

Characteristics of Tropical Cyclone Landfall in Ningbo: Climatological Statistics and Decadal Variability

Yanjie Wu^{1,2}, Fei Huang^{1,2,3}, Shibin Xu^{1,2}

¹Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Key Laboratory of Ocean-Atmospheric Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Email: huangf@mail.ouc.edu.cn

Received: Apr. 7th, 2016; accepted: Apr. 26th, 2016; published: Apr. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the Best Track Dataset from China Meteorological Administration during 1949-2014, there were 71 tropical cyclones (TCs) during the period landfall in Ningbo. According to composited analysis and t-test, the area which TC genesis with strong east-wind and the location of westerlies play an important role in TC moving. During the autumn season (September and October) of global warming hiatus epoch after the mid-to-end of 1990s, the TC number of moving to Ningbo was increased significantly. The reason may be associated with the Pacific decadal oscillation became into its negative phase. Since the sea surface temperature showing a La Nina-like pattern, which enhanced Walker Circulation and further modulated western Pacific subtropical high (WPSH), the WPSH extended westward and intensified, causing TC moving favorite to western region and favorite landing at Chinese mainland. The genesis of TC over the western North Pacific also appears interdecadal shift indicated by genesis potential index of TC. The decreasing of vertical wind shear and increasing of relative humidity play a dominant role in TC genesis increasing.

Keywords

Tropical Cyclones, Landfall at Ningbo, WPSH, Decadal Variability, Walker Circulation, GPI

入境宁波的热带气旋活动特征的气候统计及其年代际变化

吴彦洁^{1,2}, 黄菲^{1,2,3}, 许士斌^{1,2}

¹中国海洋大学物理海洋实验室, 山东 青岛

²中国海洋大学山东省高校海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 山东 青岛

³宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波

Email: huangf@mail.ouc.edu.cn

收稿日期: 2016年4月7日; 录用日期: 2016年4月26日; 发布日期: 2016年4月29日

摘要

本文利用中国气象局热带气旋(TC)资料中心最佳路径数据集,对入境宁波的TC进行统计,从1949到2014年共有71个TC入境宁波,通过合成分析和显著性检验发现:TC源地强东风引导气流的存在和西风带的南北位置是影响TC路径的重要原因。在1990s中后期以来的全球变暖减缓阶段,入境宁波的TC频数在9~10月份显著增多。1990s中后期之后,整个太平洋海表面温度(SST)呈现出太平洋年代际涛动(PDO)的负位相和赤道太平洋的类拉尼娜型海温分布,Walker环流增强,调制了西太副高的加强和西伸,使得西北太平洋TC移动路径偏西,登陆我国海岸线中段的TC频数增多,造成了在9~10月份入境宁波的TC频数增多。就TC生成而言,1990s年代中期之后西北太平洋TC源地西部垂直风切变的减弱和相对湿度的增加可能造成了TC生成的增加,而较东位置则与之相反。

关键词

热带气旋, 入境宁波, 西太副高, 年代际变化, Walker环流, 潜在生成指数

1. 引言

热带西北太平洋是全球热带气旋(TC)活动最频繁的区域之一,占全球总数的33% [1] [2]。我国海岸线绵长,TC是影响我国东部沿岸及近海的主要灾害性天气系统,热带气旋能带来大风和暴雨,对沿海城市人民的社会生活生产以及经济带来重要影响。宁波市位于我国海岸线中段,地处浙江省东部是中国副省级城市,浙江第二大城市,浙江省三大经济中心之一。宁波市两面沿海,北接杭州湾,东临象山港。TC是对宁波市破坏性最强的气象灾害之一[3],因此研究入境宁波的TC对经济生产生活有着重要意义。

李英等[4]对登陆我国的热带气旋进行了详细的特征统计,石蓉蓉等[5]对影响浙江省的热带气旋进行了灾害评估。但目前还没有研究着眼于对宁波这类小范围区域入境的TC研究工作。

近几十年来在全球变暖的大背景下,全球平均气温在上世纪90年代中后期出现了增暖减缓或停滞的现象[6]。在这种年代际变化的大背景下,入境宁波的TC活动会发生什么样的变化?

基于对入境宁波TC的基础统计,进一步对入境宁波的TC年代际变化进行分析,研究在近十几年全球变暖和全球变暖停滞前后,入境宁波TC的年代际变化及造成年代际变化的大尺度海洋-大气气候原因。

2. 资料与方法

根据中国气象局热带气旋资料中心最佳路径数据集,采用了1949年~2014年的热带气旋资料。为了

找出合理的预报因子, 采用了 NCEP/NCAR 日平均位势高度场和风场再分析数据、月平均相对湿度、风场再分析资料, 数据分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 以及月平均海温数据, 数据分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。

本文定义影响宁波的 TC 为进入宁波行政区域及其周边的一个 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 格点范围($120^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$, $28^{\circ} \sim 31^{\circ} \text{N}$)。此类热带气旋中心位置离宁波很近或者中心进入宁波境内, 对宁波的天气影响较大。

在使用副热带高压(以下称副高)来表征合成环流场时, 参考文献资料[7] [8]采用了副高西伸指数(即采用了副高最西位置点的经度值, 本文中分析副高基于 500 hPa 位势高度场的 588 线)和平均脊线(即为副高脊线位置的纬度)。

对于 TC 生成时间统一以 TC 达到热带低压等级即风速大于 12 m/s 时为 TC 生成时刻, TC 的生成位置为 TC 达到热带低压等级时所处经纬度。

西北太平洋的 TC 活动主要发生在每年的 5~11 月, 即台风季节, 在对入境宁波 TC 的路径分类研究中, 根据东亚环流的过渡和变化将台风季节划分为三个时间段: 初夏(5、6 月), 盛夏(7、8 月), 秋季(9、10、11 月), 将非台风季节的五个月份分为两个季节: 冬季(12、1、2 月), 春季(3、4 月)。

在大尺度背景环流分析中, 根据黄嘉佑[9]提出的合成场显著性检验, 采用了 T 检验来判别合成场的显著性, 并且根据陈广才和谢平[10]的传统 F 检验法检验合成要素差值场的显著性。

