

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 利用 GNSS 水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型
作者: 郭春喜, 郭鑫伟, 聂建亮, 王斌, 刘晓云, 王海涛
DOI: 10.13203/j.whugis20200167
网络首发日期: 2022-01-14
引用格式: 郭春喜, 郭鑫伟, 聂建亮, 王斌, 刘晓云, 王海涛. 利用 GNSS 水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200167>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200167

引用格式:

郭春喜, 郭鑫伟, 聂建亮, 等. 利用 GNSS 水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200167 (GUO Chunxi, GUO Xinwei, NIE Jianliang, et al. Establishment of Vertical Movement Model of Chinese Mainland by Fusion Result of Leveling and GNSS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200167)

利用 GNSS 水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型

郭春喜¹ 郭鑫伟¹ 聂建亮¹ 王斌¹ 刘晓云¹ 王海涛¹

¹ 自然资源部大地测量数据处理中心, 陕西 西安, 710054

摘要: 水准和全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 成果是研究大陆垂直运动的重要数据。充分发挥水准点高精度和 GNSS 点分布均匀的优势, 有利于提升垂直运动模型的可靠性。在融合过程中, 针对水准和 GNSS 成果缺少重合点导致速度融合失效的问题, 提出一种基于模型结果融合的方法, 即利用水准和 GNSS 成果分别建立垂直运动模型, 基于模型格网点精度及控制点与模型格网点的最近距离联合确定两类模型点权值, 逐点加权平均, 实现两类模型的融合; 针对利用反距离加权方法建模过程中观测点速度精度和空间距离均影响定权结果的问题, 提出了权因子相乘的方法, 合理确定各因素影响程度。综合利用国家一等水准网、国家 GNSS 大地控制网等成果, 建立了中国大陆垂直运动模型。结果表明: 华北、苏沪一带沉降严重, 极个别区域沉降速度达 100 mm/a; 东北、西藏一带呈现隆升趋势, 局部隆升速度超过 5 mm/a; 其余地区垂直运动相对稳定。

关键词: 水准; 全球导航卫星系统; 垂直运动; 模型融合

中图分类号: P227

文献标识码: A

受内外构造应力的作用, 地壳处于不断运动之中, 其中, 地壳垂直运动深深影响着大型水利桥梁工程、地矿开采工程、城市建设及人类社会的安全, 对其监测至关重要。水准、全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 是定量获取垂直形变的重要大地测量方法, 已被广泛应用。黄立人等^[1-2]利用多期精密水准测量成果研究地壳垂直运动及发展演变特点, 计算板块的垂直运动速率, 刘经南等^[3-5]利用分布均匀的 GPS 站点分析地壳垂直形变特征, 构建了精度相对均匀的垂直运动模型。但是, 水准路线一般沿干道布设, 利用多期水准网数据构建的地壳垂直运动模型, 环内精度低、可靠性差, 而 GNSS 点位分布均匀, 能够有效弥

补水准网空白区控制点缺失问题, 因此, 学者们综合利用水准、GNSS 技术获取垂直形变信息^[6-7]。

受观测手段、数据处理方法、参考基准等因素影响, 不同大地测量技术获取的垂直形变会存在一定的系统偏差, 影响垂直形变分析的可靠性, 因此, 学者们分别从函数模型和随机模型方面研究数据融合, 充分发挥各数据优势, 杨元喜等提出了观测信息融合模式和平差结果融合模式, 实现多源大地测量数据有效融合^[8-10]。在 GNSS 水准融合研究方面, 学者们取得了一定的成果。许才军等利用方差分量估计调整 GNSS、水准的随机模型, 提高地震反演的可靠性^[11-12]; 郭春喜等利用多期 GNSS 水准重合点, 基于转换

项目资助: 国家自然科学基金项目 (41774004, 41574003, 41904040)

第一作者: 郭春喜, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事大地测量数据处理工作。guochunxi1963@163.com

通讯作者: 郭鑫伟, 硕士, 工程师。xw_guo@126.com

思想和联合平差方法实现了 GNSS 水准速度的融合统一, 削弱了两类高程变化速度之间的系统误差影响^[13-14]。然而实际中, 若 GNSS 和水准不存在重合点, 较难通过转换方法和联合平差方法实现 GNSS 水准融合统一。本文综合利用国家一等水准网三期平差成果、2000 国家 GPS 大地控制网、国家 GNSS 大地控制网、国家卫星大地控制网、全国基准站网等成果, 基于反距离加权方法分别建立 GNSS、水准垂直运动格网模型, 按照距离最近及格网点精度综合确定格网点权值, 通过加权平均方法实现两种格网融合, 建立中国大陆垂直运动模型。

