

文章编号 : 1009 - 3575(2003)04 - 0134 - 08

## 沙尘暴尘源形成及分布<sup>\*</sup>

汪 季<sup>1</sup>, 周心澄<sup>2</sup>, 周建忠<sup>3</sup>, 韩春阳<sup>4</sup>

- (1. 内蒙古农业大学 呼和浩特 010019 2. 北京林业大学 北京 100083 ;  
3. 内蒙古磴口县林业局 015200 4. 包头市园林管理处 包头 014300)

**摘要 :** 沙尘暴(sand - duststorm)系指强风把地表大量沙尘卷入到空中,使空气特别浑浊,水平能见度低于 1000m 的灾害性天气现象,是 1 种危害性极大的灾害性天气。它的发生和发展是加速土地荒漠化的重要过程,又是土地荒漠化发展到一定程度的具体体现。沙尘暴尘源物质的形成及分布是形成沙尘暴必不可少的物质条件。本文在查阅分析了大量关于沙尘暴研究等文献的基础上,从沙尘暴尘源形成因素、尘源种类及分布等方面,对沙尘暴尘源的研究进行了简要的总结,反映沙尘暴尘源方面的研究进展。

**关键词 :** 沙尘暴; 沙尘源; 形成; 分布

**中图分类号 :** X 513 **文献标识码 :** A

## THE ORIGIN AND THE DISTRIBUTION OF THE SOURCES OF THE SAND - DUST STORMS

WANG Ji<sup>1</sup>, ZHOU Xin - cheng<sup>2</sup>, ZHOU Jian - zhong<sup>3</sup>, HAN Chun - yang<sup>4</sup>

- (1. Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019 China ;  
2. Beijing Forestry University, Beijing 100083 China ;  
3. Den Kou Forestry Department of Inner Mongolia, 015200 China ;  
4. Baotou Landscape Management Office, Baotou 014300 China)

**Abstract :** Sand - dust storms are a disastrous weather generated by strong winds, which carry a large amount of sand and dust from the surface of the earth into the sky. The level visibility is below 1000 meters when a sand - dust storm takes place. Sand - dust storms increase the process of the desertification of the farming land and is also a concrete symbol of the degrees of the desertification of the farming land. The origin of the sand and dust in the sand - dust storm forms the indispensable material condition. The factors of the formation of the sand - dust storms, the sorts and the distribution of the sand and dust, the origin of the sand and dust and the latest study progress were summarized on the basis of the analysis of the recent documents in this field.

**Key words :** sand - dust storm; the origin of the sand - dust; formation; distribution

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2003 - 09 - 10  
基金项目: 国家自然科学基金项目资助(39960064)  
作者简介: 汪季(1957—)男,北京林业大学在读博士,副教授,主要从事荒漠化防治方面的研究与教学工作。

## 引言

我国西北地区是全球四大沙尘暴区(中亚、北美、中非及澳大利亚)之一的中亚沙尘暴区的一部分,属全球现代沙尘暴的高活动区之一。2001年5月25日,中国气象局向媒体通报了2001年春季沙尘暴监测和预警情况,表明我国已经能比较准确及时地预报沙尘暴天气;同时统计分析显示:本世纪我国很可能进入1个新的沙尘暴频发期。近年来我国强沙尘天气陡增是因为处于反厄尔尼诺条件的高峰期所致,但我国北方草场退化,不合理的耕作方式,致使荒漠化日益严重,也是沙尘天气形成和加强的重要原因,许多城市建筑工地增多且绿化不足也是扬沙的重要原因。

沙尘暴是沙漠及其邻近地区特有的1种灾害性天气。国外从20世纪20年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究。沙尘暴是伴随着人类活动破坏生态平衡而加剧。早在1860年至1890年,由于美国不合理地过度开发西部处女地9000万 $\text{hm}^2$ ,大量焚烧草原,盲目垦荒,导致了1934年5月震惊世界的美国西部沙尘暴。这场沙尘暴从土地破坏严重的西部刮起来的,很快就发展成1条东西长2400km,南北宽1500km、高3km的1个巨大黄色尘土带,连续3d横扫了美国2/3国土。当时大气含尘量高达40t/ $\text{km}^3$ ,把3亿多t土壤卷进大西洋。这1a美国毁掉耕地300万 $\text{hm}^2$ ,冬小麦减产510万t,16万农民倾家荡产,逃离了西部大平原。前苏联自1954年起在哈萨克、西伯利亚、乌拉尔、伏尔加沿岸和高加索的部分地区,盲目开垦大量荒地,到1963年共10a中垦荒面积6000万 $\text{hm}^2$ 。由于耕作制度混乱,又缺乏防护林带保护,加之气候干旱,造成新垦荒地风蚀严重。每年春季疏松的表土被大风刮起,形成沙尘暴。1960年3月和4月的沙尘暴席卷了俄罗斯南部大平原广大地区,使垦荒地区春季作物受灾面积达400万 $\text{hm}^2$ 以上。1963年的沙尘暴比1960年更为严重,在哈萨克被开垦的土地上,受灾面积达2000万 $\text{hm}^2$ ,占垦区总面积80%。在俄罗斯和乌克兰的一些地区,由于对森林的极度砍伐,更加速了沙尘暴的发生。

