## 西北太平洋热带气旋极端事件对比分析

### 王照华, 吴克俭, 赵栋梁

(中国海洋大学海洋与大气学院,山东青岛 266100)

摘 要:本文选取 2004 年和 2017 年西北太平洋生成的热带气旋开展研究,两个年份的热带气旋数量和 登陆数量基本一致,但登陆地点分别集中在华东、华南两个不同位置,且气旋累积能量相差极大。对热 带气旋的路径模式、登陆地点、强度及相关环境因素的研究发现,西北太平洋热带气旋活动受区域性海 表面温度异常、厄尔尼诺-南方涛动以及青藏高原积雪异常的影响较强。热带气旋的生成数量在区域 性海表面温度高的海域明显增多,其生成位置的变化又会使路径模式发生改变,最后改变登陆地点和 频率。青藏高原积雪通过积雪面积大小来影响副热带高压的强度和位置,进而影响热带气旋的路径模 式,最终改变登陆地点和频率。由于大陆的阻挡,生成位置远离(靠近)大陆的热带气旋的气旋累积 能量偏高(低),同时偏好弧线型路径模式(寿命长)的热带气旋的气旋累积能量偏高,偏好直线型 路径模式(寿命短)的热带气旋的气旋累积能量偏低。气旋累积能量与热带气旋的生成位置、路径模 式的年际变化有一定的联系。

关键词:热带气旋;路径模式;登陆地点;气旋累积能量 中图分类号:X16 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2024)05-0755-11

# Comparative analysis of extreme events of tropical cyclones in the Northwest Pacific Ocean

WANG Zhaohua, WU Kejian, ZHAO Dongliang

(College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Two tropical cyclone (TC) events generated in the Northwest Pacific (WNP) in 2004 and 2017 were selected to study their track patterns, landfall locations, intensities and related environmental factors. The number of TCs and the number of landfalls were basically the same in these two years, but the landfall locations (east and south China, respectively) and accumulated cyclone energy (ACE) were different. The results showed that the WNP TCs were strongly influenced by regional sea surface temperature (SST) anomalies, El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and snow cover on Qinghai and Tibetan Plateau (QTPSC) anomalies. The number of TCs in the regional high SST areas increased, and the TC track patterns changed with their generation locations, which ultimately alter the landfall locations and frequencies. QTPSC affected the intensity and location of the subtropical high systems through the SC level, which in turn changed their track patterns, landfall locations and frequencies. Due to the blockage of the mainland of China, the ACE of TCs generated far (near) away from the mainland was on the high (low) side. Moreover, TCs with high ACE usually had curved track patterns and longer lifetimes, while TCs with low ACE had flat track patterns and shorter lifetimes. Additionally, ACE was associated with interannual variations of TC generation locations and track patterns. Key words: tropical cyclone; track pattern; landfall location; accumulated cyclone energy

收稿日期:2022-10-08,修订日期:2024-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(42176018,41876010);崂山实验室科技创新项目(LSKJ202202401)

作者简介:王照华(1992-),男,山东东营人,博士,主要研究方向为热带气旋/海浪及其预报,E-mail: zhaohuawangOUC@hotmail.com

热带气旋作为最严重的自然灾害之一,其过 境时及过境后产生的强风、暴雨、潮涌等可以造 成巨大的人员和财产损失<sup>[1-5]</sup>。在全部区域性海 洋中,西北太平洋产生的热带气旋数量最多<sup>[6-8]</sup>。 1950-2018年,每年平均生成热带气旋 28.4个, 1996年最多,有43个,1951年最少,有17个。 中国沿海地区平均每年有9个热带气旋登陆,最 多有15个登陆(1952年、1961年),最少有4个 登陆(1982年),其中绝大部分TC(Tropical cyclone)形成于20°N以南、160°E以西的西太平 洋海域。