为了研究大气环境对 TC 生成的影响, 采用了 GPI 指数[11], 这个指数是由 TC 活动依赖的四项大尺度环境因素(绝对涡度、700 hPa 相对湿度、潜在强度[12]、垂直风切变)计算得到的。

3. 入境宁波 TC 的特征统计

3.1. 入境宁波 TC 的个数

从 1949 年至 2014 年, 入境宁波区域的热带气旋共有 71 个, 年均 1.08 个。其中八月是 TC 入境宁波最多的季节, 共有 28 个 TC, 达到总数的三分之一, 其次是七月和九月, 这三个月的入境总和占全年入境宁波 TC 数目的三分之二。入境宁波 TC 的生成时间从五月到十一月, 最早出现中心位置到达宁波的 TC 是在 2006 年 5 月 8 日生成的, 最迟是在 1972 年的 11 月 2 日生成的。

3.2. 入境宁波 TC 的路径特征

为了研究入境宁波 TC 的路径特征, 将入境宁波的 TC 分为五类路径: 1、西北行登陆; 2、未登陆在宁波附近海域转向; 3、登陆后在陆地转向; 4、从华南登陆后转向由宁波一带入海; 5、异常路径(如蛇形、折线型等, 此类在环流合成分析中不予考虑)。在四种正常路径中(图 1), 路径 3 数目偏多, 达到 26 个, 路径 2 数目较少只有 3 个, 路径 1 和路径 4 均有 12 个。通过统计结果发现, 路径 1 和路径 2 的 TC 均生成于盛夏季节, 路径 3 主要分布在盛夏, 初夏和秋季有少数存在, 路径 4 主要存在于初夏和秋季, 盛夏仅存在 2 例。

3.3. 入境宁波 TC 的强度

对于 TC 强度的统计分类参见《热带气旋等级》国家标准, 影响宁波时 TC 强度从热带低压到强台风, 目前没有出现在宁波影响区域内为超强台风等级的 TC。影响宁波时为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风的 TC 个数分别为 18、14、16、13、1。从五月开始有 TC 影响宁波, 直到十一月份结束台风季节(图 2)。在初夏登陆宁波的 TC 强度较弱, 之后逐渐加强, 到盛夏强度与数目均为峰值。入境宁波的 TC 中, 共有 10 个在生命史中达到超强台风等级, 16 个达到强台风等级, 达到台风等级的占总数的三分之一, 弱于台风等级的少于总数三分之一, 共 19 个。唯一一个入境宁波强度为强台风等级的 TC 出现在七月。

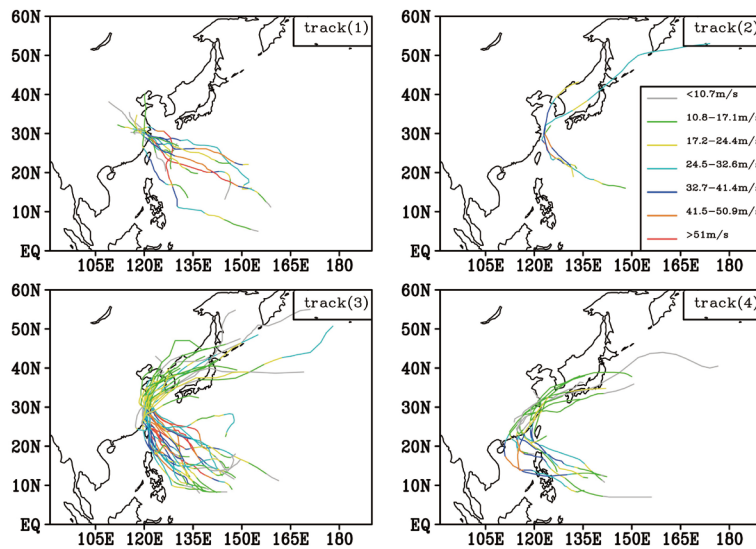


Figure 1. Four types of TC influence on Ningbo

图 1. 影响宁波的 TC 的四种正常路径

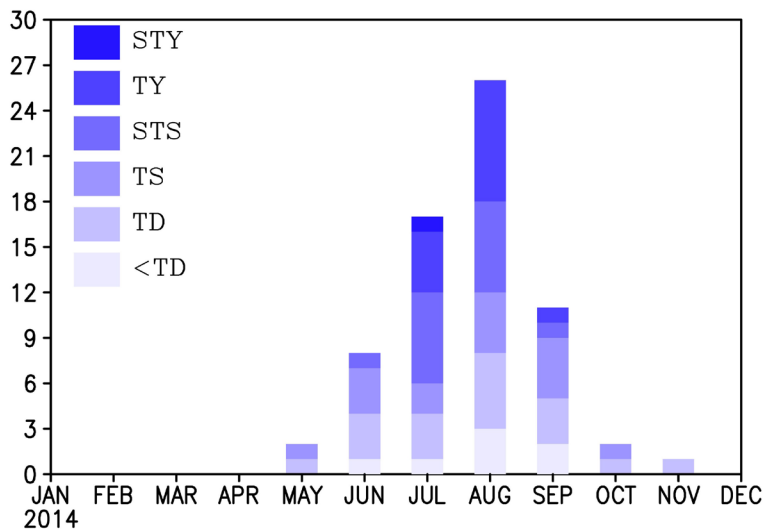


Figure 2. Monthly distribution of Ningbo TCs in different intensity

图 2. 入境宁波不同强度 TC 各月柱状分布图

3.4. 入境宁波 TC 的生成位置

入境宁波的 TC 大部分在西北太平洋菲律宾以东海域生成，少数在南海海域生成。通过图 3 可以看出 TC 生成位置有着西北 - 东南走向倾斜，并且随着季节变化南北向移动，在初夏和秋季，生成 TC 位置偏南，而到了盛夏，生成 TC 位置偏北，这可能与季风槽的移动有关[13]。但从 TC 生成位置与移动路径来看，没有明显的规律性。

