

基于多源重力场模型的湛江地区正常高计算精度分析与工程适用性评估

肖新尚¹ 庞国俊^{1*} 肖鑫¹

XIAO Xinshang PANG Guojun XIAO Xin

摘要

随着全球导航卫星系统 (GNSS) 技术的飞速发展和我国新型基础测绘体系的构建, 如何高效、高精度地将 GNSS 测得的大地高转换为工程建设中广泛使用的正常高, 已成为测绘生产实践中的核心技术问题。文章以广东省湛江地区为实验区, 利用千寻位置服务获取 129 个控制点基于 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 的大地高观测数据, 并以广东省 CORS 网络 RTK 实测的 1985 国家高程基准正常高作为真值。系统选取 EGM2008、SGG-UGM-2、WHU-CASM-UGM2025 和 XGM2019e 四种代表性全球重力场模型, 详细描述了从 ICGEM 原始 GDF 网格文件到中海达 HGO 软件可识别的 GGF 格式的转换流程, 并辅以 ArcGIS 平台的 TIF 格式表面分析计算。通过多模型、多软件的交叉比对, 全面评估了四种模型在湛江地区的适用性和精度。结果表明, WHU-CASM-UGM2025 模型精度最优, 中误差为 ± 4.70 cm, 平均误差为 9.69 cm; SGG-UGM-2 模型次之。结合《工程测量标准》(GB 50026—2020) 和《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011) 中地形图高程精度的要求, 论证了在经少量水准点校正后, 最优模型可满足 1:500 比例尺地形图等高线插求点高程中误差的规定。该研究验证了最新重力场模型, 特别是融合了我国区域精细数据的 WHU-CASM-UGM2025 模型在沿海地区 GNSS 高程转换中的工程应用价值。

关键词

正常高; 重力场模型; 大地水准面精化; GNSS 高程转换; 湛江地区; 精度分析; 工程测量标准

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.026

0 引言

高程信息是一切工程建设的基础, 是地形图测绘、城市规划、水利工程、交通建设等领域的核心数据。传统的水准测量虽然精度高、成果可靠, 是建立和维持国家高程基准的唯一手段, 但其劳动强度大、效率低、成本高, 尤其在地形起伏较大的丘陵地区或河网密布、海岸线漫长的沿海地区, 其实施难度急剧增加, 作业周期长。随着全球导航卫星系统 (GNSS) 技术的成熟, 网络 RTK 技术能以厘米级甚至毫米级精度快速获取点位的大地高, 这为高程测量提供了革命性的新途径。然而, 我国法定和工程实践中通用的是以似大地水准面为基准的正常高系统, 而非以参考椭球面为基准的大地高系统^[1-2]。因此, 精确确定地面点的高程异常 (ζ), 即似大地水准面至参考椭球面的距离, 成为实现 GNSS 技术替代传统水准测量的关键核心。

确定高程异常的方法主要分为几何法和物理重力法两大类。几何法 (如多项式拟合、多面函数拟合法) 需要在整个

测区内联测大量分布均匀的 GNSS/水准重合点来建立转换模型, 对于范围大、地形复杂或水准点稀疏的区域, 其实施成本高且模型外推能力受限。物理重力法则依赖于高精度、高分辨率的全球或区域 (似) 大地水准面模型来计算高程异常。该方法的物理基础严密, 理论上不需要大量的联测点, 仅需少量点进行系统差校正即可, 效率极高^[1]。

1 研究基础与研究概况

1.1 全球重力场模型的发展

21 世纪以来, 随着 CHAMP、GRACE、GOCE 等新一代重力卫星计划的相继成功实施, 以及全球地面、航空重力测量数据的不断积累和共享, 全球重力场模型的精度和空间分辨率得到了革命性的提升。2008 年发布的 EGM2008 模型, 以其 5'×5' 的分辨率和较高的全球整体精度, 在过去 10 余年中成为行业公认的标准模型。近年来, 融合了 GOCE 卫星高精度重力梯度数据和最新地面 / 航空重力数据的新一代超高阶重力场模型相继发布, 如 SGG-UGM-2、XGM2019e 等。特别是由我国武汉大学和中国测绘科学研究院联合研制的

