

文章编号 :1004- 4574(2003)01- 0001- 08

近 50 年来中国沙尘暴空间分异格局 及季相分布——初步研究

潘耀忠 范一大 史培军 顾晓鹤

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室 ,北京 100875 2. 北京师范大学资源信息工程研究中心 ,北京 100875)

摘要 :采用全国 396 个站点的沙尘暴观测资料 ,结合 1 :100 万中国数字高程图和 1 :100 万中国沙漠分布图 ,在地理信息系统支持下 ,重建了 1951 ~ 2000 年中国沙尘暴的空间分异格局 ,并对沙尘暴灾害发生时间的月相、季相的多年平均状况进行了分析。研究表明 :全国沙尘暴空间格局总体呈西南—东北分异 ,我国沙尘暴的空间和强度变化分布呈现明显的周期变化规律。根据全国各省受影响的程度来看 ,重点区域在西北 ,并相对集中分布在新疆南部、西藏北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。灾害发生的最大、最小年份和多年平均状况的影响界线分布基本一致 ,只是影响程度不同。从灾害发生时间的月相和季相过程看 ,可以分成 3 种类型 and 两个过渡带 ,重度区域从 11 月一直延续到次年 6 ~ 7 月 ,时间跨度很长 ,并与中国沙源地空间分布格局密切相关 ,其它受影响的区域主要发生在 3 ~ 5 月 ,且程度较轻。最后指出了在定性到定量的沙尘暴研究中 ,除了需要对沙尘暴的天气特征进行定量研究外 ,应该对与沙尘暴有关的下垫面的参数及其时间变化规律进行定量的研究 ,从而提高沙尘暴的研究精度。

关键词 :沙尘暴 ;发生日数 ;空间格局

中图分类号 :P426.616 文献标识码 :A

Spatial variation and seasonal distribution of dust-storm in China in resent 50 years 'a preliminary study

PAN Yao-zhong , FAN Yi-da , SHI Pei-jun , GU Xiao-he

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education of China , Beijing Normal University , Beijing 100875 ,China ; 2. Researching Center of Resource Information Engineering , Beijing Normal University , Beijing 10875 ,China)

Abstract :Based on the data of 396 national weather stations , spatial variation patterns of dust-storms from 1951 to 2000 are rebuilt using GIS and 1 :1000000 DEM map and 1 :1000000 desert distribution map of China in this paper. And monthly and seasonal variation of dust-storms is also analyzed. The results show that , generally , there appears northeast-southwest variability in the spatial pattern of dust-storms in China with obviously periodical variability. According to the influenced extent of dust-storm in each province , dust-storms are mainly distributed in northwest of China and relatively concentrated in southern Xinjiang , northern Tibet , mid-west Qinhai , mid-west Inner-Mongolia , Gansu , Ningxia , northern Shaanxi , northern Shanxi , northern Hebei and part of Henan Province. The most influenced years are mostly related to the least influenced years and the average influenced years and the difference lies on the intensity of dust-storm. According to the monthly and seasonal variation of the disaster , three types and two transition zones can be divided. In the most

收稿日期 2002 - 12 - 05 ,修订日期 2003 - 01 - 14

基金项目 :国家重点基础研究发展规划项目(G2000018604)、国家自然科学基金资助项目(40271114)。

作者简介 :潘耀忠(1965 -)男 ,内蒙古呼和浩特人 ,副教授 ,博士 ,主要从事自然灾害风险评价、遥感与地理信息系统应用研究。
万方数据

influenced regions , dust-storm lasts from November to June or July the next year , so the time is very long , which is tied up with the distribution pattern of China desert . In less influenced regions , the dust-storm breaks out from March to May . Finally , it is pointed out that , in quantitative dust-storm study , except the essential quantitative study on weather character of dust-storm , the parameters and temporal variation rules of earth surface which is relevant to dust-storm need to be researched quantitatively to improve the precision of dust-storm study .

Key words dust-storm ; occurring days ; spatial pattern

沙尘暴是沙漠及其邻近地区特有的一种自然灾害 ,是土地荒漠化程度的重要指标^[1] ,它是由特殊的地理环境和气象条件形成的一种较为常见的自然现象。根据气象观测规范 ,沙尘暴是指强风将地面大量沙尘吹起 ,使空气混浊 ,水平能见度小于 1000m 的天气现象^[2]。世界范围内沙尘暴多发区位于中亚、北美、中非和澳大利亚^[3] ,我国主要分布在西北及华北大部分地区 ,属于中亚沙尘暴区的一部分 ,是全球现代沙尘暴的频发地区之一。

