

王志刚,贾若尘,罗凤敏,等.沙尘热动力机制与农田防护林抑尘机理[J].中国沙漠,2024,44(5):116-122.

沙尘热动力机制与农田防护林抑尘机理

王志刚¹,贾若尘²,罗凤敏¹,刘明虎¹,刘芳¹,巴超群²,刘志民²

(1.中国林业科学研究院沙漠林业实验中心 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站,内蒙古 磴口 015200; 2.中国科学院沈阳应用生态研究所,辽宁 沈阳 110016)

摘要: 沙尘天气包括尘卷风、扬沙和沙尘暴等起沙扬尘过程,对生态、生产、生活危害很大。近年沙尘暴频繁发生的问题,引发了人们对农田防护林防控沙尘作用的争论。鉴于此,作者重点讨论了强对流沙尘暴形成和发展的热动力作用机制,包括尘卷风及沙尘暴中尘土上升的热动力作用机理、尘土热动力量值、干飚线黑风暴与飚线雹暴升力能量密度等参数的估算,在此基础上,得出了农田防护林防控沙尘暴的机理和作用:(1)减缓地表热力积蓄,摩擦消耗平流和对流能量,有效防止地表风蚀起尘;(2)林网区静风空间能够捕获尘粒、过滤尘土;(3)促进高空含尘气流与近地面乱流交换,使微尘不断进入滞尘空间被过滤。未来应加强尘源地监控、尘土热动力强化风力的正反馈作用以及不同农田防护林配置的抑尘效果研究。

关键词: 沙尘天气; 强对流沙尘暴; 尘土热动力; 农田防护林

文章编号: 1000-694X(2024)05-116-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00039

中图分类号: S727.24

文献标志码: A

0 引言

沙尘运动为贴近地面的风沙跃移运动和空气中的尘土细物质悬移运动的总称。沙尘天气由弱到强主要包括尘卷风、冷平流强风扬沙和沙尘暴、强对流沙尘暴(黑风暴)等起沙扬尘过程,亦包括含尘气流脱离尘源区后形成的浮尘和尘暴天气^[1]。

已有研究表明,中国北方常见的戈壁、草地、盐壳、沙地、农田等下垫面中,农田下垫面极易起尘^[2]。中国以世界7%的耕地承载世界22%的人口,人均耕地面积不到世界平均水平的40%^[3]。中国北方地区,特别是干旱区后备耕地资源储量集中,对保障国家粮食安全起到压舱石的作用,但本区农田风蚀沙化现象突出,是潜在的重要尘源区^[4]。传统上,人们一直认为农田防护林是抑制农田沙尘活动的屏障^[5]。

近年来中国沙尘天气频次增加,引发公众广泛关注。有人认为,由于尘卷风和强对流沙尘暴沙墙高度较高,防护林树高不足以阻挡沙尘高空输送,

沙尘天气频次增加的原因为“气候变化异常”“蒙古国沙尘输入”。显然,这种观点低估了防护林在防控沙尘中的作用。由于对于农田防护林防控沙尘作用机理的理解既牵扯沙尘源起,又牵扯沙尘滞留,既影响生态建设理论研究取向,又影响生态工程具体设计,有必要澄清防护林是否对沙尘有抑制作用、其作用大小以及如何作用等问题。

明晰沙尘起动及运移机理是理解农田防护林控尘作用的前提。地面状况对风尘活动具有明显反馈作用,尘土的热动力作用参与强对流大气运动是局部近地层风速增大、沙尘活动增强的一个重要因素。目前,对风沙跃移运动和冷平流起沙扬尘研究较为充分。但是,尘卷风和强对流沙尘暴风场复杂多变而很难开展控制试验,导致对一些关键问题的认知受到影响。

精确评估农田防护林防控风尘功能不仅是当前研究的热点,也是绿洲农业可持续发展的关键。围绕沙尘的热动力学机制、干旱区农田防护林的防尘效应及其表现形式,本文基于长期试验研究和生

收稿日期:2023-12-12; 改回日期:2024-04-08

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFYBB2022MB006);内蒙古河套平原高标准农田防护林体系建设集成技术与示范项目(2024JBGS0002)

