

欧亚大陆春季植被状况与东亚夏季大气环流的显著联系*

毛睿¹ 龚道溢¹ CHEN Delian^{g2}
MAORui¹ GONG Dao yi¹ CHEN Delian^{g2}

1. 北京师范大学资源学院,地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学),北京,100875

2. Earth Sciences Centre, Gothenburg University, Gothenburg S-40530, Sweden

1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (Beijing Normal University), College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. Earth Sciences Centre, Gothenburg University, Gothenburg S-40530, Sweden

2007-07-09 收稿, 2007-10-15 改回.

Mao Rui, Gong Dao yi, Chen Delian g. 2008. The evident linkages of springtime NDVI over Eurasia with East Asian atmospheric circulation in summer. Acta Meteorologica Sinica, 66(4): 592-598

Abstract Vegetation can feedback on climate, both directly on the energy budget through surface albedo and exchange of heat, water, and momentum and indirectly on the biogeochemical process. The purpose of this paper is to provide the statistical linkages of springtime vegetation variation over the Eurasia with summer East Asian atmospheric circulation using observational data. We firstly apply the European Center for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis datasets (ERA40) and the UMD GLCF GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dataset from 1982 to 2002 to reveal the association of the NDVI over Eurasia with the zonal wind at 200 hPa level (U_{200}) over East Asia using singular value decomposition (SVD) analysis. The results show that there is a significant relation between the spring NDVI in the sensitive area (55° - 65° N, 60° - 100° E) west of Baikal Lake and summer East Asian atmospheric circulation, and the most important NDVI- U_{200} connection accounts for 33.39% of the total squared covariance. When the spring NDVI in the sensitive area is above the normal, there are remarkable positive zonal wind anomalies in summer in the troposphere over the Balchas Lake-Baikal Lake-northern Japan area, and over South China and the Indochina Peninsula, and distinctive negative zonal wind anomalies over North China and the Changjiang-Huaihe River Valley, and therefore the anomalous center exhibits a positive-negative-positive sign distribution from north to south, which indicates that the summer 200 hPa westerly axis lies south of the normal position. In the middle troposphere, the westerly is stronger between 15° N and 25° N accompanied with a stronger ascending motion, but weaker between 25° N and 42° N with a distinctively descending motion over about 32° N. In the lower troposphere, there are evident anomalous anticyclonic wind anomalies over the Changjiang-Huaihe River Valley, North China and the area east of Baikal Lake, and anomalous northerly anomalies over South China. Those circulation characteristics suggest that the East Asian summer monsoon (EASM) is weaker than normal, and the summer rain band lies south of the normal position, which results in excessive summer rainfall in South China and deficit rainfall in the most areas north of South China. Correspondingly, summer temperature is lower than normal over southeast China and the southeastern Tibet Plateau, and higher over northern China and the Changjiang-Huaihe River Valley. The possible association between the NDVI over the Eurasian continent and the EASM could provide some help for forecast of EASM.

Keywords Eurasia, Springtime vegetation, East Asia, Summer atmospheric circulation

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划(2007CB106806,2006CB400505)和国家自然科学基金项目(40675035)。

作者简介:毛睿,主要从事气候变化及其影响研究。E-mail:mr@ires.cn

摘要 地表植被覆盖的变化能通过改变陆面参数,以及生化循环过程,对区域和全球气候产生重要影响。文中利用1982—2002年欧亚大陆春季归一化植被指数(NDVI)和欧洲中期数值天气预报中心再分析资料,采用奇异值分解分析方法,研究欧亚大陆春季植被状况与东亚夏季大气环流的关系。结果表明,贝加尔湖以西区域(55° — 65° N, 60° — 100° E)春季植被状况与东亚夏季大气环流存在显著联系。当春季该区植被指数偏高时,在对流层高层从巴尔喀什湖、贝加尔湖至日本北部,以及中国华南和中南半岛上空存在显著的纬向风正异常,中国华北地区和江淮地区以北为显著负异常,异常中心自北向南依次为“正-负-正”分布,说明东亚夏季200hPa西风急流轴偏南;相应的在对流层中层 15° — 25° N地区西风偏强,伴随偏强上升气流,而在 25° — 42° N地区西风偏弱,并且在 32° N附近存在显著下沉气流;在对流层低层,中国江淮流域以北、华北及贝加尔湖以东地区存在明显的反气旋型风场异常,而华南存在东北风异常。这种环流特征说明东亚夏季风偏弱,雨带偏南,并且使得中国华南降水偏多,华南以北大部分地区降水偏少,同时中国东南以及青藏高原东南部温度偏低,而中国北方以及江淮流域温度偏高。欧亚大陆春季植被状况与东亚夏季风的显著关系为东亚夏季风预测提供了有用的帮助。

