中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 8 期: 1634 ~ 1645
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

全球陆表水体高分辨率遥感制图

廖安平[①], 陈利军[①*], 陈军[①], 何超英[①], 曹鑫[②], 陈晋[②], 彭舒[①], 孙芳蒂[③], 宫鹏[④]

① 国家基础地理信息中心, 北京 100830;
② 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;
③ 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;
④ 清华大学地球系统科学中心, 北京 100084
* 联系人, E-mail: chenlj@nsdi.gov.cn

收稿日期: 2013-10-10; 接受日期: 2014-03-12; 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, 2009AA122003)资助

摘要 陆表水体是地表覆盖的重要组成之一, 是气候变化研究、生态环境评估和宏观调控分析等不可或缺的重要基础信息. 本文介绍了全球地表覆盖遥感制图项目中陆表水体总体研制情况. 项目通过收集、处理美国陆地卫星 Landsat TM/ETM+、国产环境减灾星(HJ-1)等影像, 实现了 2000 年、2010 年两个基准年度的全球 30 m 分辨率多光谱影像的有效覆盖, 影像纠正精度满足 1∶20 万制图要求, 两期影像配准中误差控制在 1 个像元以内. 根据 30 m 分辨率尺度的水体光谱特征与几何形态, 合理地设计提取指标, 结合基于像元分类法简单易操作、面向对象分类法可综合利用各种规则知识的优势, 开展水体信息的精细化提取, 最后利用人机交互来进一步优化完善分类结果, 实现全球水体的高精度遥感制图. 完成的全球陆表水体数据成果 GlobalLand30-water 2000 和 GlobalLand30-water 2010, 属目前全球尺度下最高分辨率的分类成果, 自评估总体精度为 96%. 该数据是开展全球陆表水体空间分布格局分析、揭示地域差异、研究时空波动规律以及进行生态环境健康诊断等相关研究工作的重要基础数据.

关键词
全球地表覆盖
陆表水体
30 m 分辨率
分类方法
遥感制图

地表覆盖(Land Cover)是指地球表面各种物质类型及其自然属性与特征的综合体, 其空间分布直接影响着地球表面的物质和能量循环过程, 时间变化则综合反映着人类活动和气候变化对自然环境的影响(Bartholomé 和 Belward, 2005; Defourny 等, 2006). 目前, 国际上已研制了 6 套全球地表覆盖数据, 其中 4 套全球 1 km 地表覆盖数据分别由美国地质调查局(USGS) (Loveland 等, 2000)、马里兰大学(UMD) (Hansen 等, 2000)、波士顿大学(BU)(Friedl 等, 2002)和欧盟委员会联合研究中心(Fritz 等, 2003)等研究机构开发, 欧洲空间局通过全球合作完成了 2005 年和 2009 年 300 m 分辨率的全球地表覆盖数据(GLOBCOVER). 总体而言, 已有 6 套全球地表覆盖数据产品的分类系统、分类精度和更新频率等不能满足全球变化与地球系统模式研究的需要. 国际社会将研制更高空间和时间分辨率的全球地表覆盖数据提上议事日程. 对地观测组织(GEO)第七次全会通过的“北京宣言”明确提出要合作研制高空间分辨率的全球地表覆盖数据产品,

中文引用格式: 廖安平, 陈利军, 陈军, 等. 2014. 全球陆表水体高分辨率遥感制图. 中国科学: 地球科学, 44: 1634–1645
英文引用格式: Liao A P, Chen L J, Chen J, et al. 2014. High-resolution remote sensing mapping of global land water. Science China: Earth Sciences, 57: 2305–2316, doi: 10.1007/s11430-014-4918-0

并将其列入了 GEO 2012~2015 年工作计划. 我国于 2009 年 7 月启动了国家高技术研究发展计划重点项目“全球地表覆盖遥感制图与关键技术研究”, 项目的主要研究任务是利用空间分辨率为 30 m 的多光谱遥感影像, 开展 2000 年和 2010 年两个基准年陆表水体、湿地、人造覆盖、农田、林地、草地和灌木等十个主要类别的遥感制图, 研制出空间分辨率为 30 m 的两期全球地表覆盖数据产品(陈军等, 2011; 陈军等, 2012).

就全球陆表水体提取而言, 波士顿大学曾利用 MODIS 影像提取了 1 km 分辨率的陆表水体掩膜栅格数据, 水体中的河网存在明显的不连续分布现象(Friedl 等, 2002); 世界自然基金会(WWF)和德国 Kassel 大学利用 MGLD、DCW 等数据库编辑生成的全球湖泊湿地数据库(GLWD), 较粗略地反映了全球水体的分布情况(Lehner 和 Doell, 2004). 近年来, 国际上一些组织和研究机构开始研究提取较高空间分辨率的全球陆表水体数据, 如 NASA-JPL 2005 年利用 90 m 格网间距的 SRTM 数据, 生成了全球陆表水体矢量数据(SWBD2005), 但受 SRTM 数据范围所限, 未能覆盖全球; 马里兰大学 2005 年在 SWBD2005 数据的基础上, 利用 250 m MODIS 影像的解译成果, 生成了全球 250 m 陆表水体掩膜栅格数据(Carroll 等, 2009). 目前, 国内外一些学者在 30 m 空间分辨率水体提取主要集中在分类算法研究和局部试验上, 尚未开展全球范围的陆表水体 30 m 遥感制图(Xu, 2006; Sheng 等, 2008; Michishita 等, 2012)工作.

2013 年初, 我国完成了全球陆表水体高分辨率遥感制图的研究工作, 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(GlobalLand30-water 2000 和 GlobalLand30-water 2010).

1　水体提取技术流程

根据项目的分类系统设计, 本次地表覆盖遥感制图中的水体类型是指在地表由天然或人工形成的水的液态聚积体, 且其表面无植被覆盖, 包括河流(运河)、湖泊、水库等, 其他如海洋、冰雪、湿地和水田等不属于本项目的水体类型.

水体遥感制图的难点主要由光谱多样性、形态多样性和季节变化因素引起. 就清澈水体而言, 其光谱反射率低于其他地物, 较好区分; 但在全球尺度下, 水体的光谱特征复杂多样, 单一水体提取算法没有普适性, 无法保障全球不同区域的制图精度. 如浅水河流或泥沙含量较高的水体往往混有裸土的光谱信息, 富营养化的水体往往混有植被的光谱信息(图 1), 高纬度地区受太阳高度角影响水体与山体阴影的低反射特征极易混淆等. 水体包括面状、线状和辫状等不同的形态, 同时随年份、季节波动, 造成水体在不同区域和不同时相影像上往往形成迥异的特征(图 2), 对特征提取、样本选取和质量控制等提出了较高要求, 使得全球陆表水体信息提取的技术更加复杂.

