

单机坤, 沈学顺, 李维京. 2013. 陆气相互作用对中尺度对流系统影响的研究进展. 气象, 39(11): 1413-1421.

# 陆气相互作用对中尺度对流系统影响的研究进展<sup>\* 1</sup>

单机坤<sup>1</sup> 沈学顺<sup>2</sup> 李维京<sup>3</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

3 国家气候中心, 北京 100081

**提 要:** 文章回顾了大气对地表性质的敏感性研究, 以及陆气相互作用对中尺度天气过程的影响, 说明了地表性质与积云对流及对流降水之间的联系。地表性质的改变对行星边界层的热通量、水汽通量、对流有效位能产生影响, 并通过湍流的垂直输送, 进而影响到其上大气的性质。陆气之间存在着复杂的、非线性的相互作用。性质不均匀的下垫面造成地表向大气感热通量和潜热通量的差异, 从而在近地层大气中形成温度和气压梯度, 产生局地环流, 在条件适合的情况下可以形成对流, 并产生降水, 而降水的不均匀分布, 又维持了下垫面的不均匀性。土壤湿度对对流的影响受到多个因素的制约, 其中天气尺度过程的影响是很显著的; 由非均匀的下垫面所产生的局地环流能够触发积云对流。

**关键词:** 地表性质, 陆气相互作用, 对流, 通量

**中图分类号:** P445, 458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.004

## Effect of Land-Atmosphere Interaction on the Process of Mesoscale System

SHAN Jikun<sup>1</sup> SHEN Xueshun<sup>2</sup> LI Weijing<sup>3</sup>

1 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Numerical Prediction Centre of CMA, Beijing 100081

3 National Climate Centre, Beijing 100081

**Abstract:** This paper has a comprehensive review on researches of the sensitivity of atmosphere to the surface properties and the impact of land-atmosphere interaction on the process of mesoscale systems demonstrating the links between surface properties and cumulus convective rainfall. Changes in surface properties influence the heat flux, moisture flux and the convective available potential energy within the planetary boundary layer and the nature of atmosphere is affected through the turbulent vertical transportation. The interaction between the land and atmosphere is very complex and nonlinear. The difference of sensible heat flux and latent heat flux in the atmosphere caused by heterogeneous underlying surface can generate the pressure and temperature gradient and local circulation which can initiate convection and precipitation in suitable conditions. And the heterogeneous distribution of precipitation can in turn aggravate the heterogeneity of the underlying surface. The influence of soil moisture on convection is restricted by various factors including the significant influence of synoptic scale process. The cumulus convection can be triggered by the local circulation which is generated by the inhomogeneous underlying surface.

**Key words:** surface property, land-atmosphere interaction, convection, flux

\* 科技部十二五科技支撑计划(2012BAC22B00)资助

2012年9月6日收稿; 2013年2月18日收修定稿

第一作者: 单机坤, 主要从事边界层气象、陆面过程等方面研究. Email: jkshlx@sohu.com

通信作者: 沈学顺, 主要从事数值预报技术研究. Email: shenxs@cams.cma.gov.cn

## 引言

陆气相互作用就是通过陆-气界面之间物质(水、 $\text{CO}_2$ 、N 等)、能量(感热、潜热、动能)、动量的交换,陆地表面和大气的动态变化相互联系,从而形成一个整体。这主要体现在两个方面:一是,下垫面对大气的热力强迫;二是,大气的状态和运动也同样会对下垫面的热力强迫产生影响。研究表明,下垫面强迫对暴雨等对流天气具有重要作用(丁一汇, 2005;陶诗言等,1980;丁仁海等,2010),包括动力强迫和热力强迫所形成的山谷风和海陆风,以及山脉波和背风波等所引起的上升和下沉运动常常是对流天气的触发因子;而不同的大气状态和大气运动必然会造成下垫面性质的不均匀,因此陆气之间存在着复杂的非线性的相互作用。本文试图总结关于陆气相互作用对中尺度天气过程影响的研究成果。

## 1 大气对地表性质的敏感性研究

对于陆气相互作用的研究,有许多集中在地表性质的敏感性研究方面。下面从不同的角度对这方面的工作做简单的总结。

### 1.1 反照率

地表反照率变化是陆面异常最重要的特性之一,土壤水分、植被覆盖、积雪覆盖等陆面状况的异常均能引起地表反照率的变化。反照率发生变化,改变了地表能量平衡,从而直接对大气产生影响。反照率大,则地表温度低,相应地表向大气的感热通量小,致使近地层气温较低(Tapper, 1991)。研究表明,地表反照率不均匀可以引发非经典的中尺度环流,在地表反照率差异较小的区域,仅能产生较弱的非经典的中尺度环流(Segal et al, 1986; Mahreh et al, 1978);而盐湖与周边区域的地表反照率差异非常大,能够形成相对较强的非经典的中尺度环流,这在观测数据分析和数值模拟中都得到了证实(Physick et al, 1990)。

### 1.2 土壤湿度

土壤湿度的变化不仅会直接影响地气之间的水分交换过程,而且会通过影响地表辐射、感热交换及大气稳定度等气象特征,从而影响地气能量和水平衡特征。如图 1, Eltahir(1998)假设土壤湿度与降水存在正反馈效应,即土壤湿度增加,降低了地面反照率和 Bowen 比,最终导致降水增加,他又给出了