关键词 欧亚大陆, 春季植被, 东亚, 夏季大气环流

中图分类号 P461+.7

1 引言

地表植被覆盖的变化能通过改变陆面参数对区域和全球气候产生重要影响(Chase,etal,2000; Zhao,etal,2001)。北半球大尺度地表覆盖变化的实验模拟说明,全球气候的响应有明显区域差别,有些地方气候的敏感度高(Zhao,etal,2001)。研究东亚夏季风和气候对地表覆盖变化的响应,对理解东亚季风的变率以及预测是很重要的。丁一汇等(2005)和郑益群等(2002a,2002b)用区域气候模式模拟得出,中国北方草原荒漠化和南方长绿阔叶林退化,加剧了华北、西北地区的干旱,使得江淮流域洪涝灾害增多,而且对东亚冬、夏季风强度有一定程度的影响。符淙斌等(2001)和张井勇等(2005)的实验表明,中国北方和蒙古南部植被状况的改变对中国东部夏季气候能产生系统性的影响,其中夏季风的相应变化是一个关键要素。不过这些研究分析的范围多局限在东亚,一些研究表明区域气候与植被的协方差存在一些高值中心,如西伯利亚春季气温与植被之间就有很高的协方差(Gong,etal,2003)。很明显,要揭示这些关键区不能局限于东亚而需要将分析区域扩展到更大范围。本文通过分析整个欧亚大陆的植被指数,发现春季西伯利亚地区的植被状况与东亚夏季风存在显著的联系。

2 资料和分析方法

植被状况用归一化植被指数(NDVI)表征,使用月最大值数据(UMDGLCFGIMMS-NDVIg资料)。该资料分辨率为 $8\text{km} \times 8\text{km}$,已经过大气订正等处理,具体技术细节可参考Tucker等(2005)的

文章。由于 8km 分辨率的资料易受局地环境影响,将原始数据处理为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度的分辨率。Suzuki等(2001)指出,3月欧亚大陆大部分区域被雪盖覆盖,植被生理活动较弱,4—5月植被开始返青,除了 63° N以北仍然为雪盖覆盖外,其余地区NDVI值普遍增加,尤其在 55° — 60° N增加比较明显。故文中以4—5月NDVI平均值作为春季NDVI值,时间长度为1982—2002年。

所用高空风场、高度场资料是欧洲中期数值天气预报中心再分析资料(ERA40)。资料为全球范围,其空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度,时段为1957—2002年。原始资料为每日4个时次,我们选用00:00UTC时刻的资料。

降水和温度资料取自中国160站月降水、温度数据集,资料时段为1951—2002年。所用全球地表温度资料取自CRU,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 经纬度,时段为1901—2002年。以上资料为了与NDVI数据保持一致,我们只取1982—2002年,限定春季为4—5月,夏季为6—8月。

本文使用奇异值分解(SVD)分析方法,同时考虑NDVI和东亚夏季大气环流之间联系最强的时空变化特征。首先将NDVI值和200hPa纬向风处理成对1982—2002年的距平,再相乘得到协方差阵,对协方差阵进行SVD分析,可以得到奇异值,每一个奇异值对应NDVI和200hPa纬向风的模态,以及每一种模态的时间系数。由于奇异值的平方和与协方差的平方和相等,所以,每一个奇异值的平方与协方差平方和的比值反映了每对模态的解释率,解释率越高,相应的模态越重要。SVD分析方法特别有效于分析遥相关型,而且更能从多方面解释物