对利用 30 m 空间分辨率遥感影像提取水体, 目前主要的分类算法有: (1) 单波段阈值法, 利用水体在近红外波段(NIR)具有较强吸收的光谱特征, 通过设定阈值来提取水体(Rundquist 等, 1987; Work 和 Gilmer, 1976); (2) 水体指数法, 主要利用绿光、NIR 及中红外(MIR)等特征波段构建水体指数, 包括简单比值指数(Jordan, 1969)、NDWI 指数(McFeeters, 1996)、MNDWI 指数(Xu, 2006; 徐涵秋, 2005)等, 通过设定阈值来提取指数; (3) 基于统计和机器学习的分类方法, 包括非 ISODATA(Sivanpillai 和 Miller, 2010)监督分类、最大似然法监督分类(Sheng 等, 2008)



(a) 理想状态, 较清澈河流　(b) 浅水河流, 混合裸土特征　(c) 有植被混合的水体

图 1　不同类型水体的遥感影像

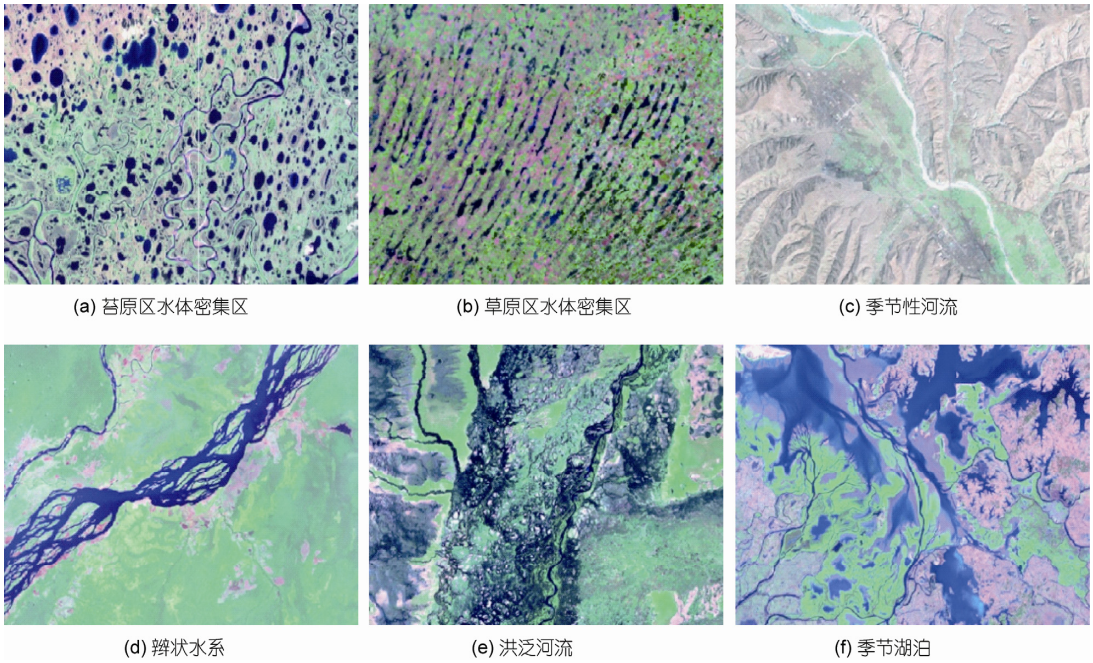

图 2　全球水体影像特征的复杂性

等; (4) 基于先验知识的决策树分类方法, 如对特征波段、指数或辅助信息设置判别函数来提取各种水体(曹凯等, 2005; 徐金鸿和陈淑娟, 2008)、根据 99.2%的水体分布于坡度小于 8°的区域(牛振国等, 2009)去剔除阴影(Sun 等, 2012); (5) 面向对象的方法, 利用水体在空间上连续分布特征的对象尺度提取(Blaschke, 2010; 骆剑承等, 2009)以及考虑目标紧凑度、平滑度或连通性等特征的提取方法(Frohn 等, 2005; Van der Werff 和 Van der Meer, 2008).

需要指出的是, 这些水体提取方法大多只能在特定影像条件或局部区域得到好的分类效果, 当面对全球多源分类基础影像、复杂多样的水体光谱特性和几何形态时, 简单套用某一方法在全球区域应用难以取得好的分类结果. 针对这一挑战, 全球陆表水体 30 m 遥感制图采取了多分类方法组合集成的分类提取流程(图 3). 其根据 30 m 分辨率尺度的水体光谱特征与几何形态, 合理设计提取指标, 结合基于像元分类法简单易操作、面向对象分类法的可综合利用各种规则知识的优势, 开展水体信息的精细化提取, 最后利用人机交互来进一步优化完善分类结果, 实现全球水体的高精度遥感制图. 根据 30 m 分辨率尺度遥感影像的水体特征, 参考 1∶10 万、1∶25 万地形图图式中关于水体的制图要求, 制定了水体分类提取的有关指标要求. 主要包括用于控制水体提取详细程度的最小图斑和用于质量控制错漏提指标等. 面状水体的最小提取图斑为 3×3 像元, 线状水体提取的最小宽度为 3 个像元. 每景影像的错漏提等具体指标见表 1~3.

2　全球影像与参考资料处理

2.1　全球两期 30 m 分类影像收集与处理

全球两期 30 m 水体遥感制图所采用的遥感影像数据主要是 Landsat TM/ETM+影像和中国环境减灾卫星(HJ-1)影像, 其中 Landsat 影像在波段数量、图像质量和分类效果等各方面具有优势, 将其作为 2000 和 2010 基准年的主要分类影像, 利用环境减灾星影像(HJ-1)对 2010 基准年的 Landsat 影像未覆盖区域进行补充, 实现全球 2 期 30 m 多光谱影像的有效覆盖. 在影像选择上遵循以下原则: 优先选择云量小于 20%、

表 1　每景影像面状水体允许的最大漏提图斑数量

面积大小(A)	一般区域	水网密集区、城区	干旱地区、农田密集区
$A \geqslant 4\times4$ 像元	0	0	0
$A < 4\times4$ 像元	2	4	1

表 2　每景影像线状水体的漏提指标

宽度(W)	$W\geqslant 3$ 像元	2 像元$\leqslant W<3$ 像元
提取指标	水体应连续	允许局部区域水体不连续

表 3　每景影像水体最大错分指标

面积(A)	一般区域	70%以上为山区或城区影像
$A<4$ 像元	3	5
$A\geqslant 4$ 像元	0	0

且为植被生长季的影像(北半球 4~9 月、南半球 10~3 月), 影像的时相不超过基准年度前后三年.