我国是受荒漠化危害十分严重的国家,荒漠化在20世纪50年代~60年代每年扩展1560 $\text{km}^2$ ,70年代~80年代每年扩展2100 $\text{km}^2$ ,90年代每年扩展2460 $\text{km}^2$ ,目前我国荒漠化土地面积已达267.4万 $\text{km}^2$ ,占国土面积的27.9%,每年扩展1.04万 $\text{km}^2$ 。我国从20世纪70年代开始对沙尘暴天气进行研究,自1993年5月5日我国西北地区的特强沙尘暴天气发生后,引起了我国政府和科学工作者们的高度重视,有力地推动了沙尘暴研究的广泛开展,于1993年9月在兰州召开了“首届全国沙尘暴天气研讨会”。之后1993年11月29日国家科委又召开汇报会,将沙尘暴研究正式列入“八五”攻关项目。1994年以来,国家自然科学基金委又先后资助了几项沙尘暴方面的研究项目,科技部和部分省、市的有关科技管理部门也相继立项支持对沙尘暴进行研究<sup>[1]</sup>,2000年我国西北、华北地区连续发生12次沙尘暴天气,狂风挟浮尘,铺天盖地,呼啸而来,涉及北京等十几个省市、自治区,面积接近1/4国土。引起上至总书记、下至平民百姓广泛地关注。朱镕基总理受江总书记委托赴实地考察,国家拨巨款,下大力气防治沙漠化、沙尘暴。

本文对国内外近期就沙尘暴的有关研究作一简要回顾,旨在促进沙尘暴尘源研究的深入开展,拓宽对荒漠化过程中沙源物质研究的途径。

## 1 尘源的种类和作用

地球大气中以悬浮形式运移的尘埃大都小于100 $\mu\text{m}$ 。当风力减弱时,大于20 $\mu\text{m}$ 的尘粒会很快沉降到地面,而小于20 $\mu\text{m}$ 的尘粒却能继续悬浮数日或数周,直到受到雨水的冲洗时才会降落到地面。在地球大气中能够运移很远距离的尘粒大都小于10 $\mu\text{m}$ 。在远离天然和工业微尘散发源的地区,如南极、北极和太平洋中部,大部分降尘属于亚微颗粒。大陆黄土沉积物主要由10 $\mu\text{m}$ ~50 $\mu\text{m}$ 的颗粒组成,搬运距离不太远,而大洋中的风积物主要由小于10 $\mu\text{m}$ 的远距离搬运颗粒所组成。尘埃的来源主要有宇宙尘、火山灰、工业散发物、气体转化微粒、燃烧烟尘、海盐晶粒、土壤和沉积物的风蚀。但从我国沙尘暴的降尘物分析,沙尘以土壤和沉积物的风蚀和工业散发物为主。虽然土壤和沉积物中都含有粉沙及粘粒级颗粒,但是地表扬尘的难易程度

大不相同。粉沙及粘粒含量高的地区本身并不意味着该地区的尘埃发散量就高,含细颗粒的沉积物或土壤如果是紧实的,胶结的或具有结皮保护层,即使在严重的风暴天气,所产生的尘埃量也很少。反之,在沙和粉沙含量高而粘粒含量较低的裸露、松散沉积物地面则很容易产生尘埃。从地貌学观点看,这种沉积物经常形成易变化的地貌景观。在这些地区的构造运动,气候变化以及人类干扰都会使含有细粒物质的地层迅速裸露,引起切割和再塑造。

在全球范围内至少有下列 11 种天然地面是重要的尘源区 (1)冰水冲积平原及辫状冰川水道 (2)干谷底部 (3)干湖床 (4)海滨盐碱滩地 (5)冲积扇 (6)高度风化的砾漠如戈壁 (7)裸露的泥质基岩区 (8)由于气候变化或耕作使植被破坏的黄土地区 (9)由于气候变化和人类活动植被已破坏的深度风化覆盖层 (10)已耕种的冲积泛滥平原区 (11)沙漠地区已经活化的固定沙丘。

