principal component total variance

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积方差百分比/%	总计	方差百分比/%	累积方差百分比/%	总计	方差百分比/%	累积方差百分比/%
1	10.563	70.419	70.419	10.563	70.419	70.419	10.302	68.681	68.681
2	2.543	16.955	87.374	2.543	16.955	87.374	2.804	18.693	87.374

依据表 7 和表 8 旋转后的成分矩阵分析, 第一主成分定义为社会经济发展, 其主要受到道路长度、人均地区 GDP 值、年末总人口、农业总产值、GDP 值、地方财政收入、社会消费品零售总额、道路面积、工业增加值和建成区绿化覆盖面积等因子驱动。

第二主成分定义为城镇化与产业发展, 其主要受到第一产业、第二产业、第三产业、道路长度和 GDP 等因子驱动。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 内陆城市与滨海城市发展土地利用变化异同。土地利用覆被变化是城镇化的标志之一, 是人口、自然、经济和社会发展的综合动态过程。贵阳市地处中国西南地区, 在城镇化发展过程中城镇人口增加, GDP 增长、城市用地和未利用地面积增长; 贵阳

市在城镇化过程中不断侵占生态地类,土地资源稀缺成为制约其发展的重要因素,加剧城镇化与生态保护的矛盾<sup>[43]</sup>。

嘉兴市是中国率先推进城乡一体化的地区之一,在近 30 a 的发展中建设用地过度侵占耕地,导致景观破碎度加剧,生态系统服务价值减少 14.7%,加剧了生态环境和城镇化发展的矛盾<sup>[44]</sup>。

宁波市在城镇化过程中,农业用地和林地面积比例分别下降 10.96% 和 8.6%,建设用地增加

1 012.3 km<sup>2</sup>;经济的快速发展吸引人口聚集,加剧宁波市城市扩张速度。在农业用地保护政策下,水域成为宁波农业用地扩张的积极贡献者,也加剧了水生态系统安全胁迫,加剧人与生态环境的矛盾<sup>[45]</sup>。

营口市填海造地用于城市建设,建设用地面积增加 310 km<sup>2</sup>,导致水域面积减少 43.5%;建设用地不断的侵占其他地类,导致 ESV 下降 17.2%。营口市“滨海新区”建设、填海造陆、海岸线破碎化、土地复垦力度不足等是 ESV 下降的主要影响因素<sup>[46]</sup>。

表 8 旋转后的成分矩阵

Table 8 Component matrix after rotation

项目	成分矩阵		项目	旋转后的成分矩阵	
	1	2		1	2
人均地区 GDP	0.985	0.15	道路长度	0.983	0.098
道路长度	0.984	-0.081	地方财政收入	0.98	-0.054
农业总产值	0.98	0.148	人口	0.977	0.108
人口	0.98	-0.069	人均地区 GDP	0.942	0.325
总 GDP 值	0.98	0.182	建成区绿化覆盖面积	0.94	0.183
社会消费品零售总额	0.965	0.195	农业总产值	0.938	0.323
道路面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	0.963	0.06	道路面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	0.937	0.233
建成区绿化覆盖面积	0.958	0.01	总 GDP 值	0.931	0.355
地方财政收入	0.954	-0.229	工业增加值 GDP	0.917	-0.312
工业增加值	0.846	-0.472	社会消费品零售总额	0.913	0.366
第一产业 GDP 比例/%	-0.82	0.499	第一产业 GDP 比例/%	-0.896	0.343
当年林地增加面积	-0.606	-0.247	当年林地增加面积	-0.551	-0.352
建筑业竣工面积	0.184	-0.961	第三产业 GDP 比例/%	0.247	0.941
第三产业 GDP 比例/%	0.413	0.881	建筑业竣工面积	0.354	-0.912
第二产业 GDP 比例/%	0.314	0.357	第二产业 GDP 比例/%	0.245	0.408