所有 Landsat TM/ETM+影像从 EROS Data Center 下载, L1T 处理级别, 该级别产品平面中误差为 75 m. 经逐景精度检查, 对精度超限 171 景重新做了纠正. 我国的 HJ-1 影像属宽视场遥感影像, 根据其成像特点研究提出了基于拉格朗日函数内插的共线方程定向模型, 综合考虑了卫星轨道拟合、姿态拟合与镜头畸变改正等问题, 保障了全球 HJ-1 影像的高精度几何纠正. 经检查、重纠正处理后的 2 期 Landsat TM/ETM+影像间的配准中误差优于 1 个像元, Landsat TM/ETM+与 HJ-1 遥感影像间配准中误差优于 1.5 个像元. 利用 1∶5 万 DOM(我国境内)和高分辨率卫星影像(境外地区), 在全球范围内均匀采集了 286 个检查点进行全球 30 m 影像的几何纠正精度评估, 相对于检查点的平面中误差为 31.23 m, 最大误差为 61.76 m. 可以看出, 用于全球水体提取的 30 m 遥感影像, 其空间定位精度达到 1∶20 万制图要求.

Landsat TM5 卫星因老化影响全球覆盖能力降低, 造成 2010 基准年的全球 30 m 影像获取极其困难. 为了实现 2010 基准年的全球 30 m 多光谱影像有效覆盖, 需要利用存在条带缺失的 Landsat 7 ETM+数据. 研究提出了邻近相似像元插补算法, 算法根据邻域里同类像元具有相似光谱特征、邻域内同类像元谱随时间变化相似等假设条件, 通过设置合理的时空距离权重来计算插补像元的光谱修正值, 准确恢复出了缺失影像的像元值, 实现了多光谱影像的高精度插补. 通过使用与 Landsat 7 ETM+ SLC-off 条带空间位置对应的 TM/ETM+区域中光谱相似度最高的像元进行插补(Chen 等, 2011), 得到条带修复后的 Landsat 7 ETM+影像 1354 景.

经过优选和处理, 实现了两期全球 30 m 分类影像的有效覆盖. 2000 基准年包括 Landsat TM、ETM+影像共计 10270 景. 2010 基准年包括 Landsat TM、ETM 影像 9907 景、HJ-1 影像 2640 景, 其中 HJ-1 影像主要作为云雪及漏洞区的补充影像.

2.2　参考资料的收集与处理

为了提高水体解译的精度, 收集了全球 1∶100 万基础地理底图数据库(河流、湖泊层)、4 套全球 1 km 地表覆盖产品与 2 套全球 300 m 分辨率地表覆盖产品、全球 250 m 陆表水体掩膜栅格数据、全球 90 m SRTM 和 30 m ASTER GDEM、全球湖泊湿地数据等参考数据, 局部区域还收集了 30 m 分辨率的地表覆盖数据, 如欧洲 CLC(Corine Land Cover)、USGS 的 NLCD(National Land Cover Dataset)和中国土地利用

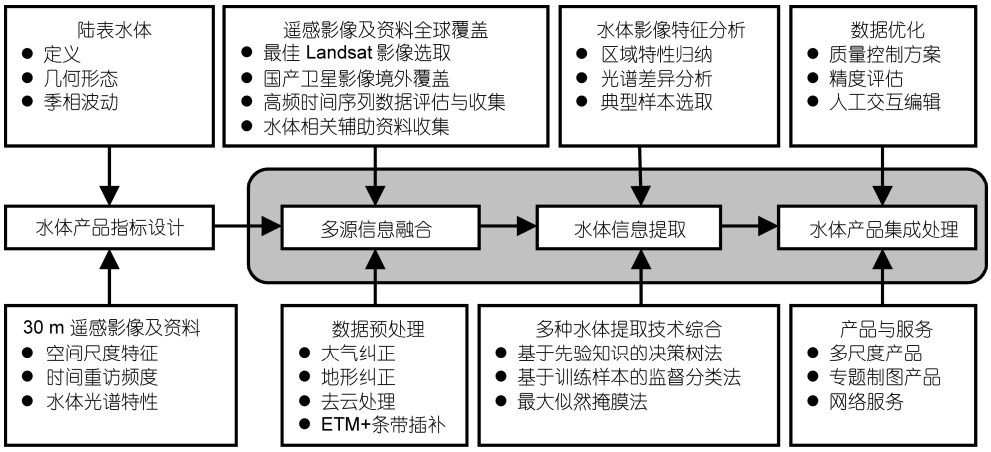

图 3　全球水体提取技术路线

数据等.

通过分析对比, SRTM 90 m DEM 整体质量优于 30 m ASTER GDEM 数据. 在全部利用 SRTM DEM 的基础上(60°N~56°S), 对其未能覆盖地区(83°~60°N, 56°~83°S)利用 30 m ASTER GDEM 作为补充, 得到覆盖全球的 DEM 数据. DEM 主要利用其计算地面坡度数据, 作为面向对象水体提取及质量检查时的基础数据.

收集的全球其他不同尺度、不同精度的地表覆盖数据和 1∶100 万等数据主要作为参考资料利用. 参考资料的处理过程包括坐标转换、类型转换、精度评估等过程, 主要用于辅助技术人员判别水体类型. 对于分辨率一致、精度较高的局部地表覆盖数据, 如 CLC, NLCD 和中国土地利用数据等, 如采用集成优化的方法, 通过调整水体图斑轮廓使结果与基准影像水体范围相匹配.

3 水体信息提取

为提高水体提取精度、减少人工工作量, 从像元提取、对象过滤和人机交互编辑等三方面进行了细化研究, 从而保障多分类方法组合集成的水体提取流程能够实现, 各环节能够进行严密的质量控制. 在分析比较不同水体遥感提取自动分类算法的基础上, 根据全球不同区域水体的光谱特征(纯净的水、带泥沙混浊的水及富营养化的水)和时空特征(几何形态和时相差异), 研究制定了监督分类法、基于先验知识决策树提取法、最大似然掩膜提取法等三种基于像元的自动分类方法, 用于全球水体遥感制图的分景水体提取工作. 对于自动分类的结果, 利用 eCognition 软件的分割对象进行图斑过滤, 滤除细碎图斑, 消除椒盐效应, 得到基于对象的水体分类结果; 同时利用知识规则通过空间运算快速定位可能存在质量问题的图斑, 用于人工核查处理. 通过建立便捷的人机交互环境, 对基于对象的水体分类结果进行逐景检查与编辑, 包括逐一图斑核查、图斑协调、分景接边等工作, 得到高精度的分景水体成果. 其流程与方法见图 4 所示.

