

第1章

台风概论

1.1 台风起源和形成

1.1.1 台风的起源

热带气旋 (tropical cyclones) 通常发生在 5°N 以北的西北太平洋热带洋面上。它有一个无云区的中心, 中心上空有一个暖核, 围绕中心的气流呈逆时针方向旋转。在这个涡旋中, 最低气压 (P_{\min}) 出现在中心, 其最大风速 (V_{\max}) 出现在中心附近, 并达到或超过 6 级 (10.8 m/s)。当热带气旋中心附近最大风速达到 32.7 m/s 时便称为台风。这样的涡旋在大西洋和东太平洋称飓风, 在北印度洋称特强气旋性风暴。

全球除东南太平洋和南大西洋外各大洋区的热带海域均有热带气旋发生和活动。例如在西北太平洋、北大西洋、东北太平洋、西南太平洋、南印度洋、孟加拉湾和阿拉伯海七大海域的热带洋面上均有热带气旋频繁活动, 其中以西北太平洋为最。历史资料表明, 西北太平洋热带气旋的活动最为频繁, 北大西洋、南印度洋、西南太平洋、东北太平洋上的热带气旋也很活跃, 阿拉伯海热带气旋也时有发生, 孟加拉湾三角区是一个地势低洼的脆弱 (vulnerable) 地带, 热带气旋不来则罢, 一来往往会造成洪水灭顶之巨灾。一个很有趣的自然现象在此值得一提, 赤道两侧、南北纬 5° 之间的环球带状海域和东南太平洋、南大西洋的热带洋面是非常特殊而引人注目的海域, 那里除个别情况外, 几乎没有热带气旋生成。只是赤道两侧 5° 间海域有两个例外, 南大西洋有一个例外。2004 年 3 月在南大西洋出现了一个一级飓风, 名为 “Catarina” (卡塔琳娜), 它因袭击了巴西南部 Santa Catarina 州而得名。Catarina 在南大西洋的出现并登陆巴西, 是历史的突破。至少在有了卫星探测的年代在南大西洋偶尔有热带气旋生成, 但尚未发现有飓风登陆。上述海域

没有热带气旋发生是有原因的，生成热带气旋的基本条件不具备。

图 1.1 也同样显示，全球赤道邻近地区也极少有热带气旋的生成和活动。但有两个例外，2001 年 12 月 27 日在新加坡以东， 1.5°N 的赤道洋面上生成一个热带气旋 Vamei（画眉），该热带气旋在新加坡以北的马来半岛南端登陆，以后穿过马六甲海峡（Strait of Malacca）和苏门答腊（Sumatra）。另一个是 2004 年 11 月 28 日在阿拉伯海 0.7°N 的赤道洋面上形成的气旋性风暴（cyclonic storm）“Agni”，以后西行登陆索马里（Somalia）。这两个热带气旋生成纬度之低在历史上十分罕见。



图 1.1 1985—2005 年全球热带气旋分布 (wikipedia, 2007)

多数台风起源于副热带高压以南的赤道辐合带（intertropical convergence zone, ITCZ）或季风槽（monsoon trough）区热带洋面上的热带扰动（tropical disturbance）。这些就是台风的胚胎（embryo）。我们曾发现有的胚胎最初是在大陆上活动的扰动，它被环境气流推到了海上的辐合区中，在暖海面上逐渐变性成热带洋面上风力达 6~7 级的小涡，称为热带低压（tropical depression）。以后，当风力进一步加强便发展成热带风暴。有的台风起源于多个胚胎，例如 2~3 个胚胎或热带扰动在天气尺度辐合环境（赤道辐合区或季风槽）中相互作用逆时针旋转，合并后加强为尺度较大的热带气旋。这些胚胎是在怎样的环境中孕育，又是在怎样的条件下成长的呢？

探测资料的分析表明（Gray, 1968, 1975），按最初的探测点（或热带气旋起源的位置）分布（图 1.2），所有的热带气旋都起源于热带暖洋面，其中 87% 的热带气旋起源于赤道两侧 20°N （S）以内。全球热带气旋的 2/3 在北半球生成。因为如上所说，南半球有两块大洋（南大西洋和东南太平洋）没有热带气旋生成（Catarina 除外）。另外，起源于东半球的热带气旋远远多于西

半球的热带气旋，前者约为后者的2倍。

对全球风暴以上强度热带气旋27年（1958—1984）的统计结果（Gray, 1985）表明，全球平均每年有80个热带风暴和台风、飓风生成，其中33%生成在西北太平洋，是全球热带气旋最为频繁的海域。其余海域依次为西南太平洋（20%），东北太平洋（18%），南印度洋（11%），北大西洋（11%）、北印度洋（含孟加拉湾、阿拉伯海）（7%）。

