

中国北方沙尘暴及其农学防治探讨

王鹤龄, 李耀辉

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化
与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要:综合了有关沙尘暴研究的主要成果, 分析了我国北方沙尘暴灾害的现状, 对沙尘暴的空间分布与发展趋势、沙尘暴的成因和沙尘物质来源及运移路径等分别进行评述。在此基础上提出了沙尘暴减灾的农学途径, 着重探讨了在全球气候变化的大背景下以冬小麦和冬油菜为代表的冬作物北移措施和保护性耕作措施的防尘机理。指出防止我国北方沙尘暴的恶化, 农业结构调整的当务之急是应对全球气候变化的大趋势, 结合北方生态环境的特点和社会发展的需求, 充分利用气候、气象变化规律, 通过合理的时空布局, 采取趋利避害的农业调控措施, 最大限度地发挥冬作物北移和保护性耕作措施的生态保护功能, 是今后北方干旱、半干旱区农业发展生态建设的必由之路。

关键词:中国北方; 沙尘暴; 农学; 防治

中图分类号: S424

文献标识码: A

引言

随着人类活动对地表作用的日益加剧, 生态环境问题已成为全球关注的热点问题。当前引起国内外高度关注的危及国家生态安全的是近年来日益猖獗的中国北方沙尘暴。中国北方地区属全球4大沙尘暴高活动区之一的中亚沙尘暴区^[1]。多年来的北方沙尘暴缘于北方脆弱生态的全面退化和步步逼进的荒漠化, 沙尘暴已成为一个重要的地球环境问题^[2]。许多学者已就沙尘暴的危害、起因、发生的环流背景及其防治等进行了比较深入的研究, 基本弄清了其产生、发生发展的机理^[3-5]。但对沙尘暴防治的研究颇见零碎。同时沙尘暴的危害范围亦逐渐从西北经济落后区扩展到经济发达的北京、天津及华北平原区^[6]。因此, 及时研究沙尘暴发生的原因及制定相应防治对策, 是摆在面前的紧迫任务。本文以沙尘暴的生态学防治为例, 在综合前人研究成果的基础上探讨我国北方生态脆弱区生态建设可持续发展的途径。

1 北方沙尘暴及其危害

沙尘暴是干旱荒漠区的一种天气现象, 也是土壤的大气搬运形式, 它对生态环境的破坏力极强^[7]。沙尘暴是沙暴和尘暴两者兼有的总称, 是指强风把地面大量沙尘卷入空气中且水平能见度 < 1 km的天气现象。其中沙暴系指大风把大量沙粒吹入近地面气层所形成的携沙风暴; 尘暴则是大风把大量尘埃及其它细粒物质卷入高空所形成的风暴^[8], 它是沙漠化的主要过程之一, 也是沙漠及其边缘特殊下垫面条件下产生的一种灾害性天气。目前, 我国受到荒漠化威胁的面积已接近国土总面积的40%, 并且还在以每年 $2\,460\text{ km}^2$ 的速度扩展^[9]。荒漠化的扩展和蔓延为沙尘暴天气提供了沙尘物质来源和不稳定的地表热量条件。当强大的气流经过没有植被覆盖的地面时, 大量粉尘细沙便会随风而起, 形成沙尘天气及沙尘暴^[10-11]。沙尘暴形成后, 狂风携带沙尘, 通过沙埋、风蚀、降温、污染大气等方式, 直接威胁工农业生产, 生态环境急剧下降, 甚至造成人畜伤亡^[12-14]。

收稿日期: 2006-07-26; 改回日期: 2007-05-31

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J100)、中国气象局兰州干旱气象研究所启动经费、甘肃省气象局面上项目(2006-2)共同资助

作者简介: 王鹤龄(1978-), 男, 甘肃会宁人, 硕士, 助理研究员, 主要从事干旱区农业生态与应用气象研究。E-mail: Wangheling1978@126.com.cn

