doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2023.02.004

基于局部均值分解和交叉小波的全球平均海平 面变化与 ONI 指数多尺度特征研究

熊璐杰¹, 王奉伟², 周世健³, 郇常敏¹

(1. 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌 330013; 2. 同济大学测绘与地理信息学院,上海 200092;3. 南昌航空大学,江西 南昌 330063)

摘要:为研究全球平均海平面与 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)的相关性问题,本文提出了一种结合局部均值分解和交叉小波原理的分析方法,揭示全球平均海平面和 ENSO 的影响机理和因果关联。利用全球平均海平面的时间序列进行局部均值分解得到 PF 分量和余量,表示海平面变化的高频分量、低频分量和趋势分量。剔除高频分量的影响,利用最小二乘线性拟合趋势分量,得到 1991—2000年的全球平均海平面上升速率为 3.6 mm/a。接着对 PF 的低频分量进行距平变换再与 ONI 指数 (Oceanic Niño Index, ONI)分别进行 Morlet 连续小波变换得到小波功率谱,再将变换的连续小波分别进行交叉小波变换得到交叉小波功率谱和凝聚谱,通过交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱揭示信号在时频空间的能量共振和协方差分布规律,其中交叉小波功率谱体现了共同的高能量区的相关性,交叉小波凝聚谱体现了共同的低能量区的相关性。 结果表明,该方法能在多尺度上分析海平面的变化,并能分析 ONI 指数与全球平均海平面的关系,可为全球平均海平面演变规律分析和预测等方面提供有力工具。

中图分类号: P732 文献标识码: A 文章编号: 1003-2029 (2023) 02-0028-08

ENSO 循环是海洋与大气环流相互作用的显著 信号,在海洋方面表现为厄尔尼诺-拉尼娜的转变, 在大气方面表现为南方涛动,它常引起大气环流的 改变并导致全球海平面的异常变动^[1]。海洋和大气 通过一定的物理过程形成一个复杂的耦合系统,进 行热量、动量和物质的交换,对海气的物理性质产 生影响^[2]。海平面的变化会影响整个大气环流的演 变,同时大气环流的变化又通过动力和热力作用使 海平面发生变化,海平面变化深受 ENSO 的影响。 ENSO 现象及其对海洋和大气的影响是物理海洋和 气候变化研究的重要问题^[3]。程炳岩等^[4]采用交叉小 波变换方法分析了热带海面温度(Sea Surface Temperature, SST)、北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)与 ENSO 的相关性。王斌等¹⁵采 用去趋势预置白 Mann-kendall 检验、直线回归滑动 平均、交叉小波等方法分析了东江流域 1995—2008 年降水时空特征,并揭示其与 ENSO 的响应关系。

传统的研究方法通常为线性倾向率法、累积距 平法和 Mann-Kendall 法,对时间序列进行趋势分析 和突变分析,用数值模拟、经验正交函数分解和旋 转经验正交函数分解等方法对时间序列进行处理。 传统的研究方法无法反映在一定物理意义下的全球

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金资助项目(42064001)

收稿日期: 2022-08-24

作者简介:熊璐杰 (1997—),女,硕士研究生,主要从事大地测量数据处理研究。E-mail: 767688426@qq.com

通讯作者:周世健(1966—),男,博士,教授,主要从事大地测量学与测量工程方面的教学与科研工作。E-mail: 408608628@ qq.com

平均海平面变化与 ENSO 相互联系的特征信息^[6-8]。 本文结合了局部均值分解方法(Local Mean Decomposition, LMD) 和交叉小波方法的分析方法,提出一 种不同于传统研究方法的结合局部均值分解和交叉 小波原理的分析方法。局部均值分解方法是 SMITH JS在2005年提出的一种对数据进行分解的方法, 将数据分解成 PF 分量和余量,其中 PF 分量可以体 现一定物理特征信息,余量反映趋势信息[9-11]。交 叉小波变换是将小波变换和交叉谱分析的新型信号 分析技术,是一种能够在时域和频域上分析两个时 间序列相关程度的一种具有优越性的方法,目前在 气象与洋流领域得到了广泛的应用[12-15]。交叉小波 是基于小波分析的一种方法,能够分析两种信号的 相关性和因果关系。将重构的全球平均海平面时间 序列和尼诺指数时间序列利用交叉小波方法进行相 关性分析,可以得到两种信号之间的关联信息。

