

doi: 10.12029/gc20170502

印萍, 林良俊, 陈斌, 肖国强, 曹珂, 杨吉龙, 李梅娜, 段晓勇, 仇建东, 胡云壮, 王磊, 孙晓明. 中国海岸带地质资源与环境评价研究[J]. 中国地质, 44(5): 842-856.

Yin Ping, Lin Liangjun, Chen Bin, Xiao Guoqiang, Cao Ke, Yang Jilong, Li Meina, Duan Xiaoyong, Qiu Jiandong, Hu Yunzhuang, Wang Lei, Sun Xiaoming. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China[J]. Geology in China, 44(5): 842-856 (in Chinese with English abstract).

## 中国海岸带地质资源与环境评价研究

印萍<sup>1</sup> 林良俊<sup>2</sup> 陈斌<sup>1</sup> 肖国强<sup>3</sup> 曹珂<sup>1</sup> 杨吉龙<sup>3</sup> 李梅娜<sup>1</sup>

段晓勇<sup>1</sup> 仇建东<sup>1</sup> 胡云壮<sup>3</sup> 王磊<sup>1</sup> 孙晓明<sup>3</sup>

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国地质调查局, 北京 100037; 3. 天津地质调查中心, 天津 300170)

**摘要:** 海岸带是中国社会经济发展的前沿地带, 人口密度最大、城镇化程度最高, 在中国海洋强国战略中发挥重要的支撑作用, 同时也是中国资源环境压力最大的区域。本文在全面分析近20年来中国海岸带地质资源环境调查成果的基础上, 系统梳理了海岸带地区地质资源环境优势和存在的地质环境问题。中国海岸带地质资源环境优势突出, 为绿色发展提供了良好条件, 重要地质资源环境优势包括:  $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$  滩涂后备土地资源可适度开发, 以缓解海岸带建设用地紧张局面;  $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$  绿色富硒土地和  $4.1 \times 10^5 \text{ km}^2$  绿色渔场, 适宜发展绿色特色农业和建设海洋牧场; 浅层地温能和地热水年可开采量折合标准煤  $4.2 \times 10^8 \text{ t}$ , 对改善能源结构、减少大气污染有重要作用;  $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$  滨海湿地和134处国家级和世界地质遗迹资源, 为海岸带生态文明建设提供了条件; 90%的陆域适宜城镇和重大工程规划建设, 地下空间开发条件较好, 为海岸带地质安全提供了保障。存在的主要环境问题包括: 海岸带局部存在活动断裂、地面沉降、地面塌陷、海岸侵蚀淤积、风暴潮等重大地质问题, 对部分城市与重要基础设施形成威胁, 局部地区水、土污染及海水入侵严重, 需要高度重视。建议加大海岸带多学科综合地质调查, 构建多要素、多圈层、多维度地质模型, 查明自然灾害发生的规律和原因, 减轻对人民生命财产造成的损失。

**关键词:** 海岸带; 地质资源; 地质环境; 地质灾害

中图分类号: P64, P66, P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)05-0842-15

## Coastal zone geo-resources and geo-environment in China

YIN Ping<sup>1</sup>, LIN Liangjun<sup>2</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>, XIAO Guoqiang<sup>3</sup>, CAO Ke<sup>1</sup>, YANG Jilong<sup>3</sup>, LI Meina<sup>1</sup>,  
DUAN Xiaoyong<sup>1</sup>, QIU Jiandong<sup>1</sup>, HU Yunzhuang<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, SUN Xiaoming<sup>3</sup>

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 3. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** The coastal zone of China is the economic development frontier with the highest population and urbanization, critically important for the national strategy of maritime power promotion, nevertheless it is also facing the highest pressures of resources shortage and environment challenges. This paper has reviewed the last two decades' survey and research results carried out by China

收稿日期: 2017-09-20; 改回日期: 2017-10-09

基金项目: 中国地质调查局项目“海岸带综合地质调查工程”(0327)资助。

作者简介: 印萍, 女, 1971年生, 研究员, 主要从事海岸带环境地质研究; E-mail: pingyin@fio.org.cn。

Geological Survey in China's coastal zone, with the purpose of assessing the advantages of geo-resources and the challenges on geo-environment as well as geo-hazards. China's coastal zone possesses very rich geo-resources which provide the foundation of sustainable and green economy development. Here are some examples:  $1.2 \times 10^4$  km<sup>2</sup> tidal flat space resources can be used for future coastal spatial expansion to release the present high pressure of land resources;  $2.8 \times 10^4$  km<sup>2</sup> high quality selenium-rich farming lands and  $4.1 \times 10^5$  km<sup>2</sup> fishing grounds provide high potential capacity for green and special agriculture, fishery and marine ranching; shallow geothermal energy and geothermal water on the coastal zone can be converted into green energy equal to  $4.2 \times 10^8$  t standard coals, which will help to improve the energy consumption structure and reduce air pollution;  $5.8 \times 10^4$  km<sup>2</sup> coastal wetlands and 134 sites of geo-heritage provide high potential opportunity for ecological civilization development on the coastal zone; 90% of the coastal land spaces are geologically suitable for urbanization development and infrastructure construction, with high quality and quantity underground space resources. Nevertheless, China's coastal zone is also facing serious challenges from geo-environment, such as active faults, land subsidence, surface collapse, coastal erosion and storm surge threats, pollution in water and soil, and salt water or brine water intrusion. These challenges should be taken into account for the coastal sustainable and ecological development. The authors suggest enhancing the coastal multidisciplinary and comprehensive geological survey, establishing the integrated coastal geological models based on multiple environmental factors, geosphere-biosphere-hydrosphere interactive layers as well as multiple spatial and temporal dimensions, and revealing the distribution and causes of geohazards so as to mitigate the life and wealth losses on the coastal zone.

**Key words:** coastal zone; geo-resources; geo-environment; geohazard

**About the first author:** YIN Ping, female, born in 1971, professor, engages in geological environment research on the coastal zone; E-mail: pingyin@fio.org.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program—Integrated coastal zone geological survey (No. 0327).

## 1 引言

海岸带地区是全球社会经济活动最活跃、生态系统最丰富、海陆作用最强烈的地理区带,在距海岸线 100 km 左右的空间范围内,聚集了全球近 60% 的人口和 70% 以上的社会财富,这是由于海岸带地区分布着优良的自然环境资源、生态资源和土地资源,据联合国专家预测,随着现代化和城市化进程的加快,到 2050 年,全世界将有 80% 的人口居住在海岸带地区 (Ketchum, 1972; Clark, 2009; Cicin-Sain et al., 1998; Kay and Alder, 1999; Burak et al., 2004)。中国海岸带地处海陆交互地带,地质条件复杂,随着沿海地区经济高速发展和工业化、城镇化程度快速提升,海岸带地区资源环境矛盾凸显,土地、水、岸线资源供需矛盾趋紧,局部地区出现地面沉降、水土污染、湿地退化、海洋灾害损失加剧等环境问题 (徐凉慧等, 2014)。为适应中国新时期自然资源管理改革、生态文明建设和沿海地区后工业化发展的时代需求,开展中国海岸带地质资源和环境调查评估,为资源环境承载力评价提供支撑,是地质调查工作的重要使命 (张训华等, 2011)。

长期以来,海岸带资源和环境地质调查研究工作是全球各国地质调查机构的重点任务,随着沿海开发活动强度和城市化水平的提高,海岸带资源可持续开发、环境保护、灾害风险评估和预警成为各国海岸带地质调查工作的热点。欧美海洋发达国家海岸带地质调查程度高,美国、加拿大、荷兰、英国、日本等国家先后完成了海岸带地区陆域和重点近岸海域大比例地质调查工作,公开出版了 1:20~1:25 万包括海岸带和近海海域在内的全国性地质图件,近年来,海岸带地质调查重点转入专题性调查或重点区资源环境地质调查。其中,以荷兰为代表的欧盟国家,将海岸带工作重心转移到应对气候变化等新挑战,重点开展以海岸侵蚀防护为主的海岸监测和海砂调查、地下水资源环境调查和海洋风能开发的工程地质调查评价,通过国家立法保证地质资料整合和数据库建设,开展地质信息社会化服务 (Van der Meulen et al., 2013)。美国地质调查局近年来实施海岸与海洋地质计划 (CMGP),旨在加强和深化对美国海岸和近海海域的认识,为应对美国面临的资源和气候变化挑战提供地质产品和数据,地质调查和研究重点已由深水转移至大陆架、海岸

和河口,开展海岸带变化、地质灾害、海洋矿产资源和海岸与海洋生态系统四大主题的调查研究工作,在加利福尼亚等海岸带与州政府合作,开展海岸带新一轮填图工作,比例尺最大可达1:2.4万(Clark and Brabb,1997; Hapke et al., 2006; Johnson et al., 2015)。日本2008年启动海岸带调查新计划,主要针对海陆对接空白区开展补充调查,以期形成海陆无缝对接的地质信息,重点加强活动断裂、地层结构和第四纪沉积环境调查,先后完成熊登、福冈和新泻等重点区海岸带填图工作,并发布了系列1:20万海岸带地质图件(Matsumoto, 2013)。

