

汪汉胜,贾路路,WU Patrick 等. 末次冰期冰盖消融对东亚历史相对海平面的影响及意义. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1144-1153, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 010.

Wang H S, Jia L L, WU Patrick, et al. Effects of last-deglaciation on the historical relative sea levels of East Asia Seas and the implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(4): 1144-1153, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 010.

末次冰期冰盖消融对东亚历史 相对海平面的影响及意义

汪汉胜¹, 贾路路^{1,2}, WU Patrick³, 江利明¹, 胡波^{1,2}, 相龙伟^{1,2}

1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 Department of Geoscience, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

摘 要 基于新的末次冰期冰川均衡调整(GIA)模型, 利用有限元算法模拟了盛冰期以来东亚相对海平面的变化, 并与观测数据进行比较分析. 研究表明, 早期相对海平面上升由盛冰期后全球冰盖消融控制, 后期的变化则由地壳黏性均衡调整控制; 每个时期的结果均具有显著的区域性差异, 与地壳均衡作用及远场均衡效应的区域性差异有关; 模拟的不确定性主要来自冰盖消融模型差异的影响, 量级在观测误差范围内. 此外, 利用本文的 GIA 模拟结果, 对东亚海岸历史相对海平面观测进行改正, 揭示了华南全新世以来不同阶段的地壳垂直运动, 其中 3—8 kaBP 地壳以较稳定的速率(1~4 mm/a)下沉, 之后则以较小速率下降或隆升, 推测可能与东南部菲律宾板块的俯冲有关; 揭示近千年来粤东海岸和珠江三角洲地壳垂直运动有长期隆升趋势, 而近三十年的观测结果则显示下沉, 推测该差异与人类活动导致的沉降有关.

关键词 末次冰期, 冰川均衡调整, 东亚地区, 历史相对海平面, 地壳垂直运动

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 010

中图分类号 P228

收稿日期 2011-02-14, 2011-10-31 收修定稿

Effects of last-deglaciation on the historical relative sea levels of East Asia Seas and the implications

WANG Han-Sheng¹, JIA Lu-Lu^{1,2}, WU Patrick³, JIANG Li-Ming¹,
HU Bo^{1,2}, XIANG Long-Wei^{1,2}

1 Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences,
Wuhan 430077, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Department of Geoscience, University of Calgary, Calgary T2N 1N4, Canada

Abstract Observed relative sea level (RSL) changes in East Asia Seas are studied with the help of our latest 3D glacial isostatic adjustment (GIA) model, which employs the finite element method to simulate RSL changes since the Last Glacial Maximum (LGM). From the temporal and spatial variation of predicted RSL, it is shown that the early rise of sea levels after LGM is mainly influenced by the addition of melt-water into the oceans while the later RSL changes are

基金项目 973 计划(2012CB957703)、国家杰出青年科学基金(40825012)、创新研究群体科学基金(41021003)、中国科学院与国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划、国家自然科学基金面上项目(41174016)、中国科学院百人计划项目和科技部国家科技支撑计划项目(2011BAK12B02)资助. WU Patrick 由加拿大 NSERC 的 Discovery Grant 资助.

作者简介 汪汉胜, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 1984 年毕业于武汉地质学院物探系, 1999 年获中国科学院测量与地球物理研究所博士学位, 主要从事负荷变形、冰川均衡调整、形变监测研究. E-mail: whs@asch. whigg. ac. cn

strongly affected by mantle flow, ocean loading and crustal adjustment. Thus, the RSL results show obvious regional changes for each epoch. The uncertainty of modeled RSL is mostly attributed to the differences in the ice models used, and its magnitude is found to be comparable to the measurement error. Second, the predicted RSL results are used to correct the historical observations. The residuals along the coast of South China show different stages of crustal vertical motions since the Holocene. Crust subsidence rates (1~4 mm/a) are found to be stable from 3 kaBP to 8 kaBP, while the rates during the last 3 ka are small. These may be caused by the subducting of southeastern Philippine plate. In East Guangdong and Pearl River Delta, residual RSL since 1 kaBP shows the long term crustal uplift while the rates observed from precise leveling during the last three decades show that the crust is subsiding. The differences can be caused by the crustal subsidence due to human activities.

Keywords Last Ice-Age, Glacial isostatic adjustment, East Asia Seas, Historical relative sea level, Crustal vertical motion

1 引言

末次冰期始于约 110 kaBP,在约 18 kaBP 的盛冰期,北美劳伦地区、北欧芬诺斯坎底亚和极地发育巨厚的冰盖,在大约 6—8 kaBP 完成了消融过程^[1]. 相对海平面(RSL)变化是海平面相对地壳的上升或下降,自盛冰期以来,RSL 被海岸和海洋各类沉积物记录下来,成为研究这段历史 RSL 变化最重要的数据集,为研究海岸、海洋环境变化和地壳运动等提供重要证据. 研究表明,盛冰期以来 RSL 变化的机制主要有:(1)冰融水流进了海洋,由于重力场的区域差异,其分布也有区域变化;(2)冰盖消融和海水增加改变了地表负荷,固体地球要进行均衡调整,其直接的响应是地壳的垂直运动,在近场(冰盖及其周围)较强,在远场(例如东亚地区)较弱;(3)沉积(或剥蚀)作用^[2]; (4)沉积压实作用^[3]; (5)局部和区域构造运动^[3]. 本文关注前两个因素,即冰盖消融和地壳均衡调整,可广义地称为冰川均衡调整(GIA)^[1],我们将从全球 GIA 模型出发,模拟和给出东亚历史相对海平面变化的结果,并结合 RSL 观测进行对比分析研究.

长期以来,地球物理学家在研究 GIA 对 RSL 的贡献时,主要精力放在近场,对处在远场的东亚地区讨论较少^[4]. 地质学家在研究东亚历史 RSL 变化时,需要考虑 GIA 的影响,采用了冰融等效海平面(IESL),即冰盖消融成的海水体积除以全球海洋面积^[2]或者整个地区统一的模型^[4],没有考虑冰融水分布或者地壳均衡垂直运动的区域性差异. 事实上,地球物理学家不断完善冰盖消融模型和地幔黏滞度

模型(例如 Peltier 的模型系列^[5-6]),可以根据严密的负荷理论和海平面方程^[7-8],模拟出 GIA 对东亚历史 RSL 变化的影响,但是对于东亚地区一直没有详细的结果和分析研究.

我们最近利用近十年空间大地测量观测数据的约束,包括北欧和北美 GPS 网络监测的地壳运动速率^[9-10]、在北美陆地用卫星测高^[11-12]、在五大湖地区用验潮站结合卫星测高^[13-14]解算的地壳隆升速率和 GRACE 卫星重力计划发布的时变重力观测结果,建立了基于横向非均匀的岩石圈和地幔流变的 GIA 模型 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G^[15-16]. 该模型已用于模拟对东亚现今重力场变化、空间大地测量监测地表现(陆地水和海水)质量变化的影响^[17]. 本文将利用该模型,进一步模拟东亚盛冰期以来的 RSL 变化,评估模拟的不确定性,将模拟结果与观测^[18-19]进行比较分析.