1 局部均值分解方法原理

在原始信号 x(t)的局部均值分解过程中,首先 将其局部极值点记为 n_i 和相应的时刻值记为 t_i,相 邻两个极值点 n_i 和 n_{i+1} 的平均值记为 m_i,其计算公 式如下。

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2} \tag{1}$$

再将平均值 m_i 在其对应的时刻之间进行直线 延伸,可得到 m₁₁(t),用滑动平均法对进行平滑处 理,得到 a₁₁(t)。再利用局部极值点计算局部幅值为 a_i,其计算公式如下。

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2}$$
(2)

然后再将局部均值函数 $m_{11}(t)$ 从原始信号中 x(t) 分离出来,得到式(3)。

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t)$$
(3)

对 $h_{11}(t)$ 解调,得到式(4)。

$$s_{11}(t) = h_{11}(t)/a_{11}(t)$$
(4)

求 $s_{11}(t)$ 的包络估计函数 $a_{12}(t)$,如果 $a_{12}(t)$ 不等 于 1,对 $s_{11}(t)$ 重复以上迭代过程,直到 $s_{1n}(t)$ 为纯 调频信号,即-1 $\leq s_{1n}(t) \leq 1$,且满足 $a_{1(n+1)}(t) = 1$,则 得出式(5)。

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t)$$

$$h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t)$$

$$\vdots$$

$$h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t)$$
(5)

迭代产生的所有包括估计函数相乘得到包络信 $\exists a_1(t)$,即

$$a_{1}(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^{n} a_{1q}(t)$$
(6)

$$PF_{1}(t) = a_{1}(t)s_{1n}(t)$$
(7)

将 PF_1 分量从原始信号 x(t)分离出来得到 $u_1(t)$, 重复循环步骤,直到 $u_k(t)$ 为单调函数为止。

$$\begin{cases} u_{1}(t) = x(t) - PF_{1}(t) \\ u_{2}(t) = u_{1}(t) - PF_{2}(t) \\ \vdots \\ u_{k}(t) = u_{k-1}(t) - PF_{k}(t) \end{cases}$$
(8)

最后原始信号可以表示为所有 PF 分量和一个 余量 u_k(t)之和。

$$x(t) = \sum_{p=1}^{k} PF_{p}(t) + u_{k}(t)$$
(9)

2 交叉小波原理

设两个连续信号分别为m(t)和n(t),m(t)的连续小波定义如下。

$$W_{m}(\alpha,\tau) = \alpha^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} m(t) \overline{\psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right)} dt \qquad (10)$$

式中, τ 表示位移算子; α 表示尺度算子; ψ 表示基本小波。

Morlet 小波是由高斯函数调整的复小波,在频率和时间尺度上具有很好的平衡性,对多尺度分析 方面具有优越性,所以本文选择该小波作为基本小 波^[16],其表达式如下。

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} (e^{-jw_0 t} - e^{-w_0^2/2}) e^{-t^2/2}$$
(11)

式中, w_0 表示信号的初始相角,一般取 $w_0 = 6$ 。

对于两个连续信号 m(t)和 n(t),利用交叉小波 能量谱体现其能量情况,其表达式如下。

$$P_m(\alpha) = ||W_m(\alpha,\tau)|^2 d\tau \qquad (12)$$

在交叉小波功率谱中其箭头的方向表示相对相

位关系,其相位角表达式如下。

$$\varphi = \arctan \frac{\xi \{W_{xy}(\alpha, \tau)\}}{R\{W_{xy}(\alpha, \tau)\}}$$
(13)

