中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 8 期: 1661 ~ 1670
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

专题: 遥感与全球变化研究

论 文

全球陆表水体空间格局与波动初步分析

曹鑫[①], 陈军[②*], 陈利军[②], 廖安平[②], 孙芳蒂[③], 李阳[①], 李磊[④], 林忠辉[⑤], 庞治国[⑥], 陈晋[①], 何超英[②], 彭舒[②]

① 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
② 国家基础地理信息中心, 北京 100830;
③ 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;
④ 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
⑤ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
⑥ 中国水利水电科学研究院, 北京 100038
* 联系人, E-mail: chenjun@nsdi.gov.cn

收稿日期: 2014-01-14; 接受日期: 2014-03-10; 网络版发表日期: 2014-07-11
国家高技术研究发展计划项目(编号: 2009AA122001, 2009AA122004)资助

摘要 陆表水体是人类生存和发展的最重要资源之一, 也是全球水循环主要组成部分之一. 全面地掌握陆表水体的空间分布、持续地测定其动态变化, 是全球生态环境健康诊断的一项重要工作. 根据 30 m 分辨率全球地表覆盖数据产品(Global Land 30)中的两期陆表水体数据产品(Global Land 30-water 2000 和 Global Land 30-water 2010), 利用 MODIS 时间序列数据对其进行时相订正, 通过水域面积、水域率及其空间变异系数的指标, 按全球、经纬度、大洲及气候区等不同层次分析了陆表水体及空间分布格局和时间波动. 遥感监测结果显示, 全球陆表水体总面积达 367.67×10^4 km^2, 占全球陆表面积的 2.73%. 陆表水体空间分布极为不均, 主要集中于北半球的中高纬度地区和热带地区. 对比 2000 与 2010 年两期的水域面积差异, 总体波动不大, 但是区域差异较明显. Global Land 30-water 产品及统计数据为分析全球陆表水体空间分布格局、揭示其地域差异、研究时空波动规律以及诊断生态环境健康提供了重要基础数据.

关键词
全球陆表水体
水域面积
水域率
空间格局
波动

陆表水体是液态水在陆地表层的标志性聚集体, 以河流、湖泊、水库和季节性水体等形式存在. 虽然陆表水体所储存的淡水只占淡水总量的 0.3%、不到全球总水量的万分之一, 却是全球许多地区生产和生活的主要水源, 是人类生存和发展的最重要资源之一. 另一方面, 陆表水体是全球水循环主要组成部分之一, 其空间分布反映着陆地表层水资源的储存、利用的状况(Foley 等, 2005; Oki 和 Kanae, 2006), 而其波动或变化体现着气候变化、地表过程及人类活动对水分运动、化学物质迁移及生态系统可持续性的影响(Vörösmarty 等, 2000; Prigent 等, 2012). 利用遥感等技术手段, 全面地掌握陆表水体的空间分布、持续地测定其动态变化, 是全球生态环境健康诊断的一项重要基础工作.

以往人们主要是采用粗分辨率的遥感数据, 进行大面积水体空间分布测定及时间波动的趋势分析

中文引用格式: 曹鑫, 陈军, 陈利军, 等. 2014. 全球陆表水体空间格局与波动初步分析. 中国科学: 地球科学, 44: 1661–1670
英文引用格式: Cao X, Chen J, Chen L J, et al. 2014. Preliminary analysis of spatiotemporal pattern of global land surface water. Science China: Earth Sciences, 57: 2330–2339, doi: 10.1007/s11430-014-4929-x

(Alsdorf 和 Lettenmaier, 2003). 例如, Prigent 等(2001, 2007)利用微波遥感、多角度遥感及 AVHRR NDVI 资料, 分析了全球洪泛区的 1992~1993 的空间分布及淹没时间及 1993~2000 全球洪泛区的时空分布; Papa 等(2010)及 Prigent 等(2012)分别生成了 1993~2004、1993~2007 年全球 0.25°水体每月变化数据, 分析了全球水域面积的空间分布、在 15 年间的整体波动情况及主要河流的变化. 随着全球环境变化、世界可持续发展等研究的不断深入, 以更高的空间和时间分辨率, 开展全球陆地水体监测分析、水资源可持续性评估等, 已成为国内外关注的发展方向(Wood 等, 2011). 经过多年的不懈努力, 国际社会已将全球地表覆盖数据产品的空间分辨率从最初的 1°提高到了 8 km, 1 km 和 300 m(Loveland 等, 2000; Hansen 等, 2000; Friedl 等, 2002; Fritz 等, 2003), 目前正在向 30 m 及更高空间分辨率发展, 从特定单一年份向逐年、逐季节产品发展, 将为全球陆表水体的空间分布与动态变化研究提供新的手段.

在国家高技术研究发展计划项目支持下, 我国于 2009 年率先开展了全球地表覆盖高精度遥感制图工作(陈军等, 2011), 利用 30 m 分辨率遥感数据, 研制出了世界上第一套空间分辨率为 30 m 的全球陆表水体数据产品(Global Land 30-water), 包含 2000 年和 2010 年两个基准年(Global Land 30-water 2000 和 Global Land 30-water 2010). 本文首先介绍了采用的数据、主要分析指标和时相订正方法, 利用 30 m 全球陆表水体数据产品, 讨论了陆表水体的全球、按经纬度及分大洲的空间分布特征, 并对 2000~2010 十年间全球陆表水体的总体波动及分大洲、分气候区的波动情况进行了初步分析, 为揭示全球陆表水体的地域差异、波动规律等提供了重要基础信息.

1 采用的数据与分析方法

1.1 采用的数据

本研究所采用的主要遥感资料包括: (1) 30 m 分辨率全球陆表水体数据产品 Global Land 30-water 2000 和 Global Land 30-water 2010 两套数据集. 该数据集根据全球最佳覆盖的两期 30 m 空间分辨率的美国陆地卫星 Landsat TM/ETM+、国产环境减灾星(HJ-1)等影像, 利用基于像元的水体综合提取、面向对象的图斑处理和人机交互的数据优化等方法, 兼顾陆表水体遥感提取的高效性和准确性, 在国内外首次完成了 2000 和 2010 两个基准年全球 30 m 陆表水体的提取, 总精度在 96%以上. (2) 长时间序列、低空间分辨率的遥感影像资料: 2000/2010 年的 MODIS(中分辨率成像光谱仪, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)500 m 分辨率 8 天合成反射率产品 MOD09A1.

