

植被覆盖对沙尘天气滞后性影响的机制分析

徐兴奎¹, 王小桃^{1, 2}, 张凤¹

(1. 中国科学院大气物理研究所国际气候和环境科学中心, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049)

摘要: 1982~2000年卫星和335个气象台站沙尘天气观测资料相关分析显示, 中国区域沙尘天气年发生频次与植被覆盖率存在非线性关系. 在沙尘天气主要发生源地, 夏季植被的覆盖状况会直接影响后期冬春两季各类沙尘天气的发生次数, 而这种影响机制却不清楚. 本研究通过准地转正压模式, 从3个摩擦量级分析了上述现象的物理机制. 结果表明, 在大气与水面摩擦系数量级, 最高可在72 h内使边界层大气风速平均下降90%; 在大气与裸土摩擦量级, 18 h内边界层大气平均风速最高可下降100%; 在大气与植被摩擦量级, 1 h内边界层大气平均风速就可以下降100%. 观测事实和模拟结果证实, 地表植被残存的根茎, 是影响冬春两季沙尘天气发生频次的重要因素之一. 残留根茎对大气的摩擦阻挡作用, 是夏季植被对沙尘天气产生滞后性作用的主要机制.

关键词: 植被; 沙尘天气; 摩擦系数; 准地转正压动力模式

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0322-06

Process Study on Hysteresis of Vegetation Cover Influencing Sand-dust Events

XU Xing-kui¹, WANG Xiao-tao^{1, 2}, ZHANG Feng¹

(1. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Data analysis from satellite and weather stations during 1982-2000 shows nonlinear relationship between vegetation cover and sand-dust events is present in most part of China. Vegetation cover ratio in summer can impact significantly on the frequency of sand-dust storms from winter to spring in the source regions of sand-dust events. It is not quite clear about the hysteresis that vegetation cover in summer influence sand-dust events during winter and spring. A quasi-geostrophic barotropic model is used under the condition of 3 magnitude of frictional coefficient to investigate the cause of the hysteresis. Wind velocity shows a greatest decline at 90% during 72 h as initial wind velocity is 10 m/s for magnitude of frictional coefficient between atmosphere and water surface, greatest decline at 100% during 18 h for magnitude of frictional coefficient between atmosphere and bare soil and a 100% reduction of wind speed during 1 h for magnitude of frictional coefficient between atmosphere and vegetation cover. Observation and simulation prove that residual root and stem from summer vegetation are one of factors to influence sand-dust events happened during winter and spring. Air inhibition from residual root and stem is a most important reason for hysteresis that vegetation cover influence sand-dust events.

Key words: vegetation cover; sand-dust events; frictional coefficient; quasi-geostrophic barotropic model

大气动力作用和地表覆盖特征是沙尘天气年波动和年代际变化的2个首要影响因素^[1, 2]. 统计分析显示, 通过大气动力的强弱变化, 能够合理地解释20世纪50年代中期至70年代中期, 沙尘天气从减少至增加的过程、以及70年代中期之后至2000年沙尘天气发生次数急剧减少的过程^[3, 4]. 然而大气动力只是沙尘天气发生的必要条件, 沙尘天气的发生还需要适当的地表覆盖特征和物质组成^[5], 大气动力作用的强度也会因地表覆盖特征的物理、几何形态而动态变化.

积雪和植被是制约沙尘天气发生的2种主要地表覆盖类型. 积雪能够隔绝大气与土壤之间的接触, 减小风蚀作用; 自身融化等物理形态的改变, 又可以增加土壤湿度和土壤颗粒间粘滞力. 植被对沙尘天气的影响要比积雪更加复杂. 与积雪类似, 植被也起

到物理隔绝作用, 但由于几何形态的季节性变化, 造成植被覆盖区域地表粗糙度等参数发生动态改变, 对边界层大气产生机械阻挡作用. 不同季节、不同的植被类型, 对天气动力的影响程度有很大差别.