2 模型与算法

在我们发展的 GIA 模型 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G 中,横向非均匀地球模型 RF3L20($\beta=0.4$) 包含厚度有横向变化的岩石圈(图 1)和黏滞度有横向变化的四层地幔(图 2)^[7-8],盛冰期以来冰盖消融模型采用 Peltier 的 ICE-4G 模型^[5].

岩石圈厚度是根据地震波速转换估计的^[20]. 在东亚(图 1)沿海地区、近海和较深海区,岩石圈厚度为 50 km;向东亚大陆西部岩石圈增厚,大部分地区岩石圈厚度为 65 km,在青藏高原,岩石圈厚度增加到 90 km;向日本以东太平洋海域岩石圈厚度为 65 km.

四层地幔包括上地幔(UM)、过渡带(TZ)、下地

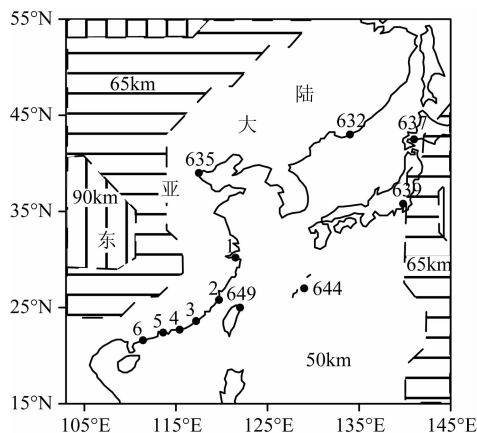


图1 东亚海域及邻近大陆岩石圈厚度
50 km、65 km、90 km 为相应区域岩石圈厚度；
圆点及附带数字为图7中相对海平面实测点及编号。

Fig. 1 Lithospheric thickness of East Asia Seas and the adjacent continent

Numbers with km denote lithospheric thickness of the related regions. Dots with numbers denote the RSL sites.

幔浅部(LM1)、下地幔深部(LM2),参考模型 RF3 给出黏滞度为 0.6×10^{21} Pa · s (UM+TZ)、 $3.0 \times$

10^{21} Pa · s (LM1)、 6.0×10^{21} Pa · s (LM2),在此(对数黏滞度)基础上叠加对数黏滞度的横向扰动,就得到三维地幔对数黏滞度.对数黏滞度的横向扰动是根据地震剪切波速异常转换的(图2),所用线性比例因子 $\beta = 0.4$ [15-16].由图2可知,在东亚地区较大的地幔黏滞度横向非均匀出现在上地幔,最大超过一个数量级,其次在过渡带,最大也接近一个数量级,而横向非均匀在下地幔的两个分层中则不明显.地球密度和弹性参数仅随深度变化,详见文献[15-16].

使用了耦合拉普拉斯方程的有限元算法进行 GIA 模拟 [7-8,16].有限元模型分辨率在浅层为 $2^\circ \times 2^\circ$,向核幔边界逐渐减少到 $8^\circ \times 8^\circ$.在5次迭代计算过程中,利用有限元位移结果,通过解海平面方程计算新的 RSL,从而不断修正海水负荷.

为了评估 RSL 模拟结果的不确定性,对当前参考模型黏滞度和冰盖消融模型认识差异的影响进行计算,取两方面结果的平方根作为 RSL 估计的不确定性.

对参考模型黏滞度,考虑两个代表性模型结果

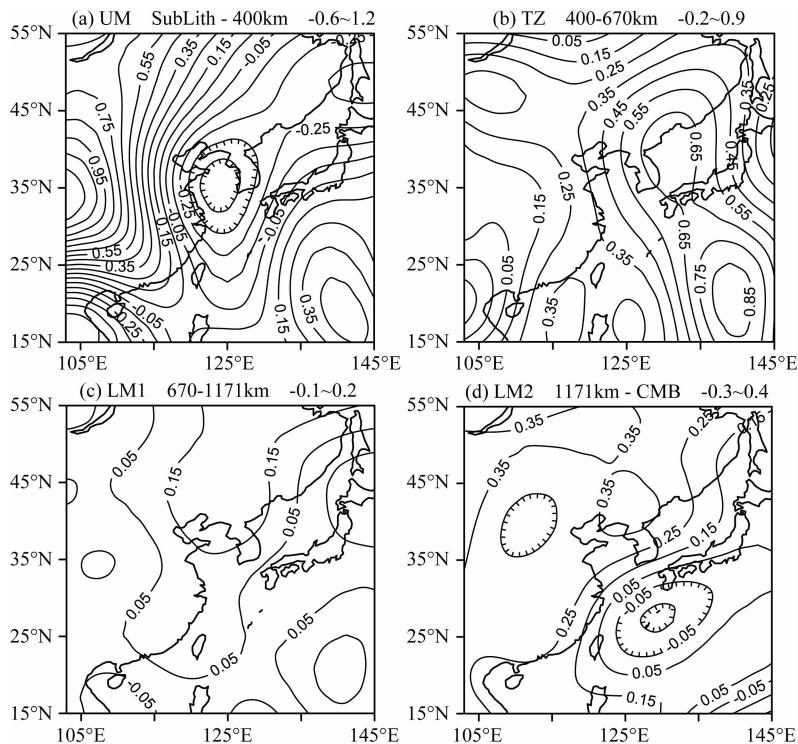


图2 东亚海域及邻近大陆四个地幔分层的对数黏滞度横向扰动
(a)上地幔(UM);(b)过渡带(TZ);(c)下地幔上部(LM1);(d)下地幔下部(LM2).

子标题后给出了层深度范围和数值范围;等值线单位为 $\lg(\text{Pa} \cdot \text{s})$.

Fig. 2 Lateral perturbations in \lg of the mantle viscosity (in Pa · s) for the four mantle layers of East Asia Seas and the adjacent continent

(a) Upper mantle (UM); (b) Transition zone (TZ); (c) Shallow part of lower mantle (LM1); (d) Deep part of lower mantle (LM2).

The depth and numerical ranges can be found in the captions of the panels. The units are in $\lg(\text{Pa} \cdot \text{s})$.

