

对“厄尔尼诺”、“拉尼娜” 发展的新认识^{*}

巢纪平

(国家海洋局海洋环境预报研究中心 北京 100081)

摘要 过去认为厄尔尼诺是起源于赤道东太平洋的暖水事件,近年来的资料分析表明,厄尔尼诺的暖水及拉尼娜的冷水其源头均在热带西太平洋次表层的温跃层附近,在那里加强后沿着气候的温跃层向东、向上传输,到赤道东太平洋表层后形成通常认为的厄尔尼诺或拉尼娜事件。当厄尔尼诺的暖水沿赤道向东传输时,在赤道东太平洋的冷水同时向北传输到北纬 10° 附近北赤道洋流所在的位置,并向西传输,在西太平洋向南传到暖池,形成一次拉尼娜的冷水源头。即在热带太平洋的次表层海洋中存在冷暖水相间的一个运动环路,使厄尔尼诺和拉尼娜事件相间出现。

关键词 厄尔尼诺/拉尼娜, 热带西太平洋暖池, 温跃层



1 历史的回顾

在太阳辐射、地球自转和海陆分布诸多因子控制下,热带太平洋(也包括大西洋)大气低层盛吹东风(即通称的信风),一般来讲,表层海水的流动在相

当程度受风应力的驱动,因而在太平洋赤道及其南北附近两侧,洋流是向西流动的,称为南、北赤道流。向西流动的洋流使在赤道西边界表层堆积大量海水,在太阳辐射等过程作用下,其表层形成大量暖的海水,由于质量连续性要求,暖的表层海水要沿着边界下沉,这样使热带西边界次表层以上形成一个暖水团,这就是通常称的“暖池”。

另一方面,在偏东的信风作用下,在赤道东太平洋表层海水是离岸流动的,也由于质量连续性要求,次表层的冷水要上翻到海表,使表层形成冷水,进而在信风作用下,沿赤道向西的洋流在地球转动而产生的柯利奥来力作用下,将引导出向两极方向的流动,同样也是质量连续性要求,次表层的冷水也要上翻到表层,并与赤道东太平洋的冷水连成一片,形成一舌状的分布,即形成通称的赤道东太平洋的冷舌水团。热带西太平洋的暖池和东太平洋的冷舌,这一东西向非常强烈的温度对比,是厄尔尼诺和拉尼娜形成的基本气候背景。

在某些年份,由于某些原因,赤道东太平洋 Nino3 区(一般取 $150^{\circ}\text{W} - 90^{\circ}\text{W}$, $4^{\circ}\text{S} - 4^{\circ}\text{N}$) 的平均温度,若比正常的气候值高(低) 0.5°C 以上,并能持续 6 个月以上,就称一次厄尔尼诺(拉尼娜)事件发生。

人们之所以重视对厄尔尼诺/拉尼娜的研究,是

^{*} 收稿日期: 2001 年 10 月 9 日

因为海水的密度和热容量等都要比空气大很多,其温度的升高或降低,通过热量交换过程会使大气环流发生大范围的调整,从而使某些地区的气候发生异常变化,进而影响到人类的社会活动。在这方面中美学者共同用赤道东太平洋的海表温度和全球多个气象参数统计相关后表示,与厄尔尼诺/拉尼娜相联系的海温变化能使大范围的大气环流发生异常变化^[1]。早在 70 年代末,中国气象学家就指出,当厄尔尼诺的暖水事件出现时,可使西太平洋的副热带高压加强而影响东亚汛期降水的分布^[2],以后又有进一步研究^[3],也指出反厄尔尼诺即拉尼娜发生时,可造成西太平洋及南海的台风增多^[4],吴国雄等进一步研究了为什么在厄尔尼诺期间西太平洋台风减少而拉尼娜期间台风增多的大气环流条件^[5]。

由此有两方面的问题需研究,一是厄尔尼诺/拉尼娜为什么会形成、发展;另一个问题是,通过什么过程影响到全球气候变化。后一个问题称为遥相关问题。已有研究表明,厄尔尼诺/拉尼娜对中国气候异常影响的规律,要比对热带地区和美洲地区的影响规律复杂得多,这是因为中国处在东亚季风区,影响气候变化的因子很多,各因子之间又存在相互作用的过程。在此不讨论厄尔尼诺/拉尼娜影响中国气候的遥相关问题,但上述早期的工作指出,影响是存在的^[6,7]。本文着重讨论近几年来我们对厄尔尼诺/拉尼娜形成、发展的新认识。