风洞试验证实, 空气流经植被体时, 植被对大气的总阻力由两部分组成: 一是粗糙元对流体的阻力, 另一个是植被间裸露地表的阻力. 当地表植被覆盖密度越大、高度越高时, 大气对土壤的风蚀力会下降. 当植被覆盖率超过35%以上时, 土壤几乎没有风蚀作用^[6], 即使稀疏植被也能有效减少风蚀^[7]. 自20世纪80年代以来, 随着风动力的逐年减弱, 在中

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-04-24

基金项目: 中国科学院创新项目(KZCX2-YW-219); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403607); 国家自然科学基金项目(40675047)

作者简介: 徐兴奎(1966~), 男, 研究员, 主要研究方向为陆面过程和遥感信息反演, E-mail: xkxu@mail. iap. ac. cn

国主要沙尘源地,植被覆盖变化已逐渐显现地成为影响沙尘天气发生频次的重要因素之一.卫星监测数据显示,植被覆盖状况不但同步影响沙尘天气的发生频次,而且具有显著的滞后性影响效应.在西北地区,夏季植被的覆盖率与后期冬春两季各类沙尘天气的发生频次高度相关^[8,9],但这种滞后效应的发生原因和机制却并没有明确的合理解释.

本研究针对这一问题,通过卫星反演数据,在全国范围内分析了夏季植被覆盖对后期冬春两季沙尘发生频次的滞后性影响分布.根据自然植被的物候规律以及农业植被的耕作习惯,认为夏季植被残留根系的固沙作用、残留茎秆增加地表摩擦力、并改变大气动力强度是滞后效应的原因.通过准地转正压动力模式,在 3 种地表覆盖类型作用面上,模拟了地表覆盖类型对风动力的影响强度.研究结果对于沙尘天气的防治和环境质量的人工调控具有一定程度的参考价值.

1 数据源

1.1 气象和气候数据

地表覆盖特征的形成是长期气候适应的结果.

由于沙尘天气与地表覆盖特征密切相关,所以沙尘天气的时间变化与所处的气候区域有关.鉴于这种关系,本研究采用中国气象局根据降水和积温绘制的中国气候区划图^[10],针对每个气候区域,分析 1982~2000 年全国 335 个气象台站观测的沙尘天气发生频次与地表覆盖特征的关系.气候区划和气象台站分布如图 1 所示,其中气候区划含义见表 1.

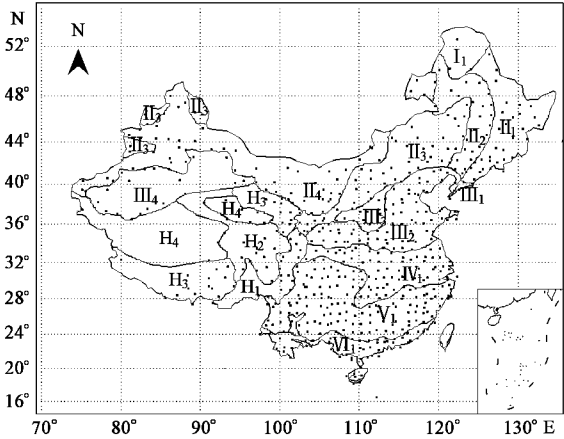


图 1 中国区域气候区划和气象台站分布(符号含义见表 1)
Fig.1 Distribution of climatic divisions and weather stations in China

表 1 中国气候区划
Table 1 Climatic divisions in China

气候区		子气候区			
I: 北温带	I ₁ : 北温带湿润大区				
II: 中温带	II ₁ : 中温带湿润大区	II ₂ : 中温带亚湿润大区	II ₃ : 中温带亚干旱大区	II ₄ : 中温带干旱大区	
III: 南温带	III ₁ : 南温带湿润大区	III ₂ : 南温带亚湿润大区	III ₃ : 南温带亚干旱大区	III ₄ : 南温带干旱大区	
IV: 北亚热带	IV ₁ : 北亚热带湿润大区				
V: 中亚热带	V ₁ : 中亚热带湿润大区				
VI: 南亚热带	VI ₁ : 南亚热带湿润大区				
H: 高原气候区	H ₁ : 高原南缘湿润大区	H ₂ : 高原亚湿润大区	H ₃ : 高原亚干旱大区	H ₄ : 高原干旱大区	