全球气候变化以变暖为主要特征<sup>[9]</sup>,在全球 变暖趋势下,西北太平洋生成的热带气旋数量总 体呈现下降趋势,但热带气旋的强度呈增加趋 势,台风强度以上的热带气旋不论是数量还是比 例都呈增加趋势<sup>[10]</sup>。2004年西北太平洋总共生 成了 32 个热带气旋, 而 2010 年则只有 19 个热 带气旋生成,这表明热带气旋的生成数量有强烈 的年际变化[11-12]。每年热带气旋登陆数量和强 度各不相同,这对人民的生活造成很大威胁,特 别是在人口稠密的沿海地区。2013年,超强台 风"海燕"袭击了菲律宾,摧毁了100多万间房 屋,并造成 6300 人死亡; 2014 年,强度堪比"海 燕"的超强台风"黄蜂"和"黑格比"使人们 对于热带气旋极端事件更加关注[13-15]。研究热 带气旋极端事件年份相关环境因子及其对于事 件的响应情况,可以提高热带气旋登陆数量、登 陆地点预报的准确度,这对沿海地区乃至整个国 家的应急响应工作具有重大意义。

本文通过对西北太平洋热带气旋极端事件 年份路径模式、登陆地点、强度的变化数据统 计,选择具有代表性的极端事件年份进行诊断分 析,研究热带气旋登陆地点、强度变化对各环境 因子变化的响应规律,研究结果可为中国近海的 防灾、减灾提供帮助。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域与数据来源

研究区域为西北太平洋地区(0-50°N、105°E-180°E)。热带气旋生成数量、路径数据 来自美国联合台风预警中心的最佳路径数据集 (https://www.metoc.navy.mil/jtwc.html),包含热带 气旋每6h(00:00-18:00)的日期、中心位置(经 度和纬度)、强度(每1min近气旋中心平均最大 风速,单位:Knot)、近中心气压和热带气旋编号 等指标。登陆中国沿海地区的热带气旋数量、 地点数据来自中国气象局热带气旋资料中心 (https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj\_sm.html)。各 环境因子数据使用美国国家海洋与大气管理 局(https://psl.noaa.gov/data)、欧洲中期天气预 报中心(https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ ecmwf-reanalysis-v5)的再分析数据。

#### 1.2 研究案例

选取登陆华东、华南地区数量和强度差异较 大的 2004 年和 2017 年热带气旋事件作为案例, 对比分析两年的各个海洋气象因子,观察各环境 因子对于极端事件的响应。

1.3 气旋累积能量

将 Bell 等<sup>[16-17]</sup> 定义的气旋累积能量作为衡量热带气旋强度的标准。气旋累积能量为强度达到热带风暴(中心最大风速达到 34 kt)以上等级的热带气旋在其保持热带风暴强度以上的时间段内,每6h观测到的中心最大风速平方和的总和,计算公式如下:

$$E = \sum_{i}^{n} v i^2 \tag{1}$$

式中: *E* 为气旋累积能量(kt<sup>2</sup>); *n* 表示在规定 观测时间内大于等于 34 kt 风速热带气旋的观测 总数; *i* 为观测次数; *v* 为观测风速(kt)。

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 极端事件年份气旋概况

1950-2018年,西北太平洋生成的热带气旋 的气旋累积能量年平均值为 3076014 kt<sup>2</sup>,平均每 个热带气旋的气旋累积能量为 108399 kt<sup>2</sup>。总体 来看,2004年与 2017年热带气旋生成数量与登 陆数量基本一致,但是生成位置、时间、气旋累 积能量、路径模式、登陆地点都有较大不同 (图 1)。2004年热带气旋的气旋累积能量共 4823400 kt<sup>2</sup>,平均值为 150731 kt<sup>2</sup>;2017年热带气 旋的气旋累积能量共 1707050 kt<sup>2</sup>,平均值为 51728 kt<sup>2</sup>。2004年热带气旋生成连续性较好, 2月-12月都有热带气旋生成,6月-11月每月 都至少有1个热带气旋登陆中国沿海地区,7月 有两个热带气旋登陆华南地区,其余6个热带气 旋均在华东地区登陆(图1)。台风季开始较早, 从4月台风季开始到11月每月都有台风生成, 全年共生成台风20个。2017年1月-6月断续 地生成了4个热带气旋,6月-10月有9个热带 气旋登陆中国沿海地区,7月有两个热带气旋登 陆华东地区,其余7个热带气旋均在华南地区登 陆(图2)。台风季较2004年向后推迟了3个月, 第一个台风在7月下旬生成,12个台风全部生 成于7月-12月。



