文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

面向海洋基础地理信息的多源水深数据融合方法——以莱州湾为例

孙栋　赵中飞　刘元*
山东省国土测绘院
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2516

[摘　要] 海洋基础地理信息是海洋经济建设与生态保护的重要数据支撑。当前海洋测绘参与主体多元,造成数据标准不统一、覆盖不全、重复冗余,数据整合利用难度较高。以莱州湾为研究区,选用908专项海底地形、山东S57海图、1:10000潮间带地形测绘成果、实测单波束水深四类数据,开展多源海洋基础地理信息融合方法研究。构建“数据源分析—关联关系映射—阈值定量选取—分层融合”一体化技术流程。针对地物多版本共存问题,经位置偏差统计确定5 m空间容差阈值,确立高现势性、大比例尺优先的要素筛选规则。利用919组重合水深点开展交叉验证,识别港口、河口四类高频扰动区域,制定分区融合优化策略。实验表明,优化后水深中误差由0.518 m降至0.278 m,要素提取准确率超过98%。该方法能够高效整合多源海洋测绘数据,降低外业测量成本,所确定的定量阈值与分区融合策略具备良好通用性与可迁移性。
[关键词] 多源数据融合；海洋基础地理信息；水深数据；莱州湾；数据质量评价
中图分类号：P229　**文献标识码**：A

Multi-source data Fusion for Marine basic geographic information: A case study of Laizhou Bay

Dong Sun　Zhongfei Zhao　Yuan Liu*
Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping

[Abstract] Marine basic geographic information supports marine economic development and ecological conservation. Diverse marine survey agencies produce data with inconsistent standards, incomplete coverage and redundancy, hindering data integration. This study takes Laizhou Bay as the research area, using four datasets: the 908-Project bathymetric data, Shandong S57 nautical chart data, 1:10 000 intertidal terrain data and measured single-beam bathymetric data. It establishes an integrated workflow: data-source analysis, correlation mapping, quantitative threshold determination and hierarchical fusion. A 5-m spatial tolerance is defined via position-deviation statistics, and features are selected by priority of high timeliness and large scale. Cross-validation of 919 overlapping depth points detects four disturbance zones including harbors and estuaries for zonal fusion optimization. Results show the bathymetric mean-square error decreases from 0.518 m to 0.278 m, with feature-extraction accuracy over 98%. The method integrates multi-source marine data efficiently, cuts field-survey costs, and its thresholds and zonal strategy are general and transferable.
[Key words] multi-source data fusion; marine basic geographic information; water depth data; Laizhou Bay; data quality assessment

海洋基础地理信息是海洋强国战略实施的重要数据基础,涵盖海洋矢量要素、水下地形、数字水深模型(DBM)和数字高程模型(DEM)等核心数据产品。然而,海洋测绘长期呈现“多部门参与、多标准执行、多格式存储”的“三多”特征[1],导致数据成果之间难以直接拼接与共享,形成“数据孤岛”现象。如何在不过度依赖新测数据的前提下,通过融合已有历史数据形成真实可靠的海洋基础地理信息产品,是当前海洋测绘领域亟需解决的关键技术问题[2]。

本文以莱州湾为研究区,面向海洋基础地理信息的生产需求,提出一套完整的“数据源分析—关联关系映射—阈值定量选

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

取—分层融合”技术流程[3]。莱州湾是渤海三大海湾之一,黄河、潍河等多条河流在此入海,同时分布有潍坊港、莱州港等多个港口,数据来源复杂、地形变化剧烈,是多源数据融合方法验证的理想试验区[4]。研究结果不仅为莱州湾区域海洋基础地理信息产品的生产提供技术支撑,也可为其他海域类似的多源数据整合需求提供可参考的方法框架[5]。

1 研究区与数据源概述

1.1研究区概况

莱州湾位于山东半岛西北部,渤海南部(37° 10′ —37° 50′ N,118° 30′ —120° 30′ E),海湾面积约6000km²,平均水深约15m,最大水深约25m。黄河、潍河、北胶莱河等河流携带大量泥沙在此入海,海底地形复杂,沉积速率高且空间差异显著。湾区同时分布有潍坊港、莱州港、龙口渔港等多个港口,航道疏浚与自然淤积的相互作用导致水深数据具有较强的时空变异性,这对多源数据融合提出了较高要求[6]。

1.2数据源构成与特征

表1 多源数据基本特征对比

数据源	数据类型	覆盖范围	现势性	空间基准	主要用途
908 专项	多波束/单波束水深	离岸海域全覆盖	2005—2009 年	理论深度基准	离岸水深基底
S57 海图	矢量要素(53 层)	全域覆盖	2015—2019 年	CGCS2000	海洋要素提取
潮间带 1:1 万	单波束水深+DEM	近岸海域	2014—2019 年	CGCS2000/1985 高程	近岸高精度地形
实测数据	单波束水深	约 150 km² 空白区	2023 年	CGCS2000	空白区补充

