

# 东亚季风边缘活动带研究综述

徐 袁, 钱维宏

(北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

**摘要:** 由于其同时具有的生态脆弱性和气候敏感性, 东亚季风边缘研究有利于加深认识季风以及生态系统在过渡带上的特性, 而且它对于国家的西部大开发战略以及南水北调工程都有重要的气候学指导意义。从天气学原理角度出发, 分析指出青藏高原等地形以及海陆热力差异是对东亚季风边缘影响的重要因子, ENSO 和全球变暖等因子对季风边缘活动也有影响。阐述了季风的年际变化, 季风边缘, 季风边缘进退等概念。通过对代用资料如湖相沉积, 湖面大小变化, 陆相沉积以及农牧交错带演变研究的综述, 对古季风的演变做了分析, 指出近几千年来干旱化趋势的存在。利用现有气象观测资料所作的东亚季风边缘的年际和年代际变化很少, 这是一个可以深入研究的方面, 已有的气候平均态的研究可以对此做一定的指导。同时, 北方干旱化和东亚冬季风边缘研究既有区别又有联系, 两方面相互促进。

**关 键 词:** 东亚季风边缘; 气候敏感性; 生态脆弱性; 古季风; 季风边缘进退; 年际

**中图分类号:** P462.4

## 1 问题的提出及其研究意义

近年来对季风的研究日益深入, 而中国是东亚季风的重要组成区域, 中国北方的干旱化问题也比较突出, 将二者结合在一起的研究也就提上了日程。季风每年能够影响的区域不同, 有的年份影响的区域大些, 有的年份小些, 有些区域季风每年都有很大的影响, 而有的区域只有在某些年份季风才可以影响到。这些由于季风的年际波动而形成的季风影响有的年份有, 有的年份没有的区域就叫做季风边缘活动区。这是一个带状区域, 是一个多年气候平均的概念。由于中国北方降水集中在夏季, 所以本文着重于东亚夏季风边缘研究。

### 1.1 季风定义

季风该如何定义是季风边缘研究中一个比较关键的因素, 它决定着该地是否被认为是季风区, 也就是季风现象所能影响的区域。

但就季风的定义而言, 全球学术界还没有一个统一的标准。Ramage (1971)<sup>[1]</sup>给季风做了如下定义: (1) 1 月和 7 月盛行风向的变化有  $120^\circ$ ; (2) 1 月与 7 月盛行风向的平均频率超过 40%; (3) 至少在 1 月和 7 月中有一个月的平均合成风超过  $3 \text{ m/s}$ ; (4) 在  $5^\circ$  经纬度矩形内, 这两个月份中每个月气旋与反气旋的交替出现至少每两年一次。Webster (1987)<sup>[2]</sup>提出了更普遍的一个季风定义: 冬夏风向的季节性反转和干湿期的季节性交替出现。Qian & Lee (2000)<sup>[3]</sup>又提出了“季风是热带水汽中心随越赤道气流向赤道外地区季节扩展”的定义。伍荣生 (1999)<sup>[4]</sup>概括为, 季风应具有三个特点: (1) 盛行风向随着季节变化而有很大差异, 甚至接近于相反; (2) 冬夏两种季风各有不同的源地, 因而气团性质有根本的不同; (3) 能给天气现象造成明显不同的季节性差异。

收稿日期: 2003-04-26; 修订日期: 2003-07-05

基金项目: 国家基础发展规划项目 (No. G1999043405) [Foundation Item: National Key Project for Basic Sciences, No. G1999043405]

作者简介: 徐袁 (1979-), 男, 江苏泰州, 硕士研究生, 研究方向为气候学。E-mail: pkuxuyuan@etang.com

由于季风定义中存在这样的差异,季风边缘范围的确定无论在年际和年代际变化还是在气候平均上都有很大的不确定性。但反过来,作为季风区和非季风区的分界,季风边缘的气候敏感性就会比较强,通过对它的研究,从其它方面了解其大致位置及其变化对于认识季风现象和正确定义季风就显得比较重要。

### 1.2 季风边缘带的生态学意义

气候决定着植被的地理分布,植被也反映了局地气候。植被作为气候系统圈层之一的生物圈中最重要的部分,对气候又有反作用。植被和气候的关系是一个重要的研究方向,其在植被带的划分上也起着重要的作用<sup>[5]</sup>。气温和降水是影响植被分布的两个主要的指标,如降水用以区别森林植被和非森林植被<sup>[6]</sup>。植被的过渡带在环境变化中也具有敏感性<sup>[7,8]</sup>。季风边缘由于年际之间受季风影响的不同,从而降水等气候指标变化就比较大,而这些地区的降水量本来就比较小,所以其雨量变化对植被的影响就更强烈一些,成为半干旱带,也是气候和生态系统的过渡地带。这些地区也经常是两种不同植被类型森林和草原的相交地带<sup>[9]</sup>,对于中国而言,是沙漠—黄土相接的地带,在农业上是农牧活动的交错地带,具有敏感性和可恢复性的双重特征,是土地利用方式变化最为剧烈的地区之一<sup>[10]</sup>。反过来,这些特征可以反映季风边缘的进退,在研究中起到了佐证的作用,同时,在有气象观测资料之前的时期,通过对这些特征的研究,可以反推季风边缘的进退,从而对认识现在季风边缘的大尺度趋势有比较好的作用。

