

文章编号: 1007-0435(2003)01-0003-07

# 中国草原带与东亚沙尘暴

介冬梅<sup>1,2</sup>, 祝廷成<sup>1\*</sup>, 周守标<sup>1</sup>, 郭继勋<sup>1</sup>

(1 东北师范大学国家草地生态工程实验室, 长春 130024; 2 吉林大学地球科学学院, 长春 130062)

**摘要:**本文论述了中国草原带的分布特点及其生态系统的服务价值;指出中国草原带对沙尘暴起沙源地的阻挡和覆盖作用;从不同时间尺度论述了沙尘暴的形成原因;提出沙尘暴的净化作用、中和作用、提供植物矿质营养和太阳伞效应等四方面的生态效益;阐述了如何全面认识沙尘暴,预测沙尘暴的出现趋势,为沙尘暴防治提供参考依据。

**关键词:**中国草原带; 沙尘暴; 生态效益

**中图分类号:**S812 **文献标识码:**A

## Steppe Zone of China and Sand-Dust Storm

JIE Dong-mei<sup>1,2</sup>, ZHU Ting-cheng<sup>1</sup>, ZHOU Shuo-biao<sup>1</sup>, GUO Ji-xun<sup>1</sup>

(1 Nation Laboratory of Grassland Ecological Engineering, Northeast Normal University, Changchun 130024 China;

2 Earth Science Academy of Jilin University, Changchun 130062 China)

**Abstract:** The paper reviews the distribution characteristics and the service value of different ecosystems of China's steppe zone, and analyzes the steppe zone's function as ground cover for resisting sand-dust storms. Based on the different time scale, the paper discusses the formation of sand-dust storms and tries to foretell their developing tendencies years before they actually burst while acknowledging their ecological benefits, as they can clean the atmosphere of some toxic matters, neutralize the acid deposition, provide mineral fertilizer for plants, and offer a parasol effect. The paper also gives some reference data for the understanding and control of sand-dust storms.

**Key words:** Chinese steppe zone; Sand-dust storm; Ecological benefit

## 1 中国草原带的分布特点及生态系统服务价值

我国以草原植被占优势的草原带,约占国土面积的1/4<sup>[1]</sup>。这片辽阔的草原带,不仅是我国草地牧业的物质基础,而且是保护环境的生态屏障。虽然草原带提供的多种畜产品早已倍受关注,但是草原生态系统服务(ecosystem service)的价值却往往被忽略。作为绿色屏障的我国草原带,占据着独特的生态空间,其生态系统的服务价值与生态空间位置密切相关。

### 1.1 分布特点

中国草原带与东亚季风(monsoon)近似垂直相交<sup>[2]</sup>。它略呈弧形延伸,与我国东部海岸带大致平行,位于森林带与荒漠带之间。因此,中国草原带既不像俄罗斯和蒙古人民共和国的草原,沿着纬度方向由西向东展开;也不像北美洲的草原,沿着经度方向由北向南延伸;而是从东北到西南斜向延伸,覆盖在我国广大的半湿润—半干旱地区,它的东部大体上是我国的农牧生态交错带(ecotone)。

### 1.2 生态系统服务价值

中国草原带提供广泛的生态系统服务(包括畜产品、药材,调节气候,抗御干旱,保持水土,控制侵

收稿日期:2002-09-12;修回日期:2002-11-26

基金项目:国家自然科学基金(40201052);国家自然科学基金重大研究计划项目(90102011);国家“973”重点基础研究发展规划项目(G2000048703);东北师范大学青年基金资助

\* 通讯联系方数据

作者简介:介冬梅(1969-),女,辽宁人,副教授,理学博士,主要从事草地生态及沙尘暴的研究;E-mail: Jiedongmei@nenu.edu.cn

蚀,降解污染,病虫害的生物防治,促进养分循环,传粉播种,保健康复,生态旅游,休闲娱乐以及自然美的享受等等<sup>[3]</sup>,其价值是永远无法替代的。我国草原的生态系统服务价值高于森林生态系统。这提醒人们必须对现有中国草原带生态系统服务的自然资本存量(natural capital stock)予以足够的重视,大力加强草原带的保护、恢复和重建。如果中国草原带被破坏,不再提供这些生态服务,人们将不得不花费大量的精力用人类工程技术来处理,至少目前我们的社会还无能为力。据估计,要想通过人类自己来解决生态系统为我们提供上述的这些服务,每人每年至少要花掉 900 万美元<sup>[4]</sup>。