2 中国北方沙尘暴的形成背景及发生机制

2.1 中国北方沙尘暴的形成背景

中国北方地区位于东亚内陆,横跨青藏高原、蒙新高原和黄土高原,纵贯塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、库姆塔格沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、库布齐沙漠以及毛乌素沙漠,是典型的东亚季风气候区,冬春季西风强劲盛行,出现沙尘暴是不可避免的^[15-17]。

地貌形态的巨大变化,直接改变了大气环流的格局,东西走向的喜马拉雅山挡住了印度洋暖湿气团向北移动,使我国西北气候趋向干旱化。西北干旱荒漠是黄土高原沙尘的发源地^[18]。巨大的青藏高原矗立在北半球的西风带中,整个高原的宽度约占西风带的 1/3,把西风带的近地面层分为南北 2 支,其中常年存在于 3 500 ~ 7 000 m 高空的北支气流成为搬运沙尘的主要动力^[19]。沙漠和戈壁中的小颗粒的粉沙(粒径 0.005 ~ 0.05 mm)和粘土(< 0.005 mm)能被风带到 3 500 m 的高空,进入西风带。同时,由于青藏高原的隆起加强了东亚季风与西风急流,在中国北部以沙尘暴形式堆积成了黄土高原。迄今 200 万 ~ 300 万 a 以来,这个沙土搬运过程一直没有停止过,是形成连续不断沙尘暴天气的自然力^[17-21]。

2.2 沙尘暴发生的动力学解释

沙尘暴的发生步骤可分为分离、输送和沉积 3 个过程。分离是土壤颗粒运动的开始,当风力达到使土壤颗粒运动时,土壤颗粒的分离就发生了。分离的土壤颗粒在风力作用下,或在空中或沿着地表输送移动。当风速降低时,飘移或滚动颗粒就会沉积^[22]。引起土壤颗粒在气流中开始移动的风速值叫临界风速值。临界风速值取决于土壤覆盖物和土壤的可侵蚀性。有植被或残茬覆盖的土壤临界风速值比裸露地表高,板结地面比疏松地面土壤临界风速值高。农田没有固定的临界风速值,它取决于土壤耕作和作物状况^[23]。

沙尘暴的发生过程中,土壤颗粒的移动有 3 种类型:跃移、悬移和蠕移。在农田干旱状况下,土壤表面 1 m 高处,风速 5 m/s 就能吹起土壤沙尘。土壤里的中等粒子被驱动时,在短时间里在离地面 30 cm 以内的高度运动,随后由于重力作用又落下来,这样促使它们相互碰撞并加入到新的土壤颗粒运动

中,这种输送方式叫跃移。由于跃移是发动其他类型输送的原因,所以在防治沙尘暴中控制跃移的发生是很重要的。跃移颗粒的直径通常是 100 ~ 500 μm ,直径 < 100 μm 的土壤颗粒被大风刮起来,悬浮到空中随风输送;这种输送方式叫悬移。悬浮颗粒是影响空气质量的最主要成份。在沙尘暴天气中悬浮颗粒直径在 0.25 ~ 16 μm 之间,平均直径 2.2 μm 。与跃移不同,刮到大气中的悬浮颗粒的数量一般由土壤表面微粒多少来决定,而不单受风能大小制约。直径在 500 ~ 1 000 μm 的大颗粒,多为沙粒,因为太重,不能离开地面进入风中,而只能在土壤表面滚动,称为蠕移^[22-24]。

2.3 中国北方沙尘暴发生条件分析

沙尘暴的发生需要具备 3 个条件:动力条件(强冷空气和气旋活动)、沙源和热力条件(近地层的热力不稳定)。强冷空气是沙尘起动和传输的动力,它的大小决定着空气中沙尘数量、粒径大小、高度和范围,每年冬春季节中国北方的寒潮是这种条件最重要的表现。气旋活动对地面沙土的最初起动、升空和传输起着重要的作用,气旋的强度也决定了沙尘天气的强弱,我国北方蒙古气旋的生成和急剧发展东移对沙尘暴的形成有着直接的影响,它的路径越偏南,北方的沙尘暴天气范围就越大。沙源是形成沙尘暴的物质基础,沙源来自沙漠、退化的林草地或没有植被覆盖的干松土地等。不稳定的近地面热力条件是指空气垂直方向上暖下凉,空气上下能量的交换频繁,处于热力不稳定状态,有利于风力加大、强对流发展^[25-28]。

