

# 大型国际重要湿地边界及遥感分类数据集(2001、2013)

张海英<sup>1</sup>, 牛振国<sup>1\*</sup>, 许盼盼<sup>1</sup>, 陈燕芬<sup>1</sup>, 胡胜杰<sup>1</sup>, 宫 宁<sup>2</sup>

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

**摘 要:** 湿地是全球最具生物多样性和生产力最高的生态系统之一。本数据集依据拉姆萨尔湿地公约网站及保护区等其他辅助资料, 对照 Google Earth、天地图等高分辨率遥感影像, 确定了全球 100 处大型 (面积大于 20 万  $\text{hm}^2$ ) 国际重要湿地的边界。以 2001 年和 2013 年 Terra/Aqua 卫星 MODIS 传感器 250 m 空间分辨率 16 天合成的 MOD13Q1 产品为数据基础, 对归一化植被指数 (NDVI) 进行滤波和时间序列重建, 采用支持向量机方法 (SVM) 对其进行分类和制图, 得到 2001 年和 2013 年全球 100 处国际重要湿地的遥感分类数据集。与高分辨率遥感影像和文献资料等数据比较, 湿地遥感分类数据集能够揭示气候波动与人类活动双重影响下国际重要湿地内湿地的时空变化特征; 与基于单期遥感数据的湿地监测相比, 更具有优势。该数据集可以为湿地保护与管理 and 全球环境变化研究等提供参考。本数据集共包含 3 个文件, 由 .kmz 和 .shp 两种格式存储, 压缩后数据量为 102MB。

**关键词:** 湿地; 边界; 遥感分类; 湿地制图; 国际重要湿地名录

DOI: 10.3974/geodp.2017.02.15

## 1 前言

湿地是全球最具生物多样性和生产力最高的生态系统之一<sup>[1]</sup>。近年来, 湿地监测不断受到全球科学家的关注, 成为全球变化研究中的热点问题。准确掌握湿地生态系统的时空变化特征, 对全球变化具有至关重要的现实意义<sup>[2]</sup>。遥感技术的快速发展为全球湿地研究提供了更为客观的手段。遥感卫星提供的时间序列数据对研究湿地在其植被生长周期或自然年份内的变化发挥了不可替代的作用<sup>[3]</sup>, 是本文全球大型国际重要湿地遥感监测的重要数据源。作者在发表相关研究论文的同时, 出版该数据集。

## 2 数据集元数据简介

大型国际重要湿地边界及遥感分类数据集<sup>[4]</sup> ( RamsarSites\_Top100\_2001/2013 ) 的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台和数据共享政策等信息见表 1。

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2015-12-10; 出版日期: 2017-06-25

通讯作者: 牛振国 L-4829-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, niuzg@radi.ac.cn

论文引用格式: 张海英, 牛振国, 许盼盼等. 大型国际重要湿地边界及遥感分类数据集 (2001、2013) [J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(2): 230-238. DOI:10.3974/geodp.2017.02.15.

数据集引用格式: 张海英, 牛振国, 许盼盼等. 大型国际重要湿地边界及遥感分类数据集 (2001、2013) [DB]. 全球变化科学研究数据出版系统, DOI:10.3974/geodb.2015.02.09.V1.