1 垂直运动模型的建立

地壳垂直运动表现为地球表面连续的形状变化, GNSS 点和水准点则是该连续变化曲面上的采样点, 为了在空间域中模拟这种变化, 需要利用这些采样点的速度拟合出整个区域的地壳垂直运动速度面, 构建该区域的垂直运动模型。目前, 构建速度场模型常用的方法有最小二乘配置、Kriging 插值、多面函数和反距离加权法^[15-17]。最小二乘配置和 Kriging 插值方法需要分布均匀的已知点求解协方差函数, 且要求逼近场是平稳随机场, 且各向同性; 多面函数应用较为广泛, 但节点、核函数和平滑因子对拟合结果影响较大, 需要经过反复试算来确定相关参数; 反距离加权法计算简单, 灵活, 基于相近相似的原理, 实现待定点的插值计算, 该方法不存在分区计算, 且不存在接边时数据的损失而影响精度的现象, 此外, 在较小区域内, 垂直运动趋势可能发生剧烈变化, 相较其它拟合方法, 反距离加权法的拟合结果更能反映出这种剧烈变化, 因此广泛应用于垂直运动速度场建模中。在插值计算中, 与距离相关的权定义为:

$$P_i^d = \begin{cases} R^{-2} & S_i \leq R \\ S_i^{-2} & S_i > R \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为搜索半径; S_i 为第 i 个重合点与待定点之间的距离。则待定点的速度 V 为:

$$V = \sum_{i=1}^N (P_i^d \times V_i) / \sum_{i=1}^N P_i^d \quad (2)$$

式 (2) 计算的待定点速度, 仅仅考虑了空间距离对于结果的影响, 而重合点速度精度同样影响待定点的结果。当高程基准一致时, 基于一定时间跨度内的两期高程成果, 可以计算出重合点的垂直速度, 速度值等于两期成果间的高程差异和时间跨度的商。根据误差传播定律, 两期高程成果差异的误差、时间跨度均影响速度精度, 即:

$$\sigma_{V_i} = \frac{\sigma_{\Delta h_i}}{\Delta t_i} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{\Delta h_i} = \sqrt{\sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2}$, 表示第 i 点两期高程成果差异的中误差, σ_{i1} 、 σ_{i2} 分别为该点第一期和第二期高程成果中误差; Δt_i 为两期成果观测的时间跨度。利用 (4) 式确定与 i 点速度精度相关的权:

$$P_i^v = f(\sigma_{V_i}) \quad (4)$$

式中, $f(\sigma_{V_i})$ 为关于 σ_{V_i} 的权函数, 如 $f(\sigma) = 1/\sigma$ 。将 (2) 式中的 P_i^d 修正为 P_i , 对于 P_i , 采用如下方式确定:

$$P_i = P_i^v \times P_i^d \quad (5)$$

2 垂直运动模型的融合

在水准和 GNSS 速度融合时, 若研究区域存在分布均匀的 GNSS 水准重合点, 可采用转换思想和联合平差方法实现: (1) 以 GNSS 水准重合点的大地高速度和正常高度差异为观测值, 基于最小二乘配置构建速度转换模型, 基于该模型将大地高速度转化为正常高速度, 实现速度融合^[13]; (2) 联合平差计算测站正常高速度, 即以水准高差和 GNSS 高程变化速度作为联合观测值, 以 GNSS 水准重合点大地高变化速度与正常高变化速度相等为限制条件, 采用抗差最小二乘方法估计待定点速度, 实现速度融合^[14]。上述方法通过 GNSS 水准重合点建立大地高速度和正常高速度间的联系, 在一定程度上削弱系统差的影响, 若研究区域不存在重合点, 系统差无法准确计算, 上述方法难以实现 GNSS、水准数据的融合。

为了充分利用两类观测成果, 在尽量减小系统差的影响下, 采用基于垂直运动模型

结果的模式融合：首先将大地高速度方向化归到正常高速度方向；然后分别基于两类速度构建垂直运动模型；最后基于一定法则融合两类垂直运动模型。基于垂直运动模型结果的融合，核心是确定两类模型的融合法则。在水准垂直运动的模型建立过程中，距离垂直运动模型格网点最近的实测水准点贡献最大，因此，在垂直运动模型融合中，以离模型格网点最近的实测点的距离为基础，分别确定水准、GNSS 垂直运动模型中该格网点的权值。水准垂直运动模型格网点 (i, j) 的权值定义为