所采用的其他资料还有: (1) 柯本气候区划矢量数据(13 个一级气候区), 主要用于全球和分大洲陆表水域面积和水域率的统计分析. (2) 全球 1∶100 万基础地理底图数据库、全球湖泊湿地数据(GLWD)、3 套全球 1 km 地表覆盖产品(由美国地质调查局(USGS)、马里兰大学(UMD)和欧盟委员会联合研究中心开发, 分别记为 USGS-1km、UMD-1km 和 GLC2000)、2 套全球 300 m 地表覆盖产品(GlobCover2005 和 GlobCover2009)等, 用作本次遥感监测成果的验证和误差分析.

1.2 分析方法

目前分析全球水域空间格局和动态变化的研究主要通过计算经纬度格网中的水域面积、沿经纬度的水域面积、全球总体波动曲线或流域水域面积波动曲线(Papa 等, 2010; Prigent 等, 2012). 而经纬度格网中的陆地面积随纬度增加而减少, 水域率则反映了单位陆地面积中的水域面积, 因此我们认为水域率比水域面积更能反映水体的空间格局及动态变化的分布特征. 本文通过计算水域面积、水域率及空间变异指数等指标, 综合分析陆表水体的空间分布格局和动态变化.

1.2.1 水域率和空间变异系数

为了更好地表征陆表水体的空间分布, 本文以 0.1°×0.1°格网为基本统计单元, 定义水域率(R)和空间变异系数(V)如下:

$$R=A_w/A_L, \quad (1)$$

$$V=\mathrm{Std}(R)/\mathrm{mean}(R). \quad (2)$$

式中, A_w 是基本统计单元内的水域面积, A_L 为其对应的陆表面积; Std(R)为该统计单元内水域率的标准差; mean(R)表示水域率的均值. 不难看出, 作为单元中水域率的标准差与均值的比值, 空间变异系数越大, 表明水体在空间分布上越不均匀, 越小则表明水体

在空间分布上越均匀, 因而能够反映或表征陆表水体在空间分布上的非均一性.

1.2.2 多层次空间统计分析

为方便进行全球尺度的陆表水体空间分布格局分析, 首先是按多级区划(大洲、国家)进行单一时相陆表水域面积、水域率的统计分析, 继而按经纬度带分析水体时空格局的分布规律; 然后是采用柯本气候分区, 分析两期水体分布的变化情况(图 1). 其中按经纬度分析水域面积或水域率时, 按照 1°经度或 1°纬度分别计算水域总面积、陆地总面积及水域率.

1.2.3 水域面积时相订正

对于全球 30 m 遥感影像覆盖而言, 时相统一是国际性难题, 尚无有效解决办法. 对于 Global Land 30-water 两期数据产品来说, 其采用的遥感影像时相大多集中在 4~9 月, 部分获取时间为 1~3 月或 10~12 月. 由于 30 m 分辨率遥感影像只有单一时相, 解译的水体结果只能反映某一特定时间的分布状况, 不能直接用于时空格局分析, 因此作者提出了基于 MODIS 时间序列信息的 30 m 分辨率陆表水域面积时相订正方法. 以柯本气候分区为单位(Peel 等, 2007), 利用 MODIS 数据获得水域面积季节变化特征, 将同一气候带内的 30 m 分辨率的陆表水域面积数据较正至年平均水域面积. 为此, 根据柯本气候分区图, 统计各分区内基于 MODIS 提取的各日期水域面积 A_D 及年平均水域面积 A_{m}, 然后计算各个气候分区内每个日期的较正系数 k_D, 即各日期水域面积与平水位面积的比值:

$$k_D=A_{\mathrm{m}}/A_D. \tag{3}$$

然后根据每一景 30 m 分辨率影像的获取时间和地点, 确定对应的较正系数, 将水域面积较正至年平均水域面积:

$$A^{\mathrm{H}}{}_D'=A^{\mathrm{H}}{}_D\times k_D, \tag{4}$$

式中, D 为 30 m 影像的获取日期; $A^{\mathrm{H}}{}_D$ 为 D 时期由 30 m 影像获取的水域面积; $A^{\mathrm{H}}{}_D'$即为相应的年平均水域面积.

为了快速准确地从大量时间序列 MODIS 数据中提取水体, 我们建立了一种非监督的、快速聚类算法 CBEST(Clustering By Eigen Space Transformation). CBEST 首先将数据映射到主成分空间中, 再根据各个主成分的特征值大小将空间进行分割成空间单元, 然后将原始数据用空间单元的均值和数量代替, 最后利用分割的空间单元进行 K-means 聚类. 与传统 K-means 算法对数据逐条遍历相比, CBEST 只需遍历特征空间单元, 因而聚类效率大幅度提高. 为进一步提高效率, 采用双层 CBEST 聚类的方法. 第一层聚类对逐景 MODIS 影像进行, 类别数设为 100; 第二层聚类对第一层聚类得到的光谱簇中心进行聚类, 类别数设为 100, 得到 100 个光谱簇终端. 根据两次聚类之间的映射关系, 可将影像中的每个像元赋值到光谱簇终端中. 通过人工交互判别, 从光谱簇终端中提取出对应于水体的光谱簇, 即得到水体的时间序列结果.

为检验 MODIS 水体提取精度, 我们从 2000 年与 2010 年两期的遥感影像中分别选取了 245 景包含水体的 Landsat 影像, 并将 30 m 水体产品中的水域面积与对应时期 MODIS 提取的水域面积作比较. 图 2 显示从两种影像提取到的水域面积存在较好的相关性, 但从 MODIS 提取的水域面积存在低估, 意味着漏分了一些水体. 然而少量漏分并不会影响不同季相水域面积的相对关系, 因此 MODIS 提取的水域面积可用来对 30 m 分辨率影像得到的水域面积进行时相订正.

