

柳本立,彭婉月,刘树林,等.2021年3月中旬东亚中部沙尘天气地面起尘量及源区贡献率估算[J].中国沙漠,2022,42(1):79-86.

2021年3月中旬东亚中部沙尘天气地面起尘量及源区贡献率估算

柳本立^{1ab}, 彭婉月^{1a,2}, 刘树林^{1a}, 杨婷³

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 a.沙漠与沙漠化重点实验室, b.甘肃省戈壁荒漠生态与环境野外科学观测研究站(敦煌), 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 2021年3月中旬,东亚中部包括中国北方大部分地区,爆发了持续性的沙尘天气,引发了人们对于沙尘源区、防风固沙生态建设工程效益的高度关注。提出了一个新的地表起尘量估算方法,使用高精度、大范围的气象数据,计算了这次沙尘天气的地面起沙条件、大风过程中的输沙状况,估算了不同时刻的起尘量,获得了14、15日蒙古和中国北方荒漠地区的起尘贡献率。结果表明:相比过去10年,中国北方总体不容易起尘,而蒙古中东部的荒漠地区由于增温显著、降水减少,更容易扬尘;3月15日覆盖中国北方的强沙尘暴,有75%的沙尘是由于14日在蒙古的起尘,随后16、17日更大范围的沙尘天气,有84%是15日起源于中国北方和西北。两日境内外的起尘总量基本相同。

关键词: 沙尘暴; 东亚中部; 起尘量; 气候变化

文章编号: 1000-694X(2022)01-079-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00144

中图分类号: P458.11

文献标志码: A

0 引言

沙尘过程是自然界物质循环的重要形式,塑造了大陆的景观,形成了黄土高原、沙漠、戈壁等地貌。沙尘可影响全球辐射平衡,同时对于维持大洋和热带雨林地区的营养成分有重要作用^[1]。地质时期的沙尘过程强度、范围可远超过当前,例如末次盛冰期(24—18 ka BP)中国的沙漠范围向南、向东可分别达到36°N和125°E^[2],全部沙尘释放量比现在大60%—300%,冰期的沙尘沉积量可达到间冰期的20倍^[3-4];历史时期中国北方及东亚、中亚中心地带也有多次大的沙尘过程,例如中国古籍《博物志》记载“夏桀之时…天乃大风扬沙,一夕填此空谷”。天气尺度的沙尘过程可对人民生活产生直接影响,春季沙尘季节也是中国北方呼吸系统疾病的高发期。

过去60年,中国北方沙尘天气的发生次数总体呈显著减小的趋势,这与全球变暖导致的西伯利亚高压减弱、平均风速降低、降水量增加有关^[5-6],尤其是过去10年没有出现大规模沙尘过程,但2021年3

月14、15日东亚中部爆发了强烈的沙尘活动,并一直持续到18日,导致中国北方大部分地区空气严重污染,北京的峰值PM₁₀浓度达到10⁴ μg·cm⁻³,其范围广、强度大,引起了公众对大规模沙尘天气的尘源、产生原因、变化趋势的密切关注。对天气系统的研究证明此次持续性沙尘天气起源于蒙古^[7],主要受强烈温度变化使土壤松散、降水减少及蒸发加剧使地表干燥,以及强烈蒙古气旋等因素的共同作用^[8]。但内源、外源沙尘源区的贡献率如何,并未有定量研究结果。同时,16、17日的过程与15日有明显差异,表明主要源区并不一致,其中15日明显有蒙古的贡献,而之后的过程可能主要来自中国西北,应当区别对待、科学判断(图1)。

大规模沙尘过程的产生,需要充足的地表物质供应和强烈的大风作用,因此与沙漠、戈壁的地理分布和强冷空气的路径密切相关^[9]。以往针对一次沙尘过程的研究中,多是从气象和动力角度分析环流形势,缺少对地面状况的反映;对地表起尘状况

收稿日期:2021-08-23; 改回日期:2021-10-18

资助项目:中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202085)

作者简介:柳本立(1986—),男,河南漯河人,研究员,主要从事风沙地貌和风沙灾害防治研究。E-mail: liubenli@lzb.ac.cn

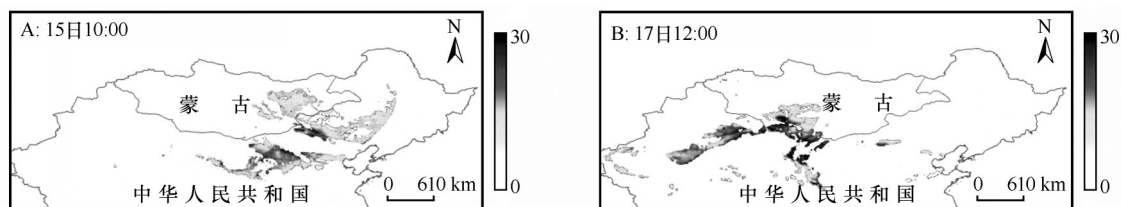


图1 风云二号卫星获取的2021年3月15日(A)和17日(B)东亚中部沙尘监测指数对比

Fig.1 Infrared difference dust index (IDDI) from FY-2 meteorological satellite across central East Asia on the day of Mar 15 (A) and Mar 17 (B)