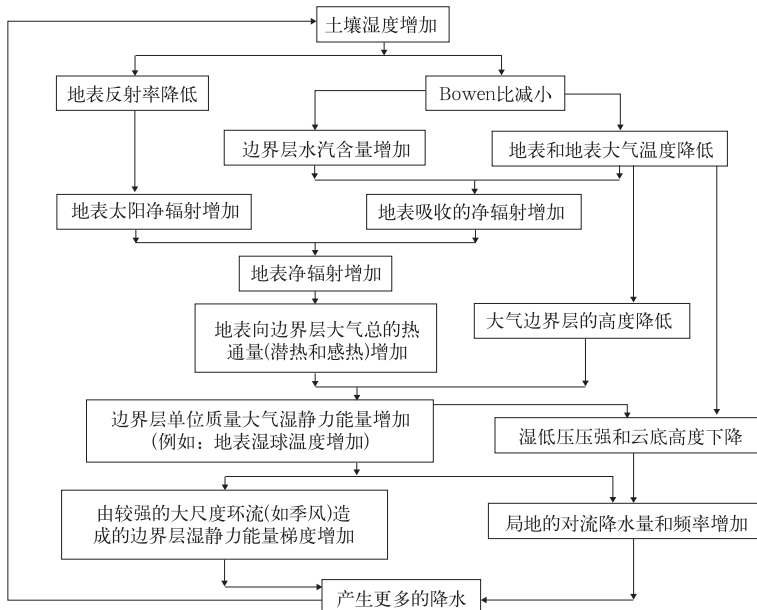


图 1 土壤湿度与降水之间关系的初步假设(Eltahir, 1998)

Fig. 1 The proposed hypothesis for relations between soil moisture conditions and subsequent rainfall process (Eltahir, 1998)

证据支持了这一假设。在很多研究中,都进一步论述了这种土壤湿度与降水之间的反馈机制(Nykanen et al,2001; Koster et al,2003; Betts,2004; Dirmeyer,2006;张瑛等,2011)。土壤湿度对潜热和感热的交换产生很大的影响,从而对中尺度对流降水造成影响(LeMone et al,2007; 杜华武等,1993a; 1993b)。

### 1.3 土壤温度(地表热状况)

土壤的热容量远大于空气,土壤的热状况及其变化将会对大气的陆面下边界起重要的作用。土壤温度的变化可以直接影响地气之间的感热通量及辐射通量,从而对气候变化起到反馈作用。土壤温度升高,增加了地表向大气的感热通量,近地层大气的浮力增加,产生上升运动,低层大气气压下降,形成气流辐合(Ookouchi et al,1984; Segal et al;1988; 1989a);相反,土壤温度低的地区则会产生下沉运动和气流辐散。如果这两个区域相邻,就会产生中尺度环流;在没有大尺度强迫机制的情况下,环流能被加强,并有可能形成对流(Maddox et al,1980; Rogger et al,2001; Xiu et al,2001)。

### 1.4 植被

陆面为不同类型的植被所覆盖,植被的存在使得陆面过程变得更加复杂。植被的生理及形态特性对陆面过程具有十分重要的影响,其影响主要表现为:(1)降水和辐射的拦截作用;(2)辐射的吸收;(3)蒸散;(4)土壤湿度;(5)改变动量输送(改变地表粗糙度);(6)生物通量等方面(陈海山等,2002)。数值试验表明(Peilke et al,1997; 陈万隆等,1997),植物通过蒸腾作用增加了近地层大气的湿度,增加了大气的对流不稳定性。植被覆盖地区与干旱区相邻,两个地区之间存在着较大的地表蒸发量的差异,这种差异可以激发中尺度环流(Segal et al,1988b)。数值模拟(Mahfouf et al,1987)表明,在紧邻干旱区、面积较大、植被密集、具有充足的水分蒸发的理想的植被覆盖地区,感热通量能够低至  $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,并且由此产生的中尺度环流强度接近于海风;把植被覆盖区减小到  $30 \text{ km}$  宽,降低植被密集度,可以模拟出较弱的中尺度环流。甚至在不同种类植被覆盖地区之间也偶然能够模拟出中尺度环流(Pinty et al,1989)。

## 1.5 积雪

在环境相同的条件下,雪地表面的感热通量比裸地表面的感热通量小很多。原因如下:(1)雪地表面的反照率较高,新雪平均反照率可达  $0.7$ ;(2)雪地表面的温度不会高于雪融化的温度(Segal et al,1991a)。中尺度范围的雪地,与裸地相邻,在大气低层可产生较大的水平热力梯度,在  $500 \text{ m}$  以下,大气平均温度差异达到  $5.5 \text{ K}$ (Cramer,1988; Segal et al,1991b),从而激发中尺度环流,也称为“雪风”(Johnson et al,1984)。理想数值试验表明,在深雪覆盖的大范围地区,可形成“雪风”,其强度与海风接近(Segal et al,1991b)。

