

增加 14.12%; 水域和裸土地面积分别减少了 10.85%、2.68%; 林地面积先减少后增加, 最大变化量为 7.29%; 沙地面积先增加后减少, 最大变化量为 4.56%。

表 3 1990~2017 年土地利用类型面积占比统计表 (%)

年份	林地	水域	建设用地	耕地	沙地	裸土地
1990	27.23	13.16	14.11	40.99	1.38	3.13
2000	23.63	12.37	17.38	42.44	1.07	3.11
2010	19.94	9.58	18.96	42.92	5.63	2.96
2017	24.96	2.31	28.43	40.00	3.85	0.45

3.2 分类精度验证

分类后利用计算机按土地利用类型随机生成若干个检验点 (1990 年 256 个、2000 年 263 个、2010 年 274 个、2017 年 264 个)。通过目视解译的方法对检验点进行分析判读, 采用误差矩阵和 Kappa 系数对随机森林分类结果进行精度评价计算出的误差矩阵 (表 4)。从 4 期分类误差矩阵看, 制图精度中水域最高, 沙地最低; 用户精度中水域最高, 裸土地最低, 整体来看, 4 期总分类精度在 87.07% 以上, 总 Kappa 系数在 0.84 以上。

表 4 1990~2017 随机森林分类器的误差矩阵计算结果

年份	类别	林地	水域	建设用地	耕地	沙地	裸土地	行和	制图精度 (%)	用户精度 (%)	Kappa 系数
1990	林地	36	1	1	2	0	0	40	90.00	90.00	0.8815
	水域	0	40	0	1	0	0	41	95.24	97.56	0.9708
	建设用地	1	0	50	1	1	2	55	90.91	90.91	0.8842
	耕地	2	0	1	45	2	1	51	86.54	88.24	0.8524
	沙地	0	1	1	1	24	3	30	77.42	80.00	0.7724
	裸土地	1	0	2	2	4	30	39	83.33	76.92	0.7315
	列和	40	42	55	52	31	36	256	总分类精度=87.89		总 Kappa=0.8536
2000	林地	38	1	2	1	0	0	42	88.37	90.48	0.8861
	水域	1	45	0	0	0	0	46	97.83	97.83	0.9737
	建设用地	1	0	47	2	1	3	54	90.38	87.04	0.8384
	耕地	3	0	1	40	3	1	48	83.33	83.33	0.7961
	沙地	0	0	1	2	27	3	33	77.14	81.82	0.7903
	裸土地	0	0	1	3	4	32	40	82.05	80.00	0.7652
	列和	43	46	52	48	35	39	263	总分类精度=87.07		总 Kappa=0.8443
2010	林地	40	1	0	2	0	0	43	88.89	93.02	0.9165
	水域	0	48	0	1	0	0	49	97.96	97.96	0.9751
	建设用地	1	0	45	1	1	2	50	90.00	90.00	0.8777
	耕地	4	0	2	43	5	1	55	81.13	78.18	0.7295
	沙地	0	0	1	2	28	2	33	75.68	84.85	0.8248
	裸土地	0	0	2	4	3	35	44	87.50	79.55	0.7605
	列和	45	49	50	53	37	40	274	总分类精度=87.23		总 Kappa=0.8462
2017	林地	53	0	1	2	0	1	57	91.38	92.98	0.9101
	水域	1	41	0	0	1	0	43	95.35	95.35	0.9444
	建设用地	1	0	47	2	2	2	54	90.38	87.04	0.8386
	耕地	2	0	1	40	2	2	47	86.96	85.11	0.8196
	沙地	1	1	2	1	20	1	26	74.07	76.92	0.7429
	裸土地	0	1	1	1	2	32	37	84.21	86.49	0.8421
	列和	58	43	52	46	27	38	264	总分类精度=88.26		总 Kappa=0.8576

3.3 土地利用变化

每次计算以前一时期的土地利用分类结果为标准, 求出 4 个时期土地利用类型间的相互转化量, 得到土地利用转移矩阵 (表 5)。1990~2000 年间, 建设用地面积增加 9.36 km², 主要源于耕地和林地的减少; 林地面积减少 10.29 km², 流失的林地主要转化为耕地和建设用地; 水域面积减少 2.25 km², 流失的水域面积主要转

