

基于潮位校正的中国潮间带遥感监测及变化

韩倩倩^{1,2}, 牛振国^{1*}, 吴孟泉³, 王靖雯^{1,2}

1. 中国科学院空天信息研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

* 联系人, E-mail: niuzg@radi.ac.cn

2018-07-19 收稿, 2018-09-20 修回, 2018-09-21 接受, 2018-12-13 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDA19030203)和国家自然科学基金(41271423)资助

摘要 潮间带位于海洋和陆地的过渡地带, 在生物多样性保护、社会经济发展以及全球环境变化等方面具有重要价值. 由于潮汐的动态性, 潮间带的卫星遥感监测存在很大挑战, 迄今为止还没有完整的全国滨海潮间带的相应数据. 本文综合遥感与地理信息系统方法, 利用1995和2015年覆盖全国滨海的156景Landsat TM/OLI卫星影像, 反演了中国滨海潮间带的时空分布, 并基于高分辨率影像, 目视解译了潮间带开发的土地利用类型. 在此基础上分析了中国潮间带变化的时空特征和潮间带变化的驱动力因素. 结果表明: (1) 2015年中国潮间带总面积约为14070 km², 其中潮间带分布面积最多的为福建省(18%), 其次是辽宁省(15%)、山东省(14%)、江苏省(12%)和广东省(11%); 面积最小的是海南省(2%). (2) 1995~2015年全国潮间带面积净减少了1375 km², 减少约8.9%. 全国不同省市潮间带面积表现了增加与减少不同的趋势, 其中潮间带面积减少最多的是浙江省, 面积减少为1189 km²; 江苏省潮间带面积由1995年的全国第1缩减为第4. 而福建省潮间带增加最多, 达453 km². (3) 潮间带被开发利用的趋势持续增强. 1995年中国沿海潮间带被开发占用的面积为3490 km², 到2015年达到4581 km². 潮间带开发利用类型由农业用海为主(41.8%)转变为围海养殖; 城镇建设占用比例也达13%. 同时围垦中(在建/未知用途)的潮间带面积持续增长, 由1995年的18.1%增长为29%. (4) 人为和自然两种因素叠加的“挤压效应”造成了我国潮间带面积的减少. 经济发展和滨海生态环境保护的矛盾依然表现突出.

关键词 潮间带, 湿地遥感, 潮位校正, 中国滨海湿地

潮间带是海洋高潮位与低潮位之间的区域, 高潮时被海水淹没, 低潮时出露水面; 其作为海陆交互作用的前锋地带, 是研究现代海岸动态和环境变迁的重要参照^[1]. 潮间带具有高生产力, 在为生物多样性、水鸟迁徙提供栖息地, 提供沿海生态系统服务, 抵御风暴潮和海平面上升所造成的危害等方面起着不可替代的作用^[2,3]. 此外利用潮间带进行滩涂围垦开发耕地、海水养殖、海盐生产及港口扩建等可以带来大量经济利益^[4,5]. 而随着人口增加和经济发展需求对滩涂资源的利用、全球气候变暖引发的海平面上

升、风暴浪潮增强和海岸侵蚀加剧等一系列因素, 潮间带减少在全球各地普遍存在. 如20世纪80年代~21世纪末期, 黄海海域潮间带减少了28%^[6]. 潮间带是人类利用海涂资源的主要场所, 潮间带减少使得滨海生态环境和经济发展面临诸多严重生态和环境问题^[7], 因此及时了解和掌握潮间带的现状和变化规律, 对于促进滨海生态环境保护和实现区域可持续发展具有重要意义^[8]. 我国20世纪80年代组织开展全国海岸带和海涂资源的综合调查, 明确调查范围为“陆域方面: 一般向陆延伸10 km左右……. 海域方面:

引用格式: 韩倩倩, 牛振国, 吴孟泉, 等. 基于潮位校正的中国潮间带遥感监测及变化. 科学通报, 2019, 64: 456–473

Han Q Q, Niu Z G, Wu M Q, et al. Remote-sensing monitoring and analysis of China intertidal zone changes based on tidal correction (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 456–473, doi: 10.1360/N972018-00723

一般向海至水深10~15 m等深线……”^[9], 全国调查面积为300000 km²左右. 但是到目前为止, 全国潮间带/海涂的面积还没有给出相对确切的数据.

遥感技术具有监测范围广、客观性强、获取信息快和高效等优势^[10], 是进行潮间带动态监测的有效方法. 目前相关研究主要集中在河口和海岸监测^[11,12]、潮间带地形监测^[1]、潮间带生态研究^[8,13]、水边线提取^[14~16]、海岸线提取^[17,18]、部分典型潮间带的遥感监测^[19]以及海岸线变化监测^[20]等方面. 由于潮汐的动态性以及遥感卫星过境成像时间相对固定, 无法获取最高/低潮时刻的遥感影像, 成为遥感监测潮间带面临的挑战之一. 许多学者在进行潮间带范围的变化监测时采用了不同的策略^[2,7,19,21]. 如Murray等人^[7]通过选取相对高潮和低潮时段的遥感影像, 从低潮分类影像中除去高潮分类影像得到潮间带分布, 在此基础上推算了东亚黄海海域的潮间带分布; 王小丹等人^[19]利用“相同潮位对比法”研究了曹妃甸地区潮间带的演变; Chen等人^[21]在研究1985~2014年长江入海口处的潮间带变化时, 直接采用低潮时的遥感影像提取水边线作为平均低潮线, 选取人工岸线作为平均高潮线, 中间所围区域定义为潮间带. 但总体来看, 目前有关研究本质上依然没有提出有效的解决方法. 王靖雯等人^[22]结合遥感和地理信息系统方法, 并利用验潮站多年观测的潮汐数据, 建立了高低潮线和潮间带的反演方法, 并在江苏盐城进行了实验. 该方法较好地解决了潮间带遥感监测面临的数据获取的限制问题, 提高了潮间带的遥感精度, 且对遥感影像的选择没有特定的要求.

为了了解和掌握我国潮间带的分布现状、变化及其原因, 我们在之前研究基础上^[22], 分别利用1995和2015年覆盖我国滨海的Landsat卫星影像数据, 并结合全国验潮站的潮位数据, 反演我国潮间带的分布, 并对潮间带的时空变化进行分析; 同时结合Google Earth等高分辨率卫星数据, 对潮间带的土地利用等进行人工解译制图; 并结合海平面变化数据, 分析潮间带变化的驱动力因素. 以期为我国海岸带生态环境的保护和可持续发展提供科学支持.

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

中国海岸线北起鸭绿江口, 南抵北仑河口, 呈向

东南突出的弧形, 覆盖中国大陆、香港、澳门以及台湾地区, 由北向南依次为辽宁省、河北省、天津市、山东省、江苏省、上海市、浙江省、福建省、广东省(包括香港、澳门)、广西省、海南省、台湾省12个省及直辖市(图1). 张云等人^[23]曾提出, 中国大陆海岸线长度为1800~1900 km左右, 1990年以来岸线以稳定和向海推进为主(大于80%), 为通过潮位数据精确提取高低潮水边线, 本文将中国海岸线根据验潮站潮汐高程值的分布特征分为53个岸段, 平均每个岸段长度均小于350 km(表2), 每个岸段为独立的计算单元, 分别进行高低潮线的推算和潮间带分布的反演.

1.2 数据源

考虑到数据的可获得性和时空分辨率的优势, 本文选用Landsat5 TM和Landsat8 OLI影像作为遥感数据源, 数据来源于美国USGS网站(<http://glovis.usgs.gov/>). 1995年覆盖中国滨海区域需要41景影像, 2015年覆盖中国沿海需要37景影像(表2). 为满足提取水边线的需要, 即同一岸段获取两景不同时间的遥感影像数据, 以提取相邻水边线. 考虑到获取影像的时间一致性(集中在1年中, 且全国海岸线覆盖), 影像获取以1995和2015年为基准, 共获取156景影像数据. 所有影像是经过系统校正和几何校正的L1T级数据产品. 利用ENVI工具进行辐射定标和大气校正, 以去除大气及云层的影响, 得到地物的真实光谱特征.

由于国家海洋信息中心官网只可查询近期潮汐数据, 查询不到1995和2015年的逐时潮汐数据, 因此查询了海洋科技情报研究所和国家海洋信息中心出版的潮汐预报表^[24~29]. 该数据包括每日高低潮的潮时与潮高, 部分港口的逐时潮高, 部分港湾、航道以及渔场的潮流预报, 附属港口的“差比数和潮信表”等. 我们选择了每日高低潮的潮时与潮高, 并计算出每个验潮站的平均高低潮位数据, 最后计算得到卫星过境时刻对应的潮汐数据.

2 研究方法

2.1 滨海潮间带面积推算

马小峰等人^[17]利用潮位高度与卫星影像计算坡度的方法, 应用于海岸线位置的校正. 张旭凯等人^[30]利用潮位数据计算潮滩坡降, 进而提取海岸线. 王靖雯等人^[22]在上述基础上提出了新的潮位校正方

