

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

徐兴奎 陈 红

(中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029. E-mail: xkxu@mail.iap.ac.cn)

摘要 自然正交(EOF)分解生成的 80 km×80 km 归一化植被指数(NDVI)显示, 自 1982~1994 年间中国西部区域地表植被覆盖率呈增加趋势, 1995 年前后, 地表覆盖状况有下降趋势, 地表覆盖变化存在很大的空间差异。其中第一、二特征向量时间系数可以很好地反映中国西部区域局地植被覆盖率的年变化。通过 NDVI 与西部区域沙尘暴、扬沙、浮尘年发生频次相关分析得出, 地表植被的年变化是影响沙尘等灾害性天气发生的最主要地表特征因素。同时, 相关分析显示, 在西部部分地区, 降雪量也是影响沙尘天气的重要地表特征因子。采用遥感数据、气象观测数据, 通过数理分析方法, 直接证明了中国西部地区地表植被、积雪覆盖变化对沙尘天气发生频次的影响。

关键词 沙尘天气 植被覆盖 积雪

气候系统对自然的或人为因素诱发的地表特征变化极为敏感^[1~13]。如地表覆盖类型的时空变化, 可引起地表物理性质的非均匀分布, 从而导致地表能量分配和转换机制不同, 直接影响区域气候环境的形成和变化^[14~16]。研究显示, 引起下垫面覆盖类型变化的因素包括自然的和非自然因素, 无论哪种因素引起的地表特征改变, 都会对区域气候温湿分布造成显著的影响^[17~19]。同时, 地表覆盖类型时空分布的多样性和多变性, 也会造成地表物理参数的复杂分布, 并直接影响大气环流的发展和变化^[20]。作为陆面过程的一个特殊群体, 干旱和半干旱地区植被覆盖率极低, 很高的反照率和气温使感热大大高于潜热, 直接影响到该区域的降水^[21~24], 降水的减少又使该地区生态环境进一步恶化, 最终导致沙尘暴等灾害性天气频繁爆发。

气候要素和地表物理特征是触发沙尘等灾害性天气的两个必要因素^[25,26], 同时两者又相互作用、相互影响。长期的气候适应以及气候差异造成了地表特征的不均匀性分布, 而这种不均匀性又会对局地气候产生反馈作用。气候因素为沙尘天气的发生提供了动力条件, 持久的风力、足够强的天气系统为沙尘天气提供了起沙和传输动力。地表物理特性则为沙尘天气的发生提供了必要的物理条件, 并极具脆弱性。气候系统的不确定性, 人为影响都会改变地表特征的物理性质。当两者超过某一阈值时, 沙尘天气就可能发生。

中国西部地区地处干旱和半干旱地区, 地表覆盖类型相对比较单一。地表覆盖类型以沙漠和半沙漠为主, 地表水资源有限, 植被生长所需水的主要来源是自然降水, 降水的多少直接影响地表覆盖密度。春季积雪融化蒸发、地表干燥, 无植被覆盖; 夏秋季节, 少量的降水使地表植被覆盖率增加; 冬季, 降雪覆盖了西部大部分区域, 其地表物理属性年变化很大。与此对应, 中国西部地区灾害性天气也呈规律性变化。春季沙尘天气频发, 夏秋冬季逐渐减少^[27], 这种变化特征暗示沙尘天气与地表特征变化之间存在相关联系。研究显示, 沙尘天气具有年际变化特征, 从 80 年代初至 1997 年间, 中国西部区域沙尘天气出现频次呈逐年下降趋势, 1997 年后开始呈上升趋势^[28]。动力分析表明, 风速的年变化与沙尘天气的发生频次高度相关^[29]。但作为影响沙尘天气重要因素的地表特征究竟起到什么作用, 这方面的研究甚少。虽然有些研究认为沙尘天气的发生与地表植被覆盖率减少有关^[30], 但已有的研究都没有对西部区域地表覆盖特征的时空变化特征作出分析, 并在时空尺度上对地表特征变化与沙尘的关系作出令人信服的验证。因此, 本文通过利用 1982~2000 年 NOAA-AVHRR 遥感数据和 1970~2000 年 616 气象台站观测数据, 在时空尺度上分析地表植被覆盖率年变化、降雪年变化与沙尘天气发生频次的关系, 通过数理分析直接证实地表特征变化对沙尘天气发生的影响。