Dewe 介绍了 1949 年 8 月发生在阿拉斯加州德尔塔辫状冰川冲积平原的 1 次沙尘暴。该平原宽 1.5km ~ 3.0km,是有辫状水道和许多淤泥的沙洲。沙尘暴期间风速高达 48km/h,尘土席卷到了 1 200m 的高空,尘埃笼罩区达 4 800km<sup>2</sup>。沙漠地区的干谷水流来势迅猛,能在短时间内带来大量泥沙。由于积水很快通过侧向渗透和垂直渗透而减少,泥沙沉积很快,所形成的沉积物分选度很差。据 Gerson 等人报道,以色列和西奈的干谷沉积物中沙占 80% ~ 90%,粉砂占 10% ~ 15%,粘粒占 1% ~ 5%,此外,还有风积尘土。

从地质学观点看,尘埃的沉积对岩石硬化,荒漠漆的形成,古土层的发育,沉积物的红色和胶结起了重要作用。风蚀过程对陆地元素向海洋的迁移,对局部海水及海相沉积物的化学组成都产生过重要影响。在太平洋的一部分水域内,一半以上的晚新生代沉积物可能成为风积物。社会经济也与大气降尘有密切关系,特别是加入到土壤中的气载营养物质,富尘粘结性结皮的形成对沙丘及其他风蚀地面的固定作用以及肥沃的黄土的堆积对农业生产有着重要作用。据估计,10%的陆地表面覆盖着黄土和类黄土沉积物。中亚和中国的黄土地区是人类文明的发祥地。在许多国家,黄土为重要的制砖和水泥的原料。肥沃的黄土地区也是世界上最严重的土壤侵蚀区。中国的黄土高原中部,每年的土壤侵蚀量为 10 000t/km<sup>2</sup>。黄河中 80%的泥沙来自黄土高原的侵蚀物质(表 1)。

从大气物理角度上看,尘埃微粒的增多,能使大气中的凝结核数量大增,这是有利于降水的。但是,由于干旱半干旱地区普遍缺乏降水条件,因此,北方地区产生的凝结核不能充分利用。反之,当凝结核随大气移动它域,遇有良好的降水条件,就可能引起灾难性的降水,从而使地球表面降水的不均匀程度更加剧烈。最近,环境科学界力图把非洲的大沙漠和南美洲亚马逊河流域的热带雨林联系起来。科学家们认为亚马逊河流域原为贫瘠的大草原,于非洲大沙漠的形成和逐渐扩展,形成了大量富含营养物质的微粒,由于风蚀,它们随大气环流输送到南美。大量营养物质的沉降和大量凝结核的供应,使南美贫瘠的地表变得肥沃,并且降水逐步增加,于是才有今天巨大的亚马逊河流域热带雨林。科学家通过飞机(美国国家航空航天局)配合地面和气象卫星观测,已初步证明了这个联系。并认为美国东部也受到这方面的恩惠而日本的酸雨危害则因中国沙尘埃东渡而减轻。总之,地球表面是一个类似封闭的环境系统,各地区地表和气象的变化,都必然对其他地域产生影响。

## 2 我国沙尘源类型及分布

据夏训诚、杨根生归纳,我国西北地区沙尘暴的沙尘源分为 2 大类:1 类是自然的第四纪沉积物堆积类型,如沙漠风成沙、戈壁沙砾、风砾劣地、第 3 纪红色砂砾岩、现代流水冲积物、湖积物、黄土、沙黄土;另 1 类是人类生产活动的人工堆积物类型,如尾矿砂、废弃土堆积。杨根生曾经划定了中国沙尘暴的四大源区,从西向东分别是新疆塔里木盆地边缘:甘肃河西走廊和内蒙古阿拉善地区;陕、蒙、晋、宁西北长城沿线的沙地、沙荒土旱作农业区;位于北京北部和东部的浑善达克、呼伦贝尔、科尔沁沙地<sup>[3]</sup>。

我国沙漠总面积 71.29km<sup>2</sup>(表 2),集中分布于新疆、甘肃、青海、宁夏、陕西、内蒙古等西北省区。

我国戈壁总面积 45.8 万 km<sup>2</sup>,有 6 个连片分布区:塔里木盆地周边环状戈壁带、准噶尔盆地周边戈壁带、

新疆甘肃毗邻区戈壁、柴达木盆地周边戈壁、阿拉善河西走廊戈壁、内蒙古宁夏北部戈壁。

表 1 一些地区沙尘量

地区	每年产生的尘埃量(百万吨)
全世界	128 ~ 5000
撒哈拉沙漠	300
咸海地区	75
南地中海地区	20 ~ 30
美国西南地区	4
地中海沿岸	3.2 ± 1.6