作者简介:王志刚(1963—),男,内蒙古固阳人,研究员,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: slwzhigang@126.com

通信作者:刘志民(E-mail: zmliu@iac.ac.cn)

产实践经验梳理了农田防护林的防控风尘的功能机制,并探讨了尘卷风、沙尘暴等不同强度沙尘过程与防护林的互馈作用关系。

1 沙尘运动过程

风力对沙尘的搬运包括3种形式:蠕移、跃移、悬移。沙粒沿地表滚动或滑动称为蠕移,蠕移质的粒径多为0.5~1.0 mm^[6]。沙粒以连续跳跃的形式运动称为跃移,粒径0.10~0.15 mm的沙粒最容易以跃移形式运动^[7]。风沙流中的跃移沙粒占总输沙量的1/2以上,甚至达到3/4^[8]。细小的尘土颗粒脱离地面后,一定时间保持在空中悬浮而不与地面接触,并以与气流相同的速度向前运动称为悬移。悬移质粒径一般小于0.10 mm^[9],粒径越小,悬浮高度越大、时间越长,可能输送的距离越远。跃移和悬移的粒径分界变化较小,一般把0.05 mm作为明显分界线^[10]。

跃移沙粒在气流与地面间跳跃,成为气流与床面间动量交换的介质,加大了地面对气流的摩擦阻力,风越大,起沙越多,阻力越大。跃移阻力对气流挟沙能力具有自限作用,单个沙粒下落时具有的击溅动量足以引起周围多个沙粒产生连锁起动,但不会引起风沙流的输沙量如链式反应那样无限制增加,而是自限于有效风速的三次方的饱和输沙量^[11]。跃移阻力对风具有负反馈作用,表现在悬移质含量极低的流动沙面很少出现持续时间较长的尘卷风,每当看似平坦炽热的流动沙面出现尘卷风,卷起的沙粒开始跃移形成跃移阻力,使平坦沙面抵挡气流的阻力急剧增大,阻滞尘卷风进一步发展并使其快速消亡。

悬移颗粒(尘土)一经起动,短距离内不再回到地面,地面对气流的阻力主要由地表粗糙度决定,不因尘土起动而急剧增大。尘卷风是中国北方夏季常发的灾害性弱沙尘天气,通常发育在白天紧靠地面被强烈加热形成一层过热空气的地方,主要有“热泡”学说解释其触发机制,因地面受热不均而产生小尺度旋风卷起尘土和细小物质形成尘柱。有学者认为,尘卷风从地表吸收了沙尘而变得可见,但夹带的尘土对旋涡的动力学几乎没有什么影响^[12-13]。我们认为,尘卷风将连续数日高温积蓄在尘土中的热量在极短时间内释放,扬起的尘土对旋涡具有不可忽略的加强作用,类似于水汽潜热对龙卷风的加强作用,即龙卷风中的水汽在上升到露点

高度凝结为水滴、上升到冰点高度时冻结为冰晶时释放潜热,不断加热上升气流,能够加强对流运动的发展,在龙卷风发展和维持中发挥正反馈作用。

通常根据所含固体颗粒物的粒径组成将气象学上的沙尘暴进一步细化为沙暴、尘暴和沙尘暴^[14]。沙暴指颗粒物以跃移和短距离悬移运动为主的携沙风暴,一般由8级以上大风在沙质下垫面上吹起沙物质形成,风速降低时因跃移运动的自限作用而消失。沙暴墙高度一般为15~30 m,能见度一般为500~1 000 m。尘暴指颗粒物以悬移运动为主的强风暴,一般由8级以上大风在尘土丰富的下垫面吹起大量尘土形成。尘墙初起时即可高达100 m,随后可发展为400~500 m,甚至3 000 m,含尘量最高的尘暴能见度可低至小于50 m^[15]。沙暴兼尘暴称为沙尘暴,能见度低至相应水平时对应气象学上的强或特强沙尘暴,俗称黑风暴。

