

引起我国夏季旱涝的东亚大气 环流异常遥相关及其物理 机制的研究

黄 荣 辉

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文综述了引起我国夏季旱涝的东亚大范围、持续性大气环流异常遥相关方面的国内外研究状况. 本文特别强调了关于夏季东亚大气环流异常遥相关物理机制的研究, 其中不少研究是作者多年努力的成果. 本文还指出在这方面应进一步研究的问题.

关键词: 旱涝; 遥相关; 副热带高压.

一、引 言

近年来, 世界许多地方发生了大范围的干旱与洪涝, 给世界人民带来严重的灾害. 我国地处东亚, 是强季风区域, 由于季风的年际变异很大, 使我国不断遭受干旱与洪涝灾害, 特别是长江、黄河流域不断发生严重的洪涝与干旱. 这些洪涝与干旱都是大气环流发生持续性异常所造成的. 近年来的研究表明, 某区域大气环流的异常不仅仅是由于该区域大气的动力、热力异常所造成, 它也可能是由于别的区域环流异常所造成. 许多观测事实已表明一个区域的大气环流异常可以引起另一些区域大气环流的异常, 这种区域之间环流异常的相关性或由它所引起的要素异常的相关性就称为遥相关.

由于遥相关现象的发现, 许多动力学家进行了遥相关动力学的研究, 提出了低频变化动力学, 这给旱涝预测带来一定的物理依据. 本文就国内外关于引起大范围、持续性旱涝的大气环流异常遥相关观测事实及其物理机制的研究现状作一综述, 特别是作者本人在这方面的研究成果. 本文着重综述与我国旱涝有关的大气环流异常遥相关方面的研究.

二、北半球夏季大气环流异常遥相关的观测研究

关于北半球冬季大气环流遥相关的研究是比较多的, 也是比较早的. 早在本世

纪 30 年代, Walker 和 Bliss 就系统地分析了地面气象要素, 他们发现大西洋与欧洲之间的海平面气压及地表面附近空气的温度存在着明显的遥相关现象^[1]. 后来 Wallace 与 Gutzler 利用海平面气压与 500hPa 高度场资料系统地计算了北半球高度场的点相关^[2], 他们发现大气环流异常的遥相关存在着几种型: 太平洋北美型(简称为 PNA 型)、西大西洋型(简称为 WA 型)、东大西洋型(简称为 EA 型)、欧亚型(简称为 EU 型)及西太平洋型(简称为 WP 型). Gambo 与 Kudo 利用扰动高度场分析了北半球大气环流异常的遥相关型^[3], 他们的结果说明了用扰动高度场更能够表现大气环流的三维遥相关, 特别是欧亚型与太平洋北美型遥相关.

关于北半球夏季大气环流遥相关迄今还没有详细的研究, 而夏季大气环流的变化对于雨带分布、梅雨的强弱起着决定性的作用. 也就是说, 北半球大气环流的变异对于我国旱涝有着十分重要的作用. 因此, 研究北半球夏季大气环流异常的遥相关型是十分重要的.

1. 东亚夏季环流和降水异常与菲律宾周围对流活动的关系

夏季西太平洋副热带高压对于我国东部、日本、朝鲜半岛等东亚地区的气候有着重要的影响, 它的位置及强度的异常直接影响着东亚夏季气候的异常. 若在盛夏, 它的强度偏强, 位置偏北, 则在我国东部、朝鲜半岛及日本等东亚地区会出现高温少雨的天气. 在这方面已有不少研究. 但是, 关于西太平洋副热带高压的年际变化与季节内变化及其物理机制至今还不太清楚.

最近, 作者分析了夏季东亚上空的西太平洋副热带高压与菲律宾周围对流活动的关系, 提出一个夏季菲律宾周围的对流活动与东亚环流异常遥相关的概念图^[4-6].

图 1 是夏季菲律宾周围对流活动加强后, 北半球大气环流异常距平分布的示意图. 从图 1 可以看到, 当夏季菲律宾周围对流活动加强后, 在 500hPa 高度场, 一个负距平区域出现在我国南海与菲律宾上空; 一个正距平区域出现在我国江淮流域与日本上空, 并且另一个负距平区域与正距平区域分别出现在鄂霍茨克海及阿拉斯加的上空. 这种异常距平的分布宛如一个 Rossby 波列的传播. 最近, 陈烈庭从北方涛动指数与北半球夏季 500hPa 异常距平的相关中也得到这个遥相关型^[7], 我们把这个遥相关型称为东亚太平洋型. Nitta 从卫星观测的多年高云量的异常也得出同样的结果^[8].