60 年代以来从气象学和海洋学方面对厄尔尼诺/拉尼娜的研究都有相当的成绩。观测方面,在 80 年代初,根据历史上观测到的厄尔尼诺把它们综合成一个形成和发展阶段的模型^[4],指出了在不同发展阶段海表温度场和低空气象场的特征。值得注意的主要有两点:一是距平(偏离气候平均值)的海表正的温度,首先在赤道东太平洋美洲沿岸附近出现,然后沿着赤道及两侧向西扩展,有时可达日界线附近,形成一个大范围的舌状分布的暖海温区,若这种海表温度的分布持续 6 个月以上,即形成了一次厄尔尼诺事件。厄尔尼诺的出现频率一般是 3—4 年,也有长到 7 年和短到 2 年的;二是热带太平洋上的低空,一般盛吹偏东的信风,但在厄

尔尼诺期间,信风减弱出现距平意义下的西风,甚至逆转改吹西风。这表明发生在海洋中的厄尔尼诺,在大气中也有反映。事实上早在 60 年代 Bjerknes J. 就指出^[8],厄尔尼诺和 30 年代发现的热带印度洋到太平洋出现的南方涛动现象(指赤道东印度洋和热带东南太平洋之间海平面气压场呈反相的变化趋势)有着密切的关系,实际上是一种地球物理现象分别在海洋和大气中的表现,或者说,厄尔尼诺和南方涛动,是一类大尺度的海气相互作用现象,从而把这两个现象合起来简称为 ENSO。

在理论研究方面,根据以上观测,Wyrtki K. 提出了厄尔尼诺发展的信风张弛理论^[9]。一个初始出现时海表温度正距平是如何增强到厄尔尼诺所需的强度,在这方面 Philander S. G. H. 等提出了海气相互作用的不稳定理论^[10],数值计算表明,通过海气之间相互作用的正反馈过程,可以使海温距平增长,同时在扰动区的东侧可以激发出向东传播的 Kelvin 波,西侧可以激发出向西的 Rossby 波,这样使增长着的海温扰动向东西两侧扩展。关于在一个海气耦合系统中,在一定条件下大气和海洋的物理状态可同时随时间增长,这个问题早在 70 年代末中国学者就已经提出来了^[11],海气耦合波不稳定性的解析解中国学者在 80 年代中期也有过研究^[12]。在厄尔尼诺发展中还有一个现象需在理论上给以解释,即为什么它们每过 3—4 年会发生一次。早期中国学者提出在海气耦合系统中如果考虑海洋的混合层和温跃层(及以下)的过程,则不稳定自由模的振荡周期可长到 3—4 年^[13]。由于这个理论是在经圈平均下提出的,因此它不能反映波动过程在厄尔尼诺发展中的调节作用。80 年代末提出的时滞振荡子理论在一定程度上解释了当时已取得的观测现象^[14]。这个理论认为热带西太平洋的海面高度,中太平洋的西风 and 东太平洋的海表温度,它们之间组成一个相互有关连的系统,西太平洋海面高度扰动可激发出向东传播的 Kelvin 波,它到达东太平洋后使那里的海表温度发生变化,而东太平洋暖的海表温度又将导致中太平洋西风加强,并在西风加强区的西侧激发出向西传播的 Rossby 波,这个波到达西太平洋边界附近后,又使那里的海平面发

生变化。考虑了这些过程相互响应的时滞时间后,完成这一个循环大致上需 3—4 年。自 80 年代中期开始了为期 10 年的研究 ENSO 的 TOGA(热带海洋和全球大气)国际计划,在这 10 年中,国内外发表了大量的各种海气耦合的数值试验模式以及数值预测模式,这众多的工作可参阅最近的综合报告^[15]。