沙尘暴的频频发生 ,是生态环境恶化的重要标志之一 ,已导致了严重的生态环境问题^[4,5]。受全球气候变化和土地荒漠化的影响 ,20 世纪 90 年代以来 ,我国北方地区进入沙尘暴相对活跃的时期 ,沙尘暴灾害的次数和强度都有增加的趋势。进入本世纪 ,这种增加的势头仍在继续 ,沙尘暴出现的时间在提前 ,次数在增多 ,影响的范围在扩大 ,并多次出现影响东亚地区的大范围沙尘暴。因此 ,研究沙尘暴对区域生态环境建设和可持续发展有着重要的意义。

国外对沙尘暴的研究始于 20 世纪 20 年代 ,国内起步较晚 ,始于 20 世纪 70 年代。研究范围主要集中在沙尘暴的天气气候学特征、时空分布特征、分析预报、遥感监测^[6]、成分分析、数字模拟以及灾害预防等领域。关于沙尘暴的时空分异规律 ,国内外也做了大量的研究 ,其中 ,Jauregui^[7]系统研究了墨西哥城沙尘暴的时空分布 ,Littmann^[8]分析了亚洲沙尘暴的发生频率 ,王式功等^[9]和全林生等^[10]研究了我国沙尘暴天气的时空分布特征、形成原因和发展趋势 ,钱正安等^[11]、胡金明等^[12]和董治宝^[13]分别分析了我国沙尘暴发生高频区的空间分布 ,史培军等^[4,14,15]、叶笃正等^[16]、高尚玉等^[17]、朱震达等^[18]、胡金明等^[19]、和范一大等^[20]分析了我国北方地区沙尘暴沙源区的分布规律和成因 ,指出沙尘暴的形成和强度变化与之有着必然的联系 ,同时指出沙尘暴的发生、发展是下垫面地形地貌、水文、土壤、植被等多种环境要素相互作用、长期发展的结果 ,并提出了相应对策。

本文利用我国 1951 ~ 2000 年 396 个气象站点的沙尘暴日数观测资料 ,结合中国 1 :100 万数字高程图 ,在地理信息系统技术支持下 ,分别以多年的年、月平均为指标 ,重建了 50 年来中国沙尘暴的空间分异格局 ,并结合 1 :100 万中国沙漠分布图 ,全面分析了我国沙尘暴发生的时空分布格局、影响范围、年内发生特征等 ,最后对全国受沙尘暴影响的重点省市的强度、特征等进行了初步的定量分析。

1 数据来源与研究方法

1.1 沙尘暴数据

本文研究所用的沙尘暴数据来源于中国气象局 ,时间为 1951 ~ 2000 年 ,数据内容为多年平均的每月沙尘暴发生日数资料 ,所统计的沙尘暴日数是严格按照我国气象观测规范所定义的沙尘暴等级标准得出的 ,共涉及 396 个气象站点(如图 1)。对沙尘暴数据进行精度验证 ,剔除不可替代的错误数据后 ,在本文研究中实际使用了 380 个站点的资料。为了研究和分析沙尘暴的空间分布格局 ,本文选取如下指标 :

(1)多年平均年指标

万方数据

$$Y_{\max i} = \max\{Y_{ij}\} \tag{1}$$

$$Y_{\min i} = \min\{Y_{ij}\} \tag{2}$$

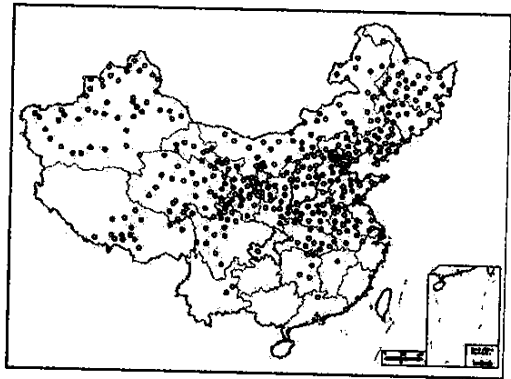


图 1 沙尘暴观测站点分布图
Fig.1 Distribution of dust storm observation station

$$Y_{\text{mean } i} = \text{mean}\{Y_{ij}\}$$
 (3)

式中 $i = 1, 2, \dots, 380$ 表示站点号; $j = 1, 2, \dots, 12$ 表示月份; Y_{ij} 表示站点 i 第 j 年的沙尘暴日数; $Y_{\text{max } i}$, $Y_{\text{min } i}$ 和 $Y_{\text{mean } i}$ 分别表示沙尘暴在第 i 年的最大、最小和平均日数。

(2) 多年平均月指标

$$M_{\text{mean } ij} = \text{mean}_j\{M_{kj}^i\}$$
 (4)

式中 $i = 1, 2, \dots, 380$ 表示站点号; $j = 1, 2, \dots, 12$ 表示月份; $k = 1951, 1952, \dots, 2000$ 表示统计数据年份。 $M_{\text{mean } ij}$ 表示站点 i 第 j 月的沙尘暴多年月平均日数; M_{kj}^i 表示站点 i 在 k 年 j 月份的沙尘暴日数。