化为建设用地; 耕地面积增加 4.15 km², 主要源于林地的减少; 沙地面积减少 0.90 km², 流失的沙地主要转化为耕地和裸土地; 裸土地面积减少 0.07 km², 流失的裸土地主要转化为建设用地和耕地。1990~2000 年间土地利用变化不明显, 主要是当时经济发展速度有限, 大部分土地都保持原有面貌。但随着人口的缓慢增加, 建筑用地和耕地也会略有增加。2000~2010 年间, 建设用地

面积增加 4.53 km², 主要源于耕地和林地的减少; 林地面积减少 10.55 km², 流失的林地主要转化为耕地和建设用地; 水域面积减少 7.98 km², 流失的水域面积主要转化为建设用地和沙地; 耕地面积增加 1.38 km², 主要

源于林地的减少; 沙地面积增加 13.04 km², 增加的沙地主要源于水域和林地减少; 裸土地面积减少 0.41 km², 流失的裸土主要转化为建设用地和沙地. 2000~2010 年间土地利用变化较为缓慢, 其主要原因与前一时期类似.

表 5 1990~2017 土地利用转移矩阵 (km²)

2000 年	1990 年					
	林地	水域	建设用地	耕地	沙地	裸土地
林地	50.33	0.82	7.94	6.64	0.45	1.43
水域	2.30	31.98	0.72	0.28	0.02	0.09
建设用地	8.07	3.78	22.99	11.85	0.60	2.43
耕地	16.40	0.51	6.07	95.58	1.11	1.75
沙地	0.11	0.17	0.36	0.60	1.02	0.80
裸土地	0.69	0.39	2.30	2.32	0.75	2.45
2010 年	2000 年					
	林地	水域	建设用地	耕地	沙地	裸土地
林地	44.44	0.66	3.36	8.45	0.04	0.10
水域	0.98	23.40	1.81	0.94	0.12	0.16
建设用地	4.25	3.33	28.78	13.59	0.61	3.71
耕地	15.73	0.66	12.31	92.49	0.43	1.18
沙地	1.20	7.30	2.12	1.28	1.69	2.51
裸土地	1.02	0.05	1.35	4.68	0.16	1.23
2017 年	2010 年					
	林地	水域	建设用地	耕地	沙地	裸土地
林地	44.82	3.13	3.00	18.15	1.68	0.63
水域	0.08	5.63	0.34	0.10	0.31	0.14
建设用地	4.32	13.94	36.16	17.15	7.57	2.20
耕地	7.21	2.10	12.99	84.66	2.47	5.00
沙地	0.50	2.49	1.66	2.01	4.05	0.29
裸土地	0.11	0.11	0.10	0.73	0.01	0.22
2017 年	1990 年					
	林地	水域	建设用地	耕地	沙地	裸土地
林地	44.60	5.25	6.31	13.25	0.56	1.44
水域	0.74	4.99	0.43	0.33	0.02	0.09
建设用地	12.25	18.14	20.30	25.81	1.28	3.56
耕地	19.13	3.85	12.23	74.88	1.33	3.02
沙地	0.94	5.32	0.97	2.28	0.76	0.75
裸土地	0.24	0.09	0.12	0.71	0.01	0.10

2010~2017 年间, 建设用地面积增加 27.09 km², 主要源于水域、沙地和耕地的减少; 林地面积增加 14.35 km², 增加的林地主要源于水域和耕地的转化; 水域面积减少 20.80 km², 流失的水域面积主要转化为建设用地和林地; 耕地面积减少 8.36 km², 流失的耕地主要转化为建设用地和林地; 沙地面积减少 5.08 km², 减少的沙地主要转化为建设用地和林地; 裸土地面积减少 7.20 km², 流失的裸土主要转化为建设用地.