的研究,一般是针对月以上的时间尺度,缺少短时具体过程的分析,这两方面难以衔接。本文提出了一个基于实测数据拟合公式估算地表起尘量的方法,并使用大范围、高精度的气象资料,获得了大区域的沙尘源区在沙尘活动爆发前的起沙状况和具体过程中各时段的起尘量,分析了3月中旬此次特大沙尘天气的详细起尘过程,据此计算了内源、外源的贡献率。

1 研究方法

1.1 天气过程概况

在这次沙尘暴过程中,受强烈蒙古气旋和冷锋影响,14日上午蒙古中西部大部分地区出现瞬时风速超过 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风,大范围的沙尘暴随气流流向偏东南方向移动,于18:00左右进入内蒙古开始影响中国北方、西北的大部分地区,于15日晚间结束;随后,在同一强烈气旋作用下,15日之后中国新疆及河西走廊西端的沙尘源区也开始强烈起尘,引起了16—17日中国北方又一次自西向东的沙尘过程;18日夜間至19日夜間,本次持续性沙尘天气逐渐结束^[7]。这与东亚内陆中心以往的沙尘事件类似^[10]。

1.2 起尘量估算方法

影响沙尘过程中起尘量的主要因素,包括风力、地表等两个主要方面。地表风力是风沙活动最重要的控制因素,中国风沙区的大规模沙尘过程主要受冬季风影响^[11],强沙尘暴往往由蒙古气旋导致^[12],因此沙尘日数的变化与中国北方春季大风日数一致^[13]。降水的控制作用反而较低,因为荒漠地区首先降水少,另外沙地的持水能力非常弱,有效水分少^[14],这在全球多个沙尘释放区的多指标分析中也得到了验证^[15]。过去几年,研究区所在的东亚中部中-蒙戈壁沙漠没有大规模沙尘过程,经过多年的堆积地表堆积粉尘物质更多,其中每年累积的

降尘(PM_{10})量可达 $3\,000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[16-17],在此次大风过程中可全部被吹起,这种情景适用于最大可能输沙量公式,代表在地表沙物质充足的情况下,风可以侵蚀携带沙物质的最大能力^[18]。该公式基于风洞试验及在宁夏中卫腾格里沙漠东南缘、甘肃敦煌戈壁、新疆塔克拉玛干沙漠东南缘的观测结果,在全国各地得到了广泛的应用。通过该公式,可获得对一次大风过程所能够吹蚀沙物质的估计。

3月中国北方及蒙古戈壁荒漠的灌草植被均未到生长季,覆盖度最低,阻止风蚀、拦截风沙的能力最弱,本身是沙尘活动的高发期,但沙尘活动爆发之前的地表状况和气候背景,能够对起沙、扬尘有控制作用。降水可显著减小风蚀,而升温引起地表蒸发增加、松散干燥,并降低起动风速增加风蚀;风洞试验证明,增温导致地表更不稳定,降低风蚀发生的阈值,使得沙尘活动更容易发生^[19]。这些因素的响应时间可能较长。沙丘活化指数考虑了当月与上月的温度、降水等气象数据,能够表达地表的不稳定和易风蚀程度^[20],可用于分析沙尘天气爆发的气候背景,以及这些因素对起沙的控制作用。其值越大代表地表条件越容易起沙,最容易起沙的情景相当于松散、裸露、干燥的地表。通过与过去10年同期的降水、温度等参数对比,也有助于量化分析这些气候条件对今年春季大规模沙尘频发的影响。

我们以中国北方和蒙古的所有荒漠地区作为潜在沙尘源区,以最大可能输沙量计算为基础,将代表地表活跃程度的沙丘活化指数(M)归一化为0—1作为起沙程度系数,即最容易起沙的地方为1,受降水等因素影响、相对不容易起沙的地方起沙程度低,二者相乘得到对起沙量的估计;在所有被吹蚀物质中,能够远距离传输的主要为尘(PM_{10}),其在起沙总量中的比例为起尘系数 α ,根据中国北方主要沙尘源区的452个实测资料,其值在沙漠腹地大约为1%,而在戈壁、干旱草地地区大约为3%^[21]。由