理意义(Gong,etal,2003)。

3 结果

3.1 春季 NDVI 与夏季东亚环流的关系

为了从整体上检查春季 NDVI 和夏季季风之间的可能联系,我们首先对欧亚大陆春季 NDVI 距平值与东亚夏季 200hPa 纬向风 (U_{200}) 距平值(1982—2002 年平均值)进行了 SVD 分析,分析区域取为 0° — 70° N, 30° — 160° E。第一对模态解释率为 33.39%, 左右场之间时间系数相关值为 0.81。NDVI 距平场(图 1a)表明,贝加尔湖以西大片区域、中国华北和中南半岛等小块区域存在 NDVI 正异常,负异常几乎不存在。模态的异常中心位于西伯利亚。相对应的 U_{200} 距平场(图 1b)反映出从巴尔喀什湖、贝加尔湖至日本北部,以及中国华南和中南半岛上空分布着显著的纬向风正异常,中间为显著负异常,且强度最强,大致位置位于中国华北地区和江淮地区以北。 U_{200} 异常区大体上呈东西走向。为

了更清楚表示图 1a 中 NDVI 变化与 U_{200} 变化的关系,我们用图 1a 时间系数的标准化值(后称 NDVI-PC1)对 200hPa 纬向风进行回归分析,异常中心位置与图 1b 相似,即自北向南依次为“正-负-正”分布(图略)。当 NDVI 增加(减少)1 个标准化值时,南北正异常中心增加(减少)1m/s, 中间强负异常中心减少(增加)3m/s。200hPa 纬向风这种分布可能与副热带西风急流位置移动有密切关系。而副热带西风急流位置移动对夏季风雨带移动有重要作用。考虑到北半球高纬地区 NDVI 指数近年来呈增长趋势(Myneni,etal,1997) ,长期增长趋势可能对结果存在影响,用回归方法去除 NDVI 和 U_{200} 长期趋势后,再次进行 SVD 分析。年际尺度变率的结果与图 1 基本相似,只是图 1a 中显著区域信号更强。上述分析说明,欧亚大陆中高纬春季 NDVI 变化与夏季 U_{200} 环流场变化可能有紧密联系。为讨论方便,下文称图 1a 中西伯利亚正异常中心为敏感区。

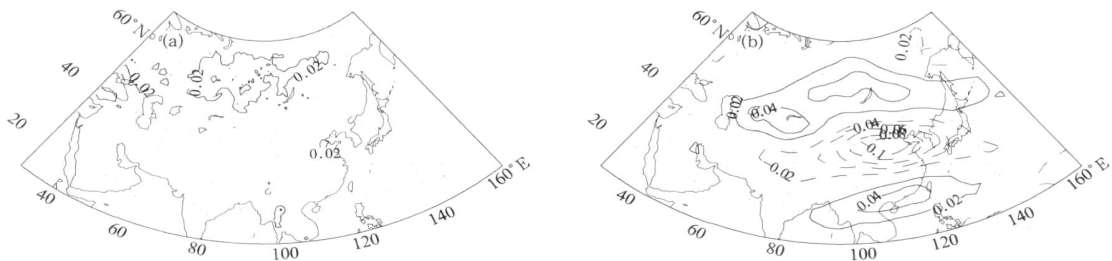


图 1 春季 NDVI 距平与夏季 U_{200} 距平 SVD 分析第一模态

(a. NDVI 距平场, b. U_{200} 距平场;为清楚表示,0 值线省去,等值线间隔 0.02)

Fig.1 First paired modes of the SVD analysis of (a) spring NDVI anomalies and

(b) summer U_{200} anomalies over the domain of 0° — 70° N, 30° — 160° E

(Units are arbitrary. Contour interval is 0.02 and the zero contour is omitted for clarity)

我们进一步检查整个对流层环流情况,来确认对流层变化的垂直结构。我们用 NDVI-PC1 分别与区域(100° — 120° E)平均纬向风、平均经向风和平均垂直风场做经向回归分析(图 2)。结果表明,从热带到中纬度存在多重经向环流,这与 Lau 等(2000)对季风分析的结果相似。当 NDVI-PC1 偏高时在对流层中层 15° — 25° N 地区存在异常西风,同时伴随偏强上升气流;在 25° — 42° N 存在异常东风,即西风偏弱,同时在 32° N 附近有显著下沉气流; 42° N 以北对流层中高层存在西风异常,低层有

下沉气流。对流层高层 3 个较强风场异常中心,一直延伸到低层,这种结构类似于正压结构,最大异常位于 200hPa 左右。因此,西伯利亚春季植被指数偏高的时候,东亚地区夏季 200hPa 西风急流轴偏南,急流轴气候中心以南西风增强,而以北西风减弱。显然急流的这种变化对东亚夏季风雨带位置必然有明显影响(Liang,etal,1998)。

