

李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 等. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 305-314, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00030.

中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展

李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 陈练

(南京信息工程大学 大气科学学院/气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 东亚副热带夏季风北边缘带作为季风区和非季风区的过渡带, 对我国西北地区东部、华北和东北地区, 特别是黄河流域的天气、气候变化和极端灾害性天气气候事件的发生具有重要影响。本文回顾了有关中国夏季风北边缘带的定义、边缘带的空间界定和变化特征以及边缘带内气候变化趋势等不同角度的主要研究进展, 并总结了影响夏季风北边缘带变化的可能因子。东亚副热带夏季风北边缘带是位于东亚大陆性气候系统与海洋性气候系统的交界区, 在现代气候上表现为东北—西南向的半干旱、半湿润气候区。边缘带内气候变化复杂、自然灾害多以及影响因素多。最后提出了现有研究中关于夏季风北边缘时空分布精细化等方面的一些不足和值得进一步研究的问题。

关键词: 东亚副热带夏季风; 季风边缘带; 气候特征

文章编号: 1000-0534(2013)01-0305-10 中图分类号: P461 文献标志码: A

doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00030

1 引言

我国位于欧亚大陆东部, 大部分区域地处东亚季风区, 东亚季风带来的影响极其深远, 涉及农业、生态、经济和生活等各个层面^[1]。

季风在全球很多地区都有存在。钱维宏^[2]根据季风低层风向季节转变、干湿季节转换和季风与越赤道气流的联系给出了亚洲季风区、澳大利亚季风区、北非季风区和南北美洲季风区的地理分布。季风区在南北半球都存在着边界线, 在东亚副热带地区, 夏季风的影响边界斜贯我国东北至西南地区, 大致处于半干旱半湿润区。由于东亚副热带夏季风的年际波动, 有的年份对这一区域有影响, 有的年份没有影响, 在气候学上称该区域为东亚副热带夏季风北边缘带(下称季风边缘带或边缘带)^[3]。季风边缘带是一条独特而重要的带状区域, 同时又是我国的生态脆弱带和农牧业交错带^[4]。生态脆弱意味着自然条件差, 灾害比较多; 农牧交错意味着不同农、牧耕作习惯的融合, 可见加强其研究不仅有利于加深对该区域气候变化的认识, 做好防灾减灾, 为本地区国民经济和人民生产生活服务, 因地制宜

发展当地经济, 合理开发当地资源有着重要的意义。

因此, 本文在文献^[5]的基础上, 首先回顾了有关副热带夏季风北边缘带的地理、气候特征、空间结构及气候变化趋势等不同角度的主要研究进展, 然后总结了影响夏季风北边缘带变化的可能因子, 最后提出了目前关于夏季风北边缘时空分布精细化等方面研究的不足, 并对进一步研究进行了展望。

2 夏季风北边缘带的地理特征

夏季风边缘带是各种相对均衡要素之间的“突变转换”或“异常空间的邻接”, 即为分界面。静态地看, 根据地理环境、生态环境和气象条件不连续状况划分边缘带的空间区域, 则夏季风边缘带范围是相对固定的, 由几种不同性质的气候因素、地理因素和自然(或人工)生态系统所组成。

2.1 地理灾变环境

从地理学角度进行夏季风边缘带的空间界定, 其分布主要包括内蒙古东北部、河北西北部、山西西部、陕西北部、宁夏南部、甘肃河东、青海东部、

收稿日期: 2011-11-18; 定稿日期: 2012-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40875059); 公益性行业专项(GYHY201006038); 2011年度高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(博导类)(20113228110003); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)共同资助

作者简介: 李栋梁(1957-), 男, 甘肃通渭人, 教授, 主要从事气候动力学、气候变化和预测研究. E-mail: lidl@nuist.edu.cn

川西山地、藏东南和云南西北部的广大地区^[6]。另外,祁连山虽处甘肃中西部,由于地形作用,也属于边缘带范围,其东部由于夏季东南季风和西南季风的影响,降水明显较西部和北部多。

季风边缘带常被称为灾害频发带,包括了我国山地、黄土高原和青藏高原三大地貌单元,地理环境极为复杂,众多的自然地理单元交互作用。该区域存在明显的内应力梯度、外应力梯度、硬度梯度和浓度梯度等,容易产生在构造变动、外力侵蚀、坡形变化和污染程度上的过渡区^[7]。边缘区表现为地形破碎、山高谷深、山体陡峻和地质作用形成的大量松散岩土体堆积于地表等特点,因此滑坡和泥石流灾害发生频率高,危害严重^[8]。该区内的地质构造界面常以断裂带形式出现,这些断裂带中最活跃的部分就构成了我国著名的南北地震带^[9],给我国人民带来了极大的灾难。由于季风边缘带自身地质、地理的孕灾环境,导致各类自然灾害的形成,同时更易伴随一些次生灾害的发生,从而增大了灾害的强度,对原有灾害起着放大作用,严重威胁着该区的生态,可以说边缘带的生态比其他地区更为脆弱。

2.2 农牧交错环境

从植被生长角度进行夏季风边缘带的空间界定,其分布主要为草原区和荒漠区的交界带^[10]。李栋梁等^[11]研究认为,我国农牧交错带北界从内蒙古中部经宁夏北部、甘肃河西中部、青海北部到西藏西北部,南界从内蒙古东部经华北北部、陕北到陇东、陇中、青海东南部到西藏东部,南北宽 200~300 km。这一地域的年降水量为 200~400 mm,东部气候属温带或暖温带半干旱类型,自然植被为森林草原和典型草原;西部属于高寒半干旱半湿润气候区,为半荒漠草甸,即在总体上宜牧的背景下,宜牧环境与宜农环境交替变化的地域(图 1)。该地带的东南部是我国主体农业区和经济发达区,西北部则是经济相对欠发达地区,而且集中了我国大部分的少数民族^[12]。边缘地带的形成意味着汉族文化与少数民族文化两种不同地域文化的融合^[13]。最初在汉代甚至更早时期^[14-16],各族人民首先是通过这个交接带开展了文化交流和经济联系,并在此基础上建立、发展了政治上的联系,促进了社会的稳定。现代农牧交错带是经过长期演变形成的,是人为因素和自然因素共同作用的结果。随着人口的增加,为缓解人口压力,从两汉时期就已经开始推行“移民富边”政策,对边缘地带不断扩