此,我们提出了新的地表起尘量估算方法,并进一步计算出中国北方及蒙古荒漠在此次大风过程的所有起尘量。这一方法综合了起尘过程的短时风力因素和月尺度的气候和地表状况,与以往研究的一些起尘量估算方法有相似性^[22-23],因而估算结果有较好的一致性。某一时刻、某一计算区域内起尘量的计算方法为:

$$Q_i = q_i \cdot \alpha \cdot (M - M_{\min}) / (M_{\max} - M_{\min}) \quad (1)$$

$$q_i = 0.163 \times (u - u_i)^{1.9} \times \rho / \rho_0 \quad (2)$$

$$M = W / (P_M / P_E) \quad (3)$$

$$P_E = 0.19 \times (20 + T_i)^2 (1 - r_i) \quad (4)$$

式中: Q_i 为起尘量(t); q_i 是每小时单位宽度(m)上的沙尘通量(kg); u 是风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); u_i 是起动风速,可取 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),根据标准大气密度($\rho_0, 1.293 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和温度、压力等数据,使用伯努利方程估算; M 为计算网格内的沙丘活化指数, M_{\max} 、 M_{\min} 分别为研究区域内 M 的最大、最小值; W 为风力因子,是关于月均风速的函数, $W \propto U^3$; P_M 为降水因子; P_E 为蒸散发因子; P_M 取当月与前月降水量的均值,以表达降水对土壤风蚀影响的延迟效应。 T_i 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$); r_i 为月相对湿度(%)。

需注意的是,输沙量的计算相比经典的拜格诺公式以及RWEQ等土壤风蚀方程^[24]中的风力因子,系数是更低的,因而估计值更为保守。同时在 q_i 的计算中,我们引入 ρ/ρ_0 ,以表达不同区域气温的较大差异导致空气密度的变化,而空气密度与空气动能线性相关,会直接影响气流侵蚀、搬运沙尘的能力^[25],因此,提出的方法更加全面,更适用于本次研究的大范围区域。

目前,已有多多个可考虑风力、地表特征、土壤粒径、湿度等要素的全球或区域尺度起尘量估算气象模型^[26-27]。然而关于地表起尘量、沙尘传输量的估算等工作仍然存在很大的不确定性,计算结果往往存在巨大的差异^[28]。一方面因为各个模型之间考虑的机制有差别,另一方面是土壤粒径分布、水平和垂直通量等局地尺度的数据很难在大范围研究区内获得准确结果,且由于尺度差别大,模型估算的结果也难以用若干观测点的资料进行评估。本研究采用的方法是基于观测结果提出的经验公式,包含了表达实时风力、温度、气压的数据,在反映实际起尘量方面具有优势;同时,考虑了较长时间内的气候背景资料,也能够较为全面地反映多种影响要素。

1.3 数据来源

2010—2021年的月均气温、降水、相对湿度、风速,以及今年3月14—15日的小时时间精度的风速数据,均选择欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析资料(<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>),空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。潜在起沙源区范围为中国、蒙古的所有荒漠区域,数据来源为1:200万中国沙漠分布图^[29]和蒙古沙漠化地图集^[30]。

2 结果与分析

2.1 气候背景条件变化

相比过去10年的平均值,2021年3月,蒙古中东部的戈壁地区月均温度显著偏高,达到 5°C 以上(图2A),而降水减少(图2B)、湿度降低(图2C),风速却显著增加(图2D),因此地表活化程度显著偏高;同期中国中东部的沙漠、沙地温度增高 1°C 左右,整体降水偏高,尤其是毛乌素沙漠、库布齐沙漠等地区,北方大部分地区风速降低,地表活化程度偏低;新疆大部分地区温度略微偏低,但新疆东部及河西走廊西端相对风速明显较高。总体来看,蒙古荒漠地区的中东部,以及中国新疆东部和河西走廊西端的荒漠地区是最容易起沙的区域(图3A,图中数值归一化即为 M),地表起沙活跃程度普遍增加200%以上(图3B)。

2.2 地表起尘过程变化

从各时刻最大可能输沙量反映的风力因子可以看出,此次蒙古气旋导致的强风过程,于3月14日在蒙古中部向东、南发展,引起了不同区域地表起沙量的差异,该日,中国境内风力还较弱,风沙活动不显著(图4A、B);15日蒙古境内的大风侵蚀过程已经显著下降,中国新疆东部和河西走廊西端开始增强(图4C、D)。