1.2 遥感数据

遥感数据是获得地表植被时空变化和分布的最佳手段.叶面积指数(LAI)是遥感反演数据中能够代表植被覆盖信息的物理参数.LAI 具有清晰的物理含义,可以突出植被信息、消除遥感信号中各类非植被信息.本研究使用的遥感资料来自 NASA 提供的 8 km×8 km 分辨率 NOAA-AVHRR 资料,时间序列从 1982~2000 年.NOAA-AVHRR 资料经过了除云和大气订正.LAI 反演采用 Sellers 等^[11]提出的基于全球植被波谱统计结果的反演方法,这种方法对于相同的象元点,反演结果比较稳定,非常适合于植被覆盖年际变化分析和气候环境应用研究.

2 植被覆盖和沙尘暴发频次统计关系

特定的天气背景下,沙尘天气能否发生、发生的强度取决于地表覆盖特征.冬春两季,在干燥的干旱和半干旱地区,裸露的沙质土壤为沙尘天气的形成提供了大面积的沙尘源,因此是中国区域沙尘天气多发季节;而在夏秋季节,植被覆盖等因素改变了地表几何形态,地表粗糙度上升,对气流的阻力作用增加;同时降水和植被根系改变了土壤结构,沙粒间吸附力也增强,沙尘天气的发生频次大幅下降.

卫星监测数据可以直观地显示植被覆盖对沙尘天气的制约作用.在不考虑地表覆盖类型的情况下,

归一化植被指数(NDVI)代表了地表综合信息.NDVI反演于 NOAA-AVHRR,它是利用各种地物对可见和红外波段的反射差异来获取地表覆盖状况.根据我国西部地区数据分析结果,当 $NDVI < 0.16$ 时,地表基本为裸土或者植被覆盖率极低.1982 ~ 2000 年 $1^{\circ}C \times 1^{\circ}C$ 分辨率 NDVI 数据与格点上沙尘天气观测记录统计结果显示,植被覆盖对沙尘天气的抑制作用呈现明显的非线性关系,相关系数 r 达到 0.92,

超过显著水平 0.01 时的临界相关系数 0.798[图 2 (a)],这说明植被是影响沙尘天气空间分布的重要原因.当地表由裸土向植被覆盖过渡时,植被对沙尘天气的影响强度尤为突出.图 2(b)是 NDVI 每增加 0.1 步长沙尘天气下降的百分比.图 2(b)显示,地表植被稍有增加,沙尘频次会急剧下降,当 NDVI 增加幅度为 0.3,即相当于我国西北河套地区 5 月份植被覆盖状况时,沙尘发生频次下降约 80% 以上.

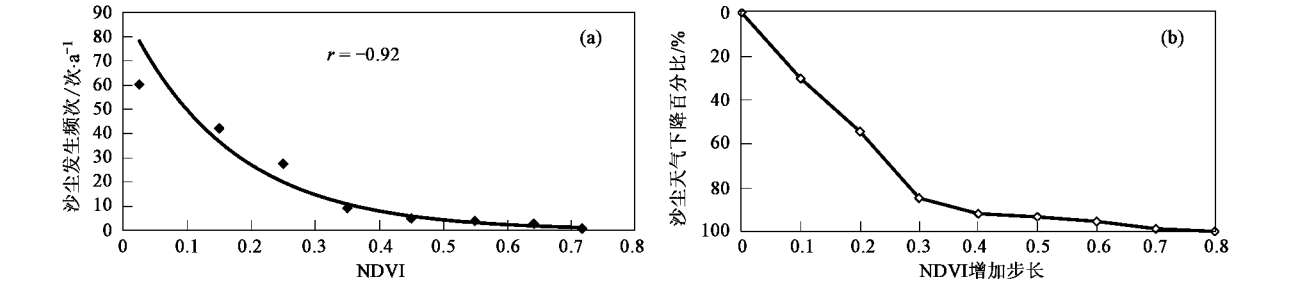


图 2 沙尘天气发生频次与植被覆盖率的关系
Fig.2 Relationship between frequencies of sand-dust event and vegetation cover