的差异。一是 Peltier (1998) 的 VM2 模型^[5], 即本文简化的 RF3 模型, 其黏滞度为 0.6×10^{21} Pa·s (UM+TZ)、 3.0×10^{21} Pa·s (LM1)、 6.0×10^{21} Pa·s (LM2); 另一是 Mitrovica 和 Forte (1997)^[21] 根据地幔对流和 GIA 联合反演的结果, 这里用 RF2 模型简化表示, 给出黏滞度为 0.7×10^{21} Pa·s (UM+TZ)、 1.0×10^{22} Pa·s (LM1+LM2), 可见下地幔较上地幔黏滞度有大幅度的升高。

对冰盖消融模型, 考虑有代表性的 ICE-4G^[5] 及其升级版 ICE-5G^[6] 模型的差异。当前这两个模型使用最为广泛, 不过其差异也是明显的: 冰盖的厚度有显著差异, 特别在北美哈德逊湾以西地区, ICE-5G 模型推测有巨厚的冰盖, 而 ICE-4G 则没有; 冰盖负荷总质量也有明显差异。由于 IESL 变化与冰盖负荷总质量成反比, 因此图 3 所示两模型的 IESL 随时间上升, 反映了随时间冰盖负荷总质量的减少。ICE-5G 在 26 kaBP 的盛冰期冰盖开始融化, 而 ICE-4G 则推迟至 18 kaBP。在 12 kaBP 以前 ICE-4G 的 IESL 较高, 说明冰盖负荷总质量相对较小。12 kaBP 以后两模型的 IESL 和冰盖负荷总质量相近。

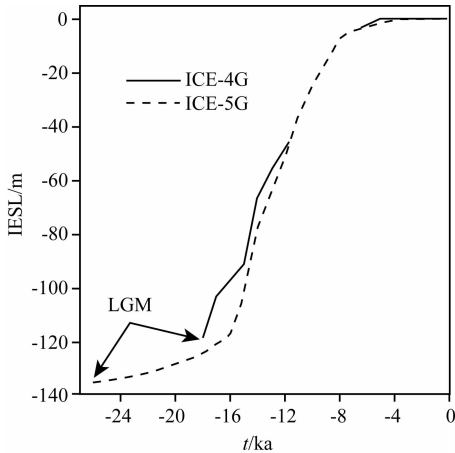


图 3 ICE-4G 和 ICE-5G 冰盖消融模型的冰融等效海平面变化

Fig. 3 The ice-volume equivalent sea levels from the deglacial models ICE-4G and ICE-5G

3 结果与分析

本节给出了东亚 RSL 模拟结果, 评估结果的不确定性, 最后结合图 1 测点实测数据进行对比分析。

3.1 东亚 RSL 的模拟结果

根据 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G 模型^[15-16], 模拟出东亚盛冰期(18 kaBP)以来每隔 2 ka 共 8 幕的 RSL 变化图像, 结果如图 4 所示。前 6 幕 RSL 均是

负值(图 4a—4f), 表明整个东亚海平面相对固体地壳降低; 后 2 幕有负也有正(图 4g—4h), 说明海平面相对固体地壳在一些区域降低、另一些区域升高。由图可知, 8 幕的 RSL 变化结果分别是: $-141 \sim -105$ m、 $-117 \sim -81$ m、 $-80 \sim -52$ m、 $-56 \sim -33$ m、 $-32 \sim -15$ m、 $-13 \sim -1$ m、 $-5 \sim 3$ m、 $-1.8 \sim 1.9$ m, 可见盛冰期以来海平面随着冰盖消融逐渐上升。这反映冰融海水是 RSL 上升最重要的控制因素, 直接影响了 RSL 变化的主体, 但对于冰盖消融结束后(图 4f—4h), RSL 变化主要与地壳黏性均衡调整引起的垂直运动有关。由图还可以看出, 8 幕 RSL 具有显著的区域性差异, 其最大最小幅度差为 28、23、17、12、8、3.7 m。一般而言在水浅区域 RSL 高于 IESL, 而在较深水区域 RSL 则在 IESL 之下, 这反映了不同区域地壳对海水负荷的均衡作用差异, 部分反映不同区域全球冰盖消融的远场均衡效应的差异, 地壳均衡下沉则 RSL 就增高, 地壳均衡隆升则 RSL 就下降。

3.2 模拟结果的不确定性

RSL 模拟的不确定性来自参考模型黏滞度差异和冰模型差异的影响。

在计算参考模型黏滞度差异对模拟 RSL 的影响时, 考虑当前对参考模型黏滞度认识的差异, 针对模型 RF3 和 RF2 分别进行有限元模拟, 冰模型都采用 ICE-4G^[5], 根据有限元输出的位移分别计算 RSL 变化, 然后计算二者之间的差值。图 5a—5d 给出了 18 kaBP 以来每隔 4 ka 共 4 幕 RSL 变化差异的图像, 可以看出, 每幕参考模型黏滞度差异对 RSL 的影响都不大, 差异基本上在 2 m 以内; 此外, 从 RSL 差异平面分布看, 发现均具有以冲绳以东太平洋负值异常和沿东亚大陆近海正异常梯度带为特征, 与图 2 所示 4 层地幔黏滞度横向非均匀图像相似, 推测由参考黏滞度不同和黏滞度横向非均匀影响耦合引起的。

关于冰盖消融模型差异对 RSL 的影响, 在已有 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G 模型^[15-16] 结果的基础上, 进一步采用 ICE-5G^[6] 冰盖消融模型, 用有限元法进行模拟和 RSL 变化的计算, 地球模型仍采用 RF3L20($\beta=0.4$)^[15-16], 然后计算 ICE-4G 与 ICE-5G 预测 RSL 变化的差值。图 5e—5h 给出了 18 kaBP 以来每隔 4 ka 共 4 幕的结果。由图可知, 18 kaBP、14 kaBP、10 kaBP、6 kaBP 的结果分别为 $2 \sim 13$ m、 $8 \sim 17$ m、 $-6 \sim -1$ m、 $0.1 \sim 1.3$ m, 正值或负值表示 ICE-4G 给出的 RSL 较高或较低。ICE-4G 在 12 kaBP