大农耕种植。人类不断向自然界索取资源,不合理的土地利用导致了地表植被破坏、生态环境恶化。沙漠逐渐南侵,范围扩大,从有关沙尘暴研究中可以发现^[17-19],沙尘暴空间分布的南边界可以到达季风边缘带的南边界,农牧交错区作为防护沙尘暴的重要屏障作用岌岌可危。中国北方沙尘暴在空间变化上主要表现为两种模态,即整体一致的偏多(少)型和东西反向的西多(少)东少(多)型。在近 50 年经历了 20 世纪 60—70 年代沙尘暴增加和 80—90 年代沙尘暴减少的演变过程。近 10 年又呈现出增加态势。北方干旱化形势日趋严峻,主要也表现为农牧交错带土地沙漠化和草原退化^[20-21]。

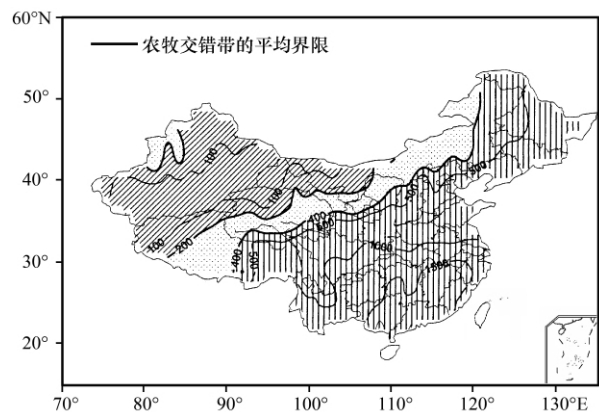


图 1 1961—2000 年平均中国降水量(等值线,单位:mm)与农牧交错带(阴影区)分布
引自文献^[11]

Fig. 1 Distribution of average precipitation (contour, unit: mm) and the interlaced zone of agriculture and pasture (the shaded) in China during 1961—2000(from reference^[11])

3 夏季风北边缘带的气候特征

对夏季风北边缘带的研究主要有两方面:一是从依赖于黄土、冰川、颗粒物和树木年轮等代用资料的古气候学角度来研究边缘带的演变;二是利用现代气象观测资料(温、压、湿、风和降水等)从现代气候学或天气学角度来定义边缘带。

3.1 古气候特征

气候变化是气象研究中的一个热点,古气候则是其中的一个分支,其变化特征可作为预测未来气候变化的依据之一。随着气候演变大量古记录的出现,古气候研究越来越被关注和认可,特别是有关季风边缘带古气候演变的研究也越来越多。

孙湘君等^[22]采用古植物资料包括孢粉化石及叶和种子等大化石反映干旱气候,对干旱带的迁移

和季风气候的演化分早第三纪和晚第三纪进行了讨论。无论是早第三纪的古新世、始新世和渐新世还是晚第三纪的中新世和上新世，中国始终存在着湿润和干旱两种气候带。然而早第三纪湿润与干旱的分界带与现代季风边缘带的位置不同，到了晚第三纪中新世，东亚季风出现，半干旱区的分布才与现在开始相似，可以说季风边缘带是在那个时候形成的，并且到了上新世湿润区有所减小。

另外，许多学者^[23-28]也利用古土壤、冰心、树木年轮、花粉和沉积物等气候代用指标来反映季风边缘带上新世之后的干湿气候演变。上新世紧接着是更新世和全新世，高尚玉等^[23]对剖面的风成砂（代表沙漠扩大）和黑色砂质（代表沙漠缩小）古土壤进行了研究，指出在全新世季风区西北边缘的沙漠主要都经历了流沙活动、扩大与缩小、固定成壤的两相组合式有序波动演变过程。张兰生等^[24]通过花粉浓度的分析，发现农牧交错文化与全新世暖期以后的冷干环境相对应，农牧业经济随气候的暖湿、冷干而彼此消长，农业经济在暖期北进，冷期南退，也即是暖期季风边缘带湿润，冷期则较干旱。刘志刚等^[26]研究指出，沙漠边缘区夏季风在未次间冰期出现了 5 次增强时期，说明此时段气候温暖湿润。以上研究表明，这些古记录可以较好地反映出季风边缘带古气候的“干—湿”周期性交替，随着气候暖湿和干冷变化，半干旱区范围有相继缩小和扩大的迹象，农业和牧业的生产生活方式也随之调整。

近 1 000 年来东亚夏季风演变可划分为中世纪时期（11—13 世纪初期）的季风稍弱阶段，13 世纪中后期至 14 世纪前半叶的季风较强时期，14 世纪后半叶至 17 世纪的季风较弱阶段，自 18 世纪开始持续约 200 年的季风再次增强时期，以及 20 世纪初开始的季风逐渐减弱阶段。整个东部季风区过去 1 000 年旱涝演变的显著特征是中世纪时期（1000—1240 年）气候总体干旱。中国东部降水变化也表现出区域性特征，在 1 000 年尺度上华北、江淮地区的干湿变化基本一致，华北与江南地区干湿变化在某些时段似乎存在相反的趋势，江淮地区处于过渡区。如果分析它们在长期趋势上（200 年以上）的变化，中国东部自南向北的干湿变化在长期趋势上也基本一致，表明中国东部所有地区在长达 200 多年的时期气候湿润；自 1910 年开始，中国东部不同地区干湿波动频繁，气候变化发生了明显区域分异，华北、江淮地区在 20 世纪 20—30 年代气候干旱，

而江南地区该时期气候湿润^[28-31]。

3.2 现代气候特征

副热带夏季风爆发以后，其前沿不断由南向北推进。夏季风的北边缘，即是副热带夏季风前缘北推最北位置。东亚夏季风期间有明显的季风涌（东亚夏季风系统的核心部分）向北传播，其实质是东亚夏季风中的 30~60 天季节内振荡（ISO），但传播的最北位置不到 35°N^[32]。东亚副热带夏季风前沿每年推进到的最北位置比季风涌到达的位置更偏北，而且每年推进的位置不同。夏季风前沿每年波动的区域就是夏季风北边缘带，因此很多学者利用描述季风前沿的指标来表征北边缘。观测事实表明，当在东亚范围内海陆间 4 个大气活动中心的强度或符号发生改变时，地面盛行风、高空西（东）风气流、雨量、湿度、温度、云量和日照等都会发生显著的变化，因而有可能综合分析各种气象要素或天气现象的不连续变化来确定季风的进退过程。