1. 广州全成多维信息技术有限公司 广东广州 511455

WHU-CASM-UGM2025 模型, 其完整阶次达 2 159 阶 (对应约 5' 分辨率), 在构建过程中充分融合了我国境内大量最新的高精度地面重力数据、数字高程模型 (DEM) 数据以及 GNSS/ 水准数据, 理论上能够更精细地刻画我国区域重力场的局部特征。这些先进模型的出现, 为基于物理重力法的 GNSS 高程转换走向工程实用化开辟了广阔前景。

1.2 湛江地区的地理特征与高程测量挑战

湛江市位于广东省西南部, 中国大陆最南端的雷州半岛, 地理坐标介于东经 109°31' 至 110°55'、北纬 20°12' 至 21°35' 之间。全境地势总体北高南低, 北部为海拔稍高的低山丘陵区, 中南部及沿海区域广泛分布着海拔较低的堆积平原、海成阶地和玄武岩台地。区内地貌类型多样, 河网沟渠密布, 并拥有长达 2 000 多公里的大陆海岸线和众多岛屿。这种沿海平原与台地交错、水域面积广阔的地理环境, 使得传统水准测量的路线布设和观测实施异常困难, 效率低下。当前, 湛江正处于城市建设、港口开发、交通基础设施完善的快速发展阶段, 各类工程对高程数据的精度要求不断提高, 亟须明确不同重力场模型在该区域的转换精度, 筛选出适配性最优的模型, 为工程实践提供技术支撑。

1.3 研究目标与创新点

本研究聚焦于湛江地区, 利用基于广东 CORS 实测的 129 个控制点, 对 EGM2008、SGG-UGM-2、WHU-CASM-UGM2025 和 XGM2019c 四种代表性重力场模型计算的正常高进行系统的外部精度检核。

主要研究目标包括:

- (1) 量化比较四种模型的高程转换精度;
- (2) 详细阐述从原始模型数据到工程软件可应用格式的完整处理流程;
- (3) 结合我国现行工程测量与城市测量规范, 评估模型成果在不同等级工程应用中的适用性。

本研究的创新点在于: 首次对 WHU-CASM-UGM2025 等最新模型在湛江这一特殊沿海地貌区的性能进行评估; 并将精度评估结果直接对标《工程测量标准》等国家规范条文, 为生产实践提供了明确、可操作的指导。

2 研究区域与数据

2.1 研究区概况

图 1 详细展示了本研究中 129 个检验点在湛江地区的空间分布。点位覆盖了湛江市市区、遂溪县、雷州市、廉江市等主要行政区, 兼顾了内陆台地、沿海平原、河流阶地等多类地貌单元, 具备良好的区域代表性, 能够全面检验模型在不同地形条件下的性能。

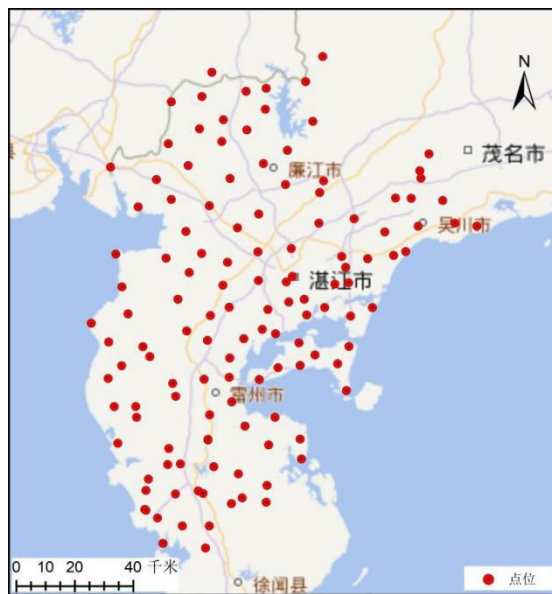


图 1 点位分布图

2.2 控制点数据来源与采集

本研究共获取 129 个分布均匀、代表性强的控制点, 采用两种独立观测方法分别采集大地高与正常高数据, 确保成果可靠、精度可控, 具体如下:

(1) 大地高数据 (CGCS2000): 采用千寻知寸 -FindCM 网络 RTK 进行野外采集, 获取各点 2 000 国家大地坐标系平面坐标及大地高。千寻知寸 -FindCM 服务基于全国北斗 / GNSS 增强网, 平面精度优于 ± 3 cm, 大地高内符合精度优于 ± 2 cm。由于千寻服务不直接提供正常高成果, 仅用于获取高精度大地高, 作为重力场模型高程转换的输入数据。