2 新的观测事实的挑战

80 年代以前一直认为厄尔尼诺的暖的海表温度信号首先出现在南美洲秘鲁沿岸,然后正的海表距平温度向北发展到赤道两侧,再沿赤道向西扩展。然而 1982/1983 年的厄尔尼诺事件,其初始的海表温度正距平首先出现在赤道中太平洋,然后向东扩展到东海岸,形成一次有观测记录以来的最强的一次厄尔尼诺事件。当时不少人认为这只是一次例外事件。1995 年开始为支持国际 TOGA 计划,中国国家海洋局及广大的海洋和气象学家与美国国家海洋大气管理总局及广大的海洋和气象学家联合开展了 6 年“热带西太平洋海气相互作用研究”,除在赤道 165°E 施放锚定浮标外,每年还进行考察船走航,对多种水文量进行观测。观测资料表明,1986/1987 年的厄尔尼诺事件的初始正距平海温也是先在西太平洋出现,并在温跃层深度有所反映,表明了厄尔尼诺的初始海温距平首先在西太平洋出现不是偶然的现象。10 年 TOGA 计划最重要的成绩是在热带太平洋布放了一系列浮标并加上其它的海洋和气象要素观测,组成一个简称为 TAO 的观测阵列,这样有可能对厄尔尼诺/拉尼娜的发生、发展和消亡的生命史做出更全面的观测。

就在 TAO 观测阵列初步建成和完善后,1997 年发生了 20 世纪最强的一次厄尔尼诺事件。国内外的科学家对资料分析后都表明^[16,17],初始的海表温度距平最早是在暖池出现的,然后 SST 距平连同西风距平不断向东传播,并在传播过程中加强,特别是 20°C 等温线也向东传播并加深。由此可见,过去是由于热带西太平洋海洋观测资料太稀少,且资料质量也差,影响了对厄尔尼诺事件全貌的认识。

3 暖池和赤道东印度洋在厄尔尼诺/拉尼娜发展中的作用

巢清尘和巢纪平分析了从 1955—1998 年 44 年热带西太平洋次表层海温距平资料后指出^[18],在此期间共发生 11 次厄尔尼诺事件,这些事件的初始海温正距平除 1994 年那次稍偏东外,其它都在“暖池”次表层 120 米温跃层附近生成,发展到一定强度,到西太平洋出现异常的持续西风距平后,暖的海温距平沿着气候的温跃层向东向海表传播,经过 1 年左右,传播到赤道东太平洋海表的 Nino3 海域,形成通常认为的厄尔尼诺事件(那里的温跃层深度不到 40 米,实际上即为海表温度)。图中给出沿赤道各次厄尔尼诺的温度距平的时间-经度变化,可以清楚地看到它们沿温跃层从暖池向东太平洋表层的演变过程。需要注意的是,图中给出的温度既不是通常的海表温度,也不是某一指定深度面上的温度,它是温跃层面上的温度,而温跃层的深度在各点是不同的。

进一步分析 1960—1999 年的 850 百帕风场指出,在热带西太平洋西风距平爆发前,赤道东印度洋已经有距平西风持续维持了两年左右(西南季风),然后距平西风快速地向东发展产生热带西太平洋的距平西风,或真正的强西风,致使西太平洋出现厄尔尼诺爆发不可缺少的条件之一,在这 40 年中,这一过程对所有的厄尔尼诺事件无一例外(图略)。

同样的分析方法也用到这 44 年中的拉尼娜事件。冷的海温距平也都首先在“暖池”的次表层形成,然后沿着温跃层向东向表层传播(见图),并在热带西太平洋出现东风异常前,印度洋也早已是持续的东风(图略)。

这一分析结果无疑改变了过去认为厄尔尼诺/拉尼娜发生的源地是在赤道东太平洋的看法,它们的源头事实上是在西太平洋暖池的次表层温跃层附近,在那里形成后,在一定的大气条件下(西风或距平西风),温度距平沿着温跃层传到东太平洋来

