

生长季植被覆盖变化对局地气象要素的可能影响

毛睿^{1,2} 龚道溢^{1,2} 房巧敏³

1 北京师范大学资源学院, 北京 100875

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

3 星球地图出版社, 北京 100088

摘要 植被覆盖变化对地表气象要素存在反馈作用, 但在不同时空尺度上反馈关系及其表现强度存在差异。作者利用地面观测资料和归一化植被指数 (NDVI) 分析了 15 天尺度上植被覆盖变化对气象要素的影响。结果表明, 我国北方农牧交错带生长季植被覆盖变化可能对同期、后期地表气象要素存在一定影响。当植被指数偏高时, 地表平均温度、最高温度、最低温度和小雨频次偏低, 而平均相对湿度和最小相对湿度偏高, 影响持续约为 1~2 周。地表温度和小雨频次的变化与地表热通量的变化有关, 当植被指数偏高时, 地表潜热所占比例偏高, 而地表感热所占比例偏低, 导致地表温度偏低; 地表感热偏低伴随偏弱的上升运动, 不利于降水, 故小雨频次偏低。地表温度偏低引起饱和比湿偏低, 加之植被蒸腾量较大引起比湿偏高, 故相对湿度偏高。此外, 从长期变化来看 NDVI 与地表温度和小雨频次的相关不明显, 故地表温度和小雨频次的长期变化可能更多是受大尺度气候变化的影响。

关键词 植被覆盖 气象要素 北方农牧交错带 相关分析

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0738-13 **中图分类号** P461+.7 **文献标识码** A

Possible Impacts of Vegetation Cover on Local Meteorological Factors in Growing Season

MAO Rui^{1,2}, GONG Dao-Yi^{1,2}, and FANG Qiao-Min³

1 College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

3 Star Map Press, Beijing 100088

Abstract Vegetation can feedback on meteorological factors, both directly on the energy budget through surface albedo and exchanges of heat, water, and momentum and indirectly on the biogeochemical process. The relationship and amplitude of the feedback of vegetation, however, varies with different spatial and temporal scales. In this study, the authors apply the observational datasets and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) datasets from 1982 to 2003 to depict the association of the NDVI over the agro-pasture zone of China with meteorological factors on the 15 days timescale. The results show that the vegetation change in spring over the north part of China may significantly impact the simultaneous and subsequent meteorological factors. When the NDVI is abnormally higher, the mean temperature, maximum temperature, minimum temperature and light rainfall frequency are abnormally lower, but the mean relative humid and minimum relative humid are abnormally higher. The possible impacts

收稿日期 2007-09-19 收到, 2008-08-12 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400505 和国家自然科学基金资助项目 40675035

作者简介 毛睿, 男, 1980 年出生, 博士研究生, 主要从事全球变化及其影响分析。E-mail: mr@ires.cn

of vegetation on meteorological factors may sustain 1—2 weeks. The change of temperature and light rainfall frequency is related with the change of surface heat fluxes. When NDVI is abnormally higher, the surface latent heat is abnormally higher and sensible heat is abnormally lower, which causes the surface temperature lower. The decreased surfaces sensible heat is accompanied by weaken ascending flows, which do not provide help for the formation of light rainfall and subsequently makes the light rainfall frequency decrease. Also the lower surface temperature results in the drop of the saturation mixing ratio. Due to that the added transpiration tends to increase the mixing ratio, the relative humid ratio rises. In addition, the relationship of NDVI with temperature and light rainfall frequency is not significant on long timescales, so the long-term change of temperature and light rainfall frequency may be more related with other climate changes on large scales than vegetation.

Key words vegetation cover, meteorological factors, agro-pasture zone, correlation analysis

1 引言

陆地植被覆盖变化对全球、区域和局地尺度的气候变化存在反馈作用。植被变化通过改变地表反照率、地面湿度和地面粗糙度等陆面参数,直接影响地表感热、潜热通量和地表长波辐射的变化,还通过对大气 CO₂ 的作用间接影响生化循环过程^[1]。大量研究采用模式模拟了全球植被和气候之间的相互作用,如 Mabuchi 等^[2]模拟亚洲热带地区植被覆盖减少的气候影响,得出亚洲热带地区及其周围地区地表陆面参数发生显著改变,能影响大尺度能量平衡和环流传输(Hadley 环流和 Walker 环流),而且这种影响类似 ENSO 的影响,通过遥相关形式对东亚中高纬气候存在作用^[3]。一些模式也模拟分析了我国区域内地表植被覆盖变化与气候变化的关系。符淙斌等^[4]和张井勇等^[5]的研究表明,中国北方和蒙古南部植被状况的改变对我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。刘晓东等^[6]指出,青藏高原地区植被变化通过调节地表潜热输送和大气湿度,影响高原上扰动发展和东西方向波的传播,进而影响西南涡、西风急流等天气系统,对我国东部地区降水产生影响。吕世华等^[7]对西北地区植被变化的分析表明,植被通过改变地表温度、高度场和流场,影响当地和华北地区气候变化以及夏季风强度。

虽然植被覆盖变化对气候变化存在显著的反馈关系,但在不同时空尺度上主导反馈关系的物理过程可能不同,这种反馈关系及其表现强度随时空尺度变化而变化^[8]。如月季尺度植被覆盖变化主要以植物生长、衰败过程为主,而年代际尺度主要以植被演替和植被动态变化为主。对于森

林来说,其气候效应可能在长时间尺度上比较明显,但对于草地和灌丛,其气候效应在短时间尺度上更加明显。此外,植被覆盖从春季开始生长到夏季茂盛期,再到秋季衰败,不同阶段生理特点决定地表对太阳辐射的吸收及陆面参数的改变不同,这些差异必然对温度、湿度等气象要素存在不同影响。Schwartz^[9]就指出植物返青时期存在对地表温度的降温作用。

以往大多数研究多采用敏感性试验来分析陆地尺度植被覆盖变化对气候的影响,分析的时间尺度多为月、季和年,较少采用统计方法来定量分析较短时间尺度内局地植被覆盖变化对气象要素的影响^[8]。通过理解较短时间尺度上局地植被覆盖变化与气象要素的关系,对理解区域乃至全球植被覆盖变化在气候变化中的作用有帮助作用。作者采用每半个月的观测资料来分析植被覆盖与气象要素之间的关系,关注的气象要素主要包括最高温度、最低温度、平均温度、温度日间差、小雨频次和相对湿度,主要对植被生长季做具体分析。

2 资料和方法

研究区域为我国北方农牧交错带,约为(36~50°N, 105~125°E)^[10]。区域植被状况用归一化植被指数(NDVI)表征,使用的是月最大值数据(GIMMS-NDVIg)资料,资料时段为1982~2003年,分辨率为8 km×8 km。该资料每月包含上半月、下半月两个数值,上半月数值为每月1~15日数值中最大值,下半月数值为所余天数中最大值。该资料已经过大气订正等处理,具体技术细节可参考文献[11]。所用气象资料取自国家气象信息中心气象资料室,资料时段为1951~2005

年。根据 Karl 等^[12]的研究结果,在中国 50 万人口以下的城市所产生的热岛效应在气候变化中的影响可以忽略。因此依据 2000 年中国人口统计年鉴,剔除了研究区内总人口超过 50 万的大城市站点,还剔除了 1982~2003 年逐日资料中存在缺测现象的站点,所选站点数约为 100 个左右。

依据站点经纬度挑选各站附近最近的 NDVI 值,然后将这些值平均作为该站的 NDVI 值,每个站点附近大约取 3~6 个 NDVI 值。为了保持与 NDVI 值一致,对各气象要素的逐日资料进行了整理,即以每月 1~15 日数据平均值作为该月上半月值,该月所余天数的数据平均值为下半月值。这样得到了相同时间分辨率的 NDVI 值和相应气象要素值。