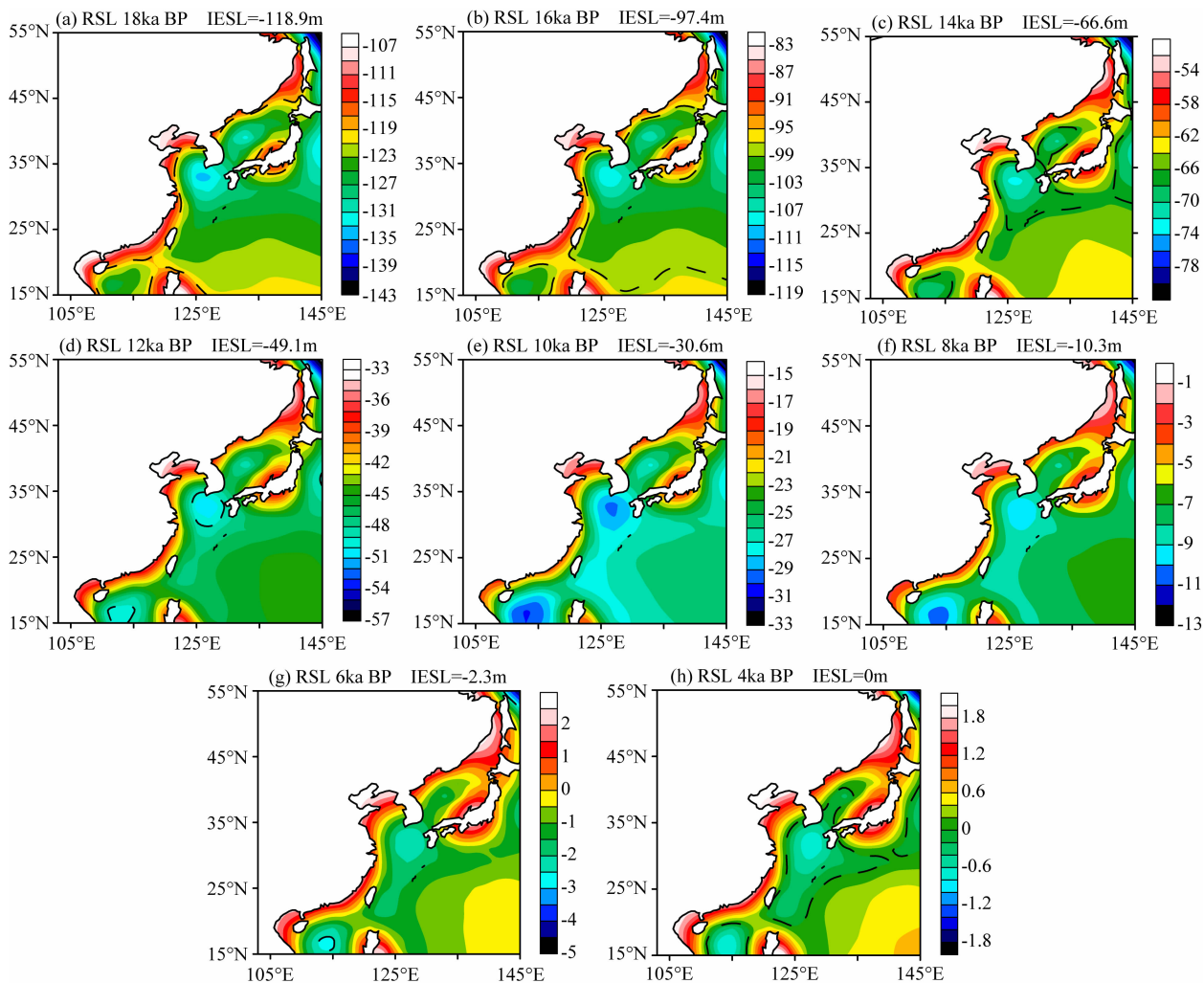


图 4 RF3L20($\beta=0.4$)+ICE-4G 模型^[15-16]预测的东亚历史相对海平面变化

(a)–(h)是 18—4 kaBP 每隔 2 ka 的结果,虚线为 IESL,所有结果以现今为基准,单位均为 m.

Fig. 4 RSL changes in East Asia Seas predicted from GIA model RF3L20($\beta=0.4$)+ICE-4G^[15-16]

(a)–(h) are from 18 kaBP to 4 kaBP at every 2 ka. All the results are given with respect to present-day sea level.

Dashed contours are the IESL. Units are in meters.

前的 RSL 较高,由图 4 可知,与这一时期冰盖负荷总质量相对较小或 IESL 相对较高有关;12 kaBP 以后,两模型的冰盖负荷总质量或 IESL 几乎相同,其 RSL 差异则与 12 kaBP 前冰盖负荷作用的差异有关.每幕结果都呈现区域性变化,其变化规律较复杂,即在 18 kaBP、14 kaBP 向西南海域和海岸冰模型差异的影响减少,向东北海域则影响增强,而 10 kaBP、6 kaBP 的情形则正好相反,这与冰模型负荷时空演化差异以及与岩石圈厚度横向变化、黏滞度横向非均匀影响耦合等因素有关.

计算参考模型黏滞度差异和冰模型差异对 RSL 影响的平方根,以此评估 RSL 模拟结果(图 4)的不确定性,图 6 给出了 18 kaBP 以来每隔 2 ka 共 8 幕的结果.计算表明,在 18—12 kaBP 冰模型差异

的影响较大(图 5e—5g),因此成为图 6a—6d 所示不确定性的控制因素,而在 10—4 kaBP,参考模型黏滞度差异与冰模型差异的影响量级逐渐相当,因此图 6e—6h 所示不确定性为两因素共同作用的结果.8 幕的 RSL 变化不确定性范围分别是:1.0~7.0 m、8.5~14.5 m、4.0~8.0 m、0.4~3.4 m、0.6~2.8 m、1.0~1.9 m、0.1~0.7 m、0.0~0.3 m,其幅度基本上随时间流逝而减少;RSL 变化不确定性分布也呈现显著的区域性变化,例如在 18 kaBP、16 kaBP、14 kaBP 最大最小幅度差分别为 6.0 m、4.0 m、3.0 m.一般而言,每幕不确定性从东亚沿海向东北向近海、太平洋逐渐增加,但 10 kaBP 和 8 kaBP 则情形正好相反;从图 7 可知,RSL 变化不确定性一般在观测的误差范围内.

