

杭州湾滨海湿地生态系统服务价值变化

李楠^{1,2,3}, 李龙伟², 张银龙¹, 陆灯盛², 吴明⁴

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 密歇根州立大学 全球变化及对地观测中心, 美国 密歇根 东兰辛 48823; 4. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要: 湿地生态服务价值评估是生态学的研究热点之一。为科学评估杭州湾滨海湿地生态服务功能价值及变化特点, 构建湿地生态系统评价体系, 基于遥感数据和社会统计数据, 结合生态学和经济学方法, 对2000, 2005, 2010和2015年杭州湾滨海湿地生态系统的供给、调节、支持、文化服务4大类12个子类服务功能, 采用市场价值法、影子工程法、替代成本法、造林成本法等方法进行了价值评估。结果表明: 杭州湾滨海湿地生态服务总价值呈递减趋势, 分别为413.01, 261.25, 259.52和224.30亿元, 调节服务是其主要服务类型, 占总服务价值的60.00%以上; 气候调节、水质净化、保持土壤是杭州湾滨海湿地生态系统的核心功能, 三者占到服务价值的80%以上。分析表明, 城市建设、过度围垦是造成湿地面积减少, 生态系统价值降低的主要驱动因素。通过对杭州湾滨海湿地服务功能价值的动态变化及定量化评估, 建议以其为指导, 为杭州湾滨海湿地现有资源的生态保护提供科学依据。表13参40

关键词: 湿地生态学; 杭州湾; 滨海湿地; 生态系统服务; 价值评估

中图分类号: S759.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)01-0118-12

Changes of ecosystem services value of Hangzhou Bay Coastal Wetland

LI Nan^{1,2,3}, LI Longwei², ZHANG Yinlong¹, LU Dengsheng², WU Ming⁴

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Center for Global Change and Earth Observations, Michigan State University, East Lansing 48823, Michigan, USA; 4. Institute of Subtropical Forestry Research, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311499, Zhejiang, China)

Abstract: Wetland ecosystems have important ecological functions such as storing flooding waters, protecting shorelines, adjusting climate, and providing habitats for fish and wildlife. Evaluation on service value of wetlands ecosystems is a hot research topic in ecology. Hangzhou Bay, as a typical coastal wetland in China, was selected as a case for this research. In order to scientifically evaluate the value and change characteristics of Hangzhou Bay coastal wetland ecosystem services, a wetland ecosystem assessment system was constructed. The ecosystem services were divided into four main categories, namely, provision, regulating, supporting and cultural services. The above four categories were further subdivided into 12 subcategories. Based on the remote sensing data and social statistics data, combined with ecological and economic methods, ecosystem services were analyzed. The results showed that the total value of ecosystem services for Hangzhou Bay coastal wetland in 2000,

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-03-27

基金项目: 浙江省省院林业科技项目(2015SY01; 2018SY03); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ19D010010); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0819); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 南京林业大学博士学位论文创新基金资助项目

作者简介: 李楠, 从事湿地生态学研究。E-mail: linan_njfu@163.com。通信作者: 张银龙, 教授, 博士, 从事生态学研究。E-mail: ecoenvylz@163.com

2005, 2010 and 2015 was 413.01×10^8 , 261.25×10^8 , 259.52×10^8 , and 224.30×10^8 RMB respectively, showing a decreasing trend. The main service category of Hangzhou Bay coastal wetland was the regulating service, the value of which accounting for more than 60.00 per cent of the total ecosystem service value. The main functions of Hangzhou Bay coastal wetland were climate regulation, water purification and soil conservation, the values of which accounting for more than 80 per cent of the total ecosystem service value. Over-reclamation and urban construction reduced wetland area, resulting in the decreasing ecosystem values. This study quantitatively evaluated the service value of Hangzhou Bay coastal wetland between 2000 and 2015. It is suggested that the study should be taken as a guide to strengthen the ecological protection of the existing resources of Hangzhou Bay coastal wetland. [Ch, 13 tab. 40 ref.]

Key words: wetland ecology; Hangzhou Bay; coastal wetland; ecosystem service; service value evaluation

滨海湿地是位于陆地和海洋之间的过渡地带, 具有复杂的生态系统^[1], 在保护海岸线、控制侵蚀及净化污水等方面具有重要作用, 是最具有保护价值的湿地生态系统之一, 对维持区域生态平衡具有重要意义^[2-3]。近年来, 有许多学者对滨海湿地生态价值进行了研究, 相关结果凸显了湿地生态功能的作用和巨大经济价值^[4-7]。王斌等^[8]评估 2008 年浙江省滨海湿地服务功能价值为 210.38 亿元; 王磊等^[9]评估 2010 年江苏滨海湿地生态系统服务功能价值为 1 202.06 亿元; 高常军等^[10]评估 2013 年广东省滨海湿地生态系统服务价值为 664.07 亿元; 丁小迪等^[11]评估 2013 年山东省滨海湿地的生态价值为 3 303.02 亿元。杭州湾滨海湿地位于中国滨海湿地的南北分界线上, 是典型的淤泥质滨海湿地, 是东亚—澳大利亚候鸟迁徙路线中的重要驿站。然而近年来区域经济发展迅速, 人口数量增加, 当地对杭州湾滨海湿地的开发利用强度加大, 使其生态系统服务功能退化, 一定程度上破坏了区域生态平衡。有学者开展了杭州湾滨海湿地生态系统服务功能定量评价研究^[12-14], 但针对生态服务价值动态变化的研究较少。对滨海湿地生态系统服务价值的动态变化进行定量评估, 有助于人们直观认识滨海湿地生态系统服务功能的重要性, 对分析滨海湿地生态系统的演化过程, 分析人类活动对生态系统的影响有重要意义。本研究以遥感数据为基础, 结合生态学和经济学方法, 对杭州湾滨海湿地生态系统的供给、调节、支持、文化服务进行价值评估, 分析 2000–2015 年间杭州湾滨海湿地的生态服务价值变化, 对进一步认识杭州湾滨海湿地生态系统, 促进可持续发展具有重要意义。

1 研究区概况

杭州湾位于浙江省的东北部, 是钱塘江入海形成的喇叭状河口湾, 是世界著名的强潮河口湾。杭州湾滨海湿地位于杭州湾南岸滩涂淤涨最快的区段。本研究选择慈溪市行政区为研究区($121^{\circ}04' \sim 121^{\circ}39'E$, $30^{\circ}04' \sim 30^{\circ}31'N$)。该地属于亚热带海洋季风气候, 四季分明, 年平均气温为 $16.0^{\circ}C$, 多年平均降水量为 1 273 mm, 年均日照时数约 2 038.0 h, 无霜期为 244.0 d。2015 年慈溪总人口为 104.71 万人, 人均生产总值 110 327 元。