4. 不同路径入境宁波 TC 的环流分析

根据最佳路径数据集的 TC 存在日期记录，来分析影响不同路径 TC 的实时背景环流。以下分为三种路径进行分析研究：西北行路径；在宁波附近转弯型路径(即路径 2 和路径 3 的合成)；从华南登陆后转向由宁波出海型路径。

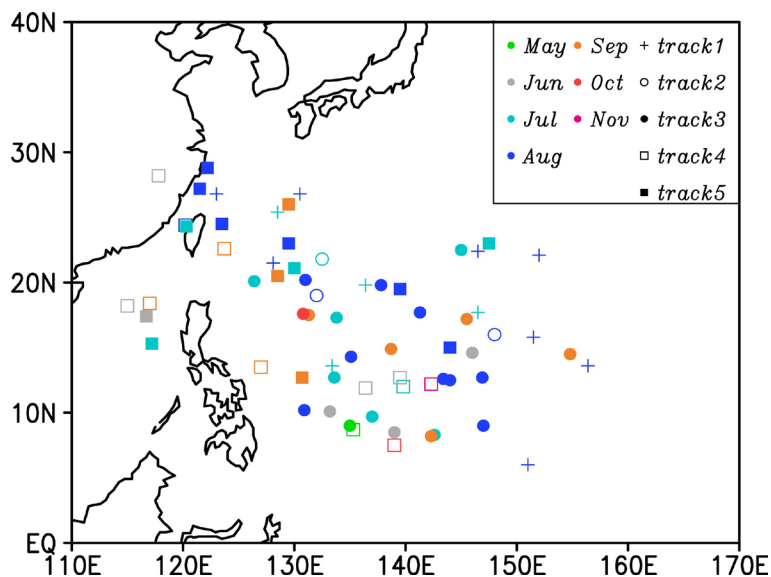


Figure 3. The genesis location of Ningbo TCs

图 3. 入境宁波 TC 生成位置落点

4.1. 西北行路径

西北行路径 TC 仅生成在盛夏。从图 4 中看出：在 500 hPa 位势高度场上，相对于气候平均，副高位置偏西，西伸指数为 148°E，副高势力弱，副高西侧西北向引导气流强。在合成风场上，过显著性检验的风矢量一直从 20°N 左右一直延伸到渤海(35°N 以北)才转向偏北，且中纬度西风气流存在于 40°N 以北，距离 TC 路径较远，不利于 TC 的转向，所以 TC 以西北行路径登陆我国海岸线中段。由于此类 TC 在登陆宁波之前没有经过转向和登陆，登陆前在洋面移动距离长，吸收了充分的水汽和热量，发展过程长，登陆时强度强，给登陆地附近造成较大的自然灾害，对社会经济、人民生活影响较大。

4.2. 在宁波附近转弯路径

由于路径 2 和路径 3 的 TC 环流合成类似，生成活动时间类似，且路径 2 统计得出个数较少，所以合并成一类路径进行分析。

根据图 5(a)发现，三个季节的副高都较气候态位置偏北，有利于 TC 的北上。在初夏，副高位置偏南，平均脊线在 25°N 附近，对比路径 1 环流场，副高偏西，西伸脊点在 125°E。TC 生成后移动至东南沿海，在 30°~40°N 一带有强的西风气流，促使 TC 在 30°N 附近转向。盛夏(图 5(b))是此路径出现最多的季节，占总数的 3/5。500 hPa 上副高位置较初夏偏北，平均脊线移动至 30°N，西伸脊点在 130°E，略微东移，但与西北行路径的副高脊线位置相差了 18 个经度，位置明显偏西，且副高范围明显偏大。从风场上看，低纬西北向引导气流较强，中纬度西风带北移至 40°N 左右，在 30°N 附近的沿海陆地的反气旋环流与引导气流的汇合处位于 30°N 附近，TC 极易在此处转向。在秋季风场过显著性检验的区域较小，但 TC 转向的关键区风场通过了显著性检验(图 5(c))。从位势高度场来看，500 hPa 副高位置较盛夏偏南，较初夏偏北，但范围比前两个季节都小，西伸脊点与盛夏基本一致，在 30°N 近岸地区东南气流转为西南气流，这也许是 TC 在宁波附近转向的原因。

4.3. 在宁波附近出海路径

在宁波附近出海的 TC 是在我国华南一带登陆后再转向，此类 TC 占入境宁波 TC 总数的 1/5，此类

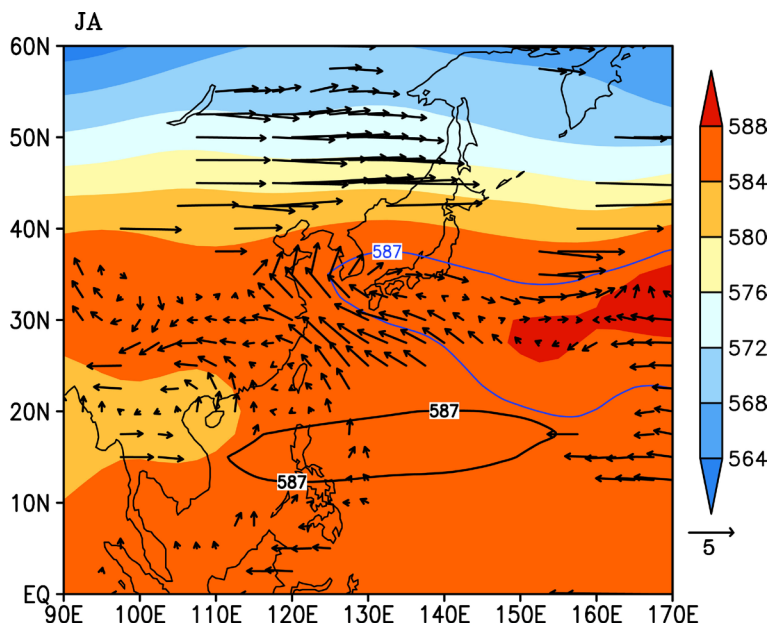


Figure 4. Composed geopotential height and wind for west-northward typhoon track (wind have passed 95% t-test, the blue line is composed-hgt587 and the black line is climatology-hgt587, the same as following pictures)