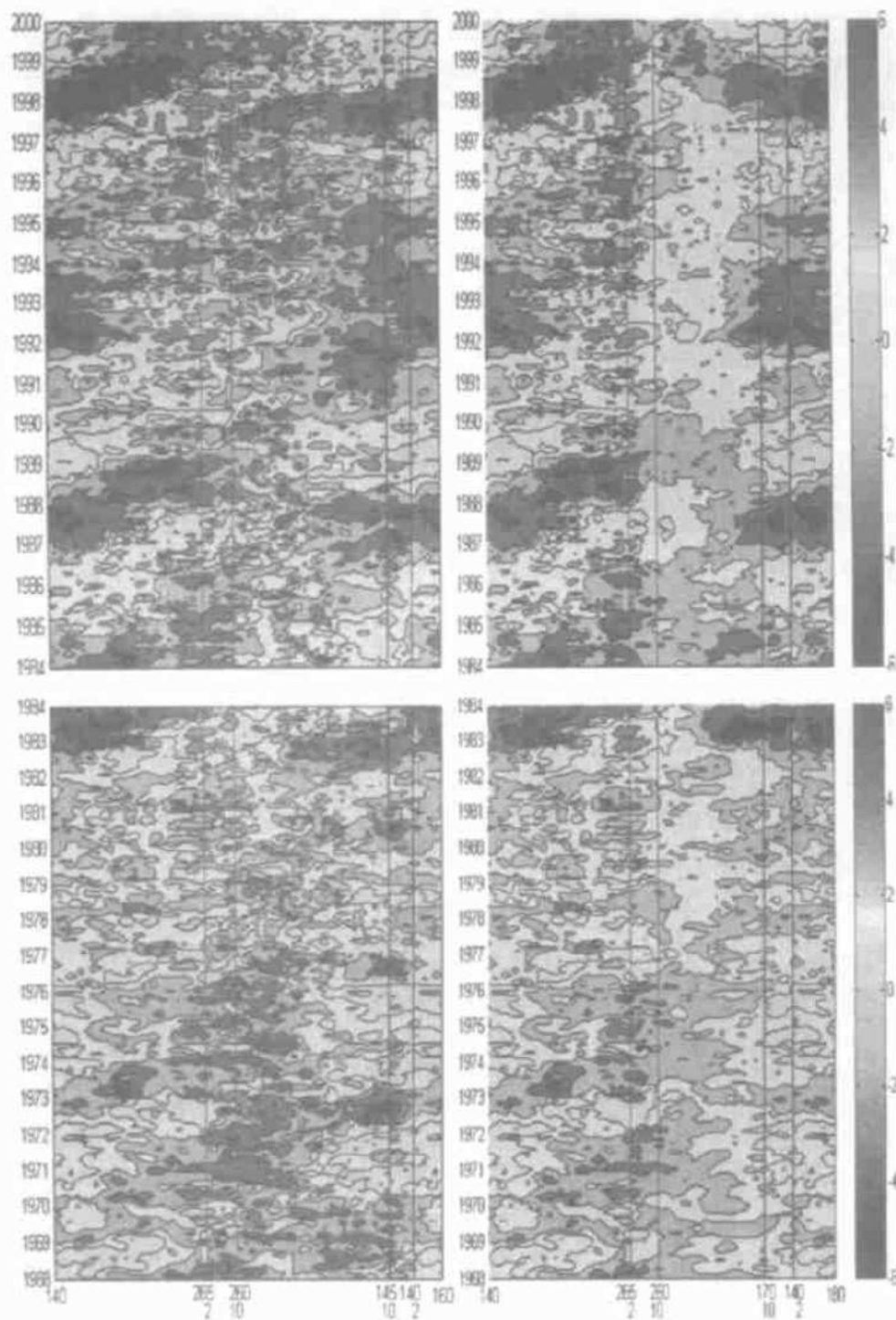


图 厄尔尼诺/拉尼娜演变过程

4 厄尔尼诺和拉尼娜的循环

那么,形成厄尔尼诺的暖池次表层暖水是从那里来的,它东传到赤道东太平洋后又到那里去了?同样的问题也适用于拉尼娜。而一般来讲,一次厄尔尼诺过程完结后,会紧跟一次拉尼娜过程,这两者之间有无联系以及什么样的联系,这样的问题单从海表问题的变化是分析不出的,但如果在温跃层面上来分析,就有迹可寻。先以 1997/1998 年的厄尔尼诺为例。

分析 1994—1998 年温跃层曲面上温度距平的演变,我们发现: 1997/1998 年厄尔尼诺产生时,在热带西太平洋暖池次表层(120 米附近)的温度正距平,是从 1994/1995 年厄尔尼诺在 Nino3 区的最大正距平信号传播或演变过来的。开始该温度正距平在 5°S — 15°S 之间(接近气候上南赤道洋流的位置)逐渐西传,最大正距平信号到达暖池后沿赤道转向东传,1997 年 9 月到达 Nino3 区,一次新的厄尔尼诺发生。当正的温度距平开始从暖池向东传播时,与此同时,一个温度负距平信号在 Nino3 区出现,并伴随赤道最大正距平信号的东传,在其北部(5°N — 10°N)向西传,于 1997 年 9—10 月之间到达暖池附近,随之转向并东传,到 1998 年底,最大负距平信号到达 Nino3 区,一次新的拉尼娜发生。而厄尔尼诺时期的温度正距平信号在拉尼娜发生前已随之转向,在最大负距平信号的北部向西传向暖池。整个最大正距平