主要分析平均温度、最高温度、最低温度、温度日较差、小雨频次(降雨量 ≤ 0.1 mm 和 ≤ 10 mm)、平均相对湿度和最小相对湿度,其中温度日较差为最高温度减去最低温度。分析方法主要包括相关分析和合成分析。分析时段限定为 5~6 月^[13,14],分析年份为 1982~2003 年。考虑到生长

季内 NDVI 值和温度等气象要素存在增长趋势,对相关分析存在一定影响,因此对各半月值做距平处理,如 5 月上半月值减去所有年份 5 月上半月值的平均值,依此类推。下文若不特指,NDVI 值、温度、相对湿度和小雨频次均为其原始值的距平。

3 植被覆盖与地表温度的关系

3.1 温度的变化特征

对所有站点 NDVI 值和温度进行平均,以此反映区域生长季内 NDVI 值和温度的变化情况。区域 NDVI 值年内存在逐月变化,年际尺度上也存在明显波动,但年代际尺度上没有明显的长期变化趋势 $[0.0042 (10 \text{ a})^{-1}]$,未通过 95% 信度检验。NDVI 值从 20 世纪 80 年代初期至 1991 年存在缓慢增加趋势,1991 年为近 20 年最高值,1991~2001 年 NDVI 值总体有略微减少趋势,2002 年达到最低(图 1)。

区域温度在年内存存在逐月变化,在年际尺度

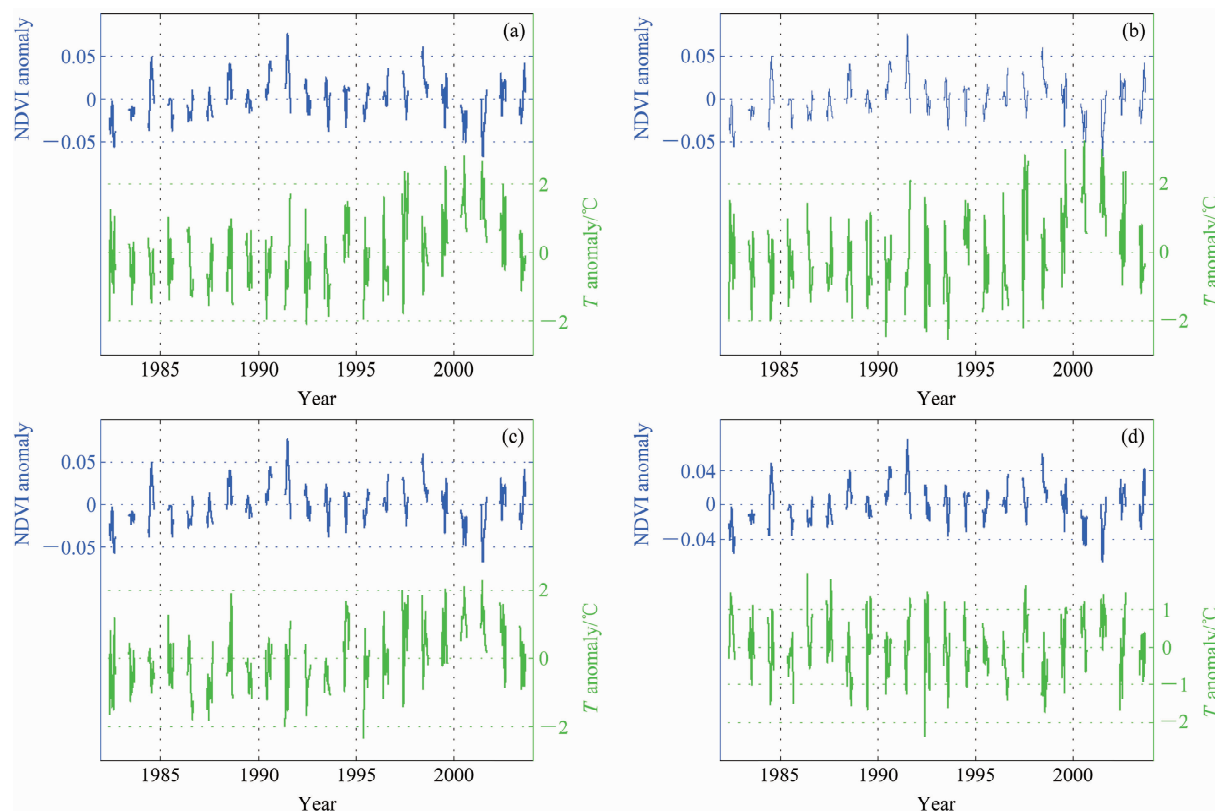


图 1 (a) 区域平均温度、(b) 最高温度、(c) 最低温度和 (d) 温度日较差与 NDVI 值

Fig. 1 Regional NDVI with (a) mean temperature, (b) maximum temperature, (c) minimum temperature and (d) diurnal temperature range

上存在明显波动。平均温度、最高温度和最低温度从 20 世纪 80 年代初期至 90 年代初期, 略微有下降趋势, 但从 1995 年开始有明显的增温趋势, 到 2000 年左右开始降温, 其中最高温度的变化幅度要高于其他二者。从长期变化来看, 平均温度 $[0.60\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ 、最高温度 $[0.61\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ 和最低温度 $[0.62\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}]$ 有明显上升趋势, 均通过 95% 信度检验。温度日较差长期变化趋势并不明显, 这可能与最高温度和最低温度变化趋势一致, 而且都存在显著增温效果有关。

3.2 与同期温度的关系

影响温度的因素很多, 为了降低噪音干扰, 采用区域平均来分析温度与植被覆盖的关系。即首先对每个站点 NDVI 值与相应温度做同期相关分析, 然后把所有站点相关系数平均, 得到区域平均的 NDVI 值与平均温度、最高温度、最低温度和温度日较差的相关系数。NDVI 值与平均温

度、最高温度、最低温度和温度日较差的同期相关系数依次为 -0.11 、 -0.11 、 -0.13 和 -0.02 。当植被覆盖偏高(低)时, 平均温度、最高温度和最低温度均偏低(高), 温度日较差变化不明显。

图 2 为区域内各站点平均温度、最高温度、最低温度和温度日较差与 NDVI 值的同期相关分布。平均温度与 NDVI 值相关关系中, 有 80% 的站点为负相关, 约 36% 的站点为显著负相关(表 1)。显著负相关站点主要分布在内蒙古中部、环渤海地区、陕西北部 and 山西等地。大兴安岭以东存在少数站点为显著正相关。最高温度的相关分布态势与平均温度大致类似。最低温度的分布态势与最高温度和平均温度的分布态势略有不同, 负相关站点略多(82%), 显著负相关站点主要位于华北环渤海地区和晋陕交界处。温度日较差与 NDVI 值的相关关系中, 负相关站点占 62%, 其中显著负相关站点主要位于内蒙古中部和大兴安