3 沙尘暴的农学防治途径

中国科学院地学部研究指出,产生沙尘的物质以粉尘为主,其颗粒直径多在 0.063 ~ 0.005 mm 之间,在河北丰宁坝上农田中,直径 < 50 μm 的颗粒占 46.83%,而在内蒙古克旗浑善达克沙地中,直径 < 50 μm 的颗粒仅占 3.01%^[29]。可见沙尘主要来自农田和退化草原,而不是原生沙漠和戈壁。最近的研究成果表明,北京沙尘暴 70% 的沙尘主要来源于北京外围地区冬季翻耕后裸露的农田;沙漠中被风吹起形成浮尘的颗粒仅有 2.56%,而来自旱作农田和沙质草地的则分别达到 30% 和 52%。说明沙尘暴的主要尘源不是沙漠,而是退化草原和裸露农田。从沙尘暴的发生时间看,沙尘暴天气过程春季(3 ~ 5 月)最多,占总次数的 38.1%,其次是夏季(6

~8月)占总次数的30%。强沙尘暴天气过程发生在时间上更集中,发生在春季的强沙尘暴天气过程占总次数的77.7%^[30]。

可见我国北方沙尘暴主要来源于冬春季裸露的

农田和沙化退化草地,治理这2类沙尘源是缓解沙尘暴的关键,其核心是改善冬春季节裸露的农田和沙化退化草地。沙尘暴的农学防治措施的结构和过程如图1所示^[31]。

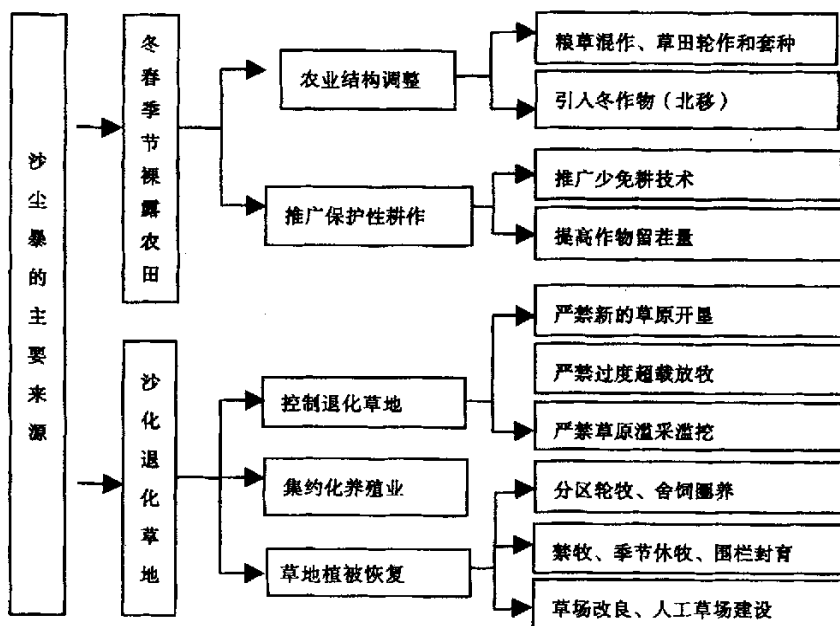


Fig. 1 Agricultural control measures for sand - dust storm

3.1 革新耕作种植制度——冬作物种植带北移

农业生产活动是最容易通过对自然环境条件的适应、利用和改造以及对生物生命活动过程的促进和控制,使生物再生产过程按照人类的社会、经济和生态目的来进行。种植制度的改变正是人们适应气候变化,充分合理利用气候资源的重要手段。同时也是改善生态环境的一项关键技术。

