

1950~2010 年 PDO 对北太平洋地区海平面变化影响的量化与评估

刘 超^{1,2,3}, 徐永生^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266200; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文研究和估计了 1950~2010 年不同太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)事件对北太平洋地区的海平面上升趋势所造成的影响。研究使用了 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)的海表面高度(sea surface height, SSH)数据资料, 通过多元线性回归方法, 分离了由 PDO 事件所引起的海表面高度变化(PDO-SSH), 以此分析 PDO 事件对海平面变化所造成的影响。结果表明, PDO-SSH 所引起的海表面变化趋势的空间分布, 及其对区域海平面变化的遮掩效果, 和对应时期内 PDO 信号的振幅和周期有着紧密的关系。进一步的分析表明, PDO 事件对北太平洋地区 SSH 变化所造成的影响是不均匀的, 在东西太平洋有着相反的变化趋势。1960~1989 年, 具有较长数据时间长度的 PDO 信号对海平面变化的影响, 要强于高度计投入使用后的时期的表现, 而受其影响最重的海域出现在赤道西太平洋海域、阿留申群岛及北美沿岸地区, PDO-SSH 在上述地区 SSH 的占比甚至高达 60%。

关键词: 太平洋年代际涛动; 区域海平面变化; 海面高度; 北太平洋

中图分类号: P722 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)04-0088-10

DOI: 10.11759/hyxx20160322003

全球和区域海平面的趋势性上升是气候变迁所带来的重要影响之一。在太平洋地区, 年际和年代际的海-气系统相互作用带来的气候变动, 例如厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)和太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)对该地区的海平面长期变化趋势的估测有着重大影响。20 世纪 90 年代初期, 高精度的卫星高度计开始用于测量海平面的趋势性变化, 但海表面高度(sea surface height, SSH)数据的时间长度相对较短, 限制了更进一步的深入研究, 尤其是目前观测到的 PDO 信号主要活跃在 1980 年之前^[1-2], 这对研究 PDO 对区域海平面变化趋势造成的影响和贡献造成了一定困难。

Nakamura 等^[1]提出, 年代际的变化趋势在北太平洋地区的中长期气候变化过程中起到了决定性的作用, 尤其是在黑潮延伸体海域。Zhang 等^[2]发现, 在北太平洋海域, 去除掉年内季节变化影响的海表面温度(sea surface temperature, SST)和海表面压力(sea level pressure, SLP)在年代际变化尺度上有着最为突出的表现, 同时北太平洋也是能量的年代际变化最强烈的地区。Casey 等^[3]发现, 在北太平洋地区,

尤其是从太平洋暖池区域到北美地区西海岸, 海表面高度的变化和海表面温度的变化之间有着很高的相关关系。

作为北太平洋地区最为强烈的年代际气候变化现象^[4], PDO 对该区域海平面变化趋势的贡献也是最为显著的。在过去的 20 a, 由于受到 PDO 的影响, 在

收稿日期: 2016-03-22; 修回日期: 2016-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41376028); 国家重点基础研究发展 973 计划(2012CB956000); 中国科学院百人计划(Y32109101L); 遥感科学国家重点实验室开放研究基金(OFSLRSS201504); 青岛市创业创新领军人才计划(13-CX-26); 国家自然科学基金-山东省-海洋科学研究中心联合资助项目(U1406401); 国家自然科学基金创新研究群体项目(41421005); 山东省自然科学基金(ZR2014DQ027)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41376028; China 973 Project, No.2012CB956000; CAS (Chinese Academy of Sciences) “100 Talent” Program, No.Y32109101L; Open Foundation of State Key Laboratory of Remote Sensing Science, No.OFSLRSS201504; Leadership in Entrepreneurship and Innovation Awarded by Qingdao Municipal Government, No.13-CX-26; NSFC-Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers, No.U1406401; NSFC Innovation research group of Sciences Fund, No.41421005; Natural Science Foundation of Shandong Province, China, No.ZR2014DQ027]

作者简介: 刘超(1990-), 男, 山东青岛人, 在读硕士, 从事气候变化方向的研究, E-mail: liu1990chao@126.com; 徐永生, 通信作者, 研究员, 主要从事物理海洋和海洋遥感方面的研究, 电话: 0532-82898352, E-mail: yongsheng.xu@qdio.ac.cn

对北美洲太平洋沿岸海平面变化的估测中,甚至出现了普遍性的下降趋势^[5-6]。也有研究使用了卫星高度计产品和海平面重构数据(包括海表面高度和海表面温度)对 PDO 信号进行分析,旨在理解和确认其在区域及全球海平面长期变化趋势中扮演的角色和作用^[7-12]。这些研究认为,类似于 PDO 的中长期气候变动是导致区域海平面上升趋势呈现不均匀分布的主要原因,而中长期气候波动会掩盖由人类活动所导致的海平面上升(sea level rise, SLR)现象,增加了对人类活动导致的全球气候变暖的评估难度。Hamlington 等^[13]通过分析 1993~2010 年的 ORA-S3 (Altimetry and Operational Ocean Re-Analysis Series 3) 数据,试图通过去除与 PDO 相关的海平面变动,将人类活动所引起的海表面高度变化从区域海平面变化趋势中分离出来,以达到提升对未来海平面变化的预测能力的目的。