近20年来,中国地质调查局在中国海岸带地区部署实施了土地质量地球化学、海洋地质、地下水、地面沉降、地面塌陷、矿山地质环境、滩涂资源、地热资源、活动断裂等地质调查工作,取得一系列重要地质调查研究成果,并及时向社会提供多样化的地质调查产品服务(中国地质调查局,2016;莫杰等,2017)。在曹妃甸、莱州湾、南通等试点区工作经验的基础上,2016年中国地质调查局全面启动了海岸带陆海统筹综合地质调查工作(郝爱兵等,2017)。近期,中国地质调查局会同沿海11省(直辖市、自治区)国土资源部门,系统梳理和总结了海岸带地区地质调查成果,对中国海岸带地质资源和地质环境条件开展分析和研判。本文对研究成果进行综述,以期为沿海地区的区域规划、重大工程建设、环境保护、资源开发和减灾防灾提供参考。本文统计和分析范围为中国沿海54个地级以上城市

陆域行政区范围(不含港澳台地区)和水深小于50m的海域范围,陆域面积 $4.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,海域面积 $6.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

## 2 中国海岸带国土资源环境优势

### 2.1 后备土地资源

中国海岸带位于西太平洋边缘,为边缘海环绕,大陆架宽平,并有黄河、长江、珠江等重要的河流携带大量沉积物入海,在海岸带地区形成广大的河口三角洲沉积体系,同时由于海洋沿岸流系发育,大量的河流入海沉积物被沿岸搬运沉积,形成宽广的潮间带滩涂(张晓浩等,2016;罗锋等,2017;孙百顺等,2017)。

中国海岸带滩涂资源丰富,潮上带和潮间带现有滩涂25808  $\text{km}^2$ ,其中山东、江苏、辽宁、福建、广东、浙江六省滩涂面积均超过2000  $\text{km}^2$ ,共计20952  $\text{km}^2$ ,占滩涂总面积的81.1%。自1980年以来,为解决港口、临港工业区、滨海开发区建设和部分农渔业用地需求,沿海各省市滩涂围填海总面积达6110  $\text{km}^2$ 。其中,1980—1990年围填海1730  $\text{km}^2$ ,1990—2010年围填海3330  $\text{km}^2$ ,2010年以来围填海1050  $\text{km}^2$ 。围填海面积较大的依次为江苏、浙江、山东、广东、福建、上海、辽宁、天津等省市,均超过400  $\text{km}^2$ ,共计5606  $\text{km}^2$ ,占围填海总面积的85%(表1)。据统计,潮上带尚有可开发利用的滩涂后备土地空间7559  $\text{km}^2$ ,面积较大的省市依次为山东、辽宁、河北、天津、福建和广东。根据水深、沉积动力、

表1 海岸带滩涂及后备土地资源(单位: $\text{km}^2$ )

Table 1 Coastal tidal flat and potential land resources in China ( $\text{km}^2$ )

序号	省市	海岸带滩涂资源	已围填海面积	海岸带后备土地面积		5 m 水深以浅潮下带面积
				潮上带	潮间带	
1	辽宁	3210	440	1159	333	3636
2	河北	1858	333	846	113	846
3	天津	972	426	586	0	513
4	山东	6174	779	3037	579	2591
5	江苏	3863	1465	406	2584	2571
6	上海	613	453	33	47	1339
7	浙江	2438	915	153	340	1978
8	福建	2664	513	586	53	952
9	广东	2604	613	566	246	3663
10	广西	1032	113	80	93	946
11	海南	386	60	100	20	633
12	合计	25808	6110	7559	4402	19667

地质环境、生态保护等限制条件评价,中国沿海潮间带适宜和较适宜围填的滩涂后备土地4402 km<sup>2</sup>,面积较大的有江苏、山东、浙江、辽宁和广东等省份。潮下带水深小于5 m浅水海域面积19667 km<sup>2</sup>,居前六位的省市依次为广东、辽宁、山东、江苏、浙江和上海。

土地资源是城镇化建设的限制性资源因素,海岸带滩涂资源开发有助于缓解发展空间压力,但带来的生态环境问题不容低估,建议科学规划、适度开发海岸带后备土地资源。在充分考虑生态环境的前提下,优先开发潮上带已围填而未利用的滩涂

后备土地,控制潮间带围填海工程规模和用途,优先满足港口、临港工业区用地需求,限制农渔业围填用海,提高生态用地比例,开展滨海湿地修复。将5 m水深以浅潮下带作为后备土地远景区,近阶段内限制开发。

### 2.2 绿色优质土地资源

中国海岸带地区已完成1:25万土地质量地球化学调查面积达2.8×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,综合评价结果表明,土地环境质量优良等级土地面积2.7×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,占调查区面积96.4%。其中,符合《绿色食品产地生态环境质量标准》(NY/T391-2000)的绿色优质土地2.2×

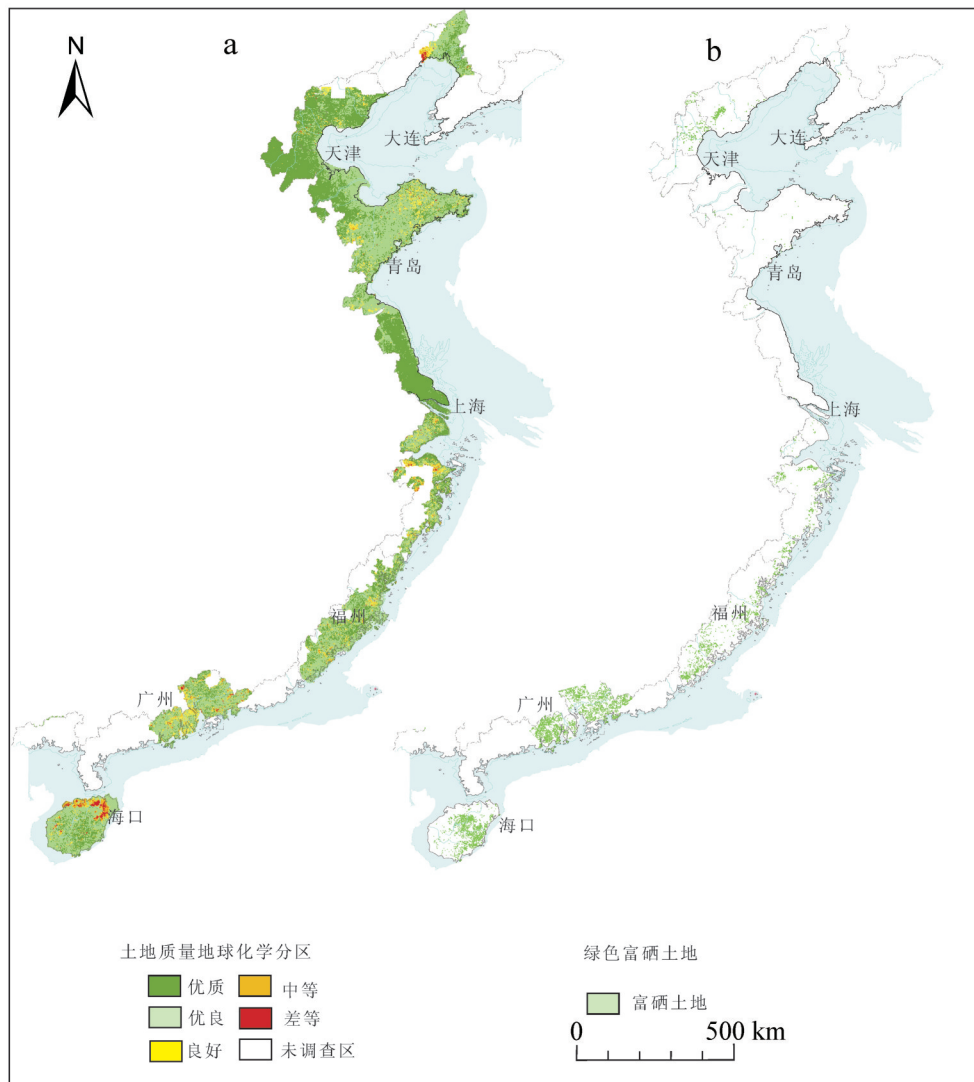


图1 海岸带土地地球化学质量分区图(a)绿色富硒土地分布图(b)  
Fig.1 Geochemical classification and gradation of land quality (a) and distribution of green Se-enriched lands (b) along China coastal zone

$10^5 \text{ km}^2$ , 占调查区面积 80.0%(图 1 a, 表 2)。唐山、天津、东营、潍坊、盐城、福州、惠州等 17 个城市及海南省的优良等级土地面积均超  $6000 \text{ km}^2$ , 共计  $1.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占优良土地的 78.8%。