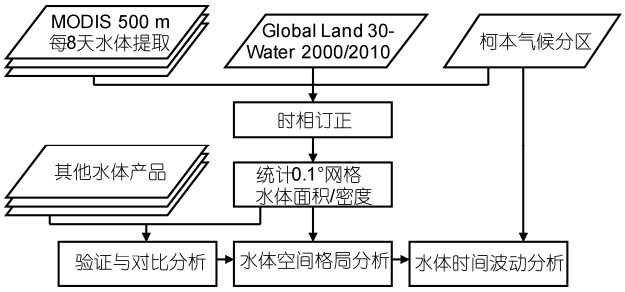

图 1 全球陆表水体空间分布及波动分析方法

2 全球陆表水体的空间分布特征分析

2.1 总体分布格局

对 Global Land 30-water 产品(图 3)进行统计分析, 得出 2010 年全球陆表水域的总面积为 367.67×10^4 km^2, 水域面积占全球陆表总面积(水域率)的 2.73%.

进一步统计可知, 全球陆表水域的空间分布不均匀. 就大洲而言, 2010 年各大洲陆表水域面积占全球陆表水域的比例依次为: 北美洲(41.62%)、亚洲

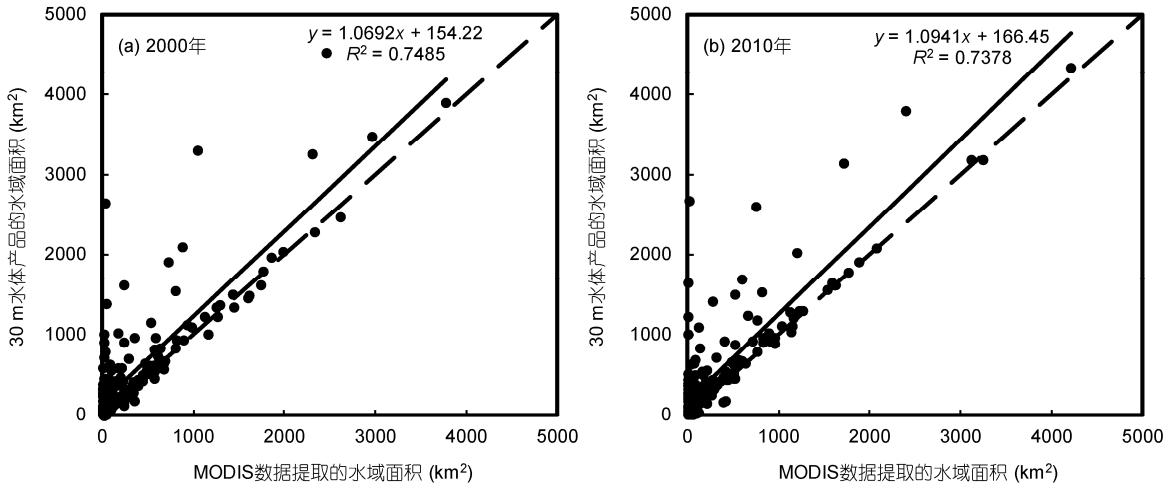

图 2　MODIS 提取的水域面积和 Global Land 30-water 水域面积的比较

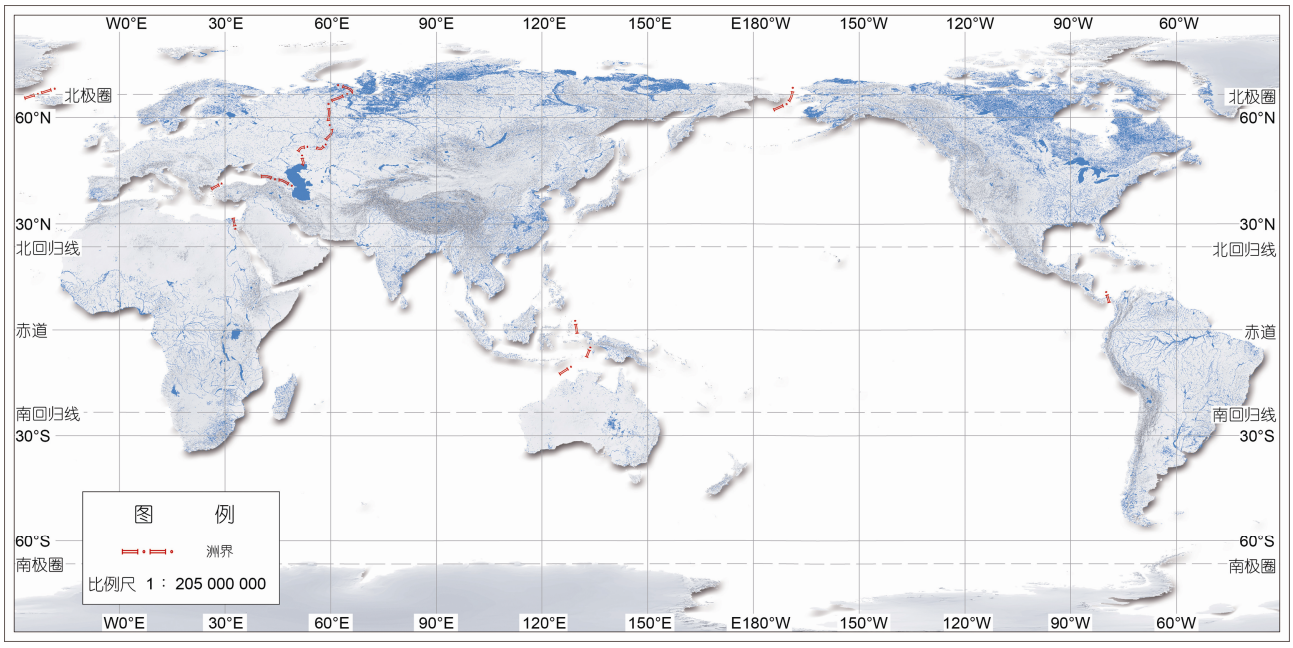

图 3　2010 年全球陆表水域分布图

(33.80%)、欧洲(8.59%)、非洲(7.40%)、南美洲(7.28%)和大洋洲(1.31%). 按照水域率排序, 则为北美洲、欧洲、亚洲、南美洲、非洲和大洋洲(表 1). 若以水域率的变异系数来看, 各大洲水域率变异系数大小排序为: 非洲、大洋洲、南美洲、亚洲、欧洲和北美洲(表 1), 表明北美洲陆表水域空间分布相对均匀, 非洲陆表水域空间分布最集中, 空间差异最大. 陆表水域的这种空间分布差异对水资源和生态环境均有一定的影响.