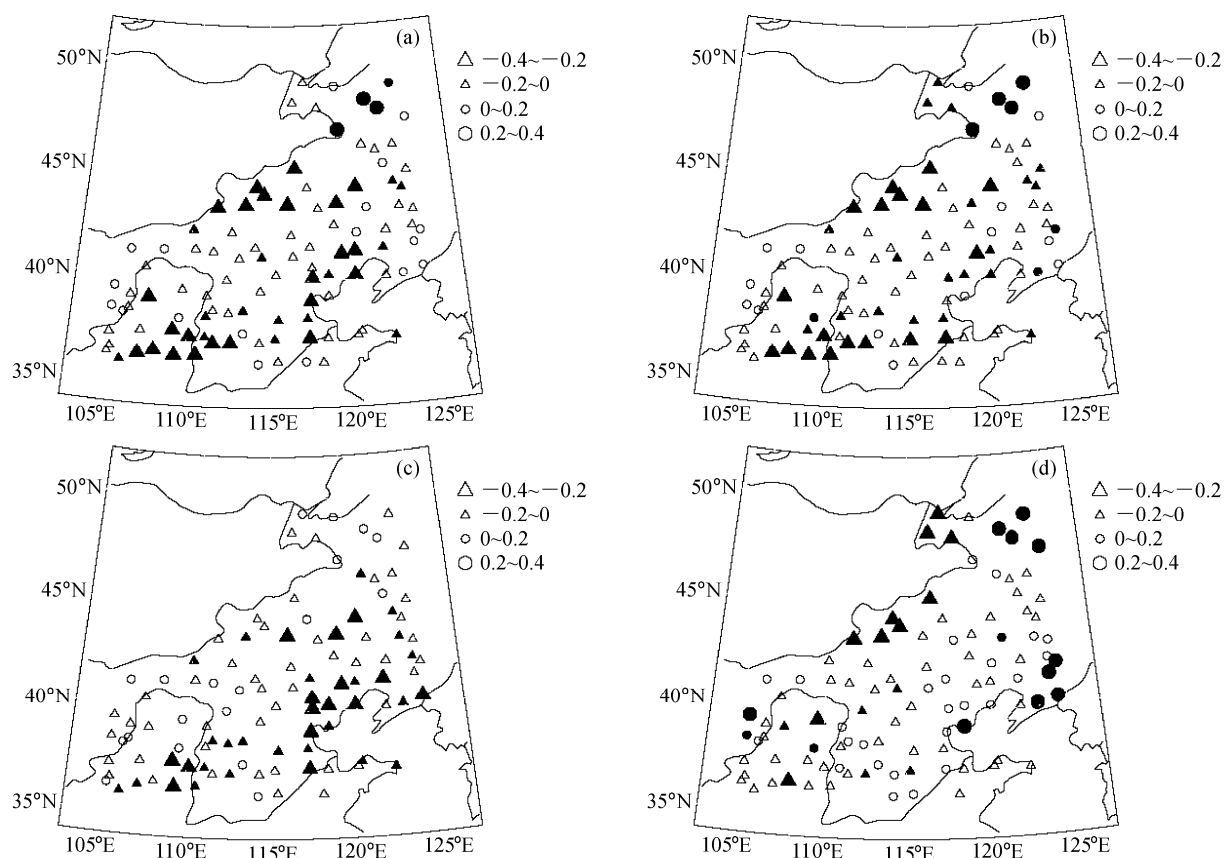


图 2 (a) 平均温度、(b) 最高温度、(c) 最低温度和 (d) 温度日较差与 NDVI 值同期相关分布。黑色图标表示该站相关系数通过 95% 信度检验

Fig. 2 Simultaneous correlation of NDVI with (a) mean temperature, (b) maximum temperature, (c) minimum temperature and (d) diurnal temperature range. Dark denote stations significance level above 95%

表 1 同期植被覆盖与温度为负相关关系的站数
Table 1 Number of station with negative correlation between vegetation and temperature

温度	未去除降水影响		去除降水影响	
	负相关站数	总站数*	负相关站数	总站数*
平均	82(37)	104	82(49)	100
最高	82(37)	103	82(43)	100
最低	84(37)	103	80(27)	99
日较差	63(15)	102	62(16)	98

注: 括号内通过 95% 信度检验, * 参与计算的总站数

岭以西, 而大兴安岭以东及辽东半岛为显著正相关站点。

在干旱/半干旱地区, 降水过程对地面温度存在直接和间接影响, 如改变地表温度、影响土壤湿度等。此外降水过程可能伴随云出现, 云形云量对地面有效辐射有一定影响, 导致地表温度变化, 因此剔除了雨日资料及雨日后一天的资料, 然后重新统计各半月温度均值, 进行相关分析。从区域总体来看, NDVI 值与平均温度、最高温度、最低温度和温度日较差的同期相关系数依次为一 0.12、-0.13、-0.11 和 -0.06。与未去除降水影响的结果相比, 平均温度和最高温度的相关性有所提高, 而最低温度的相关性比以前略差。

去除降水影响后, 各站点平均温度、最高温度、最低温度和温度日较差与 NDVI 值的同期相关分布结果与图 2 存在一些差异 (图略)。与图 2 相比, 平均温度、最高温度的负相关站点总数保持不变 (82%), 但显著负相关站点增多, 约占 49% (平均温度) 和 43% (最高温度), 而且部分站点相关性变强, 相关系数达到 -0.4 以上, 显著负相关站点分布与图 2 基本一致, 但显著正相关站点基本消失。最低温度的显著负相关站点数变少, 负相关站点和显著负相关站点分布区域与图 2 基本一致。温度日较差的负相关站点以及显著负相关站点分布区域基本不变, 只是大兴安岭以东及辽东半岛的显著正相关站点消失。去除降水影响后, 植被覆盖偏多与同期温度偏低的关系更加明显, 尤其是平均温度和最高温度。

3.3 与滞后温度的关系

Liu 等^[8]利用全球观测资料得出, 季节尺度上植被覆盖偏多可能引起地表温度偏高, 正相关显著区域主要位于加拿大南部、欧洲中部和东部、西伯利亚东部和南部以及中国西南等地。植被覆

盖偏多时, 地表反照率减少, 使得地表吸收太阳短波辐射偏多, 进而导致地表温度偏高。但 Schwartz 等^[15]指出, 春季植被返青早时, 植被可能由于蒸腾作用增加导致地表最高温度的升高趋势减缓。说明不同时间尺度上主导物理过程不同, 影响机制和程度存在差异。下面将重点分析局地植被覆盖变化对逐日气象要素的影响。

首先分析生长季 (5~6 月) 植被覆盖变化对温度的影响。首先选出各气象站点每年 5~6 月各月上下两个半月的 NDVI 值 (4×22 年, 共 88 个值), 与相同时段的温度半月值进行相关分析, 作为滞后 0 天相关; 然后将各半月温度计算天数推后一天, 用新得到的温度半月值与 NDVI 值进行相关分析, 作为滞后 1 天相关, 依此类推, 得到各站温度对 NDVI 值的逐日滞后相关; 最后将所有站的滞后相关系数平均, 得到区域平均的滑动逐日滞后相关。依据此法, 同样得到去除降水影响的逐日滞后相关。

图 3 为区域平均温度、最高温度、最低温度和温度日较差对 NDVI 值的逐日滞后相关。总体来看, 平均温度、最高温度和最低温度都表现为负相关关系, 而温度日较差相关性表现不明显。当植被覆盖偏好时, 地表平均温度、最高温度和最低温度都偏低, 反之亦然。去除降水影响的结果与未去除降水影响的结果比较类似, 只是在滞后 2 周内, 平均温度和最高温度的相关性较强, 而最低温度的相关性较弱。可以看出, 生长季植被覆盖变化对后期地表平均温度、最高温度和最低温度的降温作用, 大约能持续 2 周左右, 然后随时间推移, 影响减弱。此外降水和云的影响, 可能对最高温度有显著影响, 进而影响到平均温度。

为了表示局地地表温度对植被变化的响应特征, 分析了区域内各站点地表温度对 NDVI 值的滞后相关。考虑到植被覆盖变化对后期地表温度的降温作用, 只能持续 2 周左右, 而且作用在持续减弱, 所以选择分析温度响应较弱时的结果 (滞后 14 d), 以这种影响最弱时的结果来说明植被覆盖变化对后期地表温度的影响程度 (图 4)。平均温度与 NDVI 值相关关系中, 有 79% 的站点为负相关, 约 18% 的站点为显著负相关。显著负相关站点主要分布在环渤海地区、辽宁和吉林等地。最高温度的相关分布态势与平均温度大致类