因此对季风边缘带的研究就可以比较好的认识气候和生态系统在过渡带上的特性,对过渡带两侧的理解也会更加深刻,更加合理的划分植被类型带。对于比较全面的认识气候系统中生物圈和大气圈乃至其它圈层的关系都有比较好的帮助。

### 1.3 季风边缘带研究的现实意义

国家正在实行西部大开发战略,而其中重要的一步就是西部的生态环境建设,退耕还林、退耕还草是关键<sup>[11]</sup>。这其中必须以水热等气候因子所决定的植被生物地带性做依据<sup>[10,12]</sup>,否则,凭主观判断,就会破坏大自然的整体平衡,导致“局部改善,整体恶化”或“短期改善,长期恶化”的结局<sup>[10]</sup>。在适合还草的地方还林,很可能会加剧生态的恶化。对于这些地区的短期和长期变化趋势应该有一个比较好的了解,从而对现在的工作有科学的规划。季风边缘带作为其中的重要区域,其研究对于国家的这项战略就有着深远的意义。

我国水资源丰度南北差别较大,黄河流域单位面积产出的淡水资源仅为长江流域的1/8<sup>[13]</sup>,而随着北方国民经济的发展,对淡水的需求也在日益扩大,为此,国家提出了南水北调的宏大工程,并于近期正式动工。季风边缘区是重要的半干旱区,它是南水北调工程目的供水区的组成区域。

这两者的投资都很大,对东亚季风边缘的研究工作为之提供了气候学的背景,为工程的正确开展给予指导。

## 2 影响季风边缘活动的因素

对季风成因的了解有助于认识季风的影响因素,对把握季风边缘活动的原因及变化趋势有比较好的帮助。这方面的研究很多,下面首先就天气学原理方面做一个大致的分析,并主要针对东亚季风边缘谈一谈各因子的作用。

(1) 行星风带(或赤道辐合带,ITCZ)的季节性南北移动是季风的重要成因,而它并不依赖于海陆的热力差异<sup>[14]</sup>。这种现象以低纬地区(30°N~30°S)最为显著<sup>[4]</sup>。对于主要位于中纬的东亚季风边缘,这种因子影响较小。

(2) 海陆热力差异。东亚地区的海陆分布主要为东西向,而热力对比对大气环流起

着决定性的作用。夏季海上的副热带高压和大陆上的印度低压, 以及冬季海上的阿留申低压和大陆上的西伯利亚高压几乎在同一纬度, 气压梯度就主要为东西向, 大尺度流场主要遵循地转风关系, 从而东亚地区的环流场呈现出经向风场为主的特征, 这样海陆热力差异以及相应的大气活动中心强度就成为影响东亚季风边缘进退的重要因素。

(3) 青藏高原的作用。东亚季风气候变化非常敏感地响应于高原隆升, 且高原隆升对东亚冬季风的影响远大于对夏季风的影响; 从温湿状况看, 大约长江以北的东亚北方季风强度随高原高度上升几乎呈线性增加, 冬夏温度对比不断加大, 降水也越来越向夏季集中<sup>[15, 16]</sup>。青藏高原对季风环流的影响, 既有热力作用又有地形动力作用。边界层受到地面的影响最大, 对于其上空的大气来说, 青藏高原在夏季是个热源, 冬季是个冷源<sup>[17]</sup>, 和周围大气有比较大的东西向和南北向的温度梯度, 除了北美西部山地所造成的比较弱的类似效应之外, 其它地方都没有显示<sup>[18, 19]</sup>, 因此, 作为世界上最大最高的高原, 青藏高原在季风的形成中起到了重要的作用, 对于季风边缘地区来说就更是如此。深厚的高原边界层特征将使河套地区与黄河流域的夏季云量及降水有所减少<sup>[20]</sup>。青藏高原热力作用的变化与季风边缘进退的关系是值得研究的一个方面。

大兴安岭—太行山系的作用。从东亚地区地形图上可以看出, 山脉的走向大致为东北—西南走向, 这些山脉的高度大约在 1000~2000 m, 除了气温随高度上升而下降的效应之外, 从东南面来的气流在沿山脉爬升时由于降水造成的水汽损失对降水也有显著的影响<sup>[21]</sup>。

(4) 南北半球气流的相互作用。南北半球之间通过越赤道气流产生影响, 而这种越赤道输送在季风区最为明显。在北半球夏季, 亚洲南部两支季风环流都起源于南半球高压系统<sup>[22]</sup>, 越赤道气流成为影响季风爆发和季风推进的一个重要因素, 在东亚季风区其作用可以延伸至中纬度的季风边缘<sup>[23]</sup>, 但其作用对东亚季风边缘而言重要性比不上前两个因素, 对季风仅起到了加强的作用<sup>[9]</sup>。