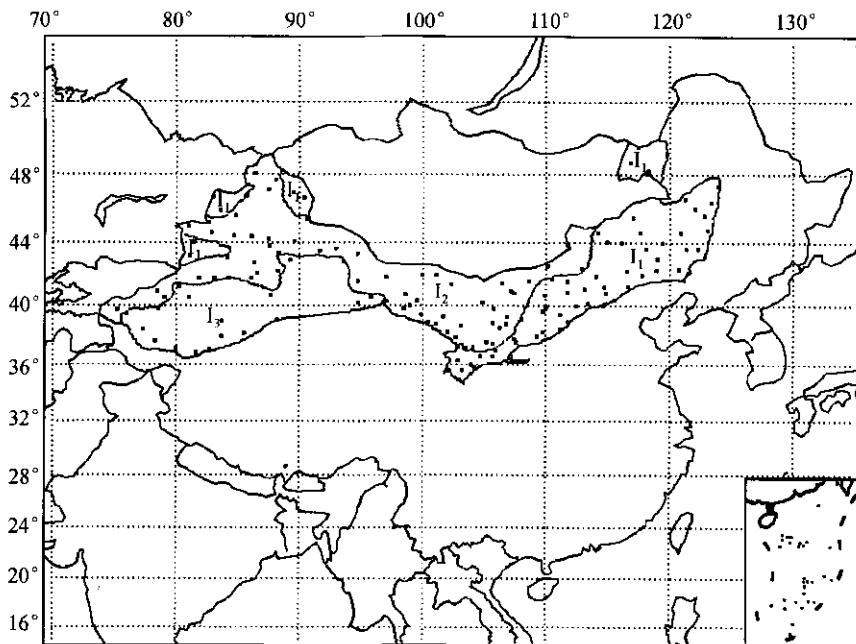


图 1 三个气候区域的分布以及气象台站分布

1 研究区域

图 1 所示为本文所研究的中国西部地区三个气候区域, 包括: 中温带亚干旱大区(I_1)、中温带干旱大区(I_2)、南温带干旱大区(I_3), 以及气象台站在三个区域的分布。本文之所以选定这样的中国西部地区的划定, 是出于以下 4 种考虑: 第 1, 在地理分布上, 该区域位于中国的西部地区; 第 2, 受气象观测台站的限制, 本文选取中国西部部分地区。因为在中国西部地区, 气象观测台站有限, 如位于西南部的青藏高原, 气象台站很少, 如果选取这些地区, 最终结果可能存在很大的误差。第 3, 中国南北横跨几个不同气候带, 受气候的影响, 地表植被的生长期差别很大。对于自然植被而言, 气候条件决定了他们的生长周期, 而对于农业作物, 受人类影响, 因所处的气候区域不同, 复种指数存在较大的差异。因此, 我们采用中国气象局绘制的气候区划定义所研究的西部区域。气候区划的标准是: 这些区域的年降水量和年积温相似。第 4, 在研究区域, 包含了近年来对中国环境影响较大, 争议也较大的区域, 同时也是沙尘天气频繁发生的区域。

2 观测数据分析

2.1 NDVI 时空变化

NDVI 是根据 NOAA-AVHRR 数据第 1(0.58~

$0.68 \mu\text{m}$) 和第 2(0.725~1.10 μm) 信道反射特性差异来反映下垫面覆盖和植被的动态变化信息, NDVI 越大, 说明地表植被覆盖状况越好。它不仅包含了自然因素对地表覆盖类型的影响, 而且也包含了人类活动信息。本文使用的 NOAA-AVHRR 数据来源于 NASA 提供的 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 分辨率旬最大 NDVI 资料, 数据经过了大气订正和角度订正, 消除了大气等因素的影响, 使 NDVI 在空间尺度上具有可对比性。