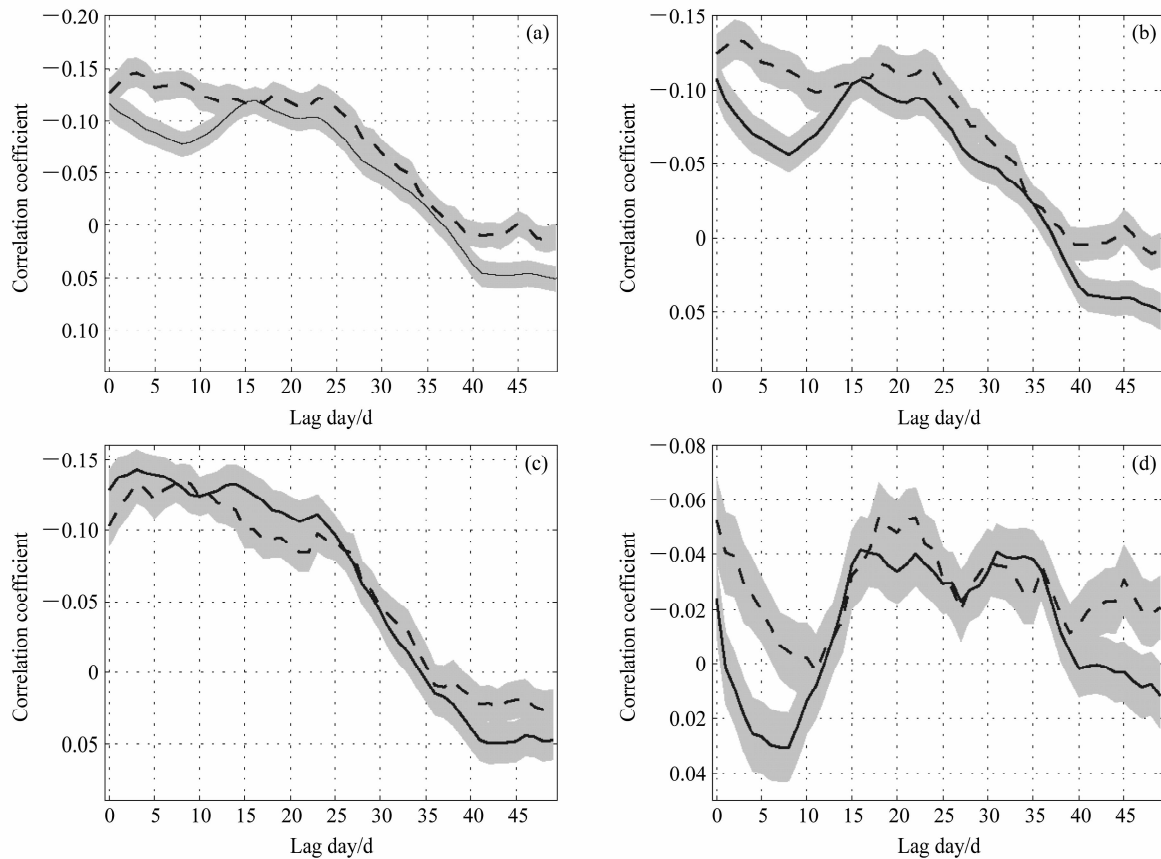


图3 (a)平均温度、(b)最高温度、(c)最低温度和(d)温度日较差对NDVI值的逐日滞后相关。虚线为去除降水影响的结果，阴影为标准误差范围

Fig. 3 The moving day-lagged correlation of (a) mean temperature, (b) maximum temperature, (c) minimum temperature and (d) diurnal temperature range to NDVI. The dashed line is for the result without rainfall impacts. Shaded areas are ± 1 standard error about the mean of all stations

似，只是显著负相关站点更少。最低温度的负相关站点较最高温度和平均温度略多，有82%的站点为负相关，其中约28%的站点为显著负相关。显著负相关站点主要位于华北环渤海地区、晋陕交界处和辽宁等地。温度日较差正负相关站点各占50%，没有显著区域特征。大多数站点的一致负相关性说明，植被覆盖变化与后期地表温度的负相关不是偶然现象，反映植被覆盖变化确实对地表温度存在一定影响。

3.4 与地表通量的关系

地表辐射过程和地表水热过程是地球系统的主要物理过程，局地气温变化特征在很大程度上是由地表辐射平衡过程和土壤水热过程来决定的。下面分析植被覆盖变化可能引起的地表通量变化，试图解释地表气温变化的原因。分析方法采用合成分析和相关分析，分析内容主要包括地表净辐

射通量、地表潜热通量和地表感热通量等。由于各通量值为半月平均值，而土壤热通量值相对较小，故不予讨论。各通量资料均取自NCEP再分析资料II，该资料在研究区内共有57个点。用所有点的平均通量值来反映研究区的通量变化。极端年份挑选依据区域NDVI值中的极大值和极小值年份来定。选取1988、1991、1993、1997和1998年作为极大值年，1982、1986、1995、2000和2001年作为极小值年。

图5为地面净辐射、地表潜热、地表感热以及波文比（地表感热与地表潜热之比）的合成结果。总的来看，极大值年和极小值年地表净辐射、地表感热、地表潜热和波文比变化趋势一致，当生长期植被指数偏高时，后期潜热通量明显偏高 $5 \sim 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，感热通量明显偏低 $5 \sim 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，波文比明显偏低，地表净辐射在6~7月略微偏低

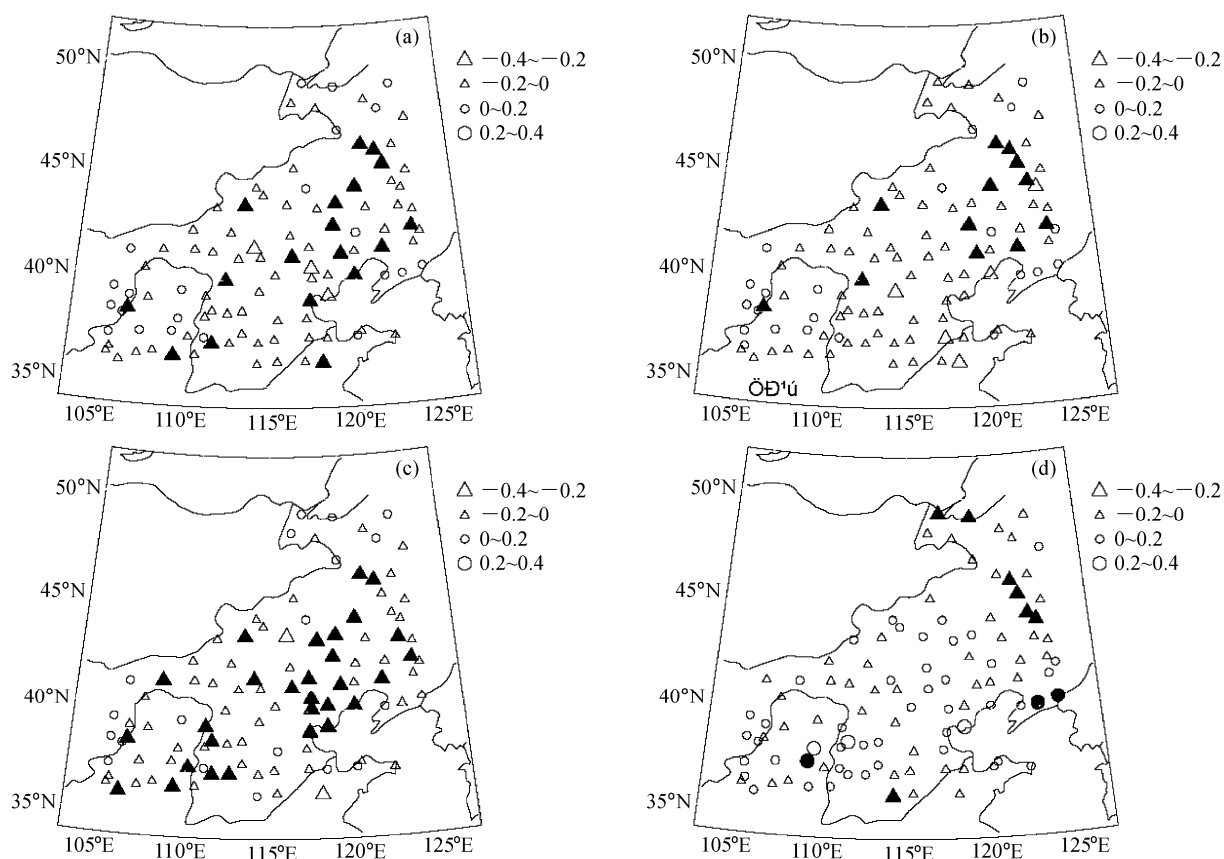


图4 (a)平均温度、(b)最高温度、(c)最低温度和 (d) 温度日较差对 NDVI 值的滞后 14 d 相关分布。黑色图标表示该站相关系数通过 95% 信度检验