式中, ξ { $W_{xy}(\alpha, \tau)$ }为交叉小波的虚部;R{ $W_{xy}(\alpha, \tau)$ }为实部。

利用交叉小波凝聚谱体现其能量的相关性,其 表达式如下。

$$\gamma_{x,y}^{2} = \frac{|S(\alpha^{-1}C_{x,y})|^{2}}{S(\alpha^{-1}P_{k}^{x})S(\alpha^{-1}P_{k}^{y})}$$
(14)

式中, S()表示平滑谱运算, 其表达式如下。

$$S(W) = S_{\text{scale}}(S_{\text{time}}(W))$$
(15)

式中, S_{scale} 表示沿着小波伸缩尺度轴平滑; S_{time}则表示沿着小波时间平移轴平滑。

将交叉小波功率谱与红色噪音标准谱进行比较,最终确定两个时间序列的显著相关程度。一阶 自回归模型是红色噪音标准谱,利用红色噪音标准 谱检验交叉小波功率谱^[17]。一阶自回归模型的傅立 叶功率为

$$P_{k} = \frac{1 - \alpha^{2}}{|1 - \alpha e^{-2j\pi k}|^{2}}$$
(16)

式中, k 为傅里叶频率指数。在 P_k 的条件下, 小波功率 p 的概率大于其显著性水平为

$$D\left(\frac{W_{x}(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\tau})}{\sigma_{x}^{2}} < p\right) = \frac{1}{2} P_{k} \chi_{v}^{2}(p) \qquad (17)$$

式中, v为自由度。

交叉小波功率谱分布如下。

$$\frac{W_x(\alpha,\tau)\overline{W_y(\alpha,\tau)}}{\sigma_x\sigma_y} = \frac{Z_v(p)}{v}\sqrt{P_k^x P_k^y}$$
(18)

式中, $Z_{v}(p)$ 表示在 v 自由度下的置信度; σ_{x} 和 σ_{y} 为 x(t)和 y(t)的标准差; P_{k}^{x} 和 P_{k}^{y} 为 x(t)和 y(t)的 红色噪音谱的功率。

根据交叉小波功率谱计算显著性水平,其表达 式如下。

$$\rho(\alpha,\tau) = \frac{|W_{xy}(\alpha,\tau)|}{\sigma_x \sigma_y} \tag{19}$$

影响锥(Cone of Influence, COI) 是交叉小波功 率谱下方的U形曲线,交叉小波变换存在边缘效 应,曲线下方区域无法准确度量。

功率谱中的信号频率*f*、采样频率*f*_α、尺度因 子 α 和尺度系数 *j* 之间的关系表达式如下。

$$f = \frac{f_{\alpha}}{j} = \frac{f_{\alpha}}{2^{j}} \tag{20}$$

3 资料来源

本文使用 https://www.psmsl.org/ 网站提供的 1991—2000 年全球月平均海平面高度的时间序列作 为实验数据。

ONI 指数是衡量 ENSO 现象的一种度量, 厄尔 尼诺事件称为 ENSO 的暖事件, 拉尼娜事件称为 ENSO 的冷事件。暖(红色)事件定义为 ONI 指数 连续 5 个月大于等于 0.5 ℃, 冷(蓝色)事件定义 为 ONI 指数连续 5 个月小于等于-0.5 ℃。本文使用 美国海洋与大气管理局 https://origin.cpc.ncep.noaa. gov/网站提供的 1991—2000 年 ONI 指数作为实验 数据。

