

DOI: 10.5846/stxb201710131837

张天海, 田野, 徐舒, 唐立娜, 郭蔚. 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. 生态学报, 2018, 38(21): 7572–7581.

Zhang T H, Tian Y, Xu S, Tang L N, Guo W. The evolvement of land use patterns in coastal cities and its influence on ecosystem service values. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7572–7581.

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

张天海¹, 田野^{2,*}, 徐舒³, 唐立娜⁴, 郭蔚¹

¹ 四川师范大学, 工学院, 成都 610068

² 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100083

³ 中国环境科学研究院, 北京 100012

⁴ 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

摘要: 土地利用变化改变土地原有的生态系统服务价值(ESV)和功能, 关系地区可持续发展。选择沿海城市厦门市为研究区, 利用 1989、2000、2010 年 3 期土地利用数据和相关文献数据, 采用土地利用动态度、转移矩阵方法, ESV 等指标计算分析了厦门市土地利用的变化及其对 ESV 的影响。研究结果表明: 1989—2010 年厦门市土地利用综合动态度为同时期全国水平的 5 倍多。该时期厦门市和全国建设用地动态度均高于其他地类。其中 2000—2010 年间, 厦门市土地利用综合动态度是 1989—2010 年间近 5 倍(458.94%); 在厦门市与各沿海地区对比中发现, 1989—2010 年整个沿海地区建设用地的动态度都高于其他各个单一地类。各沿海地区建设用地动态度大小排序为浙江沿海>厦门>福建沿海>江苏沿海, 厦门市排序靠前。空间特征上, 厦门市建设用地的增加主要是由滨海带滩涂的填埋和耕地的占用, 处于北部的林地基本稳定。研究期 1989—2010 年间, 厦门市 ESV 总量一直处于下降趋势, 其中 2000—2010 年 ESV 总减少量(1.2 亿元)是 1989—2000 年总减少量(1000 万元)的十余倍(1382.57%)。研究区由于水域和耕地的大面积减少, 导致水源涵养、废物处理等生态系统服务功能趋于弱化, 最终致使各类 ESV 成分在 1989—2010 年整体上均处于下降趋势。下降幅度最大的仍然是水文调节和废物处理, 食物和原材料生产变化幅度最小。1989—2000 阶段中保持土壤 ESV 变化的贡献最大, 2000—2010 阶段中水文调节 ESV 变化的贡献最大。2010 年厦门市单位面积 ESV 在东部沿海地区中处于较低水平。反观厦门市 2000—2010 年远高于全国水平的土地利用动态度, 表明厦门市在未来的城市建设中应当划出生态红线, 加强对具有关键生态功能的生态用地保护, 特别是水域和北部的林地。

关键词: 城市化; 土地利用; 时空变化; 生态系统服务价值; 厦门

The evolvement of land use patterns in coastal cities and its influence on ecosystem service values

ZHANG Tianhai¹, TIAN Ye^{2,*}, XU Shu³, TANG Lina⁴, GUO Wei¹

¹ College of Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

² Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100083, China

³ Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

⁴ Key Lab for Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract: Land use change alters the original ecosystem service values (ESV) and function of land, related to regional sustainable development. This research chose the coastal city of Xiamen as a study area, using land use data and related literature data on three phases, 1989, 2000, and 2010, the transfer matrix method, the indexes of ESV and land use

基金项目: 国家自然科学基金(41401213); 四川省教育厅科研项目(18ZB0492); 四川师范大学引进博士科研启动项目(341595001)

收稿日期: 2017-10-13; 网络出版日期: 2018-08-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianye@irsa.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

dynamic degree, and calculated and analyzed the land use change in Xiamen City and its effects on ESV. The results showed that the land use dynamic degree (LUDD) in Xiamen was more than five times the national level during the same period of 1989—2010. In this period, both the dynamic degree of built-up land in Xiamen City and entire nation were higher than other types of land use. Between 2000 and 2010, Xiamen's LUDD was nearly five times (458.94%) that of between 1989 and 2010. Furthermore, the built-up land net change and dynamic degree in both Xiamen and the entire nation were as times as those in 1989—2000, much higher than that of other land use types. In comparison with the LUDD for Xiamen City and three other coastal areas, the built-up land was also higher than other land use types. Additionally, Xiamen's dynamic degree of built up land ranked higher than that of Zhejiang Coast > Xiamen > Fujian Coast > Jiangsu Coast. Regarding the spatial patterns, the increase of the built-up land in Xiamen was mainly by the landfills of watersheds and occupied the farmland around the coastal zone. Forest land remained steady in the northern area. During the period of 1989—2010, the ESV in Xiamen was consistently in decline, of which the total decreased amount of ESV in 2000—2010 (120 million Chinese Yuan) was more than 10 times (1382.57%) of that (RMB 10 million) in 1989—2000. Because of the large area reduction in water and farmland, the ecosystem service functions, such as water conservation and waste disposal tended to be weakened, resulting in many ESV components decreasing in the entire period from 1989 to 2010. The largest decline was hydrologic regulation and waste disposal, with minimal changes in food and raw material production. During the 1989—2000 stage, the ESV change in soil protection contributed the most, whereas in the 2000—2010 stage, the ESV change in the hydrological regulation made the biggest contribution. In 2010, the ESV per km² of Xiamen was ranked at a low level in the eastern coastal areas. Looking back on its high LUDD in 2000—2010, it indicated that Xiamen needed to define an ecological redline for strict protection on key ecological functional zones, especially for watersheds and forest land in the northern area.