(程道远,1994)

表 2 我国主要沙漠面积(万 km<sup>2</sup>)

沙漠名称	面积
塔克拉玛干沙漠	32.76
古尔班通古特沙漠	4.88
库姆塔格沙漠	2.28
柴达木盆地沙漠	3.49
巴丹吉林沙漠	4.34
腾格里沙漠	4.27
乌兰布和沙漠	0.99
库布齐沙漠	1.61
毛乌素沙地	3.23
浑善达克沙地	2.14
科尔沁沙地	4.23
呼伦贝尔沙地	0.72

风蚀劣地,也叫雅丹或白龙堆。我国西北风蚀地集中连片分布主要有“河西走廊玉门西‘蘑菇滩’”,是河湖相粘土沉积地层,经风力作用而成的风蚀地貌,新疆罗布泊一带,湖积地层发育风蚀劣地,青海柴达木盆地西北,第三纪沙岩上发育的风蚀长丘。

第三纪红色沙岩在新疆、甘肃及青海部分地区广为分布。胶结差、松散,或以剥蚀残山,或以剥蚀面,或以地层露头的形式出现。

流水冲积物包括河流冲积与暂时性流水冲积。在西北干旱区以干河床、冲积扇、洪积扇的形式出现,分布于河西走廊及干旱内陆盆地的山前地带。

湖积物包括第四纪湖相沉积及现代湖泊沉积,分布于沙漠沙地中湖积地层及现代干旱内陆湖泊地带。

表 3 西北地区沙尘源主要类型粒度

沙尘源类型	采样地点	层位	砾石	粒 级 (mm)						粘土
				组 成 (%)						
				极粗沙	粗沙	中沙	细沙	极细沙	粉沙	
				2 ~	1.00 ~	0.50 ~	0.25 ~	0.125 ~	0.063 ~	
			> 2	1.00	0.50	0.25	0.125	0.063	0.002	< 0.002
冲洪积戈壁	敦煌东 40km	0 ~ 3cm	28.3	5.77	6.37	7.64	7.20	2.84	31.93	
		3cm 以下	23.2	7.07	8.50	9.64	1.84	9.57	0.18	
	唐玉门关	0 ~ 2cm	18.04	2.34	4.41	8.46	13.40	8.80	24.55	
		2cm 以下	15.87	2.43	4.33	12.30	17.73	27.56	19.78	
洪积戈壁	安西东 50km	0 ~ 2cm	28.21	2.96	5.26	9.76	10.26	19.53	24.02	
		2cm 以下	12.33	8.47	9.12	5.31	2.61	3.63	8.53	
	玉门镇	0 ~ 5cm	43.07	3.76	3.39	6.53	7.93	18.46	6.86	
		5cm 以下	31.5	5.00	4.87	9.70	2.33	19.10	17.50	
流沙	民勤治沙站				2.43	29.17	42.37	24.37	1.66	
	高 台				4.40	54.17	7.90	3.97	9.56	
	古 浪					1.37	67.97	27.7	2.96	
风蚀地	玉门蘑菇滩				0.10	0.24	0.80	1.77	97.09	
第三纪红色沙岩	玉门		0.83	1.60	2.00	3.23	3.63	6.74	81.97	
湖相红泥	库姆塔格沙漠					0.05	0.15	0.35	99.45	
黄 土*	神木訾柏沟						0.27	51.03	47.83	0.96
沙黄土*	榆林川北姬家坡							78.48	0.32	1.20
尾 矿	金 昌				0.10	3.46	5.27	4.86	6.31	
新垦农田	古浪土门镇					0.27	3.43	22.14	74.5	1.67

注：\* 引自黄土队资料



风成黄土是第四纪土状堆积物,具有质地疏松、多孔隙、垂直节理发育等特点。主要分布于陕西北部、宁夏西部、甘肃陇东、河西、新疆天山昆仑山北麓。

尾矿砂及人为废弃土,主要分布于金昌、酒泉等工业城市周围。西北地区沙尘源主要类型粒度分析列于表 3。

上述沙尘源物质类型粒度特征为:a.洪积戈壁或冲积戈壁机械组成的基本特点是,砾石和细粉沙所占比例大,中细沙所占比例小,一般砾石占 30%左右,极细沙、粉沙占 40%左右,中沙、细沙不足 30%;b.沙漠中流动沙丘机械组成中细沙为主,占总量 70%左右,其次是极细沙、粉沙,约占 20%左右;c.风蚀地、第三纪红色沙岩、湖相沉积 3 者具有共同特点,即主要以粉沙为主,占 80%~90%;d.黄土、沙黄土主要以极细沙、粉沙为主。黄土粉沙含量大些,约占 47.83%,而沙黄土极细沙含量多些,占 78.48%;e.农田以极细沙和粉沙为主,占 96.64%;f.尾矿沙主要以细沙、极细沙为主,占 90%。