从不同时刻各区域的起尘量估计可以看出,14日,蒙古荒漠的中东部大范围地区都有强烈的起尘过程,不断向东南发展(图5),并于15日逐渐减弱;15日中国新疆和河西走廊西端地区风力加大的地区,形成了第二轮的大范围起尘过程,总体强度略低,但自西向东影响的范围更大(图6)。这与卫星监测表明的沙尘云团位置一致,说明使用的方法可以准确判断起尘源区及其贡献量。

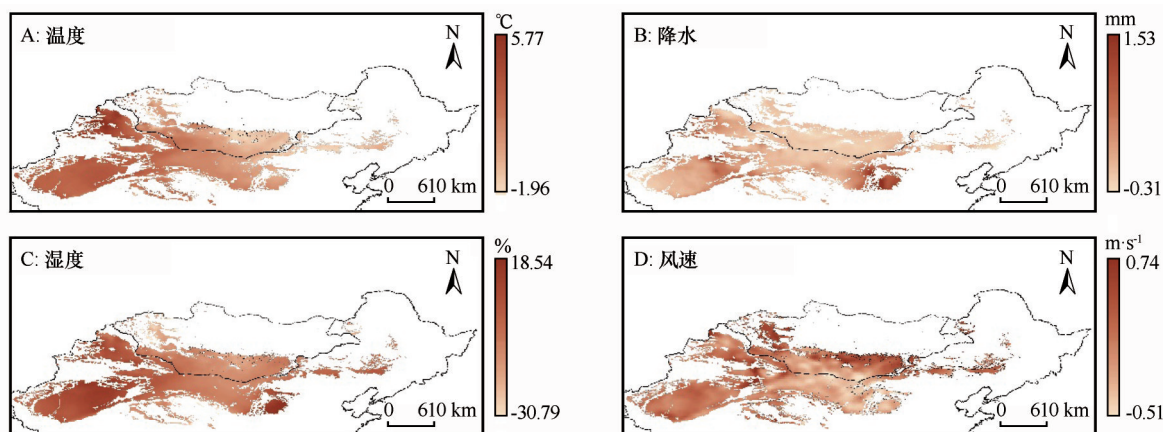


图2 2021年3月各气候参数相对过去十年平均值的变化

Fig.2 Changes of climatic factors at March 2021 compared to the average values of the past 10 years

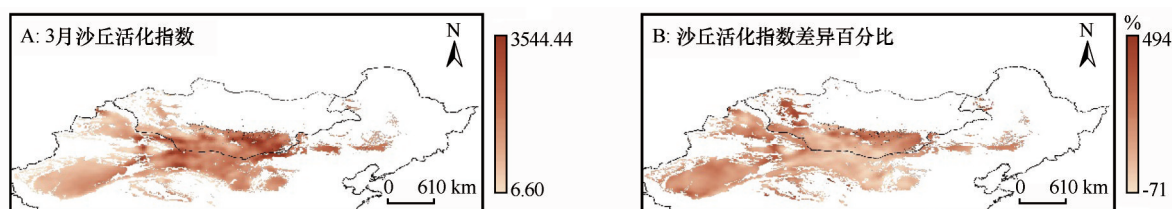
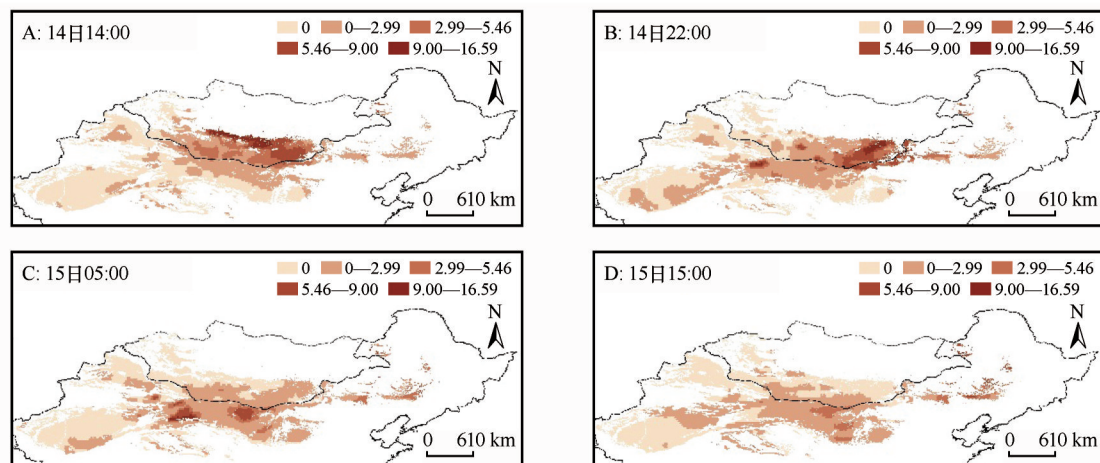


