



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：一等水准成果构建的中国大陆垂直运动模型研究
作者：郭鑫伟, 郭春喜, 聂建亮, 王海涛, 田婕
网络首发日期：2022-01-28
引用格式：郭鑫伟, 郭春喜, 聂建亮, 王海涛, 田婕. 一等水准成果构建的中国大陆垂直运动模型研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20220128.0949.002.html>



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。

一等水准成果构建的中国大陆垂直运动模型研究

郭鑫伟¹ 郭春喜¹ 聂建亮¹ 王海涛¹ 田婕¹

¹ 自然资源部大地测量数据处理中心, 陕西 西安, 710054

摘要: 国家多期一等水准网成果是研究中国大陆地壳垂直运动的宝贵数据。综合利用国家三期一等水准网成果, 分析中国近 50 a 地壳垂直运动变化趋势。首先, 确定水准重合点高程变化量, 计算重合点变化速率; 然后, 基于拟合点和检核点残差分布评估常用插值方法优劣性, 确定最优建模方法; 最后, 构建基于水准成果的中国大陆垂直运动模型, 分析各区域垂直运动趋势。结果表明: 近 50 a 来, 华北平原、苏沪、汾渭盆地、新疆和海南表现为沉降运动, 其中, 华北平原、苏沪一带沉降剧烈, 沉降速率达 (40.4 ± 1.4) mm/a; 西藏南部、东北地区、福建及陕北地区表现出隆升运动趋势, 其中, 西藏南部、东北东部隆升运动趋势较为剧烈, 隆升速率达 (5.4 ± 2.5) mm/a; 华南等其他地区垂直运动趋势相对稳定。

关键词: 一等水准; 中国大陆; 地壳垂直运动; 模型

中图分类号: P227

文献标识码: A

高精度地壳垂直运动信息是国家高程基准维护、灾害防治和地球科学研究中不可或缺的基础数据, 对推动国民经济建设和社会可持续发展具有重要意义。目前, 定量获取地壳垂直运动的主要方式为水准、全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 和合成孔径干涉雷达 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术^[1-4]。相较于水准成果, GNSS、InSAR 积累的成果时间跨度较短, 因此, 对于中国大陆长期地壳垂直运动的研究, 仍以水准成果资料为主。利用 20 世纪 50 年代至 80 年代的一、二等水准成果, 中国地震局绘制了中国第一张地壳垂直运动速率图, 宏观描述了中国地壳垂直运动的整体情况, 但是, 受观测条件和技术限制, 绘图采用的水准重合点较为稀少^[5]; 随后, 中国地震局利用 1951—1990 年的一、二等水准资料, 编制了地壳垂直运动速率图和梯度图, 相较于第一张垂直运动速率图采用的数据丰富, 但遗漏了部分可用资料^[6]。之后, 国家测绘局利用 1951—1999 年三期一、二等水准资料, 编制了中国大陆垂直运动速率图, 细化了中国地壳垂直运动特征, 初步建立了中国高精度地壳垂直运动模型^[7]。2012 年 6 月, 中国启动

国家现代基准体系基础建设一期工程, 建设了中国现代高程控制网, 全面更新了中国一等水准网, 为中国地壳垂直运动模型的更新提供了重要的基础数据。

利用垂直形变资料, 学者们研究了地壳垂直运动模型建立的理论和方法。黄立人等深入研究了多面函数在地壳垂直运动中的应用, 分析了核函数、平滑因子、节点的选择方法^[8]; 文献^[9]将经验正交函数分解方法引入地壳垂直运动模型中; 文献^[10]基于全球通量均衡假设建立地壳垂直运动的动力学模型, 此外, 谱分析方法^[11]、Delaunary 三角网插值法^[12]在垂直运动建模中亦有应用。垂直运动建模方法多样, 但是不同的空间尺度和速率差异均影响模型的精度。文献^[13]利用波兰多期水准数据, 分析了多种建模方法对地壳垂直运动的影响, 建议采用最近邻域法构建垂直运动模型, 但其采用的数据分布范围较小, 且垂直运动速率差异不明显, 不适用于中国大陆, 因此有必要分析确定适合中国大陆的垂直运动模型构建方法。本文利用中国 20 世纪 70 年代至今共三期全国范围的高精度水准测量成果, 研究地壳垂直运动建模的最佳方法, 构建中国大陆最新地壳垂直运动模型, 并进行垂直运动分析。