海岸带富硒土地面积  $5.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中 55.6% 为绿色富硒土地, 面积  $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1b, 表 2)。绍兴、宁波、温州、宁德、福州、厦门、漳州、惠州、深圳、东莞、广州、中山、珠海、江门和海南中东部, 绿色富硒土地面积均超过当地调查面积 10%, 其中, 惠州、深圳、广州和江门超过 30%, 具有良好的绿色富硒农产品发展前景。

中国近岸海域水深小于 50 m 范围内海洋水质及海底底质无污染面积  $4.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 主要分布在渤海湾中部、黄海北部、东海东部、南海大部, 包括渤中、海东、海洋岛、烟威、石岛、吕四、闽南、粤东、粤西、海南东南、西南、北部湾等 12 个绿色优质渔场。

保护优质土地、建设高标准农田、开发特色农产品是保障耕地红线和国家粮食安全的基础, 建议把海岸带绿色优质土地和富硒土地中的耕地纳入永久基本农田保护范围, 打造海岸带绿色富硒农产品基地; 加强绿色优质渔场周边陆源污染物排放和海洋石油开采溢油污染的防控, 建设绿色海洋牧场。

### 2.3 地热资源

受大陆边缘新生代沉降作用和东南沿海活跃的新构造运动等地质背景控制, 中国海岸带地区地热资源丰富。东南沿海和海南以水热型地热资源为主, 华北盆地、河淮盆地、松辽平原和苏北盆地为沉积盆地传导型地热资源, 山东半岛和辽东半岛以隆起山地型地热资源为主(王贵玲等, 2012; 蔺文静等, 2013)。

中国沿海地市浅层地温能可开采量折合标准煤  $2.84 \times 10^8 \text{ t/a}$ (表 3)。采用地源热泵系统开发利用浅层地温能, 夏季可制冷面积  $58.8 \times 10^9 \text{ m}^2$ , 冬季可供暖面积  $75.7 \times 10^9 \text{ m}^2$ 。长江以北 22 个地市浅层地温能开发利用条件较好, 若充分开发利用, 可基本实现当地建筑物供暖制冷需要。2014 年沿海城市浅层地温能供暖面积  $8.4 \times 10^7 \text{ m}^2$ , 主要分布在天津、上海、大连、山东沿海、江苏沿海、浙江宁波等城市, 浅层地温能利用量折合标准煤  $3.77 \times 10^6 \text{ t}$ , 仅占年可开

表 2 海岸带土地质量地球化学分区及富硒土地分布  
Table 2 Geochemical classification and gradation of land quality and distribution of Se-enriched land on China coastal zone

沿海地市	土地质量分区面积/ $\text{km}^2$			富硒土地面积/ $\text{km}^2$		
	优良	中等	差等	绿色土地	富硒土地	绿色富硒土地
营口	1676	8	8	1508	36	20
盘锦	3648	0	0	3612	4	4
锦州	5844	284	224	5076	24	4
秦皇岛	3136	8	4	2988	92	88
唐山	10517	40	4	9952	648	600
沧州	14101	4	4	13061	48	36
天津	11557	132	52	10309	1708	1036
滨州	9028	0	0	8132	64	56
东营	7368	0	0	6904	0	0
潍坊	15705	192	12	14873	56	48
烟台	13345	232	92	10761	108	36
威海	5376	68	28	4860	40	16
青岛	11149	40	28	10645	180	84
日照	5276	24	16	4884	24	4
连云港	7372	16	4	5484	68	28
盐城	14869	4	0	14113	0	0
南通	8584	0	4	8528	20	16
上海	6896	88	48	5880	476	72
嘉兴	3768	84	12	3212	160	108
绍兴	3240	444	144	2432	1260	464
宁波	5716	348	100	4212	1784	924
台州	3744	60	28	2936	604	364
温州	2760	96	36	1852	1004	552
宁德	3960	16	0	2356	900	452
福州	9148	216	44	6368	2108	1256
莆田	3300	44	8	2076	584	256
泉州	8540	116	24	5052	1584	580
厦门	1344	36	8	1024	372	244
漳州	8672	256	28	5560	3484	2112
惠州	8600	352	160	6208	6024	3716
深圳	1736	136	60	1132	1360	768
东莞	2372	56	20	1488	1320	700
广州	6660	356	160	3636	5216	2372
中山	1628	52	12	404	1376	316
珠海	1144	44	0	336	940	284
江门	8460	360	100	5548	7260	4276
海南	29513	2608	1644	25877	10005	6424
合计	269757	6820	3116	223283	50943	28317

表3 海岸带地热资源量估算

Table 3 Assessment of geothermal resources on China coastal zone

序号	沿海地市	水热型地热资源可开采量折合标准煤/(10 <sup>4</sup> t/a)	浅层地温能可开采量折合标准煤/(10 <sup>4</sup> t/a)
1	丹东	33.29	175.12
2	大连	27.74	442.62
3	营口	16.64	371.72
4	盘锦	11.10	303.29
5	锦州	24.97	206.48
6	葫芦岛	24.97	319.99
7	秦皇岛	632.76	7.36
8	唐山	1265.53	223.44
9	沧州	1265.53	502.41
10	天津	5061.64	6000.00
11	滨州	577.76	104.53
12	东营	288.88	44.55
13	潍坊	808.87	383.69
14	烟台	693.31	63.35
15	威海	288.88	92.49
16	青岛	577.76	86.81
17	日照	231.10	202.87
18	连云港	260.75	303.00
19	盐城	456.32	533.00
20	南通	260.75	534.00
21	上海	31.68	9690.60
22	嘉兴	16.93	387.10
23	绍兴	28.21	196.13
24	宁波	39.50	451.55
25	舟山	5.64	43.35
26	台州	33.85	137.53
27	温州	45.14	67.64
28	宁德	6.30	250.03
29	福州	7.56	115.00
30	莆田	3.78	978.50
31	泉州	6.30	350.09
32	厦门	1.26	1542.34
33	漳州	6.30	718.60
34	潮州	7.74	60.57
35	汕头	3.87	301.13
36	揭阳	19.35	94.35
37	汕尾	15.48	34.66
38	惠州	38.70	166.76
39	深圳	7.74	140.25
40	东莞	3.87	135.45
41	广州	27.09	576.00
42	中山	3.87	131.25
43	珠海	3.87	129.52
44	江门	30.96	86.49
45	阳江	23.22	11.64
46	茂名	23.22	0.42
47	湛江	23.22	2.16
48	北海	25.24	172.00
49	钦州	63.10	215.00
50	防城港	37.86	103.10
51	海口市	30.32	93.32
52	三亚市	30.32	81.50
53	三沙市	40.43	0.90
54	合计	13500	28400

采资源量的1.3%。

海岸带地下热水可采热量折合标准煤  $1.35 \times 10^8$  t/a(表3)。水温低于90℃的中低温地下热水资源主要分布在渤海湾、山东半岛、江苏沿海等地;水温大于90℃的高温地下热水资源主要分布在福建和广东沿海。初步统计,2014年,海岸带地区有地热开采井348眼,温泉192处,主要用于供暖、旅游、疗养、种植养殖等,地下热水供暖面积  $3 \times 10^7$  m<sup>2</sup>。地热水开采量折合标准煤  $1.99 \times 10^6$  t,仅占年可开采量的1.5%。

海岸带干热岩资源潜力巨大,开发前景广阔。据初步调查,福建漳州和南埕、广东惠州和阳江、雷琼地区及海南陵水等地可作为高放射性产热型干热岩靶区,河北沧州和秦皇岛等地可作为沉积盆地型干热岩靶区。

地热资源是重要的可再生绿色能源,加大地热资源的开发利用,有利于减缓碳排放压力、改善空气质量,对东部沿海地区后工业化时代的能源结构改革具有更为突出意义。建议加大对天津、秦皇岛、滨州及东营等北方中低温地下热水勘查开发力度,增加建筑物地下热水供暖比重,推进地热水梯级综合利用,开展东南沿海中低温地下热水发电试点。大力推进长江以北沿海城市新城区、重大工程区浅层地温能开发利用。开展福建、广东、海南、河北沿海干热岩勘查开发示范。

#### 2.4 港口岸线资源

港口航运是重要的海洋经济开发活动,据国家海洋局《2016年中国海洋经济统计公报》,海洋运输行业经济总值6004亿元,占我国海洋经济的21%。港口岸线是港口建设的基础性资源,既稀缺,又不可再生,是国家的宝贵战略资源(许长新等,2010)。

中国海岸带大陆岸线18000 km,海岛岸线14000 km,海岸深水港口资源丰富,根据海岸自然水深、海洋动力(波浪场)、泥沙淤积条件等综合评价结果,港口建设适宜性好的大陆岸线1877 km,占海岸线总长10.2%,主要分布在辽宁、山东和广东;适宜性中等的岸线8882 km,占海岸线总长的48.5%。海岛深水宜港岸线1220 km,占海岛岸线总长的8.7%,主要分布在浙江和福建。截止2015年底,沿海港口利用岸线总长度近1500 km,占深水宜