图3 2021年3月沙丘活化指数(A)及相对过去十年的变化(B)

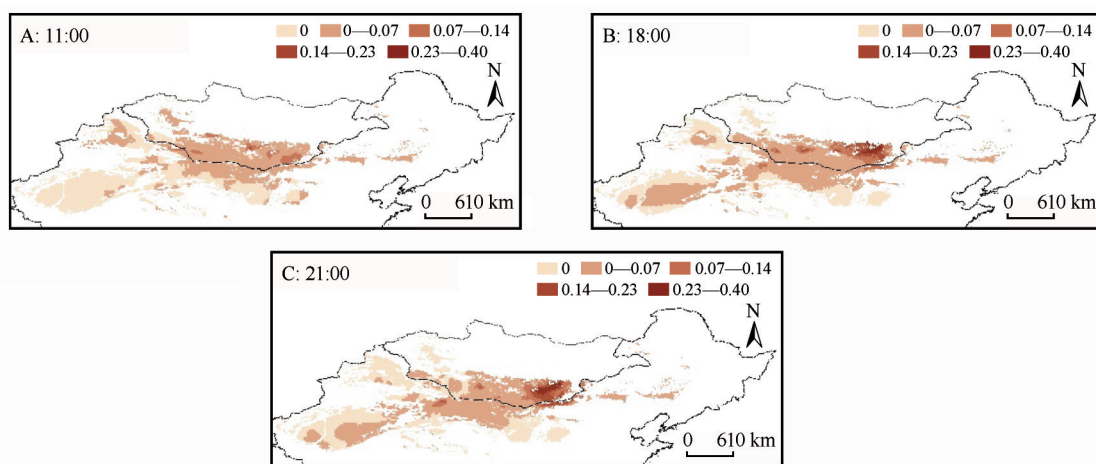
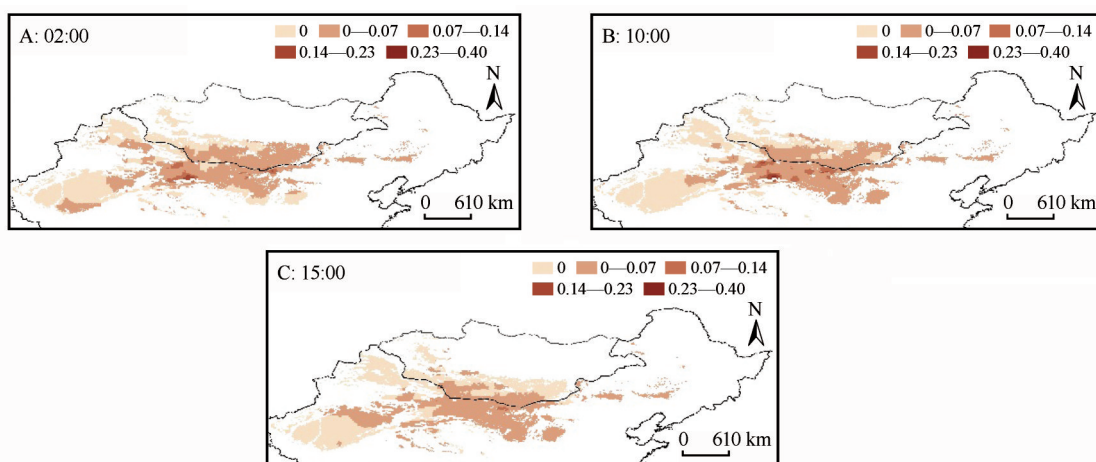
Fig.3 The dune activity indexes at March 2021 (A) and their variations compared to the average of past 10 years (B)

图4 2021年3月14、15日典型时刻东亚中部地表最大可能输沙量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)变化Fig.4 Sand drift potentials ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) across central East Asia at representative hours of March 14 and 15

2.3 起尘源区贡献量

我们提取出起尘量较高的时刻,地表数值大于全域平均值的高值区总和,作为区域总起尘量的估计,可发现在14日的过程中,蒙古境内起尘量峰值(15:00)为78 352 t,此时中国境内为14 067 t;15日10:00中国境内为起尘量峰值为41 727 t,此时蒙古境内已降低为7 609 t。14日00:00—24:00起尘过程主要发生在蒙古,起尘量为 7.70×10^5 t,中国境内为