表 1 大型国际重要湿地边界及遥感分类数据集（2001、2013）元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	大型国际重要湿地边界及遥感分类数据集（2001、2013）
数据集短名	RamsarSites_Top100_WetlandCover_2001/2013
作者信息	张海英 L-4985-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, zhanghy@radi.ac.cn 牛振国 L-4829-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, niuzg@radi.ac.cn 许盼盼 L-5064-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2548640046@qq.com 陈燕芬 L-5003-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 935836745@qq.com 胡胜杰 L-6142-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所, husj1989@yeah.net 官 宁 L-6422-2016, 山东农业大学资源与环境学院, gongningbaobao@126.com
地理区域	全球范围内 100 个面积较大的国际重要湿地, 分布在全球各大洲
数据年代	2001 年、2013 年
时间分辨率	1 期/年
空间分辨率	250 m
数据格式	.kmz、.shp
数据量	原始 481MB, 压缩后 102MB
数据集组成	数据集由三部分数据组成: 1. Top100_boundary.kmz 是全球 100 处大型国际重要湿地边界数据, 数据量为 1.54MB。采用 Google Earth .kmz 数据格式存储。 2. Ramsar2001.rar 是 2001 年全球 100 处大型国际重要湿地遥感分类结果(.shp, 数据量为 261MB)的压缩数据, 数据量 51MB。 3. Ramsar2013.rar 是 2013 年全球 100 处大型国际重要湿地遥感分类结果(.shp, 数据量为 253MB)的压缩数据, 数据量 49.6MB。 附注: 每个矢量文件包括 7 个主要字段: (1) Area 是指每个斑块的面积, 以 m <sup>2</sup> 计; (2) RSN 代表 Ramsar Site No., 即国际重要湿地编号或拉姆萨尔湿地编号; (3) Lev3 表示在该斑块在分类系统中三级类这一级的湿地类型代码 <sup>[4]</sup> (表 2); (4) Name_EN、Name_CN 分别是指国际重要湿地的英文和中文名称; (5) Country_EN、Country_CN 分别代表国际重要湿地隶属国的英文和中文名称。
基金项目	国家自然科学基金 (41271423)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统, <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、实体数据 (中英文) 和通过《全球变化数据学报》(中英文) 发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报》(中英文) 编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[5]</sup> 。

3 数据研发方法

3.1 监测对象与指标

依据可查证确切分布范围、面积较大、地图信息完整、兼顾全球典型生态气候区和各大洲均匀分布的原则, 在国际重要湿地数据库 (<https://rsis Ramsar.org/>) 中选取 100 处大型国际重要湿地 (大于 20 万 hm<sup>2</sup>) 作为监测对象 (见图 1)。

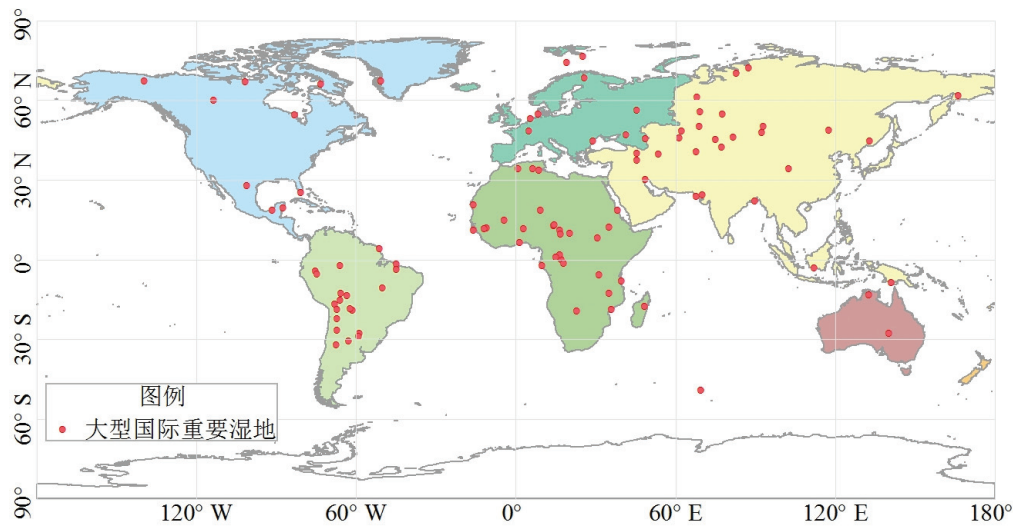


图 1 大型国际重要湿地分布图

全球大型国际重要湿地遥感监测的主要指标包括湿地保护区内各种地表类型及其面积（见表 2）。湿地与非湿地类型之间的相互转化、湿地类型之间的相互转化、湿地面积的增减等是反映国际重要湿地生态环境状况的重要指标。一般而言，如果湿地类型转变为非湿地类型或自然湿地转变为人工湿地，则意味着国际重要湿地的生态环境状况变差，不利于生物多样性的保护；反之，则认为国际重要湿地的生态环境状况向好的方向转变。