图 4. 西北行路径合成位势高度场和风场(风场通过了 95% 的显著性检验, 蓝色等值线为合成场 587 线, 黑色等值线为气候平均 587 线, 以下同)

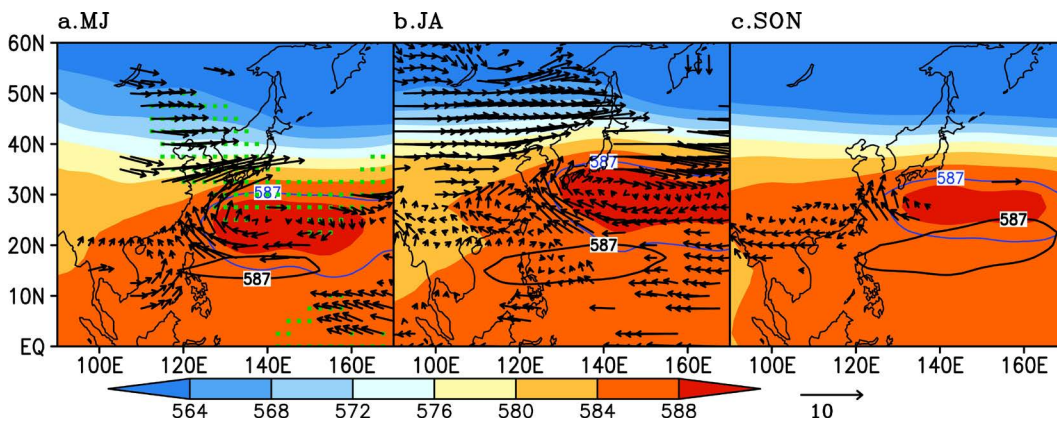


Figure 5. Same as in Figure 4 but for recurring typhoon track near Ningbo (green pot of geopotential height have passed 95% t-test)

图 5. 同图 4, 但是在宁波附近转向型路径的合成(绿色点标记区域的位势高度场通过了 95% 的显著性检验)

路径主要存在于初夏和秋季, 盛夏少有生成。

合成环流(图 6(a))显示: 500 hPa 副高位置偏西, 西伸脊点在 125°E, 副高偏南, 平均脊线在 20°N, 较在宁波附近转向型 TC 的副高偏南。从合成风场中看出, 在 TC 生成源地上空, 有强的东风气流, 使得 TC 西行移动, 到了南海后, 转成偏南风, 引导 TC 在我国华南一带登陆。在 30°~40°N 地区的西风有一定的偏南分量, 这使得 TC 不能再登陆后继续北上。在盛夏(图 6(b)), 500 hPa 副高位置偏西, 西伸脊点达到 120°E, 在西北太平洋 TC 源地有强东风, 引导 TC 移向南海, 在南海转为南风, 使得 TC 在华南登陆, 中纬度西风有偏南分量且西风气流位置偏南, 促使 TC 在 30°N 附近入海。到了秋季(图 6(c)), 副高较前两个季节偏西偏南, 在 TC 生成源地有较强东风气流, 南海上空有南风, 在 30°N 附近有较强西风。但对比前期风场

和位势高度场均不显著，这说明在秋季，可能还有其他因素影响着 TC 的移动，这点值得后续研究。

5. 入境宁波 TC 的年代际变化

5.1. 全球变暖减缓前后 TC 频数的季节性差异

基于前人研究[6]，将 1979 年之后分为两个阶段：1979~1997(P1)和 1998~2014(P2)。由于卫星资料在 1979 年后才出现，对于 TC 的观测更准确，因此 1979 年之前的 TC 数据有可能出现缺漏。从图 7 中可以看出，入境宁波的 TC 频数在 8 月最多，在其前后逐渐减少，大体上呈现出高斯准正态分布的特征。在 P1 阶段，入境宁波的 TC 最多出现在七、八月份，略呈偏态分布，入境宁波的台风时间偏早，主要在六、七月份比多年平均偏多，而在 8 月之后则相比于多年平均出现偏少。而在全球变暖减缓停滞的 P2 阶段，入境宁波数目异常偏多，而盛夏入境宁波的 TC 频数分布呈显著的偏态分布，最大值出现在 9 月，且峰度系数下降，特别是春夏之交的 4~6 月和秋季的 9~10 月，即春、秋过渡季节入境宁波的 TC 均比多年平均异常偏多，而盛夏季节的 7~8 月则异常偏少，这说明宁波地区的台风季节向春季和秋季扩张。五月、九月、十月入境宁波的 TC 频数显著增多，通过了 95% 的置信度检验，尤其是九月份入境宁波的台风频数达到了峰值，远远多于气候平均值。春季频数的变化，可能与东亚夏季风爆发的年代际变化有关[14]，而秋季为什么登陆影响宁波的 TC 大幅度增加？下文将重点研究其可能的原因。