为进一步说明东亚夏季风的变化,我们依据敏感区 NDVI 指数极大值和极小值年份对 850hPa 近地面风场做了合成分析(图略)。其中 1982、1991、

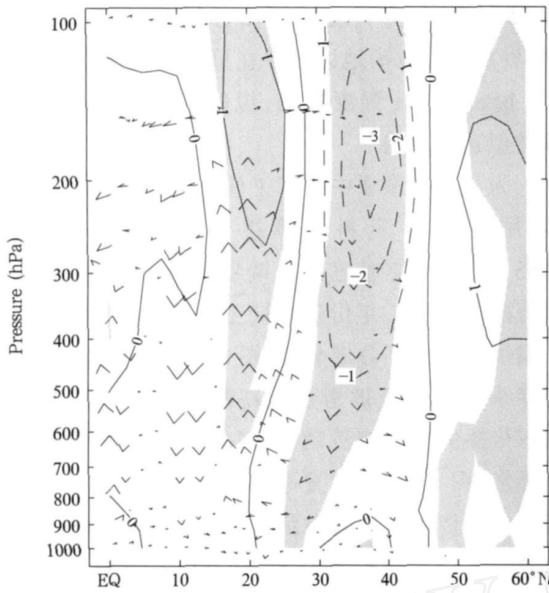


图2 NDVI-PC1 回归剖面图

(100°—120°E; 图中风矢为 v 和 $\times 100$ 合成, v 和 u 最大值依次为 0.40m/s 和 $1.3 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$. 等值线为 u , 实线为正值, 虚线为负值, 间隔为 1m/s , 阴影部分为通过 95% 信度检验)

Fig.2 Vertical crosssection of the zonal and meridional wind (u), meridional wind (v) and vertical motion ($\times 100$) over $100^\circ\text{--}120^\circ\text{E}$ (East Asia) regressed on the normalized temporal coefficient of NDVI - PC1 (u is shown as the contours at an interval of 1m/s (solid line: positive; dashed line: negative). Regions above the 95% confidence level are shaded. The resultant wind of v and $\times 100$ are shown as vectors. Units are m/s for u and v , and hPa/s for $\times 100$. The values of largest vector are 0.40m/s for v and $1.3 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$, respectively)

1994、1995 和 1997 年作为极大值年, 1983、1985、1993、1996 和 1998 年作为极小值年。当敏感区植被指数偏高时, 中国江淮流域以北、华北及贝加尔湖以东地区存在明显的反气旋型风场异常, 华南存在东北风异常。江淮流域以北地区的南风异常很可能说明冷空气活动偏弱, 导致温度偏高。而华南地区东北风异常说明夏季风偏弱, 雨带偏南, 导致华南地区降水偏多, 而中国北方地区降水偏少。华南地区降水偏多使得华南温度偏低。这种近地面风场异常与对流层中、高层环流变化具有一致性, 说明敏感区 NDVI 的变化与夏季东亚整个环流系统的变化有很好的对应关系, 这进一步会影响中国的降水和温度。

3.2 夏季温度和降水的变化

为了说明西伯利亚敏感区春季 NDVI 变化与中国夏季气候的关系, 我们做了温度和降水与 NDVI-PC1 的相关分析。中国夏季气温的变化为“北正南负”态势(图 3a)。中国东南以及青藏高原东南部为负相关, 而中国北方以及江淮流域主要为正相关, 其中华中、华北以及东北等地区通过 95% 信度检验, 相关系数在 0.4 以上。说明 NDVI-PC1 的变化能解释中国北方地区夏季温度变化方差的 16%—36%。我们同样也用 NDVI-PC1 对中国 160 站夏季温度进行回归分析(图略)。结果表明, 当 PC1 增强一个标准差时, 在华南等地降温幅度达 0.1 左右, 而中国北方大部分地区升温幅度达 0.1, 其中在东北、西北东部和华北部分地区升温幅度最高, 达