(a) 2004 年、2017 年热带气旋生成数量时间分布;(b) 2004 年、2017 年台风及以上强度气旋生成数量时间分布;(c) 2004 年、2017 年热带气旋登陆数量时间分布;(d) 2004 年、2017 年热带气旋登陆华东数量时间分布;(e) 2004 年、2017 年热带气旋登陆华南数量时间分布;

图 1 2004 年、2017 年热带气旋情况

Fig. 1 Tropical cyclones in 2004 and 2017





Fig. 2 Distribution of tropical cyclone paths in 2004 and 2017

2004 年大部分热带气旋都在西北太平洋中 部海域生成,路径沿西北方向移动,在接近中国 沿海地区时转向东北方向移动,即西北-东北弧 线型路径,移动距离偏长(图 2)。全年气旋累积 能量较高,高出年平均值约三分之二,平均寿命 为 8.34 d, 32 个热带气旋中的 31 个达到热带风 暴强度(中心最大风速大于 34 kt)以上,20 个达 到台风强度(中心最大风速大于 64 kt)以上,有 6 个发展成为超强台风(中心最大风速大于 129 kt)。 2017 年大部分热带气旋都在南海海域、西北太 平洋西部靠近菲律宾海域生成,路径偏好沿西北 方向直线移动,移动距离偏短(图 2)。全年的气 旋累积能量较低(图 3),低于年平均值的二分之 一,平均寿命为 5.57 d,33 个热带气旋中的 26 个 达到热带风暴强度(中心最大风速大于 34 kt)以



上,12个达到台风强度(中心最大风速大于64kt) 以上,仅有两个发展成为超强台风(中心最大风 速大于129kt)。



图 3 2004 年、2017 年热带气旋生成位置



#### 2.2 环境因素

2.2.1 厄尔尼诺-南方涛动与西北太平洋海表面温度

在 2004年热带气旋高发的 6月-8月, 140°E以东区域呈现高温异常状态,140°E以西 区域则呈现低温异常状态。2004年全年海表面 温度在 140°E以东呈现高温异常,在 140°E以西 的近岸区域呈现低温异常,在 140°E以东海域内 生成了全年绝大部分的热带气旋(图 3),大多偏 好西北-东北弧线型移动路径模式。2017年 6月-8月,全年海表面温度在 160°E以西区域 呈现高温异常状态,尤其在 140°E 以西区域存在 一个异常高温中心。全年海表面温度在 140°E 以西靠近大陆的区域呈现高温异常,而在厄尔尼 诺-南方涛动区域则呈现低温异常状态,2017年 应该处于厄尔尼诺-南方涛动冷暖位转换阶段,

在 140°E 以西海域内生成了全年绝大部分的热带气旋(图 3),大多偏好西北直线型移动路径模式。 2.2.2 垂直风切变

本研究采用 850 hPa 和 200 hPa 高度的平均 风场矢量差来表示垂直风切变强度,公式如下:

$$V = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2}$$
 (2)

式中: *V*表示垂直风切变大小; *u*<sub>200</sub> 和 *u*<sub>850</sub>分 别表示 200 hPa 和 850 hPa 等压面上的纬向风 速; *v*<sub>200</sub> 和 *v*<sub>850</sub>分别表示 200 hPa 和 850 hPa 等压 面上的经向风速。

2004 年和 2017 年的 3 月 – 10 月为热带气 旋主要生成月份,在 160°E 以西到 110°E 海域的 垂直风切变情况基本类似,大都处于 10 m/s 以 下,与多年平均水平基本一致,这对于热带气旋 的生成是一个有利条件(图 4)。