Key Words: urbanization; land use; temporal spatial change; transition matrix; Xiamen City

土地利用/土地覆盖变化(Land use and land cover change, LUCC)是全球环境变化重点研究内容^[1-2]。土地利用变化影响生态系统的类型、面积及空间分布格局^[1],是影响生态系统服务功能变化的重要驱动力^[3]。而生态系统服务是衡量地区可持续发展状况的重要视角^[4-6],生态系统服务的退化和丧失影响土地利用的结构、效率和人类可持续发展^[7]。因此土地利用与生态系统服务二者是相互影响、相互制约的关系。

伴随着我国经济的迅猛发展和城镇化的快速推进,土地资源的转变和占用日益活跃,由此导致土地利用类型和面积的阶段性急剧转变^[8-9],对地区生态系统服务价值(ESV, Ecosystem Services Values)产生了显著影响^[10]。因此,在当前城市化快速发展时期,研究土地利用变化对生态系统服务价值的影响,对于调整、优化土地利用格局,促进、协调地区可持续发展具有重要意义^[11-13]。

自1997年Costanza在《Nature》提出ESV估算原理、方法和计算了全球生态系统服务的经济价值后^[5],国际上众多学者对生态系统服务价值的理论方法进行了不断探索和完善^[14-15]。在土地利用变化对生态系统服务价值的影响方面,也有实证研究工作^[16-17]。

我国学者对生态系统服务价值的研究主要体现在两方面。一方面为对ESV评估方法尤其是单位面积生态服务价值表的估算^[18-19],其中2006年建立的评估单价体系及其修正结果被不少学者应用^[20-22]。另一方面则主要是应用生态系统服务价值评估方法结合土地利用进行理论或案例研究^[23-26]。

厦门市作为改革开放后的五个经济特区之一,其经济、城市化发展迅速,在全国处于领先地位。该地区的工业化、城市化建设对全国及周边地区起到示范和辐射作用。

本文选择沿海城市厦门市为研究区,进行土地利用演变及其对ESV的影响机理研究,根据1989、2000和2010年3期TM遥感影像提取的土地利用数据和查阅文献获得的其他数据,使用土地利用净变化量、动态度、ESV、ESV贡献率等指标定量描述了近20余年厦门市土地利用/覆被变化及其影响下的地区ESV变化。并将

计算结果与全国及福建沿海地区进行比较,以期对研究区厦门市的土地利用和ESV变化取得更加深入全面的认识,为促进该市土地资源和社会经济可持续发展提供理论和方法支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况、数据来源、数据处理

厦门市位于中国沿海,福建省东南部,是中国东南沿海典型的港口风景旅游城市,与台湾岛隔海相望。全市辖思明区、湖里区、集美区、海沧区、同安区、翔安区6个行政区,总土地面积1617.2 km²。厦门地势由西北向东南倾斜,西北部为戴云山脉的东南余脉,地势较高。

厦门市自1980年设立经济特区以来,城市人口增加迅速,特别是近20年来经济发展和城市化建设更是突飞猛进,截至2015年底,全市总常住人口为386万人^[27],厦门市2009年城市化率为88.4%(第六次全国人口普查),远高于2010年全国城市化率49.68%。

本研究以厦门市6个区为研究对象,选择1989—2010年为研究期是由于这一时期是厦门市工业化、城市化发展最迅速,土地利用变化异常显著的阶段,研究该时段内的土地利用变化有重要意义。本文将1989—2000年作为第一个研究时期,2000—2010年为第二期。

本研究利用3期Landsat-TM遥感影像(1989、2000和2010年)解译土地利用/覆被图,包括建设用地、耕地、水体、草地、林地5种用地类型。参与计算的栅格数据单元为30 m×30 m,采用人机交互解译方式制图,平均定性准确率90%以上。土地利用研究主要包含变化监测、驱动力分析、土地利用变化预测的建模等内容。由于本文主要采用描述性统计方式分析土地利用变化的监测,不作精细的土地利用变化驱动因素分析和过程模拟与预测,因此该数据精度已经能满足研究需要。

1.2 研究方法

1.2.1 净变化量与动态度

土地利用动态度刻画研究区土地利用在一定时间内的变化速度,综合土地利用动态度用于测算区域整体的土地利用变化速度,单一土地利用动态度(Land Use Dynamic Degree, LUDD)用于计算某种土地类型的变化速度^[28]。指标数值越大,表示土地利用变化剧烈程度越高,数值越低,土地利用变化越缓慢。研究区综合土地利用动态度等于单一土地利用动态度之和。