3.2 数据采集与研发方法

国际重要湿地的边界主要以《湿地公约》官方网站（<https://rsis Ramsar.org/>，截止到 2014 年 7 月）公布的纸质扫描版地图为基准数据<sup>[6]</sup>，少部分来自全球保护区数据（<https://www.iucn.org/>；<http://www.protectedplanet.net/>，2014 年 7 月）及其他各种文献资料等。利用 ArcGIS 平台进行地理配准和矢量化，形成初步的国际重要湿地边界。由于各个国家对于湿地的管理和技术水平条件等存在较大差异，上述边界与实际情况存在部分不一致。因此我们又参照 Google Earth、天地图等高分辨率遥感影像，依据湿地的自然地理特征进行边界的修正和确认（如沿河流、山脊和道路等走向）。湿地的遥感监测以时间序列的中等分辨率成像光谱仪（MODIS）产品 MOD13Q1（16 天合成，空间分辨率为 250 m）为主要数据源，来源于美国国家航空航天局（<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>），时间覆盖 2001 年、2013 年，每年包括 23 期。本研究同时以国家测绘地理信息局天地图网站（<http://www.tianditu.com/map/index.html>）、Google Earth 平台提供的高分辨率遥感影像以及其他地理数据作为辅助数据。由于归一化植被指数（NDVI）可以反映植被生长状况，通过分析各种湿地与非湿地类型的 NDVI 值在植被生长周期或一年内的变化规律差异（主要包括植被类型的生长期长度、NDVI 最高值与最低值、NDVI 在一年中首次出现正值时的日期等信息），结合不同生态区内的植被生长规律等信息<sup>[7]</sup>，能有效提高不同地物类型的解译精度。本研究采用 Savitzky-Golay 滤波的方法对 MODIS NDVI 时间序列数据进行重建<sup>[8]</sup>，通过对时间序列数据进行聚类，结合不同地物在高分辨率遥感影像中的图像特征，对每类地

物选取 10~20 个训练样本，利用支持向量机方法（SVM）对时间序列遥感数据进行分类制图，最小制图单元面积为 56.25 hm<sup>2</sup>（3×3 像元）。具体方法及技术流程见图 2。