Fig. 4 The 14-d lagged correlation of (a) mean temperature, (b) maximum temperature, (c) minimum temperature and (d) diurnal temperature range to NDVI. Dark denote stations significance level above 95%

($< 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。说明植被覆盖变化可能对后期地表净辐射的影响较小, 但对后期地表潜热和地表感热分配有一定影响。

为了进一步检查植被覆盖变化与后期地表净辐射的关系, 利用再分析资料和地面观测资料做了地表净辐射的逐日滞后合成分析 (图略)。观测资料结果与再分析资料结果基本一致, 当植被指数偏高时, 地表净辐射分别偏高 $4.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可以看出, 相对于地表潜热和地表感热变化, 植被覆盖变化引起地表净辐射的变化不是非常显著。生长期植被覆盖变化对地表净辐射的影响较弱, 这可能与干旱/半干旱地区植被覆盖较低, 对地表反照率的影响较弱有关。

进一步做了波文比的逐日滞后相关, 试图说明生长期植被覆盖变化对后期潜热、感热分配比例的影响 (图 6a)。总体来看, NDVI 值与波文比

呈负相关关系, 当植被指数偏高时, 地表感热减少, 地表潜热增加, 反之亦然。从同期到滞后 1 周, 相关性迅速减弱, 然后开始缓慢减弱。说明植被覆盖变化可能在短期对波文比有一定影响, 但从长期来看, 影响作用在减弱, 可能有其他要素对波文比存在影响。

在干旱/半干旱地区, 用于地表蒸散的能量 (地表潜热) 很大程度上决定了地表平均温度。当植被指数偏高时, 植被生长迅速, 植被蒸腾量较大, 蒸散阻抗降低, 地表潜热所占比例增大, 地表感热所占比例减小, 波文比下降, 致使地表温度偏低。当植被指数偏低时, 植被蒸腾量较小, 造成地表潜热降低, 由于地表净辐射基本不变, 根据能量平衡原理, 地表能量必须平衡, 从而导致地表感热增加, 地表温度偏高。但这种影响过程只能持续较短时期。

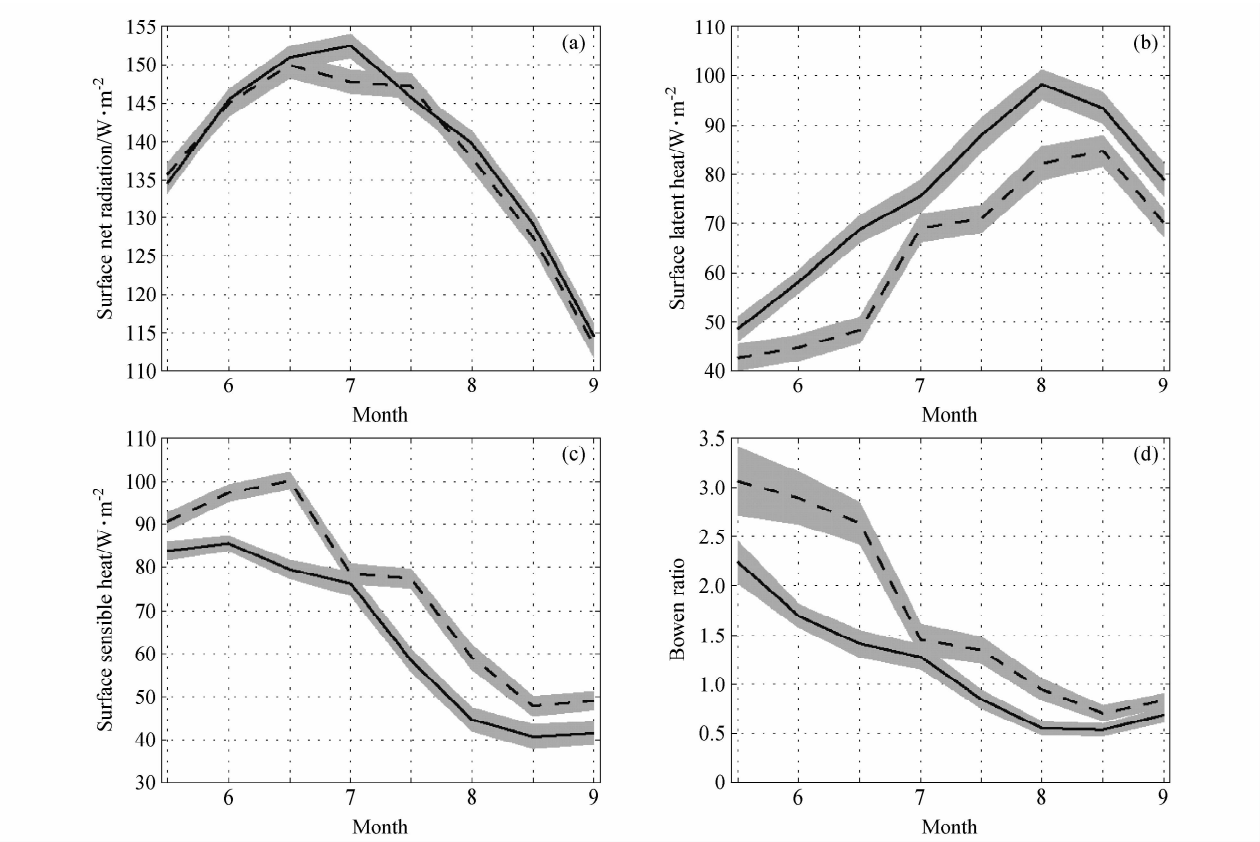


图 5 (a)地表净辐射, (b)地表潜热, (c)地表感热和(d) Bowen 比合成。实线为极大值年, 虚线为极小值年。阴影为标准误差范围
Fig. 5 Composite of (a) surface net radiation, (b) surface latent heat, (c) surface sensible heat and (d) Bowen ratio. The solid line is for maximum year, and the dashed line is for minimum year. Shaded areas are ± 1 standard error about the mean of all stations

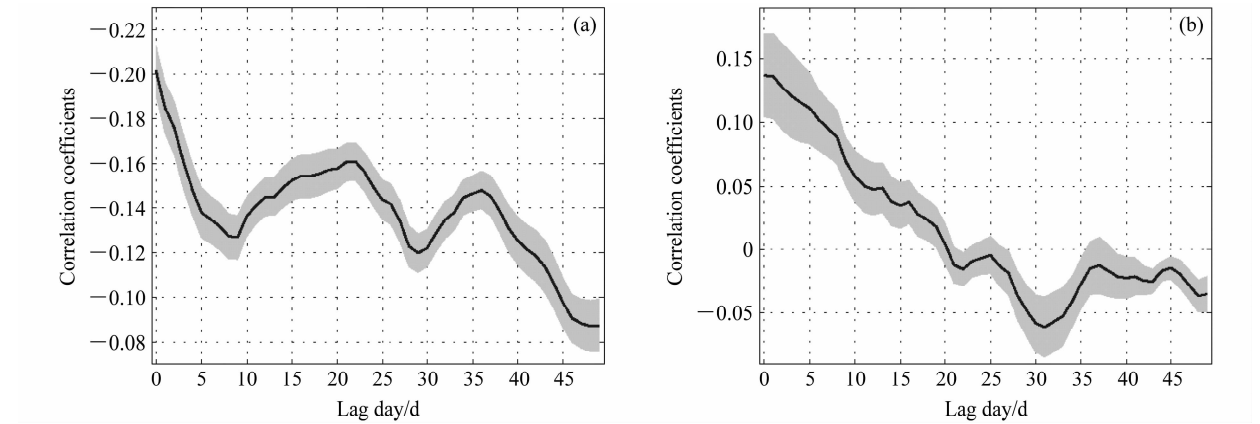


图 6 (a) Bowen 比和 (b) 垂直速度逐日滞后相关。阴影为标准误差范围
Fig. 6 The moving day-lagged correlation of (a) Bowen ratio and (b) vertical velocity. Shaded areas are ± 1 standard error about the mean of all stations