该指标传统、简明扼要,广泛应用于各种专业性及非专业性的报告和论文之中,其计算方式为研究期内某一地类转化为其他地类的面积总和与该地类转移初期面积的比值。本文为了更综合的描述变化幅度和变化速度,将单一地类在研究期内的变化量抽离出来,构建净变化量指标(Land Use Net Change, LUNC)和净变化量倍数指标。三个指标的计算公式依次为:

$$LUNC_i = LU_{ib} - LU_{ia} \quad (1)$$

$$M_{mn} = \frac{|LUNC_{im}|}{|LUNC_{in}|} \quad (2)$$

$$LUDD_i = \frac{|LUNC_i|}{LU_{ia}} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

式中,LUNC_{*i*}为地类*i*净变化量;LU_{*ib*}为该地类*i*研究终期的值;LU_{*ia*}为研究初期的值;M_{*mn*}为两个不同研究期*m*和*n*净变化量的比值;LUDD_{*i*}为动态度;*T*为研究时段;本研究中*T*设定为年,公式计算结果表示该地类的年平均变化率。综合土地利用动态度等于各地类LUDD_{*i*}之和。

3个指标中,净变化量用来比较研究区内不同地类变化幅度的大小;由于不同研究区土地面积存在差异,净变化量不便于比较不同研究区土地利用变化,因此净变化量倍数和动态度则消减了不同面积大小和时期的差异,便于不同研究区土地利用变化之间的比较研究。

1.2.2 生态服务价值

为了便于分析生态系统服务价值变化情况和对不同地区生态服务价值进行比较,本文在传统生态系统服

务价值计算方法上增加了生态服务价值贡献 (CR, Contribution rate) 率和单位面积生态系统价值 (UESV, ESV per unit) 两个指标, CR 描述单项生态系统单项服务价值变化量对生态系统服务总价值的影响。UESV 由于消减了不同研究区面积大小的差异, 便于比较研究。四者的计算公式为:

$$ESV = \sum V_i \times A_i \quad (4)$$

$$ESV_s = \sum V_{si} \times A_{si} \quad (5)$$

$$CR = \frac{\Delta ESV_s}{ESV} \quad (6)$$

$$UESV = \frac{ESV}{A} \quad (7)$$

式中, ESV 为研究区生态系统服务总价值; V_i 为单位面积上土地利用类型 i 的生态系统服务价值; A_i 为研究区土地利用类型的面积。 ESV_s 为研究区生态系统单项服务价值; V_{si} 为单位面积上土地利用类型 i 的生态系统单项服务价值。 CR 是单项生态系统单项服务价值变化量 ΔESV_s 对生态系统服务总价值的比值; $UESV$ 是生态服务价值总量和总面积的比值。

2 研究结果与分析

2.1 厦门市土地利用变化分析

2.1.1 结构变化

本文研究中, 通过对厦门市 1989 年、2000 年以及 2010 年的土地利用进行解译, 得到土地利用分类信息, 表 1 所示。

表 1 从 1989 年到 2010 年的土地利用变化
Table 1 Land use change from 1989 to 2010

时间 Time	耕地 Farmland		林地 Forest		草地 Grassland		水域 Watershed		建设用地 Built-up land	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
1989	664.8	41.1	474.3	29.3	150.9	9.3	148.9	9.2	178.3	11.0
2000	624.0	38.6	470.1	29.1	152.7	9.4	153.7	9.5	216.7	13.4
2010	473.0	29.3	474.5	29.4	130.7	8.1	121.6	7.5	413.5	25.6
1989—2000	-40.8	-6.1	-4.2	-0.9	1.8	1.2	4.8	3.2	38.4	21.5
2000—2010	-151.0	-24.2	4.4	0.9	-22.0	-14.4	-32.1	-20.9	196.8	90.8
1989—2010	-191.8	-28.9	0.2	0.0	-20.3	-13.4	-27.3	-18.3	235.2	131.9

1989、2000 和 2010 年厦门市土地利用结构表中(表 1), 耕地、林地是厦门市主要的土地利用类型, 3 个时间节点中二者面积合计占厦门市总面积的 70.4%、67.7%、58.7%。

从全时间段看, 21 年间建设用地净变化量最大(235.2 km²), 2010 年其比例上升到 25.6%, 成为主要用地类型之一。净变化量大小其次为耕地(-191.8 km²) 和水域(-27.3 km²)。耕地、水域面积的减少和建设用地的增加量基本相等, 说明这一阶段城市扩张中建设用地的增加很可能来源于减少的耕地和水域(填埋)。林地总量和比例保持稳定, 说明 20 年间的林地保护很好。

分阶段来看, 2000—2010 年间建设用地、耕地、水域的净变化量均数倍于 1989—2000 年间, 分别为 512.5%、370.1%、668.8%(表 1)。考察同时期全国数据^[29-30], 全国建设用地 2000—2010 年间净变化量是 1989—2000 年的 213.64%, 远高于全国其他地类净变化量倍数。这一对比结果显示全国范围在 2000—2010 年间建设用地普遍处于急剧增加时期, 而研究区厦门市的建设用地增速尤为迅速。

从各个阶段各个地类具体来看, 厦门市 1989—2000 年耕地净变化量最大(-40.8 km²), 其次为建设用地

(38.4 km²) 和水域(4.8 km²)。2000—2010 年间建设用地净变化量最大(196.8 km²) ,其次为耕地(-151.0 km²) 和水域(-32.1 km²)。这一结果显示 厦门市两时间段内均是耕地的大量减少和建设用地的增加。