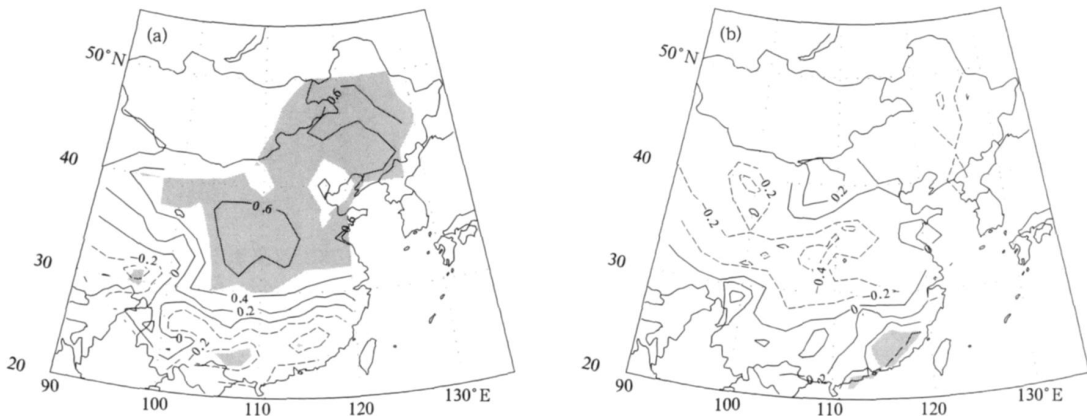


图3 NDVI-PC1 与夏季温度(a)和降水(b)相关分布

(阴影为通过 95% 信度检验, 等值线间隔 0.2)

Fig.3 The correlation of NDVI - PC1 with (a) summer temperature and (b) summer precipitation in China

(Areas above the 95% significance are shaded)

到 0.2 左右,反之亦然。

中国夏季降水与 NDVI-PC1 相关系数为“南正北负”分布(图 3b),与温度分布基本相反。其中华南为正相关,相关系数超过 0.4(通过 95% 信度检验),华南以北除内蒙中部、华北北部外均为负相关(均未通过 95% 信度检验)。有个别站负相关达到 -0.4,位于西北地区东部。我们同样用 NDVI-PC1 对夏季降水距平百分率做回归分析(图略)。结果表明,当 PC1 增强一个标准差时,华南大部分地区降水明显增加,增幅最高达 30%,而整个江南、江淮、华中地区则表现为减少趋势,减少幅度达 20%,西北地区东部减少幅度达 30%,华北北部和内蒙中部有略微增加趋势,增幅在 10% 左右,东北减少幅度为 20% 左右。

温度和降水的变化与大气环流的变化有比较好的对应关系。从图 2 中看,25°N 偏南地区有明显强辐合上升气流,25°N 以北地区基本为下沉气流覆盖,所以华南地区降水偏多,华南地区以北降水减少。降水的偏多(偏少)与温度偏低(偏高)一致。

3.3 可能影响机制

欧亚大陆春季 NDVI 变化究竟如何影响东亚夏季风,这是我们关心的内容。Zhao 等(2004)指出,欧洲春季土壤湿度减少可能导致夏季该地区地表热量增加,然后异常热源通过异常波形式激发东亚异常高压,进而影响到东亚夏季风。图 1a 中显著区域常年植被覆盖较好,春季升温较快(Suzuki, et al, 2001),很可能通过潜热感热等陆面过程影响局地或区域环流变化,再通过遥相关方式影响到东亚夏季风活动。

我们分析了 NDVI-PC1 对夏季 500hPa 高度场的回归系数(图 4)。结果表明,当 NDVI-PC1 偏强时,乌拉尔山以西、贝加尔湖以南为正位势高度异常,大西洋东部、乌拉尔山以东、鄂霍次克海附近,存在明显的负位势高度异常,中国华南地区也存在负位势高度异常,只是强度较弱,以上区域均通过 95% 信度检验。正负相间的异常中心呈波列分布。其中贝加尔湖以南东亚 40°—50°N 地区夏季的正异常很突出,范围也很宽。为了检查这种位势异常是否具有正压结构,我们还进行了 NDVI-PC1 与夏季 250

和 850hPa 位势高度的回归分析(图略)。结果表明,贝加尔湖以南地区均存在显著正位势高度异常,250hPa 高度上强度较强,说明这种正位势高度异常类似正压结构。