## 2 中国草原带对沙尘暴的屏障作用

我国位于典型的东亚季风气候区,冬春季节有来自西伯利亚的西北风,夏秋季节有来自太平洋的东南风。这些盛行的风向,都和中国草原带垂直相遇。在草原带上,多年生禾草与小半灌木混生,构成了地上郁闭的草群与地下庞大的根系,具有很强的防风固沙能力。我国沙尘暴的起沙源地有两大类:一是荒漠带中的沙漠,如塔克拉玛干沙漠和戈壁,草原带对它有一定程度的阻挡作用。二是草原带中的沙地,如科尔沁沙地,浑善达克沙地,草原带对它有强大的覆盖作用,有力地控制着沙丘群“活化”。所以,中国草原带对缓冲沙尘暴有着不可替代的功能。生态系统占据的生态空间是评估其服务价值的重要依据之一。生态空间因其重要则价值倍增。近年来频发的沙尘暴,使我们更加认识到草原带防风固沙等生态服务的重要性。随着我国西部大开发的进程,草原带的重要地位将越来越突出。中国草原带不仅是西部经济发展的动力之一<sup>[5]</sup>,也是我国乃至全球环境稳定的重要保障之一。

## 3 沙尘暴成因分析

关于沙尘暴的形成原因众说不一,张德二认为沙尘暴发生对应于冷干气候,长江流域的扬沙和浮尘天气与内蒙古中东部的干湿变化有着极好的对应关系<sup>[6,7]</sup>。史培军认为中国北方的沙尘活动不仅仅是一个气候变化的函数,而且表现为一系列复杂的地表系统动力学过程。风沙活动的驱动力因素,有气候变化、地表植被覆盖变化和土地利用变化,因气候变

暖导致土壤干燥化,土地利用覆盖格局变化中的植被覆盖比例减少,是我国北方风沙活动加剧的主要驱动力<sup>[8]</sup>。高尚玉等指出,中国风沙灾害的加剧是在气候趋于干燥化的背景下,人类大面积开发沙区生产造成的。并认为未来我国风沙灾害的发展主要取决于气候变暖的背景下降水的时空分布,沙区风力变化和土地利用格局调整<sup>[9]</sup>。Blank 等美国学者在研究西北太平洋上空粉尘气溶胶后发现,高空西风是亚洲粉尘输向太平洋等区域的主要动力,沙尘暴受行星风系控制<sup>[10]</sup>。笔者将对不同时间尺度下沙尘暴出现的规律进行分析,以期明确沙尘暴形成的根本原因。

### 3.1 沙尘暴的季节变化及其成因分析

根据内蒙古通辽气象站 1951-2002 年累计扬沙和沙尘暴日数的季节变化曲线(图 1),笔者发现扬沙和沙尘暴的季节分布以冬春季为主,是冬春多夏秋少型,与我国华北、内蒙古中西部干湿变化规律一致<sup>[11]</sup>。据张德二统计,公元 1470-1901 年的 431 年间共查到 24 例沙尘记录,其中 22 例为春季发生的,扬沙和沙尘暴的季节变化与大风日数的季节变化相当一致(图 1)。这说明扬沙和沙尘暴出现的频率受冬季风控制,3 月份冬季风在波动中开始减弱,夏季风从副热带向北移动,地面解冻,回暖,沙尘源充足,当寒潮大风天气到来时地面起沙,夏季风带来水汽促使沙尘沉降,完成沙尘起沙、传输和沉降过程。东亚沙尘暴具有春季活动性强的特点,与东亚冬季风的活动规律一致。

### 3.2 沙尘暴的多年变化规律及其成因分析

通辽气象站 1951-2002 年沙尘天气发生总日数为 1589 次,其中扬沙发生次数为 1265 次、沙尘暴发生日数为 324 次。1951-2002 年扬沙和沙尘暴变化曲线(图 2)表明扬沙和沙尘暴日数在波动中减少。20 世纪 50 年代扬沙和沙尘暴日数最多,最多年份发生扬沙 168 次。通辽气象站 1992-2002 年扬沙和沙尘暴变化曲线(图 3)表明 90 年代扬沙和沙尘暴很少发生,东亚地区在 90 年代很少受到沙尘天气的影响。2000 年扬沙和沙尘暴开始明显增多,韩国和日本也有同样规律(图 4,5)。韩国在 1996 和 1997 年各发生沙尘暴一次,2000 年 10 次,2001 年发生 27 次。日本的 123 个站 1992 年记录到沙尘天气次数为 200 次,1995 年 100 次,2002 年近 800 次,2002