综上所述,中国在快速城镇化过程中,各地区受不同的自然地理条件,经济要素和政府决策的影响。中国的滨海城市与内陆城市,在提高生态服务与碳储价值的路径上存在着本质的差异,滨海城市容易受到海陆经济发展,海上贸易、人口聚集、海陆区位优势的影响,加剧沿海地区 LULC 进程,导致 ESV 与 TCS 路径复杂。内陆城市产业结构单一,城镇化人口数量与 GDP 增长较慢,政策导向驱动对提高 ESV 与 TCS 具有积极作用。

(2) 土地利用变化驱动要素。土地利用覆被变化受驱动要素影响具有一定的差异性和相似性。长株潭城市群核心区土地利用变化,主要受交通枢纽,政府决策、经济发展、人口增长和产业发展等影响<sup>[47]</sup>,福州市土地利用变化受山地丘陵地形制约,政府决策、人口增长、人类活动强度、城镇化和第二产业规模扩大等要素驱动<sup>[48]</sup>。丹江口市土地利用变化受城镇化率、政策、城乡发展、移民搬迁、退耕还林和生

态文明建设等影响<sup>[49]</sup>。大连市土地利用变化受政府决策,城镇化率、GDP 增长,城镇人口增加、三大产业结构调整等要素驱动。与内陆城市不同的是,营口<sup>[46]</sup>、嘉兴<sup>[44]</sup>、宁波等<sup>[45]</sup>滨海城市城镇化过程中,受经济 GDP 增长,城镇人口增长,产业结构调整、建设用地需求增长等影响。促进蓝色经济发展,维护海陆生态系统动态平衡、严格限制侵占基本农田、政府决策与经济发展是滨城城市发展必须考虑的系统性、复杂性、综合性问题。

综上所述,建设用地扩张是中国土地利用变化的一大规律,形成了以建设用地面积增长,耕地、林地、草地和未利用地面积减少的宏观发展模式。在该发展模式下,中国土地利用变化主要受到城镇化,政策、人口城镇化、GDP 和产业发展等影响,滨海城市与内陆城市都不例外。

(3) 生态系统服务价值与陆地碳储量/价值量。大连市 TCS 量和 ESV 量的变化与土地利用变化具

有高度的一致性。经济快速发展,城镇化率和人口密度提升,导致大连市建设用地面积扩张加快,无法规避对生态安全的胁迫,加剧了大连市经济发展与生态系统服务功能的矛盾。近 20 a 大连市西南部耕地,林地和湿地面积的持续减少,建设用地面积增加,加剧了大连市 ESV 不均分布。在 TCS 量变化方面,建设用地过度侵占林地和草地,是导致 TCS 的下降的主要原因,与朱丽亚等<sup>[39]</sup>研究的辽宁省海岸带碳储量时空变化,王天福等<sup>[50]</sup>研究的陕西省植被碳储存分布变化、张晓光等<sup>[51]</sup>研究的青岛市碳排放结论相似。TCS 受经济发展,建设用地面积增长;耕地,林地、草地和湿地面积减少影响较大。

可见,建设用地面积增长不利于陆地生态系统碳储存能力的提升,ESV, TCS 和 TCSV 的变化与土地利用变化是相辅相成的,是土地利用变化导致的必然结果。因此,从土地利用规划的角度出发,合理调控耕地,林地、草地、湿地向建设用地转化的比例,严格控制建设用地的扩张,加强对林地,草地、水域和湿地等自然生态系统保护,有利于陆地生态服务功能与陆地碳储量和碳储价值的提升。

(4) 政策建议。大连市土地资源与生态保护建议如下:①基于“三生空间”与“三区三线”管控措施,采取自上而下与自下而上相结合的多效手段,保障大连市经济发展与海陆生态格局安全,实现大连市土地资源综合利用,保障土地资源自然生态承载力。②统筹土地管理,优化土地资源配置,科学划分土地资源功能区,优化土地空间配置,解决发展不平衡不充分的问题。③提高建设用地利用效率,集约化城区发展合理规划城市绿地,保证城市生态系统服务功能的内循环。④加强对林地,草地、滨海湿地和水系的保护,加强大连市对海岸线的生态问题的治理与管控,提升海陆生态安全指数,多方并举保护生态系统安全。