1.2 下垫面背景数据

(1) 1:100 万数字高程模型 (DEM), 空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 资料来源为美国地球资源观测系统 (Earth Resource Observation System) 数据中心;

(2) 1:100 万中国沙漠分布图, 资料来源为 1100 万中国沙漠分布图, 在 Arc/Info8.0 支持下数字化;

(3) 1:400 万中国省界行政区划数字化地图, 资料来源为国家地理信息系统重点实验室。

上述空间数据都经过严格的几何校正、配准、投影变换处理, 选取的投影方式为等角割圆锥等积投影。投影主要参数: 第一条纬线为北纬 25° , 第二条纬线为北纬 47° , 中央经线为东经 110° , 起始投影纬线为北纬 10° 。

1.3 资料处理方法

传统的气候指标空间格局的分析方法是将以离散点形式存在的气候站点指标进行空间插值, 直接生成等值线图, 或者生成一定栅格大小、一定行列数的等值栅格图像, 较著名的是最优化的 Kriging 方法^[21]。这种方法有两个必要条件: 一是有足够多的站点数据; 二是数据之间有较强的关联性。在进行地理问题研究中, 这种方法的缺点是只考虑了离散点的信息, 而忽略了地理现象本身的区域和地带性特征之间的联系, 尤其是下垫面对象本身的影响, 所生成的空间趋势和实际情况有较大的偏离。

为了更准确地寻求反映中国沙尘暴多年平均年、月空间格局的最优方案, 进而分析沙尘暴在不同区域的强度分布, 以及相应的影响程度, 本文在实施沙尘暴数据空间插值时, 对 Kriging 方法进行了一些改进, 即在插值过程中考虑了沙尘暴发生、发展和演化等过程受地形、地貌控制的影响因素。具体方法是, 依据地形、地貌条件, 借助 1:100 万数字高程图 (DEM), 在地理信息系统支持下, 对各观测站点之间的数据关联性限定了两个基本规则。规则 1: 站点之间的距离采用 DEM 模型中的实际坡面距离, 而非一般的直线距离; 规则 2: 如果两个站点之间存在大的地形地貌单元 (绝对高程大于 1000m) 则认为两者之间的数据无关联性。技术路线如图 2。

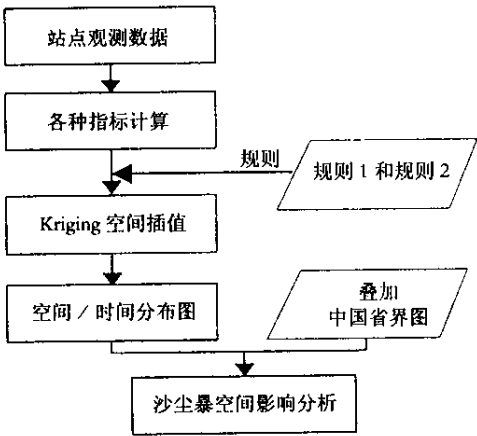


图 2 数据处理技术路线
Fig.2 Flowchart of data process

2 沙尘暴空间分异格局及其季节差异

2.1 1951 ~ 2000 年沙尘暴年日数空间分异格局

根据本文的技术路线, 对全国 380 个站点纪录的沙尘暴发生日数数据进行了处理, 在叠加 DEM 数据、等值线数据、中国行政省边界数据后, 分别生成了年最大日数、年最小日数、年平均日数空间分布图, 并与 1100 万中国沙漠分布图进行比较, 详见图 3。

从图 3 可以看出, 西北是我国沙尘暴的主要分布区, 沙尘暴空间格局总体呈东北—西南走向。最大、最小和平均日数空间分布范围基本一致, 只是严重程度有所不同。按 10d 均线划分, 在全国存在两个多发地区: 一是河西走廊、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地及其周边地区, 尤其是紧靠腾格里沙漠的甘肃民勤和宁夏盐池出现了 2 个极大值; 其次是塔克拉玛干大沙漠和柴达木盆地及其周边地区, 尤其是塔克拉玛干沙漠西南沿的和田地区, 是沙尘暴发生日数的高值区, 一直延伸到青藏高原西南部分。两个多发地区发生日数的极值超过 20d, 最大值达到年 60 ~ 70d, 最小值也在 5d 到 10d 以上。这与胡金明等^[19]、邱新法等^[1]的研

究结果基本一致。另外,两个多发区以外,在内蒙科尔沁沙地,也存在一个相对多发区,均值在 5d 到 10d,最大值达到 15d 到 20d,说明沙尘暴发生的频率与沙源地分布有密切的关系。