年发生沙尘天气近 1000 次,相当于每站记录到 8 次沙尘天气。通辽地区 2002 年春季发生 8 次沙尘天气,其中沙尘暴 2 次,与 20 世纪 90 年代相比,沙尘天气的强度增加,且向东波及日本和韩国。

通辽气象站 1951-2002 年在冬季累计发生沙尘天气 204 次,春季累计发生 991 次,冬春比为 20%。该站在 20 世纪 50 年代冬季累计发生沙尘天气 283 次,春季 433 次,冬春比为 65%,50 年代冬季气温偏

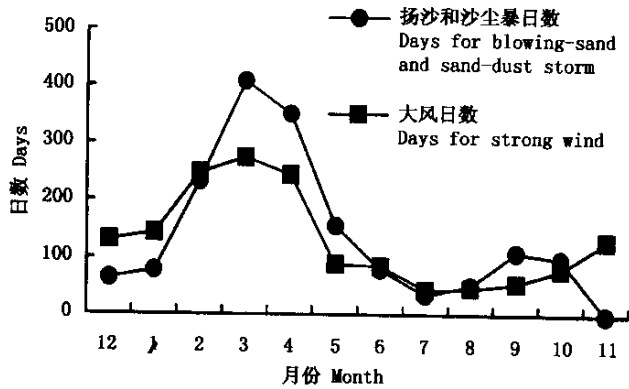


图 1 通辽气象站 50 年月累计扬沙、沙尘暴和大风日数变化曲线

Fig. 1 The accumulated curve of blowing-sand and sand-dust storm and the strong wind days of Tongliao meteorological station in fifty years

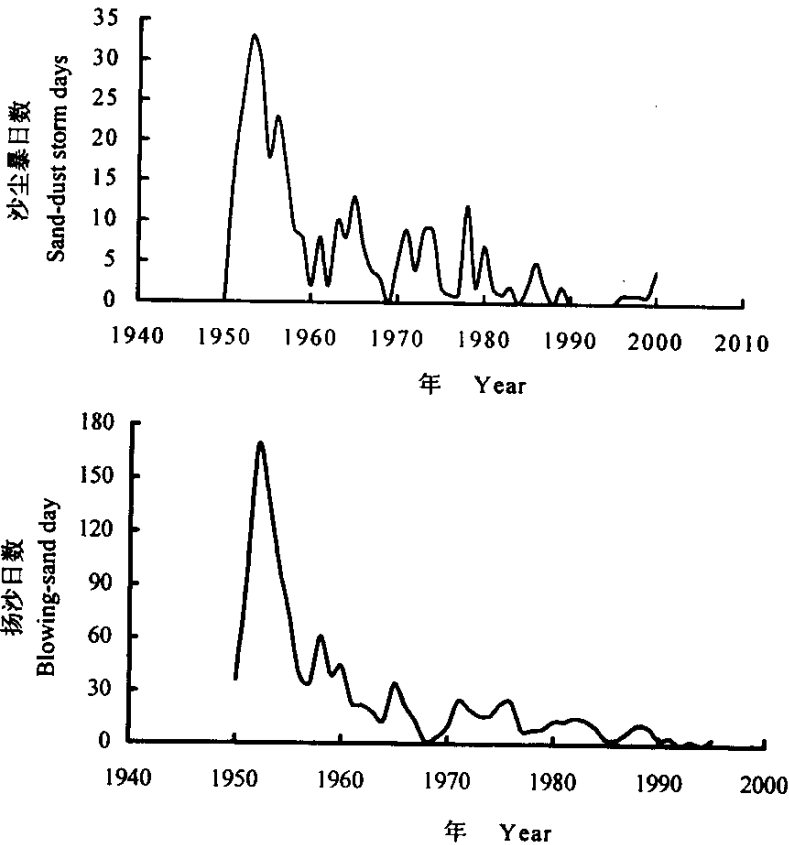


图 2 通辽站 1951-2002 年扬沙和沙尘暴日数年际变化曲线

Fig. 2 Curve showing decade change of blowing sand and sand-dust storm for fifty years(1951-2001) at Tongliao meteorological station