为了说明东亚中纬度正位势高度异常产生的原因,用 ERA40 资料计算逐年 EP 通量(Plumb, 1985),然后依据敏感区极端年份进行合成分析(极大值减极小值),年份选取同上。同时也对 CRU 地表温度资料做了合成分析(图 5,极大值减极小值)。当春季敏感区植被指数偏高时,500hPa 高度上有向东传播的异常波活动,同时敏感区地表温度存在正异常(图 5a)。随后夏季 200hPa 高度上中国东部存在向南传播的异常波活动,在贝加尔湖以东地区地表温度为正异常。这表明敏感区春季植被指数高时,地表温度为正异常,同时有向东传播的异常波,一直到 40°N 以北的东亚地区。而随后夏季东亚中纬度地表温度偏高,相应的在中国东部有向南传播的异常波。这对东亚中纬度从北向南的位势异常分布可能起了重要的作用。

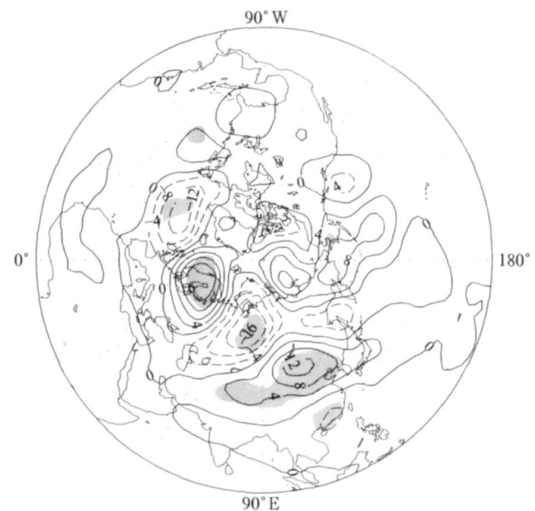


图 4 NDVI-PC1 对夏季 500hPa 高度场回归图
(单位:gpm,实线为正值,虚线为负值,阴影区表示通过 95% 信度检验.等值线间隔为 4)

Fig.4 Summer 500hPa geopotential heights (contour interval: 4 gpm) regressed on the normalized temporal coefficient of NDVI - PC1
(The solid/dashed line is for positive/negative value, respectively. Areas above the 95% confidence level are shaded.)

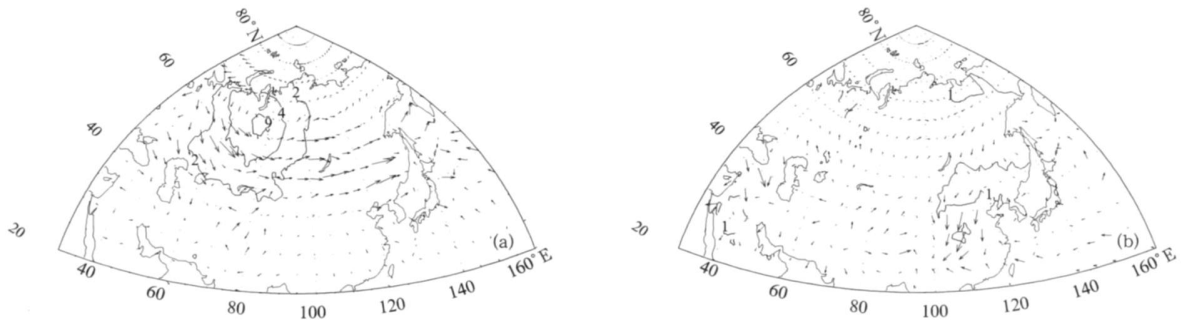


图5 春季 500hPa (a) 和夏季 200hPa (b) EP 通量合成(极大值年 - 极小值年)最大矢量值为 $10.84\text{m}^2/\text{s}^2$ (a) 和 $14.02\text{m}^2/\text{s}^2$ (b) 等值线为地表温度异常,实线为正值,虚线为负值,(a)中间隔为 2, (b)中为 1, 0 值省略

Fig.5 Composites of (a) spring 500hPa EP flux and (b) summer 200hPa EP flux (maximums minus minimums for 55°-65°N, 60°-100°E). Solid/dash contours are for positive/negative surface temperature anomalies, respectively, and the contour interval is 2 in (a) and 1 in (b) with the zero contour omitted for clarity. The value of largest vector is $10.84\text{m}^2/\text{s}^2$ in (a) and $14.02\text{m}^2/\text{s}^2$ in (b)