2.62×10^5 t,起尘量占比分别为75%和25%;15日00:00—24:00,起尘过程主要在中国境内,总起尘量为 6.03×10^5 t,占84%,而对应时间段内蒙古仅为 1.12×10^5 t,占16%。两日总的起尘量约为 1.75×10^6 t,与使用全球模式模拟的整个东亚区域全年约 5.40×10^7 t^[31]或 5.00×10^7 t^[32]起尘量较为吻合;其中蒙古境内占50.5%,中国占49.5%,也与气象模式分析的外部源区对中国北方沙尘30%—60%的贡献率一致^[22]。

图5 14日不同时刻地表起尘量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)估计Fig.5 Dust lift amount ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) at different hours of March 14图6 15日不同时刻地表起尘量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)估计Fig.6 Dust lift amount ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) at different hours of March 15

3 讨论

3.1 强烈沙尘活动的原因

气候背景。2021年前两个月蒙古气温显著偏高,降水偏少,而植被尚未开始生长,大范围的地表干燥松散,一旦出现频繁的寒潮大风天气,就造成了强沙尘天气的连续出现。蒙古高原及中国北方地区大风日数的增减受气候的周期性变化影响,今年强沙尘天气陡增,可能是因为反厄尔尼诺事件的高峰期到来,与2000年的情景相似^[13],反映了大气环流的年代际变化特征^[33],也预示着最近两年是沙尘暴的高发期。在全球变暖的背景下,东亚地区冬季增温明显,即使在全年降水增多、风速降低的情境下,也可能导致冬季地表更加干燥和风蚀加剧^[34]。

地表状况。最近十多年,是中国北方沙区从沙漠化快速发展到逆转的时期,三北防护林、京津风沙源治理^[35]等重大生态建设工程成效显著,植被覆盖度显著增加,土地沙化面积从20世纪90年代后期的年均扩展3 436 km^2 改变为每年减小1 980 km^2 (根据第二次、第五次中国荒漠化和沙化状况公报),一定程度上遏制了局地起沙,并有效拦截部分近地面的沙尘。使用RWEQ模型对中国北方植被的防风固沙效益进行估算,可知2020年全年由于荒漠地区植被的作用,减少了 8.98×10^9 t的地表物质风蚀和 7.26×10^6 t以上的起尘量,即如果没有任何植被,起尘量可能达到现在全年起尘量的10倍以上。

但蒙古78%的国土面积受荒漠化影响,23%面积受到严重或极严重风蚀,尤其是中南部的广大荒漠地区,受草原草场超载畜牧、矿产开采等因素影响,仍处在土地迅速沙化的过程中(图7),其中2000

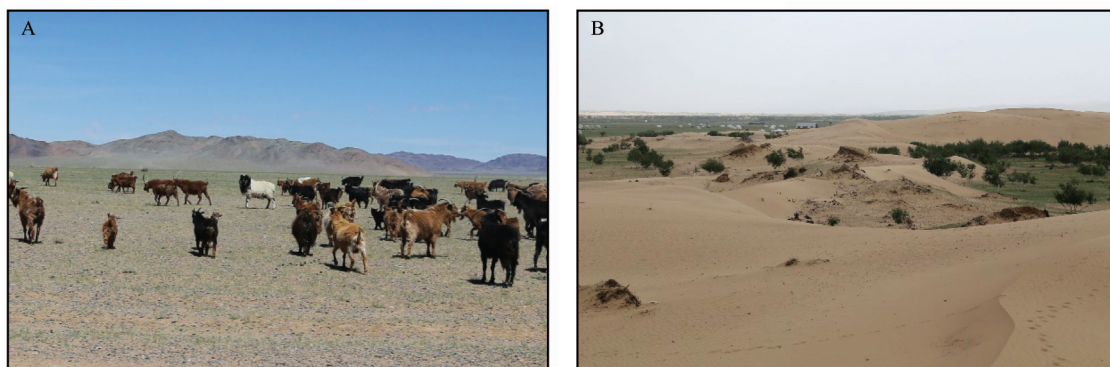


图7 蒙古戈壁阿尔泰省的草地超载畜牧(A,拍摄于2019年6月4日)和前杭爱省地表沙化状况(B,拍摄于2019年6月10日)

Fig.7 Overgrazing at Altai Province (A, photo taken on Jun 4, 2019) and land desertification at Ovorkhangai Province (B, photo taken on Jun 4, 2019) of Mongolia

—2010年极严重风蚀地的面积几乎翻倍^[30],导致可释放沙尘的源区和地面沙尘的供应量增多,尤其是正在沙化的地表贡献沙尘的比例更高^[22]。这与高精度沉积记录的分析结果一致^[36]。因此,自然和人为因素都是蒙古荒漠化和今年3月份大规模沙尘暴的驱动因素,但人为活动对沙尘暴增多的影响可明显超过气候变化的作用^[37]。