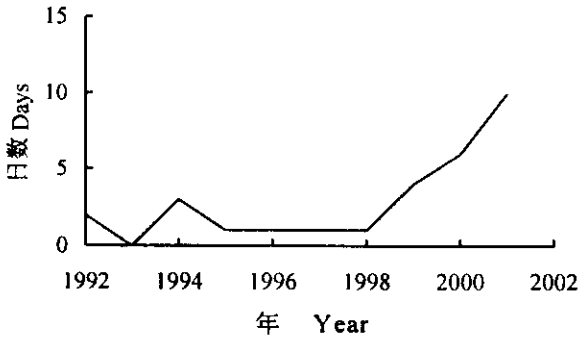


图 3 通辽气象站 1992-2002 年扬沙和沙尘暴日数的年际变化曲线

Fig. 3 Curve showing decade change of blowing-sand and sand-dust storm during 1992-2002 at Tongliao meteorological station

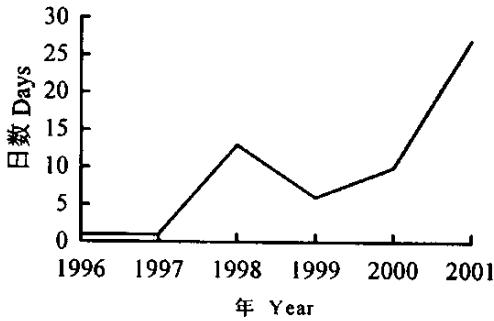


图 4 韩国汉城 1996-2001 年黄沙日数年际变化曲线

Fig. 4 Curve showing decade change of yellow-sand during 1996-2001 at Hangcheng station in south Korean

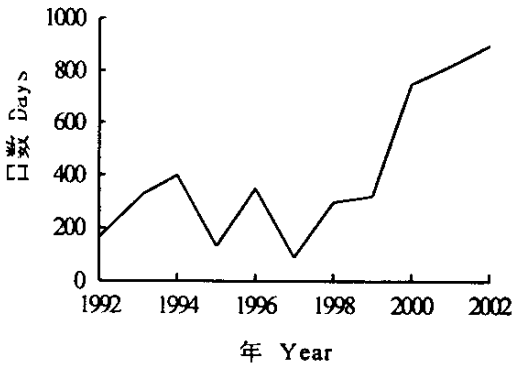


图 5 日本国 123 个观测站 1992-2002 年沙尘日数累计年际变化曲线

Fig. 5 Curve showing decade change of the accumulated days of sand-dust of 123 station during 1992-2002 in Japan

合。1951-2000 年春季大风日数和沙尘暴日数曲线(图 7)表明,从廿世纪 60 年代开始春季沙尘暴的变化规律与大风日数的变化规律一致。在 50 年代大风日数较少,连年的冬春干旱低温,土壤墒情极差,一次沙尘过程持续时间很长,因此沙尘天气日数较多。上述分析表明,沙尘天气的多少受冬春季寒潮大风的控制,而冬春季大风强度与其次数的多少与东亚冬季风的强度有关<sup>[12]</sup>。

20 世纪 70 年代东亚冬季风甚强,从 80 年代到 90 年代,东亚冬季风甚弱。穆明权、李崇银研究指出:东亚冬季风与厄尔尼诺事件有密切关系,东亚冬季风的强度在厄尔尼诺年弱,而在拉尼娜年则强,在厄尔尼诺年后的冬季东亚大槽偏深,冬季风偏强<sup>[13]</sup>。70 年代拉尼娜事件占优势,寒潮大风引起扬沙和沙尘暴较频繁,80-90 年代厄尔尼诺事件占优势,扬沙和沙尘暴频度较少。1998 年 10 月开始的拉尼娜年,2000 年达到高峰<sup>[14]</sup>,导致 21 世纪初东亚沙尘暴次数有所增加,最近几年春季沙尘暴发生的频次与 20 世纪 70-80 年代相似,是 50 年代的三分之一到五分之一。从春季沙尘暴和大风日数曲线(图 7)可以看出,60-90 年代春季沙尘暴日数的多少与大风日数基本一致,但 70 年代与 80 年代相比,前者春季沙尘暴日数较大风日数多得多,而 80 年代二者相差不多,这与 70 年代冬春季干旱有关。厄尔尼诺和拉尼娜事件具有 2 年和 5 年的气候准周期,在未来几年可能进入气候的厄尔尼诺年,同时全球暖冬趋势明显,气候冷干组合机率减少。从这个角度预测未来几年扬沙和沙尘暴出现的次数不会明显增加。据报导二十一世纪第一次厄尔尼诺年于 2002 年 5 月已初步形成<sup>[15]</sup>。