2 研究方法

2.1 数据来源

主要数据源包括多源遥感数据、湿地监测数据、地理辅助数据及社会经济统计数据。遥感数据包括 2000, 2005, 2010 和 2015 年共 4 期 Landsat TM/OLI 影像。遥感数据来源于网站 <https://glovis.usgs.gov/>, 轨道编号为 118/39。运用 ENVI 5.3 软件对遥感数据进行辐射定标、大气校正、剪裁等预处理, 采用决策树方法, 将杭州湾滨海湿地划分为浅海, 滩涂, 海三棱藨草 *Scirpus mariqueter*, 互花米草 *Spartina alterniflora*, 淡水草本沼泽, 水体, 养殖塘, 水田, 旱田, 不透水地表, 森林, 裸地和盐田共 13 类, 得到 4 期土地覆被分类结果。结合野外实地考察资料, 基于混淆矩阵方法对遥感影像分类结果进行精度检验, 湿地分类的总精度达到 85% 以上。湿地监测数据包括杭州湾湿地生态系统定位观测研究站常年观测、研究积累的数据及实验室测定数据。地理辅助数据包括慈溪市行政区划图及土壤数据。社会统计数据包括 2000–2015 年间《宁波市统计年鉴》《宁波市水资源公报》《慈溪市统计年鉴》、国家和发展改革委员

会公布的历史价格等。此外还参考了大量文献数据。

2.2 评价指标体系的构建

参考 Millennium Ecosystem Assessment^[17]的分类方式,将该研究区生态系统服务功能划分为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务四大服务类型。通过被普遍接受的分类结果^[15-18]进行总结,参考已有研究^[19-22],结合本研究区生态系统特征、结构和生态过程等特点,将杭州湾滨海湿地的生态系统服务功能细分为 12 个功能类型(表 1)。根据杭州湾滨海湿地生态系统的生态类型、生态系统服务价值属性来源及杭州湾滨海湿地土地利用现状,建立了生态系统服务与土地利用类型的归属关系。针对研究区社会经济状况,建立了一套评价指标体系,采用市场价值法、影子工程法、替代成本法、造林成本法等评价方法对湿地生态系统各项指标进行货币价值分析(表 1)。

表 1 杭州湾滨海湿地生态系统服务价值核算表

Table 1 Evaluation methods of ecosystem services functions in Hangzhou Bay coastal wetland

服务类型	功能类型	计算公式	参数说明	评价方法
供给服务	物质生产	(1) $V_1 = \sum Q_i \times P_i$	V_1 为物质生产价值; Q_i 为第 i 类物质的总产量; P_i 为相应物质的市场单位价格	市场价值法
	供水	(2) $V_2 = C_1 \times P_1 + C_2 \times P_2 + C_3 \times P_3$	V_2 为供水水资源价值; C_1, C_2, C_3 分别是湿地提供的生活、工业、生产用水量; P_1, P_2, P_3 为相应用水的单位价格	市场价值法
调节服务	水质净化	(3) $V_3 = \sum Q_i \times P_i$	V_3 为水质净化价值; Q_i 为第 i 种污染物的排放量; P_i 为相应污染物的单位处理成本	代替成本法
	水源涵养	(4) $V_4 = V \times P$	V_4 为水源涵养价值; V 为湿地存储水资源总量; P 为修建水库单位造价成本	影子工程法
	气候调节	(5) $V_5 = \Delta T \times P_t + \Delta M \times P_m$	V_5 为气候调节价值; ΔT 为湿地降温幅度; ΔM 是湿地增湿幅度; P_t 为降温 1℃需要的费用; P_m 是增湿的单位费用	代替成本法
	固碳	(6) $V_6 = (Q_{veg} + Q_{soil}) \times P_C$	V_6 为固碳价值; Q_{veg} 为湿地植被固碳量; Q_{soil} 是湿地土壤固碳量; P_C 是国际碳税标准的平均值	碳税法
	大气调节	(7) $V_7 = Q_{O_2} \times P_{O_2} - Q_{CH_4} \times P_{CH_4}$	V_7 为大气调节价值; Q_{O_2} 为湿地释氧量; Q_{CH_4} 为湿地排放温室气体量; P_{O_2} 和 P_{CH_4} 分别是相应价格	造林成本法
	促淤造陆	(8) $V_8 = S \times P$	V_8 为促淤造陆价值; S 为湿地增加面积; P 为当地单位国土面积 $V_8 = S \times P$	市场价值法
支持服务	生物多样性	(9) $V_9 = S \times I$	V_9 为生物多样性价值; S 为湿地面积; I 为生物多样性单位价值 $V_9 = S \times I$	成果参照法
	保持土壤	(10) $V_{10} = (A_i \times B) / H + \sum (A_i \times N_j \times P_j) / R_j$	V_{10} 为保持土壤价值; A_i 为不同湿地类型的土壤保持量; B 是单位土地粮食平均产出收益; H 是全国耕地平均厚度; N_j 是不同湿地类型土壤中氮、磷、钾和有机质的含量; P_j 为化肥价格; R_j 为化肥中氮、磷、钾和有机质的含量 $V_{10} = (A_i \times B) / H + \sum (A_i \times N_j \times P_j) / R_j$	影子价格法
文化服务	旅游休闲	(11) $V_{11} = F_1 + F_2 + F_3$	V_{11} 为旅游总价值; F_1 为旅游直接收入; F_2 为旅行费用; F_3 为旅游时间价值	旅行费用法
	科研教育	(12) $V_{12} = M \times P_k$	V_{12} 为科研教育价值; M 为当年发表的与湿地相关的论文数量; P_k 为每篇论文的投入成本	

3 价值评估

3.1 物质生产价值

湿地生态系统具有较高的生产力,蕴含着丰富的动植物资源,是人类重要的物质来源。根据《宁波

市统计年鉴》，研究区内浅海水域和养殖塘提供鱼类、虾蟹类、贝类等水产品，水田可以提供水稻 *Oryza sativa*，淡水草本沼泽以芦苇 *Phragmites communis* 为主。本研究使用市场价值法对湿地生态系统物质生产价值进行评价，渔业产值(海水/淡水产品价值)和水稻产量来源于《宁波市统计年鉴》，水稻价格按照国家发展和改革委员会公布的水稻最低收购价计算，芦苇面积来自于遥感数据分类结果，产量为 $0.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[4]，计算研究区物质生产价值如表 2 所示。