3.1 水体影像特征分析

(1) 水体光谱特征分析. 根据水体反射光谱曲线的表现形式, 可将水体大致分为 3 种类型: 纯净的水、富营养化的水及含泥沙浑浊的水三类, 其中纯净的水体在 TM/ETM+7, 4, 3 波段合成的影像上呈现深蓝色, 且在各个波段光谱高吸收、低反射, 光谱曲线整体很低; 含泥沙浑浊的水体在 7, 4, 3 合成的影像上呈现浅蓝色, 由于河流泥沙反射的原因, 使得光谱反射率比纯净的水体要高, 从 1 波段到 4 波段反射率逐渐增高, 5 波段和 6 波段反射率骤降, 致使诸如浅水河流等水体与周边裸土容易混淆, 边界不明显; 富营养化的水体在 4, 3, 2 波段合成的图像上偏红, 与植被的光谱相似, 在波段 3 有吸收谷, 波段 4 有反射峰, 但和植被相比, 整体的反射较低.

(2) 水体时空特征分析. 水体是波动性较大的地表覆盖类型, 通过遥感技术手段获取的图像只能表现在某一特定时态下的水体信息. 受全球遥感影像获取能力所限, 难以统一全球 30 m 遥感数据的获取时相(Gong 等, 2013), 使得水体在不同时相影像上的特征迥异(如丰水期和枯水期的河流特征), 造成同一水体的时空信息差异较大.

3.2 基于像元的水体遥感提取

针对全球陆表水体的光谱差异、尺度差异和时相差异等问题, 在现有水体遥感提取算法的基础上, 研究制定了基于先验知识的决策树水体提取方法、最大似然掩膜的水体提取方法和基于训练样本的监督分类方法等综合提取方法作为水体自动提取的推荐方法. 技术人员可根据分类影像上的水体分布、水体特征等实际情况, 选择效率最高、精度最高的方法应用.

(1) 基于先验知识的决策树水体提取方法. 根据水体反射曲线的表现特征, 从光谱差异角度出发, 通过利用指数、设定阈值、坡度过滤等决策树方法, 分别对各种类型的水体进行提取(Sun 等, 2012). 首先, 利用纯净的水体在 TM/ETM+影像中的反射率特征是随着波长增加而降低的特点, 通过设置波段 2>波段 5, 且波段 2 小于某一阈值, 即可提取出纯净的水体. 然后, 利用富营养化水体的波谱反射率最高值在波段 4 的特性, 同时又远低于植被类型, 通过设置反射率最高值在波段 4 且小于一定阈值既可以提取富氧化的水体. 为了去除与水田的混淆, 可以利用 NDVI 来进一步优化结果. 最后, 利用含泥沙浑浊水体的反射率最高值在波段 5 上同时又远小于裸土或者是居民地的特性, 通过设置反射率最大值为波段 5 且小于一定数值即可以提取含泥沙浑浊的水体.

(2) 基于谱间关系和缨帽变换湿度分量的最大

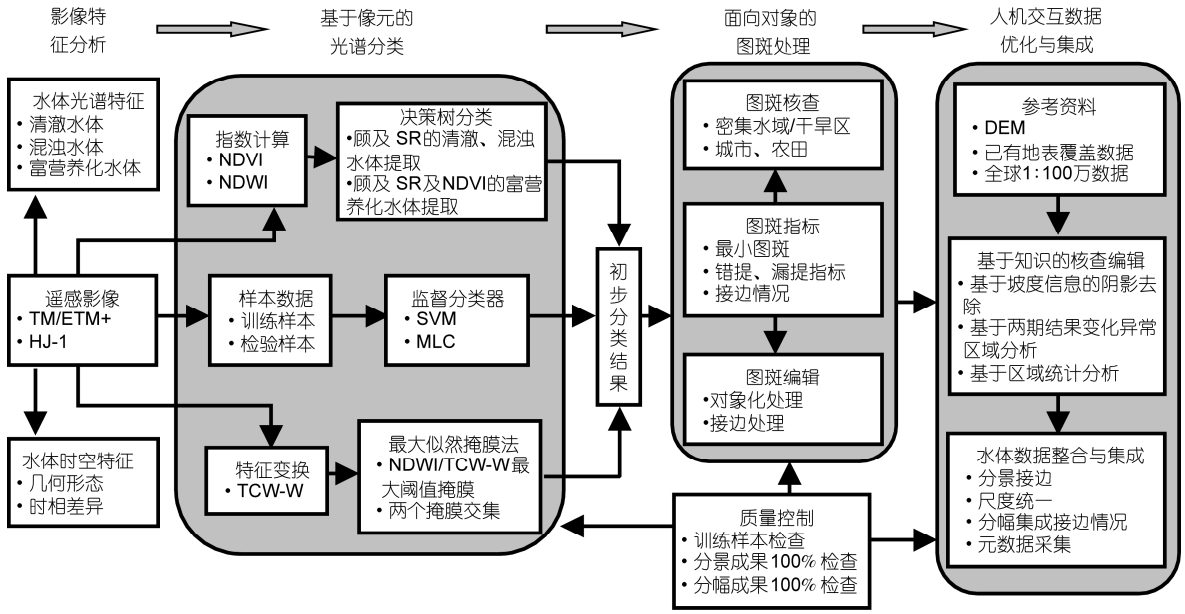

图 4　全球水体提取方法示意图

似然掩膜法. 在区域地物类型复杂的情况下, 针对河网支流和细小水体信息无法准确提取的缺点, 利用谱间关系(波段 2+波段 3)-(波段 4+波段 5)和缨帽变换湿度分量 TCW 建立提取水体的最优空间掩膜(吴文渊等, 2008), 即取农林地和山体区域提取水体较好的(波段 2+波段 3)-(波段 4+波段 5)>阈值 t1 增强图阈值法, 以及在建筑居民用的提取水体较好的缨帽变换湿度分量 TCW>阈值 t2 增强图阈值法, 用掩膜规则得到最优空间掩膜, 提取全部水体和部分地物信息, 再使用最大似然法, 将水体信息准确提取出来. 该方法降低了误提其他地物的比率, 能较好地提取出支流和细小水体信息.

3.3　面向对象的图斑处理

基于自动像元分类得到的水体分类结果, 受算法、样本、影像等诸多因素的限制, 其结果一般精度不高, 同时存在图斑破碎、椒盐现象严重等问题. 水体遥感制图的第二个处理步骤就是进行水体分类结果的对象化处理. 对于每景用于分类的基础影像, 均用 eCognition 软件进行了 3 种尺度(15, 20, 30)的分割, 得到了 3 种尺度的分割对象结果. 从每景影像的多尺度分割对象中选择与水体最匹配的尺度分割结果, 利用其进行像元分类结果的图斑自动过滤, 在减少细碎图斑, 消除椒盐效应的同时, 得到每景水体对象化的分类结果. 其流程如图 5 所示.