1984、1985 年夏季菲律宾周围的对流活动强, 使得西太平洋副热带高压位置偏北. 图 2 是 1984 年 8 月 500hPa 高度场与菲律宾周围平均 TBB 之间的关系, 其中斜线区表示 TBB 温度在 -10°C 以下, 即对流活动活跃的区域. 从图 2 可以看到强的对流活动区位于我国南海与菲律宾一带, 而强的副热带高压位于日本及我国江淮流域上空, 使我国东部及日本本州出现高温少雨天气. 这种现象同样在 1985 年盛夏出现, 图 3 是 1985 年 8 月北半球 500hPa 高度场(实线)与异常距平(虚线)的分布. 从图 2 与图 3 可以看到这两年盛夏

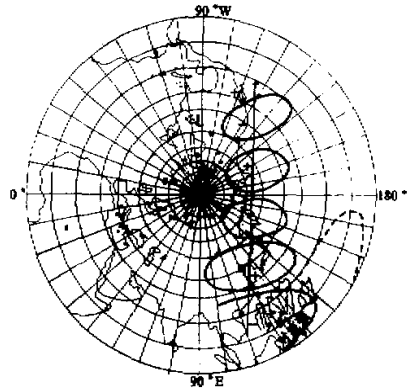


图 1 夏季菲律宾周围对流活动加强后北半球大气环流异常距平分布示意图

500hPa 高度场的距平有类似的分布.1985 年盛夏西太平洋副热带高压异常偏北,在东亚的强度偏强,我国华中,江淮流域及黄淮流域的雨量少 50%.

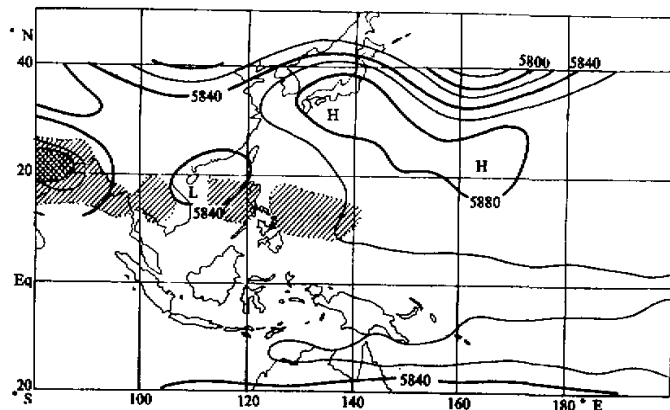


图 2 1984 年 8 月 500hPa 高度场(实线)与菲律宾周围 TBB(斜线区)的分布

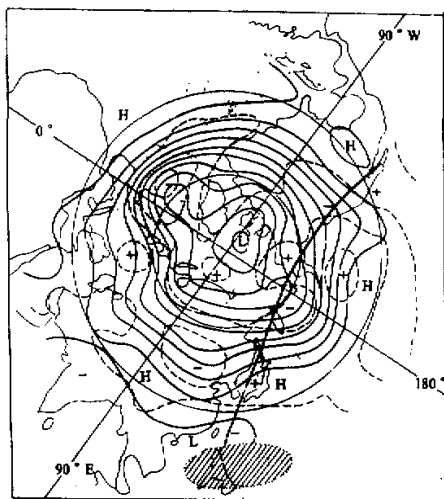


图 3 1985 年 8 月北半球 500hPa 高度场(实线)

与距平(虚线,单位:50GPM)的分布

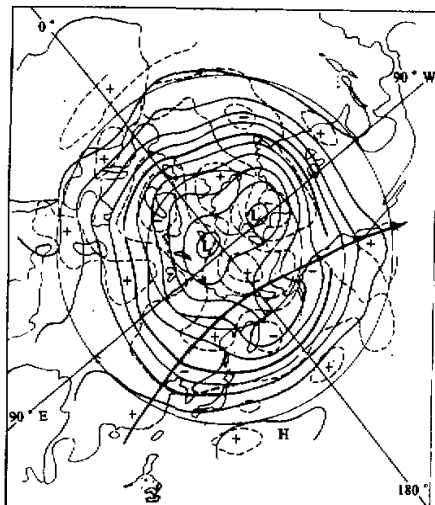


图 4 1987 年 8 月北半球 500hPa 高度场(实线)