4 全球平均海平面变化与 ONI 指数的 多尺度分析

研究全球平均海平面的时间序列包含多尺度的 信息,包括海平面上升的趋势信息、地球物理变化 过程信息和不确定的变化信息。通过传统的时间序 列研究方法不能体现其复杂的地球物理变化过程, 不能体现海平面变化的多尺度特征信息。由于全球 变暖等气候影响,长期的海平面变化呈现一种整体 上升的趋势,局部均值分解方法可以从全球平均海 平面变化的时间序列中,在剔除其余因素干扰的情 况下,分解出更有效的、能够预测未来全球平均海 平面线性变化的趋势性信息。用此时间序列结合传 统的最小二乘线性估计得到的海平面上升速率比直 接线性估计的数据更加准确且科学,为未来预测海 平面上升提供了依据。

除此之外,海平面上升也与一些规律的地球物 理变化有关,在研究海平面变化不仅要研究时间序 列的季节性规律更要结合海平面变化的实际规律, 所以提取与海平面变化的相关变化之间的影响信 息,比传统的时间序列分析方法更具有细节性。

本文研究 1991—2000 年全球平均海平面的时间序列,对其进行局部均值分解得到 2 个 PF 分量 和余量。2 个 PF 分量中, *PF*₁表示含有噪声的高频分 量, *PF*₂表示含有一定物理意义的低频分量, *u_k*表示 全球平均海平面的变化趋势分量,如图 1 所示。



针对局部均值分解的趋势性分量,采用最小 二乘线性拟合得到海平面的上升速率,其拟合的公 式如下。

$$y = Ax + b \tag{21}$$

式中, A 表示海平面上升速率; b 表示均值。 其拟合结果如图 2 所示。



全球平均海平面的稳定上升趋势项为 u_k,表示 在时间尺度上匀速上升的海平面变化趋势,主要是 由于环境的稳定性变化而导致的持续性上升现象。 对趋势项进行线性估计,剔除高频分量的影响,利 用最小二乘法对含有趋势信息的余量进行线性估 计,得到1991—2000年全球平均海平面上升的速 率为3.6 mm/a。

*PF*₂表示含有一定物理意义的低频分量,通常 与地球物理现象有关,如南北极冰川、冰盖融化, 海水受热增温膨胀及陆地水储量变化等。距平是指 时间序列中的值与其平均值的差,正距平表示高于 平均值,负距平表示低于平均值,时间序列的平均 值为零。对时间序列进行距平处理,是研究地球物 理时间序列的常用数据处理方式。

对 *PF*₂ 进行距平处理,再进行连续小波变换, 得到连续小波谱,如图 3 所示。在图谱中,黑色细 实线为小波边界效应影响锥,黑色粗实线内的部分 表示通过置信水平为 95%的红噪声检验。图谱中的 颜色表示连续小波变换系数,右侧为对应的色标¹¹⁸。

从图 3 可以看出, *PF*₂ 距平存在 14~53 m 的主 周期, 且在 1991 年 7 月至 1998 年 5 月具有显著周 期特征。同理, 再对 ONI 指数进行距平处理, 再进



图 3 1991-2000 年 PF2 距平的连续小波变换图

行连续小波变换,得到其小波功率谱,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,ONI 指数距平在 1991 年 3 月至 1999 年 10 月存在 11~53 m 的主周期,且具有显著周期特征。

接着分析 PF, 距平与 ONI 指数距平的关系,反 映全球平均海平面变化和 ENSO 的关系。通过各自 的连续小波,通过交叉小波方法得到交叉小波能量 谱和交叉小波凝聚谱,反映两种时间序列在高能量 区和低能量区的相关性。PF2距平与 ONI 指数距平 的交叉小波能量谱,如图5所示。图谱中"←"表 示 PF_2 距平和 ONI 指数呈负相关关系, "→"表示 呈正相关关系,"↓"表示超前于 ONI 指数 1/4 个 周期,"↑"表示落后于 ONI 指数 1/4 个周期^[19]。 图中箭头的角度相差30°,表示时间相差一个月。 且两者间的相关系数通过图谱的颜色表示,颜色偏 红表示两者相关性高,偏蓝色表示相关性低。从图 5 中可以看出, 交叉小波能量谱显示了 PF, 距平和 ONI 指数的共同高能量区有两个显著周期。第一个 周期为 1993 年 12 月至 1995 年 1 月的 8~12 m, 位相差表明距平落后于 ONI 指数一个月。第二个周 期为1992年5月至1998年8月的12~53m。