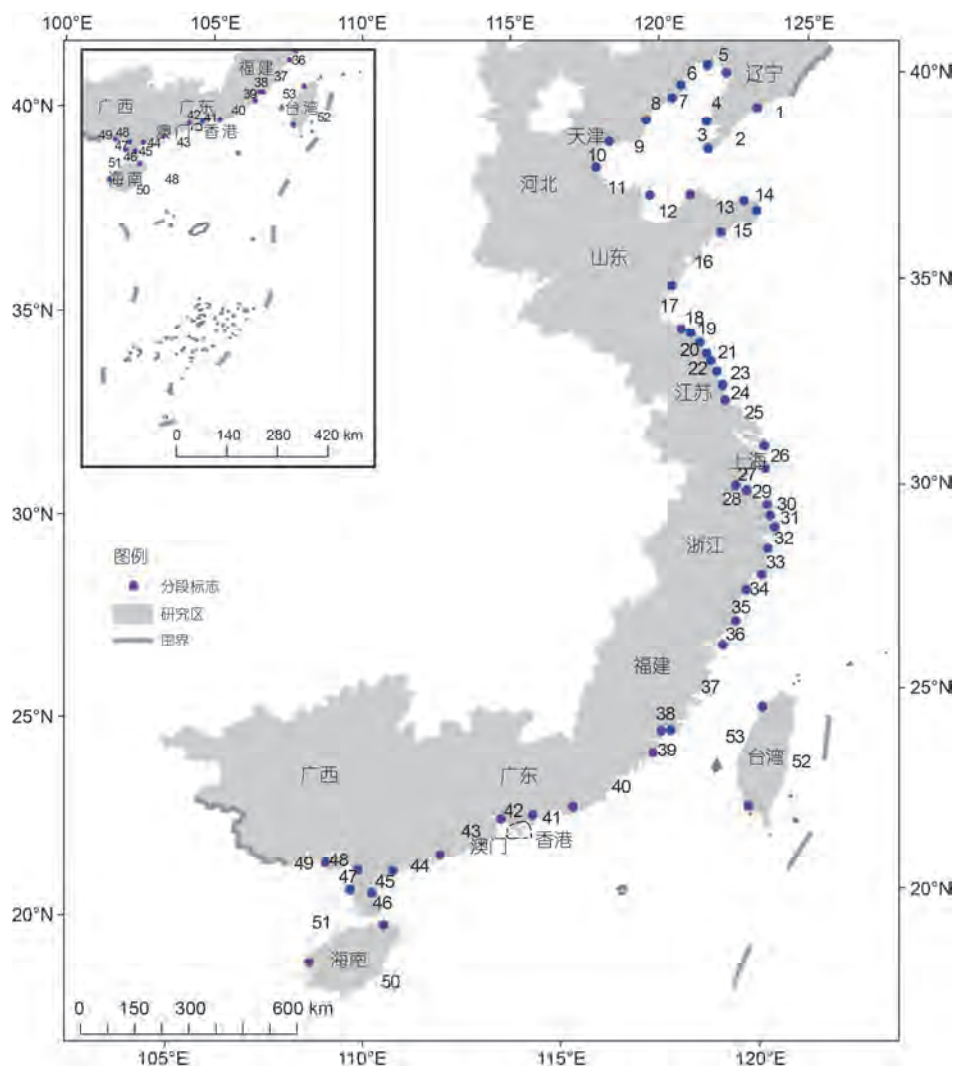


图1 (网络版彩色)中国海岸线岸段分布图. 岸段代码含义见表1

Figure 1 (Color online) China's coastal segments of study area. Table 1 is for the meaning of the segment code

法并在江苏盐城滨海进行了验证, 采用变异系数表示基于不同时相遥感影像组合得到的高低潮线和潮间带面积的差异情况, 验证了遥感影像时相的选择, 对反演的潮间带面积具有很好的稳定性, 可推广用于其他滨海潮间带面积的推算. 我们在此基础上对全国潮间带进行反演.

潮间带反演流程如图2所示. 根据全国验潮站的分布, 根据潮汐的潮位波动情况, 尽可能的让所选的验潮站之间的岸段潮位波动最小. 我们将中国海岸线分为53个岸段单元, 作为潮间带反演的计算单元. 在每个岸段内均分布有1个验潮站, 以验潮站的观测数据代表对应岸段的潮位数据. 针对每个岸段单元, 分别下载1995和2015年不同时期的2幅影像, 进行水

边线提取和高低潮线计算. 水边线的提取依据前面的分类, 分别进行提取和验证, 在此基础上推算出各个岸段的平均坡度, 进而计算平均高潮和低潮的校正距离(图3). 具体步骤为: 通过计算同一区域相邻时刻两景影像过境时的潮位差与瞬时水边线之间的距离, 计算出潮间带坡度; 然后结合平均高潮潮位数据与平均低潮潮位数据以及过境时刻潮位 h , 计算出高潮校正距离与低潮校正距离. 各个参数的计算公式如下:

$$\theta = \arctan \frac{\Delta H}{\Delta L}, \quad (1)$$

$$L_{\text{low}} = \frac{h - H_{\text{low}}}{\tan \theta}, \quad L_{\text{high}} = \frac{H_{\text{high}} - h}{\tan \theta}, \quad (2)$$

表 1 中国沿海海岸分段

Table 1 Coastal segments in the coastal zone of China

代码	岸段/验潮站	代码	岸段/验潮站	代码	岸段/验潮站
1	辽宁鸭绿江口-辽宁庄河港/丹东新港	19	江苏新淮河口-江苏扁担港/滨海港	37	福建水澳-福建安海湾口/深沪港
2	辽宁庄河港-辽宁旅顺港/大连	20	江苏扁担港-江苏射阳河口/射阳河口	38	福建安海湾口-福建西溪口/石井
3	辽宁旅顺港-辽宁葫芦山湾口/金县	21	江苏射阳河口-江苏新洋港/新洋港	39	福建西溪口-福建赤兰溪口/厦门
4	辽宁葫芦山湾口-辽宁辽河口/鲅鱼圈	22	江苏新洋港-江苏晚庄港/新洋港	40	福建赤兰溪口-广东乌坎港/汕头
5	辽宁辽河口-辽宁大凌河口/老北河口	23	江苏晚庄港-江苏吃饭港/陈家坞	41	广东乌坎港-广东渡头河口/汕尾
6	辽宁大凌河口-辽宁烟台河口/锦州港	24	江苏吃饭港-江苏新开港/琼港	42	广东渡头河口-广东珠江口/香港
7	辽宁烟台河口-辽宁狗河口/团山角	25	江苏新开港-上海长江入海口/吕四	43	广东珠江口-广东那龙河口/澳门
8	辽宁狗河口-河北饮马河口/芷锚湾	26	上海长江入海口-上海芦潮港/中浚	44	广东那龙河口-广东博茂港/西葛
9	河北饮马河口-河北陡河口/京唐港	27	上海芦潮港-浙江海盐塘口/金山嘴	45	广东博茂港-广东老港/湛江
10	河北陡河口-河北北排河口/塘沽	28	浙江海盐塘口-浙江北排江口/澈浦	46	广东老港-广东蛋场港/流沙
11	河北北排河口-山东黄河入海口/东风港	29	浙江北排江口-浙江金塘港/镇海	47	广东蛋场港-广东安铺港/下泊
12	山东黄河入海口-山东黄水河口/龙口	30	浙江金塘港-浙江大嵩江口/崎头角	48	广东安铺港-广西北海港/铁山港
13	山东黄水河口-山东威海港/烟台	31	浙江大嵩江口-浙江中央港/西泽	49	广西北海港-广西北仑河口/企沙
14	山东威海港-山东车道河口/成山角	32	浙江中央港-浙江洞港/旗门港	50	海南海南湾口-海南东方港/三亚
15	山东车道河口-山东辛家港/石岛	33	浙江洞港-浙江桐丽河口/海门	51	海南东方港-海南湾口/新盈
16	山东辛家港-山东潮河口/青岛	34	浙江桐丽河口-浙江温州湾口/东门村	52	台湾永安港-台湾红毛港/基隆
17	山东潮河口-江苏灌河口/岚山港	35	浙江温州湾口-浙江大门港/瑞安	53	台湾红毛港-台湾永安港/高雄
18	江苏灌河口-江苏新淮河口/燕尾	36	浙江大门港-福建水澳/三沙		

表 2 中国沿海遥感影像数据

Table 2 List of Landsat images in the coastal zone of China

年份	传感器	行列号
1995	Landsat 5 TM	118032 118038 118039 118040 118041 118042 119033 119034 119041 119042 119043 120032 120033
		120034 120035 120044 121032 121033 121034 121044 122033 122044 122045 123045 124045 125045
		119037 120036 119032 119035 119044 121045 123046 123047 124046 124047 117043 117044 117045
		118043 118044
2015	Landsat 8 OLI	118032 118038 118039 118040 118041 118042 119033 119034 119042 120032 120033 121032 121033
		122033 120034 120035 121034 119037 120036 119043 120044 121044 122044 122045 123045 124045
		125045 123046 123047 124046 124047 125047 117043 117044 117045 118043 118044

$$h = H_{\text{high}} - \frac{\Delta h}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{t - T_{\text{high}}}{T_{\text{low}} - T_{\text{high}}} \times 180^\circ \right) \right], \quad (3)$$

式中, θ 为潮间带坡度, ΔH 为同一区域相邻时刻两景影像过境时的潮位差, ΔL 为同一区域相邻时刻两景影像瞬时水边线距离, H_{high} 为多年平均高潮潮位数数据, H_{low} 多年平均低潮潮位数据, h 为任意时刻潮高, t 为当时时刻, T_{high} 为当日高潮时, T_{low} 为当日低潮时。

2.2 中国滨海水边线的分类与提取

由于不同类型的海岸线(如淤泥、泥沙、砂质、基岩等)在卫星遥感影像上呈现不同的图像特征,因此在水边线提取时需要根据不同岸线性质的分别进行处理。

把中国滨海水边线分为基岩水边线、砂砾水边线、淤泥质水边线、养殖围堤、盐田围堤等^[18]。以杭州湾为界,北部主要以平原海岸为主,包括三角洲海岸、砂砾质海岸和粉砂淤泥质海岸;南部以山地丘陵海岸为主,包括基岩海岸和砂砾质海岸。基于遥感影像提取水边线时,需要结合各类岸线的影像与地学特征,建立各类水边线的解译标志及绘制原则,并形成训练样本。

基岩海岸由坚硬的岩石组成,波浪作用是其形成的主要动力^[30]。分布于辽东半岛、胶东半岛以及杭州湾以南区域,卫星图像上海水区域呈深蓝色,而陆地因为岩石或者植被的高反射率呈亮白色或者绿色,颜色差异较大(图4(a))。