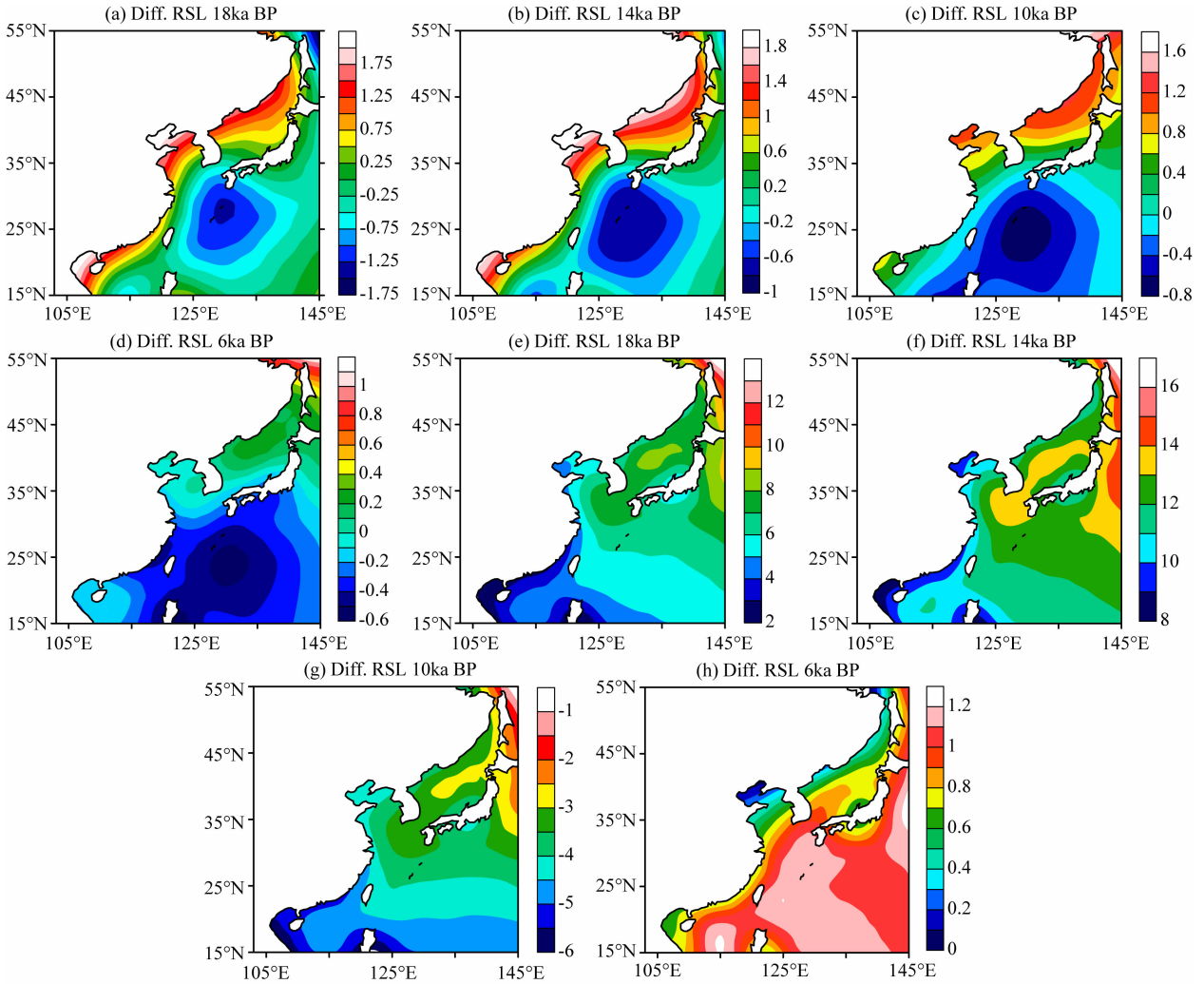


图 5 不同地幔黏滞度参考模型和冰模型对东亚 RSL 变化预测结果的影响

(a)–(d)是地幔黏滞度参考模型 RF3 和 RF2(冰盖模型用 ICE-4G 模型^[5])预测结果之差;(e)–(h)是冰模型 ICE-4G^[5]与 ICE-5G^[6][地幔黏滞度采用 RF3L20($\beta=0.4$)模型]预测结果之差。刻度单位均为 m。

Fig. 5 Effects of reference viscosity models and ice models on the predictions of RSL in East Asia Seas

(a)–(d) for the differences in the RSL predictions between reference models RF3 and RF2 with ICE-4G^[5] used; (e)–(h) for the differences in RSL predictions between ice models ICE-4G^[5] and ICE-5G^[6] with mantle viscosity model RF3L20($\beta=0.4$) used. Units of the scales are in meters.

3.3 与东亚实测结果的比较

本节将模拟计算的 RSL 变化结果与东亚现有观测进行对比和研究。如图 1 所示, RSL 观测在中国沿海和台湾包括测点(编号): 扬子三角洲(1)、福建—台湾海峡(2)、韩江三角洲(3)、广东东部(4)、珠江三角洲(5)、广东西部(6)^[18]、天津(635)和台湾北端(649)^[22]; 在国外包括俄罗斯纳霍德卡(632)、日本北海道(637)、日本东京湾(639)、日本鹿儿岛(644)^[22]。中国测点主要采用 Zong(2004)收集和重新审定的结果^[18], C^{14} 年龄已根据与树年轮、珊瑚年龄的关系进行了校正^[23]; 天津(635)、台湾北端(649)和国外的 4 个测点的 RSL 数据采用 Tushingham

和 Peltier (1991)^[22] 收集整理的结果, 但我们利用 Fairbanks 等(2005)^[24] 给出的 C^{14} 与原生珊瑚年龄关系, 对 C^{14} 年龄进行校正。

图 7 给出了东亚测点根据 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G 模型^[15-16] 的 RSL 模拟结果和实测结果, 从图可以看出, 除日本 3 个测点和中国台湾北端(649), 东亚海洋统一的 IESL 曲线显然不能反映大多数测点模拟的 RSL 区域变化, 因此利用统一的 IESL^[2] 或统一的 GIA RSL^[4] 研究东亚 RSL 变化机制是不合适的。还可看出, 在扬子三角洲(1)、天津(635)、台湾北端(649)、纳霍德卡(632)、北海道(637)、东京湾(639)、鹿儿岛(644), RSL 的 GIA 理论预测结果与