(2) 正常高数据 (1985 国家高程基准): 通过网络 RTK 接入广东省 CORS (GDCORS) 参数直接同步采集, 获取各点 2000 国家大地坐标系平面坐标及 1985 国家高程基准正常高。广东省 CORS 系统覆盖全省、基准统一、精度可靠, 实时 RTK 平面精度 $\leq \pm 3$ cm, 高程精度 $\leq \pm 5$ cm, 可直接提供满足工程要求的 1985 高程成果, 作为本研究正常高对比的基准值。

2.3 重力场模型数据下载与预处理

重力场模型是大地测量与地球物理研究的核心基础数据。国际全球地球模型中心 (ICGEM) 隶属于国际大地测量协会 (IAG) 国际重力场服务 (IGFS), 由德国波茨坦地学研究中心 (GFZ) 运营, 官网: <http://icgem.gfz-potsdam.de/>, 是全球权威的重力场模型存档与共享平台。本研究从该平台下载 4 种覆盖中国研究区域的最新全球重力场模型格网文件。

(1) EGM2008: 由美国国家地理空间情报局 (NGA) 主导发布, 模型完整展开至 2 190 阶次, 对应 5'×5' 空间分辨率,

具备全球覆盖、精度稳定、应用成熟的特点，是国际大地测量领域应用最广泛、最经典的全球重力场参考模型^[2]。

(2) SGG-UGM-2: 融合了 GOCE 卫星重力梯度数据、GRACE 卫星数据和全球地面 / 航空重力数据的超高阶模型，阶次达 2 190，分辨率为 5'×5'，在中短波重力信号刻画上精度突出。

(3) WHU-CASM-UGM2025: 由武汉大学李建成院士团队联合中国测绘科学研究院自主研制的 2025 年最新一代超高阶全球重力场模型，模型最高阶次为 2 159，空间分辨率 5'×5'。研制过程中重点融合中国区域高精度地面重力、航空重力观测数据、高分辨率数字高程模型 (DEM) 及海量 GNSS/ 水准实测资料，对中国及周边区域重力场特征刻画精度显著提升，适配国内区域大地测量应用需求^[3]。

(4) XGM2019c: 由德国慕尼黑工业大学牵头，联合多家国际机构共同发布的 2 190 阶次组合型全球重力场模型，空间分辨率 5'×5'，核心目标是构建全球一致、精度均衡的大地水准面模型，为全球高程基准统一提供支撑。

本次从 ICGEM 平台获取的模型数据，均为覆盖中国区域、格网间距 1'×1' 的 GDF 格式格网文件。由于原始 GDF 格式无法被国内测绘行业广泛使用的中海达 HGO 数据处理软件直接识别与调用，需开展针对格式转换预处理工作，将其转化为软件兼容的标准格式，保障后续重力场数据解算、高程基准转换等研究工作顺利推进。

3 数据处理与计算方法

3.1 大地高与正常高的数学模型

大地高 (H) 是地面点沿椭球法线到参考椭球面 (如 CGCS2000 椭球) 的距离。正常高 (h) 是地面点沿正常重力线到似大地水准面的距离。两者之间的关系由高程异常 (ζ) 唯一确定：

$$\zeta = H - h \quad (1)$$

因此，正常高的计算可转化为：

$$h = H - \zeta \quad (2)$$

若已知某点由 GNSS 测得的精确大地高 H ，并可从重力场模型中获得该点的高程异常值 (ζ)，即可直接计算出该点的正常高 (h)。

3.2 重力场模型计算高程异常的原理

地球重力场模型是一组重力位的球谐系数 ($\Delta\bar{C}_{nm}$, $\Delta\bar{S}_{nm}$) 的集合。根据大地测量学理论，地球外部一点的扰动位 T 可表达为级数展开形式。高程异常 ζ 可通过物理大地测量学的基本公式——Bruns 公式由扰动位求得：

$$\zeta(\phi, \lambda) = \frac{T(\phi, \lambda)}{\gamma} \quad (3)$$

式中： γ 为计算点的正常重力值。

在实际软件中，高程异常通常不是逐点实时计算，而是先利用模型的球谐系数在全球或区域格网节点上计算出格网化的 ζ 值，存储为 GDF 等格网文件。用户使用时，软件通过输入的经纬度坐标在格网中内插出该点的高程异常值。中海达 HGO 软件的“大地水准面精化”模块即采用此原理工作^[4]。