对于 PDO 和东北太平洋海平面变化的研究,由于观测数据的诸多限制,众多的研究集中在 SST,而且自 1993 年以来,卫星高度计投入使用的高度计时期,仅有少量的研究涉及长时 SSH 观测资料的相关研究。但理解和认识 PDO 事件在中长期尺度上所引起海表面高度变化,在描述和分析年代际海气相互作用以及中长期气候信号的传播的过程中是极其重要的。本文试图对 1950~2010 年共 60 a 的 PDO 事件对区域海平面变化趋势的影响进行量化,以期对北太平洋地区长期海平面上升趋势获得更好的理解,进一步提升我们对未来海平面趋势性变化的预测水平。

1 研究数据来源及 PDO 信号的提取方法

1.1 海平面高度数据及其可信度验证

本研究使用了 SODA(Simple Ocean Data Assimilation) 2.2.4 的月平均海表面高度数据,该数据的原始空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,为方便计算和比较,将分辨率处理为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,数据的时间长度为 1950~2010 年。SODA 同化数据采用了最优同化技术,结合了同化的卫星遥感数据及来自部分验潮站的实测数据。SODA2.2.4 是由美国德州农工大学(Texas A&M University)的 SODA 计算小组发布的最新版本,该版本的数据产品首次同化了超过 100 a(1871~2010 年)的海洋观测数据,但由于数据时间长度过长,在高度计时期之前的数据准确性和可信度需要使用实测数据进行再次验证。

为对 SODA2.2.4 的数据可信度进行检验,我们选取了平均海平面永久服务(Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL)验潮站数据库中的月平均海表面高度数据进行比较。所选取的验潮站站位具有相对较长的数据时间长度,至少涵盖了卫星高度计时期(1993~2010 年),主要使用了修正局地参考数据(revised local reference, RLR)。在东北太平洋区域所涉及到的上百个验潮站中,我们严格筛选了 20 个数据空白较少且具有较高连续性的验潮站作为基准(表 1),而观测的海表面高度数据中存在的空白则通过一维线性插值填补完毕。此外,作为时间序列的补充对比,我们也对 1993~2010 年间的法国 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data)发布的卫星高度计同化数据进行了相应处理,分辨率由 $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$ 重新通过二维线性插值处理为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格化数据。

为方便比较,我们分别从 SODA2.2.4 和 AVISO 数据产品中选取了临近各个验潮站的海表面高度数据来进行对比,以验证 SODA 海表面高度数据的可靠性和可信度。比较同化数据产品和验潮站数据之间的差别是验证数据时间序列一致性的常用有效方法^[14],当两者一致性程度较高的时候,同化数据和验潮站海平面变化之间的差值一般为常数或接近常数。

为去除噪声信号的干扰,3 组海表面高度数据的时间序列都进行了标准化处理,在每个站点上,每组海表面高度数据分别除以了各自的标准差,并且去除了季节性信号。图 1 展示了 3 组数据在部分验潮站站位的比较结果。结果表明,无论是年际信号还是年代际信号的变化,全部 3 组数据在各个验潮站站位上都显示了很好的一致性。而 SODA2.2.4 的海表面高度数据和各个验潮站的实测数据之间也有相对较高的相关系数(表 2),各个数值均高于 0.6。分析表明,在北太平洋地区,不管是振幅的大小还是在整体的海面高度变化趋势上,SODA2.2.4 和实测数据之间具有很高的-致性。这说明,SODA2.2.4 的数据在北太平洋地区是可信的。

1.2 PDO-SSH 的计算过程

PDO 指数 θ (获取自: <http://jisao.washington.edu/pdo/>) 被定义为北太平洋地区 SST 的经验正交分解(empirical orthogonal function, EOF)分析后得到的第一模态的时间序列^[15-16]。PDO 随指数的正负不同而具有不同相位,相位转化过程一般会持续 10~30 a。另一方面,SSH 变动主要代表着其垂直下方的上层

表 1 从 PSMSL 海表面高度数据组中所选取的验潮站名称、坐标、时间长度的起止点以及空白数据在总海表面高度时间序列中的占比

Tab. 1 Station name, location, time interval, and ratio of gaps in tide gauge SSH time series selected from PSMSL datasets

编号 (PSMSL 编号)	站点名称	地点		时间跨度(年份)		空白数据 占比 (%)
		纬度(°N)	经度(°E)	起点	终点	
1 (1071)	PORT HARDY	50.72	-127.48	1964	2010	0.00
2 (1799)	WINTER HARBOUR	50.52	-128.03	1989	2010	0.00
3 (595)	WAKE ISLAND	19.29	166.62	1950	2010	1.03
4 (756)	NAWILIWILI BAY, KAUAI ISLAND	21.95	-159.36	1950	2010	0.42
5 (155)	HONOLULU	21.31	-157.87	1950	2010	1.14
6 (521)	KAHULUI HARBOR, MAUI ISLAND	20.90	-156.48	1950	2010	0.37
7 (1634)	SAND POINT, POPOF IS., AK	55.34	-160.50	1985	2010	0.00
8 (266)	SEWARD	60.12	-149.43	1964	2010	3.59
9 (1353)	VALDEZ	61.13	-146.36	1973	2010	0.00
10 (426)	SITKA	57.05	-135.34	1950	2010	0.32
11 (225)	KETCHIKAN	55.33	-131.63	1950	2010	0.69
12 (127)	SEATTLE	47.60	-122.34	1950	2010	0.22
13 (265)	ASTORIA (TONGUE POINT)	46.21	-123.77	1950	2010	0.56
14 (1639)	N. SPIT, HUMBOLDT BAY	40.77	-124.22	1985	2010	0.28
15 (437)	ALAMEDA (NAVAL AIR STATION)	37.77	-122.30	1950	2010	1.65
16 (1352)	MONTEREY	36.61	-121.89	1973	2010	0.00
17 (508)	PORT SAN LUIS	35.18	-120.76	1950	2010	1.08
18 (377)	SANTA MONICA (MUNICIPAL PIER)	34.01	-118.50	1950	2010	2.95
19 (245)	LOS ANGELES	33.72	-118.27	1950	2010	0.46
20 (158)	SAN DIEGO	32.71	-117.17	1950	2010	0.99