在 ArcGIS 中对土地利用类型间的动态转化进行分析 ,通过对两个年份的土地利用数据进行叠加分析得到土地利用转移信息 ,将土地转出量大于 10 km²的地类转移信息整理成土地转移矩阵表 ,如表 2 所示。

表 2 1989 到 2010 年间土地的转移/km²/%

Table 2 Land-use transition from 1989 to 2010

时间 Time	转出地类 Land use out	转入地类 Land use into					
		耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Watershed	建设用地 Built-up land	合计 Total
1989—2000	耕地		1.2 (0.2)	0.5(0.1)	11.1(1.7)	31.8(4.8)	44.5(6.7)
2000—2010	耕地		0.6(0.1)	0.1(0.0)	5.6(0.9)	150.5(24.1)	156.8(25.1)
	林地	0.9(0.2)		2.3(0.5)	0.8(0.2)	14.2(3.0)	18.2(3.9)
	草地	0.3(0.2)	19.8(13.0)		0.1(0.1)	5.6(3.7)	25.8(17.0)
	水域	0.5(0.3)	0.3(0.2)	0.1(0.1)		47.3(30.8)	48.2(31.4)
	建设用地	4.2(1.9)	1.9(0.9)	1.2(0.6)	13.6(6.3)		20.9(9.7)

从表中可见 ,土地利用的主要转移是耕地、水域向建设用地的转移。具体特点有:

1989 年到 2000 年减少的耕地 44.5 km²中有 31.8 km²转化为建设用地 ,比例最大。

2000 年到 2010 年这 10 年间减少的耕地 156.8 km²中有 150.5 km²转向了建设用地 ,比例最大。其次为水域转化为建设用地的占 2000 年水域总面积的 30.8%(47.3 km²) ,一个不小的比例。此阶段建设用地面积大幅激增 ,由 2000 年的 216.7 km²(13.4%) 增加到了 2010 年的 413.5 km²(25.6%) ,接近翻倍。说明这一阶段厦门市的土地利用异常活跃 ,并且进入新的阶段 ,其中尤其是建设用地增量大幅超过历史时期和同时期其他各类用地。由此可知 ,厦门市主要的城市化加速过程发生在这 10 年中 ,并且主要是通过填埋水域和占用耕地来完成。

2.1.2 动态度分析

土地利用动态度描述变化速度的大小 ,表征阶段内人类活动对自然环境影响的强弱。结合研究区厦门市土地利用数据和查阅相关文献数据 ,计算得到厦门市和全国同时期土地利用的动态度(全国值为 1990—2010) ,如表 3 所示。对比厦门市和全国数据 ,发现如下特点:

表 3 从 1989 年到 2010 年的土地利用变化对比/%

Table 3 Comparison of land use change from 1989 to 2010

地类 Land use	全国—厦门 National—Xiamen							
	动态度 Land use dynamic degree						净变化量倍数 Times of net change amount	
	阶段 I Period I (1989—2000)		阶段 II Period II (2000—2010)		阶段 I + II Period I + II (1989—2010)		阶段 II / 阶段 I Period II / Period I	
耕地 Farmland	0.20	0.61	0.07	2.42	0.06	1.44	35.46	369.87
林地 Forest	0.48	0.09	0.46	0.09	0.02	0.00	92.10	104.93
草地 Grassland	0.12	0.12	0.07	1.44	0.09	0.67	54.65	1248.46
水域 Watershed	1.62	0.32	0.16	2.09	0.12	0.92	9.76	669.20
建设用地 Built-up land	1.02	2.15	1.98	9.08	1.60	6.59	213.64	512.16
合计 Total	3.44	3.30	2.73	15.12	1.90	9.63	405.62	2904.63

(1) 从全时期总体情况来看 ,研究区厦门市 1989—2010 年间全市土地利用综合动态度为 9.63% ,为同时期全国水平(1.90%) 的 5 倍多(507.10%)。这一结果表明 ,厦门市作为全国经济特区 ,其社会经济活动导致的土地利用活跃程度和变化速率远超出全国平均水平。

(2) 从各类土地利用分别来看,建设用地的动态度尤其高出其他地类。如,全国土地利用动态度最高的地类建设用地(1.60%)和排名第二的水域(0.12%)差别较大;同样,厦门市动态度最高的地类建设用地(6.59%)和排名第二的耕地(1.44%)之间也存在较大差距,表明此阶段全国各地的城市化建设活动处于高频时期,而地处改革开放前沿的经济特区厦门市其城市化活动尤其领先于全国。

(3) 从两个阶段土地利用综合动态度分别来看,厦门市 2000—2010 年全市土地利用综合动态度(15.12%)是 1989—2010 年间(3.30%)近 5 倍(458.94%);而全国前后两个阶段的土地利用综合动态度略有下降。

(4) 而从两个阶段各地类动态度来看,则厦门市和全国都表现出如下共同特征:

其一,建设用地的动态度在阶段 II 高于阶段 I。如,全国 2000—2010 年间建设用地动态度(1.98%)是 1989—2010 年间(1.02%)的近两倍(193.86%),厦门市 2000—2010 年间建设用地动态度(9.08%)是 1989—2010 年间(2.15%)的 4 倍多(421.38%)。