表 2 国际重要湿地遥感制图所采用的地表覆盖分类体系

一级	二级	三级	代码	时间序列 NDVI 特征	类型定义或空间分布特征
湿地	水体		11	在每年 23 期（或 46 期）的时间序列遥感影像中，NDVI 值小于 0.1	包括河流、湖泊、河口水域、水库以及城市娱乐景观、污水处理场等人工水体，主要指示为永久水体
	森林/灌丛沼泽	森林/灌丛沼泽(常绿)	121	NDVI 值大于 0.4，在一年周期内 NDVI 值变化较小	包括地处内陆及滨海的森林/灌丛沼泽，植被为常绿植物
		森林/灌丛沼泽(落叶)	122	NDVI 值大于 0.3，以一年为周期，NDVI 值存在周期性变化	包括内陆或滨海森林/灌丛沼泽，植被为落叶植物
	草本沼泽	永久性草本沼泽	131	NDVI 值的范围[0.1-0.5]，在一年周期内 NDVI 值变化相对和缓；丰水期内，NDVI 可能会出现小于 0 的数值	在一年周期内长期处于湿地状态的草本沼泽
		季节性草本沼泽	132	NDVI 值的范围[0.1-0.5]，以一年为周期，NDVI 值存在周期性变化；丰水期内 NDVI 小于 0	在生长季节或特定季节规律性存在的草本沼泽
	洪泛湿地		14	NDVI 值小于 0.2，丰水期内 NDVI 值小于 0	位于河流、湖泊、河口附近的过饱和土壤，低植被覆盖（<30%）、无开阔明水覆盖，或周期性被淹没
	水田		15	在作物初期 NDVI 值小于 0，在作物收获后出现 NDVI 值陡降	以种植水稻等作物为主的农田
	苔原/藓类沼泽		16	生长季 NDVI 值小于 0.6，一般位于高纬地带	
	积雪		21		指常年积雪
	非湿地	自然植被	森林/灌丛	22	生长季节 NDVI 值大于 0.5
草地			23	生长季节 NDVI 值在 [0.3-0.6]，不会出现较低的 NDVI 值	
人工覆盖/裸地			24	一年周期内 NDVI 值均较低 [0-0.2]	包括人工建设形成的非植被覆盖的地表（各类建筑、道路、施工地等）以及无植被覆盖、自然存在的裸地（基岩、裸沙、裸土等）
旱地		25	在一年周期内会出现 NDVI 值缓升和陡降	以种植旱生作物为主的农田	
云层覆盖		32		指图像被云层覆盖区域	
海域		33			

4 数据结果

数据结果包括在三个数据文件中，它们分别是：100 个大型国际重要湿地界线数据（Top100\_boundary.kmz，1470.14 kb）、2001 年湿地遥感监测数据（Ramsar2001.rar，52245.46kb）和 2013 年湿地遥感监测数据（Ramsar2013.rar，50858.42kb）（<http://www.>

geodoi.ac.cn/WebCn/doi.aspx?Id=243 )。

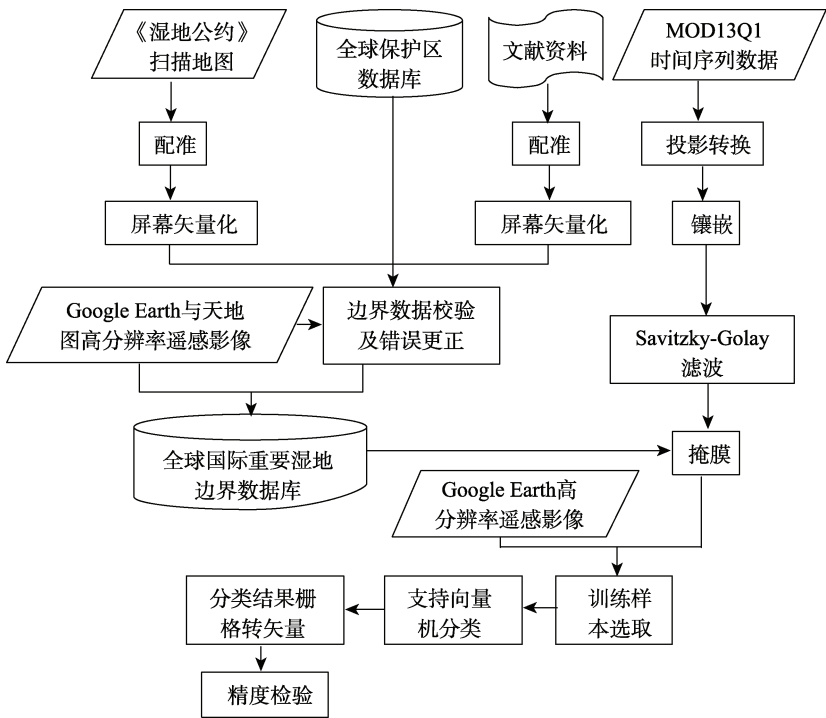


图 2 大型国际重要湿地遥感监测方法及技术流程

4.1 大型国际重要湿地面积统计

全球 100 个大型国际重要湿地面积总计 138392121.05 hm<sup>2</sup>。其中，面积最大的湿地是位于博茨瓦纳的奥卡万戈三角洲（湿地编码 879 号），面积 6703463.94 hm<sup>2</sup>。全球 100 个大型国际重要湿地面积统计结果列于表 3。