早在 20 世纪 30 年代，就有关于我国季风进退的论述。40 年代黄土松等^[33]首次用湿球温度作为指标，从气团属性方面研究季风进退，为以后研究打下了基础。60 年代，徐淑英等^[34]利用多年平均海平面气压和 500 hPa 的候平均高度资料，对 45°N 各经度（90°—170°E）气压和 500 hPa 高度的时间剖面进行分析，从而综合确定我国华南、华中和华北夏季风开始影响、盛行、极盛、减弱和撤退等 5 个阶段的起止日期。

在 20 世纪 70、80 年代，陈隆勋等^[35]采用气团属性和流场结合的方法来定义季风的推进过程，分析 850 hPa 和 700 hPa 两层上逐候的平均流场和假相当位温 θ_{se} 场，配合候雨量的分布，以确定夏季风的推进过程。汤明敏等^[36]认为可以取每日的 344~348 K 等 θ_{se} 线进行比较，确定夏季风的进退活动，分析了 1 000 hPa 上 348 K 等值线和 850 hPa 上沿 110°E 和 120°E 上各测站 θ_{se} 随时间的变化，取了 $\theta_{se} = 330$ K 和 340 K 作为 850 hPa 上夏季风的前沿。陆菊中等^[37]分析了夏季风南撤时 10 年平均的 850 hPa 候平均流场和多年平均的 θ_{se} 场变化，选用 340 K 线北界位置的变化来探讨夏季风撤退时的变化情况，认为 θ_{se} 为 340 K (332 K) 线，以其南退到 25°N (30°N) 作为临界纬度来确定夏季风南撤和冬季风建立是一个较好的参数。施尚文等^[38]采用 1971—1980 年 6—9 月 850 hPa 上候平均高度、风场以及 θ_{se} 场分析了 105°—125°E, 35°—45°N 我国北方地区的夏季风，用 $\theta_{se} = 332$ K 作为北方地区夏季风影响

期的临界值。周玉孚^[39]考虑了 850 hPa 锋面、500 hPa 副热带高压脊和 850 hPa 等压面 θ_{se} 三个指标, 500 hPa 副热带高压脊与 850 hPa 锋面这两个指标在季风北进过程中配合较好, 但不持续; θ_{se} 指标对季风推进到华南、华中和撤退时较好, 但到华北地区的时间偏早。因此在确定夏季风推进到华北时主要参考 500 hPa 副热带高压脊和 850 hPa 锋面位置, 而夏季风撤退时, 应对 θ_{se} 和锋面位置这两个指标给予较多注意。在采用候 θ_{se} 的变化来确定夏季风的来临日期时, 采用 $\theta_{se}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (332 K) 作为季风进退的指标, 采用 500 hPa 副热带高压脊线位置来确定夏季风的进退时, 以 500 hPa 等压面上 120° — 135°E 候平均副热带高压脊线位置作为标准, 用 850 hPa 上 110° — 115°E 候平均锋面位置 (或切变线) 所在的纬度位置来定义夏季风的进退。朱乾根等^[40]对 $\theta_{se}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线、大雨区与 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 露点温度等值线三个指标进行了比较, 认为用等露点温度线表征副热带季风的的活动更为合适。

20 世纪 90 年代, 朱乾根等^[41]利用日本气象厅的总云量资料分析了东亚经度上季风的进退, 用作季风前沿的低纬和中纬两条总云量大值带的活动来表示东亚经度上全年整个季风的进退。王安宇等^[42]认为, 利用雨带来定义季风的进退还存在部分问题, 指出利用暖湿性质来定义季风的推进较为合适, 但不利于季风撤退的情况。他们定义的夏季风区必须满足两个条件: (1) 西南风 $>2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (2) 在 30°N 以南 $\theta_{se}>340\text{ K}$, 在 30°N 以北 $\theta_{se}>335\text{ K}$ 。季风区前沿的进退便可代表我国夏季风的进退。廉毅等^[43]取 $\theta_{se}=336\text{ K}$ 等值线和南风 $\geq 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等值线同时越过某一纬度时, 定义为该纬度东亚夏季风建立的日期。Qian et al^[44]利用近 40 年日降水资料计算了 5 mm 等雨量线的逐日推进等时间线。每年 7 天时间平滑的 5 mm 降水经过几次不连续向北推进, 最后到达最北位置并维持一段时间。吴长刚等^[45]利用近 50 年 NCEP/NCAR 的候平均风场和比湿场资料, 计算了东亚夏季风北界的位置, 发现季风北界存在着明显的年代际变化, 季风北界偏北的年份集中于 20 世纪 50、60 年代, 而偏南的年份则集中于 80、90 年代, 并且各季风区的季风北界的年代际变化比较一致。夏季风北界位置的定义: (1) 850 hPa 候平均风场上为西南风, 并且南风分量 $>3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (2) 850 hPa 候平均的 θ_{se} 值 $>335\text{ K}$ 。Wang et al^[46]通过候平均降水资料 (CMAP) 定义了一个雨季指数, 并将该指数作为亚