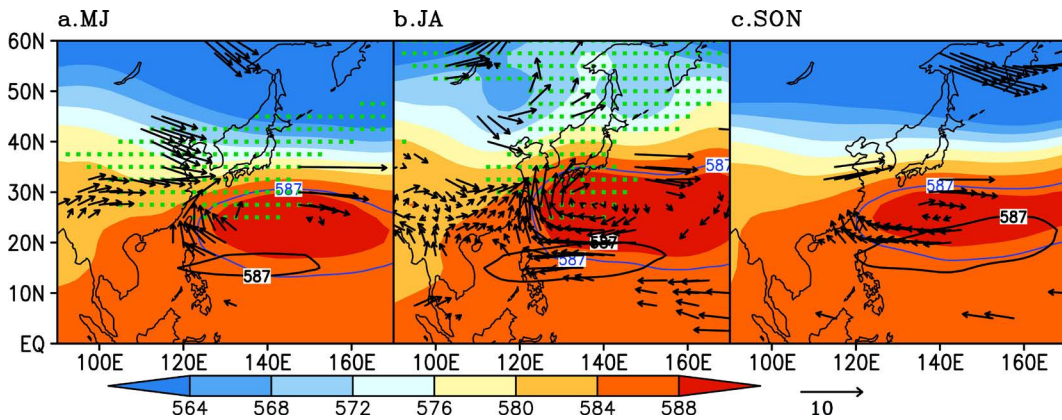


Figure 6. Same as in Figure 4 but for shift to sea track near Ningbo

图 6. 同图 4，但指在宁波附近入海型路径的合成场

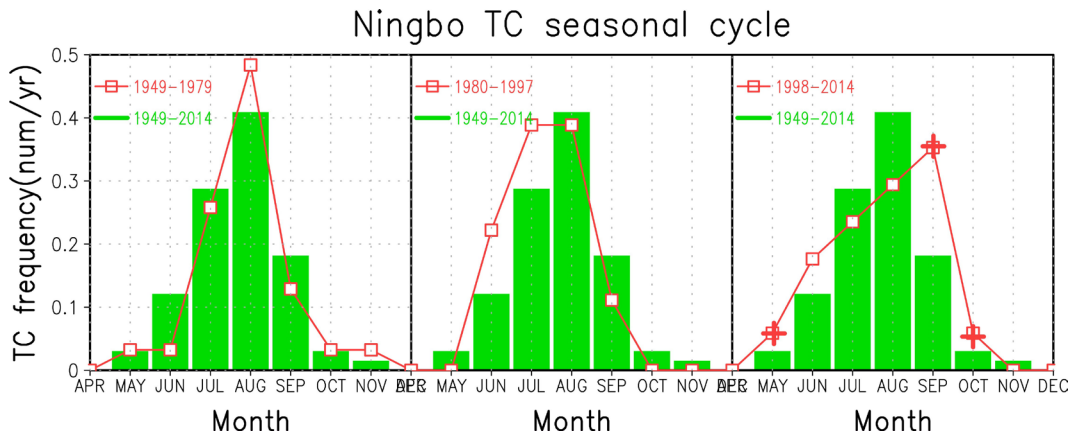


Figure 7. Seasonal cycle of Ningbo TCs frequency in TC season between three decadal (red cross have passed 95% f-test)

图 7. 台风季节三个年代段宁波 TC 频数季节变化曲线(红色十字标记是通过 95%置信度检验的月份)

5.2. TC 生成位置和路径的年代际变化

由于南海 TC 活动的季节变化与西北太平洋海域不同,且九、十月份(SO)没有南海 TC 入境宁波,所以仅分析西北太平洋海域的 TC 活动。下面将通过对比 P1 和 P2 两个年代段在西北太平洋 TC 的生成位置和路径来研究入境宁波 TC 频数在 P2 阶段增多(图 7)的原因。我们发现:1998 年后西北太平洋 TC 在 SO 生成的位置较为偏西,165°E 以东范围较少有 TC 生成,生成范围由 120°E~170°E 变为 120°E~160°E(图 8)。且从移动路径上来看(图 8),整体 TC 路径偏西,160°E 以东少有 TC 活动,转向型路径 TC 活动范围偏西,这使得我国海岸线中段在 SO 月份仍有较多的 TC 入境。而 TC 的生成纬度均在 5°~20°N 之间。通过以上分析,得出:在 1998 年后 SO 西北太平洋 TC 生成位置偏西以及活动路径偏西是造成入境宁波 TC 频数增多的原因。

6. 海洋 - 大气大尺度背景环流的年代际差异

6.1. 海表面温度(SST)

为了研究西北太平洋 SO 月份 TC 活动整体位置偏西的原因,对 P1 和 P2 两个年代段的海温差值场进行分析。从图 9 中可以看出:整个太平洋呈现出太平洋年代际涛动(PDO)负位相的分布特征[15],热带太平洋则呈现出 La Nina-Like 的分布特征,东太平洋和中太平洋偏冷,西太平洋温度偏高,且较大区域通过了 95%的显著性检验。根据前人文献[16],在 PDO 负位相阶段,会使得西北太平洋 TC 个数偏多,135°E 以西生成 TC 偏多。

6.2. 西太平洋副热带高压及引导气流

从图 10(a)和图 10(b)来看,通常定义的副高区域(588 线)没有明显的西伸,但是通过副高指数的计算,P1 段(图 10(a))的西伸脊点为 140°E,而 P2 段(图 10(b))的西伸脊点为 137°E,通过了 95%的显著性检验。且 587 线的表现更为明显,P2 阶段 587 线西伸进入了东亚大陆范围,且西伸区域显著。这一结论与 Zhou