表 2 研究区物质生产价值

Table 2 Valuation of material production in the study area

年份	水产品/亿元		芦苇			水稻			合计/亿元
	海水产品	淡水产品	面积/hm ²	总产量/t	总价值/亿元	总产量/t	价格/(元·t ⁻¹)	总价值/亿元	
2000	1.95	1.79	616.32	308.16	0.00	76 366	1 000	0.76	4.50
2005	4.52	2.57	2 660.31	1 330.16	0.01	38 203	1 500	0.57	7.67
2010	4.93	5.36	5 217.39	2 608.70	0.01	35 533	1 940	0.69	11.00
2015	6.29	9.02	3 525.84	1 762.92	0.01	47 613	2 760	1.31	16.63

3.2 供水价值

湿地包含众多的沼泽、河流、湖泊、水库，为人类提供可再生的淡水资源，常作为生活用水、工业用水和农业用水的水源。使用市场价值法对湿地生态系统的供水价值进行评价。生活、工业及农业用水量来自于《宁波市水资源公报》和《宁波市统计年鉴》，用水价格来源于宁波市发展改革委员会官网站发布的数据。计算研究区供水价值如表 3 所示。

表 3 研究区供水价值

Table 3 The valuation of water supply in the study area

年份	生活用水/m ³	工业用水/m ³	农业用水/m ³	供水总价值/亿元
2000	341 69 5 354	229 574 380	34 666 469	25.29
2005	367 578 420	244 455 038	21 147 330	27.05
2010	384 373 390	318 115 014	18 821 592	32.01
2015	410 446 344	329 750 271	18 892 640	33.58

说明：生活用水、工业用水和农业用水单价分别为 3.40，5.95，0.05 元·m⁻³

3.3 水质净化价值

当水体进入湿地时因水生植物的阻挡作用，缓慢的水流有利于沉积物的沉积，许多污染物质吸附在沉积物的表面，氮和磷等营养元素和有毒有害物质等经过复杂的理化过程和生物降解过程被湿地吸收、截留，使水质得到净化和改善^[23]。本研究使用费用代替法对湿地生态系统水质净化价值进行评价。研究区各类湿地面积来自于遥感数据分类结果。SHAO 等^[23]2013 的研究表明：自然滩涂每年处理污水量为 $196\,133.3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，水质由劣质五类提升到三类水。谭雪等^[24]2015 年的研究结果显示：污水厂平均治理成本为 $2.73\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ ，平均建设成本为 $1.73\text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均运行成本为 $1.03\text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，据此计算研究区水质净化价值如表 4。

3.4 水源涵养价值

湿地生态系统是巨大的生物储水库，能将多余的降水蓄积起来，并缓慢地释放，从而能够在时间和空间上对降水进行再次分配。湿地具有强大的蓄水能力，在洪涝期短时间储存大量的洪水，被储存在湿地土壤中或以地表水的形式保存着，从而能够调节径流，减少下游的洪水量^[2]。本研究将研究区水源涵养功能分为两部分：一部分为河流、湖泊等地表径流，另一部分为有植被覆盖的湿地和人工湿地。使用影子工程法对湿地生态系统的水源涵养价值进行评价。地表水资源量来自于宁波市政府的水资源公报，有植被覆盖的湿地主要是淡水草本沼泽。根据调查其最高水位取 1.0 m，养殖塘和水田的最高水位分别是 1.5 和 0.3 m。互花米草和海三棱藨草草本沼泽及地下土壤也可以涵养水源，由于其生长在堤坝外，受潮汐作用，涵养的水分为海水，计算水源涵养时暂时只考虑淡水资源。根据国家林业局发布的森林生态系统服务功能评估规范^[25]，2005 年单位水库库容造价为 $6.11\text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ ，国内生产总值平均物价指数进行平减计算 2000，2010 和 2015 年库容成本，据此计算每年水源涵养价值(表 5)。

表 4 研究区水质净化价值

Table 4 Valuation of water purification in the study area

年份	湿地类型	面积/m ²	净化污水量/t	价值/亿元	总价值/亿元
2000	淤泥质海滩	66 317 400	1 300 705 051	71.41	92.76
	海三棱藨草	11 688 300	229 246 485	12.59	
	互花米草	1 975 500	38 746 133	2.13	
	淡水草本沼泽	6 163 200	120 880 875	6.64	
2005	淤泥质海滩	29 460 600	577 820 469	31.72	69.42
	海三棱藨草	2 838 600	55 674 398	3.06	
	互花米草	5 566 500	109 177 601	5.99	
	淡水草本沼泽	26 603 100	521 775 379	28.65	
2010	淤泥质海滩	114 628 500	2 248 246 598	123.43	200.71
	海三棱藨草	6 687 000	131 154 337	7.20	
	互花米草	12 911 400	253 235 549	13.90	
	淡水草本沼泽	52 173 900	1 023 303 918	56.18	
2015	淤泥质海滩	171 963 900	3 372 784 719	185.17	257.17
	海三棱藨草	21 726 000	426 119 207	23.39	
	互花米草	9 888 300	193 942 491	10.65	
	淡水草本沼泽	35 258 400	691 534 634	37.97	

表 5 研究区水源涵养价值

Table 5 The valuation of water conservation in study area

年份	地表水资源量/亿 m ³	淡水草本沼泽面积/m ²	养殖塘面积/m ²	水田面积/m ²	当年单位库容成本/(元·m ⁻³)	总价值/亿元
2000	6.13	6 163 200	56 569 500	136 690 200	3.81	28.38
2005	5.19	26 603 100	65 774 700	105 055 200	6.11	41.29
2010	6.75	52 173 900	68 834 700	69 832 800	10.46	89.08
2015	11.53	35 258 400	83 502 900	52 173 900	15.29	203.18

3.5 气候调节价值

湿地调节气候功能包括湿地及湿地植物的水分循环和大气组分的改变调节局部地区的温度、湿度和降水状况,调节区域内的风、温度、湿度等气候要素,从而减轻干旱、风沙、冻灾、土壤沙化,防止土壤养分流失,改善土壤状况^[26]。由于湿地热容量大,水分蒸散剧烈,对区域空气有一定的降温增湿作用,继而对区域小气候产生调节作用。查阅《宁波市水资源公报》得到当年平均蒸发量(表 6),根据遥感分类结果计算当年总的蒸发量。按照水在 100 ℃和 1 标准大气压下的汽化热为 2 260.0 kJ·kg⁻¹,计算每年水分蒸发所需的总热量。蒸发降低气温按照空调的制冷消耗进行计算,空调的能效比取 3.0,耗电量约为 125.0 kW·h。湿地水面蒸发增加空气湿度的价值,以市场上较常见家用加湿器功率 32 W 来计算^[27],将 1.0 m³ 水转化为蒸汽耗电量约为 125.0 kW·h(1 kW·h=3.6×10⁶ J)。根据宁波物价局公布的当年电费标准,计算研究区气候调节价值(表 6)。