洲夏季风的统一标准来描述亚洲夏季风的区域、爆发、推进及消退。汤绪等^[47]利用标准化的可降水量指数 (NPWI) 和日总可降水量 (TPW) 来定义夏季风的北边缘。某经度线的夏季风北边缘位置点满足: (1) $\text{NPWI}\geq 0.618$ 的最北纬度位置; (2) 该最北位置持续 3 天以上; (3) 该最北位置上的 $(\text{TPW}_{\max}-\text{TPW}_{\min})\geq 40\text{ mm}$ 。这个最北纬度位置便确定为该经度线的夏季风北边缘位置点, 然后连接所有经线上相邻的北边缘位置点, 这条连线定义为该年的亚洲夏季风北边缘。江志红等^[48]研究东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化时, 提出东亚夏季风推进过程的定量指标。标准降水指数为 1.5 的等值线能较好地反映中国东部夏季雨带的南北移动, 以及雨带推进过程中呈现的阶段性与突变性特征。由于 850 hPa 上 $\theta_{se}=337.5\text{ K}$ 的特征线较好地反映了夏季风前沿的推进情况, 因此, 规定 850 hPa 上沿 110° — 120°E , 当日 θ_{se} 稳定 $\geq 337.5\text{ K}$ 的最北纬度作为该日夏季风前沿位置, 其中当日稳定是指在该日附近 15 天中 $\theta_{se}\geq 337.5\text{ K}$ 的天数超过 10 天; 同时定义该日夏季风前沿强度, 具体为夏季风前沿位置以南 2.5° 内沿 110° — 120°E 该日附近 15 天内 850 hPa 的平均南风风速。利用夏季风前沿位置的定义, 将逐年夏季风前沿到达的最北纬度作为夏季风北界位置, 类似于夏季风前沿强度的定义, 以夏季风北界位置附近的强度作为夏季风北界强度。富元海等^[49]利用湿润指数作为指标对边缘带北界做了分析, 得到边缘带北界有小的南北或东西向波动, 南界南移较大, 各地幅度不同, 具有地域性特征。李春等^[50]为了研究东亚夏季风北界与我国东部夏季降水异常的关系, 利用夏季 850 hPa 上 20°N 以北 105° — 125°E 之间平均南风风速 $=2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 所在的纬度, 定义了一个新的东亚夏季风北界指数。黄菲等^[51]从北方春末夏初农作物生长需水和气象业务预测服务的角度出发, 结合风场且以满足农作物正常生长需求为标准, 即一次连续性降水过程 (中间没有无雨日) 的降水量达到透雨量 (20 mm) 标准, 将全年 4—10 月出现 6 次及以上过程透雨量的区域定义为东亚夏季风区, 即用 6 次过程透雨量表示夏季风北边缘。如果两次连续透雨过程之间满足无旱标准, 则将第一次透雨过程起始时间定义为该区的夏季风到达时间。这里无旱标准是依据国家干旱评估标准 (<http://www.slwater.gov.cn>)。根据连续透雨过程结合南风描述东亚夏季风的开始和推进过程, 并分析了夏季风边缘带宽

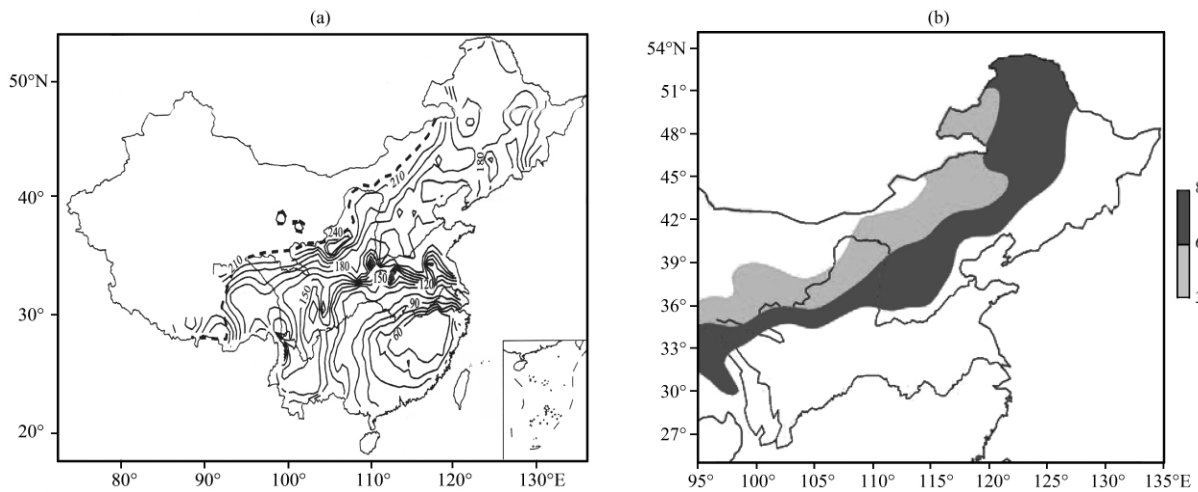


图 2 不同定义下的夏季风北边缘带

(a) Qian et al^[44], (b) 李栋梁等^[64]

Fig. 2 The north boundary belt of summer monsoon in the East Asia by different definition

(a) Qian et al^[44], (b) Li et al^[64]

度变化特征。

尽管如此，各类指标划分仍然具有一定的局限性，如内蒙古东部和东北北部的气候与季风气候有本质的不同(图 2)，不同年代的变率差异较大^[11]。

4 夏季风北边缘带的特征和变化趋势

4.1 气候特征

东亚夏季风的强弱变化与南北摆动直接控制着边缘带气候的冷暖和干湿变化。水分影响农作物、牧草和林木的生长发育，从而影响其产量。根据崔读昌等^[52]的干湿指标得到年降水量为 300~500 mm 的季风边缘带区域适合半干旱和干旱类型作物的栽培。张庆云等^[53]对中国近 30 年(1960—1989 年)的干湿变化研究表明，季风边缘带在 20 世纪 50—60 年代中期湿润指数增大即干湿界线北移，为多雨时段。到了 80 年代，湿润指数逐渐减小，降水出现持续偏少的现象，气候变干。在 20 世纪 60—70 年代，中国干湿气候出现了一次突变，由较湿润变为干旱，不过各地干旱程度有所不同。王菱等^[54]的研究结果也表明华北平原、黄土高原和淮北平原气候变化近 40 年属于持续变干型；半干旱区在扩大，主要因为降水和潜在蒸发的速率都呈下降趋势，而降水的下降速率大于潜在蒸发的下降速率。史培军等^[55]指出，在干湿年代的转换方面，非洲萨哈尔带(非洲干旱沙漠向热带过渡的半干旱稀疏草原地带)较中国农牧交错带提前 5 年左右进入少雨期或多雨期。这一研究结果在边缘带的气候预