$$p_{i,j}^L = \frac{1}{\min(S^L)} \quad (6)$$

式中， i 为水准垂直运动模型格网点的某一行数； j 为水准垂直运动模型格网点的某一列数； S^L 为参与水准垂直运动建模的水准点与当前格网点的距离。

同理，GNSS 垂直运动模型格网点 (i, j) 的权值定义为

$$p_{i,j}^G = \frac{1}{\min(S^G)} \quad (7)$$

式中， S^G 为参与 GNSS 垂直运动建模的 GNSS 点与当前格网点的距离。

在融合过程中，两类垂直运动模型精度存在差异，而这种差异在整个区域范围内并不相同。因此在融合前需要确定当前格网点的精度。以水准垂直运动模型某个格网点 (i, j) 为中心，搜索该点周边 0.5° 范围内的实测水准点，利用水准垂直运动模型内插这些点的速度，并与实际速度作差得到残差 δV_k ，按照 (8) 式计算格网点 (i, j) 的精度

$$\sigma_{i,j}^L = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\delta V_k^2) / n} \quad (8)$$

式中， n 为格网点周边 0.5° 范围内的水准点点数。若在 0.5° 范围内 n 值较小(如小于 10)，将搜索范围依次扩大 0.1° ，直至得到合理的

点数。同理确定 GNSS 垂直运动模型格网点 (i, j) 精度 $\sigma_{i,j}^{GNSS}$ 。

利用水准垂直运动模型和 GNSS 垂直运动模型进行融合，某格网点垂直运动速度按 (6) - (8) 式确定权值，则融合后的垂直运动模型格网点 (i, j) 的速度 $V_{i,j}$ 为：

$$V_{i,j} = \frac{V_{i,j}^L p_{i,j}^L / \sigma_{i,j}^L + V_{i,j}^G p_{i,j}^G / \sigma_{i,j}^{GNSS}}{p_{i,j}^L / \sigma_{i,j}^L + p_{i,j}^G / \sigma_{i,j}^{GNSS}} \quad (9)$$

式中， $V_{i,j}^L$ 为水准垂直运动模型格网点 (i, j) 的速度； $V_{i,j}^G$ 为 GNSS 垂直运动模型格网点 (i, j) 的速度。

3 中国大陆垂直运动模型的建立

3.1 资料概况

自上世纪 70 年代至今，我国共完成三期一等水准测量，分别为国家第二期一等水准网、国家第二期一等水准网复测和国家测绘基准一期工程国家一等水准网，详细信息见表 1 所示^[18-19]。分析各期水准成果的重合点，利用静态平差方法，计算重合点高程和速度。在平差过程中，各期水准网均以青岛水准原点为起算点，高程采用 72.260 4 m。

表 1 水准成果资料统计表

Tab. 1 Statistical table of leveling data

名称	施测年代	全中误差/mm
国家第二期一等水准网	1976—1984	1.03
国家第二期一等水准网复测	1991—1999	1.06
国家测绘基准一期工程国家一等水准网	2012—2015	0.92

收集 2000 国家 GPS 大地控制网、国家 GNSS 大地控制网、卫星大地控制网（2016—2018 年）和全国基准站网成果，详细信息见表 2。

表 2 GNSS 成果资料统计表

Tab. 2 Statistical table of GNSS data

名称	施测年代	点数	参考框架	参考历元
2000 国家 GPS 大地控制网	1991—2001	2524	ITRF97	2000.0
国家 GNSS 大地控制网	2004—2006 2013—2015	4508	ITRF2008	2015.650

卫星大地控制网	2016—2018	1076	ITRF2008	2016.406;2017.498; 2018.338
全国基准站网	2016—2017	2426	ITRF2008	2016.625;2017.625

由表 2 可知,不同项目成果参考框架不一致,为削弱参考框架对速度的影响,参考 IERS 公布的坐标框架转换参数,将 ITRF2008 框架、平均瞬时历元的 GNSS 坐标成果统一至 ITRF97 框架、平均瞬时历元,计算 ITRF97 框架下各重合点的垂直运动速度。

选取垂直运动模型建模点时,以重合点观测时间跨度为第一选点原则,以观测年代为第二选点原则。优先选取时间跨度长、现势性强的重合点。分析水准成果和 GNSS 成果中的粗差点,并逐一剔除,最终确定 6038 个水准重合点、2720 个 GNSS 重合点作为建模点,垂直运动速度分别见图 1、2 所示。