注: 所有验潮站的置信区间均在 95%以上, 经度负值代表西经

表 2 SODA 2.2.4 海表面高度数据和 20 个验潮站的海表面高度时间序列之间的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient between SODA 2.2.4 and tide gauge SSH data at each gauge station

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
相关系数	0.77	0.82	0.64	0.74	0.61	0.65	0.72	0.61	0.64	0.63
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
相关系数	0.73	0.62	0.65	0.63	0.80	0.79	0.75	0.64	0.78	0.71

海水及温跃层的变化, 和海表面温度不同, 对上层大气压力的响应较为缓慢。Cummins 等^[8]认为, 在寻找可以衡量 PDO 的指数上, 卫星高度计所测得的 SSH 主成分是要比 SST 更好的指标, 具有较高的强度, 不易被区域性的短期大气变化所影响, 同时, 在北太平洋地区, 其受到的噪声影响也要比 SST 为主导的 PDO 指数要低。该观点和早先的其他针对海表面高度异常的研究相一致^[8, 16-17]。综上, 可以认为基于 SST 的 PDO 指数能够反映 PDO 和 SSH 之间的紧密联系。

根据此前的相关研究^[5, 18], 通过对海面高度异常进行时间和 PDO 指数的多元线性回归(multi variable linear regression, MVLR)运算, 可将 PDO 所引起的海表面高度变动(PDO-SSH)信号从海表面高度数据中

分离出来:

$$\hat{\eta} = a_0 + a_1 t + a_2 \theta + \varepsilon_a, \quad (1)$$

式中 $\hat{\eta}$ 是海表面高度异常, a_0 是常数项, a_1 是通过多元线性回归所获得的海表面长期变化线性趋势的回归系数, a_2 是 PDO 指数所对应的回归系数, t 表示时间, 而 ε_a 是误差。 a_1 和 a_2 分别代表了长期趋势和 PDO 信号变化趋势, 而 PDO-SSH 即是通过将回归系数 a_2 与 θ 相乘得到的。至此, PDO 所引起的海面上升趋势即可从气候变动的大背景中分离出来, 并用于之后的研究和分析。

在进行多元线性回归分析之前, 为使研究能够聚焦于大尺度长周期的气候变动, 同时为保证足够的信号强度, 我们对 θ 采取了 36 个月和 12 个月的滑动平均(图 2)。