上述沙尘暴物源类型的表面硬度是决定起沙扬尘量的重要因素。据测定,流沙的表面支持强度最小  $0.2\text{kg}/\text{cm}^2 \sim 0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ,尾矿沙表面支持强度与流沙接近,为  $0.33\text{kg}/\text{cm}^2$ 。而固定沙丘表面支持强度高于流沙约 10 倍,所以固定沙丘一般不起沙。但是当固定沙丘被人为干扰后,表面支持强度等同于流沙。物源类型粒度组成特点表明,它们不仅在大风时扬沙,而且可以大量起尘,当尘暴发生时,滚滚而来的“黑风墙”过境时,这些物源类型将成为其提供大量的尘源。

### 3 沙漠化土地和建筑沙石为重要的沙尘源

吐笃止等(2000)利用长期预报观测数据,结合遥感和 GIS 技术,对 2000 年华北沙尘天气的成因进行分析,提出我国北方地表覆被状况局部改善,整体恶化也是强沙尘暴天气产生的重要原因。同时强调:影响华北地区的沙尘天气主要发源于内蒙古中西部和河北省西北部,发源地及沿途地表粉尘是沙尘的主体,城市扩展区域的地表裸土与建筑沙石则提供了就地扬沙的沙尘物来源。2000 年(截至 4 月 25 日)我国华北地区已发生了 8 次沙尘天气。据卫星遥感探测,这 8 次沙尘大气影响到我国内蒙古、宁夏、甘肃、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、吉林、山东、河南、湖北、江苏、安徽等省、市、自治区,总面积约 200 万  $\text{km}^2$ 。其中对北京地区造成重大影响的沙尘主要发源于内蒙古中—西部和河北省西北部,随着冷空气的移动向东南扩散,沿途起沙,不断增强。

上述沙尘途经地带,壤质和沙质土壤比例较高,共占 93.52%,细颗粒级物质较多,易成为沙尘来源。该区域处于我国草原地带,土地利用以牧草地和旱作耕地为主。由于土地退化,这些牧草地植被稀疏,沙化严重;旱作耕地中,由于土壤退化,水源短缺,表土裸露。该区域林地和灌木面积只占 13.14%;草地面积占 31.50%,其中退化草地面积比例大,占 2/3 以上;沙地、盐碱地、裸土等基本无植被覆盖的土地占 7.22%;旱作耕地比例为 32.19%。

观测表明,产生沙尘的地表物质以粉尘为主,其颗粒直径多在  $0.063\text{mm} \sim 0.002\text{mm}$  之间。2000 年影响华北地区的历次沙尘天气途经地带的地表物质组成中含有丰富的粉尘物质,加之表土干燥疏松,为沙尘天气提供了物质基础。这一事实与人们通常概念中沙尘物质主要来源于天然戈壁和沙漠完全不同。

在沙尘发生范围内,大面积土地存在不同程度的沙化。其中沙化土地又可以划分为沙化发展区、潜在沙化区和非沙化区(含戈壁和天然沙漠)。其中沙化发展区是强度供尘区,潜在沙化区和非沙化区是轻度供尘区,供尘能力较弱。2000 年春季华北的历次沙尘天气过程的强度供尘区主要分布在内蒙古中西部和河北省西北部的沙化发展区与该区沙化草地、撂荒耕地及退化旱作耕地的分布相吻合。

除悬浮于高空,可被强风长距离搬运的细粒径粉尘之外,低空短距离移动的较粗粒径沙尘则多为就地起沙。由于北京、天津等城市市区周边大面积城建扩展区内绿化较差,疏松裸土分布较广,加之大量建筑工地沙土遍地,缺少防护设施,致使在强风作用下较粗粒径沙尘就地扬起,与长距离搬运的粉尘相互混合,加入了沙尘的强度,同时也加大了沙尘天气对城市的危害。

中国科学院地学部对我国华北沙尘天气成因的分析报告指出 2000 年屡屡肆虐我国华北地区的沙尘主要来自北京西北面积约 25 万  $\text{km}^2$  的退化和撂荒耕地 飘到北京上空的浮尘大部分来自这些地区。这一结论是来自中国科学院大气物理所、北京气象学院、中国林业科学研究院资源信息研究所、中国科学院地理所与资源研究所、中国科学院遥感应用研究所等单位十余名专家为寻找沙尘暴源头进行了 1 个月的追踪研究后得出的。