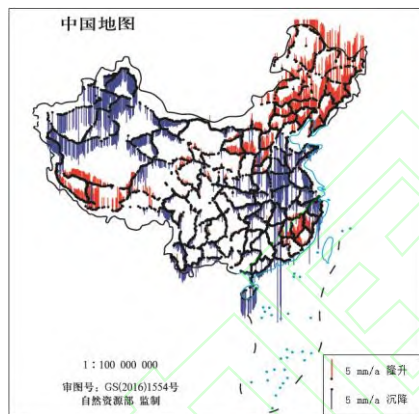


图 1 水准点垂直运动速率图

Fig. 1 Vertical Velocity of Leveling Points

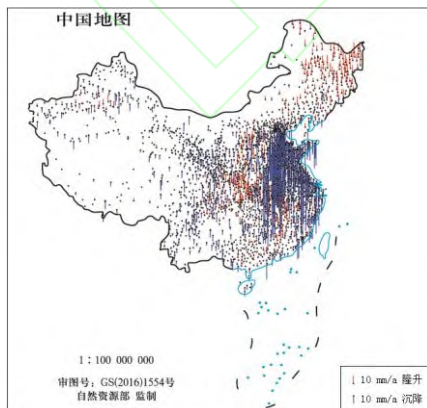


图 2 GNSS 点垂直运动速率图

Fig. 2 Vertical Velocity of GNSS Points

按照 (3) 式计算水准、GNSS 点速度精度,统计结果见表 3 所示。

表 3 水准点和 GNSS 点垂直速度误差分布

Tab. 3 Error distribution for vertical velocity of

leveling and GNSS points

误差分布 /mm a ⁻¹	水准点	GNSS 点
(0, 1]	0.0%	81.6%
(1, 2]	0.4%	11.3%
(2, 3]	6.5%	4.8%
(3, 6]	76.4%	2.3%
(6, 12]	16.7%	0.0%
(12, +∞)	0.0%	0.0%

3.2 垂直运动格网模型的建立

大地高方向为某点椭球法线的方向,正常高方向为该点的垂线方向,二者之间存在垂线偏差。某点大地高变化量 ΔH 投影到正常高方向,大地高变化量的改正量 δh 为

$$\delta h = \Delta H \times (|\cos \mu| - 1) \quad (10)$$

式中, μ 为垂线偏差。

在“我国天文大地网与高精度 GPS2000 网联合平差”项目中,基于移去-恢复技术和高阶次地球重力场模型,利用全国重力资料 and 30" × 30" 数字地形模型,完成了全国分布均匀的 48 919 个大地点相对于 WGS84 椭球垂线偏差的精化计算,经外部检核,垂线偏差子午分量总体精度为 ±1.45", 卯酉分量的总体精度为 ±1.50" [20]。由于 WGS84 椭球体和 ITRF97 对应的椭球体差异很小,因此,利用“我国天文大地网与高精度 GPS2000 网联合平差”项目 48 919 个大地点的垂线偏差插值计算本文 2 720 个 GNSS 控制点垂线偏差 μ , 利用 (10) 式计算大地高变化量的改正量 δh 以及速度改正量 δv , 结果见表 4 所示。由表可知,大地高变化量的改正量及速度改正量的值较小,按照一等水准复测周期 15 年计算 [21], 累计高程变化远小于 0.1 mm, 因此后续计算中将忽略垂线偏差导致的速度差异。

表 4 垂线偏差信息统计表

Tab. 4 Statistical table of deflection of the vertical

统计量	$ \mu /''$	$ \delta h /\text{mm}$	$ \delta v /\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$
最小值	0.3	0.00	0.00
最大值	46.3	1.3×10^{-6}	1.4×10^{-8}

利用重合点速度，基于反距离加权法分别建立基于水准和 GNSS 成果的中国大陆垂直运动模型，利用垂直运动模型内插建模点的速度，与建模点实际速度作差得到残差 δv_i ，按照 (11) 式计算模型精度，结果显示，水准垂直运动模型精度为 $\pm 0.4 \text{ mm/a}$ ，GNSS 垂直运动模型精度为 $\pm 4.1 \text{ mm/a}$ 。显然，水准模型精度较 GNSS 模型精度高，经分析，水准点沿水准路线施测，同一条水准路线上的速度一致性高，而 GNSS 速度变化较为剧烈，且观测时间跨度短，整体速率较水准点偏大（在沉降区表现尤为显著），这些原因造成水准模型精度高、GNSS 模型精度低的现象。

现象。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta V_i^2) / n} \quad (11)$$