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

第一作者: 郭鑫伟, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大地测量数据处理。Email: xw_guo@126.com

1 水准资料分析

1.1 中国一等水准资料概况

自 20 世纪 70 年代以来,中国先后完成三次全国范围的高精度水准测量,分别是 1976—1984 年建设的国家第二期一等水准网、1991—1999 年建设的国家第二期一等水准复测网和 2012—2015 年建设的中国现代高程控制网。

国家第二期一等水准网是中国第一个按照统一规划和技术标准布设的全国规模的精密水准网,全网共布设 289 条路线,总长度约 9.3 万 km,构成 100 个闭合环,形成路线结点 186 个,高程基准采用“1985 国家高程基准”。经平差处理,国家第二期一等水准网 100 个闭合环的每千米水准测量全中误差为 $\pm 1.03 \text{ mm}$ ^[7]。

国家第二期一等水准复测网共复测 248 条一等水准路线、总长度约 8.5 万 km、构成 77 个闭合环、形成 172 个结点,高程基准采用“1985 国家高程基准”。经平差处理,国家第二期一等水准复测网每千米水准测量全中误差为 $\pm 1.06 \text{ mm}$ ^[7,14]。

中国现代高程控制网是中国目前精度最高、现势性最强的 1985 国家高程基准成果。该网在全国均匀布测一等水准路线 431 条、总长度 12.6 万 km,水准点数 26694 个、构成水准闭合环 148 个,并且在每个水准点上实施了加密重力测量。经平差处理,中国现代高程控制网首次实现了全网每千米水准测量全中误差 $\pm 0.92 \text{ mm}$ 、全网 148 个水准环闭合差全部合限的精度指标,全面更新了中国一等水准网^[14]。

为方便描述,将上述三期水准成果依照时间顺序分别定义为国家一期一等水准网、国家二期一等水准网及国家三期一等水准网。

1.2 水准重合点速率计算

多期水准网重合点速率计算,常采用如下方法计算:静态平差,即固定参考基准,对每一期水准网单独平差,基于观测时间跨度计算水准重合点速率;动态平差,即考虑基准速率,联合多期水准网平差,直接获取水准点速率。第一种方法常应用于一期水准

网观测时间跨度较短,各期间隔较长的情况;第二种方法常应用于一期水准网观测时间跨度较长,各期间隔较短的情况^[1]。本文采用静态平差计算水准点速率。

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。由于国家一等水准路线较长,每条水准路线的测段较多,为保证线路的整体性,以各条路线中施加过各项改正(如标尺长度改正、正常水准面不平行改正、重力异常改正等)的观测高差累积量作为观测值,以路线结点作为参数建立误差方程,计算结点高程与中误差,平差过程中利用各水准路线测站数定权。结点平差模型为:

$$V = BX - L \quad (1)$$

$$\text{式中, } V = \begin{bmatrix} \vdots \\ V_{h_{ij}} \\ \vdots \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & -1 & \cdots & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} \vdots \\ \delta H_i \\ \vdots \\ \delta H_j \\ \vdots \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} \vdots \\ H_i^0 - H_j^0 + h_{ij} \\ \vdots \end{bmatrix}。 \text{其中, } h_{ij}$$

为结点 i 至结点 j 的高差观测值; H_i^0 、 δH_i

为结点 i 的正常高近似值及其改正数; H_j^0 、

δH_j 为结点 j 的正常高近似值及其改正数。

确定观测量权值 P 的计算公式为:

$$P = \frac{C}{N} \quad (2)$$

式中, C 为常数; N 为一条水准路线测站总数。

结点平差完成后,将每条路线的测段观测量按附和路线处理,中间点高程 H 的计算公式为:

$$H = X + h + P \times V \quad (3)$$

式中, X 为结点平差后该路线起点的高程; V 为该线路的改正数; h 为中间点距离起点的累计高差; P 为中间点的权,根据测段中测站数确定。三期水准网平差情况见表 1 所示。