按照国家统计, 2010 年全球陆表水域面积排在前十位的国家或地区是: 加拿大、俄罗斯、美国、中国、巴西、哈萨克斯坦、坦桑尼亚、阿根廷、瑞典和芬兰. 这十个国家中, 加拿大水域率最高, 中国和阿根廷水域率最低(图 4). 水域率的高低, 在一定程度上反映着该国水资源丰缺程度.

2.2　水体分布格局的经纬向分析

图 5 显示了全球 2010 年水域率及水域面积和水

表 1　2010 年全球各大洲陆表水域面积及水域率统计

	水域面积(10^4 km^2)	占全球水域总面积的比例(%)	水域率(%)	水域率空间变异系数
全球	367.67	100.00	2.73	3.42
亚洲	124.28	33.80	2.79	3.71
欧洲	31.59	8.59	3.22	2.90
非洲	27.19	7.40	0.91	8.09
北美洲	153.02	41.62	6.28	2.29
南美洲	26.78	7.28	1.51	4.51
大洋洲	4.82	1.31	0.57	6.64

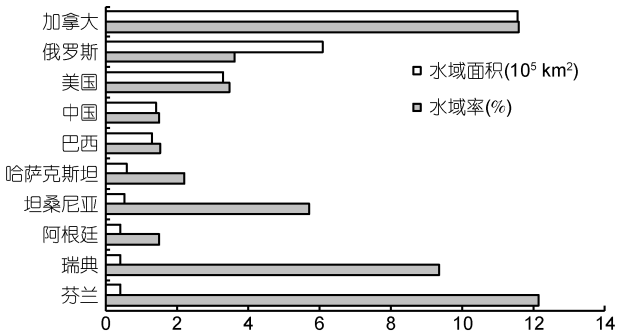

图 4　2010 年世界典型国家水域面积和水域率

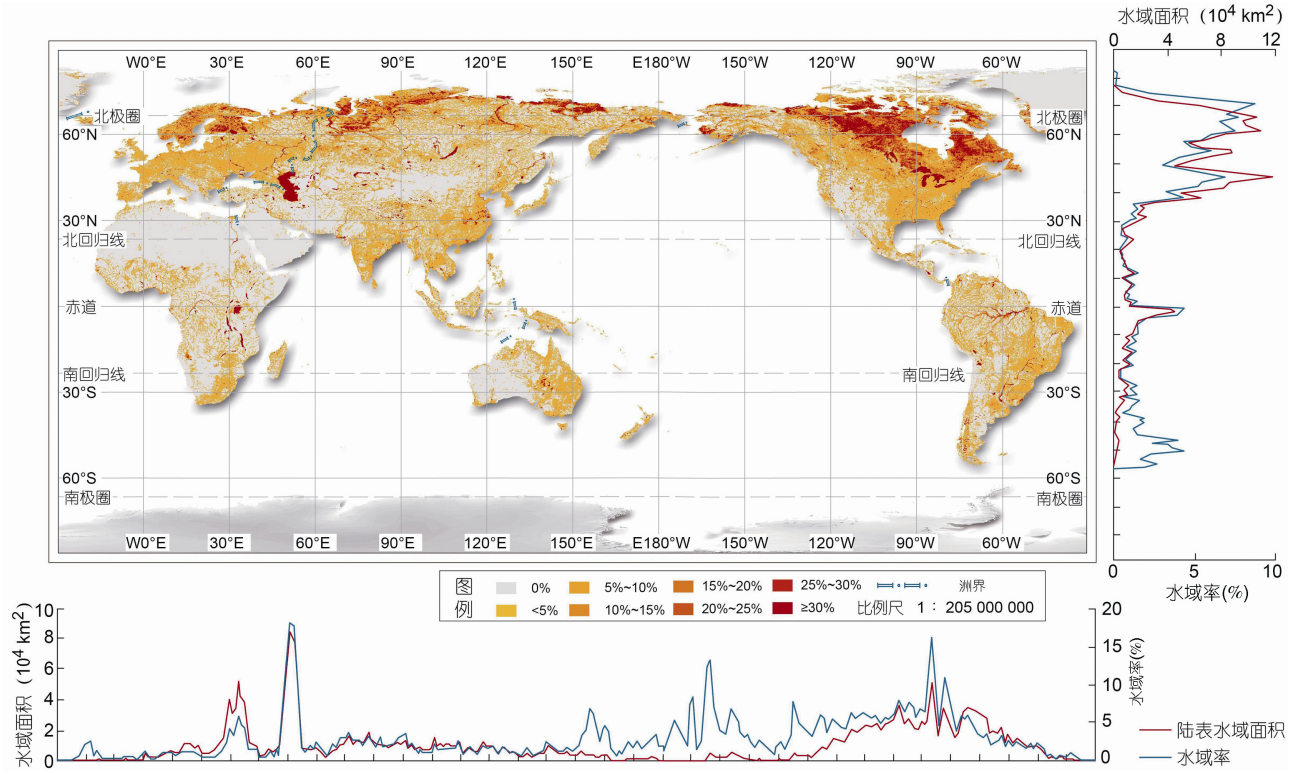

图 5　全球 2010 年水域率及沿纬向和经向水域面积和水域率分布图

域率沿经纬向的分布图. 从纬向看, 北半球陆表水域面积占全球的 86.73%, 水域率为 3.18%, 而其 30°~75°N 的中高纬度地区又集中了北半球水域面积的 91.08%. 里海、咸海和北美五大湖区等较大的湖泊分

布在 40°~50°N. 而南半球陆表水域面积仅占全球的13.27%, 水域率为 1.41%, 其中 59.91%的水体集中在赤道至 15°S 之间的热带区域, 水域率为 1.97%.