塔里木盆地四周群山环绕、地形相对封闭,只在西南角和东北角留有缺口,尘土外运条件不佳,发育的塔克拉玛干沙漠含尘土相对较多,尘卷风和沙尘暴常见^[16]。除塔克拉玛干沙漠外,其他沙漠的流沙区含尘土极少,已不是现代沙尘暴中尘土的来源,不具备形成沙尘暴(特别是尘暴或黑风暴)的物质条件。沙尘暴多发于含尘土较多的裸土地,如新开垦或缺乏防护林保护的耕地、过度放牧或遭碾压破坏的草原、活化的固定半固定沙地^[17]。这些裸露土壤细粒含量大,主要是人为因素造成沙尘暴,如合理利用水土资源,沙尘暴可得到有效防控。

2 沙尘热动力机制

2.1 尘卷风中尘土上升的热动力作用机制

晴天午后地面温度远高于气温,热尘土被风吹离地面后会对空气快速放热,使尘卷风的上升热动力陡增,形成尘土对空气的正反馈机制。空气温度随海拔每上升100 m降低0.6 °C,造成空气在上升过程中因气压下降引发的绝热冷却,在尘土温度不随压力变化的情形下,尘土在上升过程中会持续给周围空气放热,这是另外一种正反馈机制。此外,Lorenz等^[18]的观察表明,尘卷风柱内的物质被日照强烈加热后使支撑它的空气变暖,增加了系统内部能量,并可能形成一个正反馈机制,即尘卷风越强烈尘埃便越多,因而吸收更多的太阳辐射能使尘卷风变得更加强烈。

尘土的热动力对尘卷风的发展起到持续的正反馈作用,因此在尘土丰富的平坦地面上形成的尘卷风常常可以发展得相对强烈、规模较大、维持时间较长;高空的含尘气团可以漂流很远距离;夜间尘土微粒不再捕获太阳能,且大气层结趋于稳定,尘土微粒在重力作用下沉降速度加快,因此早晨的空气一般比傍晚时含尘量低得多。

2.2 沙尘暴中尘土上升的热动力作用机理

尘卷风中的尘土在上升过程中不断给周围空气放出热量,在尘卷风发展和维持中起到正反馈作用。沙尘暴(特别是黑风暴)中沙尘可能也存在着与尘卷风中类似的热动力作用。

胡隐樵等^[19]认为,黑风暴的沙尘墙是类似于飏线阵风锋面的干飏线沙尘暴锋面,由阵风锋面前沿反向上升气流卷起干燥地表沙尘而形成。胡隐樵等^[19]以1993年“5·5”沙暴为例,认为黑风暴具有飏线的一系列基本特征,黑风暴过境时也伴有气压急剧上升和气温急剧下降;黑风暴内存在如沙尘墙一样的沙尘暴锋面,类似于飏线的阵风锋面;沙尘暴锋面前下部向内凹,说明锋面前方也有相对于锋面的反向上升气流卷入沙尘暴云体内,这种上升气流可能是卷起干燥地表沙尘的主要动力。有的黑风暴发生发展的某个阶段,易出现闪电、闷雷,有时出现阵性微量雨雪,空气干燥^[20],因此黑风暴是一种强干对流天气系统,干飏线中的对流单体结构也与飏线类似。干飏线与飏线这种相似的结构,提示二者之间在动力方面也具有相似性。与水汽的潜热释放加强飏线在雷暴单体发展中的重要作用类似,胡隐樵等^[21]认为黑风暴中也存在着沙尘造成的辐射冷却正反馈作用,由于大尺度天气过程(冷锋或低压槽等)的强风扬起沙尘,大量沙尘遮挡阳光使短波入射辐射下降,造成地表温度降低进而降低气温,锋面后的气温下降使气压上升,加大与锋前高温低压区的气压差,气压差的加大将增强风速,强风速又将扬起更多的沙尘,形成一个正反馈环路。

我们认为,胡隐樵等^[19,21]描述的由沙尘对辐射遮挡引起的风力增强正反馈环路是存在的,但不具备能量迅速释放、足以支持强对流发展和维持的快速反馈特征。而沙尘暴卷起的尘土在上升过程中不断给周围空气放出热量,同样具有加强对流运动发展的正反馈作用,并且由于尘土表面积足够大,