除了以上几个重要因素之外, 还有对全球气候都有比较大的影响的一些因素, 通常认为比较重要的有:

(5) ENSO。ENSO 对太平洋上空的 Walker 环流有明显的作用, 而 Walker 环流与南亚季风环流存在选择性相互作用<sup>[24]</sup>, 这种作用在 1976 年左右发生了变化, 相关由强变弱<sup>[25]</sup>, 这两支纬向环流与东亚—印尼的经向环流又有相互作用<sup>[19]</sup>。通过大气环流, 使得 ENSO 得以对东亚季风边缘进退产生一定的影响。ENSO 与东亚季风之间的关系存在十年际或者更长尺度的振荡, 高相关期和低相关期的大气环流年际变化是不同的<sup>[26]</sup>。这种关系的变化对于中国的北方干旱化以及季风边缘进退到底有什么样的影响还不太清楚。

(6) 全球变化。很可能与温室气体增加相关的全球变暖会导致亚洲夏季风降水变率的加大, 影响季风的平均持续时间和强度<sup>[27]</sup>。在这个背景下, 东亚季风边缘会产生什么样的响应还不清楚。人类活动对地面植被的改变对气候也有强烈的反作用, 这在北方干旱化问题中是一个重要的方面。

(7) 高空西风急流。大气环流对于降水等气候要素变化有着比较直接的影响。在东亚季风边缘所在的中纬度, 内陆地区主要受到高空西风急流的影响, 而沿海地区主要受到季风环流的影响, 这样就造成了一段二者影响势均力敌的地区, 气候同时受到二者的影响, 也就是季风边缘地区。所以, 高空西风急流的变化对于季风边缘研究具有十分重要的意义。如中国东北地区夏季降水就显著的受到亚洲季风系统和高空西风急流位置和强度的影响, 东亚大槽、高纬和极区大气环流特征等对其也有很重要的作用<sup>[28]</sup>。因此, 从大气环流角度考虑各种能影响东亚季风边缘的系统, 如大气活动中心 (对东亚意义很大的冬夏各一对分别位于海陆的高低压中心)、极涡、西风带槽脊移动、高空西风急流位置强度等等, 也具有显著意义。



### 3 东亚季风边缘进退的研究

东亚季风边缘带是指东亚夏季风年际波动在内陆一侧所影响的区域,大致与中国北方农牧交错带一致。由于年降水量的多寡成为本区生态环境发生发展和变化的主导因子,所以史正涛等采用年降水量大致为 200~450 mm (或 500 mm) 的区域为我国季风边缘带的范围,并给出了季风边缘区域的大致位置,这也是一个自然灾害的多发区<sup>[29]</sup>。如果季风的年际变化上叠加了一个时间尺度更长的变化,就会产生季风边缘进退的概念,即多年气候平均的季风边缘在世纪或更长的时间上有前进或后退的变化。因此,由于气象观测资料时间长度的限制,对时间尺度比较大的季风边缘进退的研究就要借助很多代用资料,比如黄土、花粉、颗粒物尺寸分布、有机碳含量、湖面大小变化、树木年轮等等。

现在的东南季风气候形成于渐新世 (38~24 Ma B.P.)<sup>[30, 31]</sup>,在中新世 (24~6.5 Ma B.P.) 中期显著加强,而亚洲冬季风系统形成于中新世晚期及上新世 (3.4~2.5 Ma B.P.) 早期,第四纪以来主要表现为季风环流强度的变化与气候波动周期的改变<sup>[31]</sup>。而代用资料的获取在一万年以来的全新世是比较多的,而且这一时期是对人类影响最大,对未来预测最有用的,所以在对季风边缘进退问题的讨论中,主要论及全新世的情况,对更大时间尺度仅做提及。

湖泊沉积记录的环境演变研究是 PAGES 的重要研究领域之一,已经变得十分活跃<sup>[32]</sup>。湖泊沉积及湖面的扩张等作为古气候学研究的一个重要的资料来源<sup>[33, 34]</sup>,能有效的弥补研究资料序列长度不够的缺点。而且湖相沉积相对于陆相沉积而言更稳定,可信度更高。通过对于地处季风边缘带的内蒙古达拉诺尔<sup>[35]</sup>,内蒙古凉城的岱海<sup>[34, 35]</sup>,青海湖<sup>[34, 36]</sup>,内蒙古调角海子<sup>[37]</sup>,河北省张北县安固里淖<sup>[38]</sup>等湖泊的研究,对 7000 年来的东亚季风边缘区的气候变迁有了初步认识。由它们反映出的信息以及其它研究<sup>[39]</sup>,可以推断大致在 7200~6000 a BP 东亚季风的推进可以达到比现在更北的多的很广的区域,而 6000 a BP 以来,季风边缘在波动中有一个总体后退的趋势。湖面的大小变化也显示出了干旱化的趋势<sup>[40]</sup>。对该地区掖马湖的研究表明,近 4200 年来气候的干旱化趋势明显,并且近 2500 年来受到人类活动的强烈影响<sup>[41]</sup>。Qin 等对亚洲大陆 18 000 到 6000 年前的湖面高度在气候学上的应用做了综述,指出现在很多湖都比较一致的处于低水位<sup>[42]</sup>,也表明现在是一个干旱期。