表 1 水准平差成果统计表

Tab. 1 Statistical Table for Adjustment Result of Leveling Data

水准成果	全中误差/mm	最弱点中误差/mm	水准点中误差分布统计				
			(0,10]	(10,20]	(20,30]	(30,40]	(40,50]
			mm	mm	mm	mm	mm
国家一期一等水准网	±1.03	±41.3	0.00%	0.00%	47.37%	47.37%	5.26%
国家二期一等水准网	±1.06	±48.7	1.16%	1.16%	5.82%	58.72%	33.14%
国家三期一等水准网	±0.92	±35.7	0.34%	6.33%	72.72%	20.61%	0.00%

从水准点中误差分布来看,国家一期一等水准网和国家三期一等水准网的水准点精度略高,其中误差集中分布于 20~40 mm。

确定多期水准重合点是计算垂直运动速率的前提,本文综合利用点之记、手簿上注记利用旧点情况、内外业提供的重合点对照表、新旧点名对照表,再结合水准点坐标差、高程差、高程速率综合确定水准重合点:

- (1) 以水准点点位差异不超过 500 m 以及正常高差异不超过 0.4 m (沉降区正常高差异不超过 1 m) 为搜索条件进行检索;
- (2) 以水准点点名相同及点位差异不超过 300 m 为依据,确定初始重合点;
- (3) 计算初始重合点的正常高年变化速率,通过比较该点与邻近水准点速率的一致性,剔除粗差点;
- (4)

剔除基岩水准点和基本水准点附近的普通水准点。通过分析三期成果资料,确定了一、二期重合点 9 285 个,二、三期重合点 6 239 个,一、三期重合点 5 985 个。

根据重合点观测时间跨度,优先选择一、三期重合点速率,在一、三期速率空白区适当增补一、二期速率或二、三期速率,最终确定 6038 个水准重合点。水准重合点速率的计算公式为:

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4)$$

式中, v 为水准点速率; Δh 为水准点高差, Δt 为水准点时间跨度。如图 1 所示为 6 038 个水准重合点垂直运动速率图。

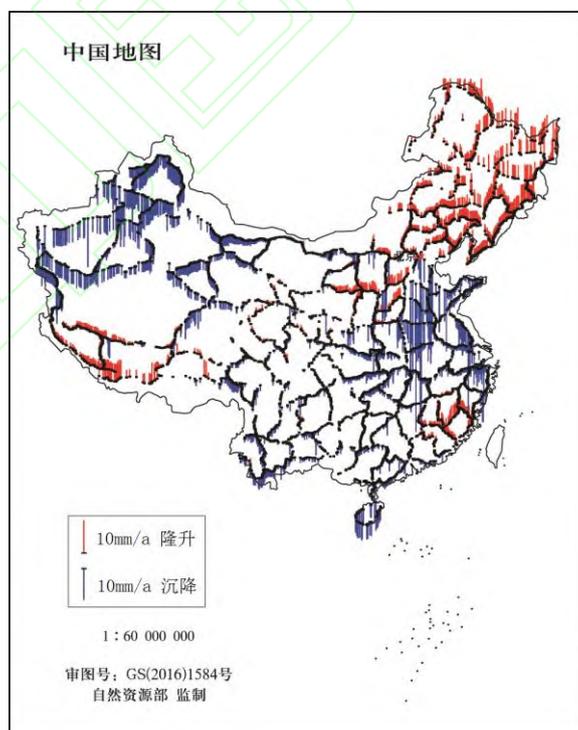


图 1 中国大陆水准重合点垂直运动速率图

Fig. 1 Vertical Velocity of Leveling Coincidence Points in Chinese Mainland

由图 1 可知, 自 20 世纪 70 年代以来, 中国西藏南部、东北等地区表现为隆升运动, 华北、苏沪、新疆等地表现为沉降运动, 华南等地区垂直运动趋势较为稳定。

2 垂直运动建模方法分析

为进一步描述中国大陆最新垂直运动情况, 利用水准重合点垂直运动速率建立垂

直运动模型。根据水准重合点分布情况, 均匀空出 1 200 个点作为检核点, 剩余 4838 个点作为拟合点, 检核点、拟合点点位分布见图 2 所示。利用 5 种建模方法^[15-20]对比分析: (1) 多面函数 (Hardy); (2) 三角网线性插值法 (TriangL); (3) 克里金插值法 (Kriging); (4) 最小曲率插值法 (MinC); (5) 反距离加权法 (InvD)。