3.3 重力场模型文件格式转换流程 (GDF → GGF)

这是本研究技术链中承前启后的关键环节，核心目标是将 ICGEM 下载的标准格网数据，转换为中海达 HGO 软件可直接调用的 GGF 格式大地水准面模型文件，具体操作流程如下：

(1) 源文件获取：从 ICGEM 官网计算并下载四种模型覆盖中国研究区域的 1'×1' 分辨率数据，包含两种格式：

① GDF 格式：存储网格节点坐标及对应高程异常值的标准网格数据文件；② TIF 格式：用于 ArcGIS 软件空间分析与可视化，与 HGO 计算结果交叉验证。

(2) GDF → 标准矩阵数据预处理 (自编工具实现)

由于 GDF 文件无法被 TrimbleGridFactory 直接识别，本研究通过自主编写的转换工具 (如图 2 所示)，将 GDF 文件解析并转换为无行列头的纯矩阵文本数据：① 读取 GDF 文件的头部信息，提取格网范围、分辨率、投影及数据排序规则；② 剥离文件头信息，去除经纬度行列标识，仅保留按“经度从小到大、纬度从大到小”排序的纯高程异常值矩阵；③ 输出为可被 GridFactory 直接读取的标准矩阵文本文件，确保数据顺序、分辨率与原 GDF 文件完全一致。



图 2 GDF → 标准矩阵数据预处理工具

(3) 标准矩阵 → GGF 格式转换

利用天宝 (Trimble) 公司的 GridFactory 工具，将预处理后的标准矩阵文本文件转换为中海达 HGO 软件专有的 GGF (Grid Factory Format) 格式：

① 在 GridFactory 中导入纯矩阵文本文件，设置正确的格网范围、分辨率与坐标系统；

② 完成数据读取、格式校验与可视化检查，确保无数据错位、行列颠倒或数值异常；

③最终分别生成4个可直接在HGO中调用的GGF文件。

3.4 基于HGO软件的正常高计算

采用中海达HGO数据处理软件进行计算，具体步骤为：

(1) 在中海达HGO软件参数设置中分别选择椭球和投影选项卡，正确配置CGCS2000椭球参数和投影参数。

(2) 选择大地水准面模型：在“参数设置”中选择“高程拟合”选项卡，选择转换模型，软件会读取GGF文件头，识别其格网范围、间距等信息（如图3所示）。

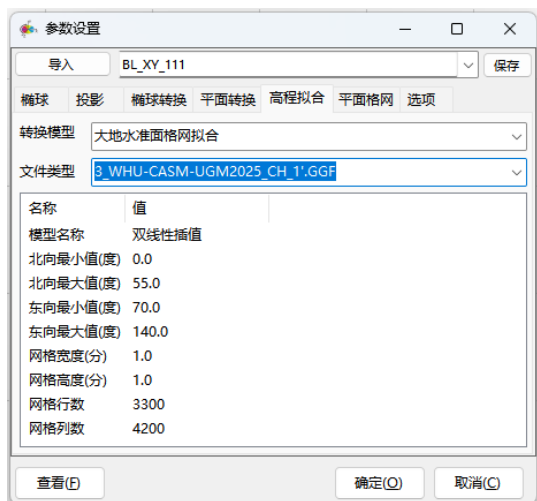


图3 HGO读取GGF模型文件

(3) 导入检验点数据：将包含点号、纬度和经度、大地高信息的129个检验点文件导入软件。

(4) 正常高计算：HGO软件自动根据每个检验点的平面位置(B, L)，在后台调入已加载的GGF模型，采用双线性内插算法计算该点的高程异常值 ζ ，并从输入的大地高 H 中减去 ζ ，得到正常高 h 。该过程可单点执行，也可批量处理所有导入点。

3.5 基于ArcGIS软件的正常高计算与验证

为进行独立验证，采用另一种技术路径计算正常高。如图4所示，具体方法如下：

(1) 加载数据：在ArcMap中加载TIFF栅格数据和129个检验点矢量文件。

(2) 提取表面信息：使用“Add Surface Information”工具，将TIFF栅格的高程异常值提取到检验点的属性表中。

(3) 计算正常高：在检验点图层的属性表中，利用字段计算器，输入公式 $[H_GNS-S]-[RASTERVALU]$ ，批量计算每个点的正常高。

(4) 互差比较：将ArcGIS中基于TIFF格网内插计算得到的正常高，与HGO软

件中基于转换后GGF模型计算的正常高进行逐点互差比较。理论上，若GGF文件格式转换过程无数据失真、两软件内插算法精度相当，则同一测点的正常计算结果应具有极高一致性。本研究中，所有测点的互差均小于1mm，有效验证了从GDF源数据到GGF格式的完整转换链条的正确性与可靠性，也证明了不同软件平台间高程异常内插结果的一致性。