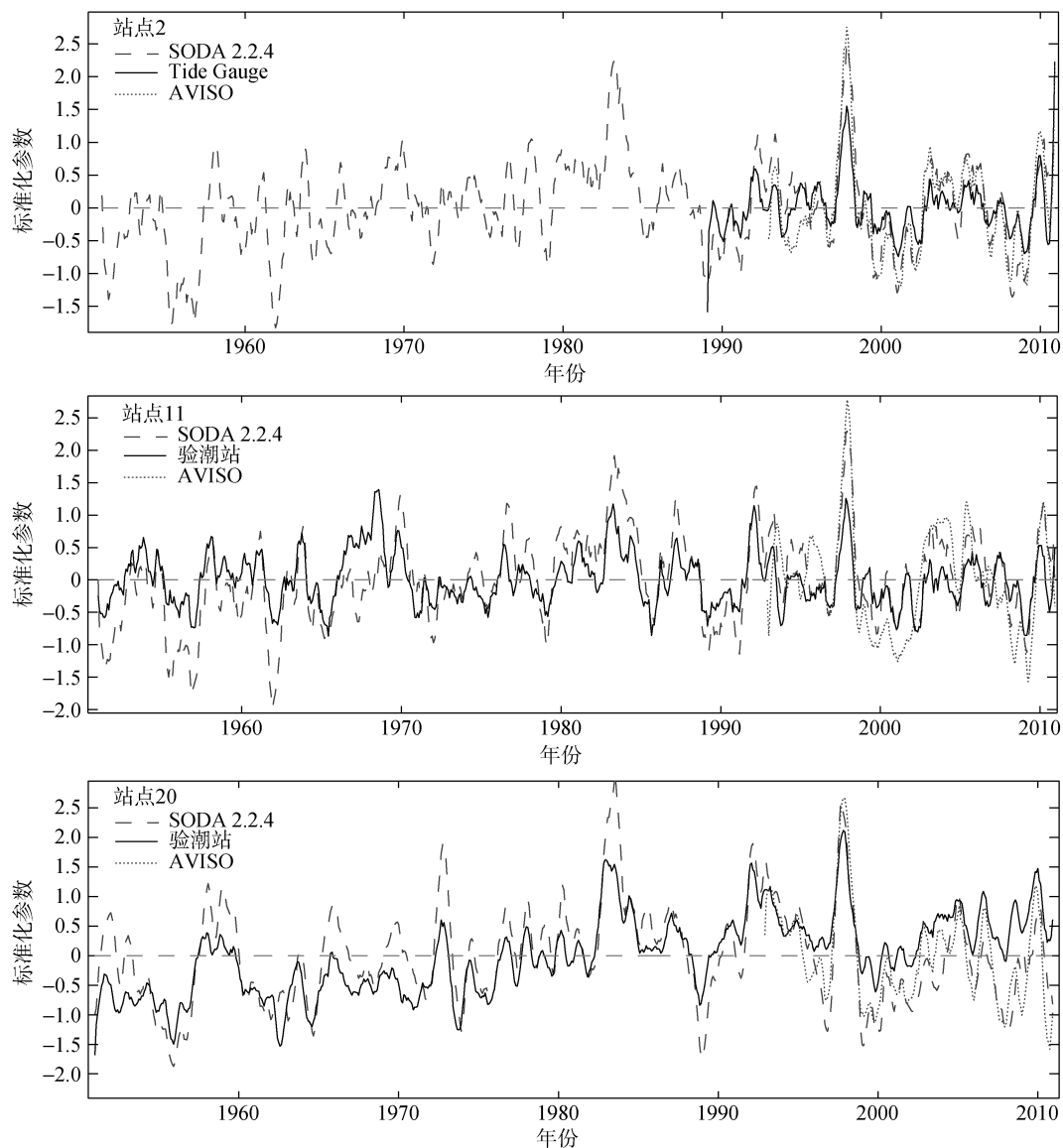


图 1 验潮站海平面数据和临近的 SODA2.2.4 海表面高度数据的比较结果
Fig. 1 Comparison between data at tide stations and nearby grid points of SODA 2.2.4

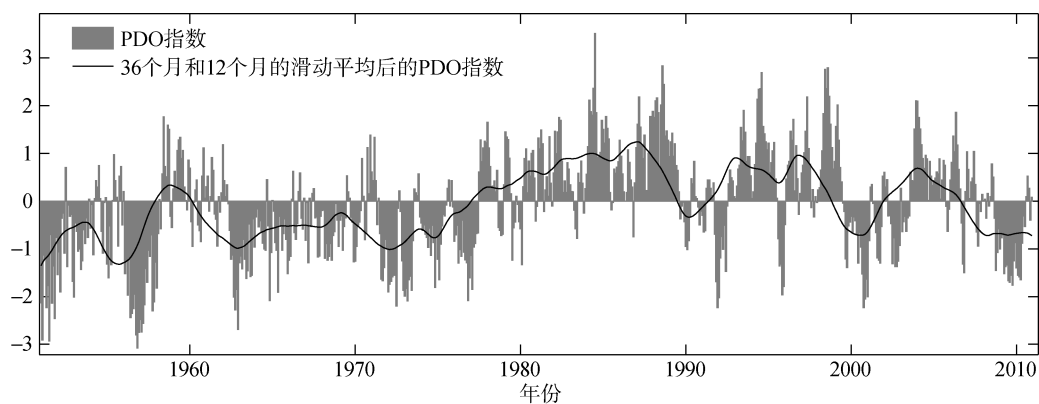


图 2 基于海表面温度的 PDO 指数及应用 36 个月和 12 个月的滑动平均后的滤波结果
Fig. 2 SST based PDO index and associated 36- and 12-month running mean filtered results

2 1950~2010 年 PDO 对区域海平面上升的贡献

图 2 中可见到在 1950~2010 年, PDO 指数出现了 2 个连续且明显的完整相位变换过程 (1960~1989 年, 1990~2001 年)。Minobe^[19-20]指出, 在 20 世纪里, PDO 在两个准周期上最为活跃, 一个是 50~70 a, 另一个是 15~25 a。此外, PDO 和 ENSO 在低频波段表现出了很高的相关性^[5-6, 17, 21], 有研究认为 PDO 或为北太平洋地区对 ENSO 的一种响应模式^[22-25]。

综合考虑上述研究中 PDO 所表现出来的特征, 为保证 PDO 指数在滤波之后依然能够保持较高的信号强度, 本研究中并未采取除滑动平均以外的低通滤波器对 PDO 指数进行滤波, 并将着重讨论和研究前文中提到的两个典型周期(图 2)。

根据之前所获得的 PDO-SSH, 通过在每个网格点上对其进行最小二乘法运算, 即可获得 PDO 所引起的海平面变化趋势。图 3 为这两个周期所分别对应的 PDO-SSH 变化趋势的空间分布, 两者和典型的 PDO 信号在北太平洋的空间分布之间具有很高的相似度。在 1960~1989 年, PDO 指数从冷相位转变到了暖相位, 所对应的 PDO-SSH 变化趋势在北太平洋地区呈现出差异化的分布特征, 在西北太平洋地区体现为下降趋势, 而在东北太平洋地区则为上升趋势。相反地, 在 1990~2001 年, 由于 PDO 指数从暖相位转变到了冷相位, 所对应的 PDO-SSH 的变化趋势在西北太平洋地区体现为上升趋势, 而东北太平洋为下降趋势。尽管在两个不同的周期里, PDO-SSH 趋势的空间分布有着非常相似的空间分布特征, 但在 1960~1989 年, PDO-SSH 趋势的区域差异性特征更