植被对沙尘天气的抑制作用,也会因不同的沙尘天气类型而有所差别.依照风力强度和能见度,沙尘天气分为沙尘暴、扬沙和浮尘 3 种天气类型.3 种天气主要集中在冬春 2 个季节发生,对于中国境内的大部分沙尘源区,这 2 个时段地表无植被覆盖或植被覆盖率相对很低.卫星反演的 LAI 和各类沙尘天气的相关性分析却显示,植被覆盖不仅同步影响各类沙尘天气的季节分布,在以北方为主的沙尘源区,夏季以 LAI 参数为代表的植被覆盖状况,与冬春两季各类沙尘天气的发生频次也具有显著的相关

性.在显著水平为 0.05 时,很多区域的绝对相关系数接近或超过 0.468 相关系数临界值(表 2).统计结果一方面说明夏季植被存在对后期沙尘天气的滞后性影响效应;另一方面也表明夏季植被覆盖状况对各类沙尘天气的影响程度不同.

夏季植被覆盖状况对各类沙尘天气的滞后性影响程度不同,间接说明 20 世纪 80 年代以来,沙尘年发生频次的减少与植被残留根茎有关.如沙尘暴天气,是由强动力天气系统触发,残留根茎对动力系统有削弱作用和固沙作用,能够显著地抑制冬春两季

表 2 各类沙尘天气与叶面积指数相关性分布¹⁾

气候区	相关系数		
	沙尘暴	扬沙	浮尘
I ₁ 北温带湿润大区	无沙尘暴记录	无扬沙记录	-0.368
II ₁ 中温带湿润大区	0.063	0.070	0.024
II ₂ 中温带亚湿润大区	-0.418	-0.465	-0.410
II ₃ 中温带亚干旱大区	-0.601	-0.619	-0.660
II ₄ 中温带干旱大区	-0.710	-0.624	-0.623
III ₂ 南温带亚湿润大区	-0.580	-0.704	-0.577
III ₃ 南温带亚干旱大区	-0.637	-0.413	0.624
III ₄ 南温带干旱大区	-0.032	0.097	0.008
IV ₁ 北亚热带湿润大区	-0.171	-0.689	-0.580
V ₁ 中亚热带湿润大区	0.104	-0.508	-0.527
VI ₁ 南亚热带湿润大区	-0.127	-0.271	0.055
H ₁ 高原南缘湿润大区	无沙尘暴记录	-0.355	-0.478
H ₂ 高原亚湿润大区	-0.169	-0.220	0.259
H ₃ 高原亚干旱大区	-0.109	-0.327	-0.349
H ₄ 高原干旱大区	-0.007	-0.180	-0.090

1) 黑体表示显著相关

沙尘暴发生频次;而对于动力系统相对较弱的扬沙和浮尘天气,残留根茎的上述作用会变得更加突出,相关性显著的气候区域相对增多.植被滞后性效应尤其能够在亚热带湿润大区(IV_1)、中亚热带湿润大区(V_1)和高原南缘湿润大区(H_1)得到验证.由于气候因素,这 3 个区域冬春两季都存在不同覆盖程度的自然植被和农业植被,植被覆盖一方面削弱来自上游的风动力,减少随动力系统飘向下流的浮尘和扬沙天气频次,同时也抑制了局地形成的扬沙和浮尘天气.高植被覆盖率也使得区域内裸土比率较低,缺少沙尘暴发生的物质源,因此在这些地区 LAI 与沙尘暴的相关反而不显著.相关分析结果预示,在冬春季节,地表存在着对大气动力的阻挡作用力和更强的土壤颗粒吸附力,而且 2 种作用力与夏季植被的覆盖状况有关.