为了使 NDVI 更加准确地反映出西部地区植被的年变化趋势, 本文选取 5~10 月的平均 NDVI 代表年平均 NDVI。理由在于: (i) 中国西部地区植被类型基本是一年一生植被, 植被的生长周期与气温降水的变化周期同步, 5~10 月份是地表植被覆盖密集时期, 而且 5 月份与 10 月份 NDVI 振幅基本相同(图 2); (ii) 可以消除非植被生长季节地表特征变化对 NDVI 的影响。为了更加准确地进行时空分析, 通过平均计算, 将 NDVI 分辨率降为 $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$, 这样做一方面使 NDVI 时间序列变得更加平稳; 另一方面减少空间点阵, 使之更加适合 EOF 数学分析。NDVI 的平均处理并不会掩盖区域内自然植被和农业植被 NDVI 的变化趋势, 首先各种植被在生长季节 NDVI 变化趋势基本相似; 其次西部地区裸露土壤湿度极低, 裸土的 NDVI 月际变化比较平稳^[31]; 再则 NDVI 是每旬最大 NDVI, 可以最大限度地消除气候等不确

表 2 沙尘暴、扬沙、浮尘与 NDVI 的相关系数

	沙尘暴	扬沙	浮尘
中温带亚干旱大区(1)	-0.70	-0.64	-0.62
中温带干旱大区(2)	-0.74	-0.66	-0.60
南温带干旱大区(3)	-0.34	-0.34	-0.20

表 3 沙尘暴、扬沙、浮尘与年降雪量的相关系数

	沙尘暴	扬沙	浮尘
中温带亚干旱大区(1)	-0.31	-0.36	-0.41
中温带干旱大区(2)	-0.55	-0.59	-0.62
南温带干旱大区(3)	-0.22	-0.06	-0.16

图 9 土壤质地分布

表特征因子作为研究对象，主要原因是由于这些影响因素中有部分是相互关联的：(i) 在西部地表植被生长区域，下垫面覆盖类型变化会影响区域温湿分布，而适合的降水温湿分布又利于植被生长，因此 NDVI 本身是地表和气候综合特征的体现，其中也包含了人为因素对地表环境的影响；而在植被非生长季节，对地表特征和沙尘天气影响最大的因素是地表积雪。 (ii) 在西部无植被覆盖的区域，冬季和春季气温积雪量是影响沙尘天气发生频次的最重要的地表特征因素，但在非积雪覆盖季节，其他要素如温度和降水等与沙尘发生频次之间关系并不是很明显^[25]。这一方面是由于夏秋季节，无植被区域降水少蒸发强烈，这种短期微弱的地表湿度变化对沙尘天气年变化频次的影响不大；另一方面是因为其他区域植被的存在，改变了西部整体地表特征；同时，

天气系统的季节性特征对沙尘天气发生频次的季节性分布也至关重要^[33]。因此本文着重分析地表植被覆盖和积雪两个主要的地表特征因子与沙尘天气年发生频次间的关系，并得出如下结论：

(i) 气象因子和地表物理特征是影响中国西部区域沙尘天气发生频次年变化的两个重要因素。在气象因子适合的条件下，地表特征的物理性质决定沙尘天气是否发生。

(ii) 地表植被覆盖率决定了沙尘天气年发生的频次。通过对我国西部三个区域的分析得出，除植被稀少的南温带干旱大区(I₃)外，在沙尘天气频发的区域，地表覆盖率年变化与沙尘天气年发生的频次高度相关，可以很好的解释中国西部地区沙尘天气年波动规律，也直接证明了中国西部区域地表植被改善和退化，都会对西部环境造成强烈的影响。