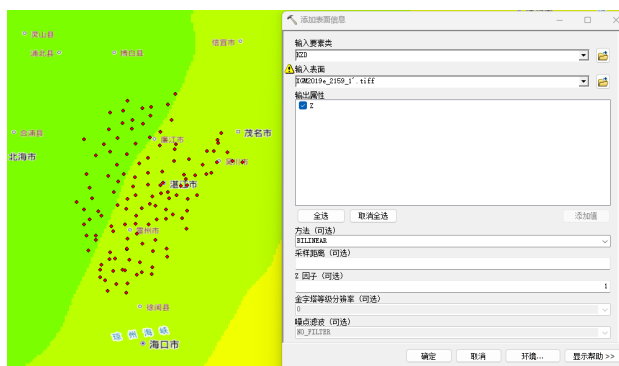


图4 高程异常值提取到点

3.6 技术路线总结

本研究的完整技术路线可概括为：

(1) 数据层：采集129个检验点的GNSS大地高与1985正常高；计算并下载四种模型的 $1' \times 1'$ GDF全球高程异常格网数据。

(2) 转换层：通过自编程序结合Trimble Grid Factory将GDF转为HGO可识别调用的GGF格式。

(3) 计算层：分别在HGO和ArcGIS软件中调用相应的模型文件，计算所有检验点的正常高，并进行结果互核。

(4) 分析层：以GDCORS实测的1985正常高为真值，计算各模型正常高预估值的误差，进行统计指标(Max, Min, Mean, RMSE)和误差分布分析。

(5) 应用层：将最优模型的精度指标与《工程测量标准》(GB 50026—2020)和《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)中的地形图高程精度要求进行对标分析，给出工程应用建议^[5-6]。

4 结果分析与讨论

4.1 各模型正常高计算精度统计

基于上述方法，计算并统计了四种重力场模型在湛江地区129个检验点上的精度指标，详细数据汇总于表1中。

表1 四种重力场模型正常高计算精度统计汇总

模型名称	Max/cm	Min/cm	平均误差/cm	中误差/cm	≤5 cm 点数	≥10 cm 点数
EGM2008	52.40	3.81	24.87	±10.21	1	123
SGG-UGM-2	33.23	0.21	11.09	±5.15	23	65
WHU-CASM-UGM2025	33.90	0.24	9.69	±4.70	37	54
XGM2019e	34.06	0.27	12.16	±5.53	18	77

通过对表 1 的分析,可以得出以下核心结论:

(1) 精度递进趋势明显:从误差指标看,模型精度呈清晰的梯次分布。WHU-CASM-UGM2025 以 ± 4.70 cm 最优,其次是 SGG-UGM-2 (± 5.15 cm),然后是 XGM2019e (± 5.53 cm),EGM2008 的 ± 10.21 cm 精度最低。这客观反映了全球重力场模型十多年来的技术飞跃。

(2) 最优模型:WHU-CASM-UGM2025 不仅中误差最小,其平均误差 (9.69 cm) 也最小,且“ ≤ 5 cm”的优质点比率最高 (28.7%),而“ ≥ 10 cm”的较大误差点比率最低 (41.9%)。这表明该模型的误差分布最为集中和稳定,整体系统偏差和局部偶然误差都得到了最佳控制。

(3) SGG-UGM-2 表现稳健:作为 GOCE 时代模型的代表,SGG-UGM-2 的精度较 EGM2008 提升了近一倍,充分体现了 GOCE 卫星重力梯度数据对大地水准面中长波精度的根本性改善。

(4) EGM2008 的局限性与适用性:EGM2008 模型的最大误差超过 50 cm,平均误差高达 24.87 cm,超过 95% 的点误差大于 10 cm。这表明,由于缺乏当时我国区域高质量数据,该模型在局部区域存在显著的系统偏差和短波遗漏,单纯使用其全球模型成果已完全不能满足现今厘米级工程测量的需求^[4]。