表 6 研究区气候调节价值

Table 6 Valuation of climate regulation in the study area

年份	湿地面积/m ²	平均蒸发/mm	调节温度价值/亿元	增湿价值/亿元	总价值/亿元
2000	110 146 500	820.0	106.03	21.11	127.14
2005	140 324 400	907.0	173.78	34.60	208.39
2010	161 676 900	777.3	186.98	37.23	224.21
2015	174 980 700	714.7	211.19	42.05	253.24

3.6 固碳价值

湿地植被通过光合作用吸收和固定大量的二氧化碳,湿地土壤中也含有大量的碳^[28]。根据光合作用反应式,植物生产 1.00 g 干物质会吸收 1.63 g 二氧化碳,即固定纯碳量 0.44 g。把式(6)扩展为 $V_6 = P_c \times \sum (0.44 N_i S_i + S_i C_i)$ 。其中: V_6 为湿地固碳价值(元·a⁻¹); P_c 为碳税率(元·t⁻¹); N_i 为第 i 种地类的单位面积植物净生产量(kg·m⁻²); S_i 为相应的湿地面积(m²); C_i 为单位面积碳密度(kg·m⁻²)。碳税率采用使用接

受较为广泛的瑞典碳税率价格，150.00 美元·t⁻¹，根据相应年份美元与人民币的平均汇率换算为 1 241.76(2000 年)，1 228.75(2005 年)，1 015.50(2010 年)，934.05 元·t⁻¹(2015 年)。经实验测定，湿地植被生物量依次为水田(4.11 kg·m⁻²)，淡水草本沼泽(3.73 kg·m⁻²)，互花米草(3.11 kg·m⁻²)和海三棱藨草(0.49 kg·m⁻²)，土壤单位面积碳密度依次为淡水草本沼泽(4.19 kg·m⁻²)，海三棱藨草(3.42 kg·m⁻²)，互花米草(3.06 kg·m⁻²)，水田(3.06 kg·m⁻²)和淤泥质海滩(3.03 kg·m⁻²)。据此计算每年各湿地类型的固碳价值及总价值(表 7)。

3.7 大气调节价值

湿地植被通过光合作用释放氧气，对气候具有改善作用，排放甲烷、一氧化二氮等温室气体，对气候有负面作用^[29]。气体调节功能价值为植物释放氧气价值之和减去温室气体排放的价值。利用造林成本法、市场价值法等计算湿地生态系统大气调节的功能价值。根据光合作用反应式，植物每生产 1 g 干物质会释放 1.19 g 的氧气。研究区主要温室气体排放植物为海三棱藨草、互花米草、芦苇和水稻，其温室气体甲烷排放通量分别为 0.096，1.085，0.582，1.000 mg·m⁻²·h⁻¹^[29]，一氧化二氮排放通量分别为 0.005，0.005，0.015，0.010 mg·m⁻²·h⁻¹^[13]。损失计算采用 PEARCE 等在经济合作与发展组织(OECD)中提出的甲烷和一氧化二氮的散放值(甲烷为 0.11 美元·kg⁻¹，一氧化二氮为 2.94 美元·kg⁻¹)。氧气价格采用中国卫生部官方网站公布的氧气平均价格 1 000.00 元·t⁻¹。据此计算每年各湿地类型的大气调节值及总价值(表7)。

表 7 研究区固碳价值和大气调节价值
Table 7 Valuation of carbon fixation and atmospheric regulation in the study area

年份	湿地类型	面积/m ²	植物固碳价 值/亿元	土壤固碳价 值/亿元	固碳总价值/ 亿元	植物释氧价 值/亿元	温室气体价 值/亿元	大气调节价 值/亿元
2000	淤泥质海滩	66 317 400		2.50				
	海三棱藨草	11 688 300	0.03	0.50		0.067 8	0.000 1	
	互花米草	1 975 500	0.03	0.08	11.76	0.073 0	0.000 1	6.92
	淡水草本沼泽	6 163 200	0.13	0.32		0.273 7	0.000 2	
	水田	136 690 200	2.99	5.19		6.506 5	0.004 9	
2005	淤泥质海滩	29 460 600		1.10				
	海三棱藨草	2 838 600	0.01	0.12		0.016 5	0.000 0	
	互花米草	5 566 500	0.09	0.21	8.56	0.205 7	0.000 3	6.40
	淡水草本沼泽	26 603 100	0.54	1.37		1.181 4	0.001 0	
	水田	105 055 200	2.27	3.95		5.000 6	0.003 7	
2010	淤泥质海滩	114 628 500		3.53				
	海三棱藨草	6 687 000	0.01	0.23		0.038 8	0.000 0	
	互花米草	12 911 400	0.18	0.40	10.86	0.477 2	0.000 5	6.15
	淡水草本沼泽	52 173 900	0.87	2.22		2.316 9	0.001 6	
	水田	69 832 800	1.25	2.17		3.324 0	0.002 1	
2015	淤泥质海滩	171 963 900		4.87				
	海三棱藨草	21 726 000	0.06	0.69		0.126 0	0.000 1	
	互花米草	9 888 300	0.17	0.28	10.78	0.365 5	0.000 4	4.45
	淡水草本沼泽	35 258 400	0.71	1.38		1.565 7	0.001 0	
	水田	52 173 900	1.13	1.49		2.483 5	0.001 4	

3.8 促淤造陆

杭州湾滨海湿地生长着互花米草和海三棱藨草，对动力沉积作用有着显著的影响，当海浪从盐水沼泽间穿过时，植物的摩擦作用使海浪的部分能量消耗，减轻了水流对土壤的冲刷，使水体携带的部分细颗粒泥沙沉降^[1, 30]。钱塘江携带的大量泥沙在此处堆积，不断淤积。通过对研究区的遥感影像进行分析，得到每期陆地增加面积，据此得到相应年份增加面积。根据慈溪市国土资源局官网查询当地相应年份的土地使用权转让价格，计算促淤造陆价值(表 8)。

3.9 生物多样性保护价值

湿地拥有非常丰富的动植物种类，为其栖息、繁衍提供了基地^[31-32]。杭州湾滨海湿地生物资源丰富，研究区内有高等植物 86 科 281 种，浮游植物 192 种，底栖动物 121 种，鱼类 64 属 78 种，鸟类 220 种，列入国家重点保护野生动物名录的鸟类有 19 种^[12-14]。采用生物多样性保护单位价值的平均值为 2 000.00 元·hm⁻²^[6,33]，计算研究区生物多样性保护价值依次是 0.53 亿元(2000 年)，0.62 亿元(2005 年)，0.84 亿元(2010 年)和 0.93 亿元(2015 年)。