4 植被覆盖与小雨频次的关系

4.1 小雨频次的变化特征

北方农牧交错带降水主要与大尺度天气系统

活动有关, 整个降水过程往往伴随大规模水汽输送, 所以局地植被覆盖变化对大雨影响较小, 但局地微量降水可能与局地植被覆盖变化有一定联系。植被覆盖增加, 近地面水汽含量增加, 若遇到上升气流, 很可能形成降水。因此对小雨频次与

植被覆盖变化的关系进行了分析。分析中主要统计了降雨量 $\leq 0.1\text{ mm}$ 和 $\leq 10\text{ mm}$ 的小雨频次。虽然痕量降水降水量不足 0.1 mm ，但也计为一个雨日。

从区域整体来看，两种小雨频次存在长期显著减少趋势，变化趋势依次为 $-0.35\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($\leq 0.1\text{ mm}$)和 $-0.57\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ($\leq 10\text{ mm}$)，均通过99%信度检验(图7)。 $\leq 0.1\text{ mm}$ 的小雨频次从1982~1998年下降趋势明显，从1999年开始小雨频次保持稳定。 $\leq 10\text{ mm}$ 的小雨频次从1982~1990年下降趋势相对较小，但从1991~2000年下降趋势明显，从2000年开始有上升趋势。

4.2 与小雨频次的关系

区域小雨频次($\leq 0.1\text{ mm}$ 和 $\leq 10\text{ mm}$)与NDVI值的同期相关系数均在 -0.06 左右，相关性较差，因此重点分析了区域内小雨频次与NDVI值的同期相关分布(图8)。 $\leq 0.1\text{ mm}$ 的小雨

频次与NDVI值的分布态势中，74%的站点为负相关，12%的站点为显著负相关。负相关站点主要分布在华北、内蒙古中西部和东北地区，其中显著负相关站点主要分布在贺兰山及贺兰山以北，内蒙古中部和环渤海地区。 $\leq 10\text{ mm}$ 的小雨频次分布态势与 $\leq 0.1\text{ mm}$ 的小雨频次分布态势相似，约72%的站点为负相关，约13%的站点为显著负相关。显著负相关站点主要分布在辽东半岛、华北和贺兰山以北地区(表2)。

表 2 同期植被覆盖与小雨频次为负相关关系的站数
Table 2 The number of station with negative correlation between vegetation and light rainfall frequency

降雨量	负相关站数	总站数*
$\leq 0.1\text{ mm}$	74(12)	100
$\leq 10\text{ mm}$	72(13)	100

注：括号内通过95%信度检验，*参与计算的总站数

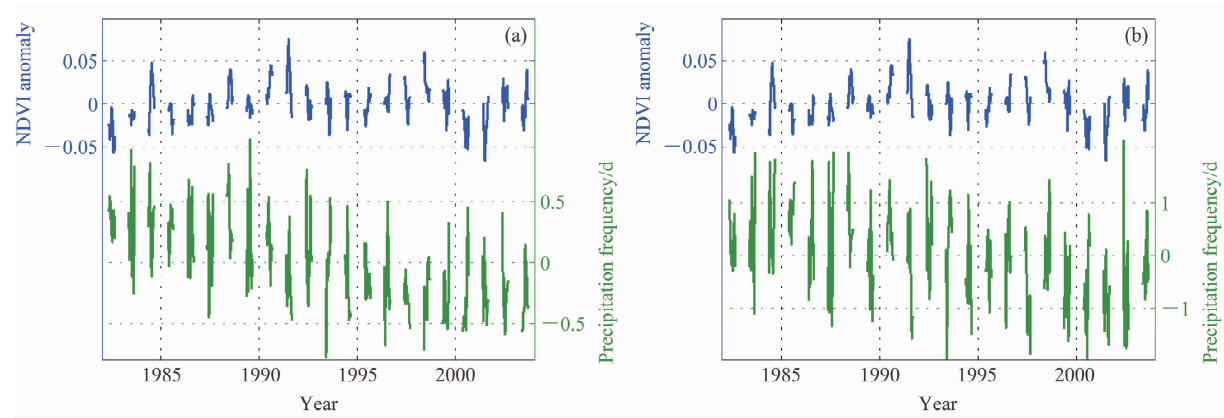


图 7 区域小雨频次：(a) $\leq 0.1\text{ mm}$ ；(b) $\leq 10\text{ mm}$
Fig. 7 Regional light rainfall frequency: (a) $\leq 0.1\text{ mm}$ ；(b) $\leq 10\text{ mm}$

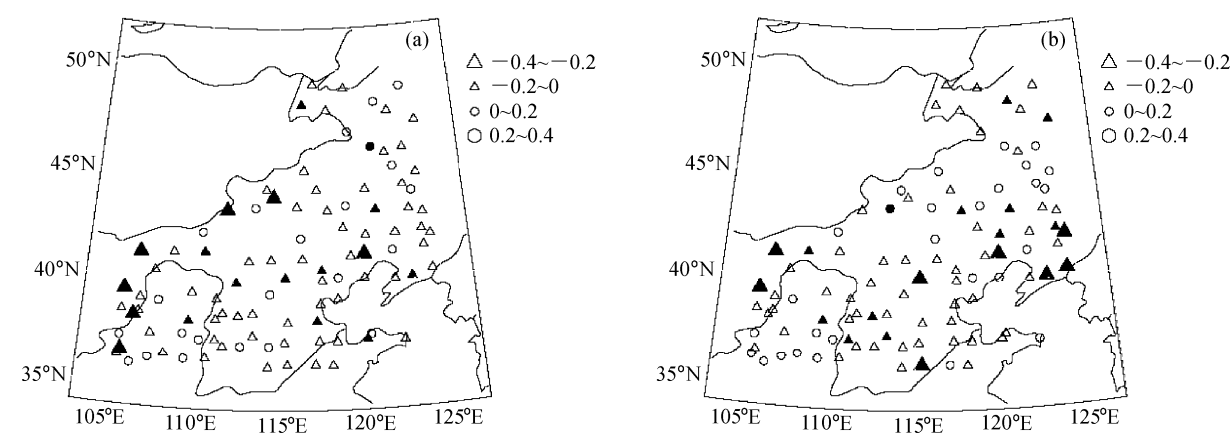


图 8 小雨频次与NDVI值同期相关分布：(a) $\leq 0.1\text{ mm}$ ；(b) $\leq 10\text{ mm}$ 。黑色图标表示该站相关系数通过95%信度检验
Fig. 8 Simultaneous correlation of NDVI with light rainfall frequency: (a) $\leq 0.1\text{ mm}$ ；(b) $\leq 10\text{ mm}$. Dark denote stations significance level above 95%

从区域小雨频次与植被覆盖变化的逐日滞后相关可以看出（图略），植被覆盖与后期小雨频次主要为负相关关系，当植被覆盖较好时， ≤ 0.1 mm 小雨频次和 ≤ 10 mm 小雨频次偏低，反之亦然。随时间推移，这种负相关关系在减弱，相关系数从同期到滞后 2 周由 -0.07 变为 0 左右。