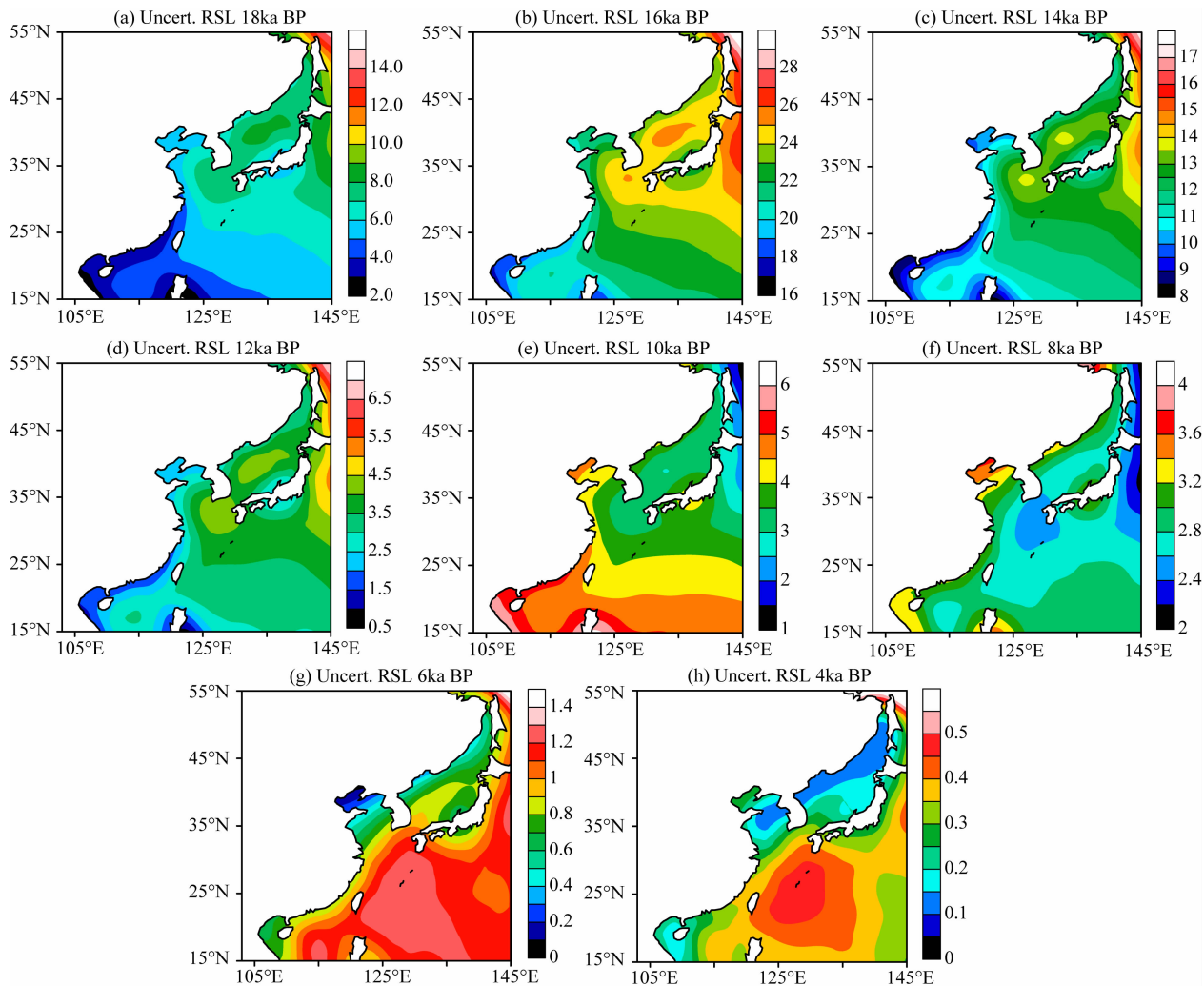


图 6 同图 4, 但为图 4 所示的相对海平面变化的不确定性估计

Fig. 6 Similar to Fig. 4, but for the uncertainties for the RSL changes as shown in Fig. 4

观测较符合, 说明这些地区的 RSL 变化基本受 GIA 控制, 其他因素影响非常小. 图 8 给出了 RSL 实测值经过 GIA 改正的结果, 在华南沿海地区的测点, RSL 的 GIA 理论预测结果与观测有较大差异, 这是由非 GIA 因素引起的, 下面进行解释.

图 8 中剩余 RSL 负值表示古地壳高于现今位置的高度. 因此, 第一阶段在 8 kaBP 以前, 地壳经历下沉和隆升(测点 2、4、6), 第二阶段在 8 kaBP 以后一段时间, 基本以较稳定的速率下沉, 最后是第三阶段则以较小速率下沉或隆升. 每个测点三个阶段的区间不同, 第二第三阶段地壳变化速率不同, 表现出显著区域性差异. 对测点 2、3、4、5, 第二阶段区间和地壳下沉速率分别为 6—8 kaBP 和 -4.2 mm/a、2.8—7 kaBP 和 -2.1 mm/a、3—8 kaBP 和 -1.5 mm/a、2.8—8 kaBP 和 -1.0 mm/a; 对测点 2、3、5, 随后的第三阶段下沉速率分别为 -0.1 mm/a、 -0.3 mm/a、 -0.3 mm/a, 而测点 4 地壳则隆升, 速率为 $+0.2$ mm/a.

广东西部(6)情况较复杂, 近 7 ka 以来, 地壳先隆升后有下沉, 速率分别为 $+0.5$ mm/a、 -0.6 mm/a. 因此, 在华南测点 RSL 观测经过 GIA 模型改正后, 揭示了较复杂的地壳运动, 推测与东南部的菲律宾板块俯冲有关, 具体机制有待进一步研究. 在东亚的其他地区测点, RSL 的 GIA 理论预测与观测结果相当, 说明构造运动对 RSL 变化影响较小.

我们将图 8 华南地壳垂直运动长期历史趋势与大地测量观测结果对比. 由图可以看出, 用最近 1.4 ka 的 2 个数据, 计算出粤西海岸和粤东海岸地壳垂直运动速率为 $+0.6$ mm/a, 用最近 1 ka 的 2 个数据计算出珠江三角洲结果为 $+2.0$ mm/a. 卢汝圻(1997) 根据 30 多年的精密水准复测数据, 揭示粤西海岸段平均以 $+0.6$ mm/a 速率上升、粤东海岸段平均以 -0.7 mm/a 速率下降、珠江三角洲以 -1.8 mm/a 速率下沉^[19]. 由此可见, 在粤西海岸, 现今地壳垂直运动与本文揭示的长期地壳垂直运动基本吻合, 但