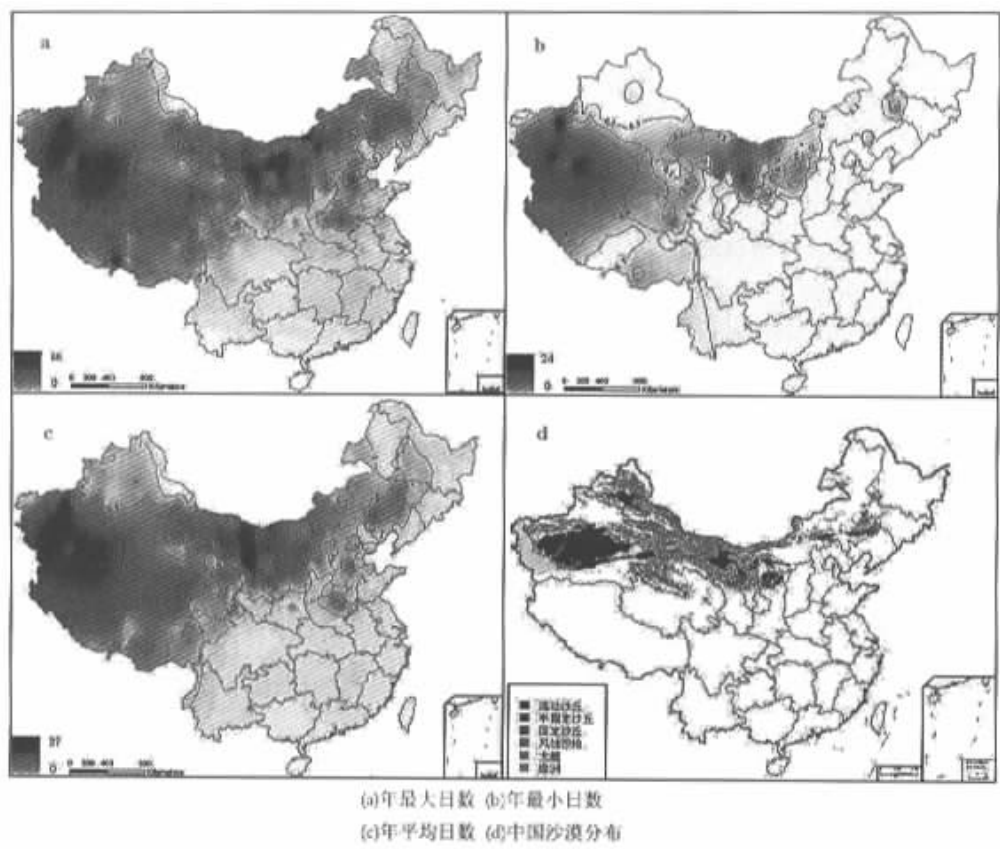


图 3 中国沙尘暴年日数空间分布图(1951~2000 年)及沙漠分布图
Fig.3 Spatial distribution of annual number of dust-storm days(1951~2000)and desert distribution in China

此外,通过与沙漠空间分布比较发现,沙尘暴多发地区都在沙源地及其周边地区,这说明沙尘暴的发生与下垫面有很好的对应关系。分析受沙尘暴影响较小的地区,主要指 1d 均线以下的地区,可以得出:良好的植被覆盖、充足的土壤水分以及地形因素对沙尘暴有明显的阻挡和抑制作用^[1]。为了从机理上解释沙尘暴的空间分布,今后应加强沙尘暴时间过程与下垫面景观各局之间的关系的定量研究工作。

2.2 1951~2000 年沙尘暴多年月平均日数空间格局与变化规律

用同样方法,以各站点多年沙尘暴月平均数据为数据源,生成了我国 50a 来沙尘暴月季空间和强度变化分布图(如图 4)。图中分别给出了 12 个月的沙尘暴空间强度分布,根据图例由白到黑分别表示沙尘暴月平均发生日数由少于 1d 过渡到 7d。据此,可以从空间上掌握我国沙尘暴月季分布格局和强度变化规律。

分析图 4 可以得出,50a 来我国沙尘暴月季变化有以下特点 (1)我国北方大部份地区几乎全年都受到沙尘暴的侵袭,其中 3~6 月最为严重,1~2 月次之,8~12 月最弱,其中 10 月份几乎没有沙尘暴发生 (2)不同月份强度中心有所不同,全年从 1 月份开始,西藏北部、青海南部和内蒙西部较强,2 月份的强中心集中在西藏和青海南部,3~4 月北方大部份地区都强烈受到侵袭,这一时段全国沙尘暴分布范围最广,西藏、青海已减弱,强中心转移到南疆南部和内蒙中西部地区,5~6 月,全国大部分地区强度都小于 4 月,强中心集中出现在南疆地区,且出现了多年月平均的最高值,达到多年月平均 7d,7~8 月,强中心仍在南疆地区,内蒙西部还有零星表现,但强度都已很弱,每月日数平均在 2 次以下,9~10 月,全国大部很少受到沙尘暴的影响,11~12 月青海西南部、西藏东北部地区有逐渐增强的趋向,预示着下一次循环的开始 (3)比较图 3,可以得出,沙尘暴频发区域位于我国西北地区,并相对集中分布在新疆南部、西藏北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。且从 2 月到 6 月强中心交替出现。