## 2 陆气相互作用对中尺度对流系统发展的影响

### 2.1 地表水分和能量通量的作用

来自地面的水汽是大气水分的重要来源,而地面来的感热、潜热及辐射热通量是大气的重要热源。翟国庆等(1997)等用模式研究一次江淮暴雨两个例子,发现从边界层进入大气的水汽(或潜热通量)通过上空西南低空急流向长江下游输送,改变了下游大气的温、湿结构,通过积云对流和层状云的潜热释放促进过程后期气旋系统的发展,造成江淮暴雨,说明了地面水汽通量的重要作用。董佩明等(1999)对1992年7月23日京津冀暴雨进行研究,由考虑与不考虑地气之间热、水交换来评价地面和边界层对暴雨的影响,当不计此交换时,降水量减少  $40\%$ ,而当去掉辐射,但考虑热、水交换时,降水仅减少一成,可见地面通过边界层进入大气的水汽源是降水重要的水汽源,而感、潜热通量则是位势不稳定源,可见下垫面热、水强迫的重要作用。程麟生等(1996)也证明了地面热通量及其垂直输送有利于暴雨和低涡的发展,增加降雨量。无地面通量则中尺度系统发展弱,降水少。马淑芬等(1996)也有类似的结果,即地面通量影响降水强度,计入地面热、水通量能使模拟区域降水量增加。毛冬艳等(2008)对凝结潜热和地表热通量的敏感性试验分析表明,暴雨发生前,地表感、潜热通量等边界层非绝热过程造成气温升高、气压下降、湿度增大,进而影响对流层中低层的风场,对暴雨的发生发展起了

重要作用。

## 2.2 地表性质的影响

大气边界层的发展与陆地表面的性质密切相关 (McCumber et al, 1981; Zhang et al, 1982; Anthes, 1984)。在地形起伏不大的区域, 太阳辐射加热陆地表面, 来自地表的感热和潜热输送到大气中, 促使大气边界层的发展。在这个过程中, 地表性质的不均匀 (如土壤湿度和植被等) 会影响地表的潜热和感热的比值, 进而造成边界层大气的温度和湿度不均匀。下垫面的水分和能量通过湍流的垂直输送, 进入到大气上层, 作为大气的一部分能量来源, 影响其上的自由大气层。因此地表性质对于对流发展和对流降水, 都具有重要的作用。反过来, 降水的不均匀分布造成了土壤湿度的不均匀分布, 进而维持了地表性质的非均匀性。因此, 对于积云对流降水的发展, 地表和大气之间的相互作用是至关重要的 (Roger et al, 2001)。

理想数值试验表明 (Avissar et al, 1996) (图 2), 在地表性质不均匀的地区, 会形成近地层大气的气压和温度梯度, 在感热通量较大的区域产生上升运动, 由此产生中尺度环流, 并进一步产生对流降水。在下垫面性质均一的情况下, 不会产生中尺度环流。研究表明 (Pielke et al, 1991a), 夏季在潮湿的热带、中纬度地区和高纬度地区, 由于海陆表面性质的差异, 形成海风, 在岛屿和海岸地区会产生雷雨。Segal 等 (1984) 指出, 在有利的环境条件下, 在稠密植被与裸土相邻的区域内, 能够产生类似于海陆风的环流。

近地层大气的热量和湿度影响大气的浮力, 而浮力可以产生边界层中的上升运动。在大气相对较干的区域, 积云最早形成的地区具有较大的感热通量, 而在潜热通量较大的地区, 对流被抑制 (Rabin et al, 1990)。Chen 等 (1994) 利用数值模拟得到, 陆地表面的湿度对对流云形成的时间, 以及降水的强度和分布都有重要的影响。在美国大平原中心地区, 干线的形成非常依赖土壤湿度的空间分布 (Grasso, 2000)。Wetzel 等 (1996) 在研究中也发现, 云首先形成在比较热的稀疏植被区域, 而在落叶林地区, 由于垂直混合被抑制, 云的形成要晚 1~2 h。在土壤湿度较大的地区, 积云降水虽被推迟, 总降水量却比较大 (Clark et al, 1995)。Baker 等 (2001) 指出, 在 Florida 土壤湿度和其他因素能够影

响由海风引起的降水。洪水和人为地改变土地利用会影响大气、云和降水的水汽供给 (Mölders, 1999)。由于灌溉, 形成了高相当位温平流 (Segal et al, 1989b) 或大气低层辐合 (Cheng et al, 2004), 这与对流云的形成有关联。在以色列南部地区, 由于灌溉和农业措施集约化, 对流降水明显增加。在美国大平原, 也是因为改变了土地利用 (如灌溉), 对流降水增加 (Barnston et al, 1984)。只有在低层大气相对