尘土与空气的热交换具备迅速释放的特点,是足以支持强对流发展和维持的快速反馈机制。

尘土在沙尘天气发展中的热动力作用还广泛存在于以逐渐增强的大风扬起沙尘的冷平流天气过程中^[22],这种热动力加强乱流交换,有利于高层急流动量下传,可使近地层风力增大。

2.3 尘土的热动力值估计

假设单位质量尘土释放的热量全部用来增加尘土的重力势能:

$$H=T \times c / G \quad (1)$$

式中: G 为重力加速度,取 $9.8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$; H 为尘土热动力上升高度; T 为地表与空气的温度差; c 为土壤比热容,为 $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。干旱地区晴天午后干燥地表沙土温度比气温高 25 °C 左右,此时尘土上升高度可达 2040 m ,远超常见的尘卷风高度。同理,1993年5月5日沙尘暴过境时气温降低 18 °C ^[23],加上黑风暴中扬起的尘土与近地表空气温差 25 °C ,总放热温差 43 °C ,可知尘土上升高度为 3510 m ,远超常见的沙尘墙高度。

2.4 干飏线黑风暴与飏线雹暴升力能量密度的比较

2.4.1 升力能量体积密度的比较

如果干飏线黑风暴中尘土腾起后对周围空气放热提供的升力能量体积密度和飏线雹暴中水汽潜热释放提供的升力能量体积密度大致处于同一数量级,即表明尘土的热动力在量级上具备支持强对流发展的能力。

1993年5月5日黑风暴沙尘墙高度 H 约在 $300 \sim 400 \text{ m}$ ^[19]。本文作者以此为案例构建了干飏线黑风暴升力能量体积密度(K_{VD})的计算公式:

$$K_{\text{VD}}=T \times c \times E_p / H \quad (2)$$

式中: E_p 为风蚀量,取 $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[24-26]。沙尘墙初起时高度可达 100 m ,升力能量体积密度 $27520 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。当沙尘墙高度为 $300 \sim 400 \text{ m}$ 时,升力能量体积密度为 $6880 \sim 9173 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

同时构建了飏线雹暴升力能量密度(K_{VS})的计算公式:

$$K_{\text{VS}}=(L+L_m) \times p / H \quad (3)$$

式中: L 和 L_m 分别为飏线中水汽的凝结潜热和结晶潜热; p 为雹暴降水量。计算中数值取自强雹暴天气下的代表案例记录^[27],飏线中水汽的凝结潜热为

$2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 结晶潜热为 $3.35 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 雹暴降水量以 50 mm ($50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 计, 雹暴云堆积高度以 8000 m 计。则由公式(4)可知, 升力能量体积密度 $17718 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

对上述结果进行比较发现, 尘土的热动力具备支持强对流发展的能力。

2.4.2 升力能量面积密度的比较

由升力能量体积密度, 易知干飏线黑风暴升力能量面积密度(K_{SD})计算公式为:

$$K_{\text{SD}} = T \times c \times E_p \quad (4)$$

飏线雹暴升力能量面积密度(K_{SS})计算公式为:

$$K_{\text{SS}} = (L + L_m) \times p \quad (5)$$

将上述数值代入可得, $K_{\text{SD}} = 2.752 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, $K_{\text{SS}} = 1.4175 \times 10^8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。结果显示, 干飏线黑风暴中尘土腾起后对周围空气放热提供的升力能量仅为飏线雹暴中水汽潜热的 1.94%。这一方面解释了干飏线黑风暴发生频次远小于飏线雹暴, 同时也可以解释飏线雹暴中的天气现象更剧烈(如飏线雹暴中连续不断的闪电炸雷, 而干飏线黑风暴仅有少数能听到闷雷)。