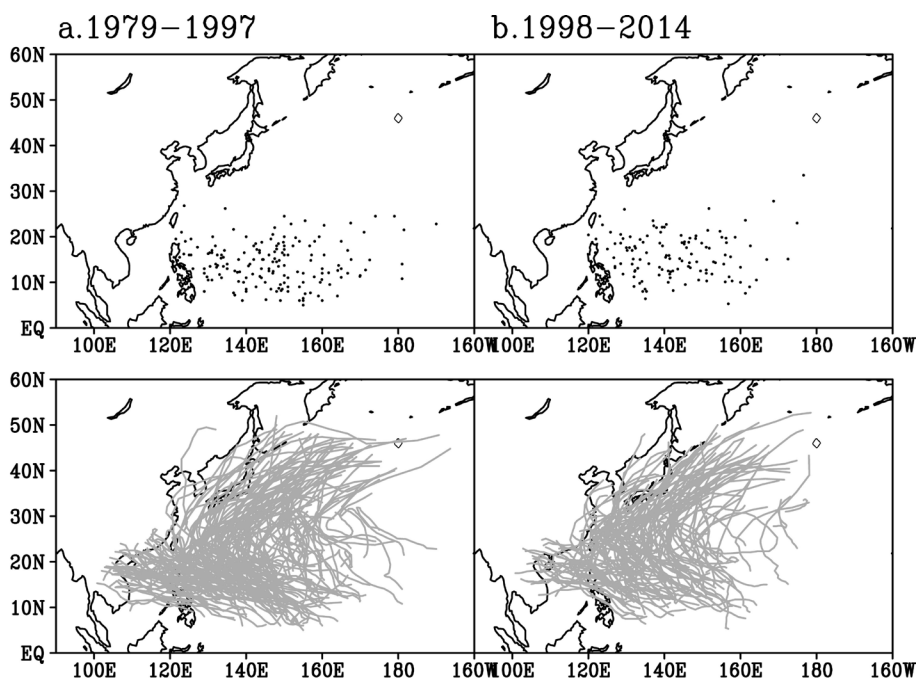


Figure 8. WNP TCs genesis location and track in P1 and P2 period

图 8. P1 和 P2 阶段西北太平洋 TC 生成位置及其路径

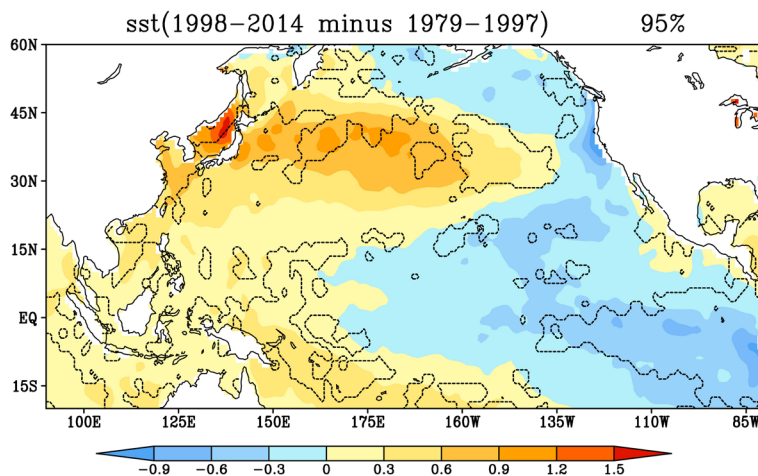


Figure 9. Difference of SST between two decadal epochs in Sep and Oct (black dashes line have passed 95% f-test)

图 9. P1 和 P2 段 SO 月份 SST 差值场(黑色虚线区域表示通过了 95% 的显著性检验)

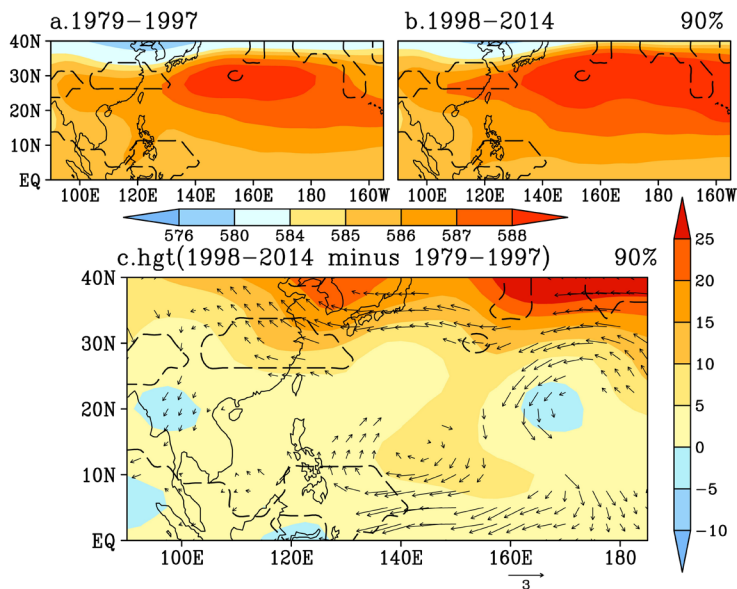


Figure 10. SO 500-hPa geopotential height and difference of geopotential height and wind between two decadal epochs (black dashes line have passed 90% f-test)

图 10. P1 和 P2 阶段 SO 月份的 500 hPa 位势高度场及差值场和风场差值场(黑色虚线为通过 90% 显著性检验的区域)

等[17]的研究结论相符，Walker 环流的加强会促使西太副高西伸。西太副高的位置与 TC 移动路径相关，西伸的西太副高引导 TC 沿着副高边缘移动，使得 TC 移动偏西。且依据气候统计特征发现，在 SO 月份入境宁波的 TC 均为转向型，则副高的西伸程度影响了 TC 的转向位置。副高西伸入内陆，则 TC 易在我国陆地或沿岸转向。

由于 P1 和 P2 的风场分布大体一致，所以只给出了风场差值场(图 10(c))。在 TC 生成源地范围内，没有明显的风场异常，当 TC 在源地生成后，在引导气流作用下向西北移动。到了中纬度地区，异常东风的存在使得 TC 更易移向我国沿海，在我国登陆。

6.3. 沃克(Walker)环流

Walker 环流[18]是热带太平洋海气相互作用的重要大气环流。1998 年后西太平洋增暖，东太平洋变冷，热带太平洋纬向 SST 梯度变大，Walker 环流增强。在 Dong 和 Lu [19]的研究中，有与此一致的结论。由于 Walker 环流的上升支在 160°E 左右，通过分析秋季 P1 和 P2 垂直速度差值的经度 - 高度剖面图(图 11)发现：在 1998 年后，在 160°E 上升支附近上升运动显著增强。Walker 环流上升支从低层到高层均有加强，而在 100°W 附近的下沉支仅有低层下沉加强。

根据前人研究[17]，副高西伸可能有诸多原因。可能是中、东太平洋的变冷和赤道西太平洋变暖影响了 Walker 环流，随后减弱了热带中、东太平洋的对流，在这之后强迫一个 ENSO/Gill 型响应去调制西太副高，促使西太平洋副热带高压西伸；也可能副高对印太暖池的增暖的响应；也可能是季风绝热加热机制[20]在副高的西伸过程中扮演二次强迫的作用。

6.4. 台风潜在生成指数 GPI

在 1998 年后，西太 TC 的生成位置较为偏西，在前人研究[21] [22]中指出，在年际和年代际尺度上，大气环流的因素对 TC 生成的影响比 SST 重要。从图 12 看出：TC 主要生成在 5°~20°N，120°~170°E 范围，在 15°附近有一生成中心，这一中心位置在 P2 阶段有扩大并西移。