陆相沉积中,黄土—风成沙的交叠是一个重要的方面。黄土高原在北部与诸多沙漠相接,如毛乌素沙漠,腾格里沙漠等等。这些沙漠—黄土的分界由于风的搬运作用在季风强弱不同的时期就会有不同的反映,呈现出沙层和黄土层在沉积截面上相互覆盖的现象。同样,同时具有生态脆弱性与气候敏感性的双重特点,对于这样的现象的研究就可以反推季风强弱在不同时期的变化特征。对于 PAGES 研究,这些地区同样具有重要的意义<sup>[43, 44]</sup>。现在的沙漠南缘大约比全新世最适宜期低了 3 个纬度,显示了干旱化的趋势<sup>[45]</sup>。

通过对中国西北部干旱区盐湖沉积物,黄土沉积以及冰川进退的研究得出,3500 a BP 以来,该地区沙漠扩张,黄土沉积速度加快,而全新世季风和中纬度西风联合控制着中国北方的干旱区,季风控制区域,一年中气候呈暖湿和冷干交替特征,而内陆的西风控制区则呈现冷湿和暖干气候<sup>[46]</sup>,东亚季风边缘的进退也就意味着这两种不同气候特征平均控制区域的变化。通过对沉积物中花粉的研究发现,在东亚季风边缘区,降水梯度在空间上呈显著的东南—西北向并在不同时期不同,这一特征被认为是西南季风和地形共同作用的结果<sup>[47]</sup>。

农牧交错带在很大程度上与季风边缘带重合,它的演变可以对东亚季风边缘进退起

到佐证的作用。而我中华文明源远流长, 基于史料的记载和其它分析, 就可以对几千年来农牧交错带的演变有一个大致的了解。王静爱等对于农牧交错带的划分以及划分依据做了综述, 指出其核心区域大致都为内蒙古高原东南边缘和黄土高原北部, 半干旱气候<sup>[48]</sup>。而其演变可以反映季风边缘的进退, 随着农业和牧业在这一地区发达程度的不同和演变<sup>[49, 50]</sup>, 可以推知当时气温和降水等气候要素的演变情况, 从一个侧面反映季风边缘进退。中国北方农牧交错带与非洲 Sahel 带均处于季风边缘地带, 其自然环境及其变化主要受季风强弱及南北摆动的控制, 除温度条件外, 具有很大的相似性: 两个地区在千年尺度和世纪尺度的波动变化规律基本一致, 且都在波动中趋于干旱化<sup>[51]</sup>。

当然, 农牧交错带的生态环境恶化和土地沙漠化的原因很多, 气候干旱化, 脆弱的地表物质基础和土体构型, 东亚季风边缘后退等气候原因和不合理的人类活动干扰和破坏都是不容忽视的<sup>[44, 52-54]</sup>, 应以系统的眼光来看待这些问题<sup>[53]</sup>。

## 4 对东亚季风北界年际和年代际变化的研究

在年际变化上, 多雨期和少雨期在中国的农牧交错带和非洲 Sahel 带都有 10~20a 左右的周期变化, 在干湿年代的转换方面, 非洲 Sahel 带较中国农牧交错带提前 5a 左右进入少雨期或多雨期<sup>[51]</sup>。就生态环境的总趋势而言, 中国农牧交错带的恶化趋势明显<sup>[55]</sup>。由于东亚夏季风的逐年年际变化主要表现在它的建立和撤退时间的迟早, 季风强度的变化以及季风盛行期内季风成员中断时间的长短及重复出现的次数等方面, 具体体现在东亚季风系统各组成成员的年际振荡及由其导致的气候主要要素气温降水的年际变化上, 因此一般用冬季气温和夏季降水来描述东亚冬夏季风的年际变化特征<sup>[56]</sup>。陶诗言和陈隆勋根据雨季和风向的变化, 定出亚洲夏季风建立的平均日期线, 从该图上也可以大致看出东亚季风边缘在该时期平均位置<sup>[57]</sup>。为了更客观的显示各地区雨季的开始, 对雨季开始日做了如下定义:  $C_N = [R(N)/N]/[R(\text{年})/365]$ , 降水相对系数  $C_N$  反映了计算的  $N$  日内, 日平均降水量  $R$  相对于全年的日平均降水量  $R$  的大小程度, 某一场雨后 (指日降水量  $\geq R_x$ , 单位: mm),  $C_5, C_{10}, C_{15}$  均  $\geq C_x$ , 则定义这个雨日为雨季开始日, 对不同地区  $R_x$  和  $C_x$  的取值不同, 对东亚季风边缘所在的华北和东北地区,  $R_x = 10.0, C_x = 1.8$ , 仅有候平均资料时, 则直接用候降水量和全年总降水量百分率大于 2% 来定义雨季开始<sup>[58]</sup>。照此, 对逐年作分析, 就可以对东亚季风边缘进退的年际和年代际变化有比较好的了解, 这是可以做的一项工作。