3.10 保持土壤价值

湿地保持土壤价值包括 2 个方面：一是湿地减少土壤侵蚀价值(V_e)，二是减少土壤肥力流失的价值(V_f)。湿地的一部分营养物质会与沉积物结合在一起，随着沉积物同时沉降，许多水生维管植物生长速度很快，能够大量吸收土壤中的氮磷钾等营养元素^[34]。选取易溶于水或容易在外力作用下与土壤分离的氮磷钾等养分，采用影子价格法计算湿地生态系统的保持土壤价值。中国无林地土壤中等侵蚀模数为 200 m³·hm⁻²·a⁻¹，作为植被减少土壤侵蚀的模数^[35]，则不同湿地类型的土壤保持量=减少土壤侵蚀模数×各湿地类型的面积。全国耕地平均厚度为 0.6 m，根据统计年鉴计算该地单位土地粮食平均产出收益，计算本研究区湿地减少土壤侵蚀的价值。假设侵蚀土壤中的氮磷钾元素只来源于人们施用的化肥，其中尿素中氮质量分数为 46.67%，磷酸氢二铵中磷质量分数为 15.01%，氯化钾中钾质量分数为 52.45%，根据中国统计局查询得到当年化肥价格，计算得出湿地减少土壤肥力流失的价值(表 9)。

表 8 研究区促淤造陆价值

Table 8 Valuation of soil formation in the study area

年份	5 a 增加面积/m ²	增加面积/(m ² ·a ⁻¹)	土地使用权转让价格/(元·m ⁻²)	总价值/亿元
2000	45 360 000	9 072 000	270	24.49
2005	73 908 900	14 781 780	370	54.69
2010	76 584 600	15 316 920	460	70.46
2015	80 446 500	16 089 300	750	120.67

表 9 研究区保持土壤价值

Table 9 Valuation of soil conservation in the study area

年份	土壤保持量/m ³	单位面积收益/(万元·hm ⁻²)	土壤侵蚀价值 V_e /亿元	土壤肥力流失的价值 V_f /亿元	总价值/亿元
2000	396 540	140 373	67.49	21.90	89.39
2005	700 164	185 327	25.91	65.73	91.64
2010	14 35 446	368 942	65.45	181.62	247.07
2015	1 337 454	467 976	59.79	150.78	210.57

3.11 旅游休闲价值

湿地风景优美，景观独特，空气清新，具有一定的美学观赏价值，是人们旅游、休养的最佳场所。研究区内的杭州湾国家湿地公园地处上海、杭州、宁波、苏州等的几何中心，与上海浦东、上海虹桥、杭州萧山和宁波栎社四大国际空港间的车程均约 1.5 h。采用旅行费用法计算湿地生态系统的旅游休闲价值，包括旅游直接收入、旅行费用和旅游时间价值。旅游直接收入包括门票、宾馆收入、旅游商品收入和停车费收入，由《宁波市统计年鉴》查询得到。旅行费用包括交通费用和食宿费用，根据《宁波市统计年鉴》查找当年旅游人次及平均旅行费用，计算得到总的旅行费用。根据当年平均日收入计算得到总的旅游时间价值=每小时工资标准×旅行总小时数×40.00%。结果见表 10。

表 10 研究区旅游休闲价值

Table 10 Valuation of entertainment in the study area

年份	旅游人次/万人次	旅游直接收入/亿元	旅行费用/亿元	旅游时间价值/亿元	旅游休闲总价值/亿元
2000	134.00	10.85	1.21	0.643 20	1.85
2005	175.64	12.05	1.76	1.0538 4	14.86
2010	543.65	38.96	8.15	4.349 20	51.46
2015	881.41	76.61	17.63	10.576 92	104.82

3.12 科研教育价值

湿地生态系统的生物多样性、湿地的演化、分布、结构和功能等为人类的科研和教育工作提供了研究对象和研究地域。湿地生态系统的科研价值主要包括相关的基础科学研究、教学实习、文化宣传、影视宣传等。本研究值只计算杭州湾滨海湿地的科研费用价值，在中国知网上检索主题含有“杭州湾湿

地”的文章，在 Sciencedirect 上以 “Hangzhoubay Wetland” 为关键字进行检索，得到当年发表的相关的论文数量。中国的科研项目周期一般为 3 a，论文投入成本为 11.92 万元·篇⁻¹[38]。计算科研教育价值见表 11。

4 结果与分析

4.1 杭州湾滨海湿地生态服务功能价值

把 2005，2010 和 2015 年当期价格计算的生态服务价值换算成以 2000 年基期不变价计算的价值，对不同时期的价值进行比较，剔除价格变化的影响，反映实际变动。如表 12 所示：2000，2005，2010 和 2015 年杭州湾滨海湿地生态系统服务总价值分别为 413.01，261.25，259.50 和 224.30 亿元；单位面积生态服务价值分别为 44.45，24.27，22.50 和 18.19 万

表 11 研究区科研教育价值

Table 11 Valuation of education and research in the study area				
年份	中文论文/篇	英文论文/篇	论文总数/篇	总价值/万元
2000	1	0	1	11.92
2005	2	1	3	35.76
2010	20	4	24	286.08
2015	20	6	26	309.92

元·hm⁻²。2000–2015 年间，杭州湾滨海湿地生态系统服务功能价值呈现逐渐降低趋势。杭州湾滨海湿地按服务类型的价值比例从高到低排序为调节服务、支持服务、供给服务和文化服务，调节服务所占比例最大，占到总服务价值的 50%以上，支持服务所占比例其次，占总服务价值的 17.00%以上，文化服务价值逐年增加，在 2010 年超过供给服务价值。2015 年杭州湾滨海湿地生态服务功能中价值最大的水质净化功能，占总价值的 21.15%，气候调节功能居第 2 位，占总价值的 20.82%，第 3 位的是保持土壤功能，占总价值的 17.31%，这 3 类功能价值占总价值的 59.28%。其他 3 期价值比例与 2015 年相似，这 3 类功能价值分别占总价值的 74.89%(2000 年)、69.63%(2005 年)和 71.19%(2010 年)。因此，水质净化、气候调节、保持土壤是杭州湾滨海湿地的核心功能。

供给服务中供水价值比例较高，是物质生产价值 2~5 倍。物质生产价值保持平稳，供水价值逐年下降，物质生产所占比例逐年增加。调节服务中，水质净化、气候调节和水源涵养所占比例较高，占调节服务价值的 80.00%以上。支持服务和文化服务分别以保持土壤和旅游休闲为主。