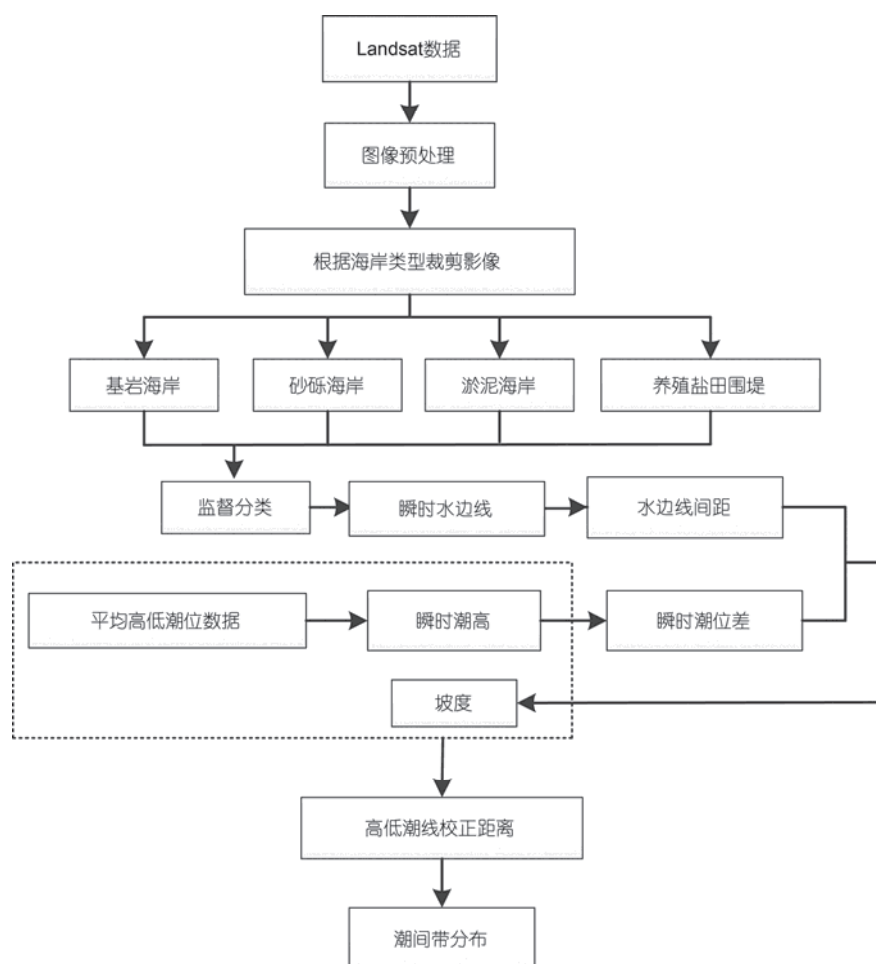


图2 中国滨海潮间带反演流程图

Figure 2 Flow chart of intertidal zone extraction

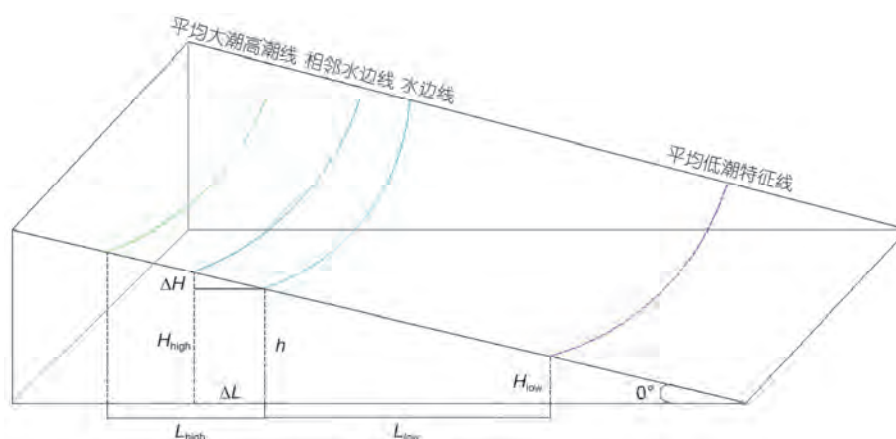


图3 (网络版彩色)潮位校正示意图^[22]

Figure 3 (Color online) Tidal correction schematic diagram^[22]

砂砾海岸是由粒径大于0.1 mm的砂组成的海岸，主要由波浪作用塑造而成^[30]。砂砾质海岸在江苏之

外的区域广泛分布^[31]。砂砾海岸分布于台湾、山海关至滦河三角洲之间。图像上呈亮白色，海水呈深蓝色

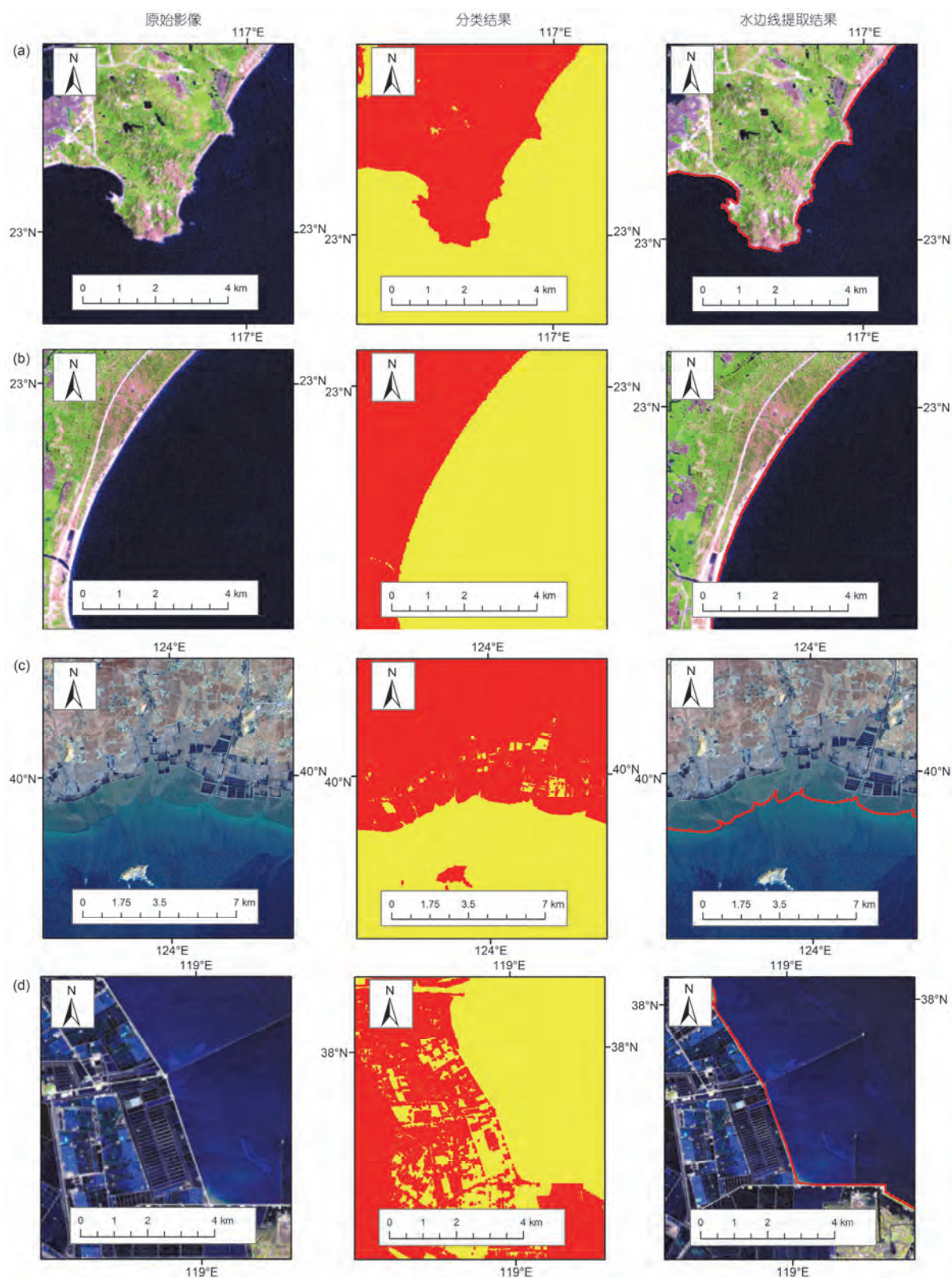


图4 不同水边线提取示例。(a) 基岩海岸;(b) 砂砾海岸;(c) 淤泥质海岸;(d) 养殖围堤、盐田围堤海岸

Figure 4 Different waterline samples. (a) Bedrock waterlines; (b) sandy waterlines; (c) muddy waterlines; (d) water lines of aquaculture pond and salt pond barrier

(图4(b)). 砂质海岸的干燥滩面反射率较高,在图像上表现为较亮区域;潮湿滩面反射率较低,在图像上表现为较暗区域;海水反射率最低,在图像上表现为最暗区域. 遥感图像瞬时水边线应为潮湿滩面和干燥滩面的分界线,此分界线不明显,需要对监督分类提取的水边线根据地物的光谱曲线进行仔细修改.

淤泥质海岸主要由平均颗粒直径为0.001~0.01 mm的淤泥组成,受上冲流的影响,淤泥质海岸滩面较宽,坡度平缓^[30]. 三角洲海岸(辽河、黄河、长江、珠江等河流的河口区域)大多以淤泥底质为主. 图像上泥滩呈粉红色或者浅棕色,部分潮湿泥滩呈较亮的深墨绿色,而近岸水体多呈浅蓝或蓝绿色,离岸水体呈中蓝或深蓝色(图4(c)).

养殖围堤,图像上养殖池呈暗蓝色,几何特征明显,呈较规则的条带状分布,内部堤坝格网明显,水体呈浅蓝或中蓝色,离岸水体呈深蓝色(图4(d)). 由于养殖池中的水和海水的光谱特征差异不大,会影响水边线提取效果,因此需要将监督分类结果进行聚类处理,将养殖池水体斑块进行合并,提高水边线提取精度. 盐田围堤,图像上盐田呈亮蓝色,几何特征明显,呈大面积方格状连片分布,海水呈中蓝或深蓝色(图4(d)).

水边线的图像提取方法包括灰度阈值法、边缘检测法、水体指数法^[14,32]. 已有研究表明最大似然分类法并结合目视解译被证明是具有最好稳定性的分类方法^[15,22,33],本文采用该方法进行水边线的提取. 每景影像根据潮间带范围的大小分别选取水体和陆地两类样本用于图像的分类^[34]. 同时通过交互式分类工具和聚类统计,将错分或细小的图斑进行重新划分,并进行目视修改.

2.3 潮间带土地利用分类

对潮间带的开发利用等社会经济活动是造成潮

间带变化的主要人为因素,如围填海、围海养殖、盐田、港口建设和工业用海等^[9,35~38]. 为量化分析过去20年间我国潮间带变化的原因,我们基于谷歌地球的高分辨率图像,对处于模拟高潮线和真实高潮线之间的土地利用类型逐一进行了目视解译和分类. 根据前人研究^[37~40]以及对潮间带进行分析,将潮间带的开发类型分为:围海养殖、城镇建设、围海(全封闭海域)、港口建设、工业填海、农业用海、围堰(半封闭海域)、盐场用海和旅游用海9种类型. 另外由于卫星图像分辨率以及其他原因,部分在围垦中潮间带开发类型无法判明,定义为在建/未知用途类型^[39~42],共计10种潮间带开发利用类型(表3). 在此基础上定量分析我国潮间带变化的驱动力.

3 中国滨海潮间带面积及变化

3.1 中国潮间带面积

根据遥感监测和模型反演,2015年中国潮间带面积为14070 km²,其中分布最广的是福建省,面积为2522 km²,约占全国潮间带面积的18%;其次是辽宁省,潮间带面积为2087 km²,约占15%;山东、江苏、广东和浙江等省的潮间带面积均大于11%. 潮间带面积最少的为海南省和台湾省,面积分别为249, 225 km²,分别约为全国的2%左右(图5).

3.2 中国潮间带面积变化

由于海岸线类型不同以及人为影响程度差异,1995~2015年中国沿海各省市/各岸段潮间带面积有增有减(图6),其中减少面积为2926 km²,增加面积为1551 km²,总体呈现减少趋势;即相比于1995年潮间带面积的15445 km²,2015年的潮间带面积减少了1375 km²,减少幅度为8.9%,年均变化率为-0.45%.