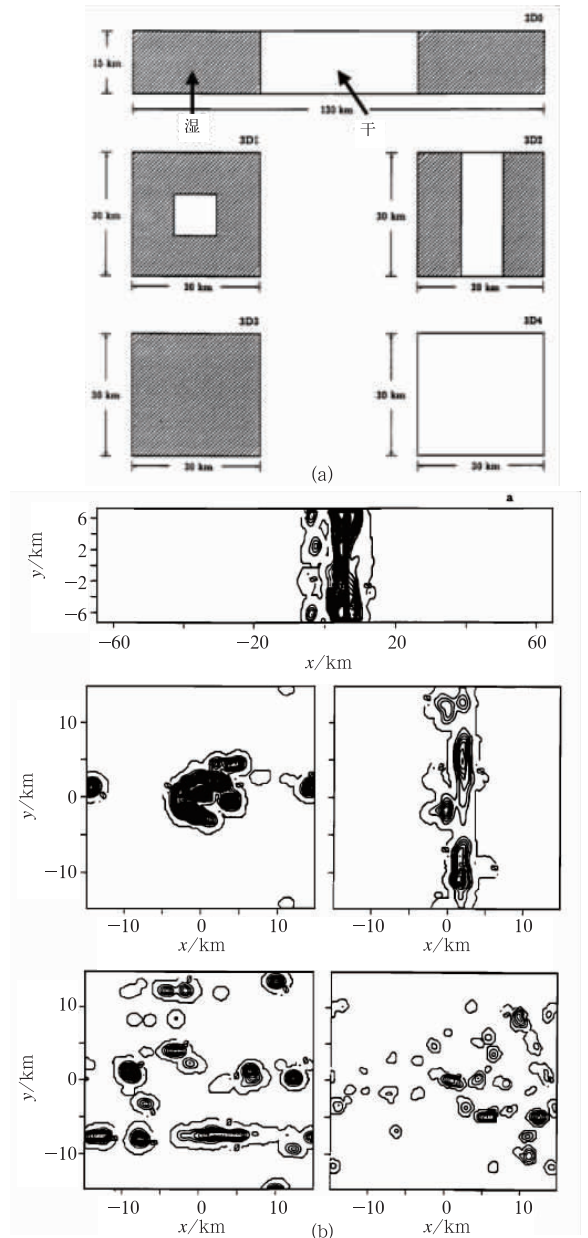


图 2 (a) 三维模拟区域示意图, (b) 各理想试验累积降水量 (摘自 Avissar et al, 1996)  
Fig. 2 (a) Schematic illustration of the simulated 3-D domains, (b) accumulated precipitation in each ideal experiment (Cited from Avissar et al, 1996)

干燥,且热力不稳定,增加土壤湿度会增加局地降水;而当低层大气比较潮湿时,缺乏有利于深积云对流形成的热力强迫时,增加土壤湿度会减少降水(Pan et al,1996)。

在被加热的地面上,地表状况(如土壤湿度和植被覆盖)对降水的发展具有重要影响。大气中的水汽主要来自土壤蒸发和植物蒸腾,潜热(水汽)能够控制抬升凝结高度,而抬升凝结高度与云底的高度密切相关。混合边界层高度能够影响雷暴云的结

构,也能够控制云下雨滴的蒸发量(McCaul et al, 2002)。Yamada et al (2006)指出(图 3),青藏高原上,对流层上层被反气旋控制的条件下,与 6 月(转变前)相比,7 月(转变后)由于土壤湿度增加和植被生长,促使感热通量减小,潜热通量增大,近地层大气的湿度增加,温度和浮力降低,云底的高度也随之降低。同时,由于云下大气湿度增加,雨滴在降落过程中,蒸发量减小,从而降水增加。

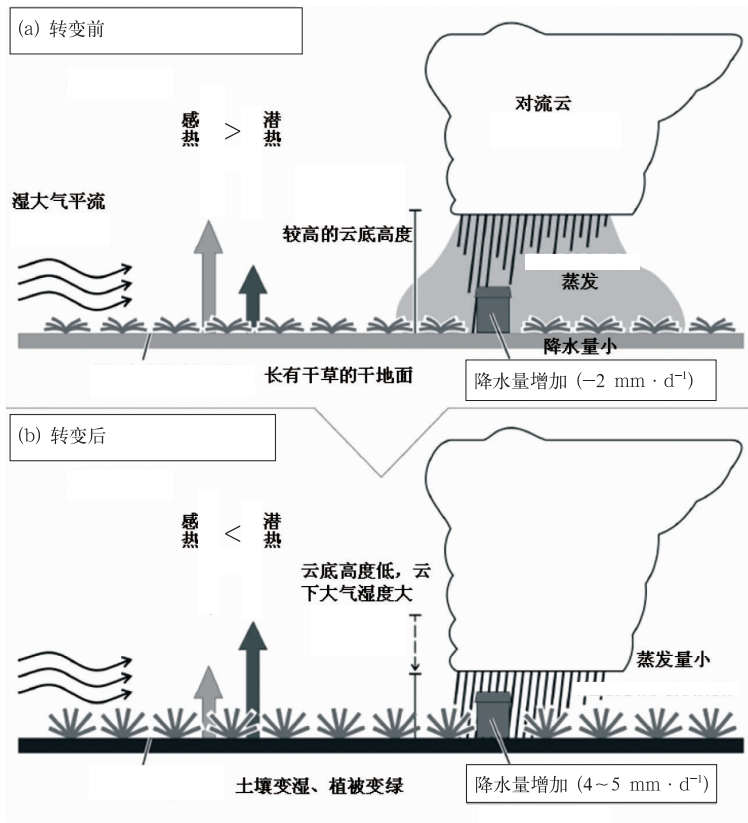


图 3 由于地表性质变化而引起降水特点转变的示意图  
(摘自 Yamada, 2006)

Fig. 3 Schematic illustration of the transition of rainfall characteristics caused by changes in ground surface conditions  
(Cited from Yamada, 2006)

以上论述都表明,陆面的非均匀性造成了地表向大气输送的能量和水分的差异,从而在边界层大气中产生了气压、温度的水平梯度,并通过湍流的垂直输送,进一步影响其上的高层大气。