(a) 2004 年 3 月-6 月垂直风切变等值线; (b) 2004 年 7 月-10 月垂直风切变等值线; (c) 2017 年 3 月-6 月垂直风切变等值线; (d) 2017 年 7 月-10 月垂直风切变等值线

Fig. 4 Vertical wind shear contours for March-June and July-October 2004 and 2017

2.2.3 青藏高原积雪

2004年1月-3月,青藏高原积雪在30°N-32°N东部区域存在一个高雪异常中心。2017 年1月-3月,青藏高原积雪在30°N-32°N东 部存在一个微低雪区域(图5)。从1月-3月的 对比来看,整体上,2004年青藏高原积雪覆盖面 积异常值明显多于2017年,3月份尤为明显。同 时两年的东亚夏季风也都处于干位相(-1.36、 -0.29),但 2004 年东亚夏季风弱于 2017 年。 2004 年 6 月垂向环流表现为下沉气流异常,7 月 没有出现稳定的上升气流异常区域,7 月-9 月 在 100°E-120°E 存在一个断续的上升气流异常 区域;2017 年 6 月在 100°E 以东出现大范围上升 流异常区域,7 月-9 月在 100°E-140°E 出现一 个稳定的上升气流异常区域(图 6)。







Fig. 6 Vertical circulation anomaly fields in the 30°N latitudinal direction for 2004 and 2017 (June, July, July-September average)

2004年6月,5880等位势高度线出现在 10°N-30°N、130°E-160°E区域,且高压脊不断 向东北方向移动,到达25°N以北时脊线向西延 伸至华东地区以东海域,随后9月被切断,一部 分盘踞在华南地区,另一部分继续跟随高点移动 至日本东南海域,之后在10月开始向东南移动, 两条副高边界线分别位于20°N以北的120°E西 部和130°E东部(图7a)。2017年5月,5880等 位势高度线出现在大约24°N以南的整个西北太 平洋海域,6月脊线向南抵达10°N,向西抵达 110°E,并且于7月分裂为两个,一个中心位于华





东地区东部,另一个中心继续向东北方向移动, 同时副热带高压脊穿过华东地区延伸到内陆,南 边界位于海南岛附近,9月两个高点连成一片, 脊线向西一直延伸到100°E以西,一直持续到10月 (图7b),副热带高压南部边界一直在海南、广东 附近徘徊。2004年与2017年等位势高度线异 常,呈现截然相反的情况。2004年5月开始在 30°N以北日本周边海域出现一个持续的正异常 高值,此异常高值一直持续到12月;2017年在 120°E以西、160°E以东区域长期存在一个正异 常值,在日本周边海域长期存在一个负异常值(图8)。









(a) 2004年5月-10月位势高度分布; (b) 2017年5月-10月等位势高度分布

图 7 2004 年和 2017 年 5 月-10 月等位势高度分布

Fig. 7 May-October 2004 and 2017 geopotential height distribution





Fig. 8 Distribution of geopotential height anomalies in 2004 and 2017

#### 2.2.4 850 hPa 信风

2004年5月在5°N以南西北太平洋海域出现了较强西风,6月在16°N以南区域西风占据 主导地位,且一直持续到11月,基本涵盖了整个 台风季,8月开始在我国台湾东南部海域出现信 风辐合区,并一直持续到10月(图9a)。2017年 5月在16°N附近的西北太平洋海域出现微弱西 风,7月在16°N附近海域出现微弱的信风辐合 区,8月、9月都没有再次出现,10月出现在菲律 宾以东海域(图9b)。

#### 2.3 讨论

2004年,西北太平洋地区共生成热带气旋 32个。大部分的热带气旋在130°E以东海域生 成,路径轨迹基本都先向西北方向移动,呈西北 -东北弧线型模式,移动距离偏长,气旋累积能量 较高,2004年共生成台风20个。2017年,西北 太平洋地区共生成热带气旋33个,大部分的热 带气旋都在140°E以西海域生成,路径模式基本 都是向西北方向沿直线移动,移动距离偏短,气 旋累积能量较低,2017年共生成台风12个。