参加该课题研究的中国林业科学研究院资源信息所所长鞠洪波指出 2000 年 4 月 6 日 当北京刮起强沙尘时 他正在腾格里沙漠 当时那里晴空万里。后来他调出了美国 NOAA — 14 卫星图 从图上更能清楚地看出 沙尘从内蒙古一些沙漠周边的退化草场和旱地刮起 途经河北到达京津。从 4 月初到 5 月 8 日 他们从甘肃到内蒙古 中间穿过了几个沙漠 发现真正能产生扬尘的是一些干旱农田和退化牧场。这一考察结果与著者前面有意引叙的全球沙尘暴多发性规律是相一致的。

## 4 结论

4.1 尘埃的来源主要有宇宙尘、火山灰、工业发散物、气体转化微粒、燃烧烟尘、海盐晶粒、土壤和沉积物的风蚀。我国沙尘暴的降尘物分析得知 沙尘以土壤和沉积物的风蚀和工业发散物为主。

4.2 我国西北地区沙尘暴的尘源分为两大类：一类是自然的第四纪沉积物堆积类型 如沙漠风成沙、戈壁沙砾、风蚀劣地、第三纪红色砂砾岩、现代流水冲积物、湖积物、黄土、沙黄土；另一类是人类生产活动的人工堆积物类型 如尾矿砂、废弃土堆积。

4.3 中国沙尘暴的 4 大源区 从西向东分别是新疆塔里木盆地边缘、甘肃河西走廊和内蒙古阿拉善地区；陕、蒙、晋、宁西北长城沿线的沙地、沙黄土旱作农业区；位于北京北部和东部的浑善达克、呼伦贝尔、科尔沁沙地。

4.4 在沙尘发生范围内 大面积土地存在不同程度的沙化。其中沙化土地又可以划分为沙化发展区、潜在沙化区和非沙化区（含戈壁和天然沙漠）。其中沙化发展区是强度供尘区 潜在沙化区和非沙化区是轻度供尘区 供尘能力较弱。

## 参 考 文 献：

- [1] 国家环保局. 环境质量标准(GB3095) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [2] Brazel A. J. The relationship of weather type and dust storm generation in Arizona (1965 - 1980) [J]. Journal of Climatology, 1986, 6: 255 - 275.
- [3] J. A 李. 美国南部高平原的干旱、风和尘暴[J]. 世界沙漠研究, 1994(1): 17 - 20.
- [4] 王式功, 董光荣, 陈慧忠等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 350 - 356.
- [5] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. 中国科学, 1984, 24(3): 278 - 288.
- [6] 张德二, 陆风. 我国北方的冬季沙尘暴[J]. 第四纪研究, 1999(5): 441 - 447.
- [7] 戴学荣, 李吉均, 俞立中等. 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 445 - 453.
- [8] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [9] 王式功, 杨德保. 我国西北地区黑风暴的成因和对策[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 19 - 29.
- [10] 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.
- [11] 瞿章, 徐宝玉, 贺慧霞等. “930505”沙尘暴的若干启示[J]. 干旱区地理, 1994, 17(1): 63 - 67.
- [12] 胡隐樵, 光田宇. 强沙尘暴发展与干飚线 - 黑风暴形成的一个机理分析[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 178 - 185.
- [13] 董治宝, 李振山. 国外土壤风蚀的研究历史与特点[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 100 - 103.
- [14] 张国平, 张增祥. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. 土壤学报, 2001, 56(2): 146 - 157.
- [15] 王训明, 董治宝. 土壤风蚀过程的一类随机模型[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 19 - 22.
- [16] 哈斯. 坝上高原土壤不可蚀性颗粒与耕作方式对风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 1994, 14(4): 92 - 96.
- [17] 董治宝, 陈渭男. 风沙土水分抗风蚀性研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(2): 17 - 23.
- [18] 张胜邦, 董旭. 柴达木盆地东南部土壤风蚀研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 293 - 295.