3 植被覆盖对沙尘天气滞后性影响机制数值分析

风洞实验证实,植被的高度、密度增加都会对起沙过程产生抑制作用,即使少量的植被也能极大地抑制起沙量^[12].针对中国西北地区的仿真风洞试验也证实风障、类似枯萎植被的矮秆直立物体对沙尘天气的巨大影响作用^[13~16].植被的存在最显著的作用是增加地表粗糙度和摩擦系数,导致地面对气流的阻力上升,改变边界层的气流结构.根据慈龙骏等(未公开资料)于 1979 年的观测研究,当气流从裸露地进入草地后,地面粗糙度可提高 $8 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5$ 倍,对气流的阻力相应增加 17~26 倍,摩阻系数增加 4~5 倍.在宽度为 244 m 的灌(草)带处,可减少上层气流对近地面层气流的动能补给,降低了近地面层的风速 40%,在 10 cm 的高度上,风速可降低 90% 左右.

根据流体力学原理,大气流经粗糙地表时,总阻力 F 分解为作用在粗糙元上的阻力 F_1 和作用于土壤的阻力 F_2 ^[17]:

$$F = F_1 + F_2 \tag{1}$$

当地表有直立物体,如植被的根茎等残留物时,地表粗糙度增加,导致粗糙元上总阻力 F_1 急速上升,而裸露地表的阻力 F_2 急剧下降,风蚀作用随之减弱.大气边界层风廓线会因为阻力变化,按照式(2)结构发生调整,越接近地表,风速会变得越小.当没有外来动力补充时,由地表产生的摩擦阻挡力会迅速上传,最终整个大气边界层风速将趋近于 0.

$$U_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \tag{2}$$

式中, U_z : 高度 Z 处风速; u^* : 摩擦速度; d : 零平面位移; z_0 : 粗糙度; k : 卡曼常数.

对于一个天气系统而言,在气压梯度力为 $-\frac{1}{\rho}\nabla p$ 、地转偏向力为 $-2\vec{\Omega} \times \vec{V}$ 和地球引力为 $\vec{g}$ 时,大气风动力变化主要来源于地表摩擦阻力 $\vec{F}$.植被对风动力的消耗过程可以表示为:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{g} + \vec{F} \tag{3}$$

因此风动力的变化强度主要由地表摩擦系数大小决定.但摩擦系数的定量确定非常困难,原因在于参考面的选择不同,观测结果有很大的差异.为了完整模拟验证植被残留根茎等对大气动力影响强度,根据风洞试验结果^[14~16],选用 10^{-6} 、 10^{-5} 和 10^{-4} 共 3 个摩擦量级,分别代表平坦的水面、裸地和枯萎植被的摩擦系数量级,针对每个摩擦量级逐一递增进行模拟.

模拟实验利用包含摩擦作用的准地转正压模式,研究非绝热加热时边界层摩擦对风动力影响.包含摩擦的准地转正压涡度方程在 β 平面可以表示为:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + J(\psi, \nabla^2 \psi) + J(\psi, \beta y) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

式中, γ 为摩擦系数,这里假设边界层摩擦的大小跟风速成正比. ψ 为准地转流函数, β 为地转参数.

模式采用均匀网格,网格距为 48 km,模式东西方向和南北方向取 101×101 个格点,时间步长为 12 min,总积分时间为 3 d.模式方程中的 Jacobian 项采用 Arakawa^[18]构造的差分格式计算,并且在模式东西方向采用周期性边界条件,南北方向采用固定边界条件,即南北边界扰动流函数为 0,从而保证模式积分计算过程中区域总动能及涡度守恒.模式时间积分起步采用了多步法(前差 + 中央差 + 中央差),之后采用中央差分进行计算,应用超松驰迭代法求解 ψ .初始风场为纬向风,经向风为 0.

$$\begin{cases} u^{(0)} = 10 \sin\left[\frac{\pi}{4}\left(\frac{j}{J} + 1\right)\right] \\ v^{(0)} = 0.0 \end{cases} \tag{5}$$
$$j = 1, 2, \dots, 101$$

为了突出 3 种下垫面摩擦作用对风动力的衰减作用,模式中没有考虑地形的影响作用,假设过程在平面上进行.