2 多源数据成果分析

2.1总体技术路线

本次研究设计出来的多源数据融合手段,可以划分成自下往上排布的四个层级,一是数据层,要把空间基准统一调整到CGCS2000,还要把数学基础、数据格式全部完成统一调整[7]；二是评价层,需要对相互重合的那部分数据开展交叉校验,把不同数据之间的偏差分布情况给定量评估到位;三是决策层,要拿偏差统计得到的结果当作凭据,把要素挑选还有水深取舍对应的分区融合规则给制定完成；四是融合层,需要使用分层融合的处理思路,把矢量要素还有水深网格分开开展处理,最终就能够生成得到一套统一完整的海洋基础地理信息产品；把“数据质量评价”连同“阈值定量化处理” 放到融合工作的前期环节当中,能够把融合结果具备的可靠性还有可追溯能力给充分保障住。

2.2海洋要素融合策略

灯塔、灯船、助航设施、碍航物这类海洋要素,同一个地物,会在不同时效性、不同比例尺绘的图件里多次记录,我们需要从中筛选出能够代表地物真实情况的唯一数据；本次研究把位置偏差统计解析手段拿来确定空间容差阈值,一方面会优先选用时效性更好的数据,另一方面当现势条件保持一致的时候,会优先取用大比例尺产出的数据。

2.3水深数据融合策略

本次研究使用“分区融合”的处理思路,普通的海域片区,会优先取用覆盖范围广同时网格密度更高的908专项多波束数据[8]；河口、港口航道这类高频扰动片区,会优先选用潮间带测绘成果或者实地测取得到的单波束数据,它们有着更好的时效性[9]；碰到存有数据缺口的空白片区,采用2023年实地测量得到的单波束水深数据。

3 实验与结果分析

3.1海洋要素融合阈值确定与结果

对莱州湾区域内9幅S57图幅(比例尺1：5000~1：250000,现势性2015—2019年)中共计108个共现要素(灯船、灯浮标、孤立碍航物等)进行位置偏差统计,结果如表2所示。

表2 同一地物在不同图幅中位置偏差统计

对比图幅(比例尺_现势性)	共现要素数	偏差<1m	1m≤偏差<3 m	3m≤偏差<5m	偏差≥5m
1∶1.5万_201809 vs 1∶2.5万_201903	45	36	7	2	0
1∶5000_201506 vs 1∶1.5万_201903	10	0	10	0	0
1∶1.5万_201705 vs 1∶15万_201903	7	7	0	0	0
1∶25万_201903 vs 1∶15万_201903	46	3	41	2	0

统计结果表明,所有共现要素的位置偏差均小于5m,其中95%以上的偏差小于3m。据此将空间容差阈值定为5m：即在同一地物的多源表达中,若不同来源的位置偏差在5m以内,视为同一地物,选取现势性最新者;若大于5m,则视为不同地物分别保留。

按照上述规则完成要素提取后,与同期实地核查的36个特征点进行比对,提取准确率为98.6%(35/36),唯一一例偏差出现在潍坊港航道内一灯浮标因S57图幅现势性标记滞后导致,后通过实测资料修正。

3.2水深数据一致性分析与阈值确定

在908专项数据与潮间带单波束数据的重合区域内,提取了919对空间位置偏差小于1m的水深点进行数值对比。

表3 重合水深点数值偏差统计

对比状态	对比点数	互差≤0.4m	互差>0.4m	中误差/m	符合率
全部点对	919	708	211	0.518	77.00%
剔除高频扰动区后	600	590	10	0.278	98.30%

超限点(互差>0.4m)的空间分布呈现显著的区域聚集性,主要集中在4类区域：

黄河入海口(泥沙快速淤积,2009年与2019年地形变化显著)；潍坊港航道(反复疏浚,水深人为扰动大)；莱州港锚地(底质扰动频繁)； 龙口渔港(小型船只活动密集,局部微地形变化快)。

0.4m这一阈值的敲定,会参考到GB12327-2022《海道测量规

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

范》里面针对水深测量定下的精度要求,水深不大于20m条件之下主检测深的互差限差为±0.5m,同时还会结合潮间带项目技术设计文件当中水深中误差需要≤0.30m的精度指标,综合权衡过后把0.4m设定成评判两期水深数据是否保持一致的临界条件[10]。

3.3融合效果评估

为验证融合方法的有效性,设置三组对比实验：

方案1(单一数据源)：仅使用908专项数据,在近岸区域存在数据稀疏问题；

方案2(简单拼接)：将908数据与潮间带数据直接拼接,未经分区优化,在港口区出现明显异常跳变；

方案3(本文融合方法)：采用分区融合策略,高频扰动区以潮间带数据为主。

以2024年实测的80个独立水深检查点作为真值,三组方案的精度对比如表4：

表4 不同融合方案精度对比

方案	中误差/m	最大偏差/m	近岸区(水深<10m)中误差	离岸区(水深≥10m)中误差
方案1(仅908)	0.452	1.87	0.612	0.387
方案2(简单拼接)	0.386	1.52	0.458	0.365
方案3(本文方法)	0.292	1.13	0.326	0.284