与距平(虚线,单位:50GPM)的分布

与 1984, 1985 年相反,当夏季菲律宾周围的对流活动弱时,则西太平洋副热带高压偏南.图 4 是 1987 年 8 月北半球 500hPa 高度场(实线)与异常距平(虚线)的分布图.从图 4 可以看到,1987 年盛夏北半球环流异常的距平分布与 1984, 1985 年的距平分布相反.一个负距平区域出现在我国江淮流域及日本上空,西太平洋副热带高压的位置偏南,它控制着我国江南及日本的南部;在我国南海与菲律宾上空是正的距平区域;并且另一个正距平与负距平区域分别位于鄂霍茨克海及阿拉斯加的上空.在 1987 年盛夏,我国江淮流域的雨量少 50% 以上,造成江淮流域很大的洪涝.1987 年盛夏我国南海与菲律宾周

围的对流活动比较弱.

Nitta 与 Kurihara 研究了热带西太平洋上空,特别是菲律宾周围云量的长期变化^[9,10].他们的研究表明菲律宾周围的对流活动与热带西太平洋海表温度有很大关系,当热带西太平洋海表温度高,则菲律宾周围的对流活动就强.如 1977, 1978, 1981, 1984, 1985 等年菲律宾周围盛夏的对流就较强;而在 1980, 1982, 1983, 1987 等年盛夏菲律宾周围的对流就较弱.

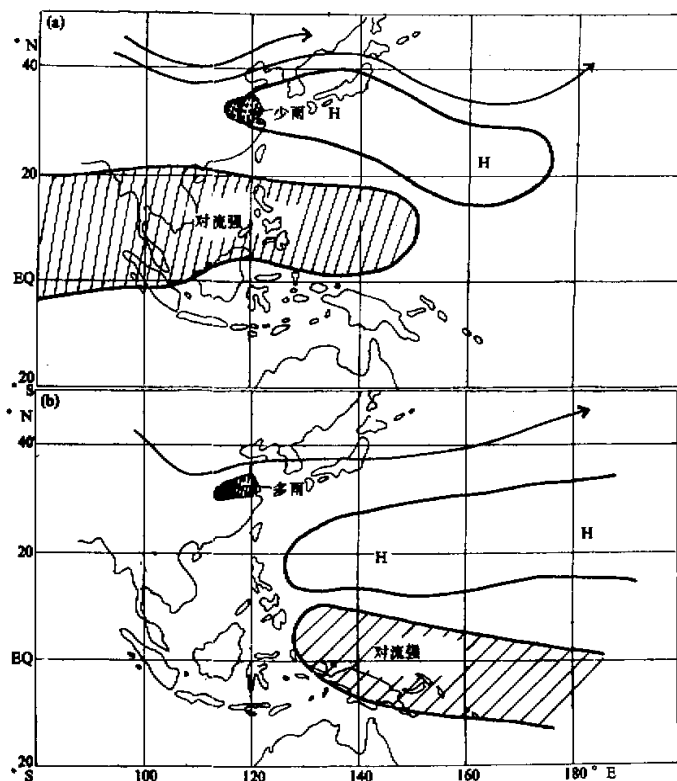


图 5 热带西太平洋海表温度、菲律宾周围的对流,西太平洋副热带高压、江淮流域降水之间的关系
(a)热带西太平洋海表温度高的情况;(b)热带西太平洋海表温度低的情况.