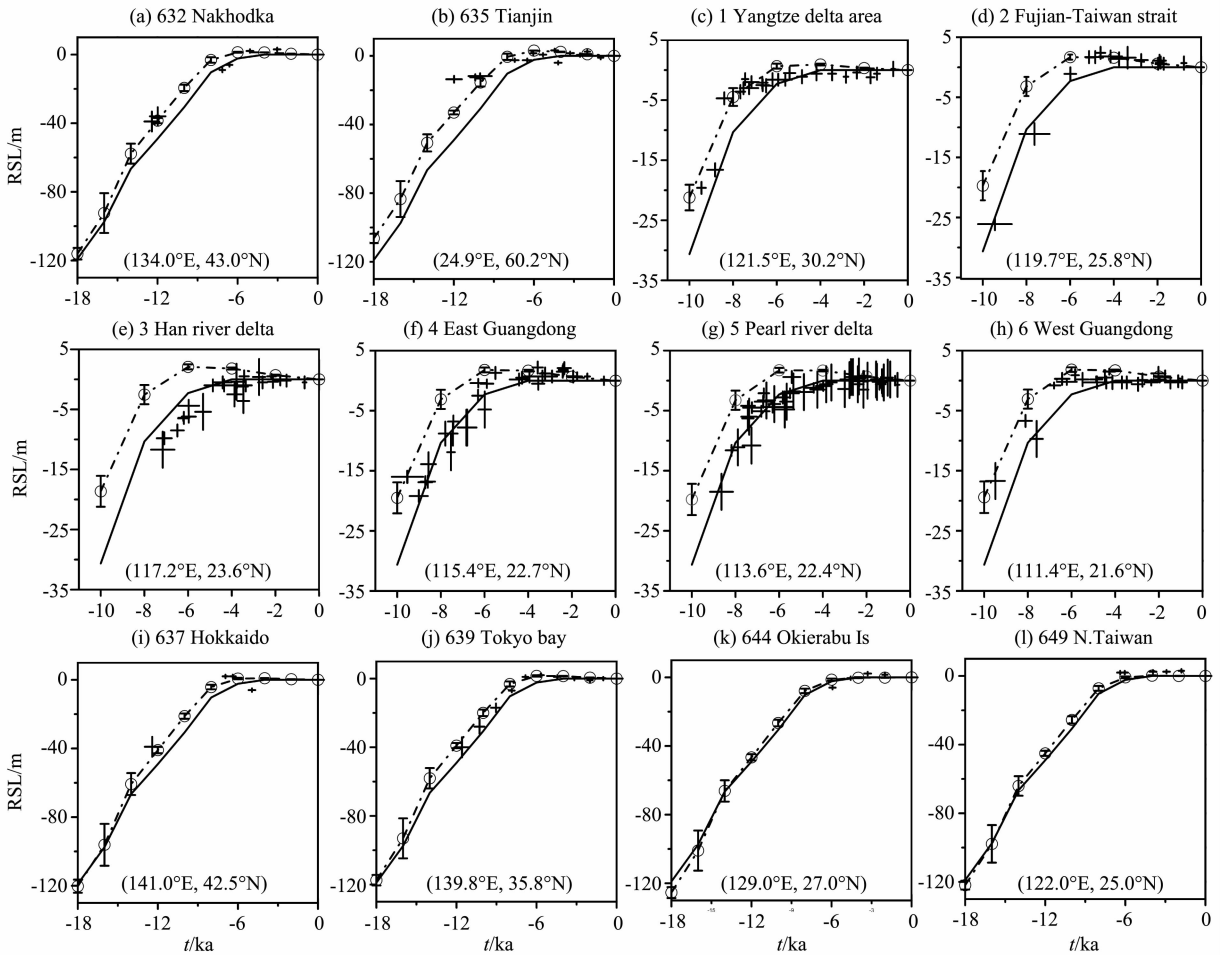


图7 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G GIA^[15-16]模型预测东亚测点 RSL 结果与观测的比较

(a) 纳霍德卡; (b) 天津; (c) 扬子三角洲; (d) 福建—台湾海峡; (e) 韩江三角洲; (f) 广东东部; (g) 珠江三角洲; (h) 广东西部; (i) 北海道; (j) 东京湾; (k) 鹿儿岛; (l) 台湾北端。带圆圈误差棒点实线为预测结果, 十字代表带误差棒的观测结果, 实线为 IESL。子标题给出了测点编号和名称, 横轴上括号内是测点的经纬度。

Fig. 7 Comparisons of RSL curves in East Asia between the predictions from RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G^[15-16] GIA model and the observations

The circles with error bars denote the GIA predictions with their uncertainties, crosses with two bars denote the observations with their uncertainties of age and RSL respectively, and solid curves are IESL for comparison. The number and name of the sites are found in the captions of the panels, geographical locations are found above the horizontal axes of the panels.

在粤东海岸和珠江三角洲则二者存在运动方向相反的根本差异, 可能与人类活动导致的沉降有关。

4 结论

利用新的冰川均衡调整(GIA)模型, 模拟了末次盛冰期以来东亚 RSL 变化, 评估了其不确定性, 将模拟结果与观测数据进行了比较分析。主要结论如下:

(1) 给出了东亚 RSL 时空分布模拟结果, 其不确定性一般小于历史 RSL 的观测误差, 该模型结果对研究东亚历史 RSL 具有重要意义。

(2) 模拟的 RSL 在 8 kaBP 前随时间的上升与

全球冰盖消融有关, 而后期的变化则主要受地壳黏性均衡调整控制。每个时间的 RSL 均具有显著的区域性差异, 与局部地壳对海水负荷的均衡作用及远场均衡效应差异有关。RSL 的不确定性主要受当前冰盖消融模型差异的影响, 其次是参考黏滞度的影响。

(3) 东亚 GIA 相关的 RSL 有显著的区域性变化, 因此用 IESL 或代表性观测站的 GIA 结果研究 RSL 变化机制是不合适的。

(4) 东亚历史海平面变化主要受全球 GIA 控制。在扬子三角洲、天津、台湾北端、纳霍德卡、北海道、东京湾、鹿儿岛测点, RSL 的 GIA 理论预测较好地解释了观测结果。

(5) 在华南海岸测点, RSL 在排除 GIA 影响后,

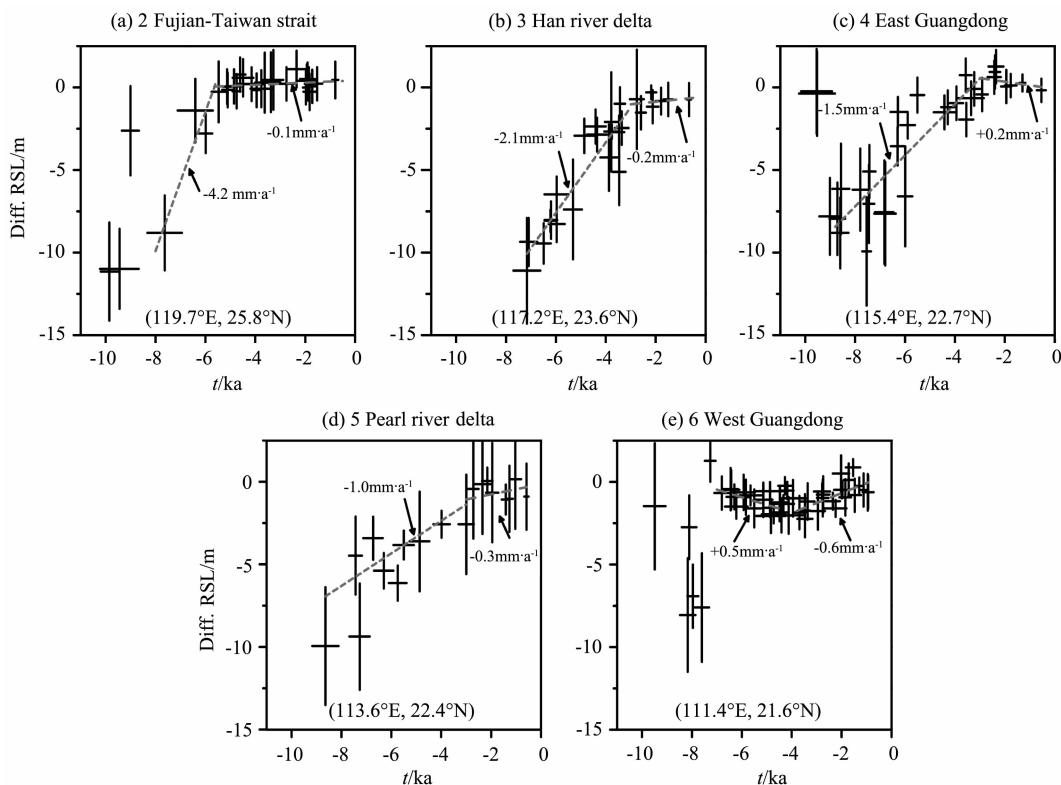


图 8 华南测点 RSL 经过 RF3L20($\beta=0.4$) + ICE-4G 模型^[15-16] GIA 改正的结果

(a) 福建—台湾海峡; (b) 韩江三角洲; (c) 广东东部; (d) 珠江三角洲; (e) 广东西部. 虚线为分段线性拟合结果. (a) — (e) RSL 误差棒同时考虑了观测误差和 GIA 预测的不确定性. 子标题给出了测点编号和名称, 横轴上括号内是测点的经纬度.