热带洋面上热带低压和扰动是很多的，这些胚胎只有一部分能在一定条件下发育为成熟的热带气旋（台风或飓风）。另有相当一部分会在中途（达到热带风暴之前的微弱状态）夭折而消亡。什么样的胚胎能发育成长壮大，而什么样的胚胎却不能呢？这是一个很有趣的问题，将在后文说明。

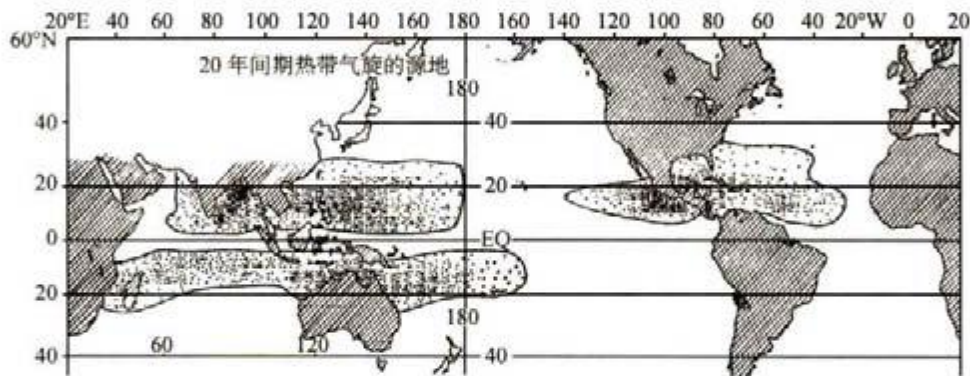


图1.2 全球热带扰动（最初探测点或起源点）分布图（Gray, 1985）

各大海域热带气旋的起源和形成都有它一定特点（Gray, 1985），今简要介绍如下。

西北太平洋上的热带扰动比较容易发展成台风，这一海域平均每年生成热带风暴和台风26~28个，其中2/3都能达到台风强度。台风的产生有明显的季节性，高产月份为8月，其次为9月和7月。而全年各月均有热带气旋生成，这是全球唯一可以一年四季产生热带气旋的海域。在这海域绝大多数台风（91%）起源于 $5^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ 的洋面，其胚胎扰动80%来自大尺度辐合区（赤道辐合带ITCZ或季风槽），有10%来源于深厚东风带上的波动。另有一些起源于不同的其他发育形式。

北大西洋上成熟热带气旋（飓风）的发生频率远比西北太平洋发生频率小。其高发期在8—10月，高峰期在9月。有一半以上的热带气旋是从非洲移来的东风波上生成的。在ITCZ上产生的反而较少。还有一些热带气旋的生成和中纬度入侵的环流系统有关。

东北太平洋有一个很有趣的现象，热带气旋（风暴和飓风）集中发生在相距墨西哥下加利福尼亚以南 800 km 左右的热带洋面上。这里是东北太平洋热带风暴的高发区，这和这一带海温较高有关（ $\geq 29^{\circ}\text{C}$ ）。这一海域热带气旋发生在 5—11 月间，以 8—9 月间发生频率最高。这一海域热带气旋胚胎来自大西洋和加勒比海，穿过中美洲陆地来到东北太平洋，但对此还有分歧。来自北大西洋的东风波和东北太平洋的 ITCZ 对这一海域热带气旋的发生都有作用。

北印度洋发生的热带气旋虽少，只有全球的 7%，却有与众不同的特点，它的发生一年有两个高频期，形成双峰型分布（其他海域为单峰型）。双峰分别出现在 5 月和 11 月。5 月和 11 月之间热带气旋的生成受到抑制，这可能与 ITCZ 的位置北移到三角形海湾有关。狭小的海域难以发生这类事件。这一海域的热带气旋与南中国海土生土长的热带气旋有类似之处，其生长环流与南亚季风活动有关，多数胚胎在季风槽内孕育成长起来。另有一部分热带气旋是与来自西北太平洋、南海并跨越中南半岛移入北印度洋的东风波有关。另外，孟加拉湾大陆架上的浅海区和三角形海湾地势低凹的陆地是一个著名的脆弱地带，中等强度的热带气旋就可以掀起巨大风暴潮，造成伤亡无数。是世界最为致命的热带气旋发灾地。孟加拉湾的热带气旋比阿拉伯海的多 5~6 倍。