岸线线的80%。自改革开放以来,以香港、广州、厦门、宁波、上海、青岛、天津、大连为龙头的港口群建设迅猛发展,港口岸线占用率高。总体上,港口建设适宜性好的岸线开发趋于饱和,但未达到优质效用,海岛深水宜岸线尚未充分利用。

科学高效开发利用港口岸线,是新时期我国沿海经济转型和新旧动能转换的关键,建议开展港口岸线资源调查评估,建立深水岸线资源保护和开发制度,科学规划港口布局;辽宁、河北、天津、广西岸线要统筹整合港口功能和布局,限制地质适宜性差的港口扩建;加快广东大鹏湾、大亚湾等港口群建设,集约开发优质深水宜岸线资源;推进福建宁德三都澳、泉州兴化湾陆—岛港口联合开发。

### 2.5 滨海湿地与地质遗迹资源

中国海岸带湿地类型多、分布广,是海岸带重要的生态系统组成部分。杭州湾以北,除山东半岛东北部和辽东半岛的东南部基岩性海岸,多为砂质和淤泥质海滩,环渤海湿地主要由辽河三角洲、黄河三角洲及莱州湾湿地组成,江苏浅海滩涂湿地主要由长江三角洲和废黄河三角洲组成。杭州湾以南主要是河口及海湾的淤泥质湿地,从海南省至福建省北部沿海滩涂有天然红树林分布。在西沙群岛、南沙群岛及海南沿海分布有热带珊瑚礁(张晓龙等,2005;徐东霞等,2007)。根据2015年卫星遥感资料统计,中国现有滨海湿地总面积达57959 km<sup>2</sup>,其中,浅海滩涂湿地23720 km<sup>2</sup>、海岸湿地17843 km<sup>2</sup>、河口湾湿地10438 km<sup>2</sup>、红树林湿地3885 km<sup>2</sup>、海岛湿地1422 km<sup>2</sup>、珊瑚礁湿地651 km<sup>2</sup>(表4)。近几十年来,围海造地大范围侵占滨海滩涂湿地,导致滨海湿地面积急剧减少。另外,河流

入海水沙减少、地下水开发、海平面上升等因素也导致滨海湿地退化和碎片化。据统计,目前我国海岸带自然湿地比20世纪50年代减少57%,天然红树林减少73%,海南省珊瑚礁面积减少80%(张晓龙等,2005;徐东霞等,2007;左平等,2012;Xie et al., 2010)。近年来,中国加强湿地保护的立法和滨海湿地生态环境修复工作,目前,已建立国家级滨海湿地保护区29个,省级湿地保护区43个,但受保护湿地面积比例不足30%。

地质遗迹是重要的旅游资源和自然遗产,我国海岸带有国家级以上地质遗迹134处,其中19处地质遗迹达到世界级标准。为有效保护海岸带地质遗迹,目前已建成10个世界地质公园、27个国家地质公园,但仍有60%的地质遗迹尚未得到保护,许多珍稀地质遗迹资源面临严重破坏或消失威胁。根据本轮调查评价结果,海岸带有14处具备建设国家地质公园的条件,4处具备建设世界地质公园的条件。

建议加强对湿地、地质遗迹等生态资源的红线保护,特别是环渤海、江苏、杭州湾、珠三角沿岸滩涂湿地,以及广东、广西红树林、海南珊瑚礁的保护与生态修复,实施地质遗迹抢救性保护,并将地质公园、湿地公园纳入国家公园进行统筹规划建设。

### 2.6 城市地下空间资源

海岸带54个地级以上城市大多数位于平原区和河谷盆地,其中,45个城市地表以下30 m内以松散土层为主,9个城市以坚硬岩层为主。综合评价结果表明,海岸带城镇和重要基础设施规划建设适宜区 $2.3 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,占比55.3%;较适宜区(应采取防控措施) $1.5 \times 10^5$  km<sup>2</sup>,占比35.6%;适宜性较差和不适

表4 海岸带主要滨海湿地分布

Table 4 Distribution of major coastal wetlands in China

省市(区)	主要滨海湿地	面积/km <sup>2</sup>
辽宁省	辽河三角洲、大连湾、鸭绿江口、辽东湾湿地	7132
河北省	北戴河、滦河口、南大港、昌黎黄金海岸湿地	2319
天津市	天津沿海湿地	1043
山东省	黄河三角洲及莱州湾、胶州湾、庙岛群岛湿地	7285
江苏省	盐城滩涂、海州湾湿地	10875
上海市	崇明东滩、江南滩涂、奉贤滩涂湿地	3866
浙江省	杭州湾、乐清湾、象山湾、三门港、南麂列岛湿地	6925
福建省	福清湾、九龙江口、泉州湾、晋江口、三都湾、东山湾湿地	5756
广东省	珠江口、湛江港、广海湾、深圳湾、韩江口湿地	8151
广西	铁山港和安铺港、钦州湾、北仑河口湿地	2590
海南省	东寨港、清澜港、洋浦港、三亚、大洲岛、西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛湿地	2017
合计		57959

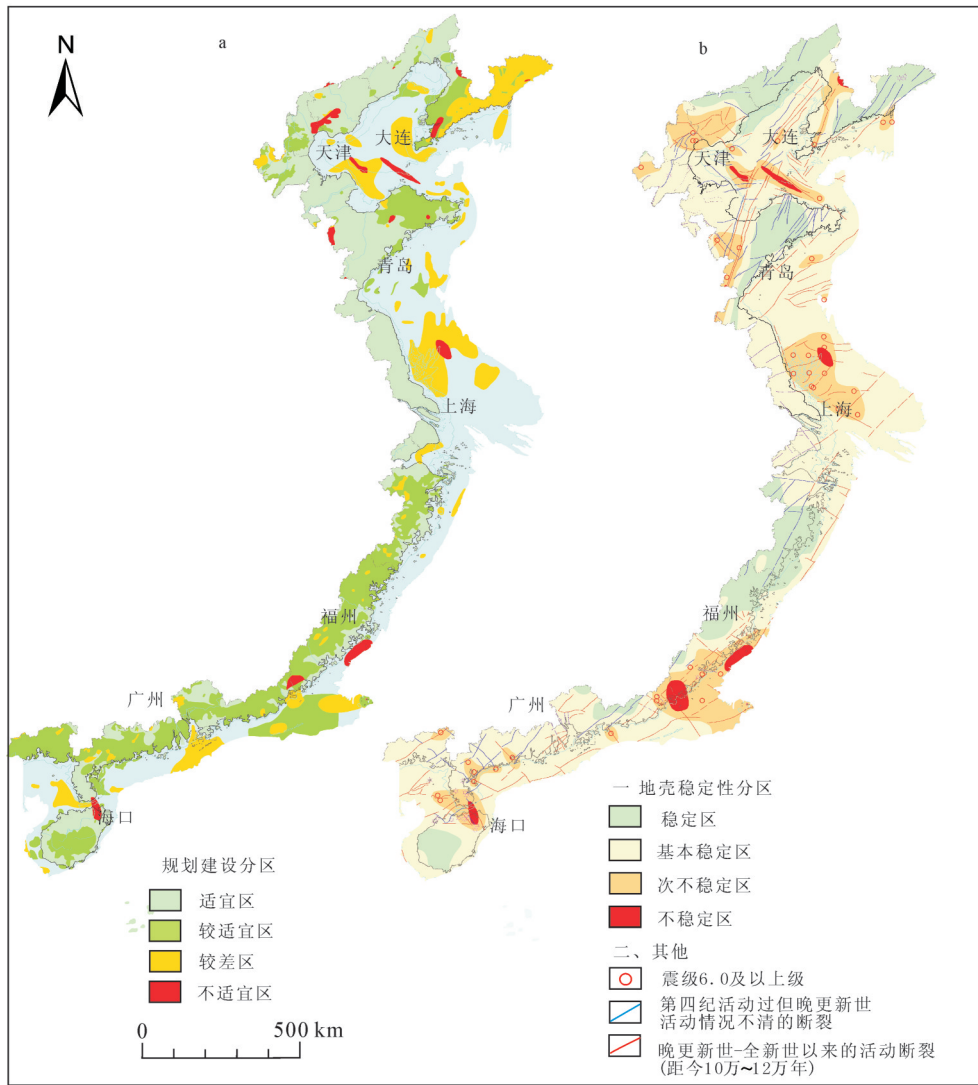


图2 海岸带城镇与重要基础设施地质适宜性(a)和海岸带地壳稳定性分区(b)

Fig.2 Assessment of geological suitability for urbanization and infrastructure construction(a)and classification of crustal stability(b)along China coastal zone

宜区  $3.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 仅占 9.1%(图 2a)。除广州市、海口市、唐山市、营口市部分地段存在制约地下空间开发利用的岩溶塌陷和活动断裂问题外,其余沿海城市地下空间开发利用地质条件较好。目前,中国沿海城市地下空间开发深度大部分小于 30 m,开发强度总体较低。其中上海市最高,达到每平方千米  $1.1 \text{ 万 m}^2$ ,另有广州、厦门、青岛、天津等 15 个城市介于  $0.1 \sim 0.3 \text{ 万 m}^2$ ,其余 38 个城市低于  $0.1 \text{ 万 m}^2$ ,具有很大地下拓展空间。建议加快开展沿海城市地质调查,因地制宜加大地下空间开发利用,提高城市土地利用集约程度。