3.4 类型级别分析

1990~2017 年海坛岛土地利用类型与景观类型级

别指标关系如图 3 所示. 从图 3 可见, 1990~2000 年, 耕地的最大斑块占景观面积比例 (LPI) 和聚合度 (AI) 呈上升趋势. 因为耕地在这一时期是最主要的景观类型, 分布规模最大且面积增加, 耕地分布更加聚集. 聚集的耕地使边界周长减小, 在面积相同的情况下, 导致耕地的边缘密度 (ED) 和周长-面积分形维数 (PAFRAC) 下降. 林地的 LPI、ED 和 PAFRAC 呈下降趋势, 因为林地面积减少, 林地的规模在缩减, 且减少的林地位于林地的集中分布区, 研究区的东北部 (图 2). 建设用地 LPI、ED、PAFRAC 和 AI 均呈上升趋势, 主要是建筑

设用地面积增加,且在上一期的建设用基础上向外扩散造成的。

2000~2010年,耕地的最大斑块占景观面积比例(LPI)和聚合度(AI)呈下降趋势,因为耕地在这一时期面积增加缓慢,且耕地最大斑块面积减小,由图2可知,耕地分布聚集度下降。聚集度下降的耕地使边界周长增加,则在面积相同的情况下,导致耕地的边缘密度(ED)和周长-面积分形维数(PAFRAC)上升。林地的LPI和PAFRAC呈上升趋势,因为林地最大斑块面积增加。随着林地面积的减少,ED和AI均下降。

2010~2017年,建设用地的最大斑块占景观面积比例(LPI)、聚合度(AI)和边缘密度(ED)呈上升趋势。因为建设用地在这一时期面积显著增加,分布规模增大。边缘长度增加明显大于面积增大,但建设用地整体形状复杂性下降,即周长-面积分形维数(PAFRAC)下降。水域的LPI、ED、AI和PAFRAC均呈下降趋势,因为水域面积急剧减少,水域形状由复杂变简单且分布零散,聚集度下降。林地的面积有所增加,人工植树造林导致分布集中形状复杂。因此林地的LPI、ED、PAFRAC和AI均呈上升趋势。