的。由于东太平洋温跃层很浅,已接近海表,所以在没有次表层浮标或其它观测手段的情况下,似乎厄尔尼诺/拉尼娜的源地是在美洲海岸附近。以后由于西风加强,通过垂直混合及涌升流减弱,使离开东海岸以西的赤道海域,温跃层强的海温距平上升到海表,于是看上去海表温度距平是由东向西发展的。

整个最大正距平

信号的传播形成一似 8 的形状。分析表明, 1997/1998 年这次完整的厄尔尼诺/拉尼娜事件主要在热带流系的温跃层附近形成并传播的。对其它几次强厄尔尼诺/拉尼娜事件的分析, 水团也出现类似的运动“轨迹”, 其分析结果见图。

先对图的构造作一说明。70 年代以来(包括 1969/1970 年)总共发生了 8 次厄尔尼诺事件和 7 次拉尼娜事件, 图中给出了厄尔尼诺/拉尼娜的演变过程, 该图是在距平最大值曲面(可近似地看成是温跃层曲面)上得到的结果, 每幅图的横坐标均分为 5 部分, 对于左边两幅图, 第一部分为沿赤道从东经 140° 向东到西经 95° , 第二部分为沿西经 95° 从北纬 2° 向北到北纬 10° , 第三部分为沿北纬 10° 从西经 100° 向西到东经 145° , 第四部分为沿东经 140° 从北纬 10° 向南到赤道, 即这是赤道以北的环路。对于右边的图, 第一部分相同, 第二部分在西经 95° 转向南, 从南纬 2° 到南纬 10° , 第三部分沿南纬 10° , 从西经 100° 向西到东经 170° , 第四部分沿 $(165, 10)$, $(160, 8)$, $(155, 6)$, $(150, 4)$, $(145, 2)$, $((m, n), m$ 为经度, n 为南纬 n 度) 返回赤道, 之所以这样选择是由于东经 140° 往南是岛区, 并没有数据, 因此, 选择这条返回的路线, 第五部分是沿赤道从东经 140° 到 180° , 构成闭合的回路, 图的纵坐标则为时间, 这样从该图上就可以看出厄尔尼诺/拉尼娜的演变过程。

图中总的来看, 基本上每次厄尔尼诺或拉尼娜爆发之前, 海温正、负距平信号总是伴随对方的出现而出现, 或是温跃层面上当负距平信号沿赤道向东传播时, 正距平信号在北部 10°N 附近向西传播, 或是当正距平信号沿赤道向东传播时, 负距平信号在 10°N 而向西传播, 同时在热带太平洋海盆东西边界附近, 从赤道北传到 10°N 附近, 或者在西边界附近从 10°N 附近南传到赤道。这样厄尔尼诺事件和拉尼娜事件构成一个环路, 并交替出现。当然各次循环所需的时间可以各不相同, 平均来说在 3—4 年左右。有的年份, 这种循环过程虽然存在, 但正的海温距平强度较弱, 或负的海温距平强度较弱, 达不到厄尔尼诺或拉尼娜所需要的温度距平强度, 即厄尔尼诺或拉尼娜“夭折”。这种情况的出现, 经常是因为大气环流条件不支持, 厄尔尼诺“夭折”往

往是缺乏强的西风持续支持, 拉尼娜的“夭折”往往是没有强的东风支持。资料表明, 在大多数情况下, 这样的环路多数发生在赤道以北。

从图上可以看出厄尔尼诺/拉尼娜的演变有下面明显的共同特征:

(1) 暖池不仅是暖水或冷水运动的必经之地, 而且也是暖水或冷水积聚的场所(1994/1995 年和 1982/1983 年的厄尔尼诺除外)。(2) 除 1991/1992 年和 1994/1995 年两次厄尔尼诺之间没有发生拉尼娜以外, 其余每次厄尔尼诺均紧跟一次拉尼娜。正、负距平信号的传播或运动规律如前述。(3) 海温距平信号沿南半球环路的传播或运动不如北半球环路清楚, 显然是受大洋西部岛屿的影响。