### 3 中国海岸带地质环境问题

中国海岸带地区地质环境条件总体良好,但局部地区存在活动断裂、地面沉降、地面塌陷、海岸侵蚀淤积、风暴潮等重大地质问题,渤海湾和台湾海峡沿岸活动断裂较为发育,地壳稳定性差(刘忠亚等,2016),浙江南部、福建和广东沿海山区易发生滑坡、崩塌、泥石流灾害,津冀和长江三角洲平原区地面沉降严重,渤海湾、长三角和珠三角局部地区土壤重金属和地下水污染物含量高,海水入侵严重(高茂生等,2016),全球变化和海平面上升加剧海



岸带土地侵蚀和地下水环境问题,海岸带规划建设和生态环境保护需要对地质环境给予高度关注。

### 3.1 活动断裂和地壳稳定性问题

中国海岸带在构造上受欧亚板块、太平洋板块及印度—澳大利亚板块活动的影响,海岸带地区的活动断裂总体上以NE—NNE向和NW—NWW向两组断裂为主,与之相对应,两组断裂的交汇部位或附近多发天然地震(张培震等,2013;张克信等,2015;Tapponnier and Molnar, 1977; Zheng et al., 2013)。中国海岸带调查已发现第四纪以来活动断裂236条,以NE—NNE向断裂与NW向断裂交叉错裂为特征(图2b)。NE—NNE向断裂主要包括郟庐断裂带和华南滨海断裂带两条大型断裂带,NW向断裂主要有张家口—蓬莱断裂带、泉州—台湾断裂带和红河断裂带等。断裂交错地区天然地震发育,地壳稳定性差,其中环渤海沿岸、台湾海峡西岸和琼州海峡地区地震烈度区划7~8级,局部8~9级,地震活动水平高。例如,渤海中部地区北东向郟庐断裂带和北西向的张家口—渤海断裂带相交汇的地区,1548年以来发生过4次7级以上的地震。华南地块地震主要集中在苏鲁南黄海盆地,1484年以来年发生过1次7级和9次6级地震。东海和南海北部陆缘的闽浙地区也是有名的强震活动地带,尤其在泉州附近和汕头附近的南彭列岛、阳江和电白附近都是强震发生地带,1604年福建泉州近海发生8级地震,1600年和1918年广东南澳岛附近发生两次7级地震。在南海的其余地区,包括海南岛东南的陵水以东海域和北部湾一带,常有一些中小地震发生,1605年海南省琼山地区发生7.5级地震。

根据活动断裂、地震火山活动、地应力场、地形变场、布格重力异常、岩性特征等综合评价结果,中国海岸带地壳稳定区域面积 $1.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占比17.4%,基本稳定区面积 $6.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占比63.8%,次不稳定区面积 $1.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占比17.2%,不稳定区面积 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占比1.6%。陆域不稳定区主要分布在营口东北部、唐山—秦皇岛、福建南澳—东山、海口东北部等,海域不稳定区主要分布在渤海中部、盐城外海、莆田—泉州外海海域(图2b)。

### 3.2 地面沉降问题

造成地面沉降因素包括自然地质作用因素和人类活动因素,其中自然因素包括构造活动、软弱

土层的自重压密固结、海平面上升等,人为因素包括过量开采地下水、地下热水及油气资源、大规模工程建设等(Xue et al., 2005; Xu et al., 2008)。人为因素尤其是深层地下水超量开采是导致地面沉降的主要原因(段晓峰等,2014;胡喜梅等,2017)。华北平原目前浅层地下水开采程度为104%,深层地下水开采程度为138%,华北平原地下水整体处于超采状态,导致地下水位持续下降,随着地下水开采控制力度的加大,地下水位下降速率已明显趋缓,地面沉降趋势得到了一定程度的控制。自1921年上海市区最早发现地面沉降现象以来,至今我国沿海地区已有很多城市和地区发生不同程度的地面沉降(Hu et al., 2004; Xue et al., 2005; Higgins et al., 2013)。

根据长期监测数据,中国海岸带地区累计沉降量大于3000 mm的地区主要分布在天津,最大累计沉降量达到3450 mm;累计沉降量2000~3000 mm的地区主要分布在上海、沧州和盘锦等;累计沉降量1000~2000 mm的地区主要分布在唐山、滨州、东营、嘉兴、台州、盐城以及广州和珠海部分地区,山东滨州、江苏盐城、浙江宁波和温州地区近年来地面沉降呈加剧趋势(图3)。沿海地区发生地面沉降的城市多达32个,是广泛影响海岸带地区地质环境安全的灾害要素之一。各地政府长期以来高度重视地面沉降防治工作,特别是近10年来,从引发地面沉降的主要因素着手,制定限制、禁止开采地下水、提高地下水人工回灌量等措施,这一措施的实施,使得长江三角洲等地区地面沉降控制效果显著(李勤奋等,2006; Shen et al., 2011; 杨天亮等,2014)。

### 3.3 风暴潮灾害问题

中国的海岸带是全球风暴潮灾害影响最严重的海岸带之一,一是位于西太平洋台风主要影响范围,二是海岸河口三角洲发育,黄河、长江和珠江三角洲海岸高程低,风暴增水影响陆地范围广。另外海岸带地区快速地面沉降和大范围围海造陆,使海岸更易暴露在风暴潮灾害威胁之下。长江口以南的风暴潮灾害以夏季台风增水为主地区,长江口以北的风暴潮以秋冬的寒潮气旋影响为主(王晶等,2010; Wang et al., 2012)。1950年以来,中国沿海共有762次台风登陆,主要登陆点分布在海南至舟山岸段,长江口以北台风影响明显减弱,年平均登陆

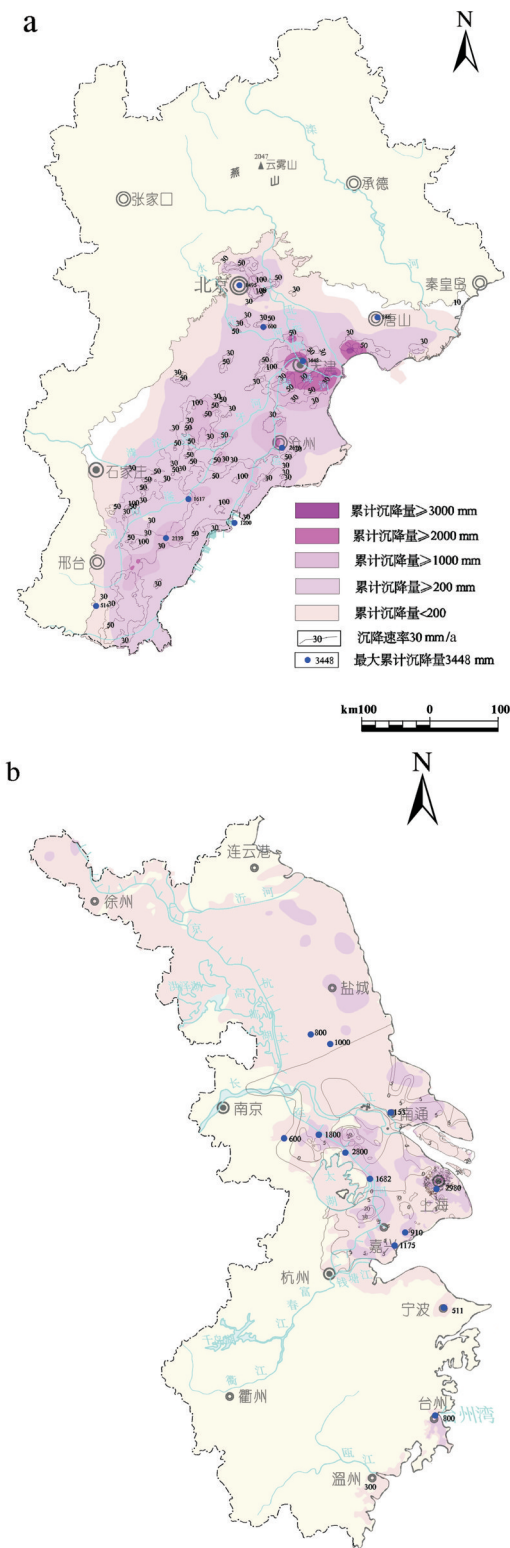


图3 京津冀(a)和长三角(b)海岸带累计地面沉降量分布图 (统计至2016年)

Fig.3 Cumulative ground subsidence in Tianjin and Hebei coastal zone(a) and the Yangtze River Delta(b) (statistics to year 2016)