2.5 干飏线黑风暴与飏线雹暴升力能量释放高度的比较

黑风暴尘土的能量释放集中在地面附近, 这是因为气温随高度的变化在近地面层最剧烈。以地表温度与气温(百叶箱温度表安装高度为 1.5 m)相差 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 计, 则 1.5 m 高度内温度梯度达 $16.7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 随着高度的上升温度梯度减小。虽然干飏线黑风暴升力能量面积密度仅为飏线雹暴的 1.94%, 但因干飏线黑风暴的能量在近地面气层集中释放, 主要破坏性天气现象(如超强的瞬时风力、飞沙走石、尘土弥漫、能见度低等)都集中在地面上, 能够造成地面上比飏线雹暴更大的破坏, 特别是对人民生命和健康的巨大损害^[28]。

飏线雹暴的能量释放集中在云层中, 这是因为水汽凝结为雨滴、雨滴冻结为冰雹这些潜热释放过程均在高空深厚的云层中进行^[29]。虽然飏线雹暴升力能量面积密度比干飏线黑风暴高数十倍, 总能量更加充足, 但最具破坏性的天气现象(如雷暴)主要集中在高空, 对地面灾害性天气现象(降雹、大风降温等)具有预警作用, 即使降雹量很大、雹块很大的雹灾对灾区造成巨大经济损失, 却极少造成人员生命和健康的严重损害。

3 农田防护林防控沙尘暴的机理和效果

3.1 农田防护林对沙尘暴近地面气流辐合起动的的影响

农田防护林是人工生态系统, 目的是调整和改善脆弱农田生态系统的结构和功能, 建立或恢复持续稳定的高生产力水平、高生态效益的农田生态系统^[30]。农田防护林具有重要的生态、经济和社会价值, 具体体现在防风固沙、防止农田土壤风蚀、提高作物土壤水分利用效率从而改善农田环境, 提高作物产量, 实现农业可持续发展^[31]。

尘卷风由热泡中空气的显热触发, 是大面积平坦沙土地表在连续高温天气、强日光照射下近地表空气积蓄的热量在乱流中随机或微风与微地貌干扰形成的。农田防护林的林带遮阴造成地面受热不均, 阴影部分温度相对较低, 随太阳入射角度变化呈规律性变化。这种不均匀受热打破了地面的随机乱流, 代之以有组织的林网内弱对流, 不利于对流能量的持续积累; 树木热容加入近地面热交换后, 提高了地面附近的总热容, 对极端高温和极端低温都具有缓减作用^[32]。因此, 林网健全的农田极少见尘卷风形成; 偶发在林网区的尘卷风与林带相遇时瞬间湮灭。

中国北方林网化农田农耕活动一般3月初开始, 早春灌溉对提高土壤抗风蚀能力有较大作用^[33]; 灌溉还可形成绿洲冷岛稳定层结, 不利于高层急流动量下传对近地面风力的加强^[34]。而林网化不足的农田往往要躲避风沙季节(3—5月, 4月最多)而推迟灌溉耕作, 裸露干燥的沙土有利于不稳定能量积蓄。

强对流沙尘暴中近地面气流的辐合起动, 受到防护林摩擦阻碍, 也是强对流系统难以生成的机理之一, 这与规模化防护林抑制强对流雹暴生成的力学机理相似。

3.2 农田防护林对沙尘暴强瞬时风速的影响

农田防护林防风效应为人所熟知, 一般是基于针对水平气流的实验和观测结果。黑风暴是一种强对流系统, 对流单体内部还存在急速辐合上升和下击暴流, 其中急速辐合上升气流可能与“将大树连根拔起”有关, 是尘土向高空快速冲腾的主要形

式;下击暴流的短促扩散与背景风力叠加可能是强瞬时风速形成的主要机理。

黑风暴的对流能量主要来源于尘土扬起时携带的热量快速释放,且以近地表释放最快,其高度范围与农田防护林树高范围重合较多。因此可以判定,林带除对水平气流起到熟知的防护作用外,还对上升气流和下击暴流具有摩擦消能作用^[35]。黑风暴所伴随的强瞬时风力能够造成巨大破坏,其中吹倒大树的情况很多,主要出现在薄弱的绿洲边缘、散生木等突出部。风吹倒或拔起大树的应力,其反作用力就是树木对风的阻力,可见其阻力巨大。规模化林网区林带防风效应具有连续叠加的效应,足以对抗任何强对流系统的破坏力,从未出现黑风暴或雹暴系统成规模抹平一个健全林网区的情况。