从经向看, 东西半球陆表水域面积基本相当, 东半球分布相对均匀; 西半球主要集中于 60°~140°W.

2.3 与现有地表覆盖产品的比较

与全球现有几套地表覆盖产品中水域面积统计结果(表 2)进行比较, 由于采用的数据源、数据时间、空间分辨率及分类体系、分类方法的不同而存在较大差异, 结果表明全球水域面积在 302×10^4~457×10^4 km^2. 总体而言, 在沿纬向分布的趋势上, Global Land 30-water 产品与其他几套产品保持了较高的一致性(图 6), 而 Global Land 30-water 产品的空间分辨率优势使得其结果更准确.

2.4 各大洲水体空间分布特征

2.4.1 亚洲

亚洲陆地面积占全球陆地面积的 33%, 居各大洲陆地面积第一位. 2010 年遥感监测的亚洲陆表水域面积为 124.28×10^4 km^2, 占全球陆表水域面积的33.80%, 居全球各大洲第二位. 其陆表水域分布具有北多南少、空间差异大、呈纬度地带性的特征. 60°~75°N 的高纬度地区是全洲水域率最高的区域, 水域率达 4.96%, 水域面积占全洲水域面积的比例为28.31%; 35°~48°N 中纬度地区的水域率次之, 平均为4.72%, 陆表水域面积占全洲陆表水域面积的 43.03%; 35°N 以南低纬度地区的水域率很低, 水域面积仅占全洲陆表水域面积的 17.31%, 水域率仅为 1.18%(图 7).

按国家统计, 2010 年水域面积排在亚洲前十位的国家或地区是: 中国、哈萨克斯坦、印度、土库曼斯坦、印度尼西亚、伊朗、乌兹别克斯坦、蒙古、土耳其和泰国. 其中, 土库曼斯坦因包括卡拉博加兹湾(约占其水域面积的一半), 水域率高达 4.92%, 而蒙古水域率仅为 0.93%. 需要说明的是, 里海水域面积为 36.15×10^4 km^2, 全部计入亚洲, 但未计入哈萨克斯坦、俄罗斯、土库曼斯坦、伊朗和阿塞拜疆等周边国家; 俄罗斯的亚洲部分水域面积很大, 但在按国家的统计中列入欧洲.

表 2 全球现有地表覆盖产品水域面积对比(单位: 10^4 km^2)

	GLC2000	GlobCover2005	GlobCover2009	UMD-1km	USGS-1km	GLWD
全球	364.11	326.15	304.80	456.96	349.37	302.63
亚洲	113.98	108.56	102.46	166.20	118.02	98.59
欧洲	28.12	26.18	22.52	44.00	34.89	23.32
非洲	31.49	30.57	29.87	47.58	36.03	30.75
北美洲	152.75	122.14	113.36	138.69	119.78	121.40
南美洲	27.13	27.25	26.28	36.10	33.87	26.12
大洋洲	10.64	11.44	10.32	24.39	6.77	2.46

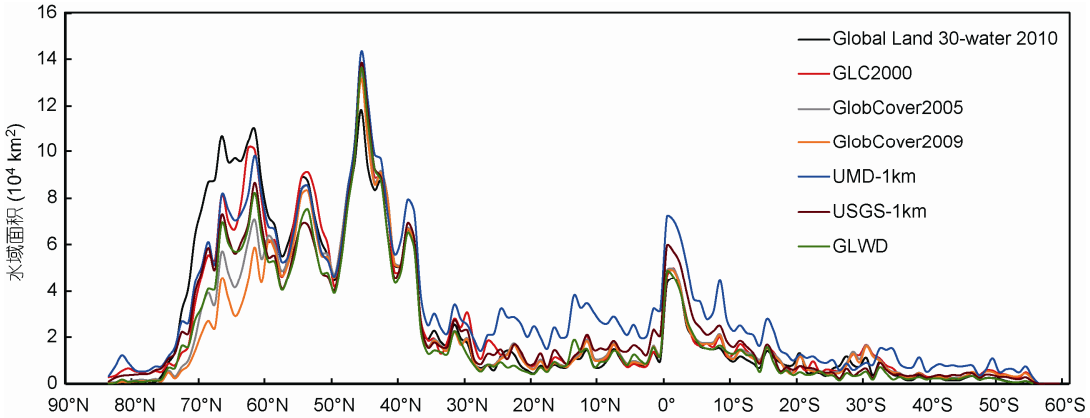

图 6 全球现有地表覆盖产品水域面积沿纬向分布图

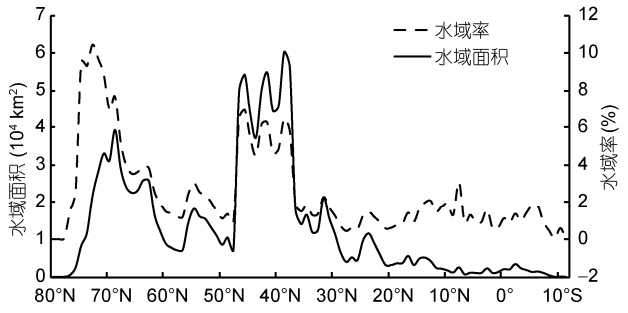

图 7　亚洲陆表水域面积和水域率纬向分布特征

2.4.2　欧洲

欧洲陆表面积占全球陆地面积的 7.4%, 2010 年遥感监测的欧洲陆表水域面积为 31.59×10^4 km^2, 水域面积占全球陆表水域面积的 8.59%, 水域率为 3.22%, 高于全球平均水平. 欧洲水体分布特点为: 北多南少, 呈纬度地带性分布. 56°N 以北的区域占全洲陆地面积的 40.39%, 水域面积占全洲陆表水域总面积的 72.68%, 水域率为 6.11%; 而 56°N 以南区域水域率仅为 1.40%. 水域率大的地区主要集中在北欧和俄罗斯北部, 以及乌拉尔山脉西麓至黑海的卡马河-伏尔加河和顿河干流沿线、东欧西南部的第聂伯河干流沿线. 其中, 北欧陆表水域主要为湖泊, 包括大型构造湖、冰碛湖、融冻湖等; 卡马河-伏尔加河、顿河、第聂伯河干流沿线以水库等人工水域为主.