潮间带面积减少的岸段主要分布在河北(包括天

表3 中国潮间带开发利用类型
Table 3 Land use types of intertidal zones in China

类型	定义	类型	定义
围海养殖	以水产养殖为主	城镇建设	以城镇住宅和交通利用为主
围海	沿海修筑围堤的全封闭水域	港口建设	以港口储存和运输为主
工业填海	用于工业企业生产活动为主	农业填海	以耕地、园地等农业利用活动为主
围堰	人工建筑围起的半封闭水域	盐场用海	用于盐田及其取水口所使用的海域
在建/未知用途	处于在建状态的未知用途开发	旅游用海	以休闲度假和观光旅游用途为主

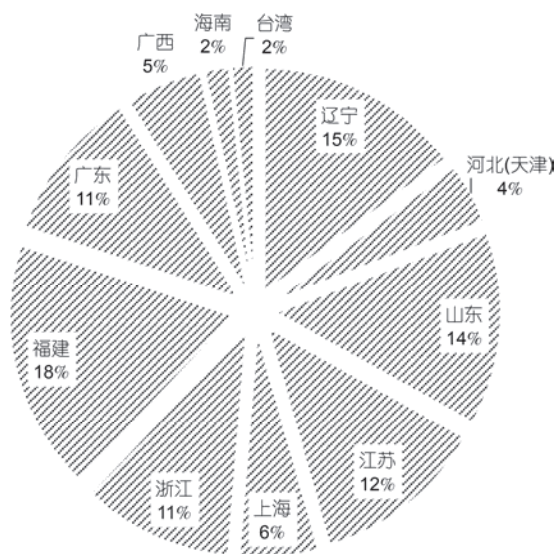


图5 2015年中国沿海各省潮间带面积及比例

Figure 5 Intertidal area and its proportion of each province in coastal China

津, 以下均如此表示)、山东、江苏、浙江、台湾等省份(图7)。无论从潮间带减少面积还是相对幅度, 浙江省都是潮间带减少最多的省份, 这与Xu和Gong^[20]的研究结果一致。相比1995年浙江省潮间带面积减少达1189 km², 占全国潮间带减少面积的40.7%。这与浙江省淤泥质海岸比例相对较高, 潮间带平坦, 易于开发; 同时浙江经济发达, 对滨海的开发强度大有密切关系。如2008年在温州举办的“全省围垦工作会议”曾指出近5年浙江省每年开发滩涂达10万亩, 计划未来5年每年开发50万亩。2012年国务院公布的沿海地区11个省市《海洋功能区划(2011~2020)》中浙江省获得的围填海规模指标面积最大^[43]。江苏省在1995年曾是潮间带面积最大的省份, 但到2015年, 20年间其潮间带面积减少达989 km², 减幅为36.1%, 已经成为我国潮间带面积第4的省份。

而潮间带面积增加的岸段主要分布在辽宁、上

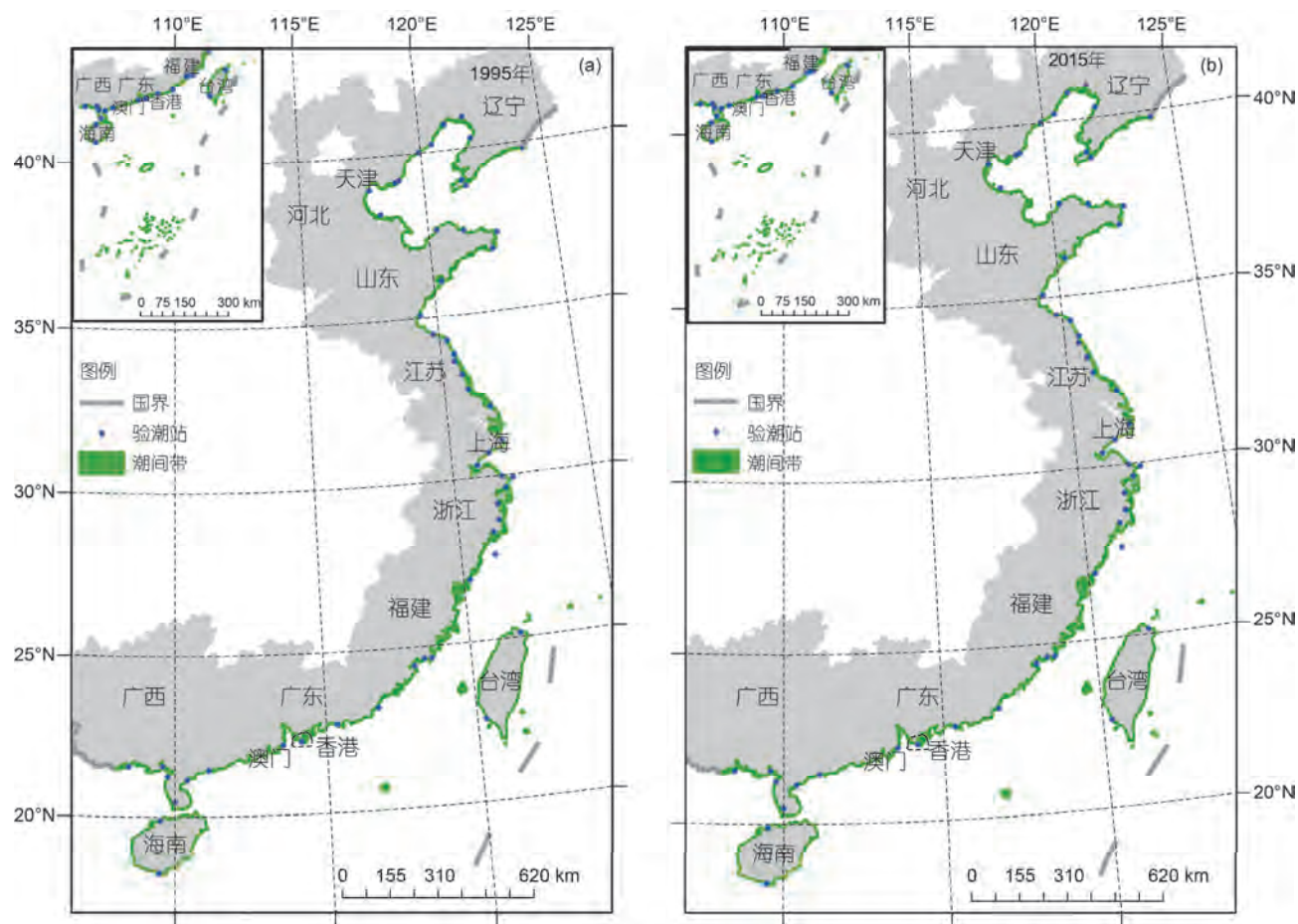


图6 (网络版彩色)1995(a)和2015年(b)中国沿海潮间带分布图

Figure 6 (Color online) The intertidal distribution map of China in 1995 (a) and 2015 (b)

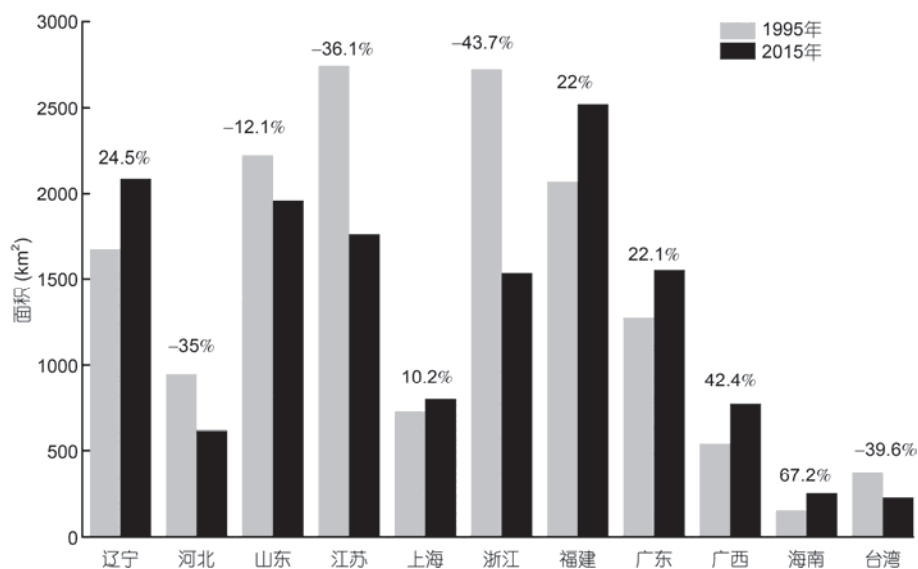


图7 中国沿海各省潮间带面积及比例

Figure 7 Intertidal area and its changes of each coastal segments in China

海、福建、广东、广西、海南等省份(图7). 其中增加幅度较大的是海南省, 潮间带面积增加了100 km², 增加幅度达67.2%, 广西省的增加幅度也较大, 其潮间带面积增加了230 km², 增加幅度达42.4%.

辽宁省除旅顺港-葫芦岛湾口外, 其余岸段被开发利用的较少. 另外由于辽东半岛海岸总体侵蚀较弱, 淤积岸段较多, 所以辽宁省潮间带表现为增加的趋势. 如双台子河年平均含沙量在2002~2013年间波动上升, 造成河口两岸泥沙快速淤积; 在辽东湾北岸泥沙向海淤进, 造成平均高潮线向陆推移^[44~46]. 长山寺湾养殖池外1995年无潮间带分布, 但围垦后在垦区外侧形成的较深水随时间推移又会逐渐被泥沙淤积形成新的滩涂^[4], 潮间带大量增加.

福建省除福建北边界-水澳和赤兰溪口-福建广东交界处潮间带略有减少, 其余岸段均在增加. 一方面福建省潮间带开发相对较少, 如水澳-安海湾口, 虽然在1995年其被占用的潮间带约为178 km², 到2015年此岸段几乎没有被开发. 除福清市龙田镇、泉州市东桥镇有少量围海, 其他岸段潮间带保护较好. 另一方面也与福建滨海自然条件有关. 福建省海岸侵蚀严重的岸段较少, 而且强侵蚀的海岸为砂质海岸, 潮间带分布较少; 基岩海岸和淤泥海岸侵蚀较弱^[47]. 同时福建省淤积岸段较多, 泉州湾的洛阳江沿岸、浔埔沿岸及晋江沿岸和九龙江口等海湾、河口区域处于淤积状态, 海岸线整体向外迁移, 海域面积

不断缩小的同时潮间带面积不断增加^[48,49].