表 12 2000，2005，2010，2015 年杭州湾滨海湿地生态服务功能价值比较

Table 12 Comparison of ecosystem services value of Hangzhou bay coastal wetland in 2000, 2005, 2010 and 2015												
功能类型	当年价值/亿元				平减后价值/亿元				百分比/%			
	2000	2005	2010	2015	2000	2005	2010	2015	2000	2005	2010	2015
物质生产	4.50	7.67	11.00	16.63	4.50	3.78	3.02	3.07	1.09	1.45	1.16	1.37
供水	25.29	27.05	32.01	33.58	25.29	13.32	8.80	6.19	6.12	5.10	3.39	2.76
水质净化	92.76	69.42	200.71	257.17	92.76	34.18	55.19	47.43	22.46	13.08	21.26	21.15
水源涵养	28.38	41.29	89.08	203.18	4.99	20.33	24.49	37.47	6.87	7.78	9.44	16.71
气候调节	127.14	208.39	224.21	253.24	182.90	102.60	61.65	46.71	30.78	39.27	23.75	20.82
固碳	11.76	8.56	10.86	10.78	11.76	4.21	2.99	1.99	2.85	1.61	1.15	0.89
大气调节	6.92	6.40	6.15	4.54	6.92	3.15	1.69	0.84	1.67	1.21	0.65	0.37
促淤造陆	24.49	54.69	70.46	120.67	24.49	26.93	19.37	22.26	5.93	10.31	7.46	9.92
生物多样性保护	0.53	0.62	0.84	0.93	0.67	0.31	0.23	0.17	0.13	0.12	0.09	0.08
保持土壤	89.39	91.64	247.07	210.57	89.39	45.12	67.93	38.84	21.64	17.27	26.18	17.31
旅游休闲	1.85	14.86	51.46	104.82	1.85	7.32	14.15	19.33	0.45	2.80	5.45	8.62
科研教育	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
供给服务	29.79	34.72	43.00	50.22	29.79	17.10	11.82	9.26	7.21	6.54	4.56	4.13
调节服务	323.81	401.32	548.37	655.30	323.81	197.60	150.78	120.86	78.40	75.64	58.10	53.88
支持服务	90.06	92.26	247.91	211.50	90.06	45.42	68.16	39.01	21.81	17.39	26.26	17.39
文化服务	1.85	14.86	51.49	104.85	1.85	7.32	14.16	19.34	0.45	2.80	5.46	8.62
总计	413.01	530.59	943.88	1 216.14	445.51	261.25	259.52	224.30	100.00	100.00	100.00	100.00

4.2 生态服务功能价值变化及驱动因素分析

由表 13 所示: 2000–2015 年间, 供给服务、调节服务和支撑服务功能价值均保持下降趋势, 文化服务保持增长趋势。①供给服务。在 2000–2015 年间, 供给服务功能价值占总价值的比例由 7.21% 下降到 4.13%, 价值下降 20.53 亿元, 下降了 68.91%; 其中 2000–2005 年下降幅度最大, 是 2010–2015 年下降幅度的 2 倍多; 物质生产价值在 2000–2010 年有所下降, 2010–2015 年略微增加; 供水价值在 2000–2015 年一直降低, 变化率从 47.34% 降低到 29.61%。②调节服务。调节服务功能价值在 2000–2010 年呈递减趋势, 总价值由 323.81 亿元减少到 156.69 亿元, 减少了 51.6%, 主要体现在大气调节、固碳、气候调节价值降低, 降低比例均在 65% 以上。淤积造陆价值降低比例最少, 不足 10%, 水源涵养价值增加。③支持服务。支持服务功能价值在 2005–2010 年有所增加, 其他阶段均降低, 主要体现在保持土壤价值的变化。2000–2015 年总价值降低 50.56 亿元, 降低了 56.55%。④文化服务。文化服务功能与其他 3 类功能服务不同, 其价值在 2000–2015 年迅速增加, 由 2000 年的 1.85 亿元增加到 2015 年的 19.34 亿元, 变化率达到 945.03%。文化服务由旅游休闲和科研教育功能构成, 其中旅游休闲功能价值持续上涨, 这与人们生活水平提高, 当地旅游景点旅游收入增加息息相关。

5 结论与讨论

基于遥感数据, 结合生态学和经济学方法, 构建杭州湾滨海湿地生态系统评价体系, 采用市场价值法、影子工程法、替代成本法、造林成本法等方法, 对 2000, 2005, 2010 和 2015 年杭州湾滨海湿地生态系统的供给、调节、支持、文化服务四大类共 12 项生态功能进行了价值评估, 得到各年份总价值分别为 413.01, 261.25, 259.52 和 224.3 亿元, 单位面积生态服务价值分别为 44.45, 24.27, 22.51 和 18.19 万元·hm⁻²。各服务类型的功能价值比例从高到低排序为调节服务>支持服务>供给服务和文化服务, 调节服务价值占到总服务价值的 60.00% 以上。水质净化、气候调节、保持土壤和淤积造陆是杭州湾滨海湿地的核心功能。

根据本研究结果, 杭州湾滨海湿地的生态服务功能具有较高的货币价值, 作为国家重要湿地, 对区域内的水体质量以及渔业安全起着重要的作用。2000 年后慈溪市城市化进程加快, 人口增加, 自然资

表 13 研究区生态服务功能价值变化量及变化率

Table 13 Changes of ecosystem services value of Hangzhou Bay coastal wetland from 2000 to 2015

项目	2000–2005		2005–2010		2010–2015		2000–2015	
	变化量/ 亿元	变化率/%	变化量/ 亿元	变化率/%	变化量/ 亿元	变化率/%	变化量/ 亿元	变化率/%
功能类型								
物质生产	-0.72	-16.02	-0.75	-19.96	0.04	1.47	-1.43	-31.80
供水	-11.97	-47.34	-4.52	-33.93	-2.61	-29.61	-19.10	-75.51
水质净化	-58.58	-63.15	21.01	61.46	-7.75	-14.05	-45.33	-48.87
水源涵养	-2.76	-55.34	-0.66	-29.65	0.07	4.72	-3.35	-67.10
气候调节	-56.00	-30.62	-56.93	-44.86	-23.26	-33.25	-136.19	-74.46
固碳	-7.55	-64.17	-1.23	-29.12	-1.00	-33.45	-9.77	-83.10
大气调节	-3.76	-54.44	-1.46	-46.31	-0.85	-50.53	-6.08	-87.90
淤积造陆	2.43	9.94	-7.56	-28.06	2.88	14.88	-2.24	-9.14
生物多样性保护	-0.36	-54.18	-0.08	-24.68	-0.06	-25.20	-0.49	-74.19
保持土壤	-44.27	-49.53	22.81	50.57	-29.10	-42.83	-50.56	-56.55
旅游休闲	5.47	295.67	6.83	93.39	5.18	36.62	17.48	945.40
科研教育	0.00	47.71	0.01	346.74	0.00	-27.33	0.00	379.53
服务类型								
供给服务	-12.69	-42.61	-5.27	-30.85	-2.56	-21.67	-20.53	-68.91
调节作用	-126.22	-38.98	-46.82	-23.70	-29.92	-19.84	-202.95	-62.68
支持服务	-44.63	-49.56	22.74	50.06	-29.16	-42.77	-51.05	-56.69
文化服务	5.47	295.51	6.84	93.46	5.18	36.58	17.49	945.03
总计	-178.08	-39.97	-22.52	-8.42	-56.45	-23.05	-257.05	-57.70