5 结论

文中提出一个分析厄尔尼诺/拉尼娜的新方法, 指出在热带太平洋强的海温距平都发生在次表层温跃层附近, 也可以认为强的海温距平, 是温跃层的深度抬升或下降偏离了它的气候平均状态所致。运用该方法分析资料结果表明, 与传统的观念不同, 几乎所有的厄尔尼诺/拉尼娜的海温正/负距平, 都起源于暖池的次表层温跃层附近, 然后在一定合适的大气条件(西风距平/东风距平)下, 在赤道沿着气候的温跃层向东、向上传播, 到赤道东太平洋传到海洋表层, 形成传统观点认为的厄尔尼诺/拉尼娜事件。同时资料分析也表明, 正、负海温距平将在赤道以北形成一个环路传播, 而正、负海温距平是在不同的纬度上沿着相反的方向, 这样造成厄尔尼诺和拉尼娜交替出现, 一般的时间间隔为 3—4 年。

这些资料分析所得与传统观念不同的事实出现后, 必然要对已有的厄尔尼诺/拉尼娜的发生、发展理论进行慎重的审视, 并建立起更符合观测的新的理论框架和数值预测厄尔尼诺/拉尼娜发生、发展的模式。

参考文献

- 1 潘怡航, Oort A. Mon. Wea. Rev., 1983, 111: 1 244.

- 2 中国科学院地理研究所长期预报组. 科学通报, 1977, 313.
- 3 黄荣辉等. Adv. Atmos. Sci., 1989, 6: 21.
- 4 潘怡航. 科学通报, 1980, 987.
- 5 吴国雄等. Mon. Wea. Rev., 1992, 126: 958.
- 6 黄荣辉等. Adv. Atmos. Soc., 1989, 6: 21.
- 7 张人禾等. J. Meteor. Soc. Japan, 1996, 74: 49.
- 8 Bjerknes J. Mon. Wea. Rev., 1969, 97: 163.
- 9 Wyrki K. J. Phys. Oceanor., 1975, 5: 572.
- 10 Philander S G H et al. J. Atmos. Sci., 1984, 41: 604.
- 11 季劲钧, 巢纪平. 气象学报, 1979, 37: 32.
- 12 巢纪平, 张人禾. Acta. Meteor. Sci., 1988, 2: 275.
- 13 季劲钧. 中国科学, 1981, (10): 1 248.
- 14 Suarez M J et al. J. Atmos. Sci., 1988, 45: 3 283.
- 15 Neelin J P et al. J. Geophys. Res., 1998, 103: 14 261.
- 16 McPhaden M J. Science, 1999, 283: 950.
- 17 李崇银等. 大气科学, 1999, 23: 513.
- 18 巢清尘, 巢纪平. 自然科学进展, 2001, (11).

New Understanding of the Development of El Nino and La Nina Events

Chao Jiping

(National Research Center for Marine Environment Forecasts,
State Oceanic Administration, 100081 Beijing)

In past years it is believed that El Nino comes from warm water events of equator east Pacific Ocean. But in recent years, we find that the sources of El Nino Warm water and La Nina cold water are both near the the thermocline of warm pool of Tropical West Pacific. After they get stronger, they propagate to east along the thermocline. When they arrive the surface of equator east pacific, and they become so- called El Nino and La Nina. On the other hand, when the warm water of El Nino goes east along the equator, the cold water of equator east pacific goes north to northern latitude 10, near the northern equator ocean current, and propagate to west, finally arrive the subsurface of warm pool, and become the source of cold water of La Nina. So we get the conclusion that there is a movement circle of cold and warm water in the sub- surface in Tropical Pacific. Then El Nino and La Nina alternately appear.

巢纪平 中国科学院院士, 国家海洋局海洋环境预报研究中心研究员, 名誉主任; 国家海洋局局长科学顾问。海洋学报主编, 南京大学、南京气象学院、中山大学兼职教授。1932 年出生于江苏无锡。1954 年毕业于南京大学气象系。曾任中国科学院地理研究所、大气物理研究所气候研究室主任。长期从事动力气象、动力气候、动力海洋、海气相互作用, 生态和环境相互作用的动力学研究。曾发表学术论文 130 余篇, 中英文专著 3 部。