### 3.3 人类历史时期和地质历史时期沙尘暴的出现规律及其成因分析

我国科学家根据中国北方黄土高原的黄土研究发现,我国的干旱在 2200 万年前就有发生。根据地质记录,在过去的几百万年里,亚洲中纬度干旱和半干旱区已经是全球沙尘暴发生的源地之一,大量的大气粉尘被搬运到黄土高原和北太平洋等地。如果按黄土的堆积年代计算,我国西北地区的沙尘暴吹袭已经有二三百万年了。黄土高原 200 多米厚的堆积层就是新生代第四纪以来西方沙漠地带松散的细粒沉积物,被沙尘暴吹向东南方降落后堆积而成。由此可见地质历史时期沙尘暴的频繁程度可见一般<sup>[16]</sup>。因此,沙尘暴在人类出现之前就已经频繁发生。

低(图 6),1951-1954 年冬季连年干旱,降水量几乎为零,这种冷干气候使冷高压的势力加强,冬季沙尘天气比例增多,结果与张德二<sup>[6,7]</sup>的研究结论不谋而

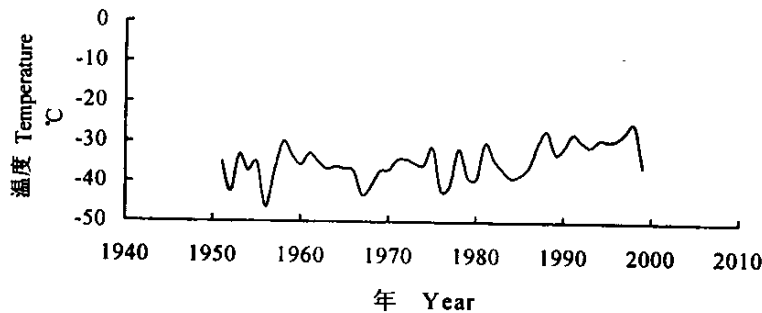


图 6 1951-2002 年通辽气象站冬季气温变化曲线

Fig. 6 The changes of winter temperature during 1951-2002 at Tongliao meteorological station

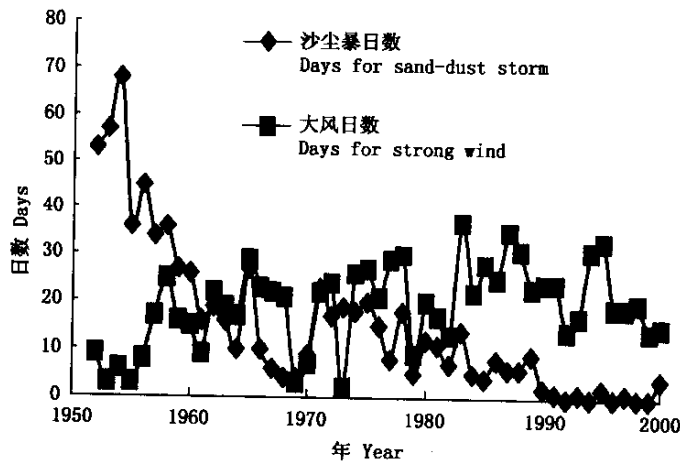


图 7 1951-2000 年通辽气象站春季沙尘暴和大风日数变化

Fig. 7 The changes of days for sand-dust storm in spring and strong wind during 1951-2002 at Tongliao meteorological station