4.2 HGO 与 ArcGIS 计算结果互差分析

通过对 129 个点、两种软件计算结果的逐点比较,发现最大互差不超过 ± 0.5 mm,中误差 (RMSE) 约为 ± 0.2 mm。这个亚毫米量级的差异完全源于两种软件在格网内插算法细节实现上的微小差异,以及数据格式转换过程中的浮点数取整误差。该结果有力证明了本研究中 GDF→GGF 的数据转换链条是精确、无损的,后续分析结果是可信的。

4.3 误差空间分布特征分析

结合点位分布图分析误差空间分布 (统计数据如表 2 所示),可以发现 WHU-CASM-UGM2025 模型的大误差点 (10 cm) 并未呈现大面积的系统性聚集,而是较为分散,且多出现在沿海岸线变迁带、台地向平原过渡的边缘区域。

表 2 误差分布统计表

上限值 /cm	误差区间 /cm	计数 / 个	占比 /%
≤ 5	0.24~5.00	37	28.68
≤ 10	5.01~10.00	38	29.46
≤ 15	10.01~15.00	29	22.48
≤ 20	15.01~20.00	14	10.85
≤ 25	20.01~25.00	5	3.88
≤ 30	25.01~30.00	4	3.10
≤ 35	30.01~35.00	2	1.55

这些区域正是地形变化和浅部物质密度横向突变最剧烈之处,局部重力场的短波成分极为复杂,即使 2 159 阶的模型也难以完全解析。而在地势平缓的平原核心区域,模型误差普遍较小且稳定。这表明,在未来应用中,对于地形突变带,可能需结合更高分辨率的局部地形改正模型来进一步精化。

4.4 误差源综合分析

本研究中高程异常 / 正常高的评估误差,是多环节误差共同作用的结果,其主要来源包括:

(1) 重力场模型固有误差:由模型构建数据源、阶次截断、拟合算法等引入的系统性误差,是影响评估精度的主导因素。

(2) 大地高测量误差:千寻位置服务提供的 GNSS 大地高观测值,受信号多路径效应、电离层延迟、接收机噪声等影响,存在一定的随机误差。

(3) 正常高测量误差:基于广东 CORS 系统采集的正常高数据,受水准测量 / 重力测量基准传递、局部地形改正等因素影响。

(4) 数据处理误差:包括高程异常格网内插算法误差、格式转换过程中的数值截断误差等,此类误差量级较小,可忽略不计。

综合来看,本研究计算得到的中误差 (RMSE) 是模型固有精度 (主导)+实测数据噪声 (次要)+数据处理误差 (可忽略) 的综合体现。综合评估 WHU-CASM-UGM2025 模型在湛江地区的真实单点模拟精度有望优于 ± 5 cm。

5 工程适用性评估——基于规范标准的对标分析

为将科研成果与工程实践紧密连接,本节将本研究得到的最佳模型精度指标,与国家现行相关测量规范进行对标分析。

5.1 相关规范的高程精度要求

(1) 《工程测量标准》(GB50026—2020)

数字线划图的基本精度要求中规定^[5],以 1:500 测图为例,等高 (深) 线的插求点或数字高程模型格网点相对于邻近图根点的高程中误差在平坦地区不应大于 $\pm 1/3$ 等高距 (等高距 0.5 m),即 ± 16.7 cm。

工程测量标准规定^[5],图根点相对于邻近等级控制点的高程中误差不应大于基本等高距的 1/10。对于平坦地区常用的 1:500 比例尺地形图,基本等高距为 0.5 m,则图根点高程中误差须 $\leq \pm 5.0$ cm。

(2) 《城市测量规范》(CJJ/T8—2011)

DLG 高程精度规定^[6],城市建筑区和基本等高距为 0.5 m 的平坦地区,1:500、1:1 000、1:2 000 DLG 的高程注记点相对于邻近图根点的高程中误差不应大于 0.15 m。等高线插求

点高程中误差作出规定（以基本等高距 0.5 m 计算）：平缓地区不应大于 $\pm 1/3$ 等高距，即 ± 16.7 cm；丘陵地不应大于 $\pm 1/2$ 等高距，即 ± 25.0 cm。