有研究显示, 厄尔尼诺-南方涛动与区域性 海表面温度变化对热带气旋的活动有显著影响<sup>[18-19]</sup>。2004年和2017年都是厄尔尼诺-南方 涛动中性年, 生成热带气旋数量(32个、33个)和 登陆数量(8个、9个)基本一致, 但是西北太平洋 地区的海表面温度异常模式不同, 热带气旋生成 位置也有很大的差异。高温异常使热带气旋生 成位置发生改变,进而导致热带气旋路径模式发 生改变,最后改变了气旋的登陆地点。2017年, 近岸的高温异常使热带气旋生成位置靠近大陆, 明显不利于气旋累积能量的加强,其强度远不 如 2004年。从 2004年与 2017年热带气旋生成、 发展情况来看,区域性的海表面温度异常模式是 增强(减弱)热带气旋累积能量的重要环境因素。

已有研究表明,强的垂直风切变是抑制热带 气旋生成、导致热带气旋强度降低的主要原因 之一。垂直风切变可以使热带气旋在每一个剖 面的水平风方向和速度产生差异,使热带气旋内 区高层暖湿空气、释放的潜热平流流通到外界 环境中,从而影响气旋强度的增强<sup>[20]</sup>。2004年、 2017年的垂直风切变并没有太大差异,这说明 垂直风切变对于热带气旋登陆地点和气旋累积 能量没有产生明显影响。

青藏高原积雪对热带气旋的活动有一定的 影响<sup>[21-22]</sup>。2004年和 2017年青藏高原 30°N—



32°N 区域1月-3月积雪分别呈现高雪、微低 雪模式,夏、秋季垂直环流模式分别表现为下沉 气流异常、上升气流异常,副热带高压系统对应 地表现出更靠东北、西南位置。2004年热带气 旋路径更加偏东,登陆华东数量远高于平均值, 2017年热带气旋路径更加偏南,登陆华南数量 远高于平均值。青藏高原地区积雪面积异常通 过改变地表潜热、感热释放量来影响垂向环流 及东亚季风等东亚地区的大气环流模式,进而改 变副热带高压的位置来控制热带气旋的路径模 式,最终改变热带气旋的登陆地点。对于气旋累 积能量来说,当热带气旋偏好更长的路径模式 (如西北-东北弧线型)时可能拥有更长的寿命, 从而使其气旋累积能量提高。

2004年,信风辐合区强度大,位置靠近我国 台湾东部海域。2017年,信风辐合区强度低,位 置处于南海附近海域。低层环流辐合区对热带 气旋的发展有一定的帮助,有利于气旋累积能量 的增强。





(a) 2004年5月-10月平均信风风场; (b) 2017年5月-10月平均信风风场

图 9 5 月-10 月平均信风风场



#### 3 结论

(1)厄尔尼诺-南方涛动暖位相(冷位相)与 西北太平洋海盆区域(0-20°N、140°E-160°E) 热带气旋频率增加(减少)、气旋西向移动数量 减少(增加)、登陆华南地区热带气旋数量减少 (增多)有关。海表面温度对于路径模式、登陆 地点的影响主要是通过异常的海表面温度分布 来改变热带气旋生成的位置实现的,是影响热带 气旋路径模式和登陆地点年际变化的主要因素 之一。

(2)青藏高原积雪异常高(低)雪模式通过减弱(加强)东南亚季风、地表感热和潜热来减弱 (增强)垂向大气环流,进而使副热带高压系统向 东北(西南)移动扩张来控制热带气旋的路径模 式和登陆地点(华东、华南),是影响热带气旋路 径模式、登陆地点年际变化的另一个主要因素。 (3)西北太平洋低层环流(信风辐合区)的强度与位置可以使经过季风辐合区的热带气旋进 一步发展,最终改变热带气旋的路径模式和登陆地点,是影响热带气旋路径模式、登陆地点年际 变化的次要因素之一。

(4)气旋累积能量与热带气旋的生成位置、 路径模式的年际变化有一定的联系,由于大陆的 阻挡,生成位远离(靠近)大陆的热带气旋累积能 量偏高(低),同时偏好弧线型路径模式(寿命长) 的热带气旋累积能量偏高,偏好直线型路径模式 (寿命短)的热带气旋累积能量偏低。

**致谢:**感谢中国留学基金委的支持 (201806330006)。

#### 参考文献:

 ZHANG Q, WU L G, LIU Q F. Tropical cyclone damages in China 1983–2006[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(4): 489-496.