源及土地资源的需求量急剧增加。2005年成立杭州湾新区,进一步修路筑坝、填海造地等土地围垦,使得滨海湿地面积不断缩小。湿地植被自然演替规律被人为破坏,滩涂湿地直接被利用成工业用地及建筑用地,滩涂植被大量减少,严重影响水质净化、气候调节和保持土壤等核心功能。需坚持可持续发展战略,在保护湿地的基础上进行合理的开发利用。

本研究区的单位面积服务价值与胶州湾滨海湿地、山东滨海湿地服务价值相差不大,与江苏近海湿地、莱州湾滨海湿地、崇明湿地、海州湾湿地服务价值相差较大^[37-40]。产生差异的原因有:①湿地类型不同,所处的地理位置不同,提供的服务功能也不相同,有些偏重于供给服务功能,有些偏重于调节服务功能;②研究者评估不同服务类型时选取的指标及方法不同,目前没有统一的湿地生态服务价值评估体系。本研究在现有评价方法的基础上,结合数据的可获得性,对杭州湾滨海湿地的生态服务功能价值进行评价,存在评价结果低于其真实值的可能性。因此,未来针对湿地生态系统服务价值的研究,应开展全面系统的湿地生态系统服务功能定位观测,并建立规范统一的湿地生态系统服务功能价值评价体系,以准确地量化其价值。

6 参考文献

- [1] 张晓龙,李培英,李萍,等.中国滨海湿地研究现状与展望[J].海洋科学进展,2005,23(1):87-95.
ZHANG Xiaolong, LI Peiying, LI Ping, et al. Present conditions and prospects of study on coastal wetlands in China [J]. *Adv Mar Sci*, 2005, 23(1): 87-95.
- [2] 崔丽娟.湿地价值评价研究[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] 陈增奇,金均,陈奕.中国滨海湿地现状及其保护意义[J].环境污染与防治,2006,28(12):930-933.
CHEN Zengqi, JIN Jun, CHEN Yi. The status and significance of seashore wetland protection in China [J]. *Environ Pollut Control*, 2006, 28(12): 930-933.
- [4] 穆亚南,丁丽霞,李楠,等.基于面向对象和随机森林模型的杭州湾河口海岸滨海湿地植被信息提取研究[J].浙江农林大学学报,2018,35(6):1088-1097.
MU Yanan, DING Lixia, LI Nan, et al. Information extraction of coastal wetland vegetation in Hangzhou Bay based on object-oriented and random forest model [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, 35(6): 1088-1097.
- [5] 王自磐.浙江省滨海湿地生态结构与经济功能分析[J].东海海洋,2001,19(4):51-57.
WANG Zipan. Analysis on economical function and ecological structure of marginal wetland in Zhejiang Province [J]. *Donghai Mar Sci*, 2001, 19(4): 51-57.
- [6] 吴玲玲,陆健健,童春富,等.长江口湿地生态系统服务功能价值的评估[J].长江流域资源与环境,2003,12(5):411-416.
WU lingling, LU Jianjian, TONG Chunfu, et al. Valuation of wetland ecosystem services in the Yangtze River estuary [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 411-416.
- [7] 郑伟,石洪华,徐宗军,等.滨海湿地生态系统服务及其价值评估:以胶州湾为例[J].生态经济(学术版),2012(1):179-182.
ZHENG Wei, SHI Honghua, XU Zongjun, et al. Valuation on ecosystem services of coastal wetland: a case study in Jiaozhou Bay [J]. *Ecol Econ*, 2012 (1): 179-182.
- [8] 王斌,杨校生,张彪,等.浙江省滨海湿地生态系统服务及其价值研究[J].湿地科学,2012,10(1):15-22.
WANG Bin, YANG Xiaosheng, ZHANG Biao, et al. Assessment of ecosystem services and value of coastal wetlands in Zhejiang Province [J]. *Wetland Sci*, 2012, 10(1): 15-22.
- [9] 王磊,何冬梅,江浩,等.江苏滨海湿地生态系统服务功能价值评估[J].生态科学,2016,35(5):169-175.
WANG Lei, HE Dongmei, JIANG Hao, et al. Evaluation of coastal wetland ecosystem services in Jiangsu Province [J]. *Ecol Sci*, 2016, 35(5): 169-175.
- [10] 高常军,魏龙,贾朋,等.基于去重复性分析的广东省滨海湿地生态系统服务价值估算[J].浙江农林大学学报,2017,34(1):152-160.
GAO Changjun, WEI Long, JIA Peng, et al. Coastal wetland ecosystem evaluation in Guangdong Province by eliminating the double counting [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, 34(9): 152-160.
- [11] 丁小迪,丁咚,李广雪.山东省滨海湿地生态价值评估[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(1):

71 – 75.

DING Xiaodi, DING Dong, LI Guangxue. Evaluations on the functional value of coastal wetlands ecosystem services in Shandong Province [J]. *Period Ocean Univ China*, 2015, **45**(1): 71 – 75.

- [12] 李加林, 许继琴, 童亿勤, 等. 杭州湾南岸滨海平原生态系统服务价值变化研究[J]. *经济地理*, 2005, **25**(6): 804 – 809.

LI Jialin, XU Jiqin, TONG Yiqin, *et al.* Effects of land use changes on values of ecosystem service on coastal plain of south Hangzhou Bay bank [J]. *Econ Geogr*, 2005, **25**(6): 804 – 809

- [13] 宁潇, 胡咪咪, 邵学新, 等. 杭州湾南岸滨海湿地生态服务功能价值评估[J]. *生态科学*, 2017, **36**(4): 166 – 175.
NING Xiao, HU Mimi, SHAO Xuexin, *et al.* Assessment of coastal wetland ecosystem services in the south of Hangzhou Bay [J]. *Ecol Sci*, 2017, **36**(4): 166 – 175.

- [14] 宁潇, 邵学新, 胡咪咪, 等. 杭州湾国家湿地公园湿地生态系统服务价值评估[J]. *湿地科学*, 2016, **14**(5): 677 – 686.