万方数据

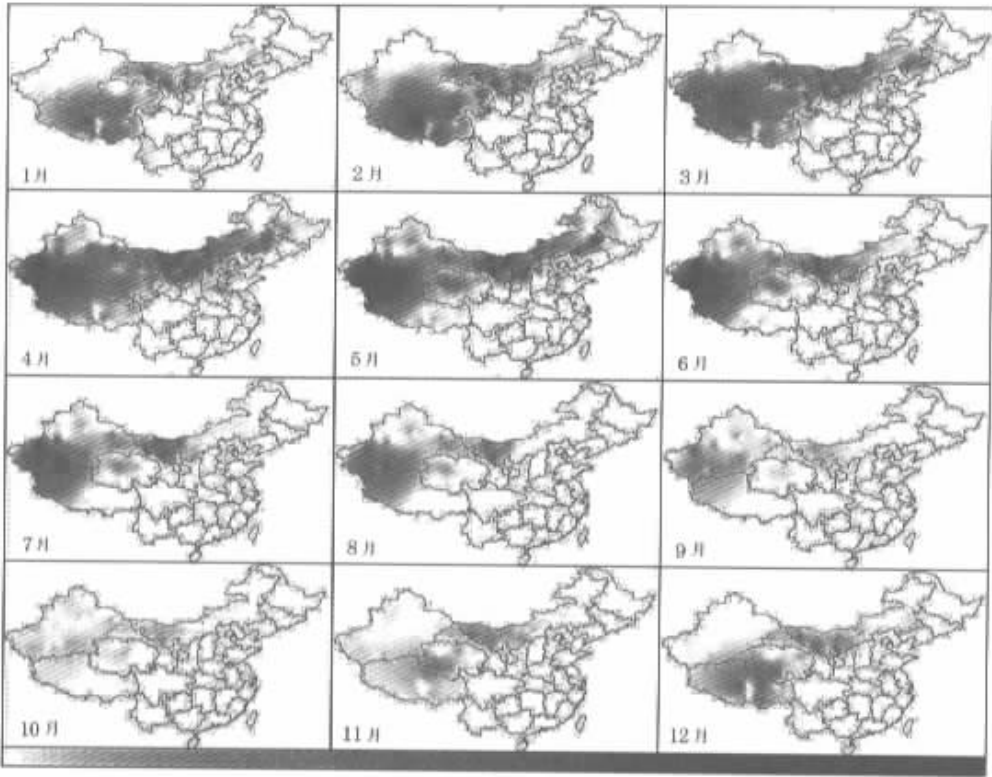


图 4 沙尘暴多年平均月日数空间分布图 (1951~2000 年)
Fig.4 Spatial distribution of average monthly number of dust-storm day(1951~2000)

可见,我国沙尘暴的空间和强度变化分布呈现明显的季节性。沙尘暴发生的季节主要集中在春季,这是因为这一季节是我国北方地区冷锋活动的频繁季节,主要受到蒙古气旋、东北气旋和黄河气旋的影响,这为沙尘暴的发生创造了有利的动力条件,同时这一时期,我国北方大部分地区气候干燥、少雨,地表植被覆盖度低,下垫面多为裸露,加之著名的四大沙地(呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地和浑善达克沙地)和八大沙漠(库不提沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、柴达木沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔沙漠和塔克拉玛干沙漠)都分布在这一区域,为沙尘暴发生和发展提供了丰富的物质基础。随着北方雨季的到来,地表植被覆盖度的改善,沙尘暴在空间上和强度上都有减小的趋势,可见,植被覆盖状况的好坏,与沙尘暴发生的频度有着密切关系。

2.3 1951~2000 年沙尘暴年内时间分布特征

本文涉及的 380 个气象站点数据中,年平均沙尘暴发生日数大于 1d 的站点达 213 个,占总数的 56.1%,集中在全国 14 个省(直辖市、自治区)。结合前人的研究成果^[1,19],进一步将沙尘暴的影响按年平均发生日数分为 5 个等级,即极重(大于 20d)、重度(10~20d)、中度(5~10d)、轻度(1~5d)和无灾(小于 1d)。

按上述 5 个等级对 213 个站点沙尘暴年内强度变化进行曲线分析发现,全国沙尘暴易发时间在不同的强中心有一定的差异,但总体可认为以春季为主,大部分集中在 2~6 月,这与一般按沙尘暴发生次数的统计结果集中在 3~5 月略有不同^[1,22,23]。图 5 是年内变化最有代表性的西藏、青海、内蒙和新疆四个省的监测站点不同等级的年内变化曲线,纵轴代表各站点沙尘暴多年平均月日数。