据史书记载,公元前就有过沙尘暴的记录,有“(汉)成帝建治元年(公元前 32 年)四月辛丑,夜,西北有如火光。壬寅晨,大风从西北起,云气赤黄,四塞天下终日夜。下著地者,黄土尘也……”的记载<sup>[17]</sup>。根据史料记载,明末清初曾比较频繁发生过沙尘暴,如“成化二十一所(1485)三月戊子,大名风霾,自辰迄申,红黄满空,俄黑如夜,已而雨沙,数日乃止。京师自正月至三月(阴历一作作者注),风霾不雨。”<sup>[18]</sup>。“隆庆三年(1568)正月初一,大风扬砂走石,白昼晦冥,自北畿抵江浙皆同。”<sup>[19]</sup>由此可见,沙尘暴面积之广阔,一直延伸到江苏、浙江。

现代沙尘影响区的南界为温州、湘潭一线,与张德二<sup>[6~7]</sup>统计的 1621-1650 年典型的干旱时期雨土的南界(北纬 28.5°)一致,可见,扬沙和沙尘暴的影响范围乃受气候因素控制。

我国的高原黄土是地质历史时期沙尘暴沉积的铁证,黄土沉积和各种尺度的大气运动有着密切的

关系,黄土的组成由西北到东南,颗粒成分由粗到细的带状分布特征显然和西北风的风力分选有关。研究 240 万年来黄土沉积的结果表明,黄土是寒冷的冰川期阶段的沉积,冬季风强度较大<sup>[20]</sup>,粉尘从沙漠向中国内陆区域尺度的输送方向为西北—东南向,显示出与近地面层风场一致的方向<sup>[21,22]</sup>。自晚更新世纪以来亚洲粉尘的区域尺度输送受控于近地面层东亚冬季风。历史上当西风强或纬向环流发展期,与亚洲季风环流相关联的近地面层冷空气活动会增加其偏西路径的频次和强度。地球上冰川期时海平面下降,陆地扩大,西伯利亚高压增强,冷空气活动更为强大,内陆更为干燥,干冷气候背景为黄土堆积的加速期,而间冰川期则正好相反。在炎热的气候条件下,黄土的堆积速度减慢,土壤化作用加强,冰川期尘暴的作用明显,间冰川期粉尘堆积量不取决于尘暴过程<sup>[23]</sup>,在气候类似现今的间冰川期,只有发生在亚洲粉尘源区的尘暴才能将粉尘吹至到海

拔 5000 m 的高空,并由高空西风携带至东半球甚至全球的输送<sup>[24,25]</sup>。以上说明地质历史时期和人类历史时期沙尘暴的发生与冬季风的强度有关,发生的频次和强度受控于冬季风的强度。

笔者发现沙尘暴和扬沙分布的南界,出现的强度和频次与东亚冬季风的强度关系极为密切,气候的厄尔尼诺年和反厄尔尼诺年(即拉尼娜年)的交替出现是东亚冬季风强度周期性变化的表现,冬春冷干的气候组合是沙尘暴高发的有利条件。人为活动改变地表植被覆盖,调整土地利用格局,只能或多或少增强或削弱沙尘暴和扬沙的强度,改变大气沙尘的浓度。

## 4 沙尘暴的生态效应

沙尘暴是一把“双刃剑”,有正负两方面的作用。当沙尘暴吹袭时,人们焦急烦躁,只看到它的负面影响,忽略了沙尘暴的正面效应。笔者认为沙尘暴还有以下生态效应:

### 4.1 净化大气的作用

沙尘暴是大气的天然“清洁剂”。京津地区每年约有 100 万 t 沙尘吹过。沙尘暴颗粒吸附酸性气体,以汽车排放气体中  $\text{NO}_2$  为例来计算,在京津地区每年的吸附量约为 1 万 t(按美国 CM 车的排放量,单位: g/km,  $\text{NO}_2$ : 0.7~1.1),相当于 30 万辆机动车尾气年硝酸排放量。沙尘暴在空中大规模飘荡、大范围清洗,减轻了因废气过度积累造成的污染,有净化大气的作用。

### 4.2 中和酸雨的作用

沙尘暴是天然的“中和剂”。根据乘飞机采集沙尘暴的样品分析,沙尘本应呈微碱性,但经过韩国和日本群岛的沙尘样品中,二氧化硫的含量增高 2 倍,变成了酸性,这是沙尘暴经过酸雨地带中和了酸而沉降的缘故。模拟试验表明,将沙尘样品装入园形量筒中,分别注入  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  后,测定量筒进口和出口处的浓度得知,即使  $\text{SO}_2$  量增加较多,也能被沙尘吸附,而  $\text{NO}_2$  量再增加时,则不能被沙尘继续吸附,在注入  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  混合气体后,沙尘吸附  $\text{SO}_2$  的能力不受  $\text{NO}_2$  浓度的影响<sup>[26]</sup>。