如图 3 所示为基于 GNSS 成果和基于水准成果构建的中国大陆垂直运动模型的差异图。从图中可以看出，中国大陆 90% 以上的地区速度差异小于 5 mm/a ，说明二者一致性较好。差异较大的地区主要分布于华北、华东等沉降区，显然，GNSS 计算的沉降速度要比水准成果计算的沉降速度大。从数据观测时间分析，水准对应的正常高速度反映近 50 年的垂直运动情况，GNSS 对应的大地高速度则主要反映近 20 年的垂直运动情况，由此可知，华北、华东地区沉降速度呈现加速状态，而其它地区垂直运动速度变化较小。

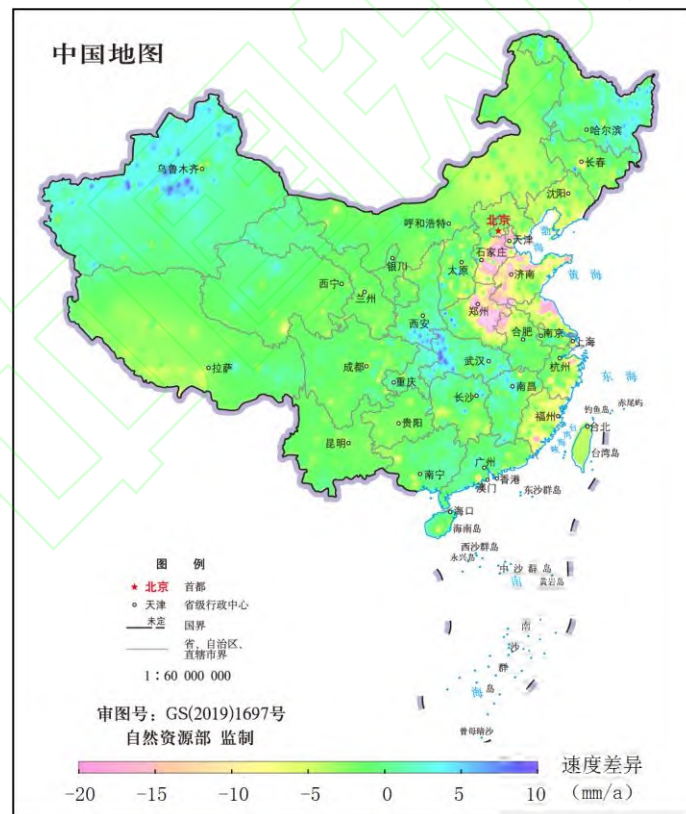


图 3 中国大陆 GNSS 与水准垂直运动模型差异图

Fig. 3 The difference of vertical movement model between GNSS and leveling in Chinese mainland

3.3 垂直运动格网模型的融合

充分发挥水准点垂直形变信息精度高，

GNSS 点分布均匀的优势，考虑两类模型精度差异，将基于水准和 GNSS 成果建立的垂

直运动模型按照第 2 节所述方法进行融合，建立中国大陆垂直运动模型。利用融合后的垂直运动模型双线性内插所有参与建模的水准点、GNSS 点垂直速度，以内插速度与实测速度的差值作为残差，统计模型精度，结果为 $\pm 2.5 \text{ mm/a}$ 。

为了衡量 GNSS 成果对水准垂直运动模型的改善效果，按照 GNSS 测站分布密度情况，分别统计青藏地区、中国大陆其它地区、中国大陆整体垂直运动模型精度。在上述地区，均匀选取 20% 的 GNSS 和水准点作为检核点，分别利用水准垂直运动模型和融合后的垂直运动模型双线性内插检核点的速度，并与实际速度比较，利用（11）式统计精度，结果见表 5 所示。

表 5 检核点残差信息统计结果

Tab. 5 Statistical result of residual for checking points

模型	青藏 /mm a ⁻¹	其它 /mm a ⁻¹	全国 /mm a ⁻¹
水准模型	1.7	6.9	5.7
融合模型	1.1	3.2	2.8

由表 5 可知，无论是青藏地区还是国内其它地区，增加 GNSS 成果后，模型的 RMS 均明显改善。从改善情况看，青藏地区精度提升 35.3%，国内其它地区提升 53.6%，这一点与 GNSS 站点密度相符。从全国来看，改善效果同样明显。因此，相较于单一水准成果，GNSS 成果能够有效改善水准垂直运动模型的精度。

为进一步分析 GNSS 成果的作用，在水准环线内部（远离水准线）均匀选取 GNSS 点成果，分别利用水准垂直运动模型和融合后的垂直运动模型双线性内插这些 GNSS 点的速度，并与实际速度比较，利用（11）式统计精度，结果显示，增加 GNSS 成果后，水准垂直运动模型的精度由 6.6 mm/a 提升至 3.1 mm/a，提升了约 53.0%，提升较大，说明 GNSS 成果能够有效改善水准环线内部的模型精度。