其二,建设用地在两个阶段的动态度排名均靠前。两个阶段中,只有全国建设用地的动态度(1.02%)在 1989—2010 年间低于水域(1.62%),在阶段 II 中建设用地动态度最高(1.98%),且是排名第二的林地(0.46%)的 4 倍多(427.96%)。而厦门市建设用地动态度在两个阶段均最高,且远高于其他地类,如 2000—2010 年间厦门市动态度最高的地类建设用地(9.08%)和排名第二的耕地(2.42%)的近 4 倍(375.18%)。

分阶段分地类动态度的差异分析结果显示,在 2000—2010 年间,全国各地的城市建设活动处于增速状态,远超过历史时期并进入加剧活动的新阶段。而厦门市在阶段 II 的建设用地增速更是远超过阶段 I,表明厦门市的城市化建设处于急剧加速时期。参考第六次全国人口普查数据,厦门市 2009 年城市化率为 88.4%,远高于 2010 年全国城市化率 49.68%,是对厦门市该时期城市化快速发展的证明之一。

为进一步确认研究区厦门市土地利用变化程度,本文查阅相关文献^[31-33],获取相似沿海地区的土地利用变化数据进行比较。所选沿海地区包括江苏 3 个地市(连云港、盐城及南通)、浙江 7 个地市(舟山、嘉兴、杭州、绍兴、宁波、台州和温州)和福建临海的 23 个县(市、区)。计算过程中主要关注建设用地、水域和耕地的变化,林地、草地和未用地归为其他。计算所得各地区 LUDD 如表 4 所示。

表 4 从 1989 年到 2010 年沿海各地区土地利用动态度对比/%

Table 4 Comparison of LUDD in coastal areas from 1989 to 2010

沿海地区* Coastal area	耕地 Farmland	建设用地 Built-up land	水域 Watershed	其他 Other
江苏	0.01	0.72	0.29	0.89
浙江	0.90	6.76	0.77	0.01
福建	1.94	2.52	0.37	0.59
厦门	1.44	6.59	0.92	0.16

* 各地区动态度时间段:江苏为 1990 年到 2009 年,浙江为 1990 年到 2010 年动态度,福建为 2005 年到 2010 年

从表 4 可见,各个沿海地区中,建设用地的动态度仍然高于其他各个单一地类(江苏其他类别的 0.89%动态度包含林地、草地、盐田等多种地类)。表明 1989—2010 年中整个沿海地区都处于城市化快速发展的过程中。进一步比较建设用地动态度,其大小排序为浙江沿海>厦门>福建沿海>江苏沿海,其中厦门和浙江沿海地区动态度非常接近,可以看出,厦门的城市土地利用变化动态度普遍高于东部沿海其他的城市和地区。说明研究时段内厦门的城市化发展速度不仅高于全国平均水平,也领先于东部经济发达的沿海各地。

2.1.3 空间特征与生态保护

上述分析可知,厦门市的城市化过程主要发生在 2000 年到 2010 年阶段。对该阶段土地利用的转移在 GIS 中进行表达,如图 1 所示。由图可见,厦门市土地利用变化中水域的减少在空间分布上主要表现为对滩涂的填埋,发生在厦门岛西北的机场周围和港区、东北的五缘湾一带、海沧的港区和同安工业区。可见,水域减少的主要原因仍然是城市化和工业化的影响所致;水域转化为其他用地的量都非常小(小于 1 km²)。

耕地转建设用地主要发生在厦门岛内和周边海沧、集美、同安、翔安四区的滨海平坦地带。造成这种转变的原因在于：一方面，受到岛内城市化以及各区区中心城市化的辐射影响；另一方面，与地理坡度可能有很大关系。此外，政策导向特别是对台投资开发区的布局以及港口、保税区、高新区的建设也是重要原因。

林地总量和比例保持稳定的原因，一方面是 20 年间的林地保护很好，另外的原因则可能是林地主要分布于厦门和泉州、漳州接壤的较高海拔山区，坡度较大。并且这些山区远离建成区或各区中心，因而较少受到城市化的直接冲击。岛内和海沧的林地主要分布于观音山、东坪山、大坪山等成片山体中。

上述分析结果的启示在于，对研究区厦门市，在制定城市未来发展规划时应统筹考虑该市土地利用空间分布特征，进而优化土地利用结构，在空间上进行合理有序的时序开发。更具体的，对于海岸线和本岛区域，可以继续对现有建成区进行合理扩张，但应当对林地、水域划出生态红线，严格控制开发。而对于北部大面积的林地区域，由于其承载重要的生态系统功能，因此应当尽量控制建成区向该地区的延伸，甚至以通过划出生态红线建立生态保护区的方式保障生态用地比重，保护生态系统的完整性和系统功能，建立生态环境友好型的土地利用合理空间格局。

后续将深入进行的工作：土地利用转移的空间特征及其驱动因素、驱动机制；已经采用的指标、模型能够测度土地利用变化的总体综合活跃程度和单一地类的转化方向，但是无法测算和比较区域差异性，即不能识别土地利用变化的空间“热点”或“敏感”区域。这部分工作有待采用空间聚类等分析方法深入探讨。