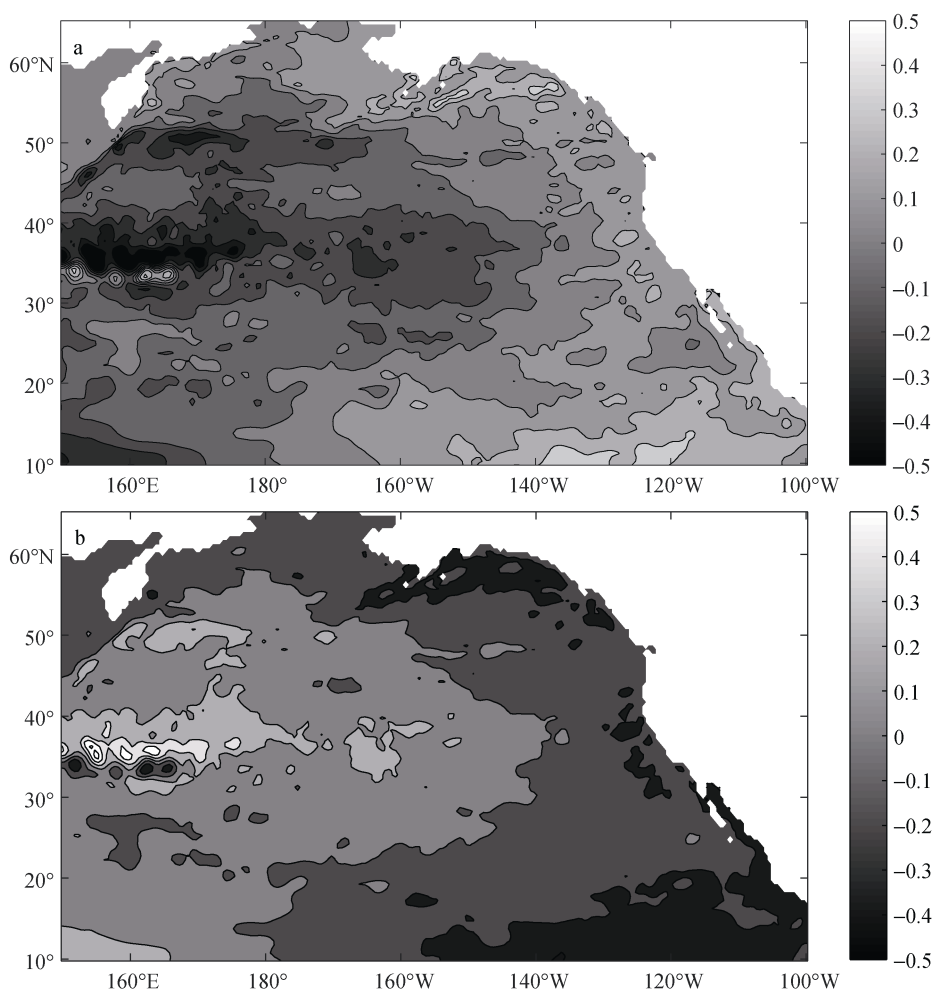


图 3 PDO 引起的海平面变化趋势的空间分布 单位 cm/a
Fig. 3 Distribution of sea-level trends induced by PDO, cm/a
a: 1960~1989 年; b: 1990~2001 年
a: between 1960 and 1989; b: between 1990 and 2001

为复杂。在两个不同时期内, PDO 所引起的海平面变化的极大值均出现在了黑潮延伸体区域, 而相反的变化速率的极大值也都出现在了北美地区太平洋沿岸以及东赤道太平洋地区。

将 PDO-SSH 信号从原始的 SODA 数据中被去除掉之后, 北太平洋地区的海表面高度变化速率在空间分布上发生了重大改变。图 4 和图 5 为去除 PDO-SSH 前后, 分别使用最小二乘法对两个周期进行计算得到的区域海平面变化趋势。

从图 4a 中可见, 由于具有较长的数据时间长度 (约 30 a), 在 1960~1989 年, 北太平洋地区的区域性海平面变化趋势分布较为均匀并且数值不高, 数据

的标准差较小, 基本控制在 ± 1 mm/a 的水平内。

在去除 PDO-SSH 之前, 该区域的海平面变化趋势空间分布和 PDO 信号的空间分布之间有一定的相似性, 在北美地区近海海域具有正的上升趋势, 而在西太平洋地区也呈现出负的上升趋势, 尤其是在黑潮延伸体海域。黑潮延伸体本身所具有的不稳定性或许是造成该地区海平面变化趋势空间分布特征复杂的首要原因。图 4a 的上升趋势的极值区出现在东赤道太平洋和阿拉斯加湾区域。整体来看, 图 4a 所表现出来的空间分布状况和 PDO-SSH 自身的变化趋势空间分布之间有着一定相似性, 同时趋势下降的地区主要集中在 $25^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$ 地区。