频率小于1次。台风风暴潮的易发区分布在广东湛江、珠江口、福建宁德至浙江台州岸段,江苏连云港、山东潍坊、河北黄骅至天津岸段则遭受寒潮气旋风暴潮影响。渤海湾、长三角、珠三角等沿海平原区,由于地面沉降、海平面上升等因素叠加,造成沿海城市地面高程损失,局部地区甚至低于海平面,城市防洪排涝设施功能下降,加剧了风暴潮的危害(于福江等,2015)。

### 3.4 水土污染问题

2014年环保部和国土资源部联合公布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,全国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。全国土壤总的超标率为16.1%,中度和重度污染点位比例达到1.5%和1.1%。城市地下水中氮超标现象普遍,少数城市地下水出现重金属超标和微量有机物超标现象。从污染分布情况看,南方土壤污染重于北方;长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地等部分地区土壤污染问题较为突出。

海岸带多目标地球化学调查显示,中国海岸带水土环境总体良好(见本文前节),但与全国土壤污染态势相同,局部地区土壤重金属含量高、地下水污染等问题较为突出,近岸海域环境污染问题不容乐观(Qu et al., 2010; 张宗祜等, 2004; 吕剑等, 2016)。在海岸带陆域采集的101653组土壤地球化学样品分析结果中,1%的样品土壤重金属含量高,8.8%的样品土壤重金属含量中等,90.2%的样品土壤重金属含量低。重金属含量高值区主要分布在经济比较发达的沿海城市,从南向北依次为海口、珠海、广州、福州、宁波、上海、天津、葫芦岛和锦州等。采集的4124组地下水样品分析结果表明,14.9%样品存在氮污染,6.2%样品存在重金属污染,3.3%样品存在有毒有害有机污染物。

海域表层沉积物的单一重金属元素含量总体水平较低,但多种重金属含量综合评价表明,近岸海域沉积物环境质量不容乐观(Duan and Li, 2017),近岸海域48608组海底沉积物地球化学样品分析结果显示,0.7%的样品重金属含量高,主要集中在珠江口以及辽宁葫芦岛近岸海域;20.7%的样

品重金属含量中等,集中分布在渤海湾西部、山东半岛北部、长江三角洲、浙闽沿岸和珠江三角洲近岸海域。

部分近岸海域海水污染问题严重(Li and Duan, 2015)。根据国家海洋局《2016年中国海洋环境质量公报》统计结果,2016年春季,近岸海域劣于第四类海水水质标准的海域面积最高达 $5.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占近岸海域面积的17%,严重污染区域主要分布在辽东湾、渤海湾、莱州湾、江苏沿岸、长江口、杭州湾、浙江沿岸、珠江口等近岸区域;主要污染物为无机氮、活性磷酸盐和石油类。面积在 $100 \text{ km}^2$ 以上的44个大中型海湾中,17个海湾全年四季均出现劣四类海水水质。海洋环境风险仍然突出,全年共发现赤潮68次,累计面积约 $7484 \text{ km}^2$ ,东海为赤潮高发海域,黄海海域浒苔绿潮分布面积达 $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

水土污染防控和修复是海岸带生态文明建设的保证,由于污染物的累积效应和环境修复技术难度大、周期长,海岸带环境保护和整治任务紧迫,建议控制海岸带重化工企业规模,加强工业企业污染物排放和农业面源污染控制,强化陆海统筹水土污染综合防治,修复治理严重污染区,实施流域环境和近岸海域综合治理。

## 4 中国海岸带地质环境评价结果和建议

### 4.1 部分海岸带城市地质环境评价结果与建议

根据地壳稳定性、活动断裂、地面沉降、地面塌陷等地质因素,本文对中国沿海54个城市进行了地质环境条件评价。结果表明,唐山、营口、海口等3个城市位于地壳不稳定区,地质安全条件差。唐山主要受宁河—昌黎等活动断裂影响,南部和东部存在地面塌陷高易发区;营口主要受盖县、大洋河等活动断裂影响;海口主要受王五—文教、铺前一马袅、铺前一清澜等活动断裂影响。13个城市地质环境条件中等,其中,天津、漳州、潮州、潍坊、泉州、厦门、汕头、阳江和湛江位于地壳次不稳定区,沧州、天津存在地面沉降速率大于 $30 \text{ mm/a}$ 的地区,中山、江门、湛江存在软土变形大于 $30 \text{ mm/a}$ 的地区,广州存在地面塌陷中易发区。其余城市规划区地质环境条件较好(表5,图2a)。

根据城市地质环境评价结果,建议沿海各地市

根据地质适宜性合理规划城市功能区布局,其中唐山、营口、海口新区规划建设时应避开活动断裂,严格控制唐山东部和南部岩溶塌陷高易发区建设规模。沿海风暴潮危害较大城市的防洪排涝设施,要考虑地面沉降等地质因素造成的地面高程损失,并应综合考虑现有地面高程、地面沉降速率、海平面上升速率、极端风暴潮增水等因素,科学设置防海堤设防标准。

### 4.2 海岸带重大工程地质环境评价结果与建议

海岸带地区社会经济发达,港口、核电、石化、交通等重大工程项目密集、投入大、安全性要求高,对地质环境信息的需求强烈。近年来,中国地质调查局为支撑沿海地区的重大工程建设,开展了一系列的专题调查。本文在整理各专项调查成果的基础上,针对核电、铁路和跨海通道等各类工程的特点和环境要求,开展综合地质环境评价。

一是根据地壳稳定性、活动断裂、取排水条件和风暴潮危害等因素,综合评价海岸核电站规划建设的地质环境条件。评价结果显示,36%的岸段地质环境条件好,主要分布在丹东—大连、葫芦岛—秦皇岛、山东半岛东部、象山—台州、瑞安—连江、海南岛西岸、钦州—防城港岸段;25%的岸段地质环境条件中等;39%的岸段地质环境条件差,主要分布在辽宁盖州—锦州、滦河口—潍坊、烟台—威海、胶州湾、连云港—宁波、莆田—汕头、香港—珠海、琼州海峡两岸、海南岛南部岸段。建议核电站选址规划应强化地质环境安全评价,加强活动断裂和地壳稳定性探测,提高地质环境和设防等级,降低地质安全隐患。

二是评价结果显示,沿海高铁部分线路穿越地壳不稳定区和次不稳定区。其中,240 km线路穿越活动断裂分布区,重要分布在盘营高铁(海城段)、津秦高铁(滦南—宁河段)、杭深高铁(梅州—潮州段)、海南环岛铁路(定安—海口段);360 km的沿海高铁路线穿越年沉降量大于 $30 \text{ mm}$ 的严重地面沉降区,主要分布在辽东湾、唐山沿海、渤海湾西岸、莱州湾、珠三角等地面沉降区;75 km穿过地面塌陷严重区,主要分布在大连市北部、秦皇岛双望镇至唐山市区东南部和莱州市北部等地区。建议沿海高铁规划建设时应应对活动断裂采取避让措施,无法避让时,应采取控制和适应变形的综合防治手段;

表5 海岸带部分城市规划区地质安全评价结果

Table 5 Assessment results of geological safety for urban development among selected cities on China coastal zone

地市	地壳稳定性	活动断裂分布	地面沉降速率/(mm/a)	地面塌陷	地质安全评价结果
营口	不稳定	盖县断裂、大洋河断裂	<30	无	差
唐山	不稳定	唐山断裂、丰台—野鸡坨断裂、宁河—昌黎断裂、卢龙—滦县断裂	<30	高易发	差
沧州	次不稳定	沧东断裂、埕西断裂	大部<30、南部>30	无	中等
天津	次不稳定—不稳定	大寺断裂、海河断裂、沧东断裂、蓟运河断裂、天津断裂、天津南断裂、宜兴埠断裂	大部<30、东部>30	无	中等
潍坊	次不稳定	KL3 断裂、因轳—葛沟、沂水—汤头、安丘—莒县、昌邑—大店、双山—李家庄断裂	<30	无	中等
泉州	次不稳定	晋江下游断裂带、长乐—东山前梧断裂	无	无	中等
厦门	次不稳定	平潭青峰—东山澳角断裂、长乐—东山前梧断裂	无	无	中等
漳州	次不稳定—不稳定	长乐—诏安断裂带、九龙江下游断裂、黄冈水断裂带	无	无	中等
潮州	次不稳定—不稳定	诏安盆地东侧断裂、榕江断裂	<30	无	中等
汕头	次不稳定	丰顺—汕头断裂带(练江断裂)	<30	无	中等
广州	基本稳定	广州—从化断裂、无棣—益都断裂、罗浮山—瘦狗岭断裂	<30	中易发	中等
中山	基本稳定	北江断裂、五桂山北麓断裂	大部<30、西部>30	无	中等
江门	基本稳定		大部>30、西南局部<30	无	中等
阳江	次不稳定	开平—阳江断裂带	无	无	中等
湛江	次不稳定	遂溪断裂	>30	无	中等
海口	不稳定	王五一文教断裂、铺前一马袅断裂、铺前一清澜断裂	<30	无	差