表 3 全球 100 个大型国际重要湿地面积统计表

中文名称	面积(hm <sup>2</sup> )	国家	国际重要湿地编码
奥卡万戈三角洲系统	6703463.94	博茨瓦纳	879
毛德皇后湾	6263006.27	加拿大	246
恩吉利-通巴-曼多比湿地	6194581.31	刚果民主共和国	1784
萨拉马特河、奥克河冲积平原	6187728.80	乍得	1621
刚果湿地	5787900.96	刚果共和国	1742
洛贡河冲积平原及图普里洼地	4017225.78	乍得	1560
帕斯塔萨河流综合体	3781662.25	秘鲁	1174

续表 3

中文名称	面积(hm <sup>2</sup> )	国家	国际重要 湿地编码
马拉加拉西河-莫约沃西河湿地	3705800.43	坦桑尼亚	1024
雅特河流湿地	3448554.92	玻利维亚	2094
帕尔马湿地	3434589.67	玻利维亚	1088
内尼日尔三角洲	3143537.63	马里	1365
布兰科河流湿地	2909863.42	玻利维亚	2092
马塞尼亚平原湿地	2905803.26	乍得	1839
马拉尼昂州湿地	2671201.38	巴西	640
帕拉河-莫科里托河之间地区	2620671.33	俄罗斯	697
苏德沼泽	2470516.39	南苏丹	1622
阿伊尔盖尔塔绿洲	2413275.61	尼日尔	1501
法属南部领地国家级自然保护区	2332885.13	法国	1837
北极熊省立公园	2231833.08	加拿大	360
帕卡亚-萨米利亚保护区	2194600.24	秘鲁	546
库吉湖	2142810.22	澳大利亚	376
马托斯河流湿地	2116721.12	玻利维亚	2093
卡卡杜国家公园	1939734.28	澳大利亚	204
巴拉保尔斯基多尔自然保护区	1826613.22	俄罗斯	693
马拉尼昂低地环境保护区	1811854.16	巴西	1020
洛斯里珀斯	1729203.22	玻利维亚	489
尼亚萨湖及海岸带	1697149.57	莫桑比克	1964
乍得湖（乍得境内部分）	1686175.47	乍得	1134
美洲鹤夏季牧场国家公园	1616992.61	加拿大	240
阿尔金岩石礁国家公园	1477460.61	毛里塔尼亚	250
萨瓦金海湾	1450427.12	苏丹	1860
奥扎拉柯库尔拉姆萨尔湿地	1385476.02	刚果共和国	2080
的的喀喀湖	1366536.56	玻利维亚	959
奇基塔湖泊湿地	1351673.35	阿根廷	1176
玛米洛阿自然保护区	1319593.43	巴西	623
卡塔马卡省普纳保护区	1311834.01	阿根廷	1865
托博尔-伊希姆森林-草原	1278538.61	俄罗斯	679
甘伯尔-昂多-里提湿地	1246779.36	几内亚	1579
伏尔加三角洲	1199249.85	俄罗斯	111
德萨瓜德罗河流湿地	1157839.02	阿根廷	1012
赞比西三角洲	1140940.11	莫桑比克	1391
普波湖与乌鲁乌鲁湖	1136273.65	玻利维亚	1181
波拉马-毕加格群岛	1065174.91	几内亚比绍共和国	2198
伊犁河三角洲和南巴尔喀什湖	973699.53	哈萨克斯坦	2020
乌布苏湖及其周边湿地	885360.38	蒙古	1379
哈尔乌苏湖国家公园	859526.41	蒙古	976
丁德尔国家公园	855072.75	苏丹	1461
阿拉湖-萨瑟科尔湖泊系统	784807.01	哈萨克斯坦	1892
杜威索珀候鸟保护区	782498.00	加拿大	249
阿劳特拉湖水域及湿地	781472.69	马达加斯加	1312
大沼泽地国家公园	754573.06	美国	374
叶尼塞河河口布洛克霍夫斯基群岛	737894.04	俄罗斯	698
特尔米诺斯潟湖动植物保护区	734350.69	墨西哥	1356