交叉小波功率谱虽然有较强的信号分辨及耦合 能力,但对于解析时频域中两个时间序列的共同特 征及共同低能量区还存在不足。为了弥补这一缺 陷,交叉小波凝聚谱可度量两者在低能量区的相关 性,揭示时频空间两个时间序列低能量区的相关 性。在这些共同低能量区域有较强的能量共振,如 图6所示。

从图 6 中可以看出,交叉小波凝聚谱显示了 PF₂距平和 ONI 指数的共同低能量区有 4 个显著周



期。第一个周期为 1991 年 5—7 月的 2.6~3.7 m, 位相差表明 PF₂距平超前于 ONI 指数 1~2 个月。 第二个周期为1999 年 4—9 月的 0~4 m, 位相差表 明 PF₂距平落后于ONI 指数 1~3 个月。第三个周 期为 1996 年 12 月至 1998 年 8 月的 12~21 m, 位 相差表明 PF₂距平超前于 ONI 指数 1~1.5 个月。 第四个周期为 1997 年 6—11 月的 27~29 m, 位相 差表明 PF₂距平与 ONI 指数正相关。在这些周期尺 度上,交叉小波凝聚谱相关系数达到 0.6 以上,说 明PF₂距平与 ONI 指数具有较好的相关关系。采用 交叉小波能量谱和凝聚谱对两个时间序列间相关 性分析是有效的,并且能反映出两个时间序列间 在时域和频域上的相关关系随变化的细部特征和共 振位相差异。

本文研究全球平均海平面变化和 ONI 指数的多 尺度特征,不仅反映了全球平均海平面整体变化的 速率,而且反映了其变化与其 ENSO 的关系。厄尔 尼诺事件会导致海平面升高,拉尼娜事件会导致海 平面降低,研究全球平均海平面与 ENSO 的关系对 多尺度变化具有实际意义。

5 结 论

利用结合局部均值分解和交叉小波原理的分析 方法研究全球平均海平面变化和 ONI 指数的多尺度 特征,根据本文研究的结果,得到以下研究结论。

(1) 1991—2000 年全球平均海平面上升的速率 为 3.6 mm/a。

(2) *PF*₂ 距平存在 14~53 m 的主振荡周期,且
 在 1991 年 7 月至 1998 年 5 月通过了红噪声检验,
 具有显著周期特征。

(3) ONI 指数距平在 1991 年 3 月至 1999 年 10月存在 11~53 m 的主振荡周期,通过了红噪声检验,具有显著周期特征。

(4) *PF*₂距平和 ONI 指数距平的交叉小波能量 谱,第一个周期说明全球平均海平面变化落后于 ENSO 事件的变化一个月。ONI 指数距平显示在 1991 年 5 月至 1992 年 6 月发生了拉尼娜事件,说 明发生拉尼娜事件的周期性变化后全球平均海平面 变化在其后一个月也发生了周期性的变化。第二个 周期体现在 1995 年前为全球平均海平面变化落后 于 ENSO 事件,在 1995 年后主要体现为全球平均 海平面变化超前于 ENSO 事件。

(5) *PF*₂距平值和 ONI 指数距平的交叉小波凝 聚谱,第一个周期说明全球平均海平面变化超前于 ENSO 事件的变化 1~2个月;第二个周期说明全球 平均海平面变化落后于 ENSO 事件的变化 1~3个 月;第三个周期说明全球平均海平面变化超前于 ENSO 事件的变化 1~1.5个月;第四个周期说明全 球平均海平面变化超前于 ENSO 事件的变化呈现正 相关。

参考文献:

- TIMILSENA J, PIECHOTA T, TOOTLE G, et al. Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term Colorado River Basin stream flow[J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4): 289–301.
- [2] PHILANDER S G, HILANDER S G. EI Niño Southern Oscillation phenomena[J]. Nature, 1983, 302: 295–301.
- [3] 李艳芳, 左军成, 李娟, 等. 热带太平洋海面风的年际变化对海平面变化的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(12): 1-7.
- [4] 程炳岩,孙卫国,王记芳.热带海表温度及北大西洋涛动与 ENSO 事件的相关分析[J]. 气象科技, 2005, 4: 318-323.