- [2] CAI Y H, HAN X, ZHAO H K, et al. Enhanced predictability of rapidly intensifying tropical cyclones over the western North Pacific associated with snow depth changes over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 2022, 35(7): 2093-2110.
- [3] SUN J, WANG D Q, HU X M, et al. Ongoing poleward migration of tropical cyclone occurrence over the western North Pacific Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(15): 9110-9117.
- [4] XIANG C Y, XU Y L, LIN J, et al. Analysis of the inner rainbands of tropical cyclones over the South China Sea during the landfall process[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 956977.
- [5] WEBSTER P J, HOLLAND G J, CURRY J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. Science, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [6] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(10): 753-757.
- [7] SONG J J, KLOTZBACH P J, WEI N, et al. Modulation of western North Pacific tropical cyclone formation by central Pacific El Niño–Southern Oscillation on decadal and interannual timescales[J]. International Journal of Climatology, 2022,doi: 10.1002/joc.7777.
- [8] DAI Y F, WANG B, WEI N, et al. How has the North Pacific Gyre Oscillation affected peak season tropical cyclone genesis over the western North Pacific from 1965 to 2020?[J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(10): 104016.
- [9] 丁一汇,戴晓苏.中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12): 19-26.
- [10] 吴泽铭, 张冬娜, 胡春迪, 等. 西北太平洋热带气旋频数及生成位置的气候变化研究进展[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(4):
  1-10.
- [11] LANDSEA C W. El Niño/Southern oscillation and the seasonal predictability of tropical cyclones[M]//DIAZ H F, MARK-GRAF V. El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 149-182.
- [12] YING M, CHA E J, KWON H J. Comparison of three western North Pacific tropical cyclone best track datasets in a seasonal

context[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2011, 89(3): 211-224.

- [13] KNUTSON T R, MCBRIDE J L, CHAN J, et al. Tropical cyclones and climate change[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(3): 157-163.
- [14] KNUTSON T, CAMARGO S J, CHAN J C L, et al. Tropical cyclones and climate change assessment: part I: detection and attribution[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(10): 1987-2007.
- [15] KNUTSON T, CAMARGO S J, CHAN J C L, et al. Tropical cyclones and climate change assessment: part II: projected response to anthropogenic warming[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(3): E303-E322.
- [16] BELL G D, HALPERT M S, ROPELEWSKI C F, et al. Climate assessment for 1998[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(5s): S1-S48.
- [17] BELL G D, CHELLIAH M. Leading tropical Modes associated with interannual and multidecadal fluctuations in North Atlantic hurricane activity[J]. Journal of Climate, 2006, 19(4): 590-612.
- [18] ZHAN R F, WANG Y Q, LEI X T. Contributions of ENSO and East Indian Ocean SSTA to the interannual variability of northwest Pacific tropical cyclone frequency[J]. Journal of Climate, 2011, 24(2): 509-521.
- [19] ZHAN R F, WANG Y Q, WU C C. Impact of SSTA in the east Indian Ocean on the frequency of northwest Pacific tropical cyclones: a regional atmospheric model study[J]. Journal of Climate, 2011, 24(23): 6227-6242.
- [20] GRAY W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. Monthly Weather Review, 1968, 96(10): 669-700.
- [21] XIE L, YAN T Z, PIETRAFESA L J, et al. Relationship between western North Pacific typhoon activity and Tibetan Plateau winter and spring snow cover[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(16): L16703.
- [22] XIE L, YAN T Z. West North Pacific typhoon track patterns and their potential connection to Tibetan Plateau snow cover[J]. Natural Hazards, 2007, 42(2): 317-333.

(本文编辑:胡莹莹)