3.3 中国沿海各岸段潮间带面积及变化

1995年, 在中国沿海各岸段中, 潮间带面积较大的岸段依次为江苏吃饭港-长江入海口、浙江大门港-福建安海湾口、河北北排河口-山东黄水河口、浙江中央港-桐丽河口、山东辛家港-潮河口和广东珠江口-那龙河口, 占全国潮间带面积的34%(表4). 其中江苏吃饭港-长江入海口潮间带分布面积最广, 达到2038 km², 占1995年潮间带总面积的13.2%. 到2015年, 在中国沿海各岸段中, 潮间带面积最大的岸段依次为浙江大门港-福建安海湾口、江苏新开港-长江入海口、山东黄河入海口-黄水河口和辽宁辽河口-大凌河口, 其中浙江大门港-福建安海湾口潮间带分布面积最广, 达到2169 km², 占2015年潮间带总面积的15.4%.

由于不同岸段的海岸类型不一, 受波浪冲刷与潮汐作用的影响程度不同, 以及开发利用程度的不同, 滨海潮间带面积变化呈现较大差异. 在1995~2015年间, 潮间带面积减少最多的岸段是上海芦潮港-浙江金塘港, 减少潮间带面积达502.49 km², 占减少潮间带面积的36.5%. 虽然文献表明1996~1998年钱塘江口出现泥沙净淤积^[50], 泥沙淤积使钱塘江口两侧平均低潮线向海推进, 但高潮线受开发影响, 向海推进距离更大, 导致潮间带面积减少. 其次是江苏吃饭港-江苏新开港, 潮间带面积减少327 km², 占减

少潮间带面积的23.6%；江苏新开港-长江入海口减少320 km²，占减少潮间带面积的23.3%。

潮间带面积减少的年变化率最大的是浙江桐丽河口-浙江温州湾口，年减少率为-3.88%，从图8可以看出，此岸段潮间带形态变化较为明显，尤其是在温州湾口的灵昆岛向海一侧填海造陆，部分造陆土地已经发展工业，潮间带被占用较为严重，潮间带整体向海推移，在1995年其潮间带面积为320 km²，在2015年其潮间带面积减少至72 km²。

在此20年间，部分岸段的潮间带面积也在增加，其中潮间带面积增加较多的岸段如浙江水澳-福建安海湾口、山东黄河入海口-黄水河口和辽宁辽河口-大凌河口。从年变化率来看，烟台河口-狗河口的年增加率

最大，达到17.11%，在1995年其潮间带面积仅17 km²，在2015年其潮间带面积达到77 km²；其次是金塘港-大嵩江口，年增加率达到10.24%，1995年此岸段潮间带面积为14 km²，在2015年其潮间带面积达到42 km²。

4 中国潮间带变化的驱动力分析

人类的社会经济活动是目前潮间带减少的主要驱动力因素；同时自然的因素，如海平面的变化、滨海泥沙淤积与侵蚀等因素也影响着潮间带的变化。潮间带变化体现了上述各种因素的综合作用。

4.1 高低潮线推移特征与潮间带变化

潮间带面积的变化主要是平均高低潮线的推移

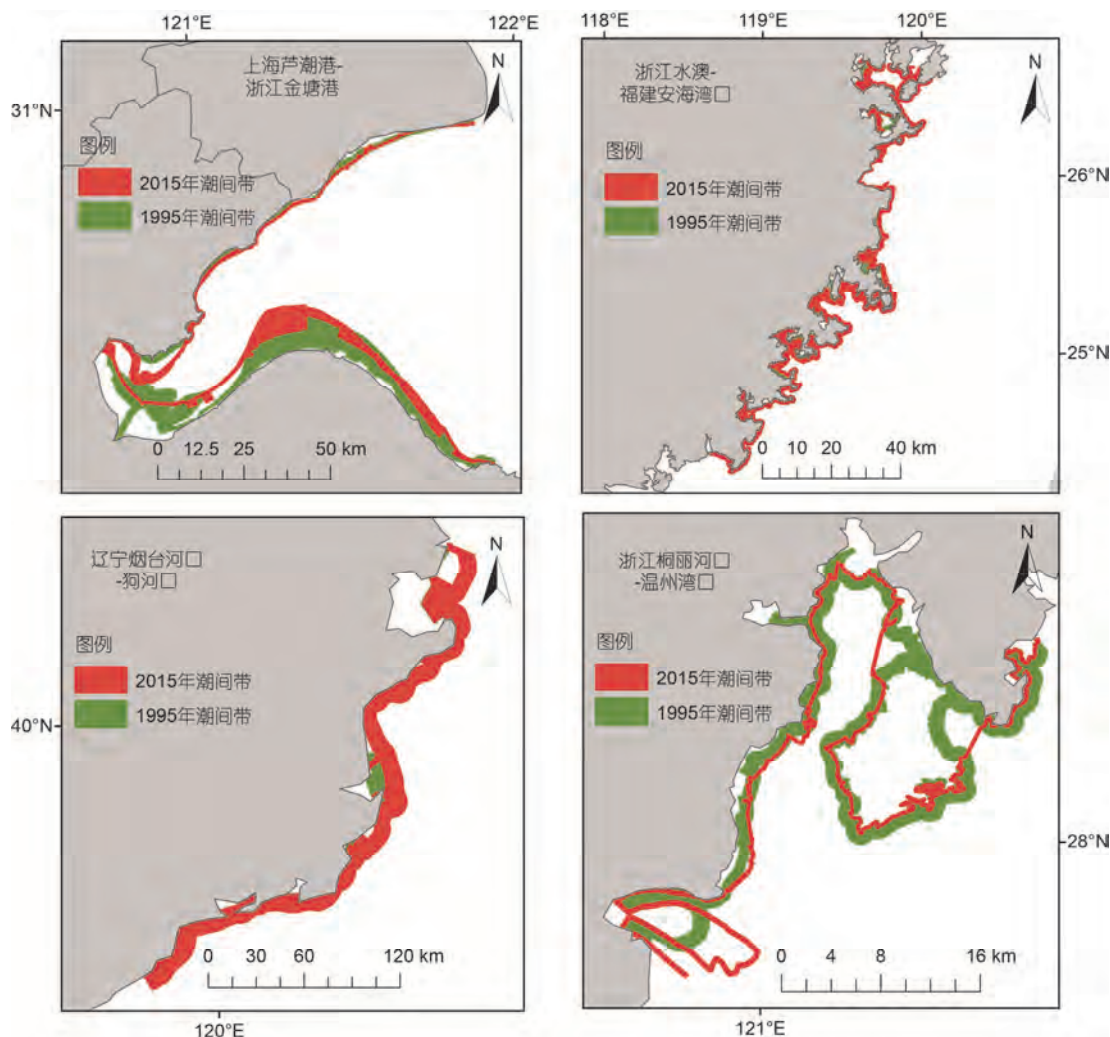


图8 (网络版彩色)典型岸段潮间带变化

Figure 8 (Color online) Changes of intertidal zone of typical coastal segments

表 4 1995~2015 年中国沿海各岸段潮间带面积变化(单位: km²)
Table 4 Changes of intertidal zone of each coastal segment in 1995 and 2015 in China (unit: km²)

代码 ^{a)}	1995年面积	1995~2015年 面积变化	年变化率(%)	代码 ^{a)}	1995年面积	1995~2015年 面积变化	年变化率(%)
1	432	23	0.26	28	438	-213	-2.43
2	117	72	3.05	29	367	-240	-3.27
3	253	-120	-2.38	30	14	28	10.24
4	109	85	3.87	31	134	-17	-0.62
5	426	238	2.80	32	568	-304	-2.68
6	316	53	0.83	33	543	-144	-1.33
7	17	60	17.11	34	320	-248	-3.88
8	10	12	6.14	35	270	-33	-0.61
9	484	-160	-1.66	36	525	4	0.04
10	247	-34	-0.69	37	1195	445	1.86
11	791	-456	-2.88	38	56	77	6.89
12	504	262	2.60	39	107	21	0.96
13	56	122	10.94	40	337	-88	-1.30
14	32	-2	-0.38	41	64	46	3.64
15	419	-159	-1.90	42	270	118	2.18
16	608	-250	-2.06	43	508	-112	-1.11
17	72	134	9.37	44	64	-5	-0.38
18	114	-19	-0.83	45	87	168	9.72
19	34	6	0.93	46	108	12	0.54
20	57	-25	-2.20	47	25	34	6.78
21	49	-14	-1.49	48	267	110	2.07
22	190	-66	-1.73	49	306	134	2.19
23	426	-283	-3.32	50	48	97	10.09
24	666	-327	-2.45	51	100	2	0.12
25	1372	-320	-1.17	52	75	-4	-0.25
26	468	99	1.05	53	297	-143	-2.41
27	85	-50	-2.93	总计	15445	-1375	-0.45

a) 代码所代表的岸段见表1

所决定的, 这些高低潮线不同的推移特征, 最终导致了潮间带的增加和减少. 在潮间带减少的岸段平均低潮线一般向陆推移, 而平均高潮线向海推移, 这种“挤压效应”使得潮间带面积剧烈减少. 如河北北排河口-山东黄河入海口、上海芦潮港-浙江金塘港、江苏吃饭港-新开港和浙江桐丽河口-温州湾口. 而在潮间带面积增加的岸段, 主要表现为平均高潮线向陆推移, 平均低潮线向海推移, 如山东黄河入海口-黄水河口. 有些岸段虽然高低潮线整体向海推移, 由于低潮线向海推移速度大于高潮线推移速度, 使得潮间带面积增加, 如辽宁辽河口-大凌河口、福建水澳-安海湾口和辽宁烟台河口-狗河口. 反之则潮间带面

积减少, 如江苏新开港-长江入海口(表5).

4.2 中国沿海开发对潮间带的影响

人类开发主要包括围海养殖、工业发展、港口扩建、城镇建设、围海、填海造陆等. 人为的潮间带开发, 使得实际的高潮线向海方向推移, 且速度甚至大于低潮线向海推进速度, 最终会导致潮间带的萎缩.

2015年中国沿海潮间带被占用的面积达4581 km², 其中在建/未知用途类型的面积最大, 约为1310 km², 占2015年被占用潮间带面积的29%; 其次是围海养殖面积为1094 km², 占比24%, 农业用海面积为904 km², 占比20%; 而城镇建设占比达13%. 表明潮间带

表 5 部分典型岸段平均低潮/高潮线变化(1995~2015 年)

Table 5 Changes of the average low/high-tide lines of each typical segment

潮间带面积 变化(km ²)	岸段名称	高低潮线推移 变化 ^{a)} (m)	潮间带面积 变化(km ²)	岸段名称	高低潮线推移 变化 ^{a)} (m)
238	辽宁辽河口-辽宁大凌河口	5396/2679	-327	江苏吃饭港-江苏新开港	-3270/6806
60	辽宁烟台河口-辽宁狗河口	1325/137	-320	江苏新开港-上海长江入海口	1095/1673
-456	河北北排河口-山东黄河入海口	-2584/779	-502	上海芦潮港-浙江金塘港	-1318/3960
262	山东黄河入海口-山东黄水河口	679/-1845	28	浙江金塘港-浙江大嵩江口	617/-109
-25	江苏扁担港-射阳河口	-552/-346	-248	浙江桐丽河口-浙江温州湾口	-1254/990
-14	江苏射阳河口-新洋港	-1305/-932	445	福建水澳-福建安海湾口	1075/350

a) “/”两侧的数值分别代表平均低潮线和高潮线的推移距离。负值为向陆推移, 正值为向海推移

被开发利用的趋势依然很强(图9(a)).