进一步分析图 5 可以看出,过去 50a 中,根据月平均最大日数峰值年内出现的时间不同,可明显地将中国沙尘暴按年内变化趋势分为 3 种类型,即:西藏型,月平均最大日数峰值出现在 2 月,以申扎、泽当、江孜等站为典型代表,主要在西藏东南偏中部,变化特点是 2 月最高,4 月以后急剧下降,5~10 月几乎很少发生,11 月开始上升;内蒙型(全国大部均属此类),峰值出现在 4 月,以内蒙的额济纳旗、阿拉善左、潮格旗海、甘肃的民勤、张掖、金塔鼎新、宁夏的同心、盐池为代表,主要在内蒙中西部、甘肃、宁夏一带,变化特点是 4 月最高,7 月开始下降,次年 2 月开始上升;新疆型,峰值出现在 5~6 月,以民丰、和田、且末为代表,主要出现在南疆沿青藏高原一带,变化特点是 5~6 月最高,9 月开始下降,全年只有 10~12 月不受沙尘暴的影响。此外,青海

作为 3 种类型的过渡地带特点突出 ,重度地区是西藏型和内蒙型的过渡带 ,峰值由 2 月向 3 月过渡 ,主要在南部靠近西藏一侧 ;中轻度地区是内蒙型和新疆型的过渡带 ,峰值由 4 月向 5 月过渡 ,主要在西北部靠近新疆一侧。