(5) 研究展望。由于遥感影像分辨率限制,采用的碳密度数据存在着误差,ESV 受到单位面积农田食物生产经济价值的影响存在误差,无法准确地估算 ESV 和 TCS 量。今后的研究中,可在提高遥感影像分辨率,碳密度数据实时动态监测和 ESV 因子测算等方面开展深入研究。

## 4.2 结论

(1) 滨海城市的生态系统服务价值,陆地碳储存量,陆地碳储存价值受土地类型转换影响明显,生产用地,建设用地和生态用地三者转换剧烈。土地资源覆被变化对生态系统服务价值,生态资源分布格局变化产生重大的影响。

(2) 滨海城市各地类转换剧烈,建设用地面积显

著增加;耕地、林地面积持续减少;草地、水系和未利用地面积占比较少变化较小。土地利用类型转换主要以耕地,林地转换为建设用地;湿地,林地,草地转换为农业用地。

(3) 滨海城市各类土地的生态系统服务价值贡献大小为:耕地、林地、湿地、草地、水域和未利用地。生态系统服务价值类型贡献大小为:供给服务、调节服务、支持服务和文化服务。碳储量贡献主要以林地、湿地、耕地为主。

(4) 滨海城市城镇化过程中,政府部门追求经济 GDP 增长,调整三大产业结构,提升滨海地带城镇化水平;土地城镇化过程中侵占耕地,林地、水域和其他生态地类,对生态服务价值和碳储量保持造成不利影响。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Turner B L, Meyer W B, Skole D L. Global land-use/land-cover change: towards an integrated study [J]. *Ambio (Journal of the Human Environment, Research and Management)*, 1994,23(1):91-95.
- [2] B Ganasri, A Raju, G Dwarakish. Different approaches for land use land cover change detection: a review[J]. *Research and Reviews: Journal of Engineering and Technology*, 2013,2:44-48.
- [3] Li Xiangmei, Wang Ying, Li Jiangfeng, et al. Physical and socioeconomic driving forces of land-use and land-cover changes: a case study of Wuhan city, China [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016,2016: 1-11.
- [4] Li Fei, Zhang Shuwen, Yang Jiuchun, et al. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China [J]. *Ecosystem Services*, 2018,31:12-20.
- [5] 杨浩,王子羿,王婧,等.京津冀城市群土地利用变化对热环境的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2018,33(11):1912-1925.
- [6] 王志恒,刘玲莉.生态系统结构与功能:前沿与展望[J]. *植物生态学报*, 2021,45(10):1033-1035.
- [7] 徐彩瑶,濮励杰,朱明.沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2018,38(3):1148-1162.
- [8] Natkhin M, Dietrich O, Schäfer M P, et al. The effects of climate and changing land use on the discharge regime of a small catchment in Tanzania [J]. *Regional Environmental Change*, 2015,15(7):1269-1280.
- [9] Lorencová E, Frélichová J, Nelson E, et al. Past and future impacts of land use and climate change on agricultural ecosystem services in the Czech Republic [J]. *Land Use Policy*, 2013,33:183-194.