图 2 检核点、拟合点点位分布图

Fig. 2 Distribution of Checking Points and Fitting Points

利用 4 838 个拟合点, 分别基于上述 5 种方法将水准重合点垂直运动速率格网化, 构建垂直运动模型, 利用 1 200 个检核点的垂直运动速率与垂直运动模型双线性内插的速率的差值绝对值进行精度统计, 结果见表 2, 拟合点残差和检核点残差分布见图 3、4 所示。

	最大值	最小值	中误差	最大值	最小值	中误差
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Hardy	7.5	0.0	0.6	8.0	0.0	0.9
TriangL	5.9	0.0	0.4	5.6	0.0	0.7
Kriging	3.4	0.0	0.3	5.3	0.0	0.7
MinC	3.7	0.0	0.3	6.1	0.0	0.7
InvD	4.4	0.0	0.4	9.9	0.0	0.8

表 2 残差信息统计结果

Tab. 2 Statistical Result of Residual

方法	拟合点残差绝对值 /(mm·a ⁻¹)	检核点残差绝对 值/(mm·a ⁻¹)
----	------------------------------------	------------------------------------

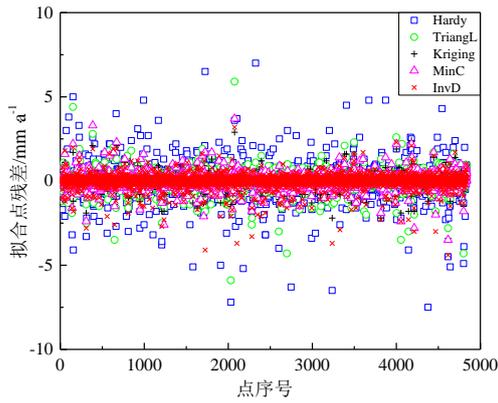


图 3 拟合点残差

Fig. 3 Residual of Fitting Points

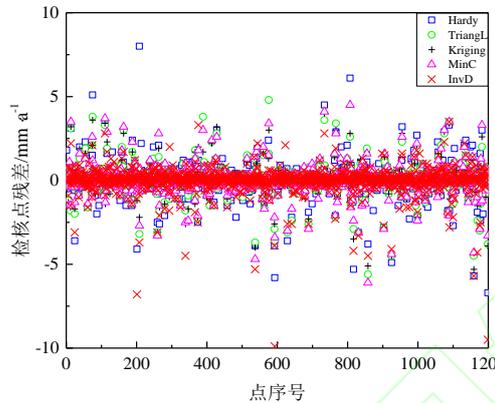


图 4 检核点残差

Fig. 4 Residual of Checking Points

结合上述结果分析:

1) 从总体上看, 各类建模方法精度相差不大, 拟合精度为 0.3~0.6 mm/a, 检核精度为 0.7~0.9 mm/a, 残差分布合理。

2) 从检核和拟合精度看, 多面函数略

低于其他建模方法, 但其检核残差与拟合残差的精度、最值之间差异较小, 模型较为稳定; 反距离加权法对应的检核、拟合精度略高, 但检核残差的最值偏大, 存在突变点。

3) 三角网线性插值法精度较好, 但这种方法插值有效范围是由最外围水准重合点构成的包含所有点的最小凸多边形, 建模后中国大陆边界附近存在空白区。

4) 克里金插值方法和最小曲率法拟合精度均为 0.3 mm/a, 检核精度均为 0.7 mm/a, 说明二者建模精度相当, 但从残差最值来看, 克里金插值方法略优。综上, 本文选用克里金插值方法构建垂直运动模型。

3 中国大陆垂直运动模型建立

利用中国大陆 6038 个水准垂直运动速率, 采用克里金插值方法建立分辨率为 5'×5' 的中国大陆垂直运动格网模型, 其中, 克里金变异函数采用的球状模型公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h \leq a \\ c & h > a \end{cases} \quad (5)$$