差值场(图 12(c))上这种分布表现的更为明显，150°E 以西 GPI 为正异常，150°E 以东 GPI 为负异常，这说明在 1998 年后大尺度环境因素的改变使得西北太平洋 TC 生成向西移动。

GPI 指数有四个影响因素[11]：绝对涡度、700 hPa 相对湿度、潜在强度以及垂直风切变。将两个阶段的以上四项因素合成对比发现，700 hPa 相对湿度和垂直风切变在年代际变化上与 GPI 变化类似，这两者可能是导致 TC 生成偏西的环境因素。从图 13 可以看出，GPI 正异常区域内，垂直风切变减少，相对湿度增加；而在 GPI 负异常区域，垂直风切变是增加，相对湿度减小。这与垂直风切变和相对湿度在 TC 生

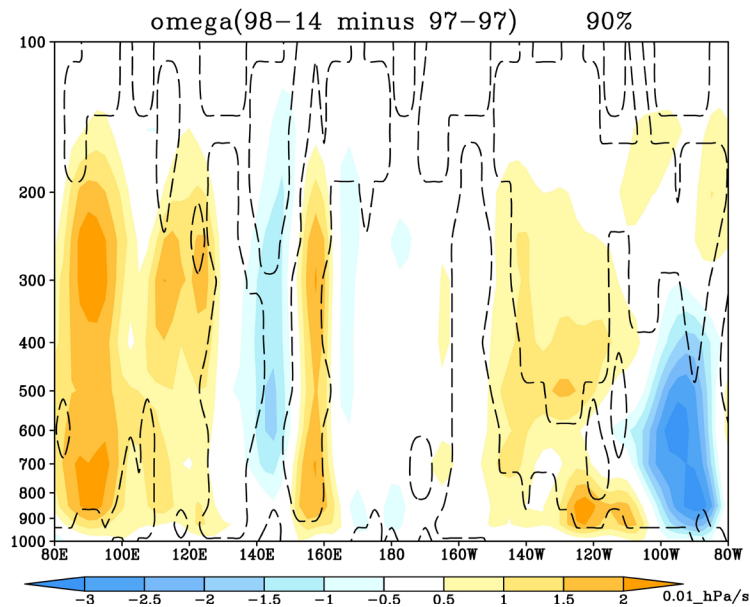


Figure 11. SO zonal-height with 5°S-5°N vertical velocity difference between two decadal epochs (black dashes line have passed 90% f-test)

图 11. P1 和 P2 阶段 SO 月份沃克环流及热带地区(5°S-5°N)垂直速度差值的经度 - 高度剖面图(图中黑色虚线表示通过了 90%的显著性检验)

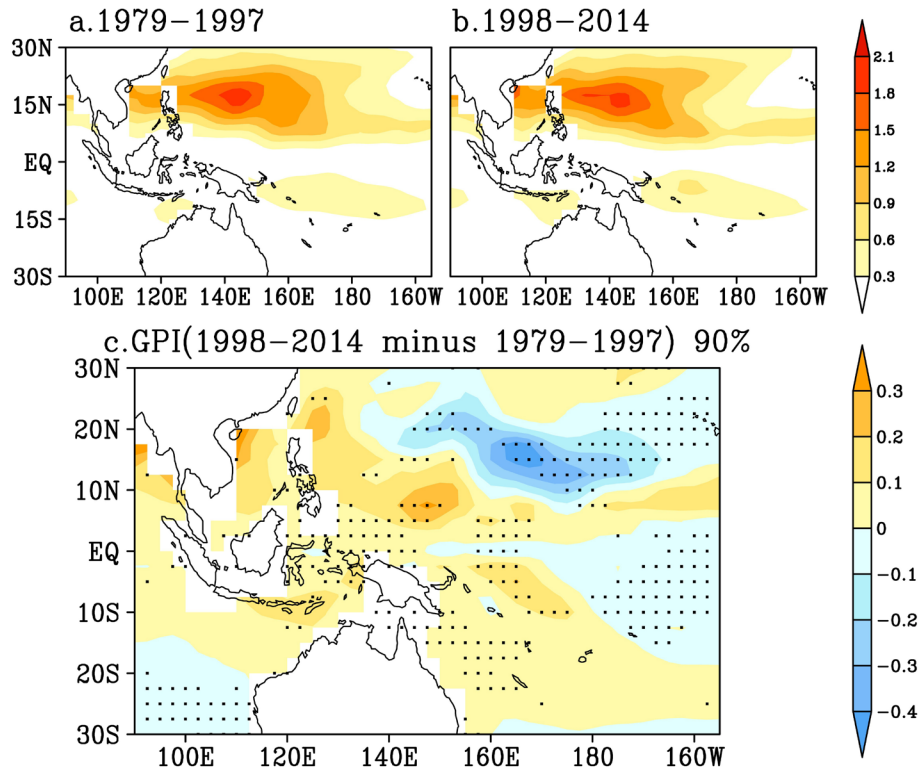


Figure 12. GPI and difference in two decadal epochs in Sep and Oct (black pot have passed f-test of 90%, the same as following picture)
图 12. P1 和 P2 阶段在 SO 月份 GPI 指数及其差值场(黑点为过 90%置信度检验, 以下同)