从我国吹到日本的沙尘,每年约 100~300 万 t, 降落到地面的沙尘大约 2~3 t/km<sup>2</sup>/a。沙尘暴尘埃

含有较多的 Ca、Mg 等碱性粒子成分,每平方公里约含碳酸钙 50 kg,中和了日本降水中酸性离子的 10%~20%。可以把日本 3~5 月份的酸雨(pH 值 4.7)中和成普通雨水(pH 值 5.6),相当于增加了 200 mm 降水量的酸雨中和作用。因此,沙尘暴好比从空中倾泻的“中和剂”,把酸雨沉降的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和氮氧化物( $\text{NO}_2$ )等酸性气体中和掉<sup>[27]</sup>,同时也缓冲了土壤的酸化进程。

### 4.3 提供植物矿质营养源的作用

沙尘暴是天然的“添加剂”。沙尘暴随着气流越过太平洋,远达北美洲,一路上落下的沙尘含有矿物质营养成分,成为陆地和海洋生态系统的无机营养供给源。当沙尘暴吹袭的时期,正是陆地植物萌发的季节,需要矿质营养的供给。落入海洋中的沙尘,是浅水浮游生物和深水海藻的营养供给源,有利于海洋生物的生长发育。沙尘暴在速度逐渐变慢的移动过程中,组成成分的比例也在不断变化,大的沙粒先行降落,在接近终点时,微细颗粒增多,这时的正面效应表现得更加明显。

东北亚海周围的边缘海域,海盆深度大,大陆架面积小,滨海矿藏不丰富。朝鲜半岛和日本群岛多山地及丘陵,河流短小而湍急,流域面积狭小,河流携带入海的陆源矿物质元素较少。日本群岛受火山喷出物的覆盖较多,因而铁矿奇缺,导致海中缺铁。铁是形成叶绿素的关键元素,缺铁会引起植物患“缺绿症”,呈现“黄化现象”,沙尘暴在一定程度上弥补了这方面的缺欠。如果浮游性植物增加或者“疯长”,则大量吸收二氧化碳,放出氧气,从而缓解温室效应<sup>[28]</sup>。

### 4.4 太阳伞效应

沙尘暴有“太阳伞效应”。沙尘在高空大气中悬浮,形成沙雾,遮挡阳光,使阳光减弱;另一方面,吸收太阳光,蓄存热量,温暖了周围的大气,并有促进云层形成和雨滴降落,每次沙尘暴都往往伴随着降雨或降雪。沙尘暴过后所引起的降水过程可能缓解春旱,这或许是沙尘暴的另一个比较重要的正面效应。

沙尘暴的上述四大生态效益不容忽视,良好的生态效益孕育着昂贵的经济效益。

## 5 全面认识沙尘暴

人类的生产与生活必须尊重自然规律。人类进

行无度的工农业生产以及长期超负荷的利用自然资源,大规模的战争以及违背自然规律的改造环境,对自然界产生污染的破坏效果,当积累到一定程度时,必然遭到自然界突发和激烈的报复。这种报复大多以天气变化的形式表现出来。大自然的这种现象即是在警告人类和惩罚人类,同时又是大自然本身的自我净化和自我保护。从自然观来看,我国位于典型的东亚季风气候区,冬春季节,西风强劲盛行,出现沙尘暴是不可避免的。北京出现沙尘暴,受到暂时的影响,不要怨天尤人。沙尘暴可称为“陆上台风”,来势迅猛,铺天盖地,漫山遍野。既然是台风,海上台风带来的危害比陆上台风更大。尽管如此,谁能够阻止海上台风发生呢?曾有人建议用氢弹爆炸去改变台风登陆的方向,企图用人为的能力去改变地球的自然现象,这是不现实的,也不算是保护环境。人类控制天气的能力还非常有限,面对陆上台风这种不可抗拒的天气系统<sup>[19]</sup>,只能躲避,在局部区域内被动地抵御。沙尘暴“大面积起沙,高空西风运搬”,不宜倡导根治,也是无法彻底根治的。陆地台风过后,风和日丽。目前,在环京津地区运用了数百亿元,提出“把沙尘暴阻挡在承德以北”及“十年灭了沙尘暴”等口号,兴师动众,修建防沙林,好象穿衣服扣错了纽扣。