### 2.3 陆面热力和动力强迫的共同影响

起伏不平的地形作为强迫振动的外源,会对大气运动产生影响。例如当气流越过山脉时,其迎风

坡由于地形的抬升产生上升运动,而在背风坡则有下沉运动。低层大气流经不同性质的下垫面时,大气的性质受到下垫面的影响,因此而发生变化。当大气流经干热的下垫面时,由于地表感热通量较大,近地层大气被加热,浮力增加;而当气流经潮湿的区域时,来自地表较大的潜热通量增加了大气中的水汽含量。

南亚夏季风为研究在高温、高不稳定的条件下



地形对降水的影响提供了一个理想的环境 (Houtz et al, 2007) (图 4)。在北半球夏季风期间, 来自孟加拉湾和阿拉伯海暖湿的低层风登上南亚大陆后, 遇到了喜马拉雅山这一世界最大的山脉阻挡 (Murkami, 1987)。由于山脉的影响, 大量的雨水降落到南亚次大陆北部。Houtz et al (2007) 认为, 包含强对流回波的对流系统发生在喜马拉雅山西北部凹陷地带, 具有如下环境条件: (1) 来自阿拉伯海的

低层气流非常潮湿; (2) 当潮湿的低层气流经过干热的塔尔沙漠时, 被加热, 增加了气流的浮力; (3) 来自阿富汗或青藏高原的干气流覆盖在潮湿的低层气流上, 在山脉的上游阻止了对流不稳定的释放; (4) 不稳定的低层气流受到喜马拉雅山山脉地形的抬升作用, 最终形成深对流。这与美国大平原上形成的强对流情况类似, 源自墨西哥高原的干气流覆盖在来自墨西哥湾的湿气流之上, 由于地形的抬升, 而产生了强对流 (Carlson et al, 1983) (图 5a)。

Houtz 等 (2007) 还注意到了位于喜马拉雅山东南侧的包含大面积层云回波的对流系统, 它的形成与季风期间孟加拉湾的低压北移有关 (Houtz et al, 1987)。对位于喜马拉雅山东南侧的降水系统的形成做出了如下假设: (1) 经过孟加拉湾的季风气流水汽含量很大; (2) 季风气流登陆后, 向东移动又经过了孟加拉国湿地和恒河三角洲, 进一步增加了气流的水汽含量; (3) 天气尺度系统中大范围较弱的上升运动提供了一个潮湿的环境, 这有利于中尺度对流系统的发展; (4) 含有大面积层云的中尺度对流系统在东移的过程中, 遇到了位于孟加拉湾以东的喜马拉雅山和其他山脉, 由于地形的抬升作用, 加强了层云降水 (图 5b)。

由于以上研究结果都是基于分析卫星和再分析资料做出的假设, 为了验证这些结果, 进一步确定在南亚季风区地形和地表状况如何共同影响湿气流, 控制极端对流的形成, Medina 等 (2010) 使用一个高分辨率的中尺度模式进行研究, 模式输出结果支持了这些结论。

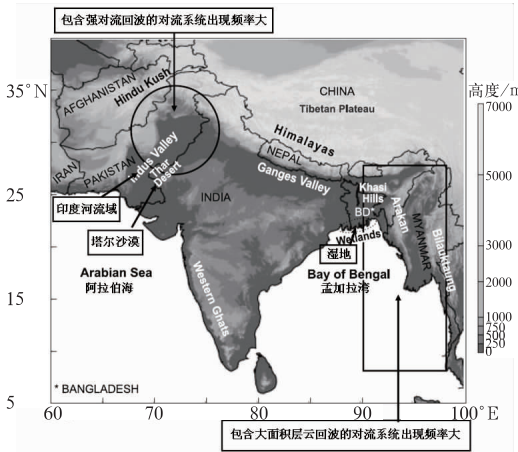


图 4 频繁形成包含强对流回波的对流系统 (圆形区域) 和包含大面积层云回波的对流系统 (矩形区域) 的地形、相关地理位置和区域 (摘自文献 Medina et al, 2010)

Fig. 4 Frequent occurrence of Convective systems containing intense convective echoes (circle) and convective systems containing broad cumulus-stratiform echoes (rectangle) (Cited from Medina et al, 2010)

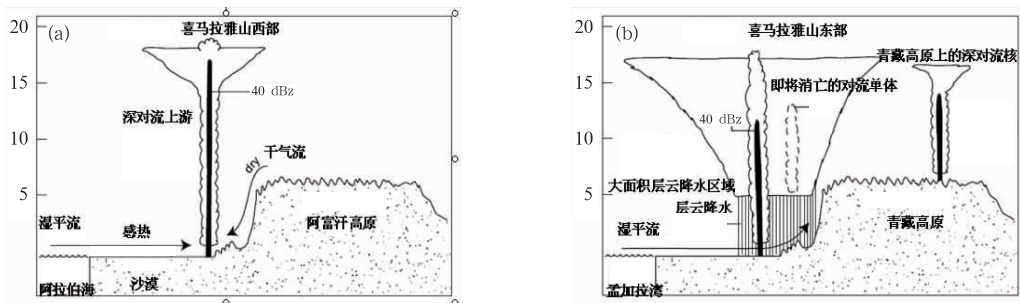


图 5 在各研究区域极端降水事件示意图

(a) 在喜马拉雅山西北部包含强对流回波的对流系统, (b) 位于喜马拉雅山东南侧的包含大面积层云回波的对流系统和高原上包含强对流回波的对流系统 (摘自 Houtz et al, 2007)