从我国夏季降水距平图可以看到,在 1977, 1978, 1981, 1984, 1985 年江淮流域偏旱;而在 1980, 1982, 1983, 1987 年江淮流域偏涝.因此,我们可以作图(见图 5)表示热带西太平洋海表温度、菲律宾周围的对流活动、西太平洋副热带高压、我国江淮流域降水之间的关系.图 5a 表示热带西太平洋海表温度高的情况;而图 5b 则表示偏低的情况.可以看到,当热带西太平洋海表温度偏高时,在盛夏,菲律宾、我国南海与中印半岛的对流偏强,西太平洋副热带高压位置偏北偏西,我国江淮流域、朝鲜半岛及日本的降水偏少;相反,当热带西太平洋海表温度偏低时,在盛夏,菲律宾、我国南海的对流偏弱,西太平洋副热带高压位置偏南,并且呈条状结构,我国江淮流域的降水偏多.

2. 夏季大气环流遥相关型的年际变化

上面我们从观测事实指出在北半球夏季大气环流的遥相关中存在着东亚太平洋型,它对东亚的环流及降水有很大影响.黄荣辉与孙凤英分析了 1971—1977 年夏季北半球大气环流遥相关型的年际变化^[11],发现在 ENSO 事件发生的年份或 ENSO 事件的第二年上述环流遥相关型比较典型,而别的年份则不明显.1972, 1973 年夏季环流异常的东亚太平洋型比较明显,而其它年份不很明显.并且 1972 与 1973 年夏季造成东亚太平洋型的准定常行星波列的传播路径也不一样.1972 年夏季南亚地区与我国南方出现正相关区;在我国东北、苏联西伯利亚上空出现负相关区;在鄂霍茨克海及勘察加半岛上空出现另一个正相关区;在阿拉斯加地区出现另一个负相关区.波列由菲律宾经东亚传播到美洲的加拿大.而 1973 年夏季在阿留申群岛上空出现负相关区,在北美西部落基山脉一带出现一片正相关区.这说明 1973 年夏季准定常行星波列由菲律宾周围经东亚、阿留申群岛向北美西部落基山脉一带传播.

从上述可以看到夏季大气环流的东亚太平洋型遥相关是有很大的年际变化,这是由于基本气流对行星尺度扰动的传播有很大作用所造成.

三、我国江淮流域旱涝与 ENSO 现象的关系

黄荣辉与吴仪芳利用 30 年观测资料分析了 ENSO 现象的不同阶段对我国旱涝分布的影响^[12].研究表明 ENSO 现象的不同阶段对我国旱涝的分布有不同的影响.如图 6 所示,在 ENSO 现象的发展阶段,我国江淮流域的降水异常与赤道东太平洋的海温异常有一个较大的正相关;而黄河流域、华北地区及江南、华南地区的降水异常与赤道东太平

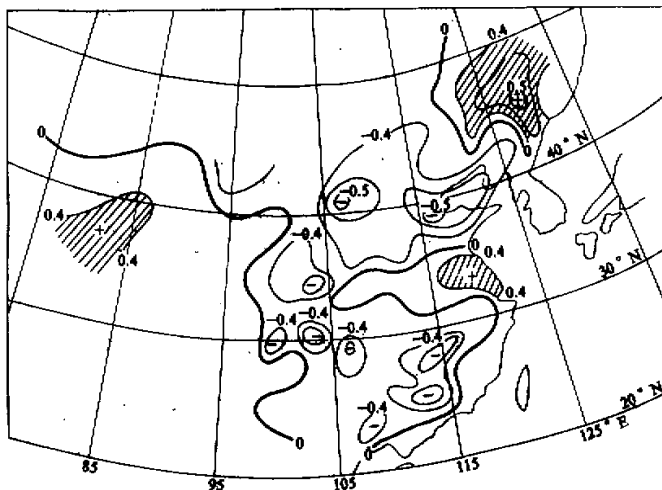


图 6 ENSO 发展阶段我国夏季降水异常与赤道东太平洋海温异常的相关分布

洋的海温异常有一个较大的负相关.这就是说,当 ENSO 现象处于发展阶段,该年夏季我国江淮流域降水将会偏多,可能发生洪涝;而黄河流域、华北地区的降水将会偏少,发生干旱;江南地区的降水也会偏少,也可能发生干旱.