全球气候变暖作为一种客观存在已为大多学者认同。在过去的几十年内,全球年平均气温已经提高了0.3~0.6℃。气候变暖的趋势在空间上以中高纬地区、时间上以冬季表现得更为明显,呈现出高纬地区升温(升高0.8~1.0℃)高于低纬地区(升温0~0.5℃),冬季升温高于夏季的规律^[20,32-33]。这种气候的整体变暖及变暖格局对中高纬、高海拔春作物区改、扩种“冬”作物提供了非常好的“天时”。目前已在冬小麦和冬油菜的北移上进行了一

些探索。

受自然条件、种植习惯和品种资源等的制约,我国春麦区和春、冬麦过渡区主要分布在宁夏、甘肃、内蒙古、新疆的大部、青海的北部、河北、陕西的长城以北及山西的雁北。我国春麦区和春、冬麦过渡区与沙尘暴沙源地、路径区和多发区基本重合。冬小麦全生长发育过程对沙尘暴的形成与发展有较强的“相应”制约作用^[32]。我国北方春小麦播种期一般在2月末至3月底,沙尘暴发生时(3、4、5月份)春小麦尚未出苗或麦苗幼小。此时经播种翻动的地面基本呈裸露、疏松状态,正在耕作的土地具有一定含量的细粒物质,春季耕翻加大了扬尘的可能性,自然成为沙尘源地或沙尘暴长驱直入的坦途^[33]。风洞实验表明,翻耕与未翻耕土壤风蚀量在7~12级风力之间相差13.8倍^[34];实测田间扰动土表风蚀量为未经扰动土表的1400倍^[35]。与春小麦不同的

是,冬小麦播种期一般在沙尘暴较少发生的 9~10 月,翌年的 2 月底至 3 月初返青(比草类返青提前 10 d 左右),在沙尘暴多发的 3~5 月已进入分蘖、拔节期,此时麦田叶面积指数达 1~4,麦株高度为 20~50 cm。不但根系已对疏松土壤产生有效固定作用,而且冬麦植株消耗了气流的能量,对地面风速也起到了抵消作用,从而大幅减弱了沙尘形成的 2 个重要条件——大面积裸露疏松地表和强劲持久的大风^[32]。因此,冬小麦作为一种特殊的草本植物,对沙尘暴具有独到的生态防治作用。若在这些传统的春麦区改、扩种冬小麦,对减轻我国北方地区沙尘暴灾害会产生积极的作用,是减弱沙尘暴强度的重要有效措施。

目前我国北方冬麦区大体上是在长城以南,秦岭、淮河以北,六盘山以东,包括河北、山西绝大部分、陕西中北部、甘肃陇东、山东、江苏、安徽、淮河以北地区以及辽宁的辽东半岛南部。辽宁省冬麦种植的北界已由过去的盖州市向北扩展到了铁岭市。内蒙古自治区赤峰市、黑龙江、吉林以及河北省北部也在试种冬小麦,试种面积已达数千 hm^2 ,已形成具有一定规模的冬小麦推广面积^[36]。甘肃省冬小麦适宜种植区北界 20 世纪 90 年代比 60 年代向西北扩展 100~200 km,适宜种植区海拔比过去升高了 300~400 m^[37]。北方冬油菜过去主要集中在秦岭以北的关中平原、晋东南等地区。目前东起山东寿光,西至甘肃临夏,北到河北玉田,都有冬油菜种植。由于抗寒品种的选育和栽培技术的提高,冬油菜的北界继续向北推移。