- [10] Daniel D W, Smith L M, Belden J B, et al. Effects of land-use change and fungicide application on soil respiration in playa wetlands and adjacent uplands of the U. S. High Plains [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514: 290-297.
- [11] Collard S J, Zammit C. Effects of land-use intensification on soil carbon and ecosystem services in Brigalow (*Acacia harpophylla*) landscapes of Southeast Queensland, Australia [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 117(2/3): 185-194.
- [12] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom [J]. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [13] 施劲瑜, 杨波, 江文胜, 等. 土地利用类型对滨海城市复合淹没的影响: 以象山县为例[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(2): 83-93.
- [14] Zhang Wen, Chang W J, Zhu Z C, et al. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change [J]. *Applied Geography*, 2020, 117: 102174.
- [15] 张天海, 田野, 徐舒, 等. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.
- [16] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [17] Gashaw T, Tulu T, Argaw M, et al. Estimating the impacts of land use/land cover changes on ecosystem service values: the case of the Andassa watershed in the Upper Blue Nile Basin of Ethiopia [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 219-228.
- [18] Talukdar S, Singha P, Mahato S, et al. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the Lower Gangetic Plain of India [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106121.
- [19] Biratu A A, Bedadi B, Gebrehiwot S G, et al. Ecosystem service valuation along landscape transformation in central Ethiopia [J]. *Land*, 2022, 11(4): 500.
- [20] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [21] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [22] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. *科学通报*, 2000, 45(1): 17-22.
- [23] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [24] 吴攀, 杨木壮, 刘伟聪. 2007—2015 年东莞市土地利用及其生态系统服务价值的时空演变[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 250-255.
- [25] 王兆峰, 许静. 土地利用演变对国家公园生态系统服务价值的影响: 以三江源国家公园为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 6948-6958.
- [26] 王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 等. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响: 基于强度分析模型[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3106-3118.
- [27] 卓昭君, 柯樱海, 洪剑明, 等. 2000 年以来张家口坝上高原生态系统服务价值及其变化[J]. *湿地科学*, 2022, 20(2): 162-175.
- [28] Zhang Mei, Huang Xianjin, Chuai Xiaowei, et al. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a spatial-temporal perspective [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10233.
- [29] Liu Xiaoping, Wang Shaojian, Wu Peijun, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12): 6834-6844.
- [30] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2799-2809.
- [31] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1198-1213.
- [32] Yu Zhen, Lu Chaoqun, Cao Peiyu, et al. Long-term terrestrial carbon dynamics in the Midwestern United States during 1850—2015: roles of land use and cover change and agricultural management [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2673-2690.
- [33] Dida J J, Tiburan C Jr, Tsutsumida N, et al. Carbon stock estimation of selected watersheds in Laguna, Philippines using InVEST [J]. *Philippine Journal of Science*, 2021, 150(2): 501-513.
- [34] 隋玉正, 孙大鹏, 李淑娟, 等. 碳储存变化背景下东营市海岸带生态系统保护修复[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8112-8123.
- [35] Li Kongming, Cao Jianjun, Adamowski J F, et al. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: a case study in Huining County, China [J]. *Environmental Development*, 2021, 39: 100641.
- [36] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10):

- 2783-2792.
- [37] Li Lu, Song Yan, Wei Xuhua, et al. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: a case study of Wuhan, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:106064.
- [38] 叶剑平, 高峰. 我国快速城镇化背景下滨海地带土地开发利用探讨[J]. *现代管理科学*, 2017(6):9-11.
- [39] 朱丽亚, 胡克, 孙爽, 等. 基于 InVEST 模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J]. *现代地质*, 2022, 36(1):96-104.
- [40] 杨怀宇, 王春晓, 郭宗香, 等. 池塘养殖生态系统空气调节服务价值的实证研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(5):432-438.
- [41] 徐婕, 潘洪义, 曹文亚, 等. 基于 LUCC 的眉山市县域碳排放效应[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(5):683-689.
- [42] 辛琨, 肖笃宁. 盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J]. *生态学报*, 2002, 22(8):1345-1349.
- [43] 陈娟, 王龙, 赵欣运, 等. 贵阳市城镇化进程与土地利用转变关系[J]. *地球科学*, 2019, 44(9):2944-2954.
- [44] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以嘉兴市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3):333-340.
- [45] Zhang Chao, Zhong Shuai, Wang Xue, et al. Land use change in coastal cities during the rapid urbanization period from 1990 to 2016: a case study in Ningbo City, China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(7):2122.
- [46] Li Ying, Feng Yu, Guo Xiaorong, et al. Changes in coastal city ecosystem service values based on land use: a case study of Yingkou, China [J]. *Land Use Policy*, 2017, 65:287-293.
- [47] 李毅, 肖腊梅, 胡文敏, 等. 长株潭核心区土地利用变化时空格局及驱动力多维分析[J]. *经济地理*, 2021, 41(7):173-182.
- [48] 张宇晗, 张兵华, 彭琳, 等. 福州市 2005—2020 年土地利用变化及驱动因素研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3):408-416.
- [49] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(4):1280-1290.
- [50] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5):1214-1232.
- [51] 张晓光, 张赢心, 李士美, 等. 基于土地利用的青岛市碳排放变化特征与预测[J]. *地理空间信息*, 2022, 20(5):1-5.