然而,当 ENSO 处于恢复阶段,如图 7 所示,我国江淮流域的降水异常与前冬赤道东太平洋的海温异常有一个较大的负相关区;而黄河流域、华北地区及江南、华南地区的降

水异常与前冬赤道东太平洋海温异常有一个较大的正相关区,这就是说,当赤道东太平洋海温异常处于恢复阶段,若海温距平还在正距平范围,则夏季我国江淮流域的降水将会偏少而发生干旱;而黄河流域、华北地区及江南、华南地区的降水可能偏多。但是,当赤道东太平洋处于冷水年,特别是反 ENSO 年,则夏季江淮流域的降水偏多,而黄河流域、华北地区及华南地区的降水可能偏少而发生干旱。

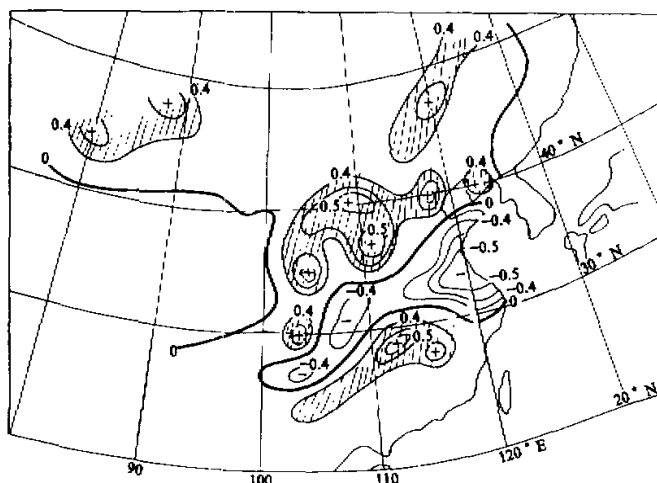


图 7 ENSO 衰减阶段我国夏季降水异常与赤道东太平洋海温异常的相关分布

这个观测事实是与第二节中所阐述的事实相一致的。黄荣辉与吴仪芳的研究表明了赤道东太平洋的海温与热带西太平洋的海温之间存在着一个“跷跷板”结构。当 ENSO 现象处于发展期,一般热带西太平洋的海温偏低;相反,当 ENSO 现象处于恢复期,一般热带西太平洋的海温就偏高,菲律宾周围的对流活动就强,从而引起东亚上空副热带高压的位置偏北,引起东亚地区夏季高温少雨天气。

上述这些大气环流的遥相关可以作为短期气候预测的依据,有的已成为长期天气预报的很有用的方法。

四、夏季大气环流遥相关物理机制的研究

为了利用大气环流遥相关来作旱涝的短期气候预测(季度与年际预测),许多动力学家都在探讨这种遥相关的物理机制。这几年来的研究表明,引起大气环流遥相关有如下几种物理机制。

1. 准定常行星波在三维空间中的传播

Hoskins 与 Karoly 把叶笃正所提出的罗斯贝波频散理论推广到球面大气中^[13],他们的研究表明罗斯贝波的波列在球面大气中是沿大圆路径传播的,并且波列向极地方向传播,其振幅要增加。黄荣辉利用波的折射指数平方与 E-P 通量系统地研究了北半球冬夏准定常行星波的传播规律^[14-16],指出准定常行星波在球面上传播路径的变化遵从下列方程式:

$$\frac{d_g \alpha}{dt} = \frac{1}{2Q_k} \vec{i} \cdot \vec{C}_g \times \nabla Q_0 \quad (1)$$

其中 Q_k 是波数为 k 的准定常行星波的折射指数平方, Q_0 可以看成是波数为 0 的波的折射指数平方, $\vec{C}_g$ 是波的群速度在经圈面上的投影, $\vec{i}$ 是纬圈方向上的单位矢量, d_g/dt 表

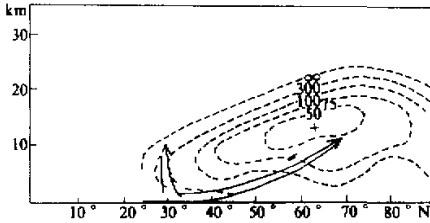


图 8 北半球夏季准定常行星波传播示意图 图中虚线表示 Q_0 值

示沿群速度方向的随体微商, α 是波传播路径与水平方向的夹角. 黄荣辉利用上述理论及数值模拟的结果提出冬季准定常行星波在三维传播中有两支波导.

黄荣辉还研究了夏季准定常行星波的传播规律^[17], 指出夏季准定常行星波不能传播到平流层, 但它能在对流层中传播. 如图 8 所示, 准定常行星波能够准水平地从副热带地区向高纬度对流层传播.