得到每景对象化的水体分类结果后, 即可利用相关知识, 通过建立规则对水体对象进行过滤, 搜索出可能被错分为水体的图斑, 进行标记后供人工核实. 主要方法如下:

(1) 利用 DEM 数据搜索阴影错提图斑. 通过全球 DEM 数据, 计算得出坡度大于 8°的区域, 对水体与阴影因光谱一致性造成的误提现象, 利用坡度信息对每期水体分类对象进行过滤, 找出山地区域阴影容易混分区域(牛振国等, 2009), 通过人机交互予以核实修正, 减少水体的错分.

(2) 两期水体数据不一致区域分析. 通过对两期水体结果进行空间运算, 得到两期分类结果不一致区域, 对于面积大于一定阈值的区域进行标记, 进行后期人工重点核查.

(3) 数据统计分析. 按国家(地区)进行两期的面积统计, 相互进行比较或者与官方文献数据比较, 异常情况重点核查分析.

3.4　基于人机交互的编辑处理

为保证全球水体提取的尺度一致性、空间一致性, 针对季节性水体、类型混淆、内陆水与海水的区分和分景影像不接边等问题, 分景提取的水体成果按照统一的制图标准进行人机交互编辑处理, 减少水体

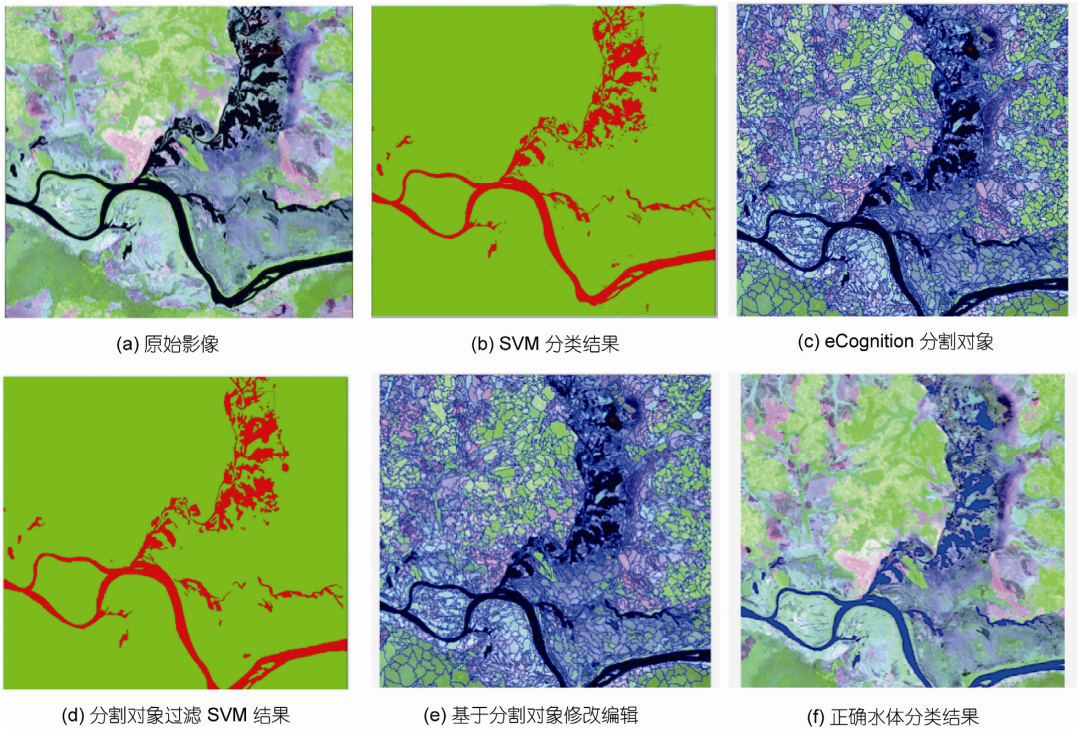

图 5　基于分割对象的水体提取过程示意图

信息的漏分和错分现象, 最大限度地提高提取精度. 该环节除了对基于知识规则搜索出的“问题”图斑逐一进行核查修改外, 还需要按照统一的尺度标准对分类结果进行处理, 同时采取多种质量控制方法来交叉检核、验证水体提取的正确性.

(1) 分类结果逐景核查. 按照测绘产品的质量控制体系, 由质检人员按照 1∶1 的放大比率, 逐屏对分类结果进行 100%逐景检查, 对达不到质量控制要求的分景结果, 需返工重新修改直至合格为止.

(2) “问题”图斑逐一核查. 对于利用知识规则运算得到的可能存在错分图斑, 逐一进行核查. 如果无法在 30 m 影像上准确判断, 利用 Google Earth、高分辨率地表覆盖参考资料进一步分析判断, 进一步减少错分率. 对于容易混淆、不易判别的图斑(如水体与湿地), 更多借助高分辨率影像和实地景观照片. 图 6 所示为对两期(2000/2010)解译的水体结果进行不一致分析, 发现结果异常区域, 原因为受云和阴影影响造成, 经人工编辑进行改正的过程.

(3) 尺度一致性处理. 按照本项目中分类系统对水体的定义, 统一规范水体与海域、水体与湿地、水体与耕地的处理要求与指标, 并进行统一的检查与处理, 最大限度减少水体分类的尺度不一致性.

(4) 分景接边处理. 分景水体接边主要核查接边处的水体是否连续、是否过渡自然, 避免因影像季相与裁切等原因, 造成线状水体、大的湖泊不接边现象. 对于因影像季相原因造成的水体不接边, 需要重新调整分景影像的裁切线, 使被分割的水体尽量位于同一景影像内.

4　成果及精度验证

全球两期 30 m 分辨率的水体数据成果按照统一的标准进行分幅集成, 根据所位于的纬度情况, 在南北纬 60°区域内, 按照 5°(纬度)×6°(经度)的大小进行分幅; 在南北纬 60°~80°区域内, 按照 5°(纬度)×12°(经度)的大小进行分幅. 水体成果数据由数据文件、坐标信息文件、分类影像接图表文件、元数据文件和说明性文件等 5 部分组成. 数据文件采用栅格数据格式进行存储, 无损 GeoTIFF 压缩格式, 8Bit 256 索引色模式. 元数据由分幅基本信息、产品基本信息、分类系统、产品研制信息、精度自评价信息和版权信息等 6 部分组成, 共 55 项.