3.3 农田防护林对运移沙尘的过滤作用

沙尘在运移过程中遇到障碍物就会沉积。乔、灌、草植被都有不同程度的捕获尘粒的作用,其中乔木为主的林网区静风空间大、过滤效率高,能够改变含尘气流的速度和方向,使林内风速降低从而促进林内一部分粒径较大沙尘颗粒物沉降,起到捕获、过滤沙尘的效果。林网区防风效应越好,过滤效果越好,颗粒粒径越大越容易被过滤^[36-38]。高空的尘粒重力沉降很慢,但高空含尘气流与近地面乱流交换活跃,通过交换作用微尘可不断进入滞尘空间被过滤。黑风暴过境时大规模完善的林网区下风部较上风部大气浑浊度明显减小,能见度明显增大。

3.4 农田防护林防控沙尘暴的实例

1993年“5·5”沙暴中受灾最严重的地区,一类是沙漠边缘新垦区,即景泰、古浪新灌区,垦区原为腾格里沙漠边缘固定、半固定灌草沙堆,前几年被大片开垦为耕地,在没有建立防护体系之前,沙土裸露,极易风蚀;另一类是河西走廊地区山前冲积洪积扇缘相沙土沉积物,特别是新堆积的工矿废渣。同属河西走廊狭管区、突入腾格里沙漠腹地、背景风力更大的民勤绿洲防护体系完善,受灾很轻^[23]。宁夏中卫地区灾情严重,但距离中卫仅21 km的沙坡头地区防护体系完整,基本未受灾^[39]。美国和前苏联20世纪的大规模垦荒活动都曾诱发黑风暴剧增,催生了“罗斯福工程”和“斯大林改造大

自然计划”。“罗斯福工程”是在密西西比河以西和洛杉矶以东地区建设大规模防护林以抵抗风沙侵蚀,但在工程造林结束后,由于防护林耗水问题、农场耕地面积的扩张需求、旱灾、病虫害等原因,当地林带经营者及农民对防护林带的维护产生了抵触情绪从而使大面积防护林出现衰退。因而工程后期重点针对这些问题对防护林进行了更新、改造^[3,40]。“罗斯福工程”在防治沙尘中发挥的作用不容忽视。“斯大林改造大自然计划”主要借鉴了苏联19世纪的农田防护林工程建设在林带保护区小气候因素与增产效益的关系、林带类型、宽度、密度、结构、带间距离等研究中取得的相关成果,规划营造各种防护林570万 hm^2 、8条大型防护林带,在防护林结构以及效益评估等方面作出了重要贡献^[41]。

4 展望

土壤颗粒中的悬移质能在高空大气中远距离输送,对生态环境与人类生活造成大范围的危害,但很少有人从热动力学角度解释悬移颗粒的上升机理。本文从尘土上扬的热动力机制角度出发,指出被太阳辐射加热的热尘土可为尘卷风甚至强对流沙尘暴提供上升动力,对尘卷风和沙尘暴的发展起到持续正反馈作用;通过估算热尘土蕴含的热量并比较了干飚线黑风暴与飚线雹暴升力能量密度,表明尘土的热动力在量级上具备支持强对流发展的能力。以此为基础,阐述了农田防护林能通过抑制近地面气流辐合起动、摩擦消除上升和下击气流、过滤运移沙尘的方式对沙尘暴的防控起一定作用。

农田防护林防尘抑尘的机制、过程和效果是一个重大的科学、技术和实践问题,尽管前人做了诸多工作,但尚有很多工作亟需开展、深化与完善。概言之,在对农田防护林的防尘抑尘机制的研究和认识上尚存在如下问题与挑战。①农田防护林防尘抑尘机制的理论尚不完善,已有理论存在针对性低、准确性低、不同理论和假说彼此相违等问题。②针对沙尘释放、运移、沉降3个环节,或单独,或综合开展专门的粉尘研究从而构建科学假说和理论的研究尚缺乏典型性和系统性。③整合基质属性和风信条件的关于农田防护林防尘抑尘机制的经验和机理模型尚很少见。④将沙尘低空过程与高空过程加以区分,并阐释防护林如何通过影响低空过程进而影响高空过程的研究尚有很大不完备性。