西南太平洋上的热带气旋生成在 11—5 月，高峰期在 1—3 月。热带气旋多数生成在南太平洋辐合带（SPCZ）上，生成过程可能与来自北半球的跨赤道冷潮有关。有少数热带气旋生成在热带洋面自东向西传播的东风波上。澳大利亚的东海岸是受热带气旋侵袭的主要区域。这一地区的热带气旋就是来自西南太平洋和其中的珊瑚海。袭击澳大利亚的热带气旋 97% 左右形成于季风切变线（monsoon shear），而 SPCZ 就是季风切变线在澳大利亚以东海域的延续。95% 的热带气旋生成在 $5^{\circ}\sim 19^{\circ}\text{S}$ 的海域。可以观测到，热带气旋的胚胎除了在季风切变线中的扰动和东风波外，另有一些是陆地上的低压扰动移入近海海面发展而成，或由登陆热带气旋的残涡（remnant）重返海洋再生而成。另外，澳大利亚的西北海岸和卡奔塔利亚湾是受热带气旋袭击的另外两个区域。

南印度洋热带气旋的 85% 生成在 12—3 月间，高峰期出现在 1 月。生成在南印度洋和帝汶海或卡奔塔利亚的热带气旋将可能袭击澳大利亚的西北海岸和北岸。西南印度洋的热带气旋有可能袭击马达加斯加和马斯克林群岛（毛里求斯和留尼旺）。有的热带气旋也会生成在狭窄的莫桑比克海峡，从而袭击马达加斯加和莫桑比克一带。这一海域的热带气旋活动在 4 月终止。4—11 月一般不出现热带气旋。

1.1.2 台风的形成

热带气旋是一类大气涡旋的统称。风力 12 级以上的热带气旋在不同海域有不同名称（表 1.1），热带气旋的胚胎或热带扰动是在怎样的条件下才能发育成为台风的呢？Gray（1968，1975，1979）作了热带气旋形成和发生（formation）条件的研究。对热带气旋发生比较一致的看法如下：（1）需要有一个初始胚胎。台风是在一个或多个初始胚胎（热带扰动）的基础上发展起来的。这种热带扰动往往也是一个小涡或云团。它是由零散的热带洋面上积云对流组织起来的。这种热带扰动比表 1.1 的热带低压强度弱，尺度小。与这个热带扰动相应的是较强的正涡度区。如果一个扰动在 ITCZ 内或季风槽内，这样的孕育环境一般都可以提供相应的正涡度区。（2）对流层中下层水汽充沛，湿度大。热带气旋的主要能量来源是潜热释放，这就取决于水汽供应是否充沛，大气湿度就是其中的重要条件。（3）热带洋面上这个扰动上空大气层结存在较强的位势不稳定。只有较强的位势不稳定才能激发扰动内部的对流和上升运动，这样才能把潮湿空气带到上空凝结潜热释放而使扰动获得能量。（4）热带气旋根本的能量来源于海洋提供的水汽，温暖的海洋才有这种可能。观测事实表明，热带气旋通常形成于海面温度 26°C 以上的海域，且要有较深厚而温暖的海洋混合层，以支持海面温度不因上升涌流（upwelling）而使其急剧下降。（5）弱的水平风速垂直切变，风速垂直切变是决定台风暖核形成的重要条件。台风中的暖核是无数积云对流使水汽在对流层上层凝结释放潜热的综合结果，也是台风形成和获得能量的标志。强的风速切变将使扰动气柱与环境大气有强的通风效应（ventilation），这种效应应将积云对流释放的潜热向四周环境大气扩散开而不能在一个区域内集中，从而不能使热量集中形成暖核，因此弱的垂直切变是台风形成的重要条件。一般用 200 hPa 与 850 hPa 之间的平均纬向风之差表示风速垂直切变，通常热带气旋在垂直切变小于 6 m/s 的环境中生成。（6）生成海域的地理位置一般要在赤道两侧 5°N （S）之外。因为热带涡旋是在几个力的平衡下转起来的，其中一个力便是科氏力，这个力是由于地球自转而产生的一种虚拟力，又称地转偏向力或折向力，其表达式为 $2\Omega\sin\varphi$ （ Ω 是地球自转角速度， φ 是纬度），故在赤道上此力为 0，在南北纬 5° 以内此力也很小，往往起不到平衡作用，通常在 5° 之外才能对涡旋运动起到平衡作用。另外，在甚低纬度大气压力均匀，也难以形成涡旋运动。形成热带气旋的上述条件是必要条件，而非充分条件，达到了这些条件也未必会使热带气旋形成。也可以把这些条件归并为环境大气条件、扰动内部条件和海洋条件三大类，一个热带气旋是上述三类条件相互作用