方案3较方案1精度提升35.4%,较方案2提升24.4%,说明分区融合策略在近岸复杂区效果尤为显著。最终形成的融合DEM有效覆盖了莱州湾全域,消除了数据空白,且在高频扰动区实现了平滑过渡。

4 融合方法的适用边界与不确定性

4.1阈值的地域依赖性

本文确定的5m空间容差和0.4m水深容差是基于莱州湾区域数据的统计极值确定的。在不同海域(如基岩海岸、开阔深海),数据偏差分布特征可能不同,阈值的具体数值需根据当地数据的偏差统计分布重新标定。但本文所提出的“偏差统计→极值边界→阈值确定”的方法路径具有普适性。

4.2时间基准差异的处理局限

908专项数据和潮间带数据中间,有着5-10年的时间跨度,在黄河入海口这类海床会发生剧烈变动的片区,就算我们做完基准转换还有阈值筛选的全套处理,融合产出的结果依旧只能反映多期数据叠加形成的加权平均状态,并不能还原某一个时间节点上面海底的真实样貌。

4.3与现有融合方法的比较

拿插值算法来实现的数学融合手段,譬如Hell&Jakobsson提出的张力样条算法拿来做对比,本次研究的手段会在开展插值运算之前就引入带有物理成因逻辑的分区决策,会把港口清淤、河流输沙这类已经掌握的地理过程拿来充当先验信息,参与到融合权重的分配环节当中,这种同时结合知识驱动还有数据驱动的处理模式,在人类活动比较频繁的近岸海域,能够展现出更为亮眼的实际效果。

5 结论

本文以莱州湾为例开展面向海洋基础地理信息的多源水深数据融合研究,得到如下主要结论。

(1)构建“数据源分析-基准统一-偏差统计-定量阈值-分区分层融合”完整工程化技术流程。把质量评价前置,依靠实测样本统计确定阈值,相比纯经验设定阈值,方法可复现、可迁移。(2)基于地物位置偏差统计确定5m要素归并容差阈值,配合高现势性、大比例尺优先选取原则,海洋要素提取准确率达到98.6%,可以有效处理多源地物重复冲突。(3)水深超限误差不是随机分布,高度集中于河口淤积区、港口航道、锚地等人-海交互活跃地带,该规律可为其他海湾多源水深处理提供先验参考。(4)提出“普通海域优先历史多波束,高频扰动区优先近期单波束”分区融合策略。测试得到融合水深中误差0.292m,对比单一数据源精度提升约35%,成果能够满足1:0000海洋基础地理信息产品生产精度需求。(5)本研究的创新不在于提出新型插值算法,而是建立一套面向工程实践的多源海洋测绘数据融合决策框架,对数据来源混杂、现势性参差不齐的近岸海域有很高实用价值,可以为国内其他海湾、海岸带多源海洋数据整合提供方法借鉴。

[参考文献]

[1]樊妙,孙毅,邢喆,等.于多源水深数据融合的海底高精度地形重建[J].海洋学报,2017,39(1):130-137.

[2]刘艳霞,黄海军,杨晓阳.于遥感反演的莱州湾悬沙分布及其沉积动力分析[J].海洋学报,2013,35(6):43-53.

[3]黄孟远.基于多源信息融合的海底地形数据集构建方法研究[D].哈尔滨:尔滨工程大学,2021.

[4]刘经南,赵建虎.波束测深系统的现状和发展趋势[J].洋测绘,2002(5):3-6.

[5]赵建虎,欧阳永忠,王爱学.底地形测量技术现状及发展趋势[J].绘学报,2017,46(10):1786-1794.

[6]凌晓春.型基础测绘思考与实践:山东省为例[J].山东国土资源,2020,36(3):74-78.

[7]牛冲.基于CORS-RTK无验潮的海岸带水下地形测量精度分析[J].海洋测绘,2021,41(06):36-39.

[8]李传,章繁荣,邓红勇.Y1621多波束测深仪的性能分析[J].洋测绘,2020,40(1):73-8.

[9]商建伟.于GNSS的单波束测深系统在大中型水库水下地形测量中的应用[J].东国土资源,2022,83(1):65-69.

[10]王海栋,柴洪洲,王敏.多波束测深数据的抗差Kriging拟合[J].绘学报,2011,40(2):238-242.

作者简介：

孙栋(1988--),男,汉族,陕西宝鸡人,本科,高级工程师,注册测绘师,研究方向：海洋测绘、基础测绘。

***通讯作者：**

刘元(1989--),男,汉族,山东新泰人,硕士研究生,高级工程师,研究方向：大地测量、海洋测绘等。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.