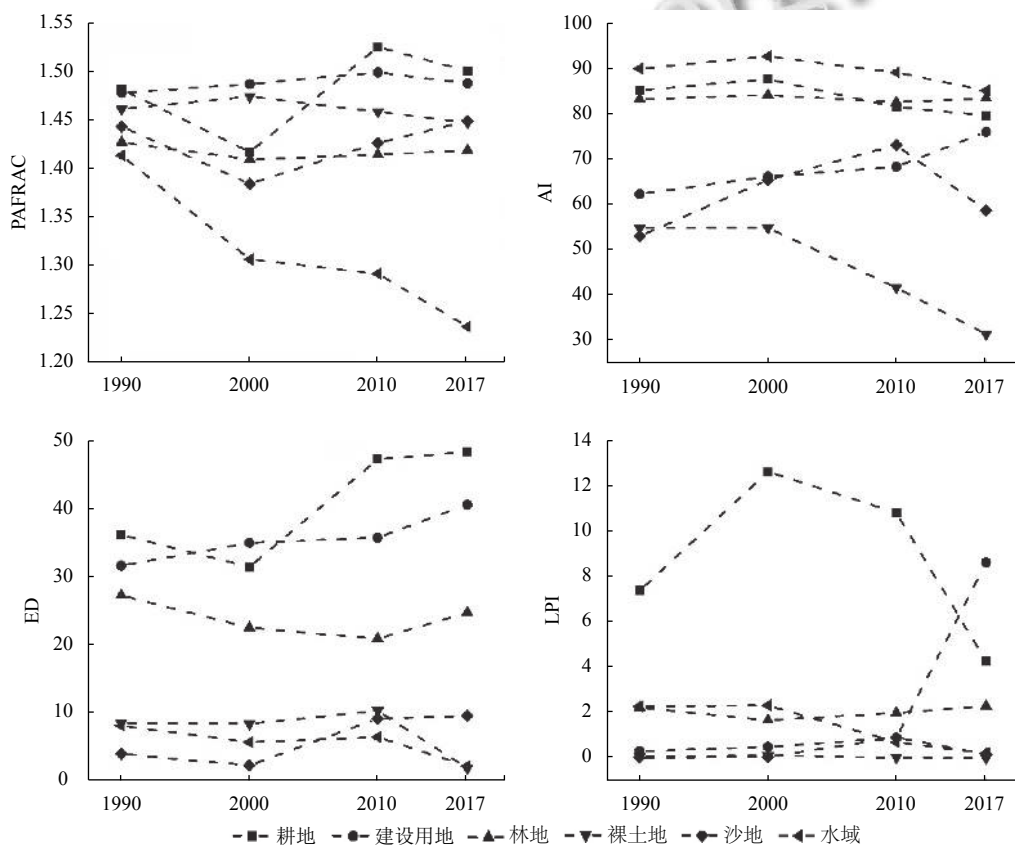


图3 1990~2017类型级别指标与土地利用关系图

3.5 景观级别分析

表6统计景观级别指标变化,1990~2000年,蔓延度(CONTAG)上升0.713,说明这10年间不同土地利用类型之间的聚集程度增加。景观形状(LSI)下降3.315,说明景观的几何复杂性在减小,同时表明相同土地利用类型之间分布更加离散。1990~2010年,多样性(SHDI)和均匀度(SHEI)变化不明显,说明3期的土地利用类型分配的均匀程度相似,各土地利用类型所占

比例变化不明显,1990~2010年间的土地利用变化也可以看出。2000~2010年,CONTAG下降1.936,说明这10年间不同土地利用类型之间的聚集程度降低。LSI上升7.812,说明景观的复杂性在增加,同时表明相同土地利用类型之间分布更加集聚。2010~2017年,CONTAG上升2.373,说明近10年间不同土地利用类型之间的聚集程度增加较1990~2010年显著,LSI下降0.783,说明景观的几何复杂性在减小,同时表明相

同土地利用类型之间分布更加离散. SHDI 和 SHEI 分别增加了 0.081 和 0.042, 说明不同土地利用类型分配的均匀程度增加, 主要土地利用类型占比增加, 2010~2017 年土地利用急剧变化, 建设用地增加, 水域减少是导致 SHDI 和 SHEI 变化的主要原因.

表 6 1990~2017 年景观级别指标统计表

年份	CONTAG	SHDI	SHEI	LSI
1990	57.6567	1.3191	0.6779	38.8408
2000	58.3701	1.3160	0.6763	35.5256
2010	56.4344	1.3457	0.6915	43.3376
2017	58.8907	1.2644	0.6498	42.5551

4 结论与展望

运用随机森林法进行遥感影像分类, 分类精度很大程度上受制于训练样本的选择. 本文通过目视解译选取较纯净的地类像元作为训练样本, 经过多次实验获得较高的土地利用分类精度 (4 期遥感影像分类的总体精度均在 87% 以上, Kappa 系数均在 0.84 以上).

2010 年以前, 研究区土地利用覆盖整体上变化不明显, 但在 2010~2017 年间土地利用变化显著, 主要是 2009 年设立平潭综合试验区后, 大量的资金注入以及政策支持造成, 海坛岛开发进入快车道, 为了获取足够的发展空间, 岛内进行了大规模的围垦造陆, 使得近海区域的滩涂、湿地和水域等景观被大规模开发利用, 其中大部分被规划为建设用地使用. 研究显示, 2010~2017 年耕地面积变化很小, 说明国家对耕地的保护力度很大. 林地面积在 2010~2017 年略微增加, 说明在开发的同时考虑到生态环境的重要性.

1990~2017 年, 持续增加的建设用地致使斑块类型级别的最大斑块占景观面积比例 (LPI)、聚合度 (AI) 和边缘密度 (ED) 景观指数呈上升趋势, 其中 LPI 受建设用地增加的影响最为显著. 景观多样性 (SHDI) 和景观形状 (LSI) 呈下降趋势, 表明研究区整体景观破碎化程度和景观异质性降低. 因此, 海坛岛的发展应该注重景观格局的演变效应, 提出适合海岛型城市发展的模式, 从而实现城市发展与景观格局优化的共赢.