1995年中国沿海潮间带被占用的面积约为3490 km²; 其中农业用海的面积最大, 达1459 km², 占比是41.8%; 其次是围海养殖和在建/未知用途, 分别达754和631 km², 占比分别是21.6%和18.1% (图9(b)).

1995~2015年在中国滨海潮间带被占用的各类用地类型中, 盐场用海、农业用海和围海类型表现为减少, 其中农业用海和盐场用海减少的面积分别为555和221 km². 而其余土地利用类型的面积均表现为增加趋势, 其中面积增加最多的类型是在建/未知用途、城镇建设和围海养殖, 分别达679, 440和340 km²(图9(b)). 由此可以看出1995~2015年间城镇建设和围海养殖的用途逐渐增加, 成为滨海潮间带减少的主要类型. 如辽宁旅顺港-辽宁葫芦山湾口, 2015年相比于1995年围海养殖业发展较快, 同时城镇建设和在建/未知用途也大量占用了潮间带.

从不同省份潮间带被占用的土地利用类型面积及比例看, 被占用潮间带面积最多的为江苏省, 占用面积为1646 km², 占全国被占用潮间带面积的35.9%. 这与江苏沿岸地势平坦有关, 也与潮间带开发利用相关政策有关. 其余依次是广东(629 km², 占全国占用潮间带的13.7%, 下同)、山东(573 km², 12.5%)、辽宁(502 km², 10.9%)和上海(473 km², 10.3%). 河北、浙江、福建、广西和海南总共占全国被占用潮间带的16.6%.

各省市内部被占用潮间带的土地利用类型存在部分差异, 反映了潮间带被占用的驱动因素在各个省市间的不同(图10). 如江苏省潮间带被占用的主要土地利用类型是农业用海和围海养殖, 其面积分别为602和469 km², 占江苏省占用潮间带面积的比例分别为36.6%和28.5%. 而广东省被占用的潮间带土地利用类型最大的是围海养殖和城镇建设, 其面积

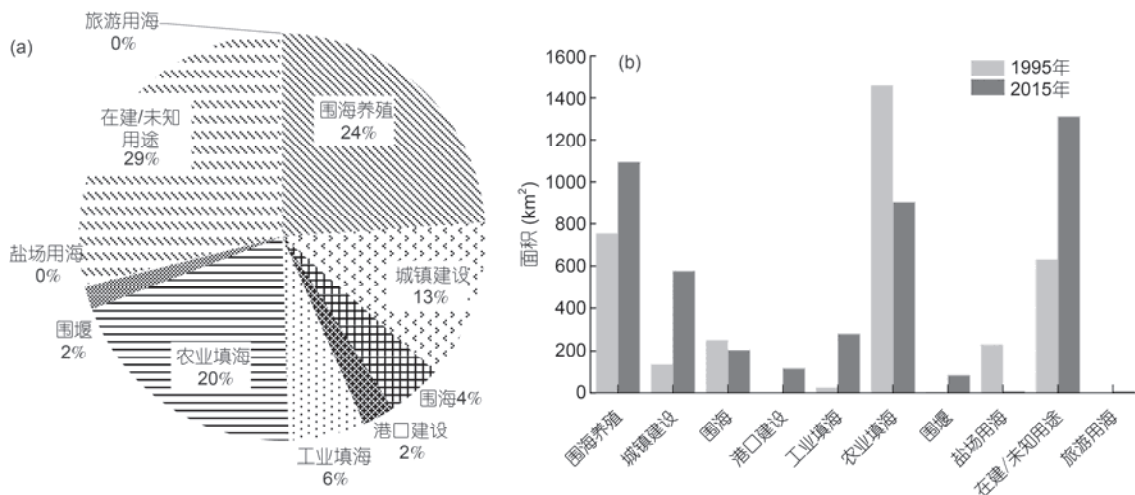


图 9 2015 年中国滨海潮间带土地利用类型面积比例(a)及面积变化(b)

Figure 9 Land use type proportion (a) and areal change (b) in China's coastal intertidal zones in 2015



图10 2015年中国各省被占用潮间带的土地利用类型

Figure 10 Land use types of intertidal zone of each province in China in 2015

分别为252和102 km², 占广东省被占用潮间带的40%和16.2%。辽宁省则3种类型(包括围海养殖、在建/用途未知的类型和城镇建设)主要占用了本省潮间带。而上海市农业用海、在建/用途未知的类型和城镇建设这3种类型占用潮间带面积较多, 面积分别为175, 152和97 km²(图10)。

4.3 海平面变化对潮间带的影响

根据国家海洋局公布的中国海平面公报(图11),

整体上我国滨海从2000年至今海平面处于波动上升趋势, 在2000年全国海平面比常年海平面高51 mm, 2015年全国海平面比常年海平面高90 mm。河北省、天津市和辽宁省的海平面几乎每年都处于全国较低值, 其他几个省海平面较常年变化接近, 2000~2008年集中在40~80 mm, 2008~2015年集中在40~120 mm, 变化趋势较为一致。2015年相比于2000年, 河北、山东、江苏、浙江省的海平面都处于上升状态, 潮间带面积减少, 福建、广东、广西、海南省的海平面处于

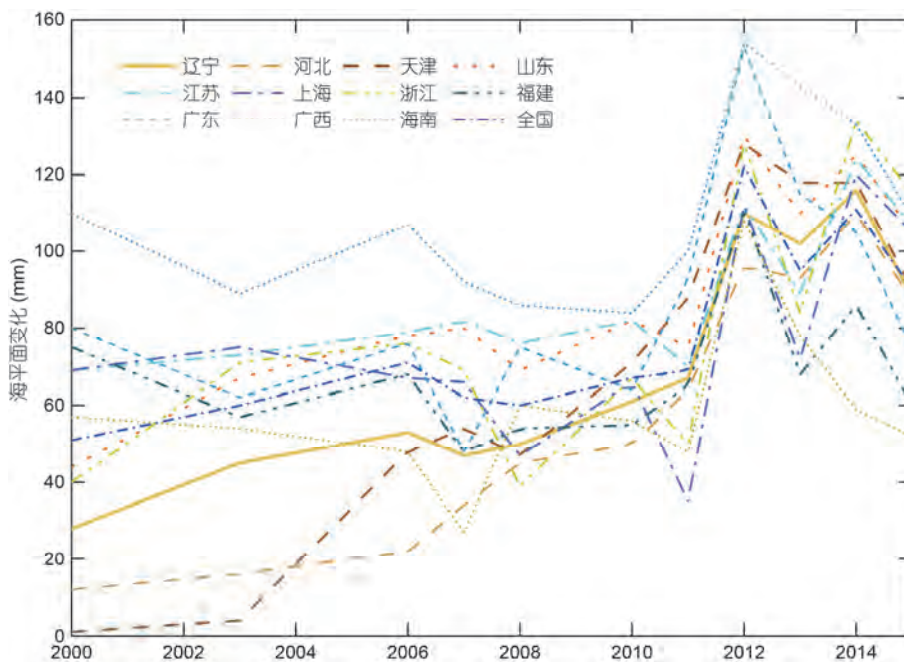


图11 2000年以来中国滨海海平面变化. 资料来源: 中国海平面公报 2000~2015年

Figure 11 China's coastal sea level change since 2000. Source: China Sea Level Bulletin 2000~2015

下降状态,潮间带面积增加,而辽宁和上海的海平面处于上升状态,潮间带面积增加,这与泥沙淤积速度和海平面上升的速度快慢有关,上海市部分岸段泥沙淤积的速率大于海平面上升速率^[51]。

虽然理论上海平面上升会造成平均岸线(平均高低潮线)向陆推移,但对不同岸段的影响存在差异。如江苏中部至浙江中部沿岸,高低潮线主要表现为向海移动。其他类似岸段如辽宁双台子河口、大凌河口、山东黄河口和杭州湾北侧等。这些岸段以淤泥质海岸为主,由于泥沙的淤积速率大于海平面上升速率,平均高低潮线向海推移,潮间带面积表现为增加^[51]。而缺少泥沙补给的情况下,随海平面上升,高低潮线表现为向陆推移,如江苏废黄河口、江苏中部至黄河三角洲岸段、江苏扁担港-新洋港等。这些岸段也包括一些砂砾海岸和基岩海岸;砂砾海岸如江苏北部的废黄河口和莱州湾南岸部分岸段等;基岩海岸如浙江南部的玉环市沿岸,淤泥质海岸如江苏扁担港-新洋港。但江苏吃饭港-新开港的平均高低潮线向不同方向推移,平均高潮线向海推移,平均低潮线向陆推移,由于“挤压效应”导致潮间带面积减少。

4.4 泥沙淤积与潮间带变化

滨海泥沙的淤积与侵蚀直接影响着潮间带的变化。而泥沙的淤积与入海河流泥沙含量的供给以及滨海微地形改变导致的水动力条件的改变有关。河口三角洲区域的潮间带,受河流泥沙淤积的影响,低潮线多数向海推进,潮间带处于缓慢增长。如辽宁葫芦岛市长山寺湾,福建的闽江、木兰溪、晋江、九龙江等每年向海中注入大量泥沙,部分入海泥沙在海洋动力作用下被搬运到潮间带堆积,使潮间带滩涂不断淤高淤宽^[4];崇明岛地区由于泥沙淤积严重,平均低潮线向海推移1.3 km左右,由于泥沙淤积的速率大于海平面上升速率^[51],潮间带面积有所增加。受黄河流域气候以及人类开发的影响,黄河三角洲泥沙淤积速度在1990年之后开始减缓,潮间带面积减少^[31];同时受海岸侵蚀加剧,北部老黄河口岸线的严峻侵蚀导致海岸线向陆推移,加剧黄河三角洲潮间带的减少,黄河口南部潮间带面积增加,而黄河口处的潮间带扩张和减少并存^[20,31]。对于淤泥质海岸,围填海造成新的水动力平衡,泥沙重新淤积。如浙江金塘港-大嵩江口的部分岸段的围堤外侧有泥沙淤积

形成新的潮间带。

5 结论

滨海潮间带的分布与动态变化是滨海生态环境监测重要的内容之一。本文针对潮间带单纯遥感技术监测的不足,综合利用遥感与地理信息系统方法,对中国滨海潮间带1995和2015年的分布进行了反演,同时基于高分辨率卫星影像和海平面变化等其余资料,对潮间带变化的驱动力进行了分析,得到如下初步结论:

中国滨海潮间带面积2015年为14070 km²,比1995年减少了1375 km²,减少了8.9%。沿海各省中,潮间带面积减少最多以及减幅最大的是浙江省,减少了1189 km²,减幅达到43.7%;江苏省潮间带面积在1995年全国第1名,而到2015年潮间带面积减少到第4名。中国沿海各岸段中,上海芦潮港-浙江金塘港之间的潮间带面积减幅最大,达到56.5%;而福建水澳-安海湾口之间的潮间带面积增加最多,达445.59 km²,增幅达到37.28%。

中国滨海潮间带的开发经历了由农业用海为主到围海养殖为主的开发过程,同时用于城镇建设的比例也在上升,达13%。1995年中国沿海潮间带被开发利用面积为3490 km²(以农业用海(41.8%)和围海养殖达(21.6%)为主)。到2015年,中国沿海潮间带被开发占用的面积达4581 km²,比1995年增加了1141 km²。其中围海养殖占用面积约为1094 km²,占全部开发潮间带面积的24%左右;同时有面积约1310 km²潮间带处于正在开发过程中(在建/未知用途),比例达29%左右。

沿海各省市中,潮间带被开发利用最多的为江苏省,占用面积为1646 km²,占全国潮间带开发利用面积的35.9%,主要利用类型是农业用海和围海养殖。其余除江苏省外,占用潮间带面积较多的省市依次是广东(13.7%)、山东(12.5%)、辽宁(10.9%)和上海(10.3%),潮间带开发利用类型主要为城镇建设和围海养殖,同时还有大量潮间带处于开发中。

总体上,人类对滨海潮间带的开发利用和海平面上升带来的“挤压效应”是中国滨海潮间带减少的主要原因;同时其他自然因素的变化,如入海河流泥沙含量以及海岸水动力变化等也是影响滨海潮间带变化的重要因素。这些因素造成了部分潮间带向海推移和面积的扩大。

高精度的地形资料是潮间带反演的基础。但由于该资料的缺乏, 本文研究采用了相似坡度角的原理, 结合卫星遥感资料来反演高低潮线及潮间带的分布。该方法对于地形平坦的潮间带(如淤泥质海岸和砂砾海岸)具有较高的精度。但对于基岩海岸类型, 坡度相对较大且岸线复杂。基于Landsat卫星30 m空间分辨率影像资料反演的水边线会具有较大的空间误差, 进而影响到地形坡度计算和高低潮线的反演。

针对这种海岸类型, 我们采用目视解译的方法, 来纠正模拟高潮线的位置, 以消除误差, 进而得到真实潮间带的分布。对于海边堤坝、道路和港口这一类水陆硬边界, 我们同样采用目视解译纠正模拟高潮线的位置。未来可以采用更高分辨率的影像资料(如5或2 m), 以获取更精细的水边线分布, 进而提高地形的模拟精度。同时依据岸线的复杂程度, 对岸线进行更为细致的划分, 提高潮间带模拟的精度。

致谢 感谢审稿专家给出的专业和建设性的意见和建议。本文图1和6经由国家测绘地理信息局审阅, 审图号为GB2018(6143)。

参考文献

- Gu Y. Study on dynamic monitoring of intertidal terrain by remote sensing (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013. 1–101 [顾燕. 潮间带地形遥感动态监测体系研究. 博士学位论文. 南京: 南京师范大学, 2013. 1–101]
- Murray N J, Stuart R P, Robert S C, et al. Continental scale mapping of tidal flats across East Asia using the landsat archive. *Remote Sens*, 2012, 4: 3417–3426
- Sagar S, Roberts D, Bala B, et al. Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28 year time series of Landsat Observations. *Remote Sens Environ*, 2017, 195: 153–169
- Zhang W K. A study on exploitation and utilization of tideland resources in Fujian Province (in Chinese). *Resour Sci*, 2001, 23: 29–32 [张文开. 福建省潮间带滩涂资源的开发利用研究. 资源科学, 2001, 23: 29–32]
- Xu J S. Advantages and directions of comprehensive development and utilization in Bohai gulf coastal zone (in Chinese). *Ocean Dev Manage*, 1987, 4: 16–19 [徐家声. 渤海湾海岸带综合开发利用的优势及方向. 海洋开发与管理, 1987, 4: 16–19]
- Cai F, Su X Z, Liu J H, et al. Coastal erosion problem and countermeasures in China under the background of global climate change (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2008, 18: 1093–1103 [蔡锋, 苏贤泽, 刘建辉, 等. 全球气候变化背景下我国海岸侵蚀问题及防范对策. 自然科学进展, 2008, 18: 1093–1103]
- Murray N J, Robert S C, Stuart R P, et al. Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea. *Front Ecol Environ*, 2014, 12: 267–272
- Sun W L, Sun Z G, Tian L P, et al. Variation and prediction of different marsh landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 215–225 [孙万龙, 孙志高, 田莉萍, 等. 黄河三角洲潮间带不同类型湿地景观格局变化与趋势预测. 生态学报, 2017, 37: 215–225]
- National Coastal Zone and Coastal Resources Comprehensive Survey Concise Procedures Compilation Group. National Coastal Zone and Coastal Resources Comprehensive Survey Concise Procedures (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1986 [全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程编写组. 全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程. 北京: 海洋出版社, 1986]
- Yao Y C, Ren C Y, Wang Z M, et al. Monitoring of salt ponds and aquaculture ponds in the coastal zone of China in 1985 and 2010 (in Chinese). *Wetl Sci*, 2016, 14: 874–882 [姚云长, 任春颖, 王宗明, 等. 1985和2010年中国沿海盐田和养殖池遥感监测. 湿地科学, 2016, 14: 874–882]
- Cracknell A P. Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones an update. *Int J Remote Sens*, 1999, 20: 485–496
- Green E P, Mumby P J, Edwards A J, et al. A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources. *Coast Manage*, 1996, 24: 1–40
- Xia Y Q, Li H L. Environmental & hydrogeological factors of tidal marsh (in Chinese). *J Yangtze River Sci Res Inst*, 2010, 27: 35–49 [夏玉强, 李海龙. 影响潮间带湿地的环境水文因素. 长江科学院院报, 2010, 27: 35–49]
- Liu B, Zhao D Y, Ning G F, et al. Comparative study of Landsat 8 images waterline extraction method (in Chinese). *Geomat Spat Inf Technol*, 2016, 39: 28–32 [刘冰, 赵得意, 宁国法, 等. Landsat 8影像水边线提取方法比较研究. 测绘与空间地理信息, 2016, 39: 28–32]
- Huang L, Zhang C Y. Preliminary study of waterline extraction methods at Xiamen Bay based on LandSAT TM (in Chinese). *Sci J Earth Sci*, 2013, 3: 133–139 [黄路, 张彩云. 基于LandSAT TM的厦门湾水边线提取方法初探. 地球科学期刊, 2013, 3: 133–139]

- 16 Ryu J H, Won J S, Min K D. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomso Bay. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 442–456
- 17 Ma X F, Zhao D Z, Xing X G, et al. Means of withdrawing coastline by remote sensing (in Chinese). *Mar Environ Sci*, 2007, 26: 185–189 [马小峰, 赵冬至, 邢小罡, 等. 海岸线卫星遥感提取方法研究. *海洋环境科学*, 2007, 26: 185–189]
- 18 Wu T, Hou X Y. Tendency of coastline variations on Mainland China since 1940s (in Chinese). *Ecol Sci*, 2017, 36: 80–88 [毋亭, 侯西勇. 1940s 以来中国大陆岸线变化的趋势分析. *生态科学*, 2017, 36: 80–88]
- 19 Wang X D, Fang C, Kang H, et al. Remote sensing monitoring of the Caofeidian tidal zone evolution (in Chinese). *Mar Sci Bull*, 2014, 33: 559–565 [王小丹, 方成, 康慧, 等. 曹妃甸地区潮间带演变的遥感监测. *海洋通报*, 2014, 33: 559–565]
- 20 Xu N, Gong P. Significant coastline changes in China during 1995–2015 tracked by Landsat data. *Sci Bull*, 2018, 63: 883–886
- 21 Chen Y, Dong J Y, Xiao X M, et al. Land claim and loss of tidal flats in the Yangtze Estuary. *Sci Rep*, 2016, 6: 1–10
- 22 Wang J W, Niu Z G. Remote-sensing analysis of Yancheng intertidal zones based on tidal correction (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2017, 39: 149–160 [王靖雯, 牛振国. 基于潮位校正的盐城滨海潮间带遥感监测及变化分析. *海洋学报*, 2017, 39: 149–160]
- 23 Zhang Y, Zhang J L, Li X M, et al. Stability of continental coastline in China since 1990 (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2015, 35: 1288–1293 [张云, 张建丽, 李雪铭, 等. 1990 年以来中国大陆海岸线稳定性研究. *地理科学*, 2015, 35: 1288–1293]
- 24 Institute of Marine Science and Technology Information. Volume 1 of Tide Tables 1995 (Yalu River Mouth-Yangtze River Mouth) (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1994 [海洋科技情报研究所. 1995 潮汐表第一册(鸭绿江口-长江口). 北京: 海洋出版社, 1994]
- 25 Institute of Marine Science and Technology Information. Volume 2 of Tide Tables 1995 (Yangtze River Mouth-Taiwan Straits) (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1994 [海洋科技情报研究所. 1995 潮汐表第二册(长江口-台湾海峡). 北京: 海洋出版社, 1994]
- 26 Institute of Marine Science and Technology Information. Volume 3 of Tide Tables 1995 (Taiwan Straits-Beibu Gulf) (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1994 [海洋科技情报研究所. 1995 潮汐表第三册(台湾海峡-北部湾). 北京: 海洋出版社, 1994]
- 27 National Marine Information Center. Volume 1 of Tide Tables 2015 (Yalu River Mouth-Yangtze River Mouth) (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2014 [国家海洋信息中心. 2015 潮汐表第一册(鸭绿江口-长江口). 北京: 海洋出版社, 2014]
- 28 National Marine Information Center. Volume 2 of Tide Tables 2015 (Yangtze River Mouth-Taiwan Straits) (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2014 [国家海洋信息中心. 2015 潮汐表第二册(长江口-台湾海峡). 北京: 海洋出版社, 2014]
- 29 National Marine Information Center. Volume 3 of Tide Tables 2015 (Taiwan Straits-Beibu Gulf) (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2014 [国家海洋信息中心. 2015 潮汐表第三册(台湾海峡-北部湾). 北京: 海洋出版社, 2014]
- 30 Zhang X K, Zhang X, Yang B H, et al. Coastline extraction using remote sensing based on coastal type and tidal correction (in Chinese). *Remote Sens Land Resour*, 2013, 25: 91–97 [张旭凯, 张霞, 杨邦会, 等. 结合海岸类型和潮位校正的海岸线遥感提取. *国土资源遥感*, 2013, 25: 91–97]
- 31 Hou X Y, Wu T, Hou W, et al. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2016, 46: 1065–1075 [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. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46: 1065–1075]
- 32 Bi H Y, Wang S Y, Zeng J Y, et al. Comparison and analysis of several common water extraction methods based on TM image (in Chinese). *Remote Sens Inf*, 2012, 27: 77–82 [毕海芸, 王思远, 曾江源, 等. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析. *遥感信息*, 2012, 27: 77–82]
- 33 Zhang C C, Dou X N, Zhang N, et al. Comparative study of the remote sensing image classification method based on water area estimation (in Chinese). *Meteorol Environ Sci*, 2008, 31: 24–28 [张成才, 窦小楠, 张楠, 等. 遥感影像分类方法在水体面积估算中的比较研究. *气象与环境科学*, 2008, 31: 24–28]
- 34 Ghooggali N, Melgani F. Automatic ground-truth validation with genetica algorithms for multispectral image classification. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47: 2172–2181
- 35 Shao W Y, Li G Q, Wang L. Changes of tidal flat and coastline in the northern Shandong Peninsula in recent 30 years (in Chinese). *J Appl Oceanogr*, 2017, 36: 512–518 [邵晚悦, 李国庆, 王乐. 近 30 年来山东半岛北部滩涂及海岸线变化. *应用海洋学学报*, 2017, 36: 512–518]
- 36 Wu S S, Zhang Z L, Chen M. Changes of coastal wetlands and analysis of its driving reasons along south coast of the Laizhou Bay (in Chinese). *Wetl Sci*, 2009, 7: 373–378 [吴珊珊, 张祖陆, 陈敏. 莱州湾南岸滨海湿地变化及其原因分析. *湿地科学*, 2009, 7: 373–378]
- 37 Zhang X L, Zhang C H, Xu Z J. Landscape pattern change and its cumulative environmental effects of coastal wetlands in southern Laizhou Bay (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2009, 28: 2437–2443 [张绪良, 张朝晖, 徐宗军. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及累积环境效应. *生态学杂志*, 2009, 28: 2437–2443]
- 38 Cui B S, Xie T, Wang Q, et al. Impact of Large-scale reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2017, 32: 418–425 [崔保山, 谢湑, 王青, 等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策. *中国科学院院刊*, 2017, 32: 418–425]