未来研究应更关注:①加强尘源地监控,当前尘源区主要为含尘量高及扰动频繁的新开垦或缺乏防护林保护的耕地、过度放牧或遭碾压破坏的草原、活化的固定半固定沙地等,监测农田防护林对沙尘释放率的影响仍为首要工作;②深化沙尘暴尘土热动力机理研究,应考虑尘土热动力强化风力的正反馈作用从而更加准确地评估农田防护林工程的抑尘作用;③深化农田防护林防尘抑尘作用研究,虽然农田防护林具有减缓地表热力积蓄、摩擦消耗平流和对流能量的作用,但规模大小、网格大小、林带结构、物种组成、防护林高度等如何组合以实现抑尘效果最大化是理论和实践上亟需解决的问题。

参考文献:

- [1] 马玉明,姚洪林,王林和,等.风沙运动学[M].呼和浩特:远方出版社,2004:257-258.
- [2] 宋阳,刘连友,严平,等.中国北方5种下垫面对沙尘暴的影响研究[J].水土保持学报,2005,19(6):17-20.
- [3] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等.中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J].自然资源学报,2001,16(4):313-319.
- [4] 秦豪君,杨晓军,马莉,等.2000-2020年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因[J].中国沙漠,2022,42(6):53-64.
- [5] 朱教君.防护林学研究现状与展望[J].植物生态学报,2013,37(9):872-888.
- [6] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Chapman and Hall, 1941.
- [7] 吴正,凌裕泉.风沙运动的若干规律及防止风沙危害问题的初步研究[M]//治沙研究.北京:科学出版社,1965,7:7-14.
- [8] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D16): D16111.
- [9] 丁国栋,赵媛媛.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2021:85-87.
- [10] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.半湿润地区农田土壤粉尘释放的风洞模拟研究[J].地理科学,2012,32(11):1364-1369.
- [11] Sherman D J, Jackson D W T, Namikas S L, et al. Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 113-133.
- [12] 顾兆林,邱剑,鲁鲁义,等.尘卷风的研究进展[J].中国沙漠,2007,27(5):843-846.
- [13] Sinclair P C. A quantitative analysis of the dust devil[D]. The University of Arizona, 1966.
- [14] 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):5-12.
- [15] 赵兴梁.甘肃特大沙尘暴的危害与对策[J].中国沙漠,1993,13(3):4-10.
- [16] 李亚云,成巍,王宁,等.塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠春季沙尘暴特征及其气象影响因素对比[J].中国沙漠,2023,43(4):1-9.
- [17] 王仁德,李庆,常春平,等.土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展[J].中国沙漠,2023,43(2):85-103.
- [18] Lorenz R D, Myers M J. Dust devil hazard to aviation: a review of United States air accident reports[J]. Journal of Meteorological Research, 2005, 30(298): 178-184.
- [19] 胡隐樵,光田宁.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):49-56.
- [20] 刘景涛,杨耀芳,李运锦,等.中国西北地区1993年5月5日黑风暴的机理探讨[J].应用气象学报,1996(3):371-376.
- [21] 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J].大气科学,1997,21(5):70-78.
- [22] 袁瑞瑞,王建英,张卫红,等.不同路径冷空气导致的宁夏沙尘重污染天气特征及传输规律[J].中国沙漠,2024,44(1):209-217.
- [23] 杨根生,王一谋.“五·五”特大风沙尘暴的形成过程及防治对策[J].中国沙漠,1993,13(3):71-74.
- [24] 胡梦甜,张慧,乔亚军,等.呼伦贝尔森林-草原生态交错带土壤风蚀量时空变化及驱动力分析[J].生态与农村环境学报,2023,39(8):999-1007.
- [25] 杨根生.中国西北地区黑风暴与农业防灾减灾措施[J].中国沙漠,1996,16(2):97-104.
- [26] 赖锋,乔占明,熊增连.青海省风蚀量及防风固沙量时空特征分析[J].测绘科学,2023,48(1):148-156.
- [27] 张军.保定地区的两次强雹暴天气[J].气象,1986(8):9-10.
- [28] 王式功,杨德保,金炯,等.我国西北地区黑风暴的成因和对策[J].中国沙漠,1995,15(1):19-30.
- [29] 王华,孙继松,李津.2005年北京城区两次强冰雹天气的对比分析[J].气象,2007(2):49-56.
- [30] 范志平,关文彬,曾德慧,等.东北地区农田防护林高效多功能经营的指标体系及标准研究[J].应用生态学报,2001,12(5):701-705.
- [31] 李春平,关文彬,范志平,等.农田防护林生态系统结构研究进展[J].应用生态学报,2003,14(11):2037-2043.
- [32] 张景波,王志刚.绿洲防护林体系缓解霜冻作用的调查研究[J].防护林科技,2008(5):14-16.
- [33] 冯彦淞,杨彩虹,强玉泉.耕作模式对河西绿洲灌区夏玉米农田土壤呼吸的影响[J].中国沙漠,2023,43(4):200-208.
- [34] 苏从先,胡隐樵.绿洲冷岛的行星边界层结构[J].气象学报,1987,45(3):322-328.
- [35] 刘明虎,张建平,苏智,等.绿洲防护林缓减冰雹灾害的动力学机制[J].生态学杂志,2019,38(9):2833-2839.
- [36] 罗凤敏,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北缘防护林内外沙尘暴低空结构特征[J].干旱区研究,2019,36(4):1032-1040.
- [37] Miri A, Davidson-Arnott R. The effectiveness of a single *Tamarix* tree in reducing aeolian erosion in an arid region[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 300: 108324.
- [38] Latif Bhutto S, Miri A, Zhang Y, et al. Experimental study on the effect of four single shrubs on aeolian erosion in a wind tunnel[J]. Catena, 2022, 212: 106097.