参考文献

- 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学 (D 辑), 2002, 32(12): 1031-1040. [doi: 10.3321/j.issn:1006-9267.2002.12.008]
- Turner BL II, Lambin EF, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666-20671. [doi: 10.1073/pnas.0704119104]
- 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420. [doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.12.001]
- Overmars KP, Verburg PH. Analysis of land use drivers at the watershed and household level: Linking two paradigms at the Philippine forest fringe. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(2): 125-152. [doi: 10.1080/13658810410001713380]
- Veldkamp A, Lambin EF. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2001, 85(1-3): 1-6.
- 葛全胜, 赵名茶, 郑景云. 20 世纪中国土地利用变化研究. 地理学报, 2000, 55(6): 698-706. [doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2000.06.007]
- 安建科. 基于 RS 和 GIS 的酒泉市肃州区土地利用变化及景观格局研究[硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2011.
- 刘淼, 胡远满, 常禹, 等. 土地利用模型时间尺度预测能力分析——以 CLUE-S 模型为例. 生态学报, 2009, 29(11): 6110-6119. [doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.11.044]
- 刘淼, 胡远满, 孙风云, 等. 土地利用模型 CLUE-S 在辽宁省中部城市群规划中的应用. 生态学杂志, 2012, 31(2): 413-420.
- 王友生, 余新晓, 贺康宁, 等. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟. 农业工程学报, 2011, 27(12): 330-336. [doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.12.062]
- 宋开山, 刘殿伟, 王宗明, 等. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力. 地理学报, 2008, 63(1): 93-104. [doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2008.01.010]
- 胡乔利, 齐永青, 胡引翠, 等. 京津冀地区土地利用/覆被与景观格局变化及驱动力分析. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1182-1189.
- 张涛, 张颖, 杨力鹏, 等. 内蒙古自治区呼和浩特市 1990-2010 年景观格局变化及其驱动力. 水土保持通报, 2018, 38(2): 217-222.
- 刘娟, 刘华民, 卓义, 等. 毛乌素沙地 1990-2014 年景观格局变化及驱动力. 草业科学, 2017, 34(2): 255-263. [doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0258]
- 杨国清, 吴志峰, 祝国瑞. 广州地区土地利用景观格局变化研究. 农业工程学报, 2006, 22(5): 218-221. [doi: 10.3321/j.issn:1002-6819.2006.05.050]
- 王书玉, 张羽威, 于振华. 基于随机森林的洪河湿地遥感影

- 像分类研究. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(4): 83–85, 93. [doi: [10.3969/j.issn.1672-5867.2014.04.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5867.2014.04.022)]
- 17 马玥, 姜琦刚, 孟治国, 等. 基于随机森林算法的农耕地土地利用分类研究. 农业机械学报, 2016, 47(1): 297–303. [doi: [10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.040](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.040)]
- 18 马骊. 随机森林算法的优化改进研究[硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2016.
- 19 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521–5531. [doi: [10.3321/j.issn:1000-0933.2008.11.037](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2008.11.037)]
- 20 齐伟, 曲衍波, 刘洪义, 等. 区域代表性景观格局指数筛选与土地利用分区. 中国土地科学, 2009, 23(1): 33–37. [doi: [10.3969/j.issn.1001-8158.2009.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8158.2009.01.007)]
- 21 刘常富, 李京泽, 李小马, 等. 基于模拟景观的城市森林景观格局指数选取. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1125–1131.
- 22 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052–1059. [doi: [10.11821/dlxb.201408002](https://doi.org/10.11821/dlxb.201408002)]
- 23 王仰麟. 农业景观格局与过程研究进展. 环境科学进展, 1998, 6(2): 29–34.
- 24 Watts JD, Powell SL, Lawrence RL, *et al.* Improved classification of conservation tillage adoption using high temporal and synthetic satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(1): 66–75. [doi: [10.1016/j.rse.2010.08.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.005)]
- 25 王栋, 岳彩荣, 田传召, 等. 基于随机森林的大姚县 TM 遥感影像分类研究. 林业调查规划, 2014, 39(2): 1–5. [doi: [10.3969/j.issn.1671-3168.2014.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3168.2014.02.001)]
- 26 姚明煌, 骆炎民. 改进的随机森林及其在遥感图像中的应用. 计算机工程与应用, 2016, 52(4): 168–173. [doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1402-0227](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1402-0227)]
- 27 Breiman L, Last M, Rice J. Random forests: Finding quasars. Feigelson ED, Babu GJ. Statistical Challenges in Astronomy. New York: Springer, 2003. 243–254.
- 28 郭玉宝, 池天河, 彭玲, 等. 利用随机森林的高分一号遥感数据进行城市用地分类. 测绘通报, 2016, (5): 73–76.