高原主体地表反射率增加是我国短期气候变化的重要控制因子之一, 它能造成东亚夏季风和高原夏季风的显著减弱, 使夏季我国东部季风区北方变暖, 南方变冷, 季风降水普遍减少<sup>[59]</sup>。这一方面还有待进一步的研究。

## 5 总结

季风已经成为研究的热点问题, 由于季风定义中存在差异, 季风边缘范围的确定无论在年际和年代际变化还是在气候平均上都有很大的不确定性。但反过来, 作为季风区和非季风区的分界, 季风边缘的气候敏感性就会比较强, 通过对它的研究, 从其它方面了解其大致位置及其变化对于认识季风现象和正确定义季风就显得比较重要。对季风边缘带的研究还可以比较好的认识气候和生态系统在过渡带上的特性, 对过渡带两侧的理解也会更加深刻, 更加合理的划分植被类型带。对于比较全面的认识气候系统中生物圈和大气圈乃至其它圈层的关系都有比较好的帮助。同时它可以对我国正在进行的西部大开发战略和南水北调工程提供气候学指导。

由于季风产生的原因对季风以及季风边缘都有十分重大的影响,所以本文从天气学原理出发,分析了行星风带的南北移动,海陆热力差异,青藏高原和其它地形的作用,南北半球气流的相互作用的影响,指出对东亚季风边缘而言,海陆热力差异以及青藏高原和其它地形的作用是最大的影响因子,应该成为研究的重点。同时,提出了对全球气候影响较大的 ENSO 和全球变暖等因子,这也是研究东亚季风边缘进退原因时需要考虑的方面。

东亚季风自建立始,就有了东亚季风边缘的概念,它是指由于季风的年际波动而形成的季风影响有的年份有、有的年份没有的区域,而季风边缘进退就是一个更长时间尺度上的概念,指多年气候平均的季风边缘在世纪或更长的时间上有前进、后退或扩张、收缩的变化。由于气象观测资料时间长度的限制,对时间尺度比较大的季风边缘进退的研究就要借助很多代用资料。这是与研究季风边缘的年际和年代际变化不同的,它们可以利用现有的气象观测资料。通过气候代用资料对古气候的研究有助于认识东亚季风边缘的大尺度变化规律,从而对年际和年代际的研究提供大背景的指导。季风边缘带、沙漠—黄土交错带、农牧交错带等在地理区域上相近但又着眼于不同角度的地带都同时具有生态脆弱性和气候敏感性的特点。7200~6000a BP 东亚季风的推进可以达到比现在更北的多的很广的区域,而 6000a BP 以来,季风边缘在波动中有一个总体后退的趋势。并且夏季风强弱变化在相对干旱的中晚全新世中 1.6ka 的周期表现明显。现在的沙漠南缘大约比全新世最适宜期低了 3 个纬度,也显示了干旱化的趋势。中国北方降水梯度在空间上呈显著的东南—西北向并在不同时期不同,这一特征被认为是西南季风和地形共同作用的结果,而同时中国北方农牧交错带与非洲 Sahel 带均处于季风边缘地带,其自然环境及其变化主要受季风强弱及南北摆动的控制,除温度条件外,具有很大的相似性:两个地区在千年尺度和世纪尺度的波动变化规律基本一致,且都在波动中趋于干旱化。在全新世季风和中纬度西风控制着中国北方的干旱区,季风控制区域,一年中气候呈暖湿和冷干交替特征,而内陆的西风控制区则呈现冷湿和暖干气候,东亚季风边缘的进退也就意味着这两种不同气候特征控制区域的变化。

对东亚季风边缘的定义目前大都以降水量作为指标,由此思想出发,对雨季开始时间做了定义,除了气候平均的工作之外,可以推知季风年际的推进,从而对季风边缘的年际和年代际变化做一个大致的了解。但由于降水很强的局地性,第二部分述及的地形等的影响,其间对大尺度的气候场的体现中夹杂了小尺度的噪声,从而对季风的影响范围的把握就会有一个偏差,因此从大尺度着眼,从大气环流角度来定义季风边缘应该会有好的结果。

高原主体地表反射率增加是我国短期气候变化的重要控制因子之一,它能造成东亚夏季风的显著减弱,使夏季我国东部季风区北方变暖,南方变冷,季风降水普遍减少。

现在对于北方干旱化问题已经有了不少的研究工作,它与东亚季风边缘的研究既有联系又有区别。由于降水很强的局地性以及区域气候与地表植被有比较强的相互作用<sup>[60]</sup>,北方的干旱化问题就应该是在大尺度的气候背景上叠加了小尺度的区域气候,是两方面综合作用的结果。而东亚季风边缘研究着重于大尺度的气候研究,且其重点放在了季风强弱变化,影响范围的变化等方面,其研究结果可以作为北方干旱化问题的背景之一,是引起北方干旱化的原因之一。

## 参考文献 (References)

- [1] Ramage C. Monsoon Meteorology. New York: Academic Press, 1971. 4-6.
- [2] Webster P J. The elementary monsoon. In: J S Fein, P L Stephens (eds.), Monsoons. A Wiley-Interscience Publication, 1987. 3-32.