Fig. 5 Schematic illustration of typical extreme precipitation events

(a) Convective system intense convective echo in northwestern Himalayas, (b) Convective system with a broad stratiform precipitation echoes in the southeastern side of Himalayas and the convective system with severe convective echoes over plateau (Cited from Houtz et al, 2007)

## 2.4 土壤湿度与天气尺度系统的共同影响

土壤湿度对降水的影响受到多个因素的影响,其中天气尺度过程对中尺度对流系统的影响是很显著的(Rabin et al,1990;Ek et al,1994;Taylor et al,1997;2006;Findell et al,2003a,2003b)。陶诗言等(1979)等指出,大尺度环境条件不但制约了暴雨和强对流天气及其演变过程,而且还可影响对流系统内部的结构、强度、运动和组织。Ek 等(1994)在研究天气尺度条件和感热、潜热通量时发现,自由大气水汽含量较低,有较强的大气层结时,对流形成在地表感热通量较大的区域;而当自由大气水汽含量高,大气层结较弱时,对流形成在地表潜热通量较大的区域。Frye 等(2010)指出,天气尺度系统较弱,土壤湿度达到 15%(25%),存在(没有)低层急流,对流形成的可能性增加;当土壤湿度低于这个值时,对流形成的几率随着土壤湿度和土壤湿度梯度的增加而减少;天气尺度系统较强时,对流形成的几率更加多变,这说明较强的天气尺度系统减小了土壤湿度不均匀性对对流形成的影响。

## 2.5 局地环流的影响

局地环流是由下垫面性质的不均匀性(如城市与乡村、绿洲与沙漠、湖泊与内陆等)、地形起伏、坡向差异等局地的热力和动力因素所引起。如城市热岛环流、海陆风、山谷风等。由局地环流引起的边界层大气辐合产生上升气流,增加了对流有效位能和其他有利于积云发展的因素,从而触发积云对流(Pielke et al,1991a;1991b)。

## 2.6 大气的状态和运动对地表属性的影响

陆面的非均匀性造成了地表向大气输送的能量和水分的差异,通过湍流的垂直输送,影响其上的高层大气。同时,大气的状态和运动也会影响地表的属性。Emori(1998)利用理想的数值试验研究土壤湿度梯度与对流降水之间的相互作用得出,降水的不均匀分布维持了土壤湿度的差异。在 Sahel 地区,由于对流降水的不均匀分布,形成了陆地表面湿度的不均匀(Taylor et al,1997;2007)。这些都说明了不同的大气运动形成降水的不均匀分布,从而造成陆面属性不均匀。

## 3 结 论

边界层和陆面过程影响了地气间交换,进而会影响大气中各种动力和物理过程。本文总结了国内外学者这方面的研究,认为陆面性质(包括反照率、土壤温度和湿度、植被覆盖等)通过改变陆气间的能量和水分交换,由于湍流的垂直输送,进而影响到其上大气的性质;下垫面性质分布不均匀,则地表向大气的热通量和水汽就会存在差异,从而在近地层大气中形成温度和气压梯度,产生局地环流,在条件适合的情况下可以形成对流,并产生降水,而降水的分布不均匀,又维持了下垫面的不均匀性;土壤湿度对对流的影响受到多个因素的制约,其中天气尺度过程的影响是很显著的;由不均匀的下垫面所产生的局地环流能够触发积云对流。因此陆气之间存在着复杂的、非线性的相互作用。

新的观测平台(如 TRMM、Cloudsat 等),为我们提供了在全球范围内高分辨率的观测资料,使得我们能够更加详细地了解对流的特点和变化;而具有更高分辨率和更精确模拟陆面过程的天气模式,则为我们提供了进一步了解陆气相互作用影响对流活动机制的工具。新资料和新工具的使用,使我们能够更深入地了解积云对流降水过程中陆气相互作用的重要性,以及陆气相互作用影响对流活动的机理,尤其是在观测站点稀少的地区。

## 参考文献

- 陈海山,孙照渤.2002.陆气相互作用及陆面模式的研究进展.南京气象学院院报,25(2):277-288.
- 陈万隆,王革丽,周锁铨.1997.植被分布对青藏高原东侧暴雨过程影响的数值模拟.高原气象,16(2):165-173.
- 程麟生,彭新东.1996.行星边界层物理过程对暴雨及其中尺度系统演变的影响//85-906-08 课题组.暴雨科学业务试验和天气动力学理论研究.北京:气象出版社,279-285.
- 丁仁海,周后福.2010.九华山区下垫面对局地降水的影响分析.气象,36(3):47-53.
- 丁一汇.2005.高等天气学.北京:气象出版社,585.
- 董佩明,张维桓.1999.下垫面强迫对京津冀大暴雨作用的数值研究.应用气象学报,10(4):436-444.
- 杜华武,颜宏.1993a.下垫面特征对一次短期天气过程影响的数值试验(一).应用气象学报,4(2):129-137.
- 杜华武,颜宏.1993b.下垫面特征对一次短期天气过程影响的数值试验(二).应用气象学报,4(2):385-393.