表 1.1 不同海域热带气旋强度等级和名称

风力等级	中心附近最大风速			西北太平洋和南海			北印度洋 (含孟加拉湾 和阿拉伯海) (印度气象局)	西南印度洋 (法国气象局) (英国气象局)	西南太平洋 (斐济气象局)	东南印度洋及 澳大利亚近海 (澳大利亚气象局)
	米/秒	千米/小时	海里/小时	中国气象局	日本气象厅	美国联合台风警报中心				
6	10.8~13.8	39~49	22~27	热带低压 Tropical Depression	热带低压 Tropical Depression	热带低压 Tropical Depression	热带扰动 Tropical Disturbance	热带低压 Tropical Depression	热带低压 Tropical Depression	热带低压 Tropical Low
7	13.9~17.1	50~61	28~33	热带风暴 Tropical Storm	热带风暴 Tropical Storm	热带风暴 Tropical Storm	中度热带风暴 Moderate Tropical Storm	热带气旋(1级) Tropical cyclone (1)	热带气旋(1级) Tropical cyclone (1)	热带气旋(1级) Tropical cyclone (1)
8	17.2~20.7	62~74	34~40	热带风暴 Tropical Storm	热带风暴 Tropical Storm	热带风暴 Tropical Storm	强热带风暴 Severe Tropical Storm	热带气旋(2级) Tropical cyclone (2)	热带气旋(2级) Tropical cyclone (2)	热带气旋(2级) Tropical cyclone (2)
9	20.8~24.4	75~88	41~47	强热带风暴 Severe Tropical Storm	强热带风暴 Severe Tropical Storm	强热带风暴 Severe Tropical Storm	强热带风暴 Severe Tropical Storm	热带气旋(3级) Tropical cyclone (3)	热带气旋(3级) Tropical cyclone (3)	热带气旋(3级) Tropical cyclone (3)
10	24.5~28.4	89~102	48~55	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带风暴 Severe Tropical Storm	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
11	28.5~32.6	103~117	56~63	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
12	32.7~36.9	118~133	64~71	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
13	37.0~41.4	134~149	72~80	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
14	41.5~42.5	150~153	81~82	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
15	42.6~43.6	154~157	83~85	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
16	43.7~46.1	158~166	86~89	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
17	46.2~49.2	167~177	90~95	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
17级 以上	49.3~50.9	178~183	96~99	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	51.0~56.0	184~201	100~108	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	56.1~56.7	202~204	109~110	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	56.8~58.1	205~209	111~113	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	58.2~59.0	210~212	114~115	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	59.1~61.2	213~220	116~118	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	61.3	221	119	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	61.4~66.4	222~239	120~129	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	66.5~69.2	240~249	130~135	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)
	≥69.3	≥250	≥136	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	台风 Typhoon	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋 Intense Tropical Cyclone	强热带气旋(4级) Severe Tropical Cyclone (4)

的产物。热带气旋形成之前,在该海域中定要有一个热带扰动的存在 (pre-existing disturbance 或 precursor),这是一个基本的内部条件。这个扰动如果出现在热带辐合区 (ITCZ) 或季风槽之中,低层有强的正涡度并有深厚潮湿的不稳定气层和强对流运动发展,这个扰动在 26°C 以上海面上弱的垂直切变下活动。热带扰动与这样的环境大气条件和海面条件相互作用,这样的热带扰动一胚胎就有可能发育成长,变成风暴或台风。如果热带扰动出现在 $24\sim 25^{\circ}\text{C}$ 的洋面上、无低空辐合却有强垂直切变的环境中,这样的胚胎就不大可能发育长大,变成为热带气旋。这三方面的条件可用来诊断一个热带扰动是否会形成台风。

上述热带气旋的形成方式是自下而上发展 (bottom-up) 的。近年来随着遥感资料的开发应用,发现东风波使胚胎在上空形成,东风波提供了胚胎发育所需的动力和热力条件。这种中尺度对流系统 (MCS) 往往与一个中尺度强对流小涡 (MCV) 相伴随,往往有多个 (2~3 个) 中尺度对流体相互旋转合并而发展成较强的中尺度涡,中尺度涡旋充分发展后下伸 (top-down) 并加强了低空的涡度场而发展为热带气旋。这可能是热带气旋形成的另一种方式。上文提到赤道两侧环球带状海域、东南太平洋、南大西洋除个别情况外,一般无热带气旋形成,就是因为不能满足上述热带气旋形成的条件。