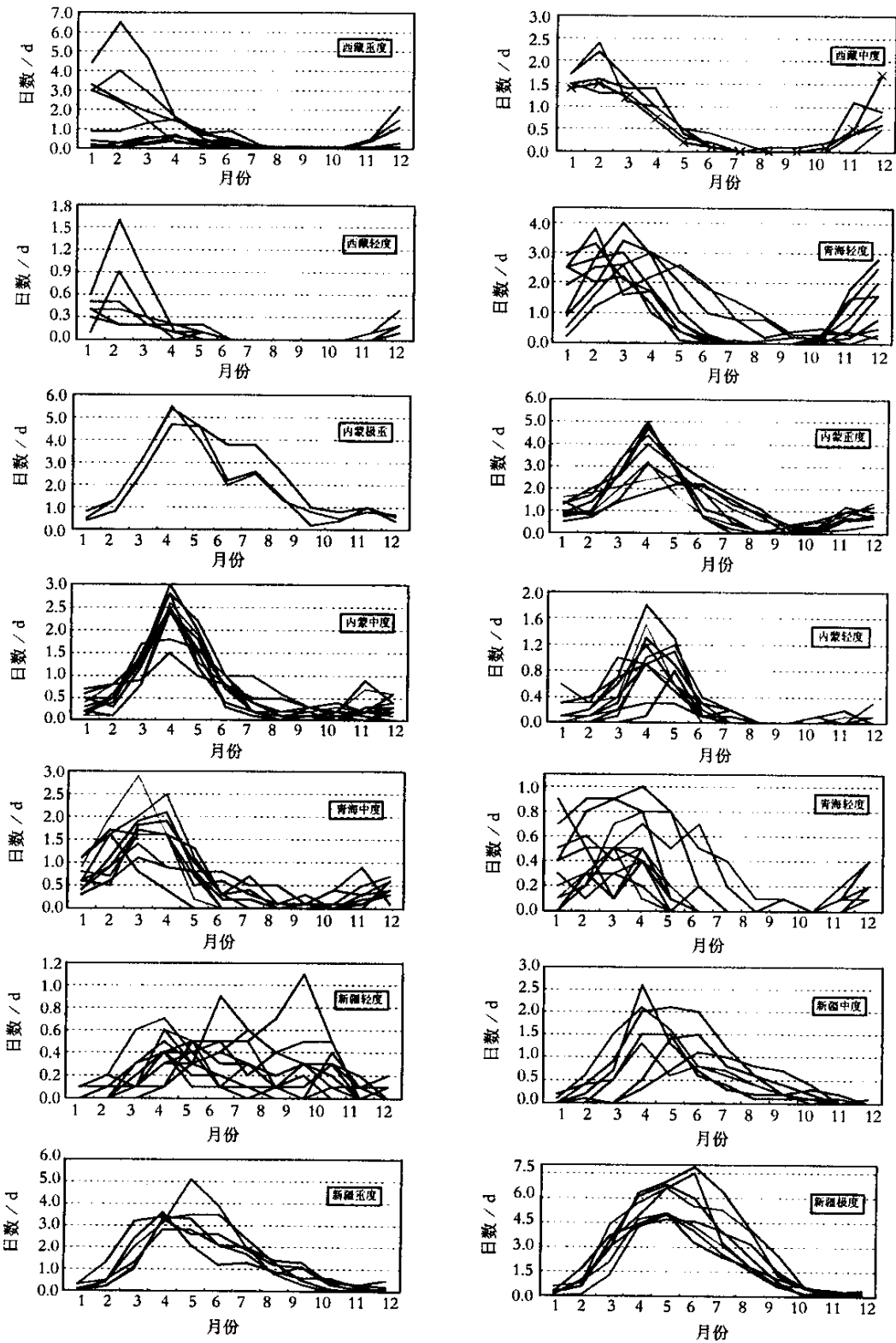


图 5 沙尘暴年内时间分布特征 (1951~2000 年)

Fig.5 Temporal distribution of dust-storm in each year from 1951 to 2000

3 全国主要省市沙尘暴平均强度比例分析

为了分析全国受沙尘暴影响的主要省市受灾程度的情况,本文将全国 1951~2000 年沙尘暴年平均日数空间分布图(图 3(c))按上述分级标准划分为 5 级,并在 Arc/Info 支持下与中国行政省边界空间叠加,得到全国受沙尘暴影响的主要省市强度比例图(图 6)和受沙尘暴影响强度比例分析表(表 1)。

分析表 1 和图 6 可以看出 (1) 全国受沙尘暴影响较为严重的共有 14 个省(直辖市、自治区),总面积 624 万 km², 占我国国土面积的 65%, 其中 90% 以上地区平均每年都会受到 1 次沙尘暴的侵袭。极重区 81.5 万 km²(13.1%), 重度区 144.1 万 km²(23.1%), 中度区 119.1 万 km²(19.1%), 轻度区 218.6 万 km²(34.9%)。(2) 全国可划分为重灾区, 包括西藏、新疆、内蒙、甘肃、青海和宁夏; 轻灾区, 包括吉林、河南、山西、河北、辽宁、北京和天津; 无灾区 3 种。(3) 重灾区影响面积不一定是全省范围, 但受灾区主要分布在中度以上的超过 50%, 其中尤以西藏、新疆、内蒙、甘肃最为典型; 轻灾区有的分布面积很大, 但主要为轻度影响, 如: 山西(99.6%)、河北(92.7%)、北京(93.0%)、天津(100%)。

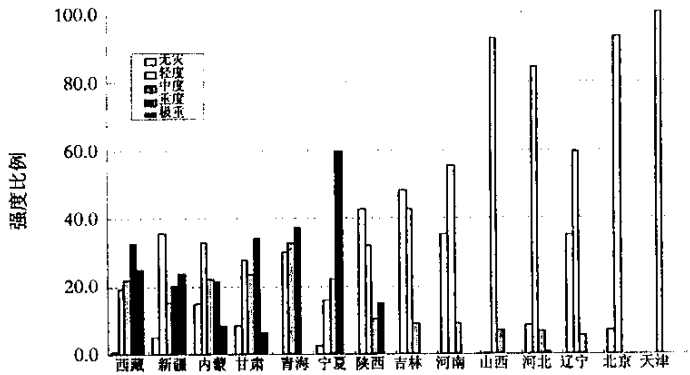


图 6 全国主要省市受沙尘暴影响强度比例
Fig.6 Intensity proportion of dust-storm influence on main provinces and municipalities in China

表 1 全国主要省市受沙尘暴影响强度比例分析表
Table 1 Intensity proportion analysis of dust - storm influence on main provinces and municipalities in China

省名	无灾		轻度		中度		重度		极重		受灾合计	
	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²	/%	/万 km ²
西藏	0.8	1.0	19.3	23.3	21.8	26.3	32.8	39.6	25.3	30.5	99.2	119.7
新疆	4.8	7.9	35.8	58.4	15.4	25.1	20.0	32.7	23.9	39.1	95.6	155.3
内蒙	15.0	17.2	33.1	37.9	22.2	25.4	21.5	24.7	8.2	9.4	85.0	97.4
甘肃	8.2	3.3	27.7	11.2	23.4	9.5	34.6	14.0	6.1	2.5	91.8	37.2
青海	0.0	0.0	30.0	21.5	32.7	23.4	37.4	26.8	0.0	0.0	100.0	71.7
宁夏	2.2	0.1	15.8	0.8	22.1	1.1	60.0	3.0	0.0	0.0	97.8	4.9
陕西	42.6	8.8	32.2	6.6	10.2	2.1	14.9	3.1	0.0	0.0	57.4	11.8
吉林	48.5	9.3	42.6	8.1	9.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	51.5	9.8
河南	35.5	5.9	55.5	9.2	8.9	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5	10.7
山西	0.4	0.1	92.7	14.6	7.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	99.6	15.7
河北	8.3	1.6	84.3	15.7	6.5	1.2	0.8	0.2	0.0	0.0	92.7	17.1
辽宁	35.2	5.1	59.7	8.6	5.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	64.8	9.3
北京	7.0	0.1	93.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.0	1.5
天津	0.0	0.0	100.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	1.2
总计	9.7	60.4	34.9	218.6	19.1	119.1	23.1	144.1	13.1	81.5	90.4	563.3