模拟结果显示,在大气和水面摩擦量级,由于摩

擦系数较小,表面摩擦对风动力的衰减过程相对较慢.在初始场风速为 10 m/s、摩擦系数为 8×10^{-6} 时,约 72 h 后边界层风速才下降至 2 m/s 以下,下降比率将近 90%(图 3).这个过程代表的物理含义是,地表风速在摩擦作用下,风速首先下降,并按照式(2)的形式在大气边界层内形成风廓线,当没有外来动力补充时,经过摩擦作用的持续逐层传递,72 h 后边界层大气平均风速近似为 2 m/s.当地表摩擦提高一个量级,即摩擦系数近似为大气和土壤之间的摩擦系数数量级时,风动力的损耗速度明显加快,在 $> 2 \times 10^{-5}$ 的摩擦系数下,边界层风速迅速下降,18 h 之后

风速最大下降率几乎 100%,风速接近于 0(图 4).而对于有地表直立物体存在、或地表存在矮秆枯萎植被的情况下,由于地表摩擦系数的增加,边界层风速下降的更加明显.当摩擦系数 $> 2 \times 10^{-4}$ 时,6 h 内边界层风速接近于 0,最快 1 h 内边界层风速就下降了 100%(图 5).上述数值模拟过程表明,当地表存在稀疏的残留植被秆茎时,即使不考虑植被根的固沙作用,仅从其对大气动力的衰减强度来看,就会很大程度上削弱沙尘天气发生的动力条件.而且模拟过程中忽略了地形的影响,如果加入地形因素,摩擦系数还会进一步增加,对风动力的衰减速度也会加剧.

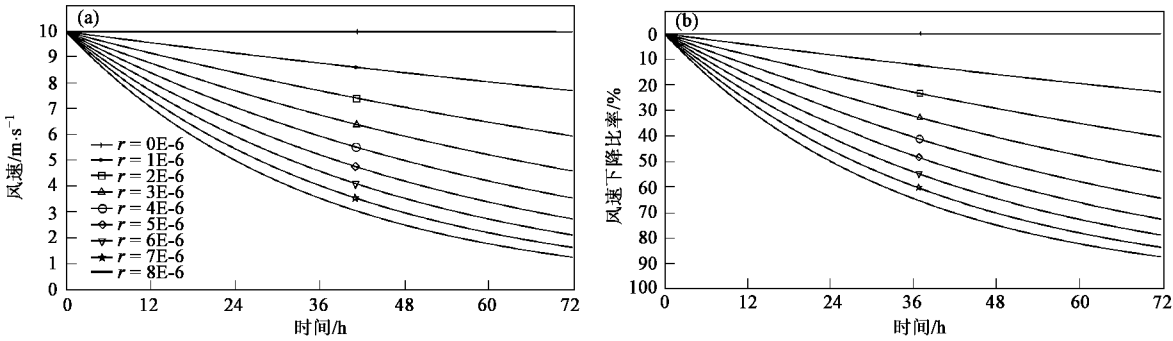


图 3 大气与水面摩擦量级时摩擦层大气平均风速随时间变化和下降比率

Fig.3 Change of wind velocity and decline percentage with time for magnitude of frictional coefficient between atmosphere and water surface