测方面有着一定的意义。

上述研究表明，从 20 世纪 60 年代开始到 90 年代，干湿界线呈现出向南移动的趋势，边缘带范围扩大，气候向暖干型转变。依据气候变化趋势，边缘带气候可以划分为 4 种类型：暖湿型、暖干型、冷湿型和冷干型^[56]。中国降水主要有三类雨型：第一类雨型就是北方多雨，突出了边缘带的降水^[57]。

北方雨季一般集中在 7 月下旬至 8 月上旬，与季风推进到华北和从华北撤退的时间比较一致，且雨季强度变化总趋势为由强变弱。赵平等^[58]有关冷暖位相期间的华北地区降水研究也得到了相同的结果，指出暖位相时我国呈现出“南涝北旱”的变化特征。边缘带旱涝变化由很多因素导致，夏季风异常波动以及与西风带相互作用都会引起水汽的输送和分布异常，进而影响边缘带的降水^[58-60]。边缘带降水量减少引起农牧界线一直往南移，降低了农业收成。季风强弱又与降水量的多寡密切相关，强的冬季风使西北地区降水偏少，强的夏季风则相反。一些研究认为^[11, 61]，中国农牧交错带受大陆性气候与季风性气候的共同影响，南北摆动幅度大，60%为干旱年份。多雨年的强降水主要出现在 7—8 月，此时，主要农作物已收割，土地裸露，强降水不利于蓄水保墒，易造成严重水土流失。目前气温持续升高、湿度减小、风速增大、沙尘暴频发。风水蚀复合区是农牧交错带中较为敏感的区域，有着气候地貌多样化、侵蚀动力多样化、生态问题严

重的特点。王宝鉴等^[62-63]研究表明,强夏季风年南风和水汽通量显著增强,西北影响区汛期降水偏多。而近几十年来,夏季风处于一直衰变状态,可能就是引起华北干旱的重要原因之一。

4.2 结构特征

富元海等^[49]对边缘带南北界做了分析,得到边缘带北界有小的南北或东西向波动,南界南移较大,各地幅度不同,具有地域性特征。李栋梁等^[64]分析了 110°E 东亚副热带夏季风北边缘带的位置变化及其结构特征,得到边缘带宽度与其南界位置具有很好的负相关,且有逐年变宽的趋势。夏季风平均在6月28日开始影响北边缘带,9月21日从北边缘带南撤离开。 110°E 是夏季风边缘带中南风分量最大的经度,200 hPa急流中心位于边缘带上空,同一层次上南界点西风小于北界点。边缘带600 hPa以下为南风,以上为北风,南界点南风分量大于北界点。边缘带内水汽可到达400 hPa,是相对湿度等值线最密集的地带。偏北年与偏南年相比,夏季风影响边缘带时间开始早、结束迟,西风急流中心偏北,强度偏强,低层湿度偏大。

5 影响夏季风北边缘带的可能因素

东亚夏季风北边缘带是我国西北地区大陆性干旱气候和南方季风气候两大系统交互作用的产物。所以,我国干旱气候和东亚夏季风的强弱变化都会对季风边缘带的空间位置南北摆动产生一定的影响。

5.1 夏季风的强度

原则上似乎是夏季风越强,其向北推进越远,影响范围越大,北边缘也越偏北。但实际上正如黄荣辉等^[65]指出的东亚夏季风在不同地区有不同表现,有的地区更多表现在降水的季节变化,而有的地区更明显表现在盛行风向随季节的变化。由于人们关注的地区不同,定义的东亚副热带夏季风强度指数的代表性不尽相同。张庆云等^[66]用风场定义的季风指数,得到季风强(梅雨锋强)时,江淮流域的降水偏多;反之则偏少。周兵等^[67]将风场与OLR相结合,指出副热带夏季风高指数年副热带高压偏南,长江中下游为涝;低指数年则相反。赵平等^[68]利用西太平洋副热带高压和蒙古低压的差异来突出这两个系统对副热带夏季风的影响,以此来定义副热带夏季风指数。该指数能够指示东亚副热带夏季风的强弱以及中国长江流域降水的异常变化。刘宣飞等^[69]利用大气环流正、斜压分解方法,

从东亚副热带夏季风为正、斜压混合型季风观点出发,定义了东亚副热带夏季风环流指数,认为强季风年,华北地区多雨、长江流域少雨;弱季风年则相反。梁萍等^[70]利用东亚副热带地区南北两侧经向水汽输送的差异来表征副热带地区的水汽辐合,以此定义副热带夏季风指数。该指数与副热带夏季风降水呈正相关。这些从不同的角度定义的副热带夏季风指数,在反映副热带地区夏季风及降水的特征上有一定的差异,但大多数指数都与长江流域夏季降水有较好的相关关系,而与副热带夏季风北边缘带的关系存在许多不确定性。李进等^[71]给出了影响黄河流域的水汽沿西南、东南及西北三条路径输送,前两支气流在多年平均时主要影响黄河下游区。涝年时影响到黄河中、下游区,而上游区水汽流入较小;旱年,黄河中、上游区均无明显的水汽输送,只有下游的小范围地区受西南气流影响。

5.2 西北地区地面感热输送

最近,Wang et al^[72]研究发现,中国西北干旱区地面感热与东亚夏季风北界位置存在显著且持续的负相关关系,地面感热输送异常偏弱年,东亚夏季风北边缘位置异常偏北,且北边缘带较窄;反之亦然。西北地区地面感热与东亚夏季风北边缘带区域降水之间相互作用,在季风前期,西北地区地面感热对东亚夏季风北边缘带区域降水有抑制作用;而到了季风盛期,东亚夏季风北边缘带区域降水又会抑制西北地区地面感热的发展。这可能主要是局地陆气相互作用的结果,其机理还不清楚。

5.3 青藏高原的作用

夏季风北边缘带作为季风区到非季风区的过渡地带,深入西北内陆,同样会受到青藏高原等大地形、大陆积雪分布等要素的影响。梁潇云等^[73]和汤绪等^[74]用全球大气环流谱模式(R42L9)进行了有、无青藏高原大地形两种情况模拟,发现青藏高原的存在,有利于引导和加强夏季风北上,使北边缘偏北。此外,青藏高原的热力作用对东亚夏季风和我国夏季降水都有重要的影响^[75-76],从而影响了每年季风北界位置的不同。青藏高原积雪^[77-78]通过大气环流与中国夏季气候也有着较好的关系:冬、春季积雪多,夏季风环流弱,副热带高压位置偏南,华北降水偏少,季风边缘带位置就偏南;反之亦然。最近,王春学等^[79]分析了青藏高原冬季积雪与黄河流域夏季降水在准3年周期振荡中的关系,黄河流域夏季降水对前冬青藏高原东部积雪日数有很好的响应,当前冬高原积雪日数以正(负)