2.2 厦门市生态服务价值变化分析

2.2.1 ESV 变化与生态保护

有学者曾对中国具有生态学背景的专业人员进行问卷调查，得出新的生态系统服务评估单价体系^[20-21]。目前，该评估体系已被广泛应用于生态系统服务价值核算研究，并取得了较好的研究成果，虽然后续也有不少学者进行 ESV 方法的改进与应用研究，其实质仍以 2003 年提出的基于单位面积价值当量表为基础进行^[20]。

采用不同的 ESV 参数得到不同的计算结果，据研究，ESV 计算结果对 ESV 参数敏感性较小^[34-35]。此外，利用已有研究^[20-21]订正生态系统服务当量可将该方法推广到不同的研究区，并使结果更符合实际。但在本研究中，考虑到便于在不同沿海地区之间进行横向比较及数据可获得性，本研究统一采用谢高地 2007ESV 系数表进行计算^[21]。计算所得厦门市生态系统单项服务价值变化情况如表 5 所示。

生态系统的异质性、复杂性造成 ESV 测量的困难。由于 ESV 对当量参数敏感性小的特点，有利于探讨自然资源变化时其服务价值的边际变化。因此，本文以此对研究期 ESV 的变化做差值计算并进而讨论 ESV 的时序演变情况。

从表 5 中可以看出，林地是研究区 ESV 的最主要构成部分(49.14%—55.32%)，其次为水域和耕地。研究期 1989—2010 年间，除林地维持稳定外，其他三类用地 ESV 均呈负增长。由公式可知，ESV 变化的本质是地类面积的变化，因此讨论单一地类 ESV 的变化幅度和比例本质是讨论地类面积的变化幅度和比例，与土地利用的分析部分重复，因此本文此处只讨论研究区整体 ESV 总量的变化量及其幅度。由表中可知，研究区

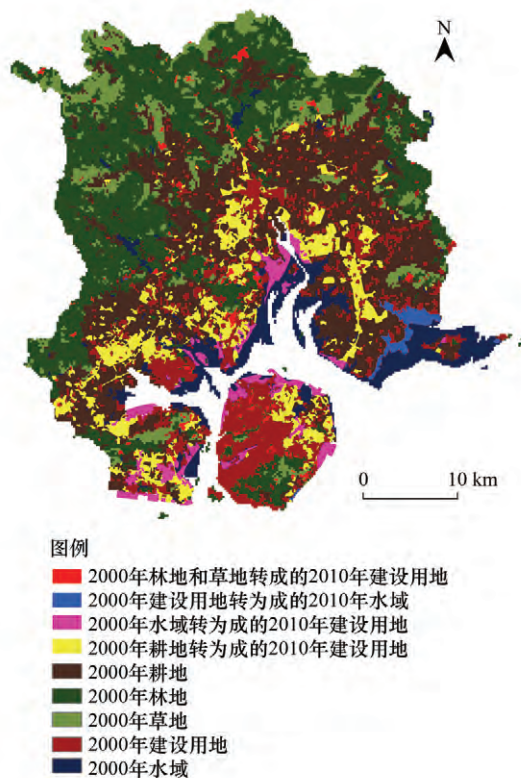


图 1 2000—2010 年间厦门市土地利用变化
Fig.1 Land-use change from 2000 to 2010 in Xiamen city

21 年间ESV 总量一直处于下降趋势,反映了该地区生态系统为人类提供服务能力的下降。其中 2000—2010 年 ESV 总减少量(1.2 亿元)是 1989—2000 年总减少量(1000 万元)的 1382.57%,十余倍。说明 2000—2010 年是研究区 ESV 总量急速下降阶段。其中,该阶段对总量的减少贡献最大的是耕地(7000 万元),其次是水域(5000 万元)。结合前述土地利用变化分析可知,主要是该时期快速城市化促使大量耕地和水域转化为建设用地,从而导致整体 ESV 的急速下降。

表 5 1989 到 2000 年间不同地类生态系统服务价值(十亿元)

Table 5 Ecosystem service values of each land use type in Xiamen from 1989 to 2010

时间 Time	耕地 Farmland	草地 Grassland	林地 Forest	水域 Watershed	合计 Total
1989	0.24	0.08	0.60	0.30	1.22
2000	0.22	0.08	0.59	0.31	1.21
2010	0.17	0.07	0.60	0.25	1.08

从表 6 中可以看出,研究区各类 ESV 中,水文调节占比最大(19.84%—20.52%),其次为废物处理和维持生物多样性,食物生产占比最小(3.11%—3.56%)。这种排序结果与魏慧等对山东德州的研究结果一致^[36],参考谢高地等的 ESV 系数表可知,食物生产的 ESV 系数在各个地类中都较低,林地、草地中均倒数第二,水域中倒数第四^[21]。因此,虽然研究区耕地面积所占比例很高,且食物生产 ESV 主要体现在耕地上,但仍不能改变其排名最低的结果。