续表 3

中文名称	面积(hm <sup>2</sup> )	国家	国际重要 湿地编码
鲁菲吉-马菲亚-基尔瓦海洋保护区	734194.39	坦桑尼亚	1443
内蒙古达赉湖国家级自然保护区	733235.89	中国	1146
圣卡安生态保护区	655727.26	墨西哥	1329
艾达尔-阿纳西湖泊系统	636595.85	乌兹别克斯坦	1841
伊塞克伊塞克湖保护区	629536.18	吉尔吉斯斯坦	1231
埃尔杰里德盐湖	616315.19	突尼斯	1699
尼日利亚乍得湖湿地	611134.90	尼日利亚	1749
里约萨维纳斯盆地	606876.07	墨西哥	1769
额克勒米特诺纳特和纳苏吐普诺纳保护区	594195.32	丹麦	386
巴纳纳尔岛	592910.39	巴西	624
W 国家公园（贝宁部分）	581917.66	贝宁	1668
桑加-努阿巴莱-恩多伊国家公园	552358.22	刚果共和国	1858
瓦登海	541257.30	荷兰	289
凯堡奥兰吉国家公园	523199.02	巴西	2190
巴芬河-法莱梅河湿地	522191.82	几内亚	1719
艾克秋尔古盐湖盆地	519421.40	阿尔及利亚	1052
巴纳多斯湿地	516491.19	玻利维亚	1087
卡奇沼泽地	513386.48	巴基斯坦	1285
孙德尔本斯森林保护区	499921.44	孟加拉国	560
德沃别耶河上游	499157.08	俄罗斯	678
杰堪尼格斯湿地	491725.87	阿根廷	1112
查科湿地	491620.32	阿根廷	1366
石勒苏益格-荷尔斯泰因州瓦登海及邻近地区	481776.92	德国	537
塞凡湖	474652.91	亚美尼亚	620
乌尔米耶湖	456996.73	伊朗	38
多瑙河三角洲	451407.18	罗马尼亚	521
印度河三角洲	435103.46	巴基斯坦	1284
瓦苏里国家公园	411337.03	印度尼西亚	1624
钱尼湖	387239.92	俄罗斯	680
丹戎普丁国家公园	378350.88	印度尼西亚	2192
多哥滨海湿地	368011.51	多哥	1722
沙代甘沼泽、豪尔艾迈耶和霍尔穆萨泥滩湿地	334645.27	伊朗	41
土库曼巴希海湾	324761.47	土库曼斯坦	1855
霍彭	316453.18	挪威	1957
小咸海和锡尔河三角洲	313371.18	哈萨克斯坦	2083
熊岛	296711.28	挪威	1966
莱门乔基国家公园	285550.79	芬兰	1521
图尔盖和伊尔吉兹下游湖泊	263261.44	哈萨克斯坦	108
田吉兹-科尔加尔任湖泊系统	261593.75	哈萨克斯坦	107
甘肃尕斯库勒湿地自然保护区	247747.47	中国	1975
香槟区复合型湿地	241348.36	法国	514
卡玛-巴卡尔迪诺泥炭沼泽	223709.33	俄罗斯	670
兴凯湖	192382.13	俄罗斯	112
迈勒吉尔盐湖	192282.62	阿尔及利亚	1296
韦肖洛夫斯科耶水库	185046.81	俄罗斯	672
佩蒂特卢安果保护区	150542.08	加蓬	352
旧克罗平地	31461.26	加拿大	244