将严重地面沉降区划定为地下水开采控制区,进一步查明高铁沿线地面塌陷分布,建立高铁沿线地质灾害监测预警系统。

三是沿海大型桥隧工程部分位于地壳不稳定区和地壳次不稳定区。其中,渤海海峡跨海通道规划线路中砣矶岛—长山岛段位于地壳不稳定区,受蓬莱—威海断裂斜交和渤海地震影响;大钦岛—砣矶岛、长山岛—蓬莱市区段位于次不稳定区,分别受砣矶岛北断裂和长岛—芝罘岛断裂斜交影响。琼州海峡跨海通道规划线路穿越地壳次不稳定区,受到铺前一马袅断裂、长流—仙沟断裂斜交影响。台湾海峡跨海通道规划线路(西线)穿越地壳次不稳定区,受滨海活动断裂和台湾地区地震影响明显。建议加强渤海海峡、琼州海峡、台湾海峡跨海通道拟选线路的综合地质勘查,强化活动断裂、软弱岩体探测和地应力测量。

重大工程地质环境安全调查评价是全球地质科技工作者面临的严峻挑战,加强工程规划区区域

地质环境认识,深入开展工程地质环境调查,实施地质环境监测、安全风险评估和模拟实验是保障重大工程安全的基石。日本为保障高地震烈度区的工程建设,开展长期的地震动态监测,提高基础地质调查程度,开展覆盖全国的地质综合编图和对比研究,实施陆海无缝连接的海岸带调查,填补调查空白,并提高工程地震防护和安全标准,确保工程安全。荷兰开展以大三角洲工程为代表的海岸带防护工程建设,未雨绸缪,设计之初就将海岸带防护设为千年一遇标准,同时开展长期、连续的海岸监测和养护,应对全球变化、海平面上升和极端气候事件。美国则建立全球地震、海啸、海洋环流、气候变化监测网,开展地球系统模拟,并实施海岸变化等精细调查和监测工作,保障海岸带工程和城市安全。但日本福岛核电站和美国新奥尔良洪水事件等,说明地质工作保障重大工程安全依然任重道远,建议大力加强科技创新,提高区域基础地质和重大地质问题研究水平,实施海岸带工程地质调查

和地质环境评价,建立海岸带环境和地质灾害监测体系,加强地质信息整合,提高成果服务能力。

## 5 结 论

总体来看,中国海岸带地理区位优势明显,地势低平和缓,90%以上的区域属城镇和重要基础设施规划建设地质适宜区,多数城市地下空间地质条件良好。海岸带滩涂、深水岸线、湿地、地热、地质遗迹等地质资源丰富,具有很大的开发潜力,大部分区域土地质量优良,为海岸带绿色发展提供了较优越的地质资源环境条件。

不容忽视的是海岸带局部地区存在活动断裂、地面沉降、地面塌陷、海岸侵蚀淤积、风暴潮、水土污染等重大地质问题。随着海岸带城镇化程度提高,重大工程和基础设施建设加快,海岸带地质环境问题更为突出,围填海等开发活动造成的滨海湿地生态退化等问题亟需高度关注。

加强海岸带地质工作是支撑海洋强国战略,合理开发利用海岸带资源,科学保护生态环境的基础,建议围绕支撑沿海生态文明建设,聚焦沿海城市群发展、重大工程建设、新型资源开发利用、生态环境保护、减灾防灾和应对全球气候变化,加快开展海岸带综合地质调查,构建海岸带地质调查评价技术方法与科技创新体系,重点开展城市地质调查、工程地质调查、地质资源调查、重大地质问题调查和水土环境质量调查工作,建设地质环境监测预警平台和资源环境信息服务平台,提升地质工作服务经济社会发展能力和水平。同时,探索中央和地方公益性地质工作结合、地质调查和科技创新融合、多专业协同联动工作机制,创新后工业时代海岸带地质工作体系。

**感谢:**中国国土资源航空物探遥感中心、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、中国地质环境监测院、水文地质环境地质调查中心、水文地质环境地质研究所、地质力学研究所、矿产资源研究所、南京地质调查中心、武汉地质调查中心、沈阳地质调查中心、广州海洋地质调查局、中国土地勘测规划院等单位,以及沿海11省(区、市)国土资源厅(局)、地质矿产勘查开发局、地质调查院、地质环境监测总站为本文提供了基础资料。参加研究人员还有彭华、马秀敏、李振、周国华、毕世普、孙

彬彬、荆继红、孙继朝、蔺文静、王贵玲、梁继运、董颖、黄卓、李燕南、赵长荣、施佩歆、程国明、王海刚、王云龙、窦衍光、刘健、徐刚、董贺平、叶思源和丁喜桂等,在此一并表示衷心感谢。

## References

- Burak S, Dogan E, Gazioglu C. 2004. Impact of urbanization and tourism on coastal environment [J]. *Ocean & Coastal Management*, 47(9): 515–527.
- China Geological Survey, 2016. 100 Major Achievement of Chinese Geological Survey [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Cicin-Sain B, Knecht R W, Jang D, Fisk G W. 1998. Integrated Coastal and Ocean Management: Concepts and Practices [M]. Island Press.
- Clark J R. 2009. Coastal Seas: The Conservation Challenge [M]. John Wiley & Sons.
- Clark J C, Brabb E E. 1997. Geology of Point Reyes National Seashore and vicinity, California—A digital database [R]. USGS Open-File Report 97-456, scale 1:48000, <http://pubs.usgs.gov/of/1997/of97-456>.
- Duan X, Li Y. 2017. Distributions and sources of heavy metals in sediments of the Bohai Sea, China: A review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017:1–12.
- Duan Xiaofeng, Xu Xuegong, Wang Ruobai. 2014. Land subsidence and its influencing factors in Tianjin coastal area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50(6):1071–1076 (in Chinese with English abstract).
- Gao Maosheng, Luo Yongming. 2016. Change of Groundwater Resource and Prevention and Control of Seawater Intrusion in Coastal Zone [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 31(10): 1197–1203 (in Chinese with English abstract).
- Hapke C J, Reid D, Richmond B B, Ruggiero P, List J. 2006. National Assessment of Shoreline Change, Part 3—Historical Shoreline Change and Associated Coastal Land Loss along Sandy Shorelines of the California coast [R]. USGS Open-File Report 2006-1219, 72., available at <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1219/>.
- Hu R L, Yue Z Q, Wang L C, Wang S J. 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China [J]. *Engineering Geology*, 76(1): 65–77.
- Higgins S, Overeem I, Tanaka A, Syvitski J P. 2013. Land subsidence at aquaculture facilities in the Yellow River delta, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 40(15): 3898–3902.
- Hu Ximei, Ma Chuanming, Deng Bo, Zhang Jingjing. 2017. Risk evaluation of land subsidence in coastal areas of Jiangsu Province [J]. *Geological Science & Technology Information*, 36(2): 222–228 (in Chinese with English abstract).
- Johnson S Y, Dartnell P, Golden N E, Hartwell S R, Greene H G.,