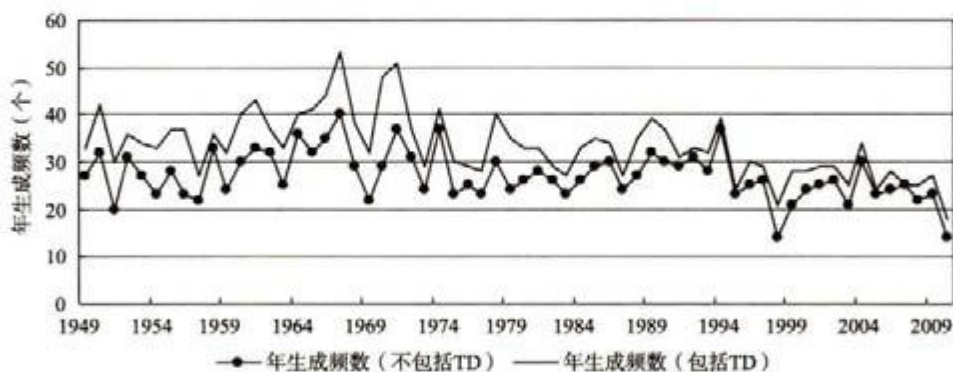


图 1.3 1949—2010 年逐年西北太平洋和南海热带气旋发生频率变化

不同海域热带气旋形成都有显著的季节性特征,西北太平洋全年都有热带气旋发生,但以 8 月发生频率最高,9 月次之,7 月位居第三,全年热带气旋发生频率最低为 2 月。热带气旋发生数也存在年际变化 (图 1.3)。

这一海域热带风暴以上等级热带气旋的年均发生数为 27 个左右,年发生数最多 40 个 (1967 年),最少为 14 个 (1998 年和 2010 年)。西北太平洋热带气旋也存在年代际变化。统计结果 (图 1.4) 表明,20 世纪 60 年代是热带气旋发生最多年代,以后年代平均值略有下降趋势。

热带气旋形成的预报至今仍是一个难题，在预报技术上主要依靠卫星遥感资料的应用和全球业务数值预报模式的改进。目前全球业务数值预报模式对热带气旋发生的预报能力是在逐渐提高的，但对于异常的情况，还是不易报出来的。例如有的热带气旋发生的很突然或此热带气旋发生在风的垂直切变高值区或少有热带气旋发生的海域，这些情况都会对模式的发生预报产生负面影响。另外，预报员的经验或概念模式（conceptual model）在热带气旋发生预报上仍很有用。卫星遥感资料能较早地显示出热带扰动或胚胎的存在，按其所在洋面的海温、垂直切变、湿层厚度和稳定度、附近强对流系统（MCSs）是否与其合并以及低空涡度场的强度和发展趋势等大致可以判断这个热带扰动是否会加强成台风。

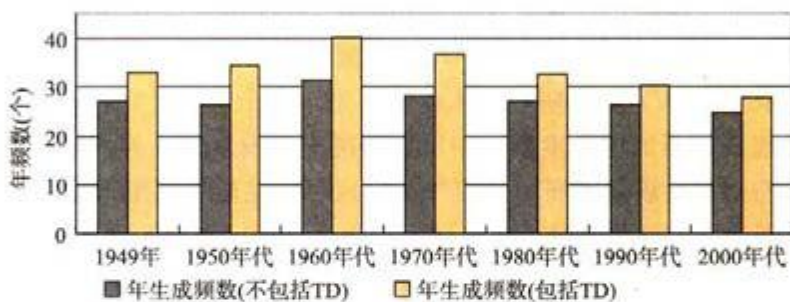


图 1.4 1949—2010 年西北太平洋和南海热带气旋频数的年代分布

不同海域对热带气旋发生预报的紧迫性不同。西北太平洋的台风和北大西洋、东北太平洋的飓风生成后会在洋面上漂移多时才会登陆，沿岸国家有较多的准备时间。而西南太平洋、南印度洋、孟加拉湾等海域热带气旋发生点与陆地之间距离短，澳大利亚东西和北部海岸在西南太平洋、南印度洋热带气旋生成后就很快遇袭；印度东海岸和孟加拉国在孟加拉湾风暴形成后也会很快登陆。可见，热带气旋的发生预报对这些海域是十分重要而又紧迫的。

1.2 台风结构和强度

1.2.1 结构框架

自然界有很多现象呈圆形、椭圆形或涡旋状的运动形态，大至宇宙星云（cosmic nebula）、银河系（the galaxy）、太阳系，小至台风（typhoon）、龙卷（tornado/spout），甚至直径数米的尘卷风（dust swirl）皆如此。台风就是一种大气涡旋（vortex）。台风的大小各异，大台风的直径上千千米，可谓超级