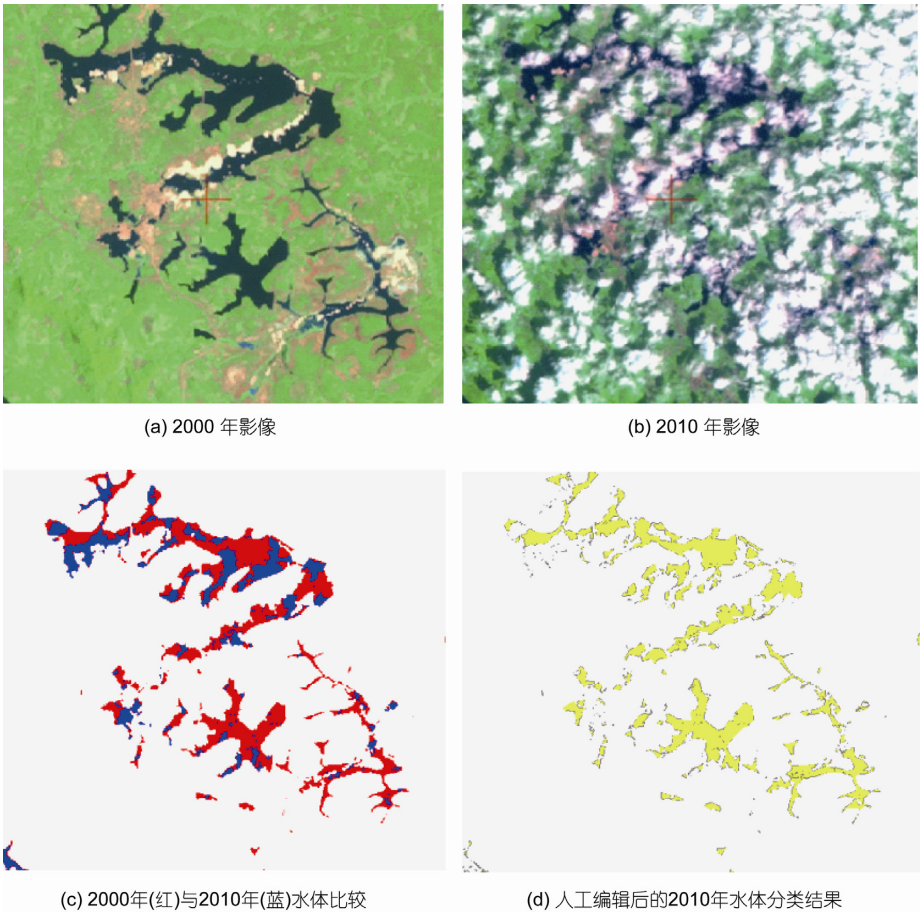

图 6　人机交互水体图斑编辑处理

为了验证水体成果的精度, 由参与项目的科研单位采用背靠背的方法进行了水体精度自评估. 数据精度评价使用统一的评价方法和标准, 在全球范围内抽取了 139 个图幅进行了产品精度自评估, 抽样图幅的分布如图 7 所示(灰色部分).

检验样本分为两部分: 一是从 30 m 分辨率影像中选取的面状样本; 二是实地采集的点状样本. 为了保障每幅所采集的检验样本具有统计意义, 每个图幅采用分层随机抽样的方法获取检验样本的空间分布, 然后由熟悉本区域、目视判读经验丰富的专家利用分类影像、高分辨率影像(Google Earth 等)和野外观测数据等逐一进行判断确定, 最终建立 2000 和 2010 年的检验样本数据集.

每个图幅检验样本的数量一般在 60~100 个左右(每个面状样本包含 10 个像元左右). 通过计算得到分幅产品的精度评价结果, 并最终得到全球 5 个工作区的精度自评价结果. 2000 和 2010 年全球水体样本数量分别为 10237 个和 9597 个, 平均总体精度分别为 96.51%和 96.48%. 全球分区域抽样图幅数量、检验样本数量和总体精度见表 4. 其中欧洲、美洲和大洋洲的水体遥感产品精度最高, 其次是东北亚及中亚地区, 之后是非洲地区、东南亚及中亚地区. 从表 4 可以看出, 精度最差的东南亚及西亚地区, 其总体精度也高于 92%.

5　讨论与结论

通过优选 Landsat TM/ETM+、HJ-1 等 30 m 空间分辨率影像, 并对影像数据进行几何和大气纠正、ETM+条带数据插补等处理, 实现了全球两期影像的有效覆盖, 影像几何定位精度优于 1∶20 万地形图制图要求, 2 期影像配准中误差优于 1 个像元. 利用基

表 4　全球水体自评估精度情况

区域	抽样图幅	2000 年水体		2010 年水体	
		检验样本	总体精度	检验样本	总体精度
东北亚及中亚	30	2003	96.00%	2040	97.00%
东南亚及西亚	20	725	93.20%	697	92.70%
欧洲	17	1210	99.66%	1200	98.75%
非洲	21	2745	93.60%	2745	93.70%
美洲	31	1215	98.00%	1215	98.00%
大洋洲	20	2339	98.60%	1700	98.60%
全球总计	139	10237	96.51%	9597	96.48%

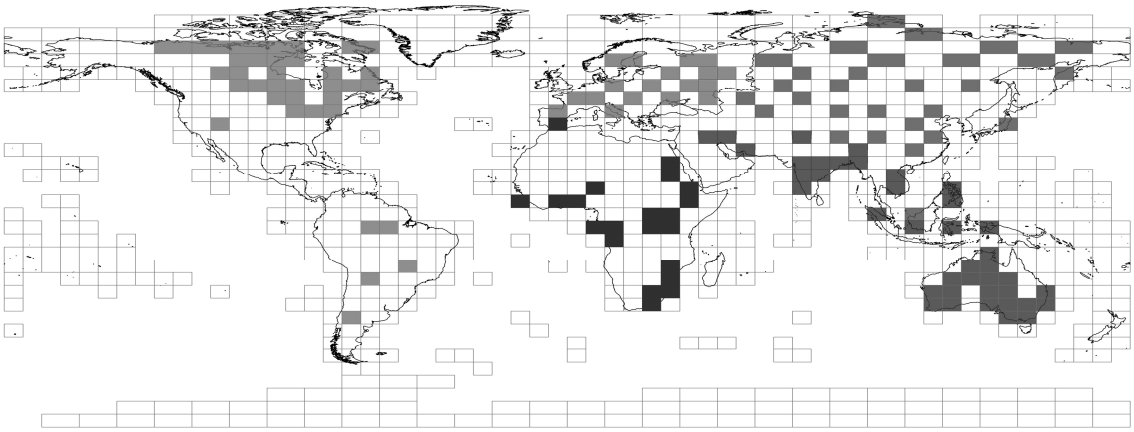

图 7　水体精度自评估抽样图幅分布图(灰色部分)

于先验知识的决策树法、最大似然掩膜法等基于像元的水体综合提取方法, 快速得到每景影像的水体像元分类结果. 利用 eCognition 软件生成的不同尺度分割对象对像元分类结果过滤, 形成每景基于对象的水体分类图斑. 通过建立不同的知识规则集对分类图斑进行检核, 并采用人机交互的方式进行核查与编辑处理, 保障了水体分类结果的正确性与尺度标准一致性. 完成的全球两期陆表水体数据集(GlobalLand30-water 2000 和 GlobalLand30-water 2010)属全球尺度下最高分辨率的分类成果. 经精度自评估分析, 其平均总体精度为 96%. 该数据可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等有关研究工作提供重要基础数据.