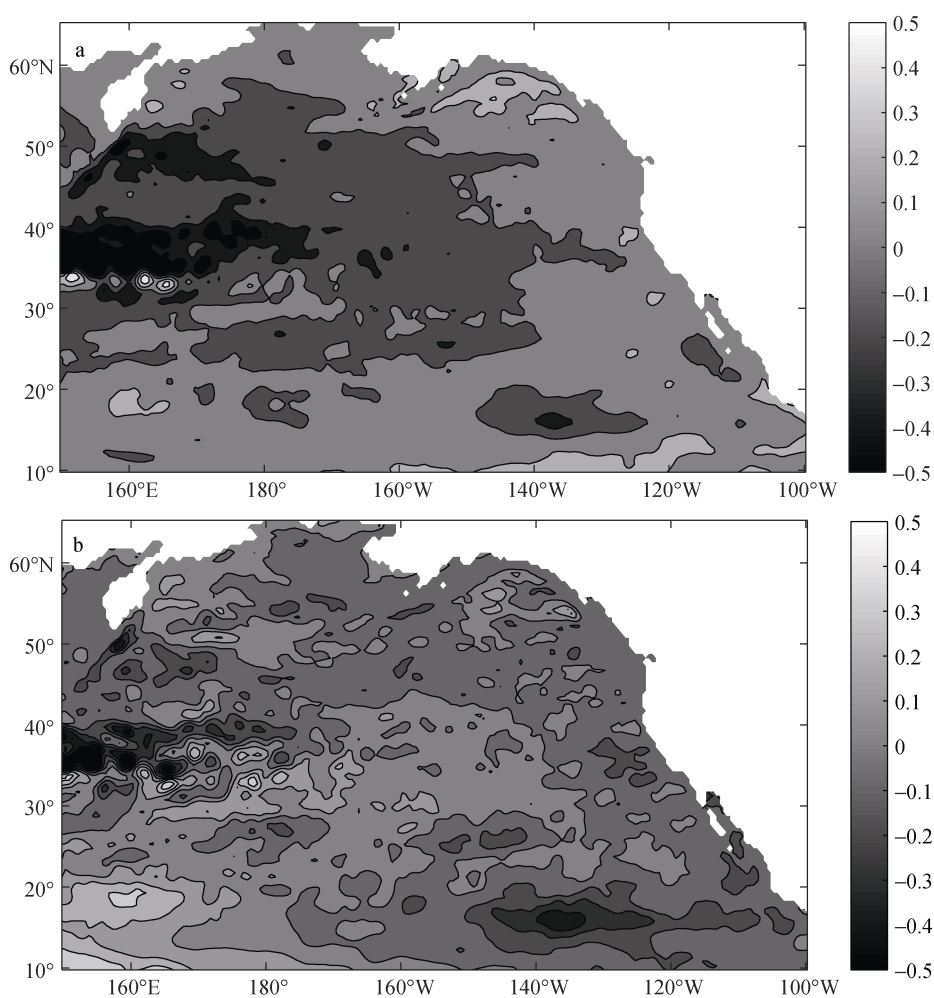


图 4 1960~1989 年区域海平面变化趋势的空间分布

Fig. 4 Regional sea-level trend distribution between 1960 and 1989

a: 移除 PDO-SSH 前; b: 移除 PDO-SSH 后

a: PDO-SSH retained; b: PDO-SSH reduced. Black contours denote zero values

图 4b 为移除 PDO-SSH 之后的北太平洋区域海平面上升趋势空间分布。在大致的升降分布上, 图

4b 和图 4a 之间有着一定的一致性, 但不再具备 PDO 信号的典型特征。

总体来看,北太平洋东西两侧的海平面升降关系在图 4b 中出现了翻转。在赤道太平洋地区,无论是升高还是下降,移除后的海平面变化趋势都得到了加强。而在赤道暖池区域($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$),海平面上升趋势的最大值达到了约 0.3 cm/a 。而同一区域的 PDO-SSH 的平均变化趋势就达到了 -0.2 cm/a ,几乎是实际观测数据的两倍之多。

由于去除了 PDO 所引起的海平面变化,在北太平洋的大部分区域里,包括北美地区近海海域,海平面变化趋势从接近于 0 变化到了 -0.1 cm/a 的水平,说明 PDO-SSH 的存在会极大地影响沿海地区的海平面上升水平。由于绝大多数北太平洋地区的验潮站都分布于北美地区沿岸,尤其是那些数据完整度较高,经常参与研究活动的验潮站,因此为提高估计人类活动所导致的区域海平面变化的准确程度,去除 PDO-SSH 信号是至关重要的。

使用同一套计算方法,我们分析和检验了另一个时间更近的 PDO 活跃时期(1990~2001 年)。高度计时期和这一活跃时期有诸多重合,同时在该时段里,还包含了 1997 年发生的历史上最强烈的 ENSO 事件之一。尽管该时期在时间长度的选择上存在一定的差异性,但图 5a 中的区域海平面变化趋势的空间分布仍然与此前的相关研究^[18]保持了一定的相似度。在未分离 PDO 所引起的海表面高度变化的情况下,北太平洋的区域海平面变化空间分布呈现出了很强的差异性。在西太平洋和赤道暖池地区,出现了一个很强的正上升速率中心,而在北美地区沿岸,则出现了负的上升速率聚集区域。最大的海平面上升速率(1 cm/a)出现在 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}$ 区域,同时最小速率(-1 cm/a)出现在了黑潮延伸体海域和东赤道太平洋地区。此外,在整个北美地区沿海地区,都呈现出了普遍的下降趋势。