黄荣辉还利用 WKBJ 方法求出了准定常行星波在球面大气中的传播路径是:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \begin{cases} \cos\varphi \sqrt{\left(\frac{ak_s}{k}\right)^2 - 1} & \text{在转向点之前} \\ -\cos\varphi \sqrt{\left(\frac{ak_s}{k}\right)^2 - 1} & \text{在转向点之后} \end{cases} \quad (2)$$

其中 k 是纬向波数, a 是地球半径, k_s 可以看作波在球面上传播的折射指数, 它是:

$$K_s^2 = k^2 + m^2 = \frac{\bar{q}_r}{a\bar{\Omega}} \quad (3)$$

$\bar{q}_r$ 是基本态位涡度的南北梯度, $\bar{\Omega} = U / a \cos\varphi$, 它是基本气流的角速度. 并且, 从群速度可以估算出西太平洋上空 500hPa 面上波数大约为 1 的行星尺度波列从菲律宾周围传播到大西洋约需 1 个月时间.

黄荣辉从实际夏季基本气流求出行星波在球面的传播路径(见图 9)以及在传播中波振幅的局地变化^[18]. 对于实际夏季基本气流而言, $\nabla \cdot \vec{C}_g \neq 0$, 波在传播中振幅的局地变化是不容易估计的, 只有当行星波的传播路径是一大圆时, 波在传播中的振幅才是极向增加的.

由于准定常行星波在球面大气中的传播, 某区域大气环流的异常会引起另一些区域大气环流的异常.

2. 下垫面热力状况的异常引起行星尺度扰动的异常

近年来, 许多研究表明了下垫面热力状况的异常是引起大气环流异常的重要原因. Moura 与 Shukla, Keshavamurly, Shukla 与 Wallace, Tokioka 模拟了 PNA 型遥相关的产生^[19-22], 黄荣辉从理论上及数值模拟方面说明了低纬度东太平洋热源异常将会引起 PNA 型环流的异常^[23], Gambo, 卢里与李维京模拟了热带大西洋海温异常对北半球冬季大气环流欧亚型异常的作用^[24].

黄荣辉研究了夏季模式大气对热源强迫的响应^[25]. 但是, 对于夏季大气环流异常的遥相关型模拟至今还不多. 黄荣辉与李维京, 黄荣辉与卢里分别利用一个动力机制模式及大

气环流模式模拟了菲律宾周围对流活动加强后东亚上空环流的异常^[26,27]。图 10 表示夏季菲律宾周围对流活动加强后所引起的北半球夏季 500hPa 环流异常的距平分布。从图 10 可以看到,当菲律宾周围的对流活动加强后,我国华南及南亚地区上空的高度场出现负距平;在江淮流域及日本上空的高度场出现正距平,这个地区正是夏季西太平洋副热带高压控制的地区,这将引起我国江淮地区及日本上空的副热带高压增强。因此,可以认为夏季东亚上空西太平洋副热带高压的强弱是与菲律宾周围上空的对流活动强弱有密切的关系。