按国家和地区行政单元统计, 2010 年欧洲水域面积较大的国家是: 俄罗斯、瑞典、芬兰、挪威、乌克兰、波兰、法国、德国、西班牙和罗马尼亚等. 其中, 芬兰水域率高达 12.16%, 而西班牙仅为 0.72%.

2.4.3　非洲

非洲陆地面积占全球陆地面积的 20%, 为世界第二大洲. 2010 年遥感监测的非洲陆表水域面积为 27.19×10^4 km^2, 仅占全球陆表水域面积总数的 7.40%, 水域率为 0.91%, 低于全球平均水平. 非洲水域分布呈现出中部多、南部次之、北部少的特征. 非洲中部的东非大裂谷沿线和赤道两侧水域分布集中, 水域面积和水域率均远高于全洲平均水平; 而面积约占全洲面积 1/3 的北部撒哈拉地区, 沙漠广布, 降水稀少, 水域面积仅占非洲水域总面积的 5.36%, 水域率多小于 0.1%, 是全球最缺水的地区.

按国家和地区行政单元统计, 水域面积排在前十位的国家或地区是: 坦桑尼亚、刚果(金)、乌干达、马拉维、赞比亚、肯尼亚、莫桑比克、尼日利亚、加纳和埃塞俄比亚. 其中, 马拉维水域率高达 17.89%, 埃塞俄比亚仅为 0.70%.

2.4.4　北美洲

北美洲陆地面积占全球陆地面积的 16.5%, 为世界第三大洲. 2010 年北美洲水域面积为 153.02×10^4 km^2, 约占全球陆表水域面积总数的 41.62%, 其水域率达到 6.28%, 远高于全球平均水平, 居全球各大洲之首. 北美洲水域总体特点为面积广、空间差异大. 其中, 40°~80°N 范围内, 陆表水域分布集中, 约占全洲水域面积总数的 94.23%, 水域率达 8.52%, 远高于全洲平均水平, 其中五大湖区是世界上最大的淡水湖群, 水域面积占北美洲水域面积的 14.65%. 落基山脉以西的美国西部大盆地及格陵兰岛水域相对较少, 水域率值低于 5%.

根据北美洲陆表水域遥感监测的结果, 水域面积排在前十位的国家或地区是: 加拿大、美国、墨西哥、格陵兰、尼加拉瓜、古巴、危地马拉、巴哈马、洪都拉斯和巴拿马. 其中, 加拿大水域面积最大, 水域率高达 11.60%, 是世界上水资源最为丰富的国家之一. 墨西哥水域率仅为 0.77%, 水资源较为短缺.

2.4.5　南美洲

南美洲陆地面积占全球陆地面积的 13%, 为世界第四大洲. 2010 年南美洲陆表水域面积为 26.78×10^4 km^2, 仅占全球陆表水域面积的 7.28%, 其水域率为 1.51%, 低于全球陆表平均水域率水平. 南美洲水体分布呈现为整体水域率较低、空间分布集中的特点. 根据南美洲水域率统计, 水域率小于 2%的区域最广, 遍布大洲, 占全洲陆地面积的 88.72%, 主要分布在安第斯山脉以西及巴西高原等区域. 水域率大于 5%的区域占全洲陆地面积的 6.32%, 而其水域面积约占全洲水体总面积的 80%, 主要集中在亚马孙河流域和巴拉那-拉普拉塔河流域、的的喀喀湖和波波湖区域, 以及南端的巴塔哥尼亚高原. 其中, 亚马孙河流域地处热带雨林及热带季风气候区, 降水充沛, 河网密集, 水域率高; 巴拉那-拉普拉塔河流域属亚热带湿润气候, 其下游地形开阔, 水域面积较大; 巴塔哥尼亚高原分布有众多冰蚀湖、冰碛湖, 构成南美洲重要的湖泊群.

按国家和地区行政单元统计, 南美洲 2010 年水

域面积排在前十位的国家或地区是: 巴西、阿根廷、玻利维亚、秘鲁、委内瑞拉、智利、哥伦比亚、乌拉圭、巴拉圭和苏里南. 巴西是全球水资源最丰富的国家之一, 其北部的亚马孙流域水域率较高, 而东北部和中西部地区, 水域率较低.

2.4.6 大洋洲

大洋洲陆地面积占全球陆地面积的 6%, 居各大洲之末. 大洋洲陆表水域分布与其他洲相比较稀少, 水域率为 0.57%, 为全球陆表水域率最低的大洲. 大洋洲陆表水域呈整体较低、东多西少的格局. 沿经度统计水体分布格局, 135°E 以东的区域占全洲陆地面积的 54.79%, 水域面积占全洲水域总面积的 87.45%, 平均水域率为 1.12%; 而 135°E 以西的区域平均水域率仅为 0.20%. 根据水域率分布统计, 水域率为 0 的区域主要分布在澳大利亚中西部荒漠地区, 占大洋洲陆表面积的 56.06%. 水域率小于 2%的区域遍布澳大利亚、巴布亚新几内亚及新西兰, 占 39.31%. 水域率 2%~5%的区域零星分布于澳大利亚中东部、中西部和东南部, 占 2.32%. 水域率 5%以上的区域主要分布在澳大利亚墨累-达令河流域、西北部的阿盖尔湖、中东部湖泊群, 占 2.31%.