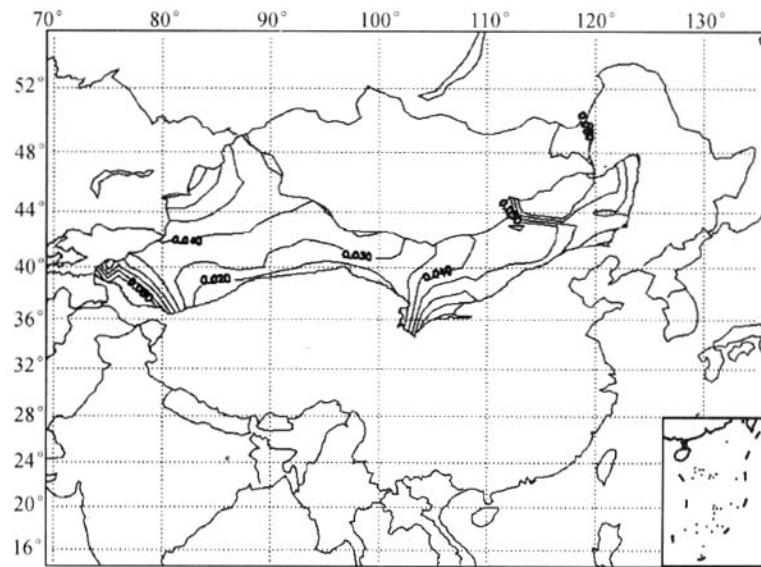


图3 NDVI 第一特征向量场

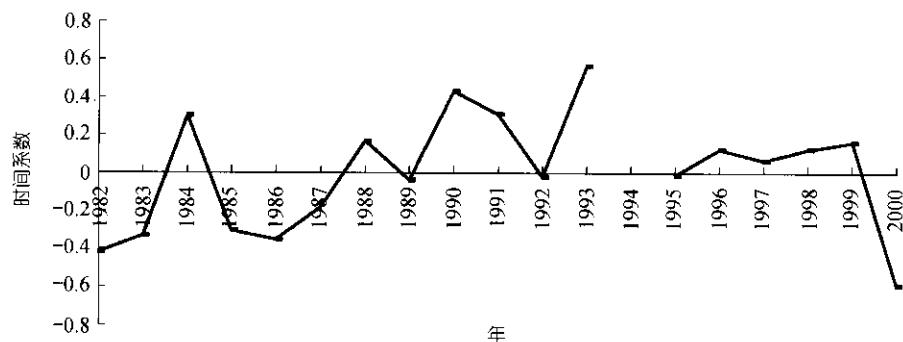


图4 第一特征场时间系数

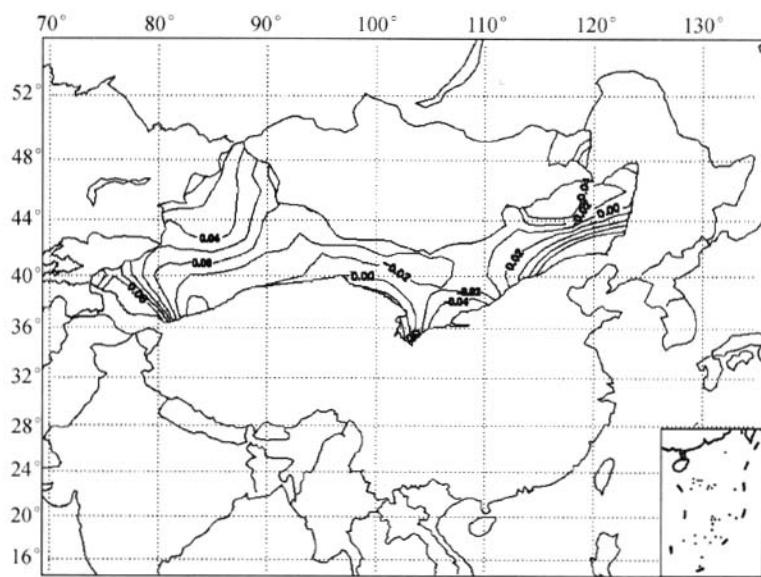


图5 NDVI 第二特征向量场

表 2 沙尘暴 扬沙 浮尘与 NDVI 的相关系数

	沙尘暴	扬沙	浮尘
中温带亚干旱大区(1)	0.70	0.64	0.62
中温带干旱大区(2)	0.74	0.66	0.60
南温带干旱大区(3)	0.34	0.34	0.20

表 3 沙尘暴 扬沙 浮尘与年降雪量的相关系数

	沙尘暴	扬沙	浮尘
中温带亚干旱大区(1)	0.31	0.36	0.41
中温带干旱大区(2)	0.55	0.59	0.62
南温带干旱大区(3)	0.22	0.06	0.16