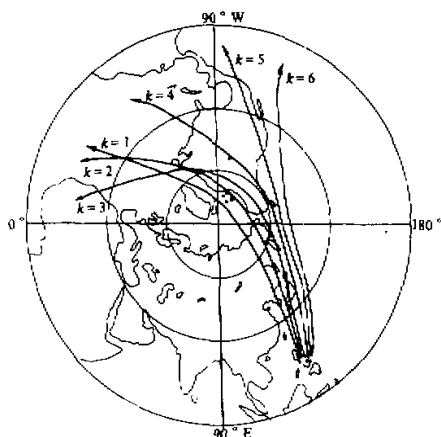


图 9 位于热带西太平洋的准定
常行星波的传播路径

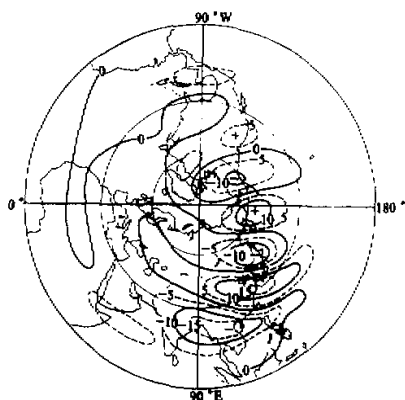


图 10 由一个动力机制模式计算得到的夏季
菲律宾周围对流活动加强后所引起的北
半球夏季 500hPa 环流异常的距
平分布单位: GPM

此外,由大气环流模式计算的结果与图 10 相类似。

大气的下垫面不仅是海洋,还有陆地,特别是青藏高原,由于它的地势高,它的热状况直接关系到对流层中层的加热。叶笃正与高由禧, Nitta, 罗会邦与 Yanai 的研究都表明了北半球夏季最大热源位于青藏高原的东南部^[28-30]。而青藏高原冬春积雪状况,如积雪天数、积雪厚度与积雪面积等对夏季青藏高原的热状况有很大影响。

黄荣辉利用数值模式模拟了夏季青藏高原上空热源异常对北半球大气环流异常的作用^[31]。如图 11 所示,若夏季青藏高原热源增强,则青藏高压就增强,我国北方的槽要加深;鄂霍茨克海上空的高压要加强;阿拉斯加地区的槽要加深;北美地区的脊要加强。这些模拟结果与实际资料分析所得到的结果一致

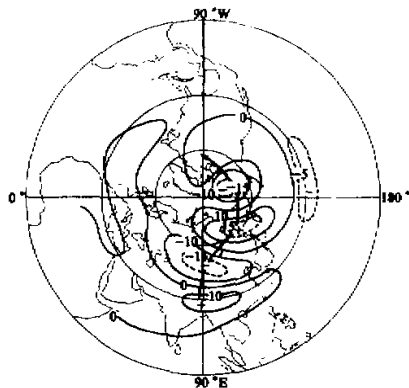


图 11 由模式计算所得到的青藏
高原上空热源增强后北半球夏季
大气环流异常的距平分布 单位: GPM

五、应进一步研究的问题

从八十年代初到现在,大气环流异常的遥相关现象吸引着许多气象学家,他们对遥相关现象及机理作了不少研究.但是,目前国际上许多研究主要集中在冬季大气环流遥相关方面,对影响夏季旱涝的大气环流遥相关研究还比较少.这一方面是由于夏季大气环流异常比冬季弱,其遥相关型比冬季不明显;另一方面是由于夏季大气环流异常的成因比较复杂.

作者认为要弄清楚我国夏季旱涝的物理机制就必须进一步研究东亚夏季大气环流异常的遥相关及其机制,要研究热带西太平洋海温、ENSO 现象、从孟加拉湾经中印半岛到菲律宾周围的对流、西太平洋副热带高压与东亚夏季旱涝之间的关系等.

从现在的研究表明,菲律宾周围的对流活动与东亚夏季旱涝有密切关系,而菲律宾周围的对流活动不仅与热带西太平洋的海表温度有关,而且与沃克环流及跨赤道气流有关.因此,必须进一步研究热带西太平洋地区的纬圈环流、经圈环流与菲律宾周围对流活动的关系.

总之,引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常的物理成因是很复杂的,本文所述的遥相关及其物理机制是很初浅的,还有许多课题有待进一步研究.