融合后的中国大陆垂直运动模型见图 4 所示。

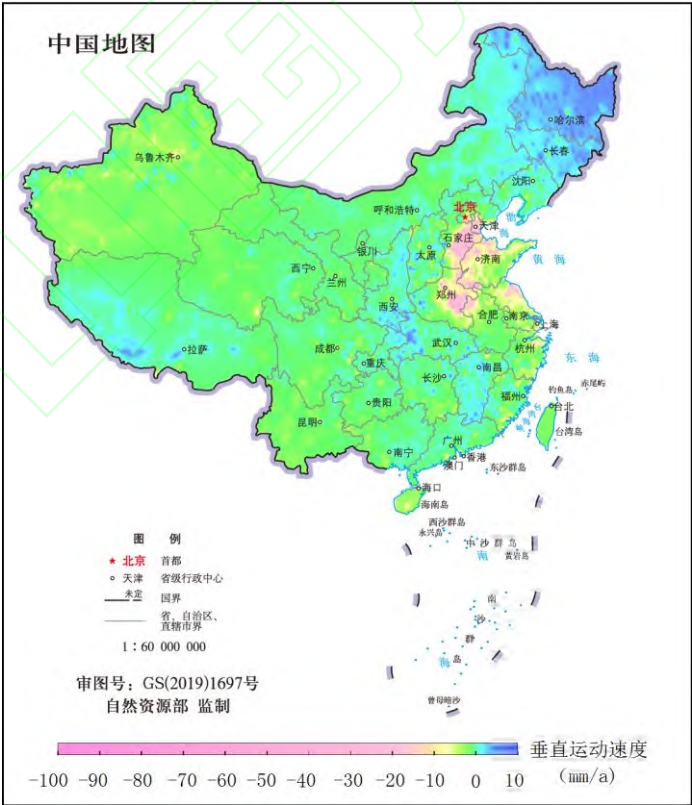


图 4 中国大陆垂直运动模型

Fig. 4 The vertical movement model of Chinese mainland

由图 4 可知,全国大陆整体垂直运动较为平稳。隆升剧烈区主要分布在东北地区、西藏南部地区,最大速率达 5 mm/a,陕南、西南地区具有一定隆升趋势。沉降严重区主要分布于华北平原、苏沪沿海地区,极个别区域沉降达 100 mm/a,汾渭盆地、新疆地区表现为沉降,平均沉降速度约为 5 mm/a。华南地区垂直运动整体比较稳定。

青藏高原南部表现出隆升运动趋势,该地区隆升运动主要是由于印度洋持续向北俯冲,与欧亚板块碰撞,使得该地区不断隆升,随着俯冲力向北减弱,隆升趋势亦逐渐减弱。东北隆升区范围最广,地跨东北三省和内蒙古东部,自西南向东北速率逐渐增大。

华北平原表现出剧烈的沉降运动,沉降中心主要位于京津地区、鲁西北、鲁西南及河北东南部、河南东北部;苏沪沿海地区沉降较为显著,由沿海一带向内陆沉降速率逐渐降低。利用全国一等水准成果前两期和后两期成果分别分析华北沉降区上世纪七十年代至九十年代以及九十年代至今的垂直运动速度,结果显示九十年代以后垂直运动速度加快。以山东为例,对比分析山东沉降区部分观测井 2010 年至 2016 年水位标高,部分观测井水位下降速度超过 2.5 m/a。自上世纪 80 年代中后期,随着这些地区城市建设进程加快、工业用水量猛增,导致地下水水位加速下降,这是导致沉降的主要原因。除构造运动外,地下矿物、油气开采亦是导致沉降的重要原因,这一点在汾河盆地、新疆北部表现明显。

4 总结

水准测量和 GNSS 测量是定量研究地壳垂直运动的重要方法。本文重点研究了 GNSS、水准不存在重合点时,融合构建垂直运动模型的方法。针对垂直运动建模过程中同一观测量受空间距离和速度精度双重因素影响的问题,提出了权因子相乘的定权方法,确定了每个观测值的合理权值,基于反距离加权法构建了垂直运动模型;基于垂直运动模型构建过程中距离模型格网点最近的实测点速度贡献最大的特点,提出一种动态定权方法,实现了水准和 GNSS 垂直运

动模型的融合。充分发挥水准点高精度优势和 GNSS 点分布均匀优势,利用国家一等水准网三期平差成果、2000 国家 GPS 大地控制网等成果,建立了中国大陆垂直运动模型,其内符合精度为 ± 2.5 mm/a。根据垂直运动模型可知,华北、苏沪一带沉降严重,极个别区域沉降速度超过 100 mm/a;东北、西藏一带呈现上升趋势,局部上升速度超过 5 mm/a;其余地区垂直运动相对稳定。