异常为主时，夏季黄河流域降水偏少（多）。亚洲大陆和海洋在季节上的热力差异是形成亚洲季风的最主要因素。同样，青藏高原高大地形和我国东部大陆之间的这种热力差异对东亚季风强弱和季风边缘带位置变化也有着重要的贡献。

5.4 高空西风急流的作用

高空西风急流是东亚中低纬度地区重要的大气环流系统，东亚季风边缘带也处在这一区域。研究发现^[64]高空西风急流位置的变化对东亚季风边缘带位置有显著的影响，急流位置偏北，边缘带位置也偏北；反之亦然，并且对应的 200 hPa 经向环流场也发生明显的转变。有研究也发现^[80]，我国东北地区夏季降水也受到高空西风急流位置和强度的显著影响。所以，高空西风急流的变化对于季风边缘带研究具有十分重要的意义^[81]。此外，东北夏季降水通常受东北冷涡的影响，降水多则气温低。夏季气温的高低与其上空 500 hPa 位势高度有关，气温偏高对应位势高度正异常，气温偏低对应位势高度负异常^[82]。

5.5 其他因子

以上是影响东亚副热带夏季风边缘带的几个重要因子。此外，一些影响东亚夏季风强弱的因子也必定会对季风北边缘带产生一定的影响。主要包括：

(1) 海陆热力差异。海陆热力差异决定夏季风的强弱，夏季风主体的强弱也与北边缘位置有一定的关系。

(2) 西太平洋副热带高压。西太平洋副热带高压是东亚夏季风的重要成员，其面积、强度、位置与中国东部夏季降水关系密切，特别是其北界位置的异常偏北，有利于副热带夏季风北边缘的向北推进。

(3) 越赤道气流。越赤道气流是影响季风爆发和推进的一个重要因素，对季风加强起到重要作用，在东亚季风区其作用可以延伸至中纬度的季风边缘带^[83]。

(4) 行星风带（赤道辐合带）季节性的南北移动。这种现象在低纬地区更加显著，可能对位于中纬度的夏季风北边缘带也有一定影响。

(5) 北极涛动、北半球极涡、ENSO 等。

很多研究都指出这些大尺度环流因子对东亚季风和我国气候变化具有重要的影响。研究发现^[84-85]，北极涛动可以反映北半球中高纬度西风强度的变化，北极涛动指数的高低分别对应着副热

带西风的强弱。近二十几年来，北极涛动维持在高指数位相是导致东亚地区大气环流异常的重要原因，并由此造成了华北干旱的加剧^[86]。东亚副热带季风的减弱，使得夏季其北边缘位置偏南，冬季其南边缘位置偏北^[87]。所以，对季风边缘带的研究，从大气环流角度综合考虑这些因子的影响也很有必要。

6 讨论

从上述分析来看，学者们从各个角度对中国夏季风北边缘带进行了研究，并取得了重大进展。但由于夏季风北边缘带的复杂性，还有一些问题有待进一步研究。主要包括以下几个方面：

(1) 边缘带的空间界定以及夏季风影响边缘带的时间确定都应该更精细化。目前研究中所用再分析资料大多为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度的格点资料，资料的精度有待提高，可以借助更高分辨率的卫星遥感等多种资料来研究季风边缘带问题。

(2) 在以往研究中，边缘带的各种定义既存在区别也有着相似之处，无论是从假相当位温场、风场、流场、可降水量指数、降水量和湿润指数，还是过程透雨量等指标来定义的夏季风北边缘，尽管在地理位置上存在或南一些、或北一些的微小差异，但夏季风北边缘基本都位于沿东北地区西部—华北地区北部—西北地区东部—西南地区北部，呈东北—西南走向。众多指数哪些能更好的用于业务适时监测北边缘带的活动还需要进一步的研究。

(3) 夏季风边缘带是各种相对均衡要素之间的“突变转换”或“异常空间的邻接”，即为衔接带。夏季风北边缘带作为一个带状区域，其三维结构特征和温、压、湿、风等气象要素的配置情况，在水平和垂直方向上的变化等都是值得研究的内容。

(4) 西北地区干旱下垫面的感热输送与东亚副热带季风北边缘带的南北摆动是相互作用的一对矛盾。春末夏初季风雨季到来之前，前期的地面感热会抑制东亚副热带季风的向北推进；但当雨季到来之后，降水量的增加又会抑制地面感热。这种相互作用的机制目前还不太清晰，值得深入探讨。

东亚副热带夏季风北边缘带作为近 10 年来的一个热点问题，引起了很多学者的研究兴趣，相信随着观测资料的完善和数值模式的改进，关于夏季风北边缘带的研究将会取得更大的成果。