图 9 土壤质地分布

表特征因子作为研究对象，主要原因是由于这些影响因素中有部分是相互关联的：(i) 在西部地表植被生长区域，下垫面覆盖类型变化会影响区域温湿分布，而适合的降水、温湿分布又利于植被生长，因此 NDVI 本身是地表和气候综合特征的体现，其中也包含了人为因素对地表环境的影响；而在植被非生长季节，对地表特征和沙尘天气影响最大的因素是地表积雪。 (ii) 在西部无植被覆盖的区域，冬季和春季气温、积雪量是影响沙尘天气发生频次的最重要的地表特征因素，但在非积雪覆盖季节，其他要素如温度和降水等与沙尘发生频次之间关系并不是很明显^[25]。这一方面是由于夏秋季节，无植被区域降水少、蒸发强烈，这种短期微弱的地表湿度变化对沙尘天气年变化频次的影响不大；另一方面是因为其他区域植被的存在，改变了西部整体地表特征；同时，

天气系统的季节性特征对沙尘天气发生频次的季节性分布也至关重要^[33]。因此本文着重分析地表植被覆盖和积雪两个主要的地表特征因子与沙尘天气年发生频次间的关系，并得出如下结论：

(i) 气象因子和地表物理特征是影响中国西部区域沙尘天气发生频次年变化的两个重要因素。在气象因子适合的条件下，地表特征的物理性质决定沙尘天气是否发生。

(ii) 地表植被覆盖率决定了沙尘天气年发生的频次。通过对我国西部三个区域的分析得出，除植被稀少的南温带干旱大区(I₃)外，在沙尘天气频发的区域，地表覆盖率年变化与沙尘天气年发生的频次高度相关，可以很好的解释中国西部地区沙尘天气年波动规律，也直接证明了中国西部区域地表植被改善和退化，都会对西部环境造成强烈的影响。

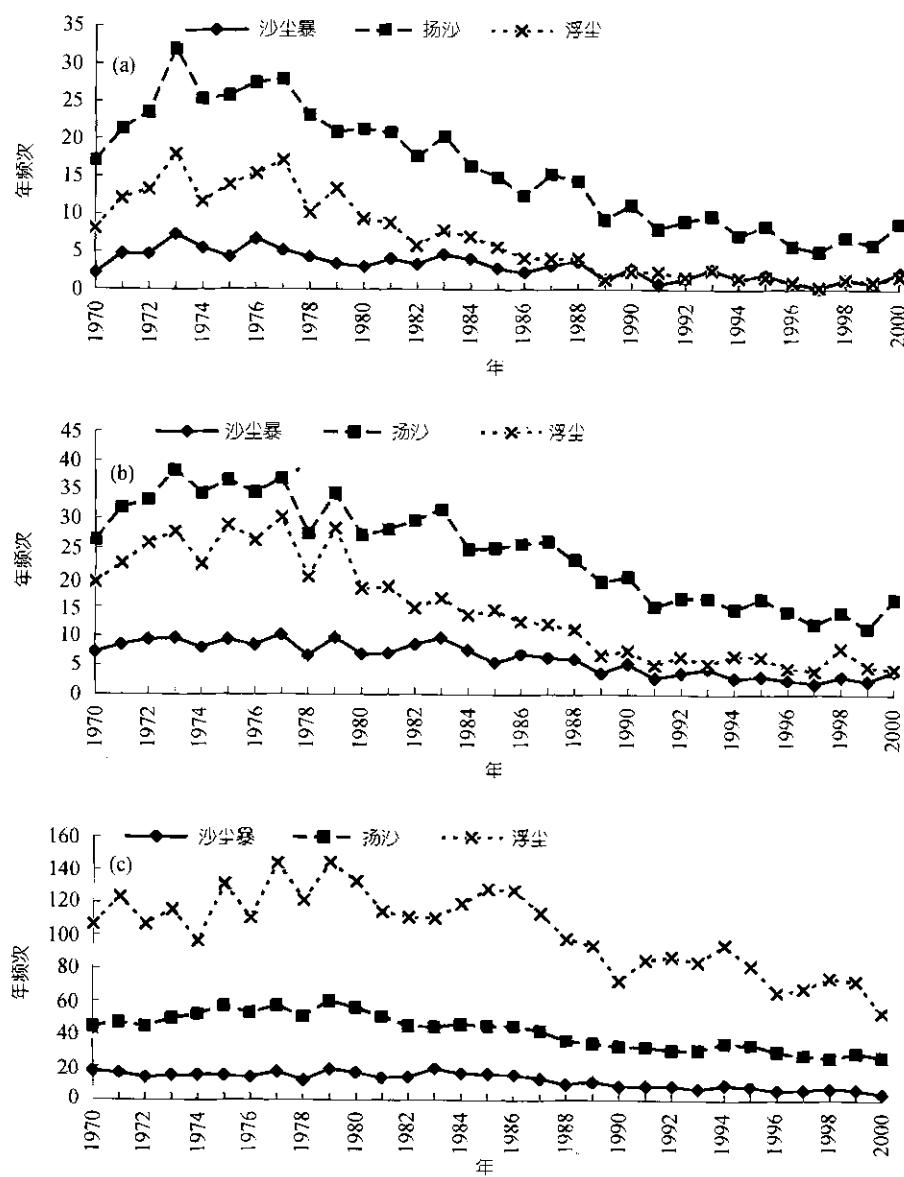
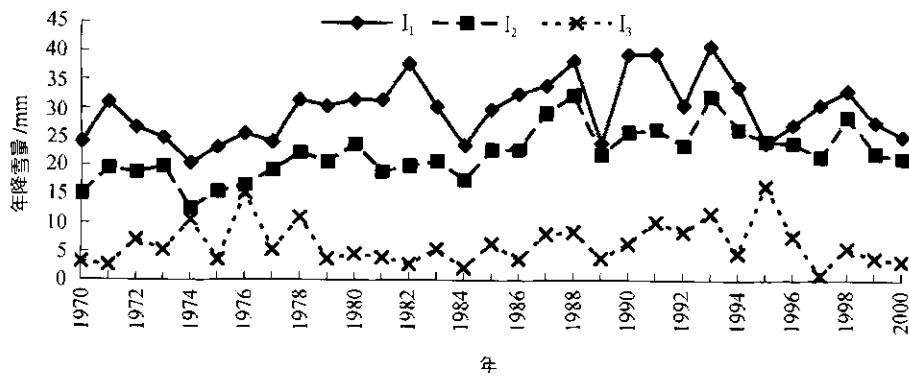
图7 沙尘暴、扬沙、浮尘在三个区域的分布((a) I₁, (b) I₂, (c) I₃)