式中, h 为滞后距; c 为基台值, 取 0.502; a 为变程, 取 0.773°。中国大陆垂直运动趋势如图 5 所示。

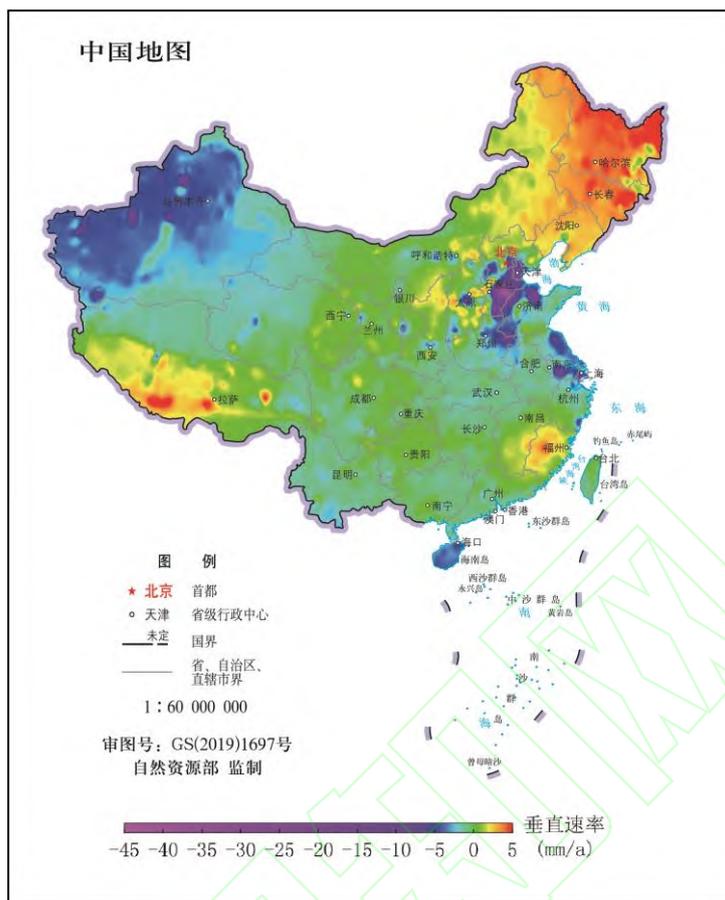


图 5 中国大陆垂直运动模型

Fig. 5 Vertical Movement Model of Chinese Mainland

由图 5 可以得出中国大陆近 50 a 垂直运动情况:

1) 从整体上看, 中国大陆垂直运动平稳, 升降有序。其中, 华北平原、苏沪地区、汾渭盆地、新疆和海南表现为沉降运动; 西藏南部、东北、福建及陕北地区表现出隆升运动; 华南等其他地区相对稳定。

2) 华北平原、苏沪地区、汾渭盆地一带沉降较为剧烈。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, 最大沉降速率达 (40.4 ± 1.4) mm/a; 苏沪沿海地区沉降显著, 沉降中心分别位于江苏射阳、江苏宜兴以及上海南部, 最大沉降速率为 (19.8 ± 1.5) mm/a, 且由沿海一带向内陆沉降速率逐渐降低; 汾渭盆地沉降中心沿山西太原、山西运城、陕西西安呈带状分布, 最大沉降速率达 (10.4 ± 1.7) mm/a, 值得注意的是, 地处汾河盆地中南部的介休市打断了汾渭盆地一贯

的沉降趋势, 并微弱隆升, 该隆升趋势向西北方向延伸, 经过山西吕梁, 与陕北隆升区相连。

3) 西藏南部、东北地区隆升较为剧烈。青藏高原表现出隆升运动趋势, 最大速率达 (5.4 ± 2.5) mm/a, 青藏高原南部地区隆升运动主要是印度洋板块持续向北俯冲, 与欧亚板块发生挤压作用所致, 随着向北推移, 印度洋向北的俯冲力逐渐减弱, 因此, 垂直运动速率自南向北逐渐降低; 东北地区是中国最大的连续隆升区域, 地跨内蒙古东部、黑龙江、吉林和辽宁, 该地区隆升速率呈阶梯状分布, 自西南向东北速率逐渐增大, 最大速率达 (4.3 ± 1.9) mm/a; 福建地区整体呈现一定的隆升趋势, 隆升中心位于福建三明市, 最大隆升速率为 (3.4 ± 2.0) mm/a。