Fig. 8 Differences in RSL between observations and GIA predictions from RF3L20

($\beta=0.4$) + ICE-4G^[15-16] model as in Fig. 4 along the coast of South China

RSL error bars from (a) to (e) are estimated from observation errors and uncertainties of GIA predictions. Dashed lines are the results of linear fitting. The number and name of the sites are found in the captions of the panels, geographical locations are found above the horizontal axes of the panels.

清楚地显示全新世以来的地壳垂直运动, 发现早期地壳经历下沉和隆升, 中期地壳以较稳定的速率(1~4 mm/a)下沉, 后期地壳以较小速率下沉或隆升, 推测可能与东南部菲律宾板块的俯冲有关.

(6) 在粤东海岸和珠江三角洲, 现今地壳垂直运动是下沉的, 与本文揭示的近千年地壳运动隆升趋势不同, 推测与人类活动导致的沉降有关.

参考文献(References)

[1] 姚衍桃, Harff J, Meyer M 等. 南海西北部末次盛冰期以来的古海岸线重建. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(6): 753-762.
Yao Y T, Harff J, Meyer M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.* (in Chinese), 2009, 39(6): 753-762.

[2] 辛立国, 李广雪, 李西双等. 中国东海 2 万年来海平面变化分析. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(5): 699-704.

Xin L G, Li G X, Li X S, et al. Analysis of sea-level variation in the East China Sea since the Last Glacial Maximum. *Periodical of Ocean University of China* (in Chinese), 2006, 36(5): 699-704.

[3] 汪汉胜, Wu P, 许厚泽. 冰川均衡调整(GIA)的研究. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 1958-1967.
Wang H S, Wu P, Xu H Z. A review of research in glacial isostatic adjustment. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(6): 1958-1967.

[4] 陈伟光, 张虎男, 李子权. 闽粤沿海全新世垂直构造运动的速率. 地震地质, 1986, 8(2): 33-42.
Chen W G, Zhang H N, Li Z Q. The velocity of Holocene vertical tectonic motion in the coastal area of Fujian and Guangdong. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1986, 8(2): 33-42.

[5] Peltier W R. Postglacial variations in the level of the sea: implications for climate dynamics and solid-earth geophysics. *Rev. Geophys.*, 1998, 36(4): 603-689.

[6] Peltier W R. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) Model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 2004, 32(1): 111-

- 149.
- [7] Wu P. Using commercial finite element packages for the study of earth deformations, sea levels and the state of stress. *Geophys. J. Int.*, 2004, 158(2): 401-408.
- [8] Wang H S, Wu P. Effects of lateral variations in lithospheric thickness and mantle viscosity on glacially induced relative sea levels and long wavelength gravity field in a spherical, self-gravitating Maxwell Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 249(3-4): 368-383.
- [9] Lidberg M, Johansson J M, Scherneck H, et al. An improved and extended GPS-derived 3D velocity field of the glacial isostatic adjustment (GIA) in Fennoscandia. *J. Geod.*, 2007, 81(3): 213-230.
- [10] Sella G F, Stein S, Dixon T H, et al. Observation of glacial isostatic adjustment in "stable" North America with GPS. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34: L02306.
- [11] Lee H, Shum C K, Kuo C Y, et al. Application of TOPEX altimetry for solid earth deformation studies. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2008, 19(1-2): 37-46.
- [12] Lee H, Shum C K, Yi Y C, et al. Laurentia crustal motion observed using TOPEX/POSEIDON radar altimetry over land. *J. Geodyn.*, 2008, 46(3-5): 182-193.
- [13] Kuo C Y, Shum C K, Braun A, et al. Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauge data in Fennoscandia. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31: L01608.
- [14] Kuo C Y, Shum C K, Braun A, et al. Vertical motion determined using satellite altimetry and tide gauges. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2008, 19(1-2): 21-35.
- [15] Wang H S, Wu P, van der Wal W. Using postglacial sea level, crustal velocities and gravity-rate-of-change to constrain the influence of thermal effects on mantle lateral heterogeneities. *J. Geodyn.*, 2008, 46(3-5): 104-117.
- [16] 汪汉胜, Wu P, van der Wal W 等. 大地测量观测和相对海平面联合约束的冰川均衡调整模型. *地球物理学报*, 2009, 52(10): 2450-2460.
- Wang H S, Wu P, van der Wal W, et al. Glacial isostatic adjustment model constrained by geodetic measurements and relative sea level. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(10): 2450-2460.
- [17] 汪汉胜, 贾路路, Wu P 等. 冰川均衡调整对东亚重力和海平面变化的影响. *地球物理学报*, 2010, 53(11): 2590-2602.
- Wang H S, Jia L L, Wu P, et al. Effects of global glacial isostatic adjustment on the secular changes of gravity, and sea level in East Asia. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(11): 2590-2602.
- [18] Zong Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast Coast of China. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 55-67.
- [19] 卢汝圻. 广东沿海地区现代地壳垂直运动研究. *华南地震*, 1997, 17(1): 25-33.
- Lu R Q. Study on the modern crustal vertical movement in Guangdong coast. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 1997, 17(1): 25-33.
- [20] Wang H S, Wu P. Effects of lateral variations in lithospheric thickness and mantle viscosity on glacially induced surface motion on a spherical, self-gravitating Maxwell Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 244(3-4): 576-589.
- [21] Mitrovica J X, Forte A M. Radial profile of mantle viscosity: results from the joint inversion of convection and postglacial rebound observables. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B2): 2751-2769.
- [22] Tushingham A M, Peltier W R. Ice-3G: a new global model of late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of post-glacial relative sea level change. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B3): 4497-4523.
- [23] Stuiver M, Bard E, Beck J W, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24, 000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 1998, 40(3): 1041-1083.
- [24] Fairbanks R G, Mortlock R A, Chiu T C, et al. Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50, 000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(16-17): 1781-1796.

(本文编辑 何 燕)