- [ 19 ] 贺大良 邹本功.地表风蚀物理过程风洞实验的初步研究[ J ].1986 1( 1 ) 25 - 30.
- [ 20 ] 刘玉璋 董光荣.影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究[ J ].中国沙漠,1992,12( 4 ) 41 - 48.
- [ 21 ] 董治宝 陈广庭.内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[ J ].土壤侵蚀与水土保持通报,1997,21( 1 ) :19 - 22.
- [ 22 ] 岳红光 张启昌.松辽流域风蚀量与下垫面关系的综合分析[ J ].水土保持通报,1996,16( 6 ) 43 - 47.
- [ 23 ] 石玉芳 徐东瑞.河北省坝上高原风蚀沙化遥感监测及防治对策[ J ].河北师范大学学报,1996,20( 4 ) 96 - 101.
- [ 24 ] 张丽萍 唐克丽.片沙覆盖的黄土丘陵区土壤风蚀特征研究[ J ].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3( 4 ) 8 - 12.
- [ 25 ] Bagnold R A. Journeys in the Libyan Desert, 1929 and 1930. Geographical Journal, 1931, 78 :13 - 29, 524 - 533.
- [ 26 ] Bagnold R A. further journey in the Libyan Desert. Geographical Journal, 1933, 82 :103 - 139, 211 - 235
- [ 27 ] Bagnold R A. Libyan sands. London : Hodder and Stoughton, 1995
- [ 28 ] Bagnold R A. The movement of desert sand. Geographical Journal, 1935, 85 :342 - 369.
- [ 29 ] Bagnold R A. The movement of desert sand. Proceedings of Royal Society London, Series A, 1936, 157 :594 - 620.
- [ 30 ] Bagnold R A. The size - grading of sand by wind. Proceedings of Royal Society London, Series A, 1937, 163 :250 - 264.
- [ 31 ] Bagnold R A. The transport of sand by wind. Geographical Journal, 1937, 89 :409 - 438.
- [ 32 ] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes. London : Methun, 1941
- [ 33 ] Chepil W S. Relation of wind to the dry aggregate structure of a soil. Scientific Agriculture, 1941, 21 :488 - 411.
- [ 34 ] Chepil W S. Dynamics of wind erosion I. Nature of movement of soil by wind. Soil Science, 1945, 60 :305 - 320.
- [ 35 ] Chepil W S. Dynamics of wind erosion : II. Initiation of soil movement. Soil Science, 1945, 60 :397 - 411.
- [ 36 ] Chepil W S. Milne R A. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel. Scientific Agriculture, 1939, 19 :249 - 257.
- [ 37 ] Chepil W S. Milne R A. Wind erosion of soils in relation to size and nature of the exposed area. Scientific Agriculture, 1941, 21 :479 - 487.
- [ 38 ] Chepil W S. Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control. Advance of Agronomy, 1963, 15 :211 - 302.
- [ 39 ] 兹纳门斯基 AH 著 杨郁华译.沙地风蚀过程的实验研究及沙堆防止问题[ M ].北京 科学出版社,1960
- [ 40 ] 河村龙马.飞砂の研究,日本东北理工研究所报告( R ).1951,95 - 112.
- [ 41 ] 伊万诺夫 AH.沙地风蚀的物理原理[ M ].阿什哈巴德 埃雷姆出版社,1972
- [ 42 ] 贺大良 高有广.沙粒跃移运动的高速摄影研究[ J ].中国沙漠,1988( 8 ) :18 - 29.
- [ 43 ] 邹学勇 朱久江.风沙流结构中起伏沙粒垂直初速度分布函数[ J ].科学通报,1992( 23 ) 2117 - 2175.
- [ 44 ] 刘万贤.实验风沙物理与风沙工程学[ M ].北京 科学出版社,1995
- [ 45 ] 董治宝 李振山.国外土壤风蚀的研究历史与特点[ J ].中国沙漠,1995,15( 1 ) :100 - 103.
- [ 46 ] 马世威 高永.风沙流结构三定律[ J ].内蒙古林业科技,1987( 3 ) 26 - 27.
- [ 47 ] 丁国栋.野外风沙流结构的定量研究[ J ].内蒙古林业科技,1994( 4 ) 38 - 40.
- [ 48 ] 祁士华 傅家谟.澳门大气降尘中优控多环芳烃研究[ J ].环境科学研究,2001,14( 1 ) 9 - 13.
- [ 49 ] 文军 季国良 吕兰芝.黑河实验地区大气浑浊度的初步分析[ J ].高原气象,1994,13( 3 ) 339 - 345.
- [ 50 ] 沈志宝 魏丽.黑河地区大气沙尘对地面辐射能收支的影响[ J ].高原气象,1999,18( 1 ) :1 - 7.
- [ 51 ] Bersamini OF Dula C. Mineral aerosols : Renewed interest for climate forcing and tropospheric chemistry studies. JGBP newsletter, 1998, 33 :19 - 52.
- [ 52 ] 雷文方 任丽新 吕位秀等.黑河地区沙漠气溶胶浓度和谱分布特征[ J ].高原气象,1993,12( 2 ) :170 - 178.
- [ 53 ] Tanre D. et al. Radiative properties of desert aerosols by optical ground - band measurement at solar wave - length. J. G. R. . 1988, Vol. 93, No. D10/11 :14223 - 14231.
- [ 54 ] 王栋梁 邱金桓.塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶的光学特性[ J ].大气科学,1988,12( 1 ) :75 - 82.
- [ 55 ] 沈志宝.太阳辐射在山谷城市污染大气中的削弱[ J ].高原气象,1982,11( 14 ) 84 - 91.
- [ 56 ] 陈金荣.黄山大气气溶胶浓度和尺度分布特征[ J ].南京气象学院学报,1991,14( 3 ) 354 - 358.
- [ 57 ] 钱永甫.散射辐射计算方法和气溶胶气候效应[ J ].高原气象,1991,10( 4 ) 429 - 441.
- [ 58 ] 王尧奇.兰州冬季的大气浑浊度[ J ].高原气象,1982( 4 ) 84 - 91.
- [ 59 ] 周允华 项月琴.北京地区大气浑浊度的测量和沙尘污染初步分析[ J ].环境科学,1984,5( 5 ) 50 - 54.