参考文献：

[1] 朱乾根，林锦瑞，寿绍文，等. 天气学原理和方法[M]. 北京：

- 气象出版社, 2007: 565.
- [2] 钱维宏. 季风的季节、年际和年代际变化[J]. 热带气象学报, 2005, 21(2): 199-206.
- [3] 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 东亚夏季风边缘带的气候特征[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 375-381.
- [4] 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 111-112.
- [5] 汤绪, 钱维宏, 孙国武. 东亚副热带夏季风研究进展及相关问题[J]. 高原气象, 2008, 27(增刊): 1-7.
- [6] 史正涛, 张林源, 苏桂武. 中国季风边缘带的自然灾害及成因[J]. 灾害学, 1994, 9(4): 59-64.
- [7] 赵永国. 我国生态环境脆弱带环境灾变特征的初步研究[J]. 灾害学, 1991, 6(4): 58-62.
- [8] 史正涛. 中国季风边缘带自然灾害的区域特征[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(4): 1-7.
- [9] 苏桂武, 张林源. 中国北方季风边缘区自然灾害环境和成灾过程的特征[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 1-9.
- [10] 符淙斌, 严中伟. 季风驱动下的生态系统[M]. 北京: 气象出版社, 1996: 208-211.
- [11] 李栋梁, 吕兰芝. 中国农牧交错带的气候特征与演变[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 483-488.
- [12] 张建春, 储少林, 陈全功. 中国农牧交错带界面的现状及进展[J]. 草业科学, 2008, 25(3): 78-84.
- [13] 张维祥, 睦金娥. 我国边缘地带的社会文化现象与生态经济学分析[J]. 科学经济社会, 1990: 4-8.
- [14] 王尚义. 历史时期鄂尔多斯高原农牧业的交替及其对自然环境的影响[J]. 历史地理, 1987(5): 11-24.
- [15] 王石英, 蔡强国, 吴淑安. 中国北方农牧交错区研究展望[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 138-142.
- [16] 苏志珠, 马义娟, 刘梅. 中国北方农牧交错带形成之探讨[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2003, 26(3): 269-273.
- [17] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.
- [18] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽, 等. 中国北方年沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 337-345.
- [19] 李栋梁, 钟海玲. 我国沙尘暴的气候成因及未来发展趋势[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 14-18.
- [20] 张养才. 气候波动对我国亚热带地区杉木、毛竹生态环境影响的研究[J]. 应用气象学报, 1995, 6(增刊): 75-82.
- [21] 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1): 22-29.
- [22] 孙湘君, 汪品先. 从中国古植被记录看东亚季风的年龄[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(9): 1137-1159.
- [23] 高尚玉, 陈渭南, 靳鹤龄, 等. 全新世中国季风区西北缘沙漠演化初步研究[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(2): 202-208.
- [24] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 我国北方农牧交错带的环境演变[J]. 地学前缘, 1997, 4(1/2): 127-136.
- [25] 王乃昂, 赵晶, 高顺尉. 东亚季风边缘区气候代用指标的分形比较及其意义[J]. 海洋地址与第四纪地质, 1999, 19(4): 59-65.
- [26] 刘志刚, 潘保田, 邬光剑, 等. 末次间冰期以来中国西北部沙漠边缘区夏季风变化初步研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 375-377.
- [27] 郭正堂, 姜文英, 吕厚远. 东亚季风区的极端气候事件及其原因[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 113-120.
- [28] 王国平, 刘景双, 汤洁. 半干旱区沼泽沉积物粒度特征及环境意义[J]. 干旱区研究, 2003, 20(3): 211-216.
- [29] 杨保, 谭明. 近千年东亚夏季风演变历史重建及与区域温湿变化关系的讨论[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 880-887.
- [30] 李茜, 魏凤英, 李栋梁. 近 159 年东亚夏季风年代际变化与中国东部旱涝分布[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 25-37.
- [31] 李茜, 魏凤英, 李栋梁. 近千年东亚夏季风演变[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 253-260.
- [32] 据建华, 孙丹, 吕俊梅. 东亚季风涌对我国东部大尺度降水过程的影响分析[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1129-1137.
- [33] 黄土松, 涂长望. 中国夏季风之进退[J]. 气象学报, 1944, 18(1/4): 82-92.
- [34] 徐淑英, 高由禧. 我国季风进退及其日期的确定[J]. 地理学报, 1962, 28(1): 1-18.
- [35] 陈隆勋, 高志成, 冯国柱. 1979 年夏季风在我国的推进过程[C]. 全国热带季风会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 1983: 241-252.
- [36] 汤明敏, 黄土松. 1979 年中国东部夏季风的进退[C]. 全国热带季风会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 1981: 15-30.
- [37] 陆菊中, 林春育. 中国东部夏季风南撤与东亚季节变化的联系[C]. 全国热带季风会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 1982: 45-55.
- [38] 施尚文, 巢俊民. 我国北方地区的夏季风. 全国热带季风会议文集[C]. 昆明: 云南人民出版社, 1982: 72-85.
- [39] 周玉孚. 我国东部地区季风进退与雨季起迄的关系[C]. 全国热带季风会议文集. 昆明: 云南人民出版社, 1982: 311-317.
- [40] 朱乾根, 杨松. 东亚副热带季风的北进及其低频振荡[J]. 南京气象学院学报, 1989, 12(3): 249-257.
- [41] 朱乾根, 杨松, 肖稳安. 总云量资料所揭示的东亚经度上季风之进退及低频振荡特征[J]. 南京气象学院学报, 1994, 27(4): 405-409.
- [42] 王安宇, 吴池胜, 林文实, 等. 关于我国东部夏季风进退的定义[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 400-407.
- [43] 廉毅, 沈柏竹, 高极亭. 关于确定东亚夏季风强度指数的探讨[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 782-789.
- [44] Qian W H, Kang H S, Lee D K. Temporal-spatial distribution of seasonal rainfall and circulation in the East Asian monsoon region[J]. Theor Appl Climatol, 2002, 73: 151-168.
- [45] 吴长刚, 刘鸿升, 谢安. 夏季风北推和强度对我国北方夏季降水影响的年代际特征[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 656-665.
- [46] Wang B, Lin Ho. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon[J]. J Climate, 2002, 15: 386-398.
- [47] 汤绪, 孙国武, 钱维宏. 亚洲夏季风北边缘研究[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 25-50.
- [48] 江志红, 何金海, 李建平, 等. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化[J]. 地理学报, 2006, 61(7): 675-686.
- [49] 富元海, 刘宣飞. 中国北方季风边缘区边界位置的年代际变化[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 94-100.