3.2 防治对策

沙尘丰富的干旱荒漠地表,只有风力减弱的时期才会趋于稳定,否则需要人工干预或种植植被等方式才能抵抗更大的风力侵蚀作用^[14]。因此,积极开展人工防治措施,包括减少荒漠地表的扰动、增加植被覆盖度,仍然是控制沙尘活动的主要方式。

减少沙尘对空气污染和人口健康危害的最有效方法,是在源头进行控制,因为沙尘一旦悬浮进入大气,就很难拦截阻挡。境外沙源对中国境内的沙尘天气一直都有重要影响^[22],今年春季几次大范围沙尘过程都是起源于蒙古,该沙尘源区海拔相对较低,主要影响临近的中国内蒙古、京津地区和韩国、日本^[28]。因此,控制蒙古境内的风蚀起沙最重要,而其中最关键的是防治沙漠化,尤其是正在快速发展的区域,包括中戈壁省、东戈壁省等地。蒙古的沙漠化也受到降水减少、气温升高的自然因素影响,以及过度放牧、开垦等人为作用,因此其防治需要系统的生态工程及对应政策的实施;在当前蒙古缺少风沙灾害防治和生态环境提升的科研、人力、财力支撑的形势下,加强研究、对策、措施等各方面的国际合作是必不可少的。

在沙尘向京津方向传输的途径中,如果没有沙

尘补给、或植被覆盖度较高,可拦截部分近地面的沙尘,尤其是较粗的颗粒物。因此,中国京津风沙源治理区范围内的生态环境建设可发挥重要作用。

中国新疆东部和河西走廊西端的沙漠、戈壁区域也是容易造成中国中东部地区沙尘天气的主要源区。这些区域由于极端干旱的气候,不适宜实施大规模的植被建设工作,可通过加强绿洲防护林建设减少沙漠区域城乡居民点的风沙危害,同时注意保护荒漠地表免遭扰动,减少风蚀。

4 结论

2021年春季,中国北方总体较以往不容易起尘,而蒙古中东部的荒漠地区增温显著、降水减少,地表更容易起沙扬尘;受强烈的气旋天气系统影响,中国河西走廊西端和新疆东部也大量起尘,形成了远超过去10年的沙尘暴天气过程。3月15日影响华北地区的强沙尘暴,有75%的沙尘是于3月14日起源在蒙古。随后16、17日的沙尘,有84%的来自于15日中国北方和西北,但总起尘量减小了31%。14、15日两天,境内外沙尘源区的贡献基本相当。

蒙古退化的生态环境是东亚中部沙尘暴强度增加的原因之一。蒙古沙尘源得到控制,中国生态治理的成效才能够得到更客观的显现。

参考文献:

- [1] Shao Y P. Physics and Modelling of Wind Erosion [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2009: 117–390.
- [2] Sun J M, Ding Z L, Liu T S, et al. Desert distributions during the glacial maximum and climatic optimum: example of China [J]. Episodes, 1998, 21(1): 28–31.
- [3] Hopcroft P O, Valdes P J, Woodward S, et al. Last glacial maxi-