参考文献

- [1] Huang Liren, Ma Qing, Wang Ruobai. Vertical Crustal Movement in A Part of China Mainland[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004,24(4):7-12 (黄立人,马青,王若柏.中国大陆部分地区的地壳垂直运动[J].大地测量与地球动力学,2004,24(4):7-12)
- [2] Aline P, Bradley S, Tony H. Ground Deformation Patterns at White Island Volcano (New Zealand) between 1967 and 2008 Deduced from Levelling Data[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, 181(3-4): 207-218.
- [3] Liu Jingnan, Yao Yibin, Shi Chuang, et al. Preliminary Research on Characteristic of Present-day Vertical Deformation of China Mainland[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002,22(3):1-5 (刘经南,姚宜斌,施闯,等.中国大陆现今垂直形变特征的初步探讨[J].大地测量与地球动力学,2002,22(3):1-5)
- [4] Liu Genyou, Zhu Yaozhong, Xu Houze, et al. Study on Height Change of Chinese Tide Gauges by GPS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005,30(12): 1044-1047 (刘根友,朱耀仲,许厚泽,等.GPS 监测中国沿海验潮站垂直运动观测研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2005,30(12):1044-1047)
- [5] Hiroshi P S, Kaoru A, Osamu O. GPS-measured Land Subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan[J]. *Engineering Geology*, 2003, 67(3): 379-390.
- [6] Gabriele B, Flavio B, Marco U. Levelling and GPS Networks to Monitor Ground Subsidence in the Southern Po Valley[J]. *Journal of*

- Geodynamics*, 2000, 30(3):355-369.
- [7] Mahdi M, Yahya D, Thomas R W, et al. Land Subsidence in Mashhad Valley, Northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2007, 168(2): 518-526.
- [8] Yang Yuanxi, Zeng Anmin. Fusion Modes of Various Geodetic Observations and Their Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008,33(8):771-774 (杨元喜,曾安敏.大地测量数据融合模式及其分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8): 771-774)
- [9] Wang Leyang, Yu Hang. Total Least Squares Joint Adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(12):1683-1689 (王乐洋,余航.总体最小二乘联合平差[J].武汉大学学报·信息科学版,2016, 41(12):1683-1689)
- [10] Yang Yuanxi. Adaptive Navigation and Kinematic Positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press,2006(杨元喜.自适应动态导航定位[M].北京:测绘出版社,2006)
- [11] Xu Caijun. Progress of Joint Inversion on Geodesy and Geophysics[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6):555-561(许才军.大地测量联合反演理论和方法研究进展[J].武汉大学学报·信息科学版, 2001,26(6):555-561)
- [12] Zhang Chaoyu, Xu Caijun. Sequential Algorithm of Geodesy Joint Inversion with Auto-match Weight Ratio and Its Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012,37(10):1140-1144 (张朝玉,许才军.具有自适应权比的大地测量联合反演序贯算法及其应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(10):1140-1144)
- [13] Guo Chunxi, Nie Jianliang, Tian Jie, et al. Analysis of Vertical Deformation with the Adaptive Fusion of GNSS and Leveling Elevation Variation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1):7-12 (郭春喜,聂建亮,田婕,等. GNSS水准高程变化自适应融合的垂直形变分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020,45(1):7-12)
- [14] Ding Alu, Tian Jie, Nie Jianliang,et al. The Adaptive Combination Adjustment of GNSS and Leveling Data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(11):126-129 (丁阿鹿,田婕,聂建亮,等.GNSS水准自适应联合平差[J].测绘通报, 2019(11):126-129)
- [15] Zeng Anmin, Qin XianPing, Liu Guangming, et al. Hardy Multi-quadric Fitting Model of Chinese Mainland Horizontal Crustal Movement [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013,38(4): 394-398(曾安敏,秦显平,刘光明等.中国大陆水平运动速度场的多面函数模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013,38(4):394-398)
- [16] Liu Xiaoxia, Jiang Zaisen, Wu yanqiang. The Applicability of Kriging Interpolation Method in GPS Velocity Gridding and Strain Calculating[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014,39(4):457-461 (刘晓霞,江在森,武艳强. Kriging 方法在 GPS 速度场网格化和应变率场计算中的适用性[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014,39(4):457-461)
- [17] Fan Zide, Li Jialin, Deng Min. An Adaptive Inverse-distance Weighting Spatial Interpolation Method with the Consideration of Multiple Factors [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 842-847 (樊子德,李佳霖,邓敏.顾及多因素影响的自适应反距离加权插值方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2016,41(6):842-847)
- [18] Dong Hongwen, Gu Dansheng, Li Guozhi, et al, Research on the Current Vertical Crustal Movement in Chinese Mainland [M].Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 2002 (董鸿闻,顾旦生,李国智,等.中国大陆现今地壳垂直运动研究[M].西安:西安地图出版社,2002)
- [19] Wang WenLi, Guo Chunxi, Ding Li, et al. Elevation Change Analysis of the Nation First Order Leveling Points in Recent 20 Years[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(1): 1-8(王文利,郭春喜,丁黎,等.全国一等水准点近20年变化分析[J].测绘学报,2019,48(1): 1-8)