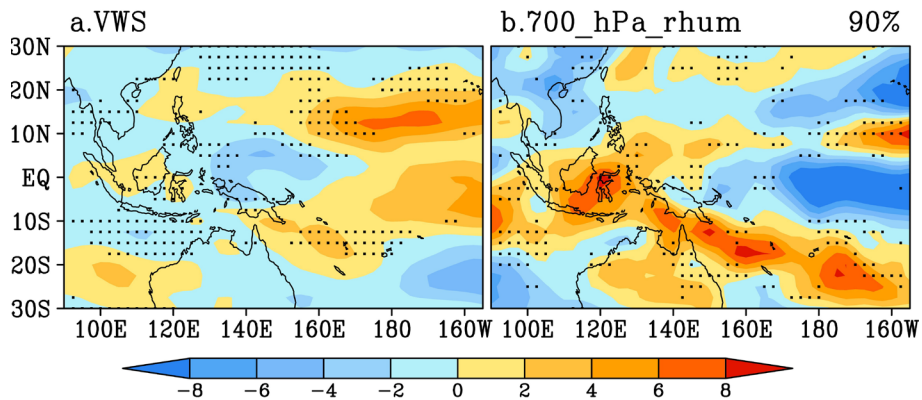


Figure 13. The D-value of Vertical Wind Shear and 700 hPa relative humidity between two decadal epochs
图 13. P1 和 P2 阶段的 VWS 和 700 hPa 相对湿度差值场

成发展过程中的作用相符。弱的垂直风切变和大的相对湿度有利于 TC 生成和发展。

综上可知, 在 SO 月份西北太平洋 TC 路径生成位置受到副高和大尺度环境因素的影响而西移, 造成了在 SO 月份入境宁波 TC 频数的增多。

7. 结论

1) 入境宁波的 TC 在 66 年间共有 71 个, 影响宁波时为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风的 TC 个数分别为 18、14、16、13、1。共有 10 个在生命史中达到超强台风等级, 16 个达到强台

风等级, 达到台风等级的占总数的三分之一, 弱于台风等级的少于总数三分之一, 共 19 个。

2) 从四类正常路径来分析, 除了 TC 生成源地有强的东风气流, 使得 TC 生成后移向我国, 另外, 中纬度西风带的位置也是 TC 入境宁波的重要因素。

3) 1990 s 中期后全球变暖停滞, 西北太平洋 TC 生成位置和移动路径均较之前偏西。通过分析 SST 发现, 整个太平洋呈现出 PDO 负位相的分布特征, 热带太平洋则呈现出 La Nina-Like 的分布特征, 东太平洋和中太平洋偏冷, 西北太平洋温度偏高。1990 s 中期后, SST 的异常分布可能导致 Walker 环流加强, Walker 环流的变化调制西太副高, 使得西太副高西伸, 从而影响了西北太平洋 TC 活动整体偏西。

4) 通过对 GPI 的分析发现: TC 生成源地西部垂直风切变的减弱和相对湿度的增加有利于 TC 生成位置偏西。

基金项目

全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2012CB955604, 2015CB953904)和国家自然科学基金项目(41575067)。

参考文献 (References)

- [1] Gray, W.M. (1968) Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms. *Monthly Weather Review*, **96**, 669-700. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096<0669:GVOTOO>2.0.CO;2)
- [2] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 北京科学出版社, 1979: 109.
- [3] 刘爱民. 宁波气候和气候变化[M]. 气象出版社, 2009: 135-179.
- [4] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 14-23.
- [5] 石蓉蓉, 雷媛, 王东法, 等. 1949-2007 年影响浙江热带气旋灾情分析及评估研究[J]. 科技通报, 2008, 24(5): 612-616.
- [6] Kosaka, Y. and Xie, S. (2013) Recent Global-Warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling. *Nature*, **501**, 403-407. <http://dx.doi.org/10.1038/nature12534>
- [7] Lu, R.Y. (2004) Indices of Summertime Western North Pacific Subtropical High. *Advance in Atmospheric Sciences*, **19**, 1004-1028.
- [8] 刘芸芸, 李维京, 艾税秀, 等. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 2012, 23(4): 414-423.
- [9] 黄嘉佑. 气象水文统计分析中显著性检验的应用[C]//中国气象学会. 推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会年会论文集: 2004 年(下册). 2004.
- [10] 陈广才, 谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法[J]. 水文, 2006, 26(2): 57-60.
- [11] Emanuel, K. and Nolan, D.S. (2004) Tropical Cyclone Activity and Global Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**.
- [12] Emanuel, K.A. (1992) The Dependence of Hurricane Intensity on Climate. In: *The World at Risk: Natural Hazards and Climate Change*, **277**, 25-33. <http://dx.doi.org/10.1063/1.43909>
- [13] 吕心艳, 端义宏. 季风槽内热带气旋生成的基本特征分析[C]//中国气象学会. 海峡两岸气象科学技术交流研讨会论文集: 2011 年卷. 2011: 990-1000.
- [14] Xu, S. and Wang, B. (2013) Enhanced Western North Pacific Tropical Cyclone Activity in May in Recent Years. *Climate Dynamics*, **42**, 2555-2563. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1921-7>
- [15] Stewart, I.T., Cayan, D.R. and Dettinger, M.D. (2005) Changes toward Earlier Streamflow Timing across Western North America. *Journal of Climate*, **18**, 1136-1155. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3321.1>
- [16] He, P.C. (2011) Effect of PDO on the Relationships between Large Scale Circulation and Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific. *Journal of the Meteorological Sciences*, **31**, 266-273.
- [17] Zhou, T.J., Yu, R.C., Zhang, J., et al. (2009) Why the Western Pacific Subtropical High Has Extended Westward since the Late 1970s. *Journal of Climate*, **22**, 2199-2215. <http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2527.1>
- [18] Bjerknes, J.A.B. (2009) Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, **97**, 163-

172. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2)

- [19] Dong, B.W. and Lu, R.Y. (2013) Interdecadal Enhancement of the Walker Circulation over the Tropical Pacific in the Late 1990s. *Advance in Atmospheric Sciences*, **2**, 247-262. <http://dx.doi.org/10.1007/s00376-012-2069-9>
- [20] Chan, J.C.L. (2010) Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, **13**, 2960-2972. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2960:TCAOTW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2960:TCAOTW>2.0.CO;2)
- [21] Rodwell, M.J. and Hoskins, B.J. (1996) Monsoons and the Dynamics of Deserts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **122**, 1385-1404. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49712253408>
- [22] Matsuura, T., Yumoto, M. and Iizuka, S. (2003) A Mechanism of Interdecadal Variability of Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific. *Climate Dynamics*, **21**, 105-117. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49712253408>