- 39 Xu J Y, Zhang Z X, Zhao X L, et al. Remote sensing monitoring method of land reclamation (in Chinese). *Bull Surv Map*, 2014, 5: 60–75 [徐进勇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 围填海遥感监测方法研究. 测绘通报, 2014, 5: 60–75]
- 40 Hou X Y, Xu X L. Spatial patterns of land use in coastal zones of China in the early 21st century (in Chinese). *Geogr Res*, 2011, 30: 1370–1379 [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. 地理研究, 2011, 30: 1370–1379]
- 41 Gao Z Q, Liu X Y, Ning J C, et al. Analysis on changes in coastline and reclamation area and its causes based on 30-year satellite data in China (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, 30: 140–147 [高志强, 刘向阳, 宁吉才, 等. 基于遥感的近 30 a 中国海岸线和围填海面积变化及成因分析. 农业工程学报, 2014, 30: 140–147]
- 42 Meng W Q, Hu B B, He M X, et al. Temporal-spatial variations and driving factors analysis of coastal reclamation of China. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2017, 191: 39–49
- 43 Chinese Academy of Sciences. China Subject Development Strategy, Coastal Marine Science (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [中国科学院. 中国学科发展战略·海岸海洋科学. 北京: 科学出版社, 2016]
- 44 Jie D M, Zhang J Q, Wang L K. Research on the stability for north shoreline of Liaodong Bay (in Chinese). In: Risk Analysis and Crisis Response from the Chinese Perspective—The Fourth Annual Conference Article Collection of China Disaster Prevention Association Risk Analysis Committee. Changchun: Atlantis Press, 2010. 764–769 [介冬梅, 张景奇, 王刘奎. 辽东湾北岸岸线稳定性研究. 见: “中国视角的风险分析和危机反应”——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第四届年会论文集. 长春: Atlantis 出版社, 2010. 764–769]
- 45 Yu D H, Jiang A N, Song Z P. Distribution and development of coast erosion in Liaodong Peninsula (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 2014, 34: 34–37 [于德海, 姜谔男, 宋站平. 辽东半岛海岸侵蚀分布规律及其发育特征. 水土保持通报, 2014, 34: 34–37]
- 46 Zhang X R. Research on determination method and evolution trend of Shuangtaizi Estuary coastline (in Chinese). Master Dissertation. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2015. 1–54 [仇新日. 双台子河口海岸线确定方法及其演变趋势研究. 长春: 长春工程学院, 2015. 1–54]
- 47 Chen J, Huang F M, Chen F. Characteristics and protection measurement of coastal erosion of Fujian Province, China (in Chinese). In: Symposium on Submarine Science and Strategy. Beijing: China Ocean Press, 2015. 28–35 [陈坚, 黄发明, 陈峰. 福建省海岸侵蚀状况与对策. 见: 海底科学战略研讨会论文集. 北京: 中国海洋出版社, 2015. 28–35]
- 48 Cai A Z, Cai X. Diffusion and modern sedimentation of seaward-transporting discharges in the estuary of Jiulongjiang River, Fujian Province (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 1991, 11: 57–67 [蔡爱智, 蔡雄. 福建九龙江口入海泥沙的扩散和河口湾的现代沉积. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11: 57–67]
- 49 Huang Y Q. Numerical simulation of sediment deposition and coastline evolution in Quanzhou Bay (in Chinese). Master Dissertation. Quanzhou: Huaqiao University, 2015. 1–93 [黄逸群. 泉州湾泥沙淤积数值模拟及海岸线演变规律研究. 泉州: 华侨大学, 2015. 1–93]
- 50 Yu J, Cao Y. Sediment deposition after regulation and reclaiming of Qiantang Estuary (in Chinese). *J Sediment Res*, 2006, 1: 17–24 [余炯, 曹颖. 治江缩窄后钱塘江河口泥沙淤积和成因探讨. 泥沙研究, 2006, 1: 17–24]
- 51 Liu Y W, Yang S L, Luo X X. Separation estimate of beach erosion and deposition on intertidal wetland because of sea level rise and normal deposition (in Chinese). *Shanghai Land Resour*, 2011, 32: 23–52 [刘英文, 杨世伦, 罗向欣. 海平面上升的淹没效应和岸滩冲淤对潮间带湿地面积影响的分离估算. 上海国土资源, 2011, 32: 23–52]

Summary for “基于潮位校正的中国潮间带遥感监测及变化”

Remote-sensing monitoring and analysis of China intertidal zone changes based on tidal correction

Qianqian Han^{1,2}, Zhenguo Niu^{1*}, Mengquan Wu³ & Jingwen Wang^{1,2}

¹ State key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

* Corresponding author, E-mail: niuzg@radi.ac.cn

Intertidal zones are located in the transitional area of sea and land and are important to biodiversity protection, social and economic development, and global environmental changes. However, due to the irregular dynamics of the tides and the regular local time of satellite transit, it is challenging to monitor the extent of intertidal zones using only satellite remote-sensing methods. Until now, there has been no complete dataset of China's coastal intertidal zones and knowledge about their distribution is limited. In the work described in this paper, we first used 156 Landsat Thematic Mapper/Operational Land Imager images covering the entire coastal area of China in 1995 and 2015 to extract the instantaneous shoreline water boundaries. Then, by combining the tidal level information at the transit of the satellite, we simulated the average high- and low-tide lines and determined the spatial and temporal distribution of intertidal zones by the geographic information system method. At the same time, the land-use types across the intertidal zones were manually interpreted based on high-resolution images from Google Earth. On this basis, the spatial and temporal characteristics of intertidal zone changes across China's coastal areas and their driving factors were researched. The results follow. (1) In 2015, the total area of the intertidal zone in China was approximately 14070 km², of which Fujian Province (18%) was the most distributed in the intertidal zone, followed by Liaoning Province (15%), Shandong Province (14%), Jiangsu Province (12%), and Guangdong Province (11%); the smallest area was distributed in Hainan Province (2%). (2) From 1995 to 2015, the national intertidal zone area decreased by 1375 km², approximately 8.9%. The intertidal zone area of different provinces and cities showed different increasing and decreasing trends. The largest reduction of intertidal zones was in Zhejiang Province, with an area decrease of 1189 km². The intertidal zone area of Jiangsu Province was greatly reduced, by which its first position of having the most intertidal zone area of China in 1995 decreased to the fourth in 2015. The intertidal zones in Fujian Province exhibited the greatest increase, reaching 453 km². The area of intertidal zones between the ports of Shanghai Luchao and Zhejiang Jintang exhibited the greatest decrease, reaching 56.5%. The area of intertidal zones between Fujian Shui'ao and Anhaiwan estuaries increased the most, reaching 37.28%, an area of 445.59 km². (3) The trend of development and utilization of intertidal zones continues to increase. In 1995, the coastal intertidal zone area occupied was 3490 km², and by 2015, it had reached 4581 km². The type of development and utilization of intertidal zones changed from agricultural sea (41.8%) to marine aquaculture; the proportion of urban construction occupied also reached 13%. At the same time, the intertidal zone area in the cofferdam (under construction/unknown use) continued to grow, from 18.1% in 1995 to 29% in 2015. The intertidal zone showing the greatest level of development and utilization among the coastal provinces is Jiangsu Province, with an occupied area of 1646 km², accounting for 35.9% of the developed and utilized national intertidal zone, with the main types of utilization being agricultural sea and mariculture. The other provinces that developed intertidal zones are Guangdong (13.7%), Shandong (12.5%), Liaoning (10.9%), and Shanghai (10.3%). The main development and utilization types of intertidal zones are urban construction and mariculture, with a large number of intertidal zones presently under development. (4) The “squeezing effect” caused by the combination of artificial and natural factors have caused the reduction of intertidal zones in China. Human development mainly includes marine aquaculture, industrial development, port expansion, urban construction, and reclamation. And the actual high-tide line has moved towards the sea by artificial intertidal zone development. The velocity is even higher than that of low-tide line, resulting in the reduction of intertidal zones. Natural factors mainly include rising sea level and other factors, such as changes in the sediment concentration of rivers entering the sea and coastal hydrodynamic forces, which are also important factors affecting the change of coastal intertidal zones. These factors contribute to the drift of some intertidal zones towards the sea and the expansion of the area. The contradiction between economic development and coastal ecological environmental protection is still outstanding.

intertidal zones, wetland remote sensing, tidal correction, China coastal wetland

doi: 10.1360/N972018-00723