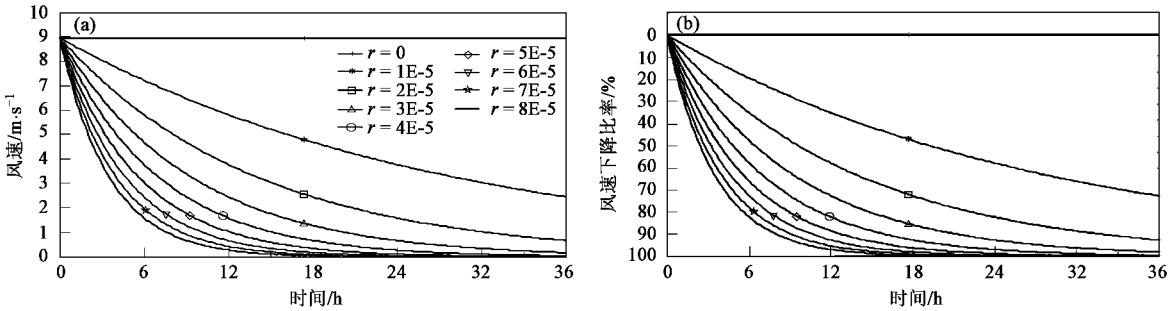


图 4 大气与裸土摩擦量级时摩擦层大气平均风速随时间变化和下降比率

Fig.4 Change of wind velocity and decline percentage with time for magnitude of frictional coefficient between atmosphere and bare soil

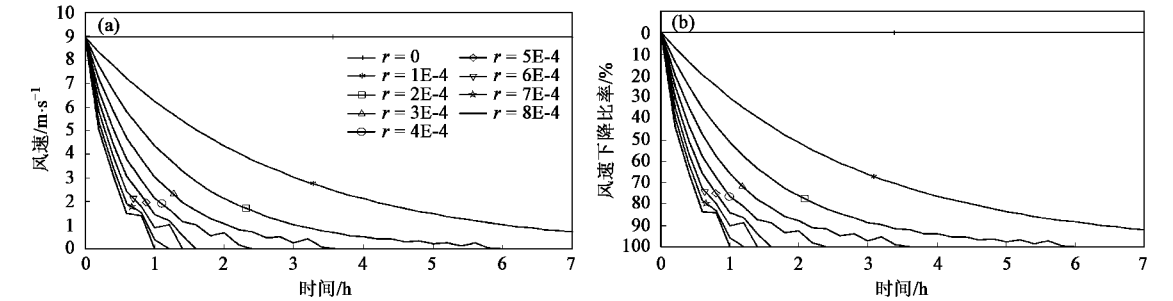


图 5 大气与植被摩擦量级时摩擦层大气平均风速随时间变化和下降比率

Fig.5 Change of wind velocity and decline percentage with time for magnitude of frictional coefficient between atmosphere and vegetation cover

模拟结果从数值上证实植被残留根茎对风动力的削弱作用,而卫星数据则进一步从实践上证实植被对沙尘天气滞后性效应的存在.本研究利用 1982~2000 年由 NOAA-AVHRR 数据计算的 5~10 月平均 NDVI 描述地表植被的年变化.选择 5~10 月是因为中国南北植被物候变化差距很大,使用全年 NDVI 数据会因为非植被因素产生较大误差,而且 5~10 月涵盖了我国所有地区植被的主生长期.另一方面,使用近似卫星原始资料的 NDVI 也可以消除反演过程中造成的误差.线性统计分析结果表明,1982~2000 年期间,中国大部分地区植被覆盖随时间变化呈现显著增加的过程,而且主要集中于我国沙尘源地区域,只有在人口密集的城市及其周边地区,植被覆盖才呈现点状的显著退化现象(图 6).沙尘源地区域植被的显著增加趋势,意味着冬春季节地表残留的根茎密度增多,固沙和对风动力的削弱作用更强,在统计上则出现植被的滞后性影响效应.

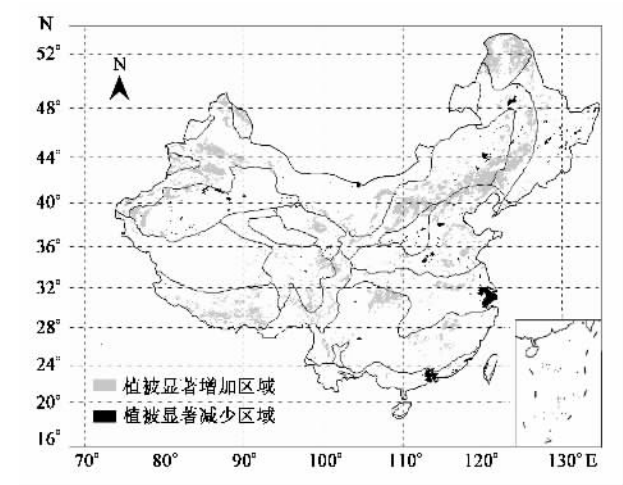


图 6 中国西部地区植被显著增加和减少区域分布
Fig.6 Increased and decreased regions in vegetation cover in China