4) 新疆地区整体为沉降趋势, 个别区域最大沉降速率达 (14.5 ± 2.3) mm/a, 平均沉降速率为 (2.5 ± 2.0) mm/a, 沉降速率由西北向

东南方向逐渐降低；海南整体沉降，平均沉降速率为(4.4±1.9) mm/a；华南、西南、甘青地带垂直运动趋势相对稳定。

4 结 语

水准测量是定量研究地壳垂直运动最重要的方法之一。利用三期国家一等水准成果，建立了中国大陆近 50 a 垂直运动模型，并进行了垂直运动分析。结果表明：近 50 a 来，东北地区整体上呈现隆升趋势；华北平原地区整体呈现下沉趋势；华南地区垂直运动整体比较稳定，福建存在一定的隆升运动趋势；西北地区垂直运动稳中有降，沉降地区主要位于新疆；西藏地区垂直运动整体上呈隆升趋势，除此之外，其他地区垂直运动趋势较为稳定。

由于水准点一般沿主干道布设成闭合环线，点位分布不均匀，因此，仅利用水准成果构建的垂直运动模型在水准环内部表达不够精细。GNSS 点位分布均匀、InSAR 空间分辨率高，因此未来拟综合水准、GNSS、InSAR 数据，构建中国大陆垂直运动模型。

参 考 文 献

- [1] Feng Haojian, Gu Dansheng, Zhang Li, et al. The Research on the Earth Crust Vertical Movement Characteristic and Mechanism in Eastern China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998, 27(1): 16-23 (冯浩鉴, 顾旦生, 张莉, 等. 中国东部地区地壳垂直运动规律及其机制研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(1): 16-23)
- [2] Chen Chao, Zou Rong, Liu Renli. Vertical Deformation of Seasonal Hydrological Loading in Southern Tibet Detected by Joint Analysis of GPS and GRACE[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 669-675 (陈超, 邹蓉, 刘任莉. 联合 GPS 和 GRACE 研究青藏高原南部地区垂直形变的季节性波动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(5): 669-675)
- [3] Teferle F N, Bingley R M, Williams S D, et al. Using Continuous GPS and Absolute Gravity to Separate Vertical Land Movements and Changes in Sea-Level at Tide-Gauges in the UK[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2006,

364(1841): 917-930

- [4] Zhang Yonghong, Wu Hong'an, Kang Yonghui. Ground Subsidence over Beijing-Tianjin-Hebei Region during Three Periods of 1992 to 2014 Monitored by Interferometric SAR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9): 1050-1058 (张永红, 吴宏安, 康永辉. 京津冀地区 1992—2014 年三阶段地面沉降 InSAR 监测[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1050-1058)
- [5] Editorial Committee of Chinese Lithosphere Dynamic Atlas of National Earthquake Administration. Chinese Lithosphere Dynamic Atlas[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989 (国家地震局《中国岩石圈动力学地图集》编委会. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1989)
- [6] Lai Xi'an, Huang Liren, Xu Jusheng, et al. *Present - Day Crustal Movement in China Constrained*[M]. Beijing: Seismological Press, 2004 (赖锡安, 黄立人, 徐菊生, 等. 中国大陆现今地壳运动[M]. 北京: 地震出版社, 2004)
- [7] Dong Hongwen, Gu Dansheng, Li Guozhi, et al. *Research on Vertical Recent Crustal Movement of the Mainland of China*[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)
- [8] Huang Liren, Tao Benzao, Zhao Chengkun. Thb Application of Fitting Method of Multiquadric Functions Inresearch on Crustal Vertical Movement[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1993, 22(1): 25-32 (黄立人, 陶本藻, 赵承坤. 多面函数拟合在地壳垂直运动研究中的应用[J]. 测绘学报, 1993, 22(1): 25-32)
- [9] Cui Duxin, Liu Wenyi. Application of Empirical Orthogonal Function Resolution to Analysis of Crustal Vertical Deformation Field[J]. *Earthquake*, 2000, 20(3): 82-86 (崔笃信, 刘文义. 经验正交函数分解在地壳垂直形变场分析中的应用[J]. 地震, 2000, 20(3): 82-86)
- [10] Zhang Qin, Fan Yizhong, Zhao Chaoying. Analysis Model of Crustal Vertical Movement Based on the Flux Isostasy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004,