- Erdey M D, Cochrane G R, Watt J T, Kvitek R G, Manson M W, Endris C A, Dieter B E, Krigsman L M, Sliter R W, Lowe E N, Chin J L. (Johnson S Y, Cochran S A, eds.). 2015. California State Waters Map Series—Offshore of Tomales Point, California [R]. USGS Open—File Report 2015—1088, pamphlet 38 p., 10 sheets, scale 1:24,000, <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20151088>.
- Kay R, Alder J. 1999. Coastal Management and Planning [M]. E & FN SPON. New York.
- Ketchum, B. H. 1972. The Water's Edge: Critical Problems of the Coastal Zone [M]. MIT Press.
- Li Qinfen, Wang Hanmei. 2006. Study of land subsidence in Shanghai [J]. Geological Journal of China Universities, 12(2): 169–178. (in Chinese)
- Li Y, Duan X. 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of China Sea [J]. Environmental Science and Pollution Research, 22(20): 15432–15442.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China [J]. Geology in China, 40(1): 312–321.
- Liu Kai, Liao Shunbo, Zhang Sai. 2008. Spatial distribution of earthquake frequency and seismic intensity in China [J]. Progress in Geography, 27(3): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhongya, Peng Xuanming, Zhao Tiehu, Sun Jun. 2016. The distribution and activities of active faults in the Bohai strait and its adjacent areas [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 36(1): 87–97 (in Chinese with English abstract).
- Luo Feng, Song Xiaochun, Chang Man, Mao Shifeng, Zhang Yiyi. 2017. Needs and restricting factors for development and utilization of tidal flat resources [J]. Journal of economics of water resources, 35(1):1–3 (in Chinese with English abstract).
- Lv Jian, Luo Yongming, Zhang Haibo. 2016. Coastal zone pollution and its prevention and treatment measures in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 31(10):1175–1181 (in Chinese with English abstract)
- Matsumoto, D. 2013. 1:200,000 Marine geological map along the coastal zone around Fukuoka with explanatory notes [R]//Seamless Geoinformation of Coastal Zone, “Coastal Zone Around Fukuoka”, Digital Geological Map S-3, Geological Survey of Japan, AIST.
- Mo Jie, Wang Wenhai, Peng Nana, Xu Chengde, Zhang Deyu. 2017. New progresses on marine geological survey—research in China [J]. Geological Survey of China, 4(4): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Qu J H, Fan M H. 2010. The current state of water quality and technology development for water pollution control in China [J]. Critical Reviews in Environmental Science & Technology, 40(6): 519–560.
- Shen S L, Xu Y S. 2011. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai [J]. Canadian Geotechnical Journal, 48(9): 1378–1392.
- Sun Baisun, Zuo Shuhua, Xie Hualiang, Li Huaiyuan, Yang Zhiwen. 2017. Analysis of impact effects and changes of the coastline in the Bohai bay during the past 40 years [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), (4):139–148 (in Chinese with English abstract) .
- State Oceanic Administration, 2016. China Marine Environmental Quality Bulletin [R]. Beijing: State Oceanic Administration (in Chinese) .
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics in China [J]. Journal of Geophysical Research, 82(20): 2905–2930.
- Van der Meulen M J, Doornenbal J C, Gunnink J L, Stafleu J, Schokker J, Vernes, R W, Bakker M A J. 2013. 3D geology in a 2D country: Perspectives for geological surveying in the Netherlands [J]. Netherlands Journal of Geosciences, 92(4): 217–241.
- Wang Guiling, Lin Wenjing, Zhang Wei. 2012. Evaluation on Utilization potential of shallow geothermal energy in major cities of China [J]. Building Science, 28(10): 1–3+8. (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Gao W, Xu S, Yu L. 2012. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China [J]. Climatic Change, 115(3/4): 537–558.
- Wang Jing, Lu Mei, Ding Jun. 2010. Spatial and temporal distribution of typhoon storm surge in coastal Zhejiang province [J]. Marine Forecasts, 27(3):16–22 (in Chinese).
- Xie Z, Xu X, Yan L. 2010. Analyzing qualitative and quantitative changes in coastal wetland associated to the effects of natural and anthropogenic factors in a part of Tianjin, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 86(3):379–386.
- Xue Y Q, Zhang Y, Ye S J, Wu J C, Li Q F. 2005. Land subsidence in China [J]. Environmental Geology, 2005, 48(6): 713–720.
- Xu Changxin, Shi Changfeng. 2010. Study on assessment evaluation index system of coastline resources [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 12(3): 55–58 (in Chinese).
- Xu Y S, Shen S L, Cai Z Y, Zhou, G. Y. 2008. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China [J]. Natural Hazards, 45(1):123–135.
- Xu Lianghui, Li Jialin, Li Weifang, Zhao Si, Yuan Qixiang, Wang Mingyue, Yang Lei, Lu Xuezh. 2014. Progress in impact of Human activities on coastal resource and environment [J]. Journal of Nanjing Normal University, 37(03): 124–131 (in Chinese with English abstract).
- Xu DongXia, Zhang GuangXin. 2007. Impact of human activities on coastal wetlands in China [J]. Wetland Science, 5(3): 282–288 (in Chinese with English abstract).
- Yu Fujiang, Dong Jianxi, Ye Lin. 2015. Collection of storm surge disasters historical data in China [M]. Beijing: Ocean Press (In Chinese).

- Yang Tianliang, Wang Hanmei, Jiao Xun. 2014. Methods of partition control on land subsidence prevention in Shanghai[J]. Shanghai Land & Resources, 4:105-109 (in Chinese).
- Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, Xiao Qinghui, Xu Yadong, Zhang Zhiyong, Li Jintie. 2015. New division of tectonic-strata superregion in China [J]. Earth Science, 40(2):206-233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Deng Qingdong, Zhang Zhuqi, Li Haibing. 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. Scientia Sinica Terrae, 43(10):1607-1620 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xunhua, Lu Jing, Yin Ping, Liu Jian. 2011. Challenges and missions of coastal geological investigation in china. Marine Geology Frontiers. [J]. Marine Geology Frontiers, 27(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. Introduction to tectonics of China [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4):1189-1206.
- Zhang Xiaohao, Huang Huamei, Wang Ping, Chen Mianrun, Wang Jinhua, Sun Qingyang. 2016. Change analysis of coastline and sea reclamation in Pearl River Estuary from 1973 to 2015 [J]. Transactions of Oceanology & Limnology, 5:9-15(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaolong, Li Peiyong, Li Ping, Xu Xingyong. 2005. Present conditions and prospects of study on coastal Wetlands in China [J]. Advance in Marine Science, 23(1): 87-95. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zonghu. 2005. Environmental geology and geological hazard. Quaternary Science, 25(1), 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Ping, Li Yun, Zhao Shuhe, Zhou Xin, Teng Houfeng, Chen Hao. 2012. Landscape changes of Jiangsu Yancheng coastal wetlands and their driving forces since 1976 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(1):101-108(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 段晓峰, 许学工, 王若柏. 2014. 天津沿海地区地面沉降及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 50(6):1071-1076.
- 高茂生, 骆永明. 2016. 我国重点海岸带地下水资源问题与海水入侵防控[J]. 中国科学院院刊, 31(10):1197-1203.
- 国家海洋局. 2016. 中国海洋环境质量公报[R]. 北京: 国家海洋局.
- 胡喜梅, 马传明, 邓波, 张晶晶. 2017. 江苏省沿海地区地面沉降风险评价[J]. 地质科技情报, 36(02):222-228.
- 李勤奋, 王寒梅. 2006. 上海地面沉降研究[J]. 高校地质学报, 12(2):169-178.
- 蒯文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312-321.
- 刘凯, 廖顺宝, 张赛. 2008. 中国地震发生频率与烈度的空间分布[J]. 地理科学进展, 27(3): 13-18.
- 刘忠亚, 彭轩明, 赵铁虎, 孙军. 2016. 渤海海峡及邻区活动断裂分布及其活动特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(1): 87-97.
- 罗锋, 宋晓村, 常曼, 冒士凤, 张一乙, 邱宇. 2017. 沿海滩涂资源围垦开发利用需求与制约因素[J]. 水利经济, 35(1):1-3.
- 吕剑, 骆永明, 章海波. 2016. 中国海岸带污染问题与防治措施[J]. 中国科学院院刊, 31(10):1175-1181.
- 莫杰, 王文海, 彭娜娜, 徐承德, 张德玉. 2017. 我国海洋地质调查研究新进展[J]. 中国地质调查, 4(4): 1-8.
- 孙百顺, 左书华, 谢华亮, 李怀远, 阳志文. 2017. 近40年来渤海湾岸线变化及影响分析[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2017(4):139-148.
- 王贵玲, 蒯文静, 张薇. 2012. 我国主要城市浅层地温能利用潜力评价[J]. 建筑科学, 2012(10):1-3+8.
- 王晶, 卢美, 丁骏. 2010. 浙江沿海台风风暴潮时空分布特征分析[J]. 海洋预报, 27(3):16-22.
- 许长新, 石常峰. 2010. 港口岸线资源价值评估指标体系研究[J]. 河海大学学报:哲学社会科学版, 12(3): 55-58.
- 徐东霞, 章光新. 2007. 人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策[J]. 湿地科学, 5(3): 282-288.
- 徐凉慧, 李加林, 李伟芳, 赵斯, 袁麒麟, 王明月, 杨磊, 卢雪珠. 2014. 人类活动对海岸带资源环境的影响研究综述[J]. 南京师大学报(自然科学版), 37(03):124-131.
- 杨天亮, 王寒梅, 焦珣. 2014. 上海地面沉降防治分区管控方法研究 [J]. 上海国土资源, 2014(4):105-109.
- 于福江, 董剑希, 叶琳. 2015. 中国风暴潮灾害史料集[M]. 北京: 中国海洋出版社.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 肖庆辉, 徐亚东, 张智勇, 李锦轶. 2015. 中国构造-地层大区划分新方案[J]. 地球科学, 40(2):206-233.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 李海兵. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学, 43(10):1607-1620.
- 张晓浩, 黄华梅, 王平, 陈绵润, 王金华, 孙庆杨. 2016. 1973—2015年珠江口海域岸线和围填海变化分析[J]. 海洋湖沼通报, 5:9-15.
- 张晓龙, 李培英, 李萍, 徐兴永. 2005. 中国滨海湿地研究现状与展望[J]. 海洋科学进展, 23(1): 87-95.
- 张宗祜. 2005. 环境地质与地质灾害[J]. 第四纪研究, 25(1): 1-5.
- 张训华, 鲁静, 印萍, 刘健. 2011. 我国海岸带地质工作面临的形势与任务[J]. 海洋地质动态, 27(1): 1-7.
- 中国地质调查局. 2016. 中国地质调查百项成果[M]. 北京: 地质出版社.
- 左平, 李云, 赵书河, 周鑫, 滕厚锋, 陈浩. 2012. 1976年以来江苏盐城滨海湿地景观变化及驱动力分析[J]. 海洋学报, 34(1):101-108.