3.2 保护性耕作技术及其防尘原理

国外的经验证明,农田实行保护性耕作是人类治理沙尘暴的重要手段。近年来我国积极改革传统的耕作方法,大力推行农业保护性耕作,减少冬春季节裸露农田扬尘,并且与种树种草等措施有机结合,形成沙地、草原、农田综合防治体系,不仅有效地防治沙尘暴的发生,改善了生态环境,而且促进旱作农业的可持续发展^[38~41]。现有研究表明,我国北方沙漠化土地的成因中,人为因素占 94.5%,其中由于不合理的耕作措施和灌溉用水导致土地沙漠化占 59.7%,可见沙尘暴的发生与土地的不合理开发和不合理耕作有密切关系,实施农田和草原沙化治理是沙漠化和沙尘暴防治的根本之所在^[42]。

保护性耕作是相对于传统耕作而言的一种新型土壤耕作和保护生态环境的技术^[43]。作为旱地农

业保护耕作方法之一,其核心内容主要是少、免耕措施和秸秆还田(覆盖)。少、免耕措施是在尽量不翻耕土壤的前提下进行农事操作(播种、施肥等),尽可能减少对土壤耕层的破坏,减少水分蒸发;秸秆还田可保持尽可能多的茎叶残茬覆盖地表,既可以抵销部分风能,减少大风引起的沙尘颗粒运动,又能保护地表土壤免遭风蚀,从而有效控制农田起尘。与传统耕作比较,保护性耕作可增加土壤贮水量,减少径流量和蒸发量,增加团粒结构,增强土壤抗风蚀能力,提高作物产量^[42~46]。

农田缺乏植被和翻松表土是风蚀的主要原因,所以残茬覆盖就相当于自然条件下的植被覆盖,起到了保护农田的作用,进而对抑制沙尘暴起到重要作用^[47~48]。保护性耕作在美国西部已广泛应用,证明对控制风蚀非常有效^[49]。从多点试验示范结果看,保护性耕作是一项防止风蚀、保持水土的有效耕作方法,具有明显的保土、保水、保肥、抗旱和增产效果,可减少水土流失 90%,减少风蚀 70%~80%,减少地表径流量 50%~60%,减少土壤流失 80%左右,增加土壤蓄水量 16%~19%,减少田间大风扬尘 50%~60%,一般增产 6%以上^[25,29,45~46]。风洞试验结果表明,随着作物残茬高度和覆盖度的增加,土壤风蚀量逐渐减少,在干旱高寒地区农田留茬高度不应 <25 cm,覆盖度 >35% 时可有效控制土壤风蚀,在一定风力作用下,随着秸秆残茬高度和覆盖度的增加,作用在其上的剪切力也会增大,而作用在裸露地表上的剪切力相应地就会减小,甚至趋于零^[26]。

农业保护性耕作是美国从 20 世纪 30 年代为防治沙尘暴而逐步形成的一种耕作方式。目前,这项技术已经在世界上十几个国家得到了大规模的推广应用^[50]。我国从 20 世纪 50 年代开始了免耕、覆盖等耕作技术的试验和研究,从 1993 年开始,我国北方的山西、内蒙古、河北、辽宁、陕西、甘肃等不同类型耕作区进行一定范围的保护性耕作技术实验,取得了显著效果^[50~52]。保护性耕作技术可提高土壤含水率 10%,增加土壤有机质 0.03% 左右。具有稳产和增产趋势,增产幅度 10% 左右,生产成本降低 20%~50%。同时地表作物残茬有助于截留和保存植物养分(特别是 P 素)及农药和除草剂,减少这些物质随径流进入地下水的机会。地表秸秆可明显地降低地表径流中的除草剂含量;同时,富含有机质的免耕土壤中,活跃的微生物活动可加快土壤

中农药和除草剂的降解,从而保护地下水和地表水质量,作物残留物覆盖地表,可阻止风蚀,降低空气尘土含量,从而改善空气质量。降低能源消耗和加强土壤固碳,也有益于缓冲大气温室效应^[49,52-55]。因此,保护性耕作是一种改良的、集约的防治风蚀和沙尘的作物栽培方法。