[5] F	E斌、马志鹏、	刘晋.	等. 东江流域降水时空变化及其与 ENSO 事件的响应关系[]].	水电能源科学,	2021.	39(1): 6	5-9.
-------	---------	-----	-----------------------------------	---------	-------	----------	------

- [6] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [7] 郭渠,孙卫国,程炳岩,等.我国西北地区气候变化与北极涛动的交叉小波分析[J].南京气象学院学报,2008,31(6): 811-818.
- [8] 王登. ENSO 影响中国东部秋季降水的年代际变化[D]. 南京:南京信息工程大学, 2019.
- [9] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2005, 2(5): 443-454.
- [10] KLIONSKI D M, ORESHKO N, IGEPPENER V V, et al. Applications of empirical mode decomposition for processing nonstationary signal[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2008, 18(3): 390–399.
- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hibert spectrum for non linear and non-stationary time series analysis[M]. London: Proceedings of the Royal Society of London, 1998.
- [12] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear processes in geophysics, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [13] JUN S. Multi-scale correlation analysis of hydrological time series based on cross wavelet transform[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 22–26.
- [14] BANERJEE S, MITRA M. Application of cross wavelet transform for ECG pattern analysis and classification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 63(2): 326–333.
- [15] ADAMOWSKI J F. River flow forecasting using wavelet and cross-wavelet transform models[J]. Hydrological Processes: AnInternational Journal, 2008, 22(25): 4877–4891.
- [16] 张进. 基于时间-小波能量谱及交叉小波变换的振动信号分析[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [17] ALLEN M R, SMITH L A. Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise[J]. Journal of Climate, 1996, 9(12): 3373–3404.
- [18] 尚海昆,苑津莎,王瑜,等.基于交叉小波变换和相关系数矩阵的局部放电特征提取[J].电工技术学报,2014,29(4): 274-281.
- [19] 张洪波,俞奇骏,陈克宇,等.基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 59-66.

Global Mean Sea Level Change and ONI Index Multiscale Characteristics Based on Local Mean Decomposition and Cross Wavelet

XIONG Lujie¹, WANG Fengwei², ZHOU Shijian³, HUAN Changmin¹

(1. School of Surveying and Mapping Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
 2. School of Surveying, Mapping and Geographic Information, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In order to study the correlation analysis between global mean sea level and ENSO, an analysis method combining local mean decomposition method and cross wavelet method is proposed, which can reveal the influence mechanism and causal relationship between global mean sea level and ENSO. The PF component and the margin are obtained by means of local mean decomposition based on the time series of global mean sea level, which represent the high frequency component, low frequency component and trend component of sea level change. The global mean sea level rise rate from 1993 to 2000 is 3.6 mm/a after removing the influence of high frequency component and using the least square method to fit the trend component. Then the low frequency component of PF analyzed separately Morlet transform again and ONI index continuous wavelet transform to get the wavelet power spectrum, then transform of continuous wavelet cross wavelet power spectrum and coagulation spectrum, by cross wavelet power spectrum and cross wavelet power spectrum reflects the common high energy region correlation, the cross wavelet condensation spectrum reflects the common low energy region correlation. The results show that the proposed method can analyze the changes of sea level at multiple scales and the relationship between ONI index and global mean sea level, which provides a powerful tool for the analysis and prediction of global mean sea level evolution.

Key words: local mean decomposition; cross wavelet; sea level change; ONI Index; ENSO; correlation analysis