4 结论

(1) 结合 DEM 模型,对站点数据进行空间格局的恢复较传统的方法更为科学,重建的沙尘暴空间格局更接近于真实情况。

(2) 全国沙尘暴空间格局总体呈西南—东北分异。重点区域在西北,并相对集中分布在新疆南部、西藏

北部、青海中西部、内蒙中西部、甘肃、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部及河南部分地区。灾害发生的最大、最小年份和多年平均状况的影响界线分布基本一致 ,只是影响程度不同。

(3)从灾害发生时间的月相过程看 ,重度区域从 11 月一直延续到次年 6~7 月 ,时间跨度很长 ,按年内变化趋势可以分为 3 种类型和两个过渡带。全国受沙尘暴影响较为严重的共 14 个省(直辖市、自治区) ,总面积 624 万 km² ,占我国国土面积的 65% ,重灾区主要分布西藏、新疆、内蒙、甘肃、青海和宁夏一带。

(4)我国沙尘暴的空间和强度变化分布呈现明显周期变化规律。随着季节的变化 ,沙尘暴发生的动力条件和下垫面条件性质都将发生周期性变化 ,这种变化规律与沙尘暴空间和强度的周期变化有着明显的一致性。因此 ,在从定性到定量的沙尘暴研究中 ,除了需要对沙尘暴的天气特征进行定量研究外 ,应该对与沙尘暴有关的下垫面的参数及其时间变化规律进行定量的研究 ,从而提高沙尘暴的研究精度。

参考文献：

[1] 邱新法,曾燕,繆启龙.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J].地理学报,2001,56(3):316-322.

[2] 张养才,何维勋,李世奎.中国农业气象灾害[M].北京:气象出版社,1991.414-438.

[3] Pye K. Aolian dust and dust deposits[M]. London:Academic Press Inc Ltd,1987.113-126.

[4] 史培军,张宏,王平,等.我国沙区防沙治沙的区域模式[J].自然灾害学报,2000,9(3):1-7.

[5] 史培军,严平,高尚玉,等.我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J].自然灾害学报,2000,9(4):71-77.

[6] 范一大,史培军,潘耀忠,等.基于 NOAA/AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测[J].自然灾害学报,2001,10(4):46-51.

[7] Jauregui E. The dust storms of Mexico City[J]. Inter. J. Climatology,1989,9(2):169-180.

[8] Littmann T. Dust storm frequency in Asia:climatic control and variability[J]. International Journal of Climatology,1991,11:393-412.

[9] 王式功,董光荣,杨德保,等.中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J].自然灾害学报,1996,6(2):31-37.

[10] 全林生,时少英,朱亚芬,等.中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J].地理学报,2001,56(4):477-485.

[11] 钱正安,贺慧霞,瞿章,等.我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征[A].方宗义.中国沙尘暴研究[C].北京:气象出版社,1997.1-10.

[12] 胡金明,崔海亭,唐志尧.中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J].自然灾害学报,1999,9(4):49-56.

[13] Dong Zhibao. Wind erosion in arid and semiarid China :an overview[J]. Journal of Research,2000,20(2):134-139.

[14] 史培军,严平,袁艺.中国北方风沙活动的驱动力分析[J].第四纪研究,2001,21(1):41-47.

[15] 王静爱,徐伟,史培军,等.2000 年中国风沙灾害的时空格局与危险性评价[J].自然灾害学报,2001,10(4):1-7.

[16] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘暴天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513-521.

[17] 高尚玉,史培军,哈斯,等.我国北方风沙灾害加剧的成因及其发展趋势[J].自然灾害学报,2000,9(3):31-37.

[18] 朱震达,陈广庭.中国土地沙漠荒漠化[M].北京:科学出版社,1994.

[19] 胡金明,崔海亭,唐志尧.中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J].自然灾害学报,1999,9(4):49-56.

[20] 范一大,史培军,王秀山,等.中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J].地球科学进展,2002,17(2):289-294.

[21] Oliver, Kriging M A. A method of interpolation for geographical information systems[J]. International Journal of Geographic Information Systems,1990,4(4):313-332.

[22] 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[J].中国沙漠,2002,22(2):106-111.

[23] 张晓龙,张艳芳,赵景波.近年来中国沙尘暴发生特点、成因及其防治对策[J].干旱区资源与环境,2001,15(3):31-36.