4 对策与建议

防止我国北方沙尘暴的恶化,农业结构调整的当务之急是应对全球气候变化的大趋势,结合北方生态环境的特点和社会发展的需求。充分利用气候、气象变化规律,通过合理的时空布局,采取趋利避害的农业调控措施,最大限度地发挥种植业的生态保护功能,是今后北方干旱、半干旱区农业生态建设的必由之路。历经数十年的研究试验证明,在春麦区大力改、扩种冬小麦就是一种“三赢”的佳径。对于此项农业种植结构、种植制度的重大改革措施,我们必须把它提高到战略高度去认识,同时应加大冬油菜北移的试验和推广工作。

我国发展的保护性耕作是在沙尘暴、风蚀等恶化的压力下起步的,是在美国等国家成熟技术的基础上开展的,在技术上实现了跨越式的发展,采用少耕、免耕、秸秆覆盖等保护性耕作技术,可以有效减轻土壤裸露,减少扬尘量,缓解沙尘暴的危害,既有较好的产量效益,又有良好的经济效益和生态效益。是一项适合于我国北方地区旱地农业持续发展的耕作体系,实施保护性耕作措施对于北方地区较其它地区具有更加重要的意义。

参考文献:

- [1] Pyke K Aolian. dust and dust deposits [M]. London: Academic Press, 1987. 113-126.
- [2] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.
- [3] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356.
- [4] 周自江. 近 45 年中国杨沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 9-17.
- [5] 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析[J]. 第四纪研究, 2002, 22(4): 374-380.
- [6] 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 1-158.
- [7] 夏训诚, 杨根生. 中国西北部地区沙尘暴灾害及其防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 1-242.
- [8] 赵兴梁. 甘肃特大沙尘暴的危害与对策[J]. 中国沙漠, 1993, 13(3): 1-7.
- [9] 祝廷成, 梁存柱, 陈敏. 沙尘暴的生态效益[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 34-37.
- [10] 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, 5(2): 86-94.
- [11] 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.
- [12] 史培军, 严平, 高尚玉. 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(3): 71-77.
- [13] 彭珂珊. 中国西部沙尘暴的成因、危害及其防御对策[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2): 18-39.
- [14] 黄维, 牛耘. 西北地区沙尘暴的危害及对策[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(3): 83-88.
- [15] 许炯心. 黄土高原地区沙尘暴形成的自然地理因素: I 影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 548-551.
- [16] 许炯心. 黄土高原地区沙尘暴形成的自然地理因素: II 多元回归分析与地带性特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 552-556.
- [17] 宋宗水. 产生沙尘暴的自然因素与人类活动因素[J]. 中国农业资源与区划, 2004, 25(4): 5-8.
- [18] 王炜, 方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 366-381.
- [19] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 616-622.
- [20] 宋豫秦, 张力小. 历史时期我国沙尘暴东渐的原因分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 632-635.
- [21] 赵翠光, 刘还珠. 我国北方沙尘暴发生的环流形势分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 246-250.
- [22] Chepil W S. The physics of wind erosion and its control[J]. Advances in Agronomy, 1963(15): 211-301.
- [23] Chander D G. Defining wind Erodibility of Loessial soils by Particle Sizing[J]. Proc of Amer, 2001, 4(2): 301-312.
- [24] Fryrear D W. A field dust sampler[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996(41): 117-120.
- [25] 申元村, 杨勤业, 景可. 中国的沙尘暴、尘暴及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(3): 11-14.
- [26] 周建忠, 路明. 保护性耕作残茬覆盖防治农田土壤风蚀的试验研究[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(2): 170-173, 178.
- [27] 郭锐, 张杰, 韩涛. 西北特殊地形与沙尘暴发生的关系探讨[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 576-581.
- [28] 申元村. 我国沙尘暴形成机制及防治对策研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 9-13.
- [29] 路明. 我国沙尘暴发生成因及其防御策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 440-446.
- [30] 冯建英, 陈旭辉, 陆登荣. 我国西北干旱区区域性沙尘暴特征及成因研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 582-587.
- [31] 徐斌, 侯向阳, 王道龙. 沙尘暴的危害及农业防治措施[J]. 生态科学, 2004, 23(1): 60-63.
- [32] 隋玉柱, 袁汉民. 沙尘暴农业防治途径研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 566-569.
- [33] 隋玉柱, 袁汉民. 生态脆弱区农业可持续发展途径探讨——以宁夏改种冬麦的沙尘暴防治为例[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 46-50.
- [34] 张国平, 张增祥, 刘纪远, 等. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. 地理学报, 2001, 56(2): 146-158.
- [35] Stephen D Merrill, Alfred L Black. Soil Wind Erosion Hazard of Spring Wheat - Fallow as Affected by Long - Term Climate and Till-