根据大洋洲水体遥感监测的结果, 水域面积前五位的国家或地区是: 澳大利亚、巴布亚新几内亚、新西兰、斐济和新喀里多尼亚. 澳大利亚虽然有较大的水域面积, 但水域率仅为 0.53%.

3 2000/2010 年两期波动情况分析

3.1 总体波动情况

2000/2010 年两期监测结果的比较显示, 2000 年全球陆表水域总面积为 374.19×10^4 km^2, 水域率为 2.78%; 2010 年全球陆表水域总面积为 367.67×10^4 km^2, 水域率为 2.73%, 两期水域面积总体波动较小. 按大洲分析, 各大洲陆表水体面积排序基本不变, 但各大洲水体面积波动差异明显(表 3). 其中, 大洋洲波动最大, 水域面积差异率达–24.06%; 南美洲、非洲和欧洲差异率分别为–7.49%, –5.22%和–3.12%; 亚洲和北美洲波动较小, 分别为–0.58%和–0.14%.

3.2 各大洲水体波动情况

从各大洲水体波动情况的空间分布来看(图 8), 亚洲水体波动较大的区域位于俄罗斯西伯利亚、南亚印度河流域下游、中国青藏高原及长江中下游区域等. 总体上看, 亚洲高海拔、高纬度地区水体波动较大. 欧洲波动主要发生欧洲北部地区. 斯堪的纳维亚半岛水域率增大和减小的面积大体相抵, 芬兰南部和俄罗斯联邦(欧洲)北部则水域率减小的面积比增大的面积要大. 非洲波动明显的区域主要分布于东非东南部、中非中部、西非中西部、南非北部以及北非埃及东南部. 根据各气候分区水域率差值图, 上述水体波动大的区域主要位于热带干湿季气候区、草原气候区和冬干温暖气候区.

北美洲波动较大的区域主要位于常湿冷温气候区和苔原气候区, 包括加拿大的西北地区、艾伯塔州东北部、萨斯喀彻温州北部、马尼托巴州大部、魁北克州以及美加交界的五大湖区域. 整体来看, 水体波动减少和增加的区域大致相当. 南美洲大部分气候分区的水体波动不大. 其中位于草原气候区的秘鲁、位于常湿温暖气候区的阿根廷中部地区水域率略有减少, 位于热带干湿季的气候区的委内瑞拉、位于常湿温暖气候区的巴西南部与巴拉圭交界处的巴拉圭河流域水域率有所增加. 大洋洲水体波动主要集中在澳大利亚中部区域, 大部分区域水域面积变化不大, 但由于大洋洲总体水域面积很小, 因此较小的波动也会产生较大的变化率.

表 3 Global Land 30 产品 2000/2010 年全球水域面积及在各大洲的分布

	2000 年水域面积 (10^4 km^2)	2000 年平均水域率 (%)	2010 年水域面积 (10^4 km^2)	2010 年平均水域率 (%)	两期水域面积差值 (10^4 km^2)	相对变化率(%)
全球	374.19	2.78	367.67	2.73	–6.52	–1.77
亚洲	125.00	2.81	124.28	2.79	–0.72	–0.58
欧洲	32.58	3.32	31.59	3.22	–0.99	–3.12
非洲	28.61	0.96	27.19	0.91	–1.42	–5.22
北美洲	153.23	6.29	153.02	6.28	–0.21	–0.14
南美洲	28.79	1.62	26.78	1.51	–2.01	–7.49
大洋洲	5.98	0.71	4.82	0.57	–1.16	–24.06

3.3　气候区水体波动分析

根据两期水域面积按气候区统计分析(表 4), 冰原气候区(–14.18%)、常湿温暖气候区(–5.57%)、冬干冷温气候区(4.65%)、苔原气候区(4.13%)、热带季风气候区(–3.80%)水域率波动较大, 地中海式气候区和草原气候区的波动较小(均小于 1%).

4　讨论与结论

通过以 30 m 分辨率的遥感影像数据为主、500 m 遥感影像数据为辅, 形成了全球两期陆表水体数据集(Global Land 30-water 2000 和 Global Land 30-water 2010), 并生成了水域面积、水域率等统计数据. 这些数据为分析全球陆表水体空间分布格局、揭示其地域差异、研究时空波动规律以及诊断生态环境健康提供了重要基础数据. 通过在全球、经纬度、大洲、国家及气候分区的多级分析, 揭示了陆表水域分布及动态变化的空间特征.

遥感监测结果显示, 2010 年全球陆表水域总面积为 367.67×10^4 km^2, 占全球陆表面积的 2.73%. 全球各大洲水域面积从大到小依次为北美洲、亚洲、欧洲、非洲、南美洲和大洋洲; 水域率从高到低依次为