5.1　水体的时相统一问题

受数据获取条件限制, 全球两期(2000 年、2010 年)30 m 地表覆盖遥感制图所需的遥感影像获取难度极大, 最终只实现了两期基本无云的有效覆盖, 没有统一数据时相(Gong 等, 2013), 也没有完整获取一期内多季相的影像信息. 图 8 显示了用于水体提取的 Landsat TM/ETM+影像的时相差异. 由于水体是波动性较大的地表覆盖类型, 受年际、季节变化的影响, 水资源有枯水、平水和丰水之分. 而分类的遥感影像只有单一时相, 解译的水体结果也只是反映某一特定时间的分布状况. 因此, 通过遥感监测的全球水体面积存在一定的不确定性, 需要通过时相订正, 才能用于时空格局和波动分析.

5.2　全球范围水体高精度提取策略

针对 30 m 空间分辨率遥感影像自动提取水体的算法问题, 国内外已开展了大量的研究工作. 通过从 ISI Web of Knowledge 数据库中检索出的 300 多篇中外科技文献中介绍的水体类型自动提取方法进行总结, 目前常用的分类方法是 MLC、SVM、决策树、Hybrid

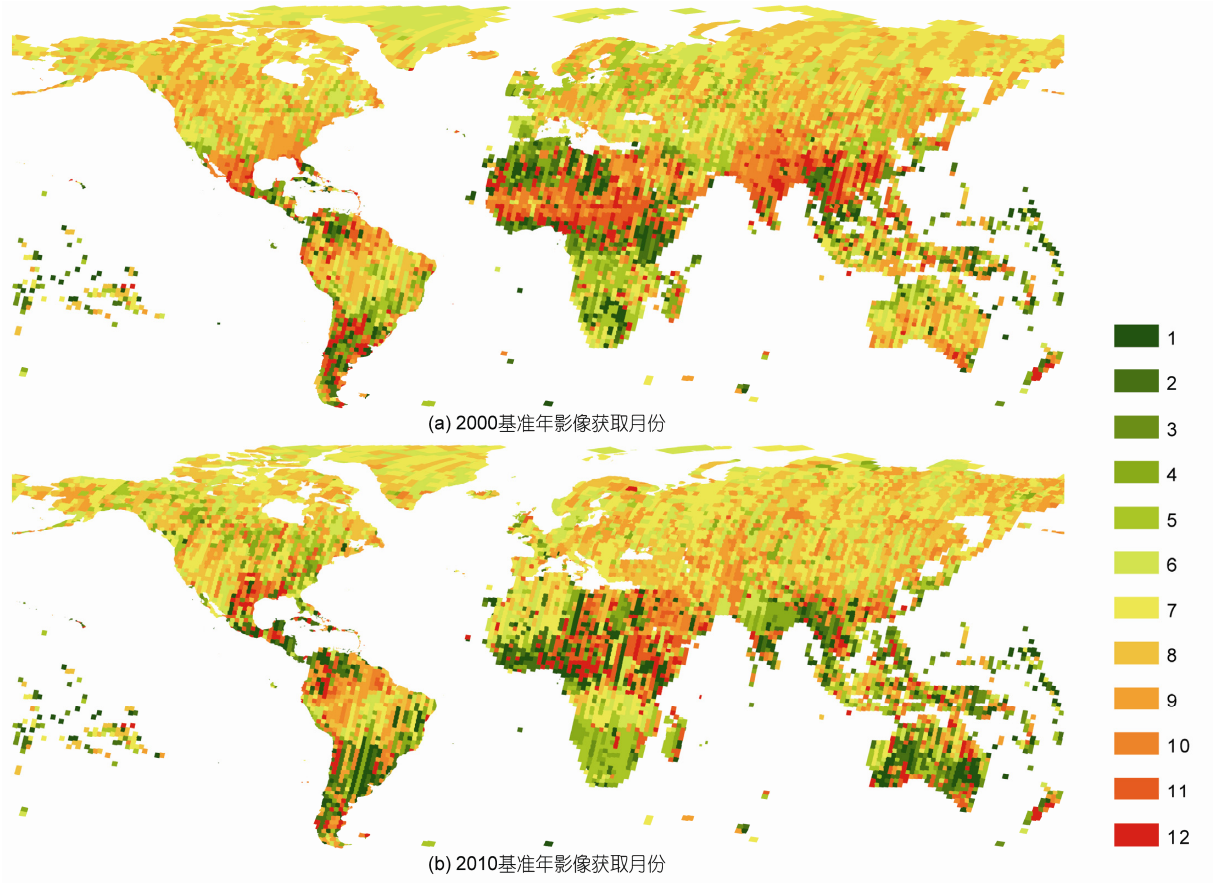

图 8　全球两期 Landsat TM/ETM+数据获取月份统计

等; 从分类精度看, 监督分类方法精度优于非监督分类方法, 且方差最小; 目视解译分类精度最高, 其次是贝叶斯方可靠的分类方法. 本项目通过采用多分类方法集成的组成提取策略开展全球水体遥感制图, 即先通过基于像元的自动分类, 然后基于分割对象的过滤和人工编辑, 得出最终的分类结果, 最大限度地发挥了计算机自动分类、知识规则和人的经验优势, 提高了水体的提取效率, 降低人工编辑修改的工作强度, 从效果看明显提高了水体提取的精度. 由于是首次采用此方法提取全球水体, 其流程衔接不够紧密, 需要综合利用多个软件才能实现, 今后需在此方面加强研究开发工作, 进一步提高提取效率.