- [50] 李春, 韩笑. 东亚夏季风北界与我国夏季降水关系的研究[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 325—330.
- [51] 黄菲, 李栋梁, 汤绪, 等. 用过程透雨量确定的东亚夏季风北边缘特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 530—538.
- [52] 崔读昌, 曹平, 梁红. 干旱半干旱半湿润偏旱地区农林牧气候界限的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1986(3): 60—69.
- [53] 张庆云, 陈烈庭. 近 30 年来中国气候的干湿变化[J]. 大气科学, 1991, 15(5): 72—81.
- [54] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 45—54.
- [55] 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[J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 121—128.
- [56] 陈海, 梁小英, 李立新. 近 40 年中国北方农牧交错带气候时空分异特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, 37(4): 653—656.
- [57] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 中国东部夏季降水型的研究[J]. 应用气象学报, 1998, 9(增刊): 65—74.
- [58] 赵平, 周秀骥. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 548—556.
- [59] 张存杰, 谢金南, 李栋梁, 等. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响[J]. 高原气象, 2002, 21(2): 193—198.
- [60] 戴新刚, 汪萍, 丑纪范. 华北汛期降水多尺度特征与夏季风年代际衰变[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 2483—2487.
- [61] 安志山, 李栋梁, 王涛, 等. 气候变化对风水蚀复合区的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 610—618.
- [62] 王宝鉴, 李栋梁, 黄玉霞, 等. 东亚夏季风异常与西北东部汛期降水的关系分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 563—568.
- [63] 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 等. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 912—918.
- [64] 李栋梁, 邵鹏程. 近 60a 东亚副热带夏季风北边缘位置的地域特征[J]. 中国沙漠(待发表).
- [65] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 691—719.
- [66] 张庆云, 陶诗言. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水[J]. 应用气象学报, 1998, 9(增刊): 17—23.
- [67] 周兵, 何金海, 吴国雄, 等. 东亚副热带季风特征及其指数的建立[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 123—135.
- [68] 赵平, 周自江. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 933—941.
- [69] 刘宣飞, 汪婧. 东亚副热带夏季风环流指数及其与中国气候的关系[J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 533—538.
- [70] 梁萍, 汤绪, 何金海, 等. 用水汽输送表征的东亚副热带夏季风指数研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 467—473.
- [71] 李进, 李栋梁, 张杰. 黄河流域冬、夏季水汽输送及收支特征[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 342—350.
- [72] Wang H, Li D. Correlation of surface sensible heat flux in the arid region of northwestern China with the northern boundary of the East Asian summer monsoon and Chinese summer precipitation[J]. J Geophys Res, 116, D19114, doi:10.1029/2011JD015696.
- [73] 梁潇云, 刘屹岷, 吴国雄. 青藏高原隆升对春、夏季亚洲大气环流的影响[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 837—845.
- [74] 汤绪, 赵兵科, 孙国武, 等. 青藏高原地形对东亚夏季风北缘影响的数值实验[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 921—927.
- [75] 江爱良. 全球变化与亚洲季风[J]. 第四纪研究, 1995, 15(3): 232—242.
- [76] 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 528—540.
- [77] 张顺利, 陶诗言. 青藏高原积雪对亚洲季风影响的诊断及数值研究[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 373—390.
- [78] 蔡学湛, 吴滨. 青藏高原雪盖异常的环流特征及其与我国夏季降水的关系[J]. 应用气象学报, 2005, 16(1): 89—95.
- [79] 王春学, 李栋梁. 基于 MTM—SVD 方法的黄河流域夏季降水年际变化及其主要影响因子分析[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 823—834.
- [80] 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[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(1): 102—113.
- [81] 徐袁, 钱维宏. 东亚季风边缘活动带研究综述[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 138—146.
- [82] 张茜, 李栋梁. 东北及邻近地区夏季气温异常的新特征及其对大气环流的响应[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1604—1614.
- [83] Qian W H, Kang H S, Lee D K. Distribution of seasonal rainfall in the East Asian monsoon region[J]. Theor Appl Climatol, 2002, 73: 151—168.
- [84] Thompson D W J, Wallace J M. Structure of the Arctic and Antarctic oscillation [C]. Proceeding of the Twenty Third Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop. Oct 26—30 1998. NOAA, NWS, CPC/ NCEP, 1999: 281—284.
- [85] Thompson D W J, Wallace J M. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode and associated climate trends[J]. Science, 2001, 293(5527): 85—89.
- [86] 据建华, 吕俊梅, 任菊章. 北极涛动年代际变化对华北地区干旱化的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 74—81.
- [87] 杨绚, 李栋梁. 东亚副热带冬季风南边缘的确定及其变化特征[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 668—675.

Advances in Research of the North Boundary Belt of East Asia Subtropical Summer Monsoon in China

LI Dong-liang, SHAO Peng-cheng, WANG Hui, CHEN Lian

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NanJing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As the transition zone between monsoon and non-monsoon zones, the north boundary belt of East Asia Subtropical Summer Monsoon has significant influences on the weather, climate change and extremely severe weather or climate events in the eastern part of Northwest China, North China and Northeast China especially in Yellow River basin. The present work reviews the definition, characteristics, change trends of the north boundary belt of East Asia Subtropical Summer Monsoon and also summarizes some factors which may impact the boundary belt. The north boundary belt of the East Asia monsoon is in the juncture of continental climate and marine one in East Asia. This region can be divided into semi-humid and semi-arid subareas along the northeast-southwest direction, according to modern climate study. Climate in this boundary belt is variable and is influenced by multifactor, resulting in large amount of natural disasters. Due to the lack of the spatial and temporal distribution refinements on the northern edge of the summer monsoon, further worthy study is proposed in the last stage of this review.

Key words: East Asia subtropical summer monsoon; Boundary belt of monsoon; Climatic characteristic



2011 年大气科学类期刊主要指标*

刊名	总被引频次		影响因子		综合评价总分	
	数值	排名	数值	排名	数值	排名
Advances in Atmospheric Sciences	933	10	0.692	11	44.1	7
暴雨灾害	260	15	0.787	9	17.5	15
大气科学	2 389	3	1.376	2	82.0	1
干旱气象	459	13	0.955	6	18.6	14
高原气象	2 822	1	1.357	3	70.3	3
南京信息工程大学学报	962	9	0.436	15	33.1	9
气候变化研究进展	666	12	1.015	5	43.6	8
气候与环境研究	1 042	8	0.721	10	45.7	6
气象	2 769	2	1.678	1	74.3	2
气象科技	1 174	6	0.677	12	22.6	12
气象科学	805	11	0.654	13	29.7	11
气象学报	2 279	4	0.813	8	65.0	4
气象与环境学报	344	14	0.815	7	21.0	13
热带气象学报	1 053	7	0.570	14	32.8	10
应用气象学报	1 930	5	1.120	4	61.3	5

* 数据来源: 中国科学技术信息研究所 2012 年版《中国科技期刊》引证报告(核心版)