- [3] Qian W H, Lee D K. Seasonal march of Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 1371-1386.
- [4] Wu Rongsheng. *Principle of Modern Synoptic Meteorology*. Beijing: Higher Education Press, 1999. 209-236. [伍荣生. 现代天气学原理. 北京: 高等教育出版社, 1999. 209-236.]
- [5] Fang Jingyun, Song Yongchang, Liu Hongyan et al. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China, 2002. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [6] Woodward E I. *Climate and Plant Distribution*. London: Cambridge University Press.
- [7] Fu Congbin, Ye Duzheng. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19: 116-126. [符淙斌, 叶笃正. 全球变化和我国生存环境. *大气科学*, 1995, 19: 116-126.]
- [8] Fu Congbin. Transitional climate zone and biome boundaries. In: A J Hansen, F di Castri (eds.), *Landscape Boundaries, Ecological Studies 92*. New York: Springer-Verlag, 1992. 394-402.
- [9] Li Zhenji, Chen Xiaolin, Zhen Hailei et al. (ed.). *Ecology*. Beijing: Science Press, 2000. 229-234. [李振基, 陈小麟, 郑海雷 编著. *生态学*. 北京: 科学出版社, 2000. 229-234.]
- [10] Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in northern China. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(1): 22-29. [符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. *气候与环境研究*, 2002, 7(1): 22-29.]
- [11] State Council of People's Republic of China. Several advices on replanting forest and grassland from agrarian. *China Forestry*, 2000, (10): 3-4. [国务院. 关于进一步做好退耕还林还草试点工作的若干意见. *中国林业*, 2000, (10): 3-4.]
- [12] Yu Guirui, Xie Gaudi, Wang Qiufeng et al. Considerations to some issues on vegetation rehabilitation in western China. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 216-220. [于贵瑞, 谢高地, 王秋凤 等. 西部地区植被恢复重建中几个问题的思考. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 216-220.]
- [13] Zhang Hongren. Problems of freshwater resource of China. *Environmental Protection*, 2001, (5): 3-7. [张宏仁. 中国的淡水资源问题. *环境保护*, 2001, (5): 3-7.]
- [14] Chao W C, Chen B. The origin of monsoons. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 58: 3497-3507.
- [15] Liu Xiaodong, Jiao Yanjun. Sensitivity of East Asia monsoon climate to the Tibetan Plateau uplift. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(5): 593-607. [刘晓东, 焦彦军. 东亚季风气候对青藏高原隆升的敏感性研究. *大气科学*, 2000, 24(5): 593-607.]
- [16] Liu X D, Yin Z Y. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 183(3-4): 223-245.
- [17] Ye Duzheng, Gao Youxi. *Meteorology of Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 1979. [叶笃正, 高由禧. *青藏高原气象学*. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [18] Li C, M Yanai. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast. *Journal of Climate*, 1996, 9: 358-375.
- [19] Webster P J, Magana V O, Palmer T N et al. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C7): 14,451-14,510.
- [20] Zhuo Ge, Xu Xiangde, Chen Lianshou. Dynamical effect of boundary layer characteristics of Tibetan Plateau on general circulation. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 13(2): 163-169. [卓嘎, 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原边界层高度特征对大气环流动力学效应的数值试验. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 163-169.]
- [21] Qian W H, H-S Kang, D-K Lee. Distribution of seasonal rainfall in the East Asian monsoon region. *Theoretical Applied Climatology*, 2002, 73: 151-168.
- [22] Huang Shisong et al. The summer rainy season of the middle-lower reaches of the Yangtze River and the atmospheric circulation in low latitudes. In: *Proceedings of the International Conference of the General Circulation of East Asia*, 1987. 121-126.
- [23] Qian W H, Y Deng, Y Zhu. Demarcating the worldwide monsoon. *Theoretical Applied Climatology*, 2002, 71: 1-16.
- [24] Webster P J, Yang Song. Monsoon and ENSO: selectively interactive systems. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1992, 118: 877-926.
- [25] Kinter J L III, Miyakoda K, Yang S. Recent change in the connection from the Asian Monsoon to ENSO. *Journal of Climate*, 2002: 1203-1215.
- [26] Wang Huijun. The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(1): 1-11.
- [27] *Climate Change 2001. The Scientific Basis*, IPCC Report, Work Group I.
- [28] Sun Li, An Gang, Lian Yi et al. The unusual characteristics of general circulation in drought and waterlogging years of Northeast China. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(1): 102-113. [孙力, 安刚, 廉毅 等. 中国东北地区夏季旱涝的大气环流异常特征. *气候与环境研究*, 2002, 7(1): 102-113.]