4.3 与地表垂直运动的关系

虽然区域 NDVI 值与小雨频次同期相关性较差，相关系数仅为 -0.06 左右，但 74% (≤ 0.1 mm 小雨频次) 和 72% (≤ 10 mm 小雨频次) 的站点为负相关，说明植被覆盖变化对小雨频次可能存在一定影响。当植被覆盖偏低时，辐射加热的能量大部分转化为感热而加热大气，空气上升运动增强，有利于降水，反之亦然。为了检查植被覆盖变化对大气上升运动的可能影响，分析了垂直运动的逐日滞后相关，试图说明植被覆盖对小雨频次的影响（图 6b）。总体来看，NDVI 值与垂直速度 (ω) 为正相关关系，随时间推移，相关性迅速减弱。当植被指数偏高时， ω 为正异常，说明空气上升运动减弱，不利于降水，因此降水频次偏少。这个结论与地面植被覆盖增加时感热减少一致，地面感热减少使得大气对流辐合上升减弱，不利于降水。

5 植被覆盖与相对湿度的关系

5.1 与同期相对湿度的关系

区域平均相对湿度和最小相对湿度年际变化明显，但长期变化趋势不明显。从长期变化来看，

平均相对湿度 [$-0.07\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$]、最小相对湿度 [$-0.01\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$] 有微弱的下降趋势，均未通过 95% 信度检验（图略）。年际尺度上，平均相对湿度和最小相对湿度与 NDVI 值的相关系数依次为 0.09 和 0.07 。若去除降水影响后，相关系数依次为 0.17 和 0.13 。说明当植被覆盖偏高（低）时，平均相对湿度和最小相对湿度均偏高（低）。

图 9 为各站点平均相对湿度和最小相对湿度与 NDVI 值的同期相关分布。平均相对湿度的相关分布中，有 79% 的站点为正相关，约 42% 的站点为显著正相关。显著正相关站点主要分布在内蒙古中部、环渤海地区、陕西北部、华北南部和大兴安岭以西等地。大兴安岭以东和辽东半岛等地少数站点为显著负相关。最小相对湿度的相关分布态势与平均相对湿度大致类似， 72% 的站点为正相关，约 34% 的站点为显著正相关，显著正相关站点所在区域与平均相对湿度基本一致。平均相对湿度和最小相对湿度去除降水影响的结果与图 9 基本一致（图略），只是显著正相关站点所占比例更高，其中内蒙古中部和大兴安岭以西站点正相关性达到 0.5 以上（表 3）。

表 3 同期植被覆盖与相对湿度为正相关关系的站数
Table 3 The number of station with positive correlation between vegetation and relative humid

相对湿度	未去除降水影响		去除降水影响	
	正相关站数	总站数*	正相关站数	总站数*
平均	79(42)	101	88(50)	97
最小	74(35)	103	83(41)	99

注：括号内通过 95% 信度检验，* 参与计算的总站数

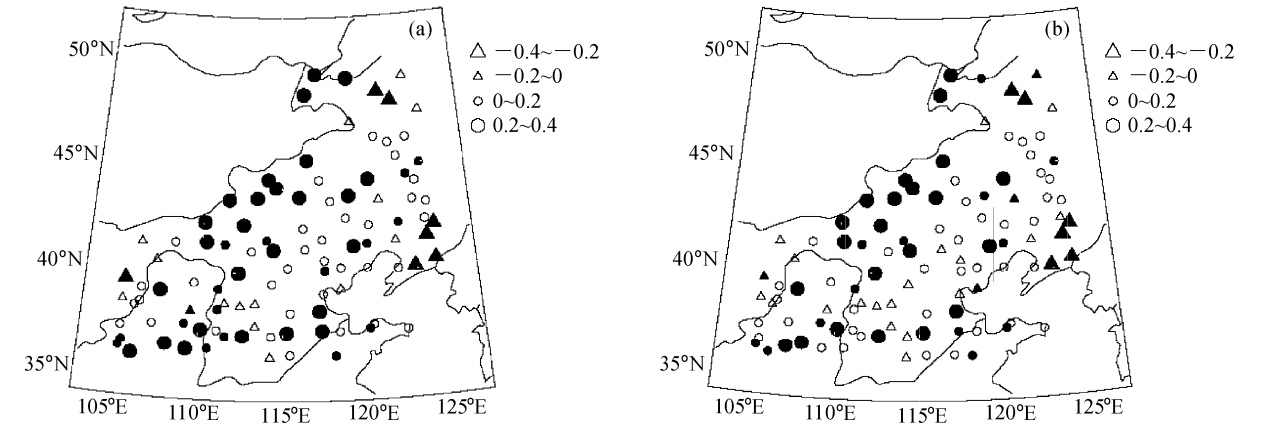


图 9 (a)平均相对湿度、(b)最小相对湿度与 NDVI 值同期相关分布。黑色图标表示该站相关系数通过 95% 信度检验
Fig. 9 Simultaneous correlation of NDVI with (a) mean relative humid, (b) minimum relative humid. Dark denote stations significance level above 95%

5.2 与滞后相对湿度的关系

图 10 为区域平均相对湿度和最小相对湿度对植被覆盖变化的逐日滞后相关。平均相对湿度和最小相对湿度变化趋势比较相似。总的来看，相对湿度与植被覆盖变化的关系为正相关关系，当植被覆盖偏高时，平均相对湿度和最小相对湿度均偏高，反之亦然。相关系数从同期到滞后 1 周变弱，但从滞后 2 周到滞后 5 周，相关性一直保持较强态势。去除降水影响的结果与未去除降水影响的结果比较类似，只是各个阶段相关性更强。

同样分析了区域内各站点平均相对湿度和最小相对湿度对植被覆盖变化的滞后相关（图 11）。考虑到正相关性从滞后 5 周左右开始减弱，所以分析了滞后 35 d 的结果。平均相对湿度的相关分

布中，有 84% 的站点为正相关，约 13% 的站点为显著正相关。显著正相关站点主要分布在山西北部 and 内蒙古东部等地。最小相对湿度的相关分布态势与平均相对湿度大致类似，82% 的站点为正相关，约 14% 的站点为显著正相关，显著正相关站点所在区域与平均相对湿度基本一致。

相对湿度的变化主要与地表温度和绝对水汽含量有关。地表温度决定了饱和水汽含量，而空气中绝对水汽含量主要由比湿来反映。上文只是分析了植被覆盖变化与地表温度的关系，但没有分析植被覆盖变化与比湿的关系。为说明相对湿度的变化，进一步做了比湿对植被覆盖变化的逐日滞后相关，考虑到比湿受降水影响明显，只做了去除降水影响后的结果（图略）。结果表明，比

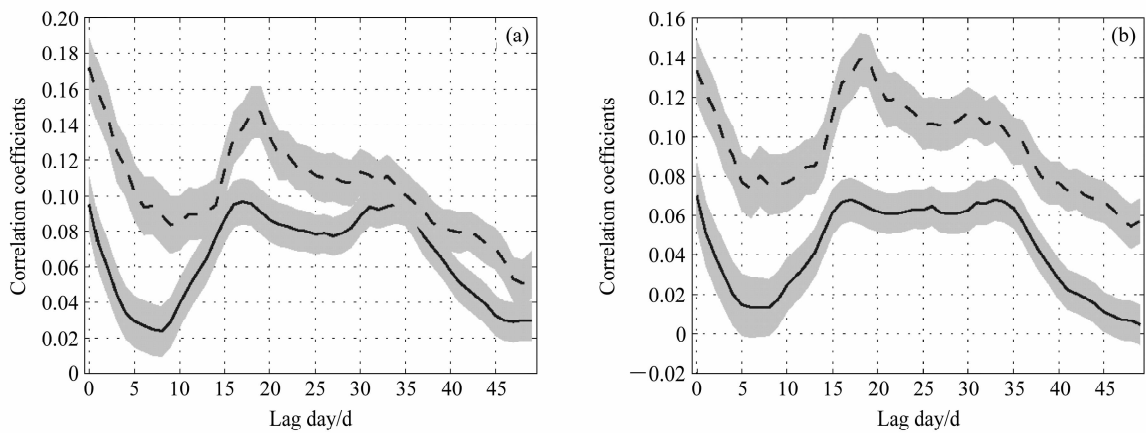


图 10 区域 NDVI 值与 (a) 平均相对湿度和 (b) 最小相对湿度逐日滞后相关。虚线为去除降水影响的结果，阴影为标准误差范围
Fig. 10 The moving day-lagged correlation of (a) mean relative humid and (b) minimum relative humid. The dashed line is for the results without rainfall impacts. Shaded areas are ± 1 standard error about the mean of all stations