我们需要调整思路,科学地认识沙尘暴。沙尘暴是由于天气过程和地面过程共同作用的产物,对天气现象当前我们难以改变,目前一方面首先遏制中国草原带和农牧交错带这两个生态空间进一步沙化;另一方面建立和完善沙尘天气的监测和预警系统。一项名为“春季朦胧”研究计划,作为国际地球大气化学合作研究计划(IGAC)的组成部分,有 6 个国家参加,开始在亚洲东部地区研究造成“春季朦胧”的沙尘气雾(aerosol)在大气中的动态及其对环境的影响,预计 4 年后得出结论。只有科学地掌握沙尘暴的规律,才能或多或少在减弱沙尘暴的实践中取得预期的效果。

参考文献

[1] ZHU Ting-cheng. Grassland of China[A]. In: R. T. Coupland editor, national grassland-eastern hemisphere, ecosystems of world, eastern hemisphere and resume [C]. Elsevier Amsterdam Science Press, 1992. 8:61~82

[2] 祝廷成,王育敦等.草地分类分布及其基本特征[J]. 草地生态学,东北师大博士生导师文库,1996,166~190

[3] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报,1999,10(5):635~640

[4] 葵晓明. 生态系统生态学,中国科学院研究生教材丛书[M]. 北京:科学出版社,2000. 39~55

[5] 徐世晓,赵新全,孙平等. 草地生态系统公益保护与西部开发[J]. 中国草地,2002,24(10):55~60

[6] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析[J]. 科学通报,1982,(5):294~297

[7] 张德二. 中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,(1):1~5

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

[9] 高尚玉等. 我国北方风沙灾害加剧的成因及其趋势[J]. 自然灾害学报,2000,9(3):31~37

[10] Pye K. Aeolian dust and dust deposits[M]. London. Academic Press, 1987. 113~126

[11] 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究,2001,(1):9~17

[12] 龙振夏等. ENSO 对其后东亚季风活动影响的 GCM 模拟研究[J]. 气象学报,1999,(6):652~659

[13] 李建芳等. 2000 年夏季北方地区沙尘暴天气初探[J]. 陕西气象,2001,(1):1~4

[14] 丁仲礼,刘东生. 沙尘暴研究迫在眉睫[N]. 科学日报,2000-4-17

[15] 国家海洋环境预报中心. 本世纪首次出现厄尔尼诺[N]. 长春日报,2002-07-12(3)

[16] 《汉书》卷 27 下《五行志》

[17] 《明史》卷 30《五行志》

[18] 《清史稿》卷 44《异灾志》. 240 页

[19] 石元春. 走出治沙与退耕误区[J]. 草业科学,总第 109 期,2002,(5):70~73

[20] 刘东生等. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985. 320~322

[21] Merill J, Uematum T, Savoie D L. Mineral aerosol transport to the Pacific ocean[A]. In : Riley J P, Chester R. Duce R A eds. Chemical ocean ographygraphy [C]. San Diego, Ca: Academic, 1989. 188~218

[22] Merill J T, Arold E, Leinen. Metal mineralogy of aeolian dust reaching the north Pacific ocean; Relationship of mineral assemblages to atmospheric transport pattern[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99:21025~21032

[23] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Glacial and interglacial patterns for Asian dust transport [J]. Quaternary Science Review, 1999, 18:811~819

[24] 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(1):29~40

[25] 掘江羲人. 生态环境恶化增加[N]. 朝日新闻,2001-04-19(国际第 13 版)

[26] 北海道新闻[N],2002-04-13(1)

[27] Feng Zong-wei. Effects of acid depositon on terrestrial ecosystems and their rehabilitation strategies in China[J]. Journal of Environmental Science, 2002, 14(2):227~223

[28] Sohn B J, Fukushima H W. Modelin the Asian dust Aerosol based on ground observation of solar radiation and the sea WIFS Proc. Int Sym. of remote sensiny 99, Korean soc[J]. Remote Sens November, 1999, 110~118