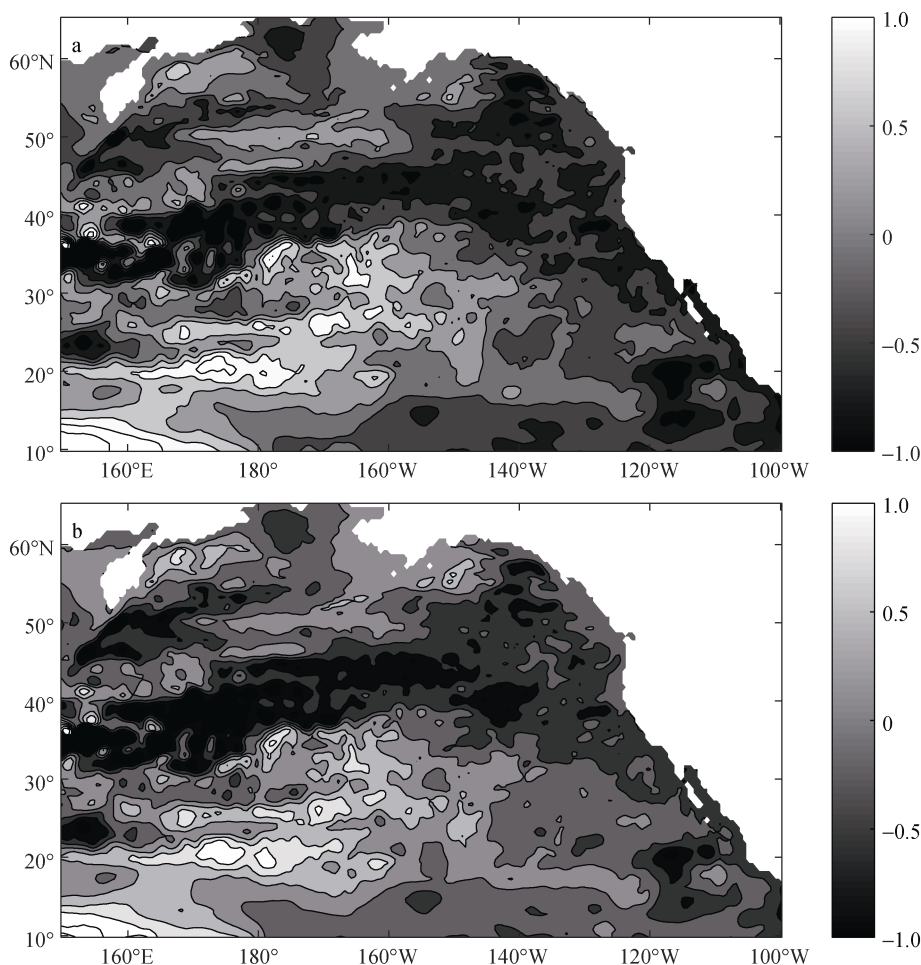


图 5 1990~2001 年,区域海平面变化趋势的空间分布

Fig. 5 Regional sea-level trend distribution between 1990 and 2001

a: 移除 PDO-SSH 前; b: 移除 PDO-SSH 后

a: PDO-SSH retained; b: PDO-SSH reduced. Black contours denote zero values

然而在移除 PDO-SSH 后, 北太平洋区域海平面变化趋势的空间变化模式, 与图 4 和其他研究^[8]的变化模式都有一定差异。在大多数格点上, 尽管 PDO-SSH 的变化趋势并不一致, 但通过移除 PDO-SSH 信号, 整个北太平洋地区的区域海平面的上升趋势均得到了抑制。和图 5a 中的海平面上升趋势相比, 图 3b 中的 PDO-SSH 变化趋势强度较弱, 最大值仅为 0.5 cm/a。而另一方面, 沿海地区和东北太平洋地区的海平面下降趋势也得到了抑制, 但阿留申群岛附近海域的上升趋势得到了加强。

在两个不同的 PDO 活跃时期内, 移除 PDO-SSH 前后, 海平面上升速率的空间分布有着截然不同的变化模式, 导致这种变化差异的主要原因或许是由于趋势计算方法本身存在一定的不稳定性。在趋势估计的过程中, 最小二乘法是广泛适用的方法, 但这种方法对数据的时间长度的选取有着很强的依赖性^[26]。在选取不同的数据时间长度的过程中, 即使参与最小二乘法运算的数据之间存在很小的不同, 也可能导致截然相反的统计结果。图 3 中, 在两个不同的时期里, PDO 所引起的海平面趋势性变化有着相似的空间分布和信号强度, 仅因为 PDO 指数的冷暖相位转化方向相反, 使得东西太平洋地区在上升趋势的正负关系有所不同。1990~2001 年, 发生了最强烈的 ENSO 事件之一。尽管对 PDO 指数进行了滑动滤波, 由于 ENSO 和 PDO 之间的紧密联系, 使得该时期的 PDO 指数变化曲线和 ENSO 之间, 在强度和变化规律上仍然有着一定的相似度。然而, 由于 1990~2001 年间观测所得的海平面变化要远强于同期对应的 PDO-SSH 的变化, 使得长期气候振荡对海平面变化所产生的真实影响被掩盖了。

3 讨论

类似 ENSO 和 PDO 的年际和年代际气候振荡, 不仅能够影响大洋热量的经向输运过程和大气辐射平衡, 也能够掩盖长期不可逆转的海平面上升趋势。整体看来, 中长期的气候变动会对全球平均海平面以及区域海平面有提升效果^[3]。通过降低大尺度气候变动对海平面所造成的影响, 可以显著提升我们对区域海平面升高状况估测结果的精确度。此前已有诸多学者使用卫星高度计和其他海平面重构产品对 PDO 和海平面变化之间的关系进行了研究^[5, 9, 11, 16]。本文中, 我们使用了一种估计 PDO 对区域海平面变化的影响的量化方法。基于 SODA 2.2.4 同化数据和

卫星高度计数据, 可以计算出 PDO 事件对海平面变化的影响尺度, 提升我们对人类活动所导致的全球气候变暖效应和区域海平面差异性变化的认识。

在计算的过程中, 我们使用了多元线性回归方法来提取 PDO-SSH 信号, 并重新计算了海平面变化速率。PDO 的相位变换主要发生在年代际尺度上, 约为 10~30 a, 而在 15~25 a 的周期上最为活跃。当 PDO 信号从冷相位转向暖相位时, 如 1960~1989 年, PDO 指数整体呈现上升趋势。同时, 回归计算得到的 PDO-SSH 在西北太平洋呈现下降趋势, 在东北太平洋则是上升趋势。当相位变换的方向相反时, 如 1990~2001 年, 则相应地会出现正负关系相反的空间分布。在 1960~1989 年间, PDO 影响了整个北太平洋海域, 将区域海平面升高的空间分布模式打散甚至逆转。而在东北太平洋的大部分区域内, 包括北美地区沿岸和东赤道太平洋海域, 发现海平面升高速率严重受到 PDO-SSH 的影响。然而, 在相对较短的时期里(如 1990~2001 年), PDO-SSH 对区域海平面升高趋势的影响仅相当于一个背景场信号。这是由于在高度计时期, PDO-SSH 的强度要远小于 SODA 海平面高度数据的强度, 这对准确判断 PDO 对海平面所造成的真正影响范围形成了一定的干扰。