- num radiative forcing from mineral dust aerosols in an Earth system model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(16): 8186–8205.
- [4] Mahowald N, Kohfeld K, Hansson M, et al. Dust sources and deposition during the last glacial maximum and current climate: a comparison of model results with paleodata from ice cores and marine sediments [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D13): 15895–15916.
- [5] Grigholm B, Mayewski P A, Kang S, et al. Twentieth century dust lows and the weakening of the westerly winds over the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(7): 2434–2441.
- [6] 张莉, 丁一汇, 任国玉. 中国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析[C]//中国气象学会. 新世纪气象科技创新与大气科学发展: 中国气象学会2003年年会“气候系统与气候变化”分会论文集. 北京: 中国气象学会, 2003: 5.
- [7] 杨晓军, 张强, 叶培龙, 等. 中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 245–255.
- [8] Yin Z H, Wan Y, Zhang Y J, et al. Why super sandstorm 2021 in North China [J]. *National Science Review*, 2021, 8(9): nwab165.
- [9] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954–2002年)[J]. *科学通报*, 2003(11): 1224–1228.
- [10] Zhao X J, Zhuang G S, Wang Z F, et al. Variation of sources and mixing mechanism of mineral dust with pollution aerosol: revealed by the two peaks of a super dust storm in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2007, 84(3): 265–279.
- [11] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S, et al. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D23): 28041–28047.
- [12] 陈磊, 顾润源, 姜学恭, 等. 内蒙古中西部一次强沙尘暴天气过程的诊断分析I: 背景场分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 137–141.
- [13] 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(5): 513–521.
- [14] Tsoar H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate [J]. *Physica A Statistical Mechanics and its Applications*, 2005, 357(1): 50–56.
- [15] Shi L, Zhang J H, Yao F M, et al. Drivers to dust emissions over dust belt from 1980 to 2018 and their variation in two global warming phases [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 767(1): 144860.
- [16] 毛东雷, 蔡富艳, 雷加强, 等. 新疆策勒不同下垫面大气降尘时空分布特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(6): 1222–1229.
- [17] 徐立帅, 郑伟, 郑新倩, 等. 塔里木盆地南缘策勒绿洲荒漠大气降尘特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2018, 12(4): 58–64.
- [18] 凌裕泉. 最大可能输沙量的工程计算[J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 30–36.
- [19] Niu Q H, Qu J J, Zhang K C, et al. Thermodynamic effects on particle movement: wind tunnel simulation results [J]. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(2): 178–187.
- [20] Lancaster N. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, Southern Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 1988, 14(3): 233–244.
- [21] Wang H B, Jia X P, Kuan L, et al. Horizontal wind erosion flux and potential dust emission in arid and semiarid regions of China: a major source area for East Asia dust storms [J]. *Catena*, 2015, 133: 373–384.
- [22] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Sensitivity of Asian dust storm to natural and anthropogenic factors [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(7): L07210.
- [23] Tanaka T Y, Chiba M. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 52(1): 88–104.
- [24] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(2): 183–189.
- [25] Han Q J, Qu J J, Dong Z B, et al. The effect of air density on sand transport structures and the adobe abrasion profile: a field wind-tunnel experiment over a wide range of altitude [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2014, 150(2): 299–317.
- [26] Tanaka C Y, Chiba M. Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2005, 83(A): 255–278.
- [27] Wang Z F, Hiromasa U, Huang M Y. A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, 105(D22): 26947–26959.
- [28] Shao Y P, Wyrwoll K-H, Chappell A, et al. Dust cycle: an emerging core theme in Earth system science [J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181–204.
- [29] 王建华. 中国1:200万沙漠分布图(1974). 国家青藏高原科学数据中心[Z/OL]. DOI: 10.3972/westdc.009.2013.db. CSTR: 18406.11.westdc.009.2013.db.
- [30] Tsogtbaatar J, Khudulmur S. Desertification Atlas of Mongolia [M]. Ulaanbaatar, Mongolia: Institute of Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, 2014: 1–43.
- [31] Chao L, Mahowald N M, Corral J D. Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D15): AAC 5–1.
- [32] Miller R L, Tegen I, Perlwitz J. Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D04203): 1–24.
- [33] 康杜娟, 王会军. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2005, 36(11): 1096–1102.
- [34] Liu B L, Qu J J, Kang S C. Response of dune activity on the Tibetan Plateau to near future climate change [J]. *Climate Research*, 2016, 69(1): 1–8.
- [35] 黄麟, 吴丹, 孙朝阳. 基于规划目标的京津风沙源治理区生态

- 保护与修复效应[J].生态学报,2020,40(6):1923–1932.
- [36] 张爽,徐海,蓝江湖,等.中国北方近500年沙尘暴活动及机制[J].中国科学(D辑):地球科学,2021,51(5):783–794.
- [37] Chen F H, Chen S Q, Zhang X, et al. Asian dust-storm activity dominated by Chinese dynasty changes since 2000 BP [J]. Nature Communications, 2020, 11(1):992.

Estimation on the dust lift amount and source contribution of the heavy dust weather in mid-March 2021 over Central East Asia

Liu Benli^{1ab}, Peng Wanyue^{1a,2}, Liu Shulin^{1a}, Yang Ting³

(1. a. Key Laboratory of Desert and Desertification / b. Research Station of Gobi Desert Ecology and Environment in Dunhuang of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In the middle of March 2021, a persistent dust weather broke out in central East Asia including most parts of northern China, which aroused people's high attention to the dust source area and the benefit of the ecological construction project. Using high precision and large range of meteorological data, this paper calculated the dust driving conditions on the ground and the sand transport conditions during the strong wind process, and estimated the dust lift amounts at different hours. Then, the dust contribution rates of Mongolia and northern China were obtained for the days of 14th and 15th. The results show that, compared with the past ten years, northern China is not prone to emit dust, while desert areas in central and eastern Mongolia tend to rise more dust due to significant temperature increase and decreased precipitation. It shows that 75% of the dust in the strong dust storm in Beijing on March 15 was raised on the 14th in Mongolia, while 84% of the dust in the followed larger storm on the 16th and 17th was raised from North and Northwest China on the 15th. The total dust amounts inside and outside the border are basically the same.

Key words: dust storm; Central East Asia; dust lift amount; climate change