- 马淑芬, 丁一汇, 郭立新, 等. 1996. 暴雨系统与地面通量的数值试验 // 85-906-08 课题组. 暴雨科学业务试验和天气动力学理论研究. 北京: 气象出版社, 286-291.
- 毛冬艳, 乔林, 陈涛, 等. 2008. 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨数值模拟分析. 气象, 34(2): 25-32.
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨对强对流天气的研究. 大气科学, 3(3): 227-238.
- 陶诗言, 等. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225.
- 翟国庆, 高坤. 1997. 江南地面热通量对江淮气旋暴雨形成的模拟研究. 气象学报, 55(1): 55-65.
- 张瑛, 肖安, 马力, 等. 2011. WRF 耦合 4 个陆面过程对“6.19”暴雨过程的模拟研究. 气象, 37(9): 1060-1069.
- Anthes R A. 1984. Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions. J Climate Appl Meteor, 23: 541-553.
- Avissar R, Schmidt T. 1996. Three-dimensional numerical study of shallow convective clouds and precipitation induced by land surface forcing. J Geophys Res, 101: 7499-7518.
- Baker R D, Lynn B H, Boone A, et al. 2001. The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-breeze initiated precipitation. J Hydrometeor, 2: 193-210.
- Barnston A G, Schikiedanz P T. 1984. The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern Great Plains. J Climate Appl Meteor, 23: 865-888.
- Betts A K. 2004. Understanding hydrometeorology using global climate models. Bull Amer Meteor Soc, 85: 1673-1688.
- Carlson T N, Benjamin S G, Forbes G S. 1983. Elevated mixed layers in the regional severe storm environment: Conceptual model and case studies. Mon Wea Rev, 111: 1453-1473.
- Chen F, Avissar R. 1994. Impact of land-surface moisture variabilities on local shallow convective cumulus and precipitation in large-scale models. J Appl Meteor, 33: 1382-1394.
- Cheng Y W, Cotton W R. 2004. Sensitivity of a cloud-resolving simulation of the genesis of a mesoscale convective system to horizontal heterogeneities in soil moisture initialization. J Hydrometeor, 5: 934-958.
- Clark C A, Arritt R W. 1995. Numerical simulations of the effect of soil moisture and vegetation cover on the development of deep convection. J Appl Meteor, 34: 2029-2045.
- Cramer J H. 1988. Observation evaluation of snow cover effects on the generation and modification of mesoscale circulations. Paper # 439, Dept of Atmospheric Science, CSU, Fort Collins, CO, 144.
- Dirmeyer P A. 2006. The hydrological feedback pathway for land-climate coupling. J Hydrometeor, 7: 857-867.
- Ek M, Mahrt L. 1994. Daytime evolution of relative humidity at the boundary layer top. Mon Wea Rev, 122: 2709-2721.
- Eltahir E A B. 1998. A soil moisture-rainfall feedback mechanism: 1. Theory and observations. Water Resour Res, 34: 765-776.
- Emori S. 1998. The interaction of cumulus convection with soil moisture distribution: An idealized simulation. J Geophys Res, 31: 633-643.
- Findell K L, Eltahir E A B. 2003a. Atmospheric controls on soil moisture-boundary layer interactions. Part I: Framework development. J Hydrometeor, 4: 552-569.
- Findell K L, Eltahir E A B. 2003b. Atmospheric controls on soil moisture-boundary layer interactions. Part II: Feedbacks within the continental United States. J Hydrometeor, 4: 570-583.
- Frye J D, Thomas L M. 2010. Convection initiation along soil moisture boundaries in the Southern Great Plains. Mon Wea Rev, 138: 1140-1151.
- Grasso L D. 2000. The numerical simulation of dryline formation on soil moisture. Mon Wea Rev, 128: 2816-2834.
- Houtz R A Jr, Churchill D D. 1987. Mesoscale organization and cloud microphysics in a Bay of Bengal depress. J Atmos Sci, 44: 1845-1867.
- Houtz R A Jr, Wilton D C, Smull B F. 2007. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM Precipitation Radar. Q J R Meteor Soc, 133: 1389-1411.
- Johnson R H, Young G S, Toth T J, et al. 1984. Mesoscale weather effects of variable snow cover over north-east Colorado. Mon Wea Rev, 112: 1141-1152.
- Koster R D, Suarez M J, Higgins R W, et al. 2003. Observation evidence that soil moisture variations affect precipitation. Geophys Res Lett, 30: 1241. doi: 10.1029/2002GL016571.
- LeMone M A, Chen F, Alfieri J G, et al. 2007. Influence of land cover and soil moisture on the horizontal distribution of sensible and latent heat fluxes in Southeast Kansas during IHOP\_2002 and CASES-97. J Hydrometeor, 8: 68-87.
- Maddox R A, Hoxit L R, Chappell C F. 1980. A study of tornadic thunderstorm interaction with thermal boundaries. Mon Wea Rev, 108: 322-336.
- Mahreh Y, Pielke R A. 1978. The meteorological effect of the changes in surface albedo and moisture. Isr Meteorol Res Pap, 2: 55-70.
- Mahfouf J F, Richard E, Mascart P. 1987. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations. J Climate Appl Meteor, 28: 1483-1495.
- McCaul E W, Cohen Jr C. 2002. The impact on simulated storm structure and intensity of variations in the mixed layer and moist layer depths. Mon Wea Rev, 130: 1722-1748.
- McCumber M C, Pielke R A. 1981. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. Part I: Soil layer. J Geophys Res, 86: 9929-9938.
- Medina S, Houtz Jr R A, Kumar A, et al. 2010. Summer monsoon convection in the Himalayan region: Terrain and land cover effects. Q J R Meteor Soc, 136: 593-616.
- Mölders N. 1999. On the effects different flooding stages of the Oder