在计算海平面上升趋势和 PDO-SSH 变化趋势时, 变化速率对所选取的时间长度十分敏感。一般来说, 给定的 PDO 信号的数据时间长度越长, 其对区域海平面变化趋势所造成的影响就越小; 而数据的信号强度越大, 对海平面变化趋势的影响就越大。在北太平洋地区, 尽管 PDO 影响的空间分布模式并不唯一, 但北美沿岸地区受到的影响始终最为显著。

参考文献:

- [1] Nakamura H, Lin G, Yamagata T. Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(10): 2215-2225.
- [2] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(5): 1004-1020.
- [3] Casey K S, Adamec D. Sea surface temperature and sea surface height variability in the North Pacific Ocean from 1993 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C8): 14-1-14-12.
- [4] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(10): 2215-2225.

- Society, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [5] Zhang X, Church J A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(21): 653-660.
- [6] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展[J]. *大气科学*, 2004, 28(6): 979-992.
YANG Xiuqun, ZHU Yimin, XIE qian, et al. Advances in Studies of Pacific Decadal Oscillation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(6): 979-992.
- [7] Bromirski P D, Miller A J, Flick R E, et al. Dynamical suppression of sea level rise along the Pacific coast of North America: Indications for imminent acceleration[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2011, 116: C7.
- [8] Cummins P F, Lagerloef G S E. Low-Frequency Pycnocline Depth Variability at Ocean Weather Station P in the Northeast Pacific[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(32): 3207-3215.
- [9] Hamlington B D, Leben R R, Strassburg M W, et al. Contribution of the Pacific Decadal Oscillation to global mean sea level trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(19): 5171-5175.
- [10] Merrifield M A, Thompson P R, Lander M. Multidecadal sea level anomalies and trends in the western tropical Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(13): 34-47.
- [11] Meyssignac B, Salas y Melia D, Becker M, et al. Tropical Pacific spatial trend patterns in observed sea level: internal variability and/or anthropogenic signature?[J]. *Climate of the Past*, 2012, 8(2): 787-802.
- [12] Feng M, Li Y, Meyers G. Multidecadal variations of Fremantle sea level: Footprint of climate variability in the tropical Pacific[J]. *Arquivos Brasileiros De Cardiologia*, 2007, 88(2): 144-151.
- [13] Hamlington B D, Leben R R, Strassburg M W, et al. Cyclostationary empirical orthogonal function sea-level reconstruction[J]. *Geoscience Data Journal*, 2014, 1(C12): 90-99.
- [14] Nerem R S, Mitchum G T. Estimates of vertical crustal motion derived from differences of TOPEX/POSEIDON and tide gauge sea level measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 40-1-40-4.
- [15] Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation[J]. *Journal of oceanography*, 2002, 58(1): 35-44.
- [16] Cummins P F, Lagerloef G S E, Mitchum G. A regional index of northeast Pacific variability based on satellite altimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): L17607.
- [17] Lagerloef G S E. Interdecadal Variations in the Alaska Gyre[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25(10): 2242-2258.
- [18] Si, Z., Xu, Y. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on regional sea level rise in the Pacific Ocean from 1993 to 2012[J]. *Chinese Journal of Oceanology & Limnology*, 2014, 32(6): 1414-1420.
- [19] Minobe S. A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(6): 683-686.
- [20] Minobe S. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7): 855-858.
- [21] Power S, Colman R. Multi-year predictability in a coupled general circulation model[J]. *Climate Dynamics*, 2006, 26(2-3): 247-272.
- [22] Deser C, Alexander M A, Xie S P, et al. Sea surface temperature variability: patterns and mechanisms[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2(3): 115-143.
- [23] Newman M, Compo G P, Alexander M A. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(23): 3853-3857.
- [24] 顾小丽, 李培良. 太平洋海平面变化特征及影响因素分析[J]. *海洋学报*, 2009, 31(1): 28-36.
GU xiaoli, LI peiliang. Pacific sea level variations and its factors [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(1): 28-36.
- [25] Hay C C, Eric M, Kopp R E, et al. Probabilistic re-analysis of twentieth-century sea-level rise[J]. *Nature*, 2015, 517(7535): 481-484.
- [26] Chambers D P, Mehlhaff C A, Urban T J, et al. Low-frequency variations in global mean sea level: 1950–2000[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C4): 1-1–1-10.

Quantification and evaluation of PDO influence on north Pacific SLR during 1950–2010

LIU Chao^{1, 2, 3}, XU Yong-sheng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Mar. 22, 2016

Key words: PDO (Pacific decadal oscillation); regional sea level; SSH (sea surface height); North Pacific Ocean

Abstract: In this paper, the influence of different Pacific Decadal Oscillation (PDO) events are investigated and estimated during 1950–2010 in the North Pacific. Simple ocean data assimilation (SODA) sea surface height (SSH) data are used to separate PDO-induced SSH varieties (PDO-SSH) by applying the multiple linear regression method. Results show that the obtained PDO-SSH induced sea level rise and its obscure-effect are closely related to the amplitude and period of the corresponding PDO signal. Further analysis shows that the influence of PDO events in the North Pacific is not uniform, and an opposite sign is observed in the Eastern and Western Pacific. The long-term PDO signal during 1960 to 1989 has a stronger influence than the altimeter period, and the areas most influenced are the western equatorial Pacific, Aleutian Islands, and coast of North America, where PDO-SSH in these regions accounts for nearly 60% of observed SSH.

(本文编辑: 李晓燕)