4 结论

(1)植被对沙尘天气存在明显的滞后性影响,植被残留根系和残留茎秆是产生滞后效应的主要原因.在中国北方主要沙尘天气源地,自然植被残留的根茎会一直保留到下一个生长季;对于农业植被而言,出于土壤保护等目的,农业耕作习惯也是将一定高度的茎秆保留到下一个农耕季节.自然环境的逐渐改善和农业保护性耕作技术的普及,冬春季节残留的根茎密度也因之而增加.虽然在强天气系统下,植被残留根茎的作用有限,但随着 20 世纪 80 年代以来风动力的逐年减弱,残留根茎的显著作用变得

越来越突出.

(2)滞后效应的机制是残留根茎对风动力的强烈衰减作用.夏季植被引发的土壤性质和地表几何形态变化,会在冬春非植被生长季节保持一定程度的稳定性,并导致地表粗糙度增加.通过对比模拟水体、裸土和枯萎矮秆植被 3 种下垫面对风动力的影响证实,稀疏的残留植被即可对边界层风场产生强烈的衰减作用,导致触发各类沙尘天气所必需的動力条件更高.如果考虑真实地表状况,如加入地形、灌木、林地以及植被的空间几何分布等因素,对风动力的衰减作用会远大于模拟结果.

参考文献:

[1] 赵景波,杜娟,黄春长.沙尘暴发生的条件和影响因素[J].干旱区研究,2002,19(1):58-62.

[2] 石广玉,赵思雄.沙尘暴研究中的若干科学问题[J].大气科学,2003,27(4):591-606.

[3] 王小玲,翟盘茂.我国春季沙尘天气频率变化及其与地面风场和气压场的关系[J].气象学报,2004,62(1):96-103.

[4] 陈玉福,唐海萍.近 50 年首都圈沙尘暴的变化趋势及其与气温、降水和风的关系[J].环境科学,2005,26(1):32-37.

[5] 沈振兴,张小曳,曹军骥,等.粘土矿物比率对沙尘源区的指示[J].环境科学,2005,26(4):30-34.

[6] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(5): 505-514.

[7] Van de Ven T A M, Fryrear D W, Spaan W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(3): 347-349.

[8] 顾卫,蔡雪鹏,谢锋,等.植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨——以内蒙古中西部地区为例[J].地球科学进展,2002,17(2):273-277.

[9] 徐兴奎,陈红.中国西部地区地表植被覆盖和积雪覆盖变化对沙尘天气的影响[J].科学通报,2006,51(6):707-714.

[10] 中国自然地理图集[M].北京:地图出版社,1984.1-200.

[11] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models[J]. Journal of Atmospheric Science, 1986, 43: 505-531.

[12] Marshall J K. Drag Measurements in Roughness Array of Varying Density[J]. Agriculture Meteorology, 1971, 8:269-292.

[13] 宣捷,俞学曾.风障减少尘埃飞起的风洞模拟研究[J].环境科学研究,1997,10(2):14-18.

[14] 刘小平,董治宝.直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J].中国沙漠,2002,22(1):82-87.

[15] 董治宝,高尚玉, Fryrear D W. 直立植物-砾石覆盖组合措施的防风蚀作用[J].水土保持学报,2000,14(1):7-17.

[16] 董治宝,屈建军,刘小平,等.戈壁表面阻力系数的实验研究[J].中国科学(D辑),2001,31(11):953-958.

[17] Schlichting H. Experimentelle Untersuchungen zum Rauheitsproblem[J]. Ing Arch, 1936, 7: 1-34.

[18] Arakawa A. Computational design for long-term numerical integrations of the equations of Atmospheric motion[J]. Journal of Computational Physics, 1966, 1: 119-142.