4.2 大型国际重要湿地 2001 年、2013 年遥感分类结果

在 100 个大型国际重要湿地 2001、2013 年遥感分类结果（Ramsar2001.rar，Ramsar2013.rar）基础上，汇总出各种地表覆盖类型的面积总和，汇总结果见表 4。

表 4 100 个大型国际重要湿地 2001、2013 年遥感监测各种类型面积统计表

类型代码	二级类	三级类	面积统计（hm <sup>2</sup> ）	
			2001	2013
湿地			58134960.36	57734032.42
11	水体		7962751.49	7220121.10
121	森林/灌丛沼泽	森林/灌丛沼泽（常绿）	5670938.35	5372163.35
122		森林/灌丛沼泽（落叶）	17989514.92	17264579.94
131	草本沼泽	永久性草本沼泽	8852939.87	9019623.32
132		季节性草本沼泽	11446049.25	12970340.19
14	洪泛湿地		3677715.96	3755553.93
15	水田		161536.44	118356.86
16	苔原/藓类沼泽		2373514.09	2013293.73
非湿地			80256924.04	80657761.93
21	积雪		203466.14	161471.34
22	自然植被	森林/灌丛	49795219.42	49793411.47
23		草地	10253074.54	10202998.58
24	人工覆盖/裸地		10255547.25	9634365.16
25	旱地		2071076.67	3200432.37
32	云层覆盖		54188.66	53787.91
33	海水		7624351.36	7611295.11

5 数据验证

利用高分辨率遥感影像对全球大型国际重要湿地制图结果进行精度检验。在各大洲（南极洲除外）各个国际重要湿地内随机抽选 10 个国际重要湿地作为待检验区域，将分类结果中的所有地物类型进行随机采样，共计选取各类样本 2386 个，利用高分一号、资源三号等国内外高分辨率卫星影像进行对照，完成对所有类型的精度检验。其中，2001 年总精度为 88%，Kappa 系数为 0.86；2013 年总精度为 89%，Kappa 系数为 0.87。

该数据集是一套包含全球 100 处大型国际重要湿地边界和以 250m 空间分辨率 16 天合成 MODIS MOD13Q1 产品为基础的湿地遥感制图及类型变化数据。它是全球湿地及气候变化研究的重要参考数据。

作者分工：张海英、牛振国负责全球大型国际重要湿地边界提取方法研发、数据收集与处理、数据分析与验证等全部流程的研究工作。张海英、许盼盼、陈燕芬、胡胜杰、宫宁参与了大型国际重要湿地边界提取和湿地遥感分类工作，在文章作者顺序中按其工作量和贡献程度进行排列。张海英负责数据论文撰写，牛振国负责文章审核和校正等。



## 参考文献

- [1] Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Kloiber, S. M., Macleod, R. D., Smith, A. J., et al. A semi-automated, multi-source data fusion update of a wetland inventory for East-Central Minnesota, USA [J]. *Wetlands*, 2015, 35: 335-348.
- [3] Dong, J., Xiao, X., Kou, W., et al. Tracking the dynamics of paddy rice planting area in 1986–2010 through time series Landsat images and phenology-based algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 99-113.
- [4] 张海英, 牛振国, 宫宁等. 全球大型国际重要湿地遥感分类及类型变化数据集[DB]. 全球变化科学研究数据出版系统, DOI:10.3974/geodb.2015.02.09.V1
- [5] 全球变化科学研究数据出版系统编辑部. 全球变化科学研究数据共享政策. DOI:10.3974/dp.policy. 2014.05.
- [6] Ramsar convention secretariat. The Ramsar convention manual: A guide to the convention on wetlands (Ramsar, Iran, 1971), 4th edition [Z]. 2006.
- [7] Jin, Z., Xu, B. A novel compound smoother - RMMEH to reconstruct MODIS NDVI time series [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10: 942-946.
- [8] Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 332-344.