表 6 生态系统服务价值变化及贡献率

Table 6 Ecosystem services values change and its contribution rate

一级服务功能 1st level services	二级服务功能 2nd level services	价值 Value billion/(10 亿元)			价值变化贡献率 Contribution rate of value change/%		
		1989	2000	2010	1989—2000	2000—2010	1989—2010
供给服务 Supply services	食物生产	0.04	0.04	0.03	19.32%	6.33%	7.20
	原材料生产	0.08	0.08	0.08	12.92%	2.34%	3.05
调节服务 Regulating services	气体调节	0.13	0.13	0.12	21.00%	5.00%	6.08
	气候调节	0.14	0.14	0.13	21.80%	8.24%	9.15
	水文调节	0.25	0.25	0.21	-22.00%	26.39%	23.13
支持服务 Support services	废物处理	0.19	0.19	0.15	-4.81%	25.45%	23.40
	保持土壤	0.15	0.14	0.13	35.17%	9.59%	11.32
文化服务 Cultural services	维持生物多样性	0.16	0.16	0.15	20.19%	10.26%	10.93
	提供美学景观	0.08	0.09	0.08	-3.60%	6.41%	5.73

水域的各类 ESV 成分系数中,最大的三者分别是水文调节(8429.61)、废物处理(6669.14)和维持生物多样性(1540.41)。厦门市 ESV 的这种构成,一方面归因于 ESV 系数,另一方面也反映出研究区地处沿海,拥有大面积水域地类的特点。

研究区各类 ESV 成分的变化方面,在 1989—2010 年间整体上均处于下降趋势。下降幅度最大的仍然是水文调节(4000 万元)和废物处理(4000 万元),主要原因是水域地类在城市化过程中大面积转化为建设用地。与土地利用类型中耕地减少面积最大的情况相反,食物和原材料生产的 ESV 变化幅度最小(1000 万元,400 万元),原因在于 ESV 系数表中森林的原材料生产系数最大(1338.32),其次才是耕地(175.15)。由于厦门市 21 年间林地面积基本维持稳定(470.1—474.5 km²),因此极大的缓解了因为耕地面积下降对食物和原材料生产 ESV 的影响。考虑到林地是研究区 ESV 的最主要构成部分(占比 49.14%—55.32%),因此厦门市林地的良好保护对地区维持 ESV 稳定发挥了积极的作用。

从各成分对 ESV 总量减小的贡献看,1989—2000 阶段中保持土壤 ESV 变化的贡献最大(35.17%),主要是这一阶段耕地减少面积最大。2000—2010 阶段中水文调节 ESV 变化的贡献最大(26.39%),原因主要是这

一阶段水域面积减少很多,而水域的水文调节 ESV 系数最大(8429.61),其次为废物处理(25.45%),其原因有两方面,一为该阶段耕地减少面积最大,二为水域的废物处理 ESV 系数很大(6669.14)。

上述分析结果表明,对于研究区厦门市,由于水域和耕地的大面积减少,逐步被低生态系统服务价值区域(建设用地)所替代。导致水源涵养、废物处理等生态系统服务功能趋于弱化,最终致使生态系统服务价值趋于下降趋势。此外,由于林地是研究区 ESV 的最主要构成部分,因此在未来的城市建设中,厦门市应当加强对水域、林地、耕地等生态用地的保护,及时划出生态红线给予保护,注重城市的合理开发和有序建设,避免过度开发导致区域生态失衡和危机。

2.2.2 ESV 时空探讨

ESV 空间分析方面,本文将厦门市与外部其他沿海地区进行横向比较以便进一步确定厦门 ESV 发展状态。查阅相关文献并使用本文中同样方法计算、比较发现^[31-33] 2010 年厦门市单位面积 ESV(6697.22)低于福建省沿海 23 个县(市、区) ESV 均值(8051.45)和浙江沿海地区 ESV 均值(8168.67),仅高于江苏沿海地区 ESV 均值(4750.69)。亦即,2010 年厦门市的 ESV 在中国东部沿海地区中处于较低水平。反观厦门市 2000—2010 年远高于全国水平的土地利用动态度,表明 2000—2010 年期间厦门市土地利用变化速度急剧加速,区域人类社会经济活动对自然环境系统的影响明显加强。该地区协调城市的快速化发展和生态环境的可持续发展是当前应该注意的问题。

由于本文主要致力于确认研究区厦门市的城市发展状态(土地利用变化)以及由此导致的生态服务变化,因此本文主要进行的是研究区与外部其他沿海地区之间的横向比较分析。在研究区内部空间分析上,本文没有计算其 ESV 空间差异及其与土地利用空间部分的关系。以研究区各县区为统计单元,对土地利用面积变化量与 ESV 变化量进行相关性分析是进一步的工作。

此外,为便于比较分析,本文在不同时空计算上采用的是统一参数。对于单一区域研究,修正空间和时间序列上 ESV 参数的差异,也有利于使计算结果更贴近实际值,提高 ESV 评价的准确性和可比性。

3 结论

1989—2010 年全时间段土地利用变化方面,作为经济特区的厦门市土地利用综合动态度为同时期全国水平的 5 倍多。同时厦门市和全国建设用地动态度均高于其他地类。其中,厦门市和全国 2000—2010 年间建设用地净变化量和动态度均数倍于 1989—2000 年间,远高于其他地类净变化量倍数。全国各地的城市建设活动处于增速状态,而厦门市建设用地增速尤为迅速,远超过历史时期并进入加剧活动的新阶段。