- 29(3): 231-234 (张勤, 范一中, 赵超英. 基于通量均衡基准的地壳垂直形变场分析模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(3): 231-234)
- [11] Huang Liren. Research on the Possibility of Extracting information about the Crustal Vertical movements from Precise Relevelings by fourier-Analysis Method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1990, 19(4): 257-266 (黄立人. 由复测精密水准用富氏分析法提取地壳垂直运动信息可能性的探讨[J]. 测绘学报, 1990, 19(4): 257-266)
- [12] Liu Jingnan, Yao Yibin, Shi Chuang, et al. Preliminary Research on Characteristic of present-Day Vertical Deformation of China Mainland[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 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)
- [13] Kamil K, Jacek R, Marek M. Analysis of Vertical Movement Modeling through Various Interpolation Techniques[J]. *ResearchGate*, 2010, 7(4): 399-408
- [14] Wang Wenli, Guo Chunxi, Ding Li, et al. Elevation Change Analysis of the National 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. 全国一等水准点高程近 20 年变化分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(1): 1-8)
- [15] Liu Jingnan, Yao Yibin, Shi Chuang. Method for Establishing the Speed Field Model of Crustal Movement in China[J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4): 331-336 (刘经南, 姚宜斌, 施闯. 中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 331-336)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] Wang Wanyin, Qiu Zhiyun. The Research to a Stable Minimum Curvature Gridding Method in Potential Data Processing[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(6): 2003-2010 (王万银, 邱之云. 一种稳定的位场数据最小曲率网格化方法研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(6): 2003-2010)
- [20] Tsai V J D. Delaunay Triangulations in TIN Creation: An Overview and a Linear-Time Algorithm[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1993, 7(6): 501-524

Vertical Movement Model in Chinese Mainland Based on First Order Leveling Results

GUO Xinwei¹ GUO Chunxi¹ NIE Jianliang¹ WANG Haitao¹ TIAN Jie¹

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

Abstract: Objectives: The national first order leveling results are valuable data for studying the vertical movement of crust in Chinese mainland. The trend of vertical movement in the past 50 years is analyzed with three period results of first order leveling network of China. **Methods:** Firstly, on the same reference datum, a static adjustment method is used to calculate the height of the first order leveling points. By analyzing the location, height difference and record of leveling points, the coincidence points of different period results are obtained. And then the velocity of leveling coincidence points can be calculated by height difference and time span. Secondly, the residual distribution of checking points and fitting points is used to evaluate the pros and cons of the interpolation methods, such as Hardy function interpolation, Kriging interpolation and inverse distance weighted method, one of which is determined to establish vertical movement model. Finally, the vertical movement model in Chinese mainland is obtained with the method of Kriging interpolation. **Results:** The residual distribution of checking points and fitting points shows that the fitting precision of Hardy function is slightly lower but more stable than other methods. And the precision of inverse distance weighted method is slighter higher, but there are some outlier in the fitting results. The valid fitting region of triangulation with linear interpolation is the smallest convex polygon consisting of the outermost leveling points, so the blank area near the boundary of Chinese mainland is existed. The precision is basically equal between Kriging interpolation and minimum curvature interpolation, but from the perspective of the residual, Kriging interpolation is slighter better. **Conclusions:** From the vertical movement model, the characteristic of vertical movement is qualitatively analyzed: in the past 50 years, the North China Plain, Jiangsu-Shanghai area, Fen-Wei basin, Xinjiang and Hainan are subsiding. Among them, the North China Plain and Jiangsu-Shanghai area are severe subsiding condition with velocity more than 40 mm/a. The south of Tibet, North-east China, Fujian and north of Shaanxi are uplifting, and the trend of uplifting is kind of fierce in the south of Tibet and east of North-east China. Other areas such as South China are relatively stable.

Key words: first order leveling; Chinese mainland; vertical movement of crust; model

First Author: GUO Xinwei, master, engineer, majors in geodetic data processing. E-mail: xw_guo@126.com

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