NING Xiao, SHAO Xuexin, HU Mimi, *et al.* Value assessment of wetland ecosystem services of Hangzhou Bay National Wetland Park [J]. *Wetland Sci*, 2016, **14**(5): 677 – 686.

- [15] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water* [M]. Washington D C: World Resources Institute, 2005: 5.

- [16] COSTANZA R, d'ARCE R, de GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253 – 260.

- [17] de GROOT R S, ALKEMADE R, BRAAT L, *et al.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making [J]. *Ecol Complexity*, 2010, **7**(3): 260 – 272.

- [18] BRAAT L C, de GROOT R. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy [J]. *Ecosyst Serv*, 2012, **1**(1): 4 – 15.

- [19] 程敏, 张丽云, 崔丽娟, 等. 滨海湿地生态系统服务及其价值评估研究进展[J]. *生态学报*, 2016, **36**(23): 7509 – 7518.

CHENG Min, ZHANG Liyun, CUI Lijuan, *et al.* Progress in ecosystem services value valuation of coastal wetlands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(23): 7509 – 7518.

- [20] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999, **10**(5): 635 – 640.

OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, ZHAO Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, **10**(5): 635 – 640.

- [21] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. *资源科学*, 2001, **23**(6): 2 – 9.

XIE Gaodi, LU Chunxia, CHENG Shengkui. Progress in evaluating the global ecosystem services [J]. *Resour Sci*, 2001, **23**(6): 2 – 9.

- [22] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. *山地学报*, 2003, **21**(1): 50 – 55.

XIE Gaodi, LU Chunxia, XIAO Yu, *et al.* The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *J Mount Sci*, 2001, **21**(1): 50 – 55.

- [23] SHAO Xuexin, WU Ming, GU Binhe, *et al.* Nutrient retention in plant biomass and sediments from the salt marsh in Hangzhou Bay estuary, China [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2013, **20**(9): 6382 – 6391.

- [24] 谭雪, 石磊, 陈卓琨, 等. 基于全国 227 个样本的城镇污水处理厂治理全成本分析[J]. *给水排水*, 2015, **41**(5): 30 – 34.

TAN Xue, SHI Lei, CHEN Zhuokun, *et al.* Cost analysis of the municipal wastewater treatment plant operation based on 227 samples in China [J]. *Water Wastewater Eng*, 2015, **41**(5): 30 – 34.

- [25] 王兵, 杨锋伟, 郭浩. 森林生态系统服务功能评估规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- [26] 刘晓辉, 吕宪国, 姜明, 等. 湿地生态系统服务功能的价值评估[J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5625 – 5631.
LIU Xiaohui, LÜ Xianguo, JIANG Ming, *et al.* Research on the valuation of wetland ecosystem services [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(11): 5625 – 5631.

- [27] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. *生态学报*, 2011, **31**(8): 2236 – 2244.

- JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, *et al.* Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(8): 2236 – 2244.
- [28] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展[J]. 生态学报, 2007, **27**(1): 346 – 356.
ZHAO Jun, YANG Kai. Valuation of ecosystem services characteristics issues and prospects [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(1): 346 – 356.
- [29] 王蒙, 吴明, 邵学新, 等. 杭州湾滨海湿地 CH₄ 排放通量的研究[J]. 土壤, 2014, **46**(6): 1003 – 1009.
WANG Meng, WU Ming, SHAO Xuexin, *et al.* Study on CH₄ emission fluxes in Hangzhou Bay Coastal Wetland [J]. *Soils*, 2014, **46**(6): 1003 – 1009.
- [30] 李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 中国滨海湿地及其生态系统服务功能研究概述[J]. 林业调查规划, 2014, **39**(4): 24 – 30.
LI Wei, CUI Lijuan, ZHAO Xinsheng, *et al.* An overview of Chinese coastal wetland and their ecosystem services [J]. *For Invent Plann*, 2014, **39**(4): 24 – 30.
- [31] 张雪飞, 李宏. 湿地生态系统价值评估述评[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2015, **36**(5): 91 – 96.
ZHANG Xuefei, LI Hong. The review and commentary of wetland ecosystem valuation [J]. *J Cap Norm Univ Nat Sci Ed*, 2015, **36**(5): 91 – 96.
- [32] 崔丽娟. 扎龙湿地价值货币化评价[J]. 自然资源学报, 2002, **17**(4): 451 – 456.
CUI Lijuan. Assessment on Zhalong Wetland value [J]. *J Nat Resour*, 2002, **17**(4): 451 – 456.
- [33] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, **18**(2): 189 – 196.
XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, *et al.* Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2003, **18**(2): 189 – 196.
- [34] 邵学新, 李文华, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物碳氮磷储量特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3451 – 3457.
SHAO Xuexin, LI Wenhua, WU Ming, *et al.* Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus storage of three dominant marsh plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland [J]. *Environ Sci*, 2013, **34**(9): 3451 – 3457.
- [35] 何冬梅, 王磊, 倪霞, 等. 江苏盐城沿海滩涂湿地生态系统服务价值评估[J]. 江苏林业科技, 2016, **43**(6): 29 – 33.
HE Dongmei, WANG Lei, NI Xia, *et al.* Evaluation of ecosystem service of the coastal mudflat wetland in Yancheng, Jiangsu Province [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2016, **43**(6): 29 – 33.
- [36] 王其翔. 黄海海洋生态系统服务评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
WANG Qixiang. *Assessment of Yellow Sea Ecosystem Services* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [37] 商慧敏, 郝敏, 李悦, 等. 胶州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J]. 生态学报, 2018, **38**(2): 1 – 11.
SHANG Huimin, XI Min, LI Yue, *et al.* Evaluation of changes in the ecosystem services of Jiaozhou Bay coastal wetland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(2): 1 – 11.
- [38] 张秀英, 钟太洋, 黄贤金, 等. 海州湾生态系统服务价值评估[J]. 生态学报, 2013, **33**(2): 640 – 649.
ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, *et al.* Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(2): 640 – 649.
- [39] 夏涛, 陈尚, 张涛, 等. 江苏近海生态系统服务价值评估[J]. 生态学报, 2014, **34**(17): 5069 – 5076.
XIA Tao, CHEN Shang, ZHANG Tao, *et al.* Valuation of ecosystem services in Jiangsu coastal waters [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(17): 5069 – 5076.
- [40] 曹莹, 汤臣栋, 马强, 等. 上海崇明县湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, **41**(1): 28 – 34.
CAO Ying, TANG Chendong, MA Qiang, *et al.* Reevaluation of the value of wetland ecosystem services in Chongming County, Shanghai [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2017, **41**(1): 28 – 34.