- [29] Shi Zhengtao. Regional characters of natural disaster in marginal monsoon belt of China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1996, 10(4): 1-7. [史正涛. 中国季风边缘带自然灾害的区域特征. 干旱区资源与环境, 1996, 10(4): 1-7.]
- [30] An Zhisheng, Liu Xiaodong. History and variability of East Asia monsoon climate. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 238-249. [安芷生, 刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率. 科学通报, 2000, 45(3): 238-249.]
- [31] Liu Dongsheng, Zhen Mianping, Guo Zhengtang. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia. *Quaternary Sciences*, 1998, (3): 194-204. [刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. 第四纪研究, 1998, (3): 194-204.]
- [32] Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress of lake deposition and environmental evolution research in China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(6): 579-587. [王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587.]
- [33] Williams M A J, Dunkerley D L, De Dekker P et al. *Quaternary Environment*. Translated by Liu Dongsheng. Beijing: Science Press, 1997. 7-11; 87-99. [Williams M A J, Dunkerley D L, De Dekker P 等著. 第四纪环境. 刘东生 译. 北京: 科学出版社, 1997. 7-11; 87-99.]
- [34] Wang Sumin, Li Jianren. Lake deposition--effective methods to study historical climate: to take Qinghai Lake and Dai Lake as examples. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(1): 54. [王苏民, 李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段——以青海湖和岱海为例. 科学通报, 1991, 36(1): 54.]
- [35] Li Rongquan, Zhen Liangmei, Zhu Guorong. *Lake and Environment Change on Inner Mongolia Plateau*. Beijing: Beijing Normal University Press, 1990. 1-219. [李容全, 郑良美, 朱国荣. 内蒙古高原湖泊与环境变迁. 北京: 北京师范大学出版社, 1990. 1-219.]
- [36] Kong Zhaochen, Du Naiqiu, Shan Fashou et al. Vegetation evolution and climate change of Qinghai Lake in Holocene: numerical analysis on QH85-14C Spores. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1990, 10(3): 79. [孔昭宸, 杜乃秋, 山发寿 等. 青海湖全新世植被演变及气候变迁——QH85-14C 孔孢粉数值分析. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 79.]
- [37] Song Changqing, Wang Fengyu, Sun Xiangjun. Indication of vegetation change of DJ Drill in Daqing Mountain of Inner Mongolia in Holocene. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(7): 568. [宋长青, 王淦瑜, 孙湘君. 内蒙古大青山 DJ 钻孔全新世古植被变化指示. 植物学报, 1996, 38(7): 568.]
- [38] Qiu Weili, Qu Qiumin, Hu Haibo et al. Holocene water level changes of Angulinao Lake and their environmental significance. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 1999, 35(4): 542-548. [邱维理, 翟秋敏, 扈海波 等. 安固里淖全新世湖面变化及其环境意义. 北京师范大学学报(自然科学版), 1999, 35(4): 542-548.]
- [39] Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin et al. Fundamental characteristics of climate and environment in Great Warm Period in Holocene in China. In: Shi Yafeng (ed.), *Climate and Environment in Great Warm Period in Holocene in China*. Beijing: Ocean Press, 1992. 1-18. [施雅风, 孔昭宸, 王苏民 等. 中国全新世大暖期气候与环境的基本特征. 施雅风主编, 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 1-18.]
- [40] Shi Q, Chen F H, Zhu Y, Madsen D. Lake evolution of the terminal area of Shiyang River drainage in arid China since the Last Glaciation. *Quaternary International*, 2002, 93(4): 31-43.
- [41] Chen F H, Shi Q, Wang J M. Environmental changes documented by sedimentation of Lake Yiema in arid China since the Late Glaciation, Sept 1999. *Journal of Paleolimnology*, 22(2): 159-169.
- [42] Qin B Q, Yu G. Implications of lake level variations at 6 ka and 18 ka in mainland Asia. *Global and Planetary Change*, 1998, 18 (1-2): 59-72.
- [43] Sun Jimin, Ding Zhongli, Liu Dongsheng. Environmental evolution of the desert-loess transitional zone over the last 0.5 Ma. *Arid Land Geography*, 1995, 18(4): 1-9. [孙继敏, 丁仲礼, 刘东生. 50 万 a 来沙漠—黄土交界带的环境演变. 干旱区地理, 1995, 18(4): 1-9.]
- [44] Jin H L, Dong G R, Su Z Z et al. Reconstruction of the spatial patterns of desert/loess boundary belt in North China during the Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(12): 969-975.
- [45] Zhou W J, Wu Z K, Jull A J T et al. Environmental and climatic change as recorded in geological sediments from the arid to semi-arid zone of China (Part 2). *Radiocarbon*, 2001, 43(2B): 619-627.
- [46] Ji J J. Climatic change in arid areas of China and monsoon fluctuations during the past 10 k years. *Journal of Arid Environments*, 1996, 32(1): 1-7.
- [47] Liu H Y, Cui H T, Tian Y H et al. Temporal-spatial variances of Holocene precipitation at the marginal area of the East Asian monsoon influences from pollen evidence. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(7): 864-871.
- [48] Wang Jing'ai, Xu Xia, Liu Peifang. Land Use and land carrying capacity in ecotone between agriculture and animal husbandry in northern China. *Resources Science*, 1999, 21(5): 19-25. [王静爱, 徐霞, 刘培芳. 中国北方农牧交错带土