5.3　与现有全球地表覆盖产品比较

为了验证提取的 30 m 水体成果精度, 在全球范围内选择了陕西省、俄罗斯贝加尔湖地区、马来西亚西岛、德国中部、西班牙巴塞罗那地区、北非突尼斯、南非西南部、北美加拿大东南沿海地区、南美巴西亚马逊河流域中游、澳大利亚塔斯马尼亚岛等地的 10 块区域, 与其他已有的 5 套产品进行精度比较. 精度比较样本由长期从事地表覆盖研究的科研人员选取, 分别对 6 套产品的水体分类进行总体精度评价, 由表 5 中可以看出 GlobalLand30 产品的水体总体精度显著优于其他已有的 5 套地表覆盖数据产品.

图 9 是在勒拿河三角洲, 本项目水体成果与欧洲 300 m 的 GLOBCOVER 数据水体结果的对比情况, 本项目的水体成果在河网分布空间分布、河流连续性及细小水体等表现方面均占优.

全球陆表水域的持续遥感监测与制图是一项长期而艰巨的任务, 尽管本次工作在分辨率上有所提高, 但从持续监测与更新的角度仍需进一步提高提取效率、研究新的方法. 目前项目成果只是在部分地区通过自评估的方式进行了精度检验, 其真实精度还有待于全球范围第三方机构进行更为详细的检验

表 5　10 个实验区水体提取结果与已有 5 套产品的总体精度比较(%)

实验区	GlobalLand30	USGS	UMD	Boston	GLC2000	GLC2005
陕西省	89.32	29.74	16.23	31.47	38.80	46.41
俄罗斯贝加尔湖地区	96.68	25.45	9.12	14.91	18.84	44.20
马来西亚西岛	99.39	80.00	80.00	80.00	77.78	70.00
北非突尼斯	99.45	0.00	4.51	4.51	4.51	36.09
南非西南部地区	97.27	0.00	0.00	2.70	2.70	5.41
欧洲德国中部	99.00	14.54	3.39	8.76	4.98	46.02
西班牙巴塞罗那地区	99.48	38.35	25.73	29.13	25.97	55.10
北美加拿大东南沿海地区	99.30	73.72	91.6	0.00	86.34	92.94
巴西亚马逊河中游地区	99.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
澳大利亚塔斯马尼亚岛	98.97	39.64	47.64	19.49	44.36	64.00

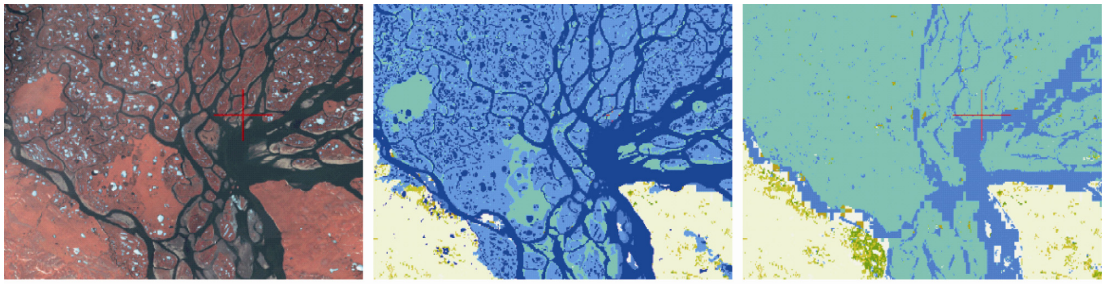

图 9　勒拿河三角洲水体成果对比图

后得出客观结果. 受遥感影像获取的制约, 无法取得全部理想季相的遥感影像, 需要进一步研究水域面积时相订正的科学方法. 全球变化研究是一项长期的研究任务, 如何开展全球陆表水体的时空格局分析与变化研究, 揭示水体变化对全球气候变化的影响, 是广大遥感科研人员今后需要努力的方向.

参考文献

曹凯, 江南, 李新国, 等. 2005. 基于 SPOT-5 图像的城市水体自动提取模型研究. 国土资源遥感, 4: 24–27
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
陈军, 陈利军, 陈晋, 等. 2012. 基于层次分类策略的全球地表覆盖遥感制图初步研究. 见: 第 18 届中国遥感大会论文集.0 626–636
骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 2009. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取. 遥感学报, 13: 610–615
牛振国, 宫鹏, 程晓, 等. 2009. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 188–203
吴文渊, 沈晓华, 邹乐君, 等. 2008. 基于 LandsatETM_影像的水体信息综合提取方法. 科学通报, 24: 252–259
徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 9: 589–595
徐金鸿, 陈淑娟. 2008. 基于 TM 影像的水体信息提取. 水土保持学报, 15: 161–163
Bartholomé E, Belward A S. 2005. GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth observation data. Int J Remote Sens, 26: 1959–1977
Blaschke T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. Isprs-J Photogramm Remote Sens, 65: 2–16
Carroll M L, Townshend J R, DiMiceli C M, et al. 2009. A new global raster water mask at 250 m resolution. Int J Digit Earth, 2: 291–308
Chen J, Zhu X, Vogelmann J E, et al. 2011. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. Remote Sens Environ, 115: 1053–1064

Defourny P, Vancutsem C, Bicheron P, et al. 2006. GlobCover: A 300 m global land cover product for 2005 using Envisat MERIS time series. Proceedings of ISPRS Commission VII Mid-term Symposium: Remote Sensing: From Pixels to Processes, Enschede (NL)

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

Frohn R C, Hinkel K M, Eisner W R. 2005. Satellite remote sensing classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska. Remote Sens Environ, 97: 116–126

Gong P, Wang J, Yu L, et al. 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. Int J Remote Sens, 34: 2603–2654

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

Jordan C F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology, 50: 663–666

Lehner B, Doell P. 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. J Hydrol, 296: 1–22

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

McFeeters S K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. Int J Remote Sens, 17: 1425–1432

Michishita R, Gong P, Xu B. 2012. Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data. Int J Remote Sens, 33: 3373–3401

Rundquist D C, Lawson M P, Queen L P, et al. 1987. The relationship between summer-season rainfall events and lake-surface area. Water Resour Bull, 23: 493–508

Sheng Y, Shah C A, Smith L C. 2008. Automated image registration for hydrologic change detection in the lake-rich Arctic. IEEE Geosci Remote Sensing, 5: 414–418

Sun F, Sun W, Chen J, et al. 2012. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. Int J Remote Sens, 33: 6854–6875

Sivanpillai R, Miller S N. 2010. Improvements in mapping water bodies using ASTER data. Ecol Inform, 5: 73–78

Van der Werff H M A, Van der Meer F D. 2008. Shape-based classification of spectrally identical objects. Isprs-J Photogramm Remote Sens, 36: 251–258

Work E A, Gilmer D S. 1976. Utilization of satellite data for inventorying prairie pondsand lakes. Photogramm Eng Remote Sens, 42: 685–694

Xu H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. Int J Remote Sens, 27: 3025–3033