- [39] 刘家琼,李金贵,张民力.宁夏中卫地区“五·五”特大沙尘暴灾害调查[J].中国沙漠,1993,13(3):75-76. Journal of Forestry,1989,87(4):32-36.
- [40] Baer N W.Shelterbelts and windbreaks on the Great Plains[J]. [41] 曹新孙,陶玉英.农田防护林国外研究概况(一)[J].中国科学院林业土壤研究所集刊,1981,5:177-190.

Thermal dynamic mechanism of dust and dust suppression mechanism of farmland shelterbelts

Wang Zhigang¹, Jia Ruochen², Luo Fengmin¹, Liu Minghu¹, Liu Fang¹, Ba Chaoqun², Liu Zhimin²

(1.Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem National Observation Research Station, Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China; 2.Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Sand and dust weather includes dust devil, sand and dust storm and other sand and dust processes, which do great harm to ecology, production and life. With the frequent occurrence of dust storms in recent years, especially this year, debates have arisen regarding the role of farmland shelterbelts in preventing and controlling dust storms. In light of this, we focused on discussing the thermodynamic mechanisms of the formation and development of severe convective dust storms, including the thermodynamic effects of dust devils and dust rising in dust storms, the thermodynamic values of dust and the estimation of the lifting energy density of dry squall line black storm and squall line hailstorm, etc. Based on this, we obtained the mechanisms and effects of farmland shelterbelts in preventing and controlling dust storms: (1) slowing down the accumulation of surface heat, dissipating advection and convective heat through friction, effectively preventing surface wind erosion and dust uplift; (2) the static air space within the forest network can capture dust particles and filter dust; (3) promoting the exchange of high-altitude dusty airflows with near-ground turbulent flows, continuously directing micro-dust enters the dust retention spaces for filtration. In the future, it is necessary to strengthen the monitoring of dust source areas, the positive feedback effects of dust thermal dynamics and the dust suppression effect of different farmland shelterbelts configurations.

Key words: dust weather; severe convective dust storm; dust thermal dynamics; farmland shelterbelts