- 地利用与人口负荷研究. 资源科学, 1999, 21(5): 19-25.]
- [49] Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu et al. Environmental changes in the North China farming-grazing transitional zone. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1-2): 127-136. [张兰生, 方修琦, 任国玉 等. 我国北方农牧交错带的环境演变. 地学前缘, 1997, 4(1-2): 127-136.]
- [50] Wu Honglin. The variation of land use patterns in the agro-pastoral zone in northern China. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(4): 91-95. [武弘麟. 历史上中国北方农牧交错带土地利用演变过程. 水土保持研究, 1999, 6(4): 91-95.]
- [51] Shi Peijun, Ha Si. Comparison between Holocene environmental changes in North China agro-pastoral zone and Africa Sahelian belt. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 121-128. [史培军, 哈斯. 中国北方农牧交错带与非洲萨哈尔地带全新世环境变迁的比较研究. 地学前缘, 2002, 9(1): 121-128.]
- [52] Hu Chunyuan, Gui Chensen, Yan Lin et al. Discussion on the causes of desertification process and countermeasures. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(3): 130-132. [胡春元, 桂呈森, 闫琳 等. 沙漠化本质原因分析及防止策略探讨. 水土保持研究, 2002, 9(3): 130-132.]
- [53] Wang Aijun. Discussion on genetic mechanism and countermeasure of desertification in China viewed from the system theory. *Resources Survey & Environment*, 2002, 23(3): 220-226. [王爱军. 以系统观点讨论中国沙漠化的成因机制及对策. 资源调查与环境, 2002, 23(3): 220-226.]
- [54] Luo Chenping, Xue Jiyu. Ecologically vulnerable characteristics of the farming-pastoral zigzag zone in northern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1995, 9(1): 1-7. [罗承平, 薛纪瑜. 中国北方农牧交错带生态环境脆弱性及其成因分析. 干旱区资源与环境, 1995, 9(1): 1-7.]
- [55] Zhou Daowei, Lu Wenxi, Xia Lihua et al. Grassland degradation and soil erosion in the eastern ecotone between agriculture and animal husbandry in northern China. *Resources Science*, 1999, 21(5): 57-61. [周道伟, 卢文喜, 夏丽花 等. 北方农牧交错带东段草地退化与水土流失. 资源科学, 1999, 21(5): 57-61.]
- [56] Xiang Bao, Liu Jiyuan. Relationship between East Asian land cover dynamic and monsoon climate interannual variability. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 39-46. [香宝, 刘纪远. 东亚土地覆盖动态与季风气候年际变化的关系. 地理学报, 2002, 57(1): 39-46.]
- [57] Tao S Y, L X Chen. *The East Asian Summer in Reviews in Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, 1987.
- [58] Chen L X, Li Wei, Zhao Ping et al. On the process of summer monsoon onset over East Asia. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(4): 345-355. [陈隆勋, 李薇, 赵平 等. 东亚地区夏季风爆发过程. 气候与环境研究, 2000, 5(4): 345-355.]
- [59] Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. An important leading to short-term climatic variation in China: the change in the surface albedo in Tibetan Plateau. *Journal of Tropical Meteorology*, 1996, 12(8): 240-245. [刘晓东, 马柱国. 中国短期气候变化的一个重要原因——青藏高原地表反射率的变化. 热带气象学报, 1996, 12(8): 240-245.]
- [60] Zhao Ming, Zeng Weimin. A theoretical analysis on the local climate change induced by the change of landuse. *Adv. Atmos. Sci.* 2002, 19(1): 45-63.
- [61] Zhen Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian et al. The effects of vegetation change on regional climate I: simulation results. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(1): 1-16. [郑益群, 钱永甫, 苗曼倩 等. 植被变化对中国区域气候的影响 I——初步模拟结果. 气象学报, 2002, 60(1): 1-16.]

## Research on East Asian Summer Monsoon: A Review

XU Yuan, QIAN Weihong

(Department of Atmospheric Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** This paper summarizes the researches on the marginal active belt of East Asian summer monsoon. A range of sections are presented, dealing with the meaning of this research, the influencing factors in marginal monsoon activity, and studies on advance and retreat of monsoonal margins as well as interannual and interdecadal variations of northern boundary of East Asian summer monsoon.

**Key words:** East Asia; monsoonal margin; climate sensitivity; ancient monsoon; ecological vulnerability; advance and retreat of summer monsoon