图8 各自气候区域年降雪量年际变化

表 2 沙尘暴、扬沙、浮尘与 NDVI 的相关系数

	沙尘暴	扬沙	浮尘
中温带亚干旱大区(I ₁)	-0.70	-0.64	-0.62
中温带干旱大区(I ₂)	-0.74	-0.66	-0.60
南温带干旱大区(I ₃)	-0.34	-0.34	-0.20

表 3 沙尘暴、扬沙、浮尘与年降雪量的相关系数

	沙尘暴	扬沙	浮尘
中温带亚干旱大区(I ₁)	-0.31	-0.36	-0.41
中温带干旱大区(I ₂)	-0.55	-0.59	-0.62
南温带干旱大区(I ₃)	-0.22	-0.06	-0.16

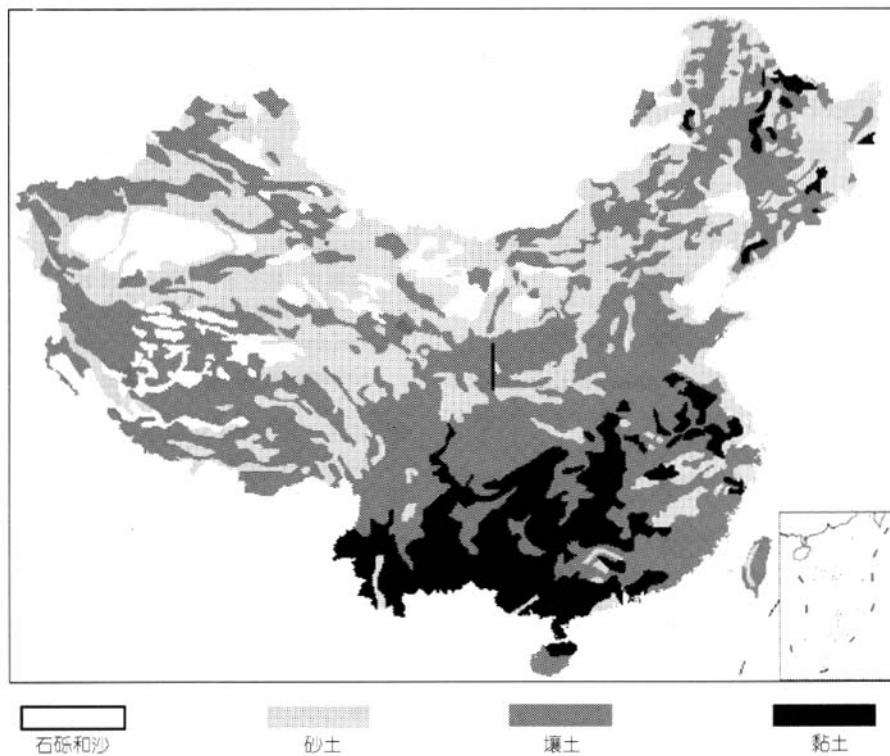


图 9 土壤质地分布

表特征因子作为研究对象，主要原因是由于这些影响因素中有部分是相互关联的：(i) 在西部地表植被生长区域，下垫面覆盖类型变化会影响区域温湿分布，而适合的降水、温湿分布又利于植被生长，因此 NDVI 本身是地表和气候综合特征的体现，其中也包含了人为因素对地表环境的影响；而在植被非生长季节，对地表特征和沙尘天气影响最大的因素是地表积雪。 (ii) 在西部无植被覆盖的区域，冬季和春季气温、积雪量是影响沙尘天气发生频次的最重要的地表特征因素，但在非积雪覆盖季节，其他要素如温度和降水等与沙尘发生频次之间关系并不是很明显^[25]。这一方面是由于夏秋季节，无植被区域降水少、蒸发强烈，这种短期微弱的地表湿度变化对沙尘天气年变化频次的影响不大；另一方面是因为其他区域植被的存在，改变了西部整体地表特征；同时，

天气系统的季节性特征对沙尘天气发生频次的季节性分布也至关重要^[33]。因此本文着重分析地表植被覆盖和积雪两个主要的地表特征因子与沙尘天气年发生频次间的关系，并得出如下结论：

(i) 气象因子和地表物理特征是影响中国西部区域沙尘天气发生频次年变化的两个重要因素。在气象因子适合的条件下，地表特征的物理性质决定沙尘天气是否发生。

(ii) 地表植被覆盖率决定了沙尘天气年发生的频次。通过对我国西部三个区域的分析得出，除植被稀少的南温带干旱大区(I₃)外，在沙尘天气频发的区域，地表覆盖率年变化与沙尘天气年发生的频次高度相关，可以很好的解释中国西部地区沙尘天气年波动规律，也直接证明了中国西部区域地表植被改善和退化，都会对西部环境造成强烈的影响。

(iii) 积雪也是影响沙尘天气年发生频次的重要地表特征之一。除降雪量较少的干旱区域 I₃ 外, 在其他区域, 年降雪量与沙尘天气年发生的频次也具有很好的相关性。

(iv) 通过本文研究结果, 可以得出, 在中温带亚干旱大区(I₁)、中温带干旱大区(I₂)区域, 人为地对地表施加影响, 改善这两个区域的地表植被覆盖状况, 可以有效抑制或减少沙尘等灾害性天气的发生频次; 而对于南温带干旱大区(I₃), 由于自然状况限制, 通过人为活动改善区域环境的可能性很小。

致谢 本文受到财政部资助项目(Y0101)、中国科学院知识创新方向性项目(批准号: KZCX3-SW-221)以及国家自然科学基金重点项目(批准号: 40233027)联合资助。