- age[J]. SOIL SCI SOC AM J, 1999, 63(5): 1768 - 1777.
- [36] 邹立坤, 张建平, 姜青珍, 等. 冬小麦北移种植的研究进展[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 53 - 57.
- [37] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119 - 125.
- [38] 刘裕春, 李钢铁, 郭丽珍, 等. 国内外保护性农业耕作技术研究[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1999, 21(3): 83 - 88.
- [39] Peter Berg. Conservation Farming Production Manual[M]. Australia; Department of Conservation and Natural Resources Horsham and WCFA, 1994.
- [40] Alex Knight, Darren Mc Grath, Roger Lawes. Low rainfall alley farming systems[M]. Primary Industries and Resources South of Australia. 1998.
- [41] Saxton K, Horning L. wind erosion and fugitive Dust On Agriculture lands in the Pacific Northwest[J]. Transaction of ASAE, 2000, 43(3): 623 - 630.
- [42] 高国雄, 吴发启, 阎维恒. 保护性耕作是防止沙尘暴发生的有效途径[J]. 水土保持学报, 2004, 24(1): 66 - 68.
- [43] 张海林, 高旺盛, 陈阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 16 - 20.
- [44] 贾树龙, 任图生. 保护耕作研究进展及前景展望[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 152 - 154.
- [45] 王晓燕, 高焕文, 李洪文, 等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 66 - 69.
- [46] 臧英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 56 - 60.
- [47] 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.
- [48] 常旭虹, 赵广才, 张雯, 等. 作物残茬对农田土壤风蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 19(1): 28 - 30.
- [49] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 335 - 340.
- [50] 臧英, 高焕文. 国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 195 - 198.
- [51] 蔡典雄, 王小彬, 张志田, 等. 寿阳旱农试区保护耕作体系研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 41 - 46.
- [52] 高焕文, 李同盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 1 - 4.
- [53] 胡立峰, 张立峰. 风蚀地区的保护性耕作探讨——以河北坝上地区为例[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 23(4): 219 - 224.
- [54] 贾树龙, 孟春香, 张执欣. 保护性耕作在河北省的区域适应性[J]. 华北农学报, 2003(18): 139 - 141.
- [55] 张庆阳, 张沅, 李莉. 我国沙尘暴灾害及其治理对策初步研究[J]. 干旱环境监测, 2001(12): 199 - 203.

Sand - dust Storm and Agronomy Prevention Countermeasures in Northern China

WANG Heling, LI Yaohui

(Institute of Arid Meteorology, CMA ; Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The status quo of disasters caused by sand - dust storm in Northern China was analyzed, and the spatial distribution, developing trend, as well as origin, source and moving path of sand - dust storm were reviewed respectively. The agronomy approaches to sand - dust storm disasters reduction were suggested, and mechanism for sand - dust storm prevention under the ground of global climate change was discussed mainly. It was pointed out that the farming structure adjustment should apply to global climate change to prevent worsening of sand - dust storm in Northern China, and the way to improve sustainable development of agriculture in arid and semi - arid regions was put forward, namely combining the environment and the needs of social development in Northern China, making use of climate change law, adopting agricultural control measures through reasonable spatial - temporal farming distribution, exerting the environment preservation function of conservation tillage and winter crop extending northward.

Key words: Northern China; sand - dust storm; agronomy; prevention countermeasures