生态系统服务价值方面,林地是研究区厦门市 ESV 的最主要构成部分,其次为水域和耕地。研究期 1989—2010 年间,除林地维持稳定外,其他三类用地 ESV 均呈负增长。说明快速的经济增长,致使城市扩张加剧进而导致生态系统服务价值下降。其中 2000—2010 年 ESV 总减少量是 1989—2000 年总减少量的十余倍。其中水域地类大面积转化为建设用地从而导致水文调节和废物处理大幅度下降,是 ESV 总体下降的主要原因。

通过比较发现,2010 年厦门市单位面积 ESV 在沿海地区中处于较低水平。反观厦门市 2000—2010 年远高于全国水平的土地利用动态度和急剧增加的建设用地,表明研究期间厦门市剧烈的土地利用变化对自然环境系统的影响明显加强。该地区协调城市快速化发展和生态环境的保护与可持续发展是当前应该高度重视的问题。在未来的土地利用总体规划中,应当注意土地空间格局的调控,划出生态红线,维持甚至增加生态用地。

参考文献(References):

- [1] Mooney H A, Duraipappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(S1): 3665-3672.
- [2] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2012, 3(4):

385-390.

- [3] 房学宁, 赵文武. 生态系统服务研究进展——2013 年第 11 届国际生态学大会(INTECOL Congress) 会议述评. 生态学报, 2013, 33(20) : 6736-6740.
- [4] 张永民. 生态系统服务研究的几个基本问题. 资源科学, 2012, 34(4) : 725-733.
- [5] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630) : 253-260.
- [6] 郑德凤, 臧正, 孙才志, 李红英. 基于生态系统服务理论的中国绿色经济转型预测分析. 生态学报, 2014, 34(23) : 7137-7147.
- [7] Gascoigne W R, Hoag D, Koontz L, Tangen B A, Shaffer T L, Gleason R A. Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas, USA. *Ecological Economics*, 2011, 70(10) : 1715-1725.
- [8] De Groot R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4) : 175-186.
- [9] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin III S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, De Wit C A, Hughes T, Van Der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461(7263) : 472-475.
- [10] 蒋小荣, 李丁, 李智勇. 基于土地利用的石羊河流域生态服务价值. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(6) : 68-73.
- [11] 高奇, 师学义, 黄勤, 张琛, 马桦薇. 区域土地利用变化的生态系统服务价值响应. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2) : 308-312.
- [12] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5) : 798-808.
- [13] 王晓峰, 吕一河, 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 自然杂志, 2012, 34(5) : 273-276, 298-299.
- [14] Rönnbäck P. The ecological basis for economic value of seafood production supported by mangrove ecosystems. *Ecological Economics*, 1999, 29(2) : 235-252.
- [15] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2) : 293-301.
- [16] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2) : 219-242.
- [17] Kozak J, Lant C, Shaikh S, Wang G X. The geography of ecosystem service value: the case of the des Plaines and Cache River Wetlands, Illinois. *Applied Geography*, 2011, 31(1) : 303-311.
- [18] 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. 生态学报, 1999, 19(5) : 607-613.
- [19] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1) : 17-22.
- [20] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2) : 189-196.
- [21] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5) : 911-919.
- [22] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. 自然资源学报, 2015, 30(8) : 1243-1254.
- [23] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4) : 441-446.
- [24] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 刘江. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. 地理学报, 2010, 65(6) : 708-714.
- [25] 冯异星, 罗格平, 鲁蕾, 尹昌应, 周德成, 许文强. 土地利用变化对干旱区典型流域生态系统服务价值的影响. 水土保持学报, 2009, 23(6) : 247-251.
- [26] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. 生态学报, 2013, 33(3) : 726-736.
- [27] 厦门市统计局. 厦门市国民经济和社会发展统计公报. <http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjsj>.
- [28] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 2003, 58(5) : 643-650.
- [29] 翟俊, 刘荣高, 刘纪远, 赵国松. 1990-2010 年中国土地覆被变化引起反照率改变的辐射强迫. 地理学报, 2013, 68(7) : 875-885.
- [30] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东. 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. 地理学报, 2014, 69(1) : 3-14.
- [31] 崔莉. 浙江沿海 20 年土地利用变化分析. 湿地科学与管理, 2013, 9(3) : 44-47.
- [32] 张兴榆, 黄贤金, 赵小凤. 江苏省沿海地区土地利用变化的生态系统服务价值核算. 水土保持研究, 2015, 22(1) : 252-256.
- [33] 何诗, 曾从盛. 2005-2010 年福建沿海土地利用程度动态综合评价分析. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 26(3) : 314-319.
- [34] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2014, 34(12) : 3311-3319.
- [35] 张舟, 吴次芳, 谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用: 瓶颈和展望. 应用生态学报, 2013, 24(2) : 556-562.
- [36] 魏慧, 赵文武, 张骁, 王新志. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例. 生态学报, 2017, 37(11) : 3830-3839.