参 考 文 献

- 1 Baron J S, Hartman M D, Kittel T G F, et al. Effects of land cover, water redistribution, and temperature on ecosystem processes in the South Platte basin. *Ecol Appl*, 1998, 8: 1037~1051
- 2 Bonan G B. Effects of land use on the climate of the United States. *Climatic Change*, 1997, 37: 449~486
- 3 Bounoua L, Collatz G J, Los S O, et al. Sensitivity of Climate to Changes in NDVI. *Journal of Climate*, 2000, 13: 2277~2292
- 4 Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1366~1385
- 5 Lauenroth W K, Burke I C, Gutmann M P. The structure and function of ecosystems in the central North American grassland region. *Great Plains Res*, 1999, 9: 223~259
- 6 Lewis T. The effect of deforestation on grown surface temperatures. *Global Planetary Change*, 1998, 18: 1~13
- 7 Ning Zeng, Neelin J D, Lau K M, et al. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 1999, 286: 1537~1540
- 8 Pielke R A. Overlooked issues in the U.S. National Climate and IPCC assessments. Preprints, 11th Symposium on Global Change Studies, 80th AMS Annual Meeting, Long Beach CA, January 9~14, 2000, 32~35
- 9 Pitman A, Pielke R, Avissar S R, et al. The role of the land surface in weather and climate: does the land surface matter? *IGBP Newsletter*, 1999, 39: 4~9
- 10 Shukla J. Predictability of time averages. Part II: The influence of the boundary forcing. *Problems and Prospects in Long and Medium Range Weather Forecasting*. In: Burridge D M, Kallen E, eds. London: Springer-Verlag, 1984, 155~206
- 11 Skinner W R, Majorowicz J A. Regional climatic warming and associated twentieth century land-cover changes in north-western North America. *Climate Res*, 1999, 12: 39~52
- 12 Wang G, Eltahir E A B. Ecosystem dynamics and the Sahel drought. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 795~798
- 13 Wang G, Eltahir E A B. Role of vegetation in enhancing the low-frequency variability of the Sahel rainfall. *Water Resources Res*, 2000, 36: 1013~1021
- 14 张耀存, 钱永甫. 陆地下垫面特征对区域能量平衡过程影响的数值试验. *高原气象*, 1995, 14(3): 325~333
- 15 周锁铨, 陈万隆. 青藏高原植被下垫面对东亚大气环流影响的数值试验. *南京气象学院学报*, 1995, 18(4): 536~542
- 16 周锁铨, 陈万隆, 王革丽. 夏季中国高原植被气候效应的数值研究 I: 模式及降水、流场的效应. *南京气象学院学报*, 1997, 20(2): 158~163
- 17 罗哲贤. 植被带宽度对局地环流及温度场影响的数值研究. *地理学报*, 1994, 19(1): 37~45
- 18 刘树华, 黄子琛, 刘立超. 半干旱区植被覆盖度对边界层气候热力影响的数值模拟. *气象学报*, 1996, 54(3): 303~311
- 19 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩. 植被变化对中国区域气候的影响 I——初步模拟结果; II——机理分析. *气象学报*, 2002, 60(1): 1~29
- 20 Charney J G. Dynamics of deserts and droughts in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101: 193~202
- 21 Balling R C. The climatic impact of a Sonoran vegetation discontinuity. *Climatic Change*, 1988, 13: 99~109
- 22 Balling R C. Impact of desertification on regional and global warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1989, 72: 232~234
- 23 Gee G W, Wierenga P J, Andraski B J, et al. Variations in water balance and recharge potential at three western desert sites. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 63~72
- 24 Schlesinger W H, Fonteyn P J, Marion G M. Soil moisture content and plant transpiration in the Chihuahuan Desert of New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 1987, 12: 119~126
- 25 赵景波, 杜娟, 黄春长. 沙尘暴发生的条件和影响因素. *干旱区研究*, 2002, 19(1): 58~62
- 26 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题. *大气科学*, 2003, 27(4): 591~606
- 27 潘耀忠, 范一大, 史培军, 等. 近 50 年来中国沙尘暴空间分异格局及季相分布——初步研究. *自然灾害学报*, 2003, 12(1): 1~8
- 28 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106~111
- 29 王小玲, 翟盘茂. 中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. *气象学报*, 2004, 62(1): 96~103
- 30 Zou X K, Zhai P M. Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China. *J Geophys Res*, 109, D03104, doi:10.1029/2003JD003913, 2004
- 31 童庆禧. 中国典型地物波谱及其特征分析. 北京: 科学出版社, 1990
- 32 徐兴奎, 林朝晖, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析. *生态学报*, 2003, 23(2): 221~230
- 33 张高英, 赵思雄, 孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究. *气候与环境研究*, 2004, 9(1): 101~115

(2005-06-29 收稿, 2005-10-12 接受)