5.2 模型精度对标分析

将表 1 中的中误差 (RMSE) 指标与上述标准进行对标 (以最优模型 WHU-CASM-UGM2025 的 ± 4.70 cm 为例)：

(1) 模型系统差校准后的潜力

在实际工程中，绝不会直接使用模型原始值，而必须利用少量水准点校正系统差。设利用 3~5 个均匀分布的水准点，求解一个常数改正量 $\delta = \text{MeanError} \approx 9.69$ cm。校正后，WHU-CASM-UGM2025 模型的中误差 (RMSE) 将接近其标准偏差，约为 ± 4.66 cm。若进一步拟合一个简单的平面或二次曲面，可进一步吸收模型随空间缓慢变化的系统趋势，其拟合后的残差中误差预计可降至 $\pm 3 \sim 4$ cm。

(2) 对标地形图高程精度

WHU-CASM-UGM2025 模型系统差校准后的预期残差 ($\pm 3 \sim 4$ cm) 远优于 CJJ/T 8—2011 规定的 1:500 地形图等高线插求点平缓地 ± 16.7 cm 的限差，完全满足 1:500 地形图测绘对高程精度的需求。

5.3 模型在不同地貌条件下的适用性建议

结合空间误差分析，可提出分区应用建议：

(1) 平原及平缓台地区：WHU-CASM-UGM2025 模型的内部符合精度很高，经少量点校正后，可应用于 1:500 地形图测绘。

(2) 沿海与地形过渡带：模型误差可能增大至 5~10 cm。在这些区域应用时，建议适当增加联测水准点的密度，采用分区拟合或考虑引入地形改正。

(3) 低山丘陵区：建议谨慎评估。可以该模型作为背景场，但必须联测更多水准点进行非线性拟合。

6 结论与展望

6.1 主要结论

本研究基于湛江地区 129 个已有控制点，系统评估了四种重力场模型用于正常高度计算的精度，并对照国家测量规范分析了其工程适用性，得出以下主要结论：

(1) WHU-CASM-UGM2025 高阶重力场模型精度全面超越了经典的 EGM2008 模型。EGM2008 在湛江地区的中误差 (RMSE) 为 ± 10.21 cm，已不适宜用作高精度直接高程转换。

(2) 由我国自主研发的 WHU-CASM-UGM2025 模型在湛江地区表现最优，中误差为 ± 4.70 cm，平均误差为 9.69 cm。SGG-UGM-2 模型次之 (RMSE = ± 5.15 cm)。

(3) 完整构建并验证了从 ICGEM 下载 GDF 格式模型，经转换生成中海达 HGO 软件可用的 GGF 格式、同时利用

ICGEM 计算下载的 TIF 格式模型在 ArcGIS 中进行表面插值，实现成果交叉验证，形成一套可直接应用、可推广的标准化技术流程，为工程单位使用先进重力场模型提供了可靠技术支撑。

(4) 对标分析表明，WHU-CASM-UGM2025 模型在经过少量水准点进行系统差校正后，其精度可进一步优化，完全满足《工程测量标准》和《城市测量规范》中大比例尺地形图对高程中误差的要求^[5-6]。

6.2 不足与展望

(1) 计划在广东省乃至华南地区更多不同类型的地貌单元开展系统的模型精度检核，构建区域自适应的优化模型。

(2) 软件化是实现技术推广的关键。建议将最优模型和局部校正算法集成为自动化处理模块，嵌入主流 GNSS 手簿或后处理软件中。

参考文献：

- [1] 陈俊勇, 李建成, 宁津生, 等. 地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [2] 宁津生, 刘经南, 陈俊勇, 等. 现代大地测量理论与技术 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- [3] 武汉大学, 中国测绘科学研究院. WHU-CASM-UGM2025 全球重力场模型 [M]. 波茨坦: 国际全球地球模型中心 (ICGEM), 2025.
- [4] 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM 2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析 [J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量标准: GB 50026—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市测量规范: CJJ/T 8—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

【作者简介】

肖新尚 (1991—)，男，河南睢县人，本科，测绘助理工程师，研究方向：不动产测绘、工程测量，email: 864140319@qq.com。

庞国俊 (1983—)，通信作者 (email: 369756595@qq.com)，男，山西孝义人，本科，测绘高级工程师、注册测绘师，研究方向：大地测量、工程测量及不动产测量等。

肖鑫 (1988—)，男，河南睢县人，本科，测绘助理工程师，研究方向：不动产测绘、工程测量及 3S 新技术应用和质量管，email: 120579971@qq.com。

(收稿日期: 2026-05-14 修回日期: 2026-06-30)