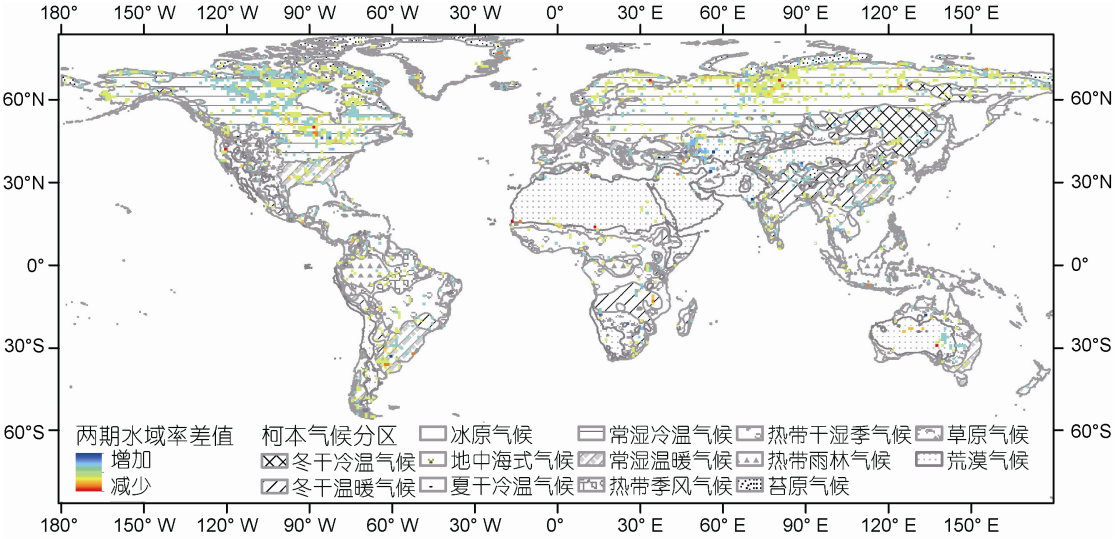

图 8　全球两期陆表水域率波动的空间分布

表 4　全球柯本气候区水域面积及水域率统计

气候分区	2000 年		2010 年		两期水域面积差值 (10^4 km^2)	相对变化率(%)
	水域面积 (10^4 km^2)	水域率 (%)	水域面积 (10^4 km^2)	水域率 (%)		
冬干冷温气候	10.90	1.81	11.43	1.90	0.53	4.65
冬干温暖气候	11.79	1.60	11.43	1.55	–0.36	–3.12
冰原气候	0.06	0.04	0.05	0.03	–0.01	–14.18
地中海式气候	8.78	3.17	8.83	3.19	0.05	0.59
夏干冷温气候	6.70	4.49	6.63	4.44	–0.07	–1.06
常湿冷温气候	180.05	6.27	174.06	6.06	–5.99	–3.44
常湿温暖气候	18.81	2.02	17.82	1.91	–0.99	–5.57
沙漠气候	29.49	1.09	28.68	1.06	–0.81	–2.82
热带季风气候	10.66	2.18	10.27	2.10	–0.39	–3.80
热带干湿季气候	20.74	1.24	20.35	1.22	–0.39	–1.91
热带雨林气候	10.31	1.71	10.24	1.70	–0.07	–0.64
苔原气候	37.51	7.63	39.13	7.96	1.62	4.13
草原气候	28.40	1.64	28.63	1.66	0.23	0.80

北美洲、欧洲、亚洲、南美洲、非洲和大洋洲. 水域面积最大的五个国家为加拿大、俄罗斯、美国、中国和巴西. 陆表水体空间分布极为不均, 主要集中于北半球的中高纬度地区和热带地区. 通过与生态地理气候分区资料的比对分析发现, 陆表水体主要分布在中高纬度常湿冷温气候区和降水丰沛、有江河补给、地势低洼的低纬度热带气候区. 陆表水体的分布格局是降水空间分布、洋流和地形地貌因素共同作用的结果. 对比 2000 与 2010 年两期的水域面积差异, 总体波动不大, 但是区域差异较明显. 按气候区分析, 冰原气候区和常湿温暖气候区水域面积波动较大, 而地中海式气候区和草原气候区的波动较小. 水域率波动则与全球变暖、降水空间格局的波动及地形等因素有密切的联系.

值得指出的是, 由于陆表水域的动态特征, 通过遥感监测获取的水域面积只是水资源在特定时态下的一种表征, 不能直接反映地表水资源量; 两期陆表水体数据产品所体现的差异只反映两个独立年份的气候条件和水循环过程的差异, 不能代表水域面积的变化趋势, 如果要分析全球陆表水域的变化趋势, 需要连续长时间序列的数据产品支撑. 因此, 开展陆表水域高空间分辨率、长时间序列持续测定的工作, 并结合全球气候变暖及热点地区土地利用和人类活动强度的变化, 分析其动态变化的原因和影响, 是下一步研究的方向.

致谢 本文得到国家遥感中心李加洪总工、张松梅博士、卢麾博士等的大力支持和协助; 中国气象局国家卫星气象中心、环境保护部卫星环境应用中心等为本研究提供了部分参考数据; 在本文成文过程中, 得到王光谦院士、田国良研究员、武国祥研究员、刘闯研究员、高志海研究员等专家的指导并提出若干修改意见, 在此一并感谢.

参考文献

陈军, 陈晋, 宫鹏, 等. 2011. 全球地表覆盖高分辨率遥感制图. 地理信息世界, 2: 12–14

Alsdorf D E, Lettenmaier D P. 2003. Tracking fresh water from space. Science, 301: 1491–1494

Foley J A, Gregory R D, Barford C, et al. 2005. Global consequences of land use. Science, 309: 570, doi: 10.1126/science.1111772

Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, et al. 2002. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. Remote Sens Environ, 83: 287–302

Fritz S, Bartholomé E, Belward A, et al. 2003. Harmonisation, Mosaicing and Production of the Global Land Cover 2000 Database (Beta Version). Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. EUR 20849 EN, 41

Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. Int J Remote Sens, 21: 1331–1364

Loveland T R, Reed B C, Brown J F, et al. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. Int J Remote Sens, 21: 1303–1330

Oki T, Kanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. Science, 313: 1068, doi: 10.1126/science.1128845

Papa F, Prigent C, Aires F, et al. 2010. Interannual variability of surface water extent at the global scale, 1993–2004. J Geophys Res, 115: D12111, doi: 10.1029/2009JD012674

Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. 2007. Updated world map of Köppen-Geiger climate classification. Hydrol Earth Syst Sci, 11: 1633–1644

Prigent C, Matthews E, Aires F, et al. 2001. Remote Sensing of global wetland dynamics with multiple satellite date sets. Geophys Res Lett, 28: 4361–4364

Prigent C, Papa F, Aires F, et al. 2007. Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000. J Geophys Res, 112: D12107, doi: 10.1029/2006JD007847

Prigent C, Papa F, Aires F, et al. 2012. Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. Geophys Res Lett, 39: L08403, doi: 10.1029/2012GL051276

Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. Science, 289: 284–288

Wood E F, Roundy J K, Troy T J, et al. 2011. Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. Water Resour Res, 47: W05301, doi: 10.1029/2010WR010090