4 结论与讨论

以上分析说明,除了中国内蒙古及其周边地区、西北地区和青藏高原植被外,贝加尔湖以西区域(55°—65°N, 60°—100°E)春季植被覆盖很可能对中国夏季气候有明显影响。当春季敏感区植被指数偏高时,东亚地区夏季 200hPa 西风急流轴偏南,对流层中层 15°—25°N 地区西风偏强,伴随偏强上升气流,而在 25°—42°N 地区西风偏弱,并且在 32°N 附近存在显著下沉气流。这种环流特征使得中国华南降水偏多,华南以北大部分地区降水偏少,中国东南以及青藏高原东南部温度偏低,而中国北方以及江淮流域温度偏高。这种显著关系为东亚夏季风的预测提供了一条有用的指标。

本文只是从统计上得出欧亚大陆春季植被覆盖与东亚夏季风可能存在一定联系,还需数值模拟方法来进一步检验这种联系。此外,图 4 的相关分布显示,欧亚大陆春季植被指数的变化可能与大尺度的环流变化有密切联系。我们检查了 NDVI-PC1 对春季 500hPa 位势高度场的回归分析结果(图略),表明当 NDVI-PC1 偏强时,同期春季墨西哥湾、大西洋东、乌拉尔山以东地区表现为显著正位势高度异常,而大西洋西、乌拉尔山以西和东北亚为显著的负位势高度异常。这说明西伯利亚地区春季植被指数和地表温度可能与大尺度的气候信号有关,如欧亚遥相关型和前期冬季北大西洋涛动(NAO)

等。而欧亚大陆植被和温度对这种信号的气候影响,是否起到了桥梁和放大的作用也还需进一步研究。

References

- Chase TN, Pielke Sr RA, Kittel TGF, et al. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dyn*, 16: 93-105
- Ding Yihui, Li Qiaoping, Don G Wenjie. 2005. A numerical simulation study of the impacts of vegetation changes on regional climate in China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 63 (5): 613-621
- Fu Congbin, Yuan Huiling. 2001. A virtual numerical experiment to understand the impact of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 46 (14): 1199-1203
- Gong Dao yi, Ho CH. 2003. Detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere. *J Geophys Res*, 108 (D16), 4498, doi: 10.1029/2002JD002300
- Lau KM, Kim KM, Yan g S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon. *J Climate*, 13: 2461-2482
- Liang XZ, Wang WC. 1998. Association between Chinese monsoon rainfall and tropospheric jets. *Quart J Royal Meteor Soc*, 124: 2597-2623
- Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, et al. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386: 698-702
- Plumb RA. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J Atmos Sci*, 42 (3): 217-229

Suzuki R, Nomaki T, Yasunari T. 2001. Spatial distribution and its seasonality of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate in Siberia. *Int J Climatol*, 21: 1321 - 1335

Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int J Remote Sens*, 26 (20): 4485 - 4498

Zhang Jinyong, Dong Wenjie, Fu Congbin. 2005. Impact of land surface faceted gradation in northern China and southern Mongolia on regional climate. *Chinese Sci Bull (in Chinese)*, 50 (1): 75 - 81

Zhao M, Pitman A J, Chase T. 2001. The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dyn*, 17: 467 - 477

Zhao Ping, Zhang Xiangdong, Zhou Xiuji, et al. 2004. The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the east Asian summer monsoon rainfall. *J Climate*, 17: 3434 - 3447

Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2002. The effect of vegetation change on regional climate: simulation results. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 1 - 16

Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2002. The effect of vegetation change on regional climate: mechanisms. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 17 - 30

附中文参考文献

丁一汇, 李巧萍, 董文杰. 2005. 植被变化对中国区域气候影响的数值模拟研究. *气象学报*, 63 (5): 613 - 621

符淙斌, 袁慧玲. 2001. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. *科学通报*, 46 (8): 691 - 695

张井勇, 董文杰, 符淙斌. 2005. 中国北方和蒙古南部植被退化对区域气候的影响. *科学通报*, 50 (1): 53 - 58

郑益群, 钱永甫, 苗曼倩等. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响: 初步模拟结果. *气象学报*, 60 (1): 1 - 16

郑益群, 钱永甫, 苗曼倩等. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响: 机理分析. *气象学报*, 60 (1): 17 - 30

WWW.CNKI.NET