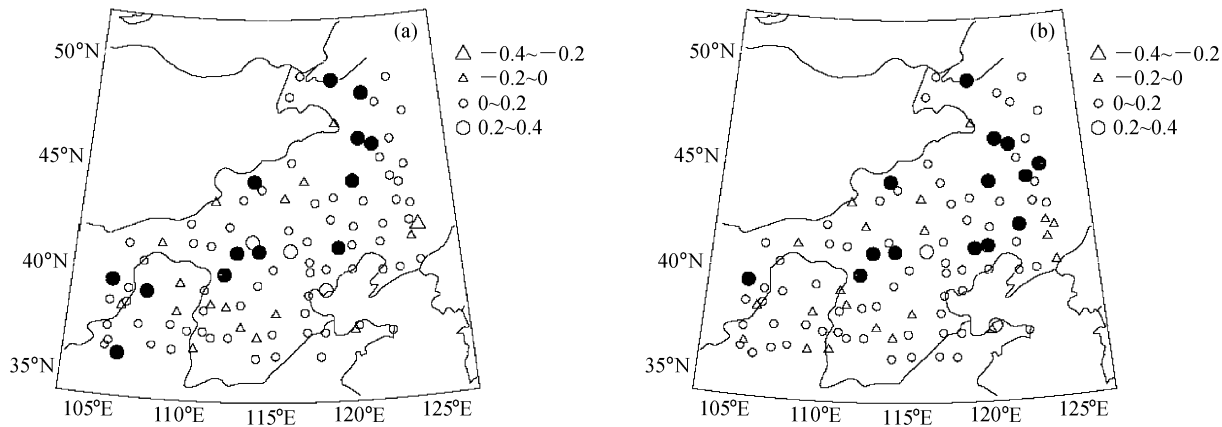


图 11 (a) 平均相对湿度和 (b) 最小相对湿度对 NDVI 值的滞后 35 d 相关。黑色图标表示该站相关系数通过 95% 信度检验
Fig. 11 The 35-d lagged correlation of (a) mean temperature, (b) maximum temperature, (c) minimum temperature and (d) diurnal temperature range to NDVI. Dark denote stations significance level above 95%

湿与植被覆盖成正相关关系, 当植被覆盖偏高时, 比湿偏高, 反之亦然。但随时间推移, 相关性急剧减弱。综合以上分析得出, 当生长期植被指数偏高时, 地表温度偏低, 进而导致饱和比湿偏低, 加之比湿偏高, 故相对湿度偏高, 但随时间推移, 这一系列关系迅速减弱。

6 结论与讨论

我国北方农牧交错带生长季的局地植被覆盖变化可能对同期、后期地表气象因素存在一定影响。当植被指数偏高时, 植被生长迅速, 植被蒸腾量较大, 地表蒸散阻抗降低, 地表潜热所占比例偏高, 而地表感热所占比例偏低时, 则导致地表温度偏低, 引起饱和比湿偏低, 加之植被蒸腾量较大又将引起比湿偏高, 故相对湿度也偏高。地表感热偏低同时伴随偏弱的大气上升运动, 因而不利于降水, 故小雨频次偏少。此外, 植被覆盖变化与地表平均温度、最高温度、最低温度和小雨频次的负相关关系, 以及与平均相对湿度和最小相对湿度的正相关关系, 都随时间推移而迅速减弱。从图 1 和图 7 还可以看出, 虽然区域植被覆盖没有明显的长期趋势, 但是地表温度和小雨频次存在长期变化趋势, 因此对各气象要素和 NDVI 值做了去趋势处理, 然后重新进行相关分析, 所得结果基本一致, 说明植被覆盖变化与气象要素的关系是比较密切的。

值得注意的是, 文中使用的 NDVI 值为半月中的最大值, 而气候场为半月平均值, 所以在同期相关时可能会出现后期植被覆盖与前期气候要素的相关, 但是从去除降水影响后与地表温度同期相关的结果来看, 这种极端情况不会影响分析结果。去除降水影响后, 若同期地表温度影响 NDVI, 应该为正相关, 但结论是负相关, 说明其结果更多反映的是 NDVI 变化对同期、后期气候场的影响。

尽管部分站点植被覆盖与各气象要素相关性较高, 但从区域整体来看, 相关性较低, 说明可能有其他气候要素对后期地表气象要素存在影响。此外, 区域植被覆盖没有明显的长期趋势, 但地表温度和小雨频次存在长期变化趋势, 说明地表温度和小雨频次等气象要素的长期趋势可能受其

他因子(如大气环流)影响, 而植被变化对长期趋势的直接影响不显著, 当然也不能排除间接影响起重要作用, 以上问题还需要深入研究。

参考文献 (References)

- [1] Pielke R, Avissar R, Raupach M, et al. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 461~475
- [2] Mabuchi K, Sato Y, Kida H. Climatic impact of vegetation change in the Asian tropical region. Part II: Case of the northern hemisphere winter and impact on the extratropical circulation. *J. Climate*, 2005, **18** (3): 429~446
- [3] Zhao M, Pitman A J, Chase T. The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 467~477
- [4] 符淙斌, 袁慧玲. 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, 2001, **46** (8): 691~695
Fu Congbin, Yuan Huilin. An virtual numerical experiment to understand the impacts of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2001, **46** (14): 1199~1203
- [5] 张井勇, 董文杰, 符淙斌. 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, 2005, **50** (1): 53~58
Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Fu Congbin. Impact of land surface degradation in northern China and southern Mongolia on regional climate. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2005, **50** (1): 75~81
- [6] 刘晓东, 罗四维, 钱永甫. 青藏高原地表热状况对夏季东亚大气环流影响的数值试验. 高原气象, 1989, **8** (3): 205~216
Liu Xiaodong, Luo Siwei, Qian Yongfu. Numerical simulations of influences of different thermal characteristics on ground surface of Tibetan plateau on the general circulations over SE-Asia. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1989, **8** (3): 205~216
- [7] 吕世华, 陈玉春. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟. 高原气象, 1999, **18** (3): 416~424
Lü Shihua, Chen Yuchun. The Influence of northwest China afforestation on regional climate in China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (3): 416~424
- [8] Liu Z Y, Notaro M, Kutzbach J, et al. Assessing global vegetation-climate feedbacks from observations. *J. Climate*, 2006, **19** (5): 787~814
- [9] Schwartz. Examining the spring discontinuity in daily temperature ranges. *J. Climate*, 1996, **9**: 803~808

[10] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题. 地球科学进展, 2002, **17** (5): 739~747
Zhao Halin, Zhao Xueyong, Zhang Tonghui, et al. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in north China and its problem on eco-environment. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2002, **17** (5): 739~747

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

[12] Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74** (6): 1007~1023

[13] 温刚, 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征: 多年平均结果. 大气科学, 2000, **24** (5): 676~682
Wen Gang, Fu Congbin. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: multi-year average results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (5): 676~682

[14] 温刚, 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征: 年际比较. 气候与环境研究, 2001, **6** (1): 1~11
Wen Gang, Fu Congbin. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: interannual variations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (1): 1~11

[15] Schwartz M D, Karl T R. Spring phenology: Nature's experiment to detect the effect of "green up" on surface maximum temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 883~890