- and different land-use types on the distributions of evapotranspiration, cloudiness and rainfall in the Brandenburg-Polish border area. *Contrib Atmos Phys*, 72:1-25.
- Murkami T. 1987. Orography and monsoon. Chapter 12 in Monsoon. JS Fein and PL Stephens (eds.) John Wiley and Sons, New York.
- Nykanen D K, Fofoula-Georgiou E, Lapenta W M. 2001. Impact of small-scale rainfall variability on large-scale spatial organization of land-atmosphere fluxes. *J Hydrometeorol*, 2:105-121.
- Ookouchi Y, Segal M, Kessler R C, et al. 1984. Evaluation of soil moisture effects on the generation and modification of mesoscale circulations. *Mon Wea Rev*, 112:2281-2292.
- Pan Z, Takle E, Segal M, et al. 1996. Influence of model parameterization schemes on the response of rainfall to soil moisture in the central United States. *Mon Wea Rev*, 124:1786-1802.
- Pielke R A, Song A, Michaels P J, et al. 1991a. The predictability of sea-breeze generated thunderstorms. *Atmosfera*, 4:65-78.
- Pielke R A, Dalu G, Snook J S, et al. 1991b. Nonlinear influence of mesoscale land use on weather and climate. *J Climate*, 4:1053-1069.
- Pielke R A, Lee T J, Copeland J H, et al. 1997. Use of USGS-provided data to improve weather and climate simulations. *Ecol Appl*, 7:3-21.
- Physick W L, Tapper N J. 1990. Numerical study of circulations induced by dry salt lake. *Mon Wea Rev*, 118:1029-1042.
- Pinty J-P, Mascart P, Richard E, et al. 1989. An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against the HAPEX-MOBILHY data. *J Appl Meteor*, 28:976-992.
- Rabin R M, Stadler S, Wetzel P J, et al. 1990. Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bull Am Meteor Soc*, 71:272-280.
- Roger A, Pielke Sr. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soil on the prediction of cumulus convective rainfall. *Review of Geophysics*, 39:151-177.
- Segal M, Mahrer Y. 1984. Evaluation of surface sensible heat flux effects on the generation and modification of mesoscale circulations. *Proc Second Int Symp On Nowcasting*, European Space Agency, Norrköping, Sweden, 263-269.
- Segal M, Purdom J F W, Pielke R A. 1986. Evaluation of cloud shading effects on the generation and modification of mesoscale circulations. *Mon Wea Rev*, 114:1201-1212.
- Segal M, Avissar R, McCumber M C, et al. 1988. Evaluation of vegetation effects on the generation and modification of mesoscale circulations. *J Atmos Sci*, 45:2268-2292.
- Segal M, Garratt J R, Kallos G, et al. 1989a. The impact of wet soil and canopy temperatures on daytime boundary-layer growth. *J Atmos Sci*, 46:3673-3684.
- Segal M, Schreiber W E, Kallos G, et al. 1989b. The impact of crop areas in northeast Colorado on midsummer mesoscale thermal circulations. *Mon Wea Rev*, 117:809-825.
- Segal M, Garratt J R, Pielke R A, et al. 1991a. Scaling and numerical model evaluation of snow cover effects on the generation and modification of mesoscale circulation. *J Atmos Sci*, 48:1024-1042.
- Segal M, Cramer J H, Pielke R A, et al. 1991b. Observational evaluations of the snow breeze. *Mon Wea Rev*, 119:412-424.
- Tapper N J. 1991. Evidence for a mesoscale thermal circulation over dry salt lakes. *Palaeogeog. Paleoclim. Palaeoecol.* (in press). Volume 84, Issues 1-4, 15 May 1991, Pages 259-269 *Paleoenvironments of Salt Lakes*.
- Taylor C M, Ellis R J. 2006. Satellite detection of soil moisture impacts on convection at the mesoscale. *Geophys Res Lett*, 33, L03404, doi:10.1029/2005GL025252.
- Taylor M C, Parker D J, Harris P P. 2007. An observational case study of mesoscale atmospheric circulations induced by soil moisture. *Geophys Res Lett*, 34, L15801.
- Taylor C M, Said F, Lebel T. 1997. Interactions between land surface and mesoscale rainfall variability during HAPEX-Sahel. *Mon Wea Rev*, 125:2211-2227.
- Wetzel P J, Argentini S, Boone A. 1996. Role of land surface in controlling daytime cloud amount: Two case studies in the GCIP-SW area. *J Geophys Res*, 101:7359-7370.
- Xiu A, Pleim J E. 2001. Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *J Appl Meteor*, 40:192-209.
- Yamada H, Uyeda H. 2006. Transition of the rainfall characteristics related to the moisture of the land surface over the central Tibetan Plateau during the summer of 1998. *Mon Wea Rev*, 134:3230-3247.
- Zhang D, Anthes R A. 1982. A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESA-ME-79 data. *J Appl Meteor*, 21:1594-1609.