- [20] Ning Jinsheng, Guo Chunxi, Wang Bin, et al. Determination of the deflection of the vertical in mainland China area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(12):1035-1038 (宁津生,郭春喜,王斌,等.我国陆地垂线偏差精化计算[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(12):1035-1038)
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会.国家一、二等测量规范:GB/T 12897-2006[S].北京:中国标准出版社,2006 (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for the First and Second Order Leveling: GB/T 12897-2006[S].Beijing: Standards Press of China)

Establishment of Vertical Movement Model of Chinese Mainland by Fusion Result of Leveling and GNSS

GUO Chunxi¹ GUO Xinwei¹ NIE Jianliang¹ WANG Bin¹ LIU Xiaoyun¹ WANG Haitao¹

¹ Geodetic Data Processing Centre of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: The leveling and GNSS results are provided important data for studying the vertical movement in mainland. Give full play to the advantages of high-precision leveling points and uniform distribution of GNSS points and help improve the reliability of the vertical movement model. In the process of fusion, that the lack of coincidence points between leveling and GNSS causes joint adjustment of velocity fusion to fail, a fusion method based on final model is proposed. The method consists of two steps. Firstly, establish respective vertical movement model by leveling and GNSS with the method of inverse distance to a power. Secondly, fuse two types of models by weighted average according to the grid point precision and nearest point principle depending on the distance between grid point and measured point. Aiming at the problem that the weight associated with the distance and the velocity precision affects the final model when inverse distance to a power is applied, a method of multiplying the weight is proposed to determine reasonable weight value for each factor. The vertical movement model of Chinese mainland is established by comprehensively using the national first order leveling result, national GNSS geodetic control network and so on. In order to measure the improvement of GNSS results on the vertical movement model, utilize 20% of the modeling points selected from leveling and GNSS points uniformly to statistics the precision of leveling and fused vertical movement model. The results show that the fused vertical movement model has increased by 35.3% in Tibet, 53.6% in other region of China and 50.8% in Chinese mainland. Therefore, GNSS results can improve the precision and accuracy of the leveling vertical movement model, which is especially obvious inside the leveling loop. According to fused vertical movement model, the characteristic of vertical movement is analyzed: North China Plain and Jiangsu-shanghai area are severe subsiding, where the velocity of individual areas is up to 100 mm/a, the North-east of China and Tibet areas are uplifting, and the maximum velocity exceeds 5 mm/a in some local area, the vertical movement in other areas is relatively stable.

Key words: leveling; global navigation satellite system; vertical movement; model fusion

First Author: GUO Chunxi, PhD, professorate senior engineer, specializes in geodetic data processing. Email: guochunxi1963@163.com

Corresponding Author: GUO Xinwei, master, engineer. Email: xw_guo@126.com

Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (41774004, 41574003, 41904040) .

网络首发:

标题: 利用 GNSS 水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型

作者: 郭春喜, 郭鑫伟, 聂建亮, 王斌, 刘晓云, 王海涛

DOI:10.13203/j.whugis20200167

引用格式:

郭春喜, 郭鑫伟, 聂建亮, 等. 利用 GNSS 水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200167 (GUO Chunxi, GUO Xinwei, NIE Jianliang, et al. Establishment of Vertical Movement Model of Chinese Mainland by Fusion Result of Leveling and GNSS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200167)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

GNSS 水准高程变化自适应融合的垂直形变分析

郭春喜, 聂建亮, 田婕, 王斌, 靳鑫洋, 赵大江

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 7-12

利用自适应水准网动态平差建立山东垂直运动速度模型

聂建亮, 刘晓云, 田婕, 李秀明, 赵大江, 黄功文, 张海平

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4): 620-625

陕西地区垂直形变分析

杨宏山, 聂建亮

武汉大学学报·信息科学版,