参 考 文 献

- [1] Walker, G.T., and E.W.Bliss, 1932, World Weather, *V.Mem.Roy.Meteor.Soc.* Vol.4, 53-84.
- [2] Wallace, J.M., and D.S.Gutzler, 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon.Wea.Rev.*, Vol.109, 784-812.
- [3] Gambo, K., and K.Kudo, 1983, Three-dimensional teleconnection in the zonally asymmetric height field during the Northern Hemisphere winter, *J.Meteor.Soc.Japan*, Vol.61, 36-50.
- [4] Huang, R.H.(黄荣辉), and Li, W.J.(李维京), 1987, Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the Subtropical High over East Asia, International Conference on the General Circulation of East Asia, April 10-15, 1987, Chengdu, China.
- [5] 黄荣辉、李维京, 1988, 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制, *大气科学(特刊)*, 107-116.
- [6] Huang, R.H.(黄荣辉), and Wu, Y.F.(吴仪芳), 1987, The influence of the ENSO on the summer climate change in China and its mechanism, Japan-U.S.Workshop on the El Niño Southern Oscillation Phenomenon, November 3-7, 1987, Tokyo, Japan.
- [7] 陈烈庭、吴仁广, 北方涛动对北半球温带环流的影响(待发表)
- [8] Nitta, Ts., 1986, Long-term variation of cloud amount in the western Pacific region, *J.Meteor. Soc.Japan*, Vol.64, 373-390.
- [9] Nitta, Ts., 1987, Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation, *J.Meteor.Soc.Japan*, Vol. 64, 373-390.
- [10] Kurihara, K.and M.Kawahara, 1986, Extremes of East Asian weather during the post ENSO years of 1983 / 84 — Severe cold winter and hot dry summer, *J.Meteor.Soc.Japan*, Vol.64, 493-503.
- [11] 黄荣辉、孙凤英, 北半球夏季遥相关型的年际变化及其数值模拟(待发表)
- [12] Wu, Y.F.(吴仪芳) and Huang, R.H.(黄荣辉), 1988, A possible approach to increasing the accuracy of long-range weather forecast, *Annual Report of Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*, Vol.7, 138-143.
- [13] Hoskins, B.J.and D.J.Karoly, 1981, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J.Atmos.Sci.*, Vol.38, 1179-1196.

- [14] Huang, R.H. (黄荣辉) and K. Gambo, 1982, The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources, Part I, II, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 60, 78-108.
- [15] 黄荣辉, 岸保勘三郎, 1983, 关于冬季北半球定常行星波传播另一波导的研究, 中国科学B辑, 第10期, 940-950.
- [16] 黄荣辉, 1984, 球面大气中行星波的波作用守恒方程及用波作用通量所表征的定常行星波传播波导, 中国科学B辑, 第8期, 766-775.
- [17] Huang, R.H. (黄荣辉), 1984, The characteristics of the forced stationary planetary wave propagations in summer Northern Hemisphere, *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 1, 85-94.
- [18] Huang, R.H. (黄荣辉), 1986, The physical mechanism of the three-dimensional teleconnection in the summer circulation and application in the long-range weather forecasting, First WMO Conference on Long-Range Forecasting, Sep. 29-Oct. 3, Sofia.
- [19] Moura, A.D. and T. Shukla, 1981, On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 38, 2653-2675.
- [20] Keshavamurty, R.N., 1982, Response of the atmosphere to sea surface temperature anomalies over the equatorial Pacific and teleconnections of the Southern Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 39, 1241-1259.
- [21] Shukla, J. and J.M. Wallace, 1983, Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, 1613-1630.
- [22] Tokioka, T., Yamazaki, K. and M. Chiba, 1985, Atmospheric response to the sea surface temperature anomalies observed in early summer of 1983, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 63, 565-588.
- [23] 黄荣辉, 1985, 冬季低纬度热源异常在北半球对流层大气环流异常中的作用, 气象学报, Vol. 43, 411-423.
- [24] Gambo, K., Lu, L. (卢里), and Li, W.J. (李维京), 1987, Numerical simulation of Eurasian pattern teleconnection in the atmospheric circulation during the Northern Hemisphere winter, *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 4, 385-394.
- [25] Huang, R.H. (黄荣辉) and K. Gambo, 1983, The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources in summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 61, 495-509.
- [26] Huang, R.H. (黄荣辉) and Li, W.J. (李维京), 1988, Anomaly of the Subtropical High and its association with the propagations of the summer quasi-stationary planetary waves over East Asia, Summer School on Large-scale Dynamics of the Atmosphere, 5-20 August, 1988.
- [27] Huang, R.H. (黄荣辉) and Lu, L. (卢里), 1989, Numerical simulation of the relationship between the anomaly of the Subtropical High over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific, *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 6, 202-214.
- [28] 叶笃正, 高由禧, 1979, 青藏高原气象学, 科学出版社.
- [29] Nitta, T., 1983, Observational study of heat sources over the eastern Tibetan Plateau during the summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 61, 590-605.
- [30] Luo, H. (罗会邦) and M. Yanai, 1980, The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 108, 1840-1853.
- [31] Huang, R.H. (黄荣辉), 1985, The numerical simulation of the three-dimensional teleconnections in the summer circulation over the Northern Hemisphere, *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 2, 81-92.