- [60] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析[J]. 科学通报, 1982 (5): 294–296.
- [61] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 29–40.
- [62] Arimoto R, Duce R A, Ray B J et al. Atmospheric trace elements et al. Enewetak Atoll 2, Transport to the ocean by wet and dry deposition. Journal of Geophysical Research, 1985, 90: 2391–2408.
- [63] 张德二, 孙霞. 我国历史时期降尘记录南界的变动及其对北方干旱气候的推断[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 1–8.
- [64] Jensen M., 1961, Shelter effect, Danish Technical Press, Copenhagen.
- [65] Caborn J. M., 1957, Shelterbelts and microclimate, Bull. For. Comm. (29).
- [66] Skidore E. I., et al., 1970, Aerial environment and energy budget as influenced by slat – fence windbreak, paper presented before division of climatology, American Society of Agro. Meeting, Arizona, 47–61.
- [67] Plate E. J., 1971, The aerodynamics of shelter Belts, Agro. Met. 8: 203–222.
- [68] A. P. 康斯坦季诺夫 (闻大钟译) 林带与农作物产量[J]. 北京: 中国林业出版社, 1983.
- [69] Seginer, I., 1972, Windbreak drag calculated from the horizontal velocity field, Boundary – layer. Met. (3): 87–97.
- [70] Wilson J. D., 1985, Numerical studies of flow through a windbreak, 17 4h Conference Agriculture and Forest Meteorology and Seventh Conference Biometeorology and Agribiology, Scottsdale, Ariz. U.S.A..
- [71] Taichi Maki, 1985, Micrometeorological improvement of paddy fields by using windbreaknets, J. Agr. Met., 19(2): 98–102.
- [72] Hayakawa S. et al., 1985, Study on the wind ward and leeward of windbreak structure (1) characteristics of the horizontal flow patterns obtained from the simulation of idealized horizontal windbreak structure, J. Agr. Met., 41(1): 31–38.
- [73] 王治国, 张云龙. 林业生态工程学——林草植被建设的理论与实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. 144–147.
- [74] 曹斯孙. 农田防护林学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1983. 168–174, 110–111, 107.
- [75] 高尚武. 程致力. 大范围绿化工程对环境质量作用的研究[J]. 林业科学研究, 3(增1): 1–35.
- [76] 朱朝云, 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994. 2.
- [77] 汪季, 高永, 刘艳萍等. 多伦县沙尘暴天气成因及时空分布特征[J]. 中国西部地区生态环境建设研究, 2001.
- [78] 文倩, 戴君峰, 崔卫国等. 关于现代浮尘研究与进展[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 68–70.
- [79] 王晓青. 西北地区沙尘暴灾害及防治对策[J]. 干旱区研究, 2001. 6.
- [80] 徐建华, 艾南山, 金炯等. 沙漠化的分形特征研究[J]. 2002, 3(1): 5–9.
- [81] 董治宝, 王涛, 屈建军. 100a 来沙漠科学的发展[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 1–5.
- [82] 刘立超, 安兴琴, 李新荣等. 宁夏盐池沙尘暴特征分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 33–37.
- [83] 陈广庭. 北京强沙尘暴史和周围生态环境变化[J]. 中国沙漠, 2002, 22(8): 210–213.
- [84] 王旭, 马禹, 陈洪武等. 南疆沙尘暴气候特征分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 147–151.
- [85] 高卫东, 姜魏. 塔克拉玛干沙漠西部和南部沙尘暴的形成及危害[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(3): 64–69.
- [86] 张庆阳, 张云荣, 胡英. 沙尘暴灾害及其防治[J]. 生态与自然保护, 2000. 7.
- [87] 86 杨根生. 走进沙尘暴源区[J]. 环境科学, 2001. 4.