

京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化

赵晓萌^{1,2,3}, 程宏^{1,2,3*}, 蒋宁^{1,2,3}, 邹学勇^{1,2,3}, 吴波⁴, 蒋玲梅³, 张恺笛^{1,2,3}, 贺伟伟^{1,2,3}

1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875;

3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;

4. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

* 联系人, E-mail: chengh@bnu.edu.cn

2022-05-23 收稿, 2022-08-12 修回, 2022-08-12 接受, 2022-08-15 网络版发表

国家自然科学基金(42171003)、国家重点研发计划(2016YFC0500806)和地表过程与资源生态国家重点实验室自主课题(2022-ZD-01)资助

摘要 为了控制土壤风蚀及其产生的沙尘释放对京津地区大气环境的影响, 中国政府于21世纪初实施了具有重要战略意义的京津风沙源治理工程. 通过植树种草、轮牧禁牧、土地利用优化等措施, 丰富了区内生物多样性, 提高了区内植被盖度, 生态环境得到一定程度的改善. 基于野外调查、室内实验、遥感影像反演以及气象数据, 本文采用《全国水土流失动态监测规划(2018~2022年)》和《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》中指定的土壤风蚀模型, 计算了京津风沙源治理以来典型年份、土地利用变化和气候变化共计3种情形下土壤风蚀, 揭示了京津风沙源土壤风蚀模数和强度的时空格局及其演化规律, 明确了土地利用变化、气候变化对京津风沙源土壤风蚀时空格局的影响, 发现气候变化导致风蚀模数和面积的变率, 与当年对应的变率相当, 大于土地利用变化的影响. 此外, 土地利用变化情形风蚀面积总体减少, 尤其是2010~2015年间减小了4.10%, 说明京津风沙源治理工程发挥了重要作用, 为京津风沙源治理工程效益评估以及优化布局提供科学依据.

关键词 京津风沙源, 风蚀, 时空格局, 气候变化, 土地利用变化

土壤风蚀是干旱、半干旱以及部分湿润区最重要的生态环境问题^[1], 中国北方风蚀区风蚀面积高达188万km²^[2], 由此产生的地表沙尘释放及其输移过程^[3,4], 导致沙尘源区及其途经地区大气环境中可吸入颗粒物浓度急剧增加^[5,6], 甚至达到国家标准的54倍^[7], 严重威胁着人们的身体健康, 尤其是京津这样人口密集的地区^[8]. 因此, 土壤风蚀及其防治是生态文明建设的重要组成部分^[9].

21世纪初京津地区爆发的大范围沙尘暴、扬尘、扬沙等风沙灾害, 促使中国政府启动了京津风沙源治理工程. 经过20余年的治理, 京津风沙源植被盖度增加^[10-12]、生物多样性好转^[10]、风沙灾害减少^[8]、社会

可持续发展能力逐渐增强^[8]等方面得到共识, 但土壤风蚀还存在很大争议^[10,13,14]. 一是已有研究利用国外耕地风蚀模型^[15-18]估算京津风沙源区土壤风蚀^[13,14], 但是该区超过80%的面积并不是耕地, 那么耕地模型是否适用于其他土地利用还有相当多的工作^[19]. 即便是耕地, 不同地区土壤机械组成^[20]、土壤水分、作物种植类型以及耕作方式等的差异, 使得土壤风蚀存在明显的差异, 意味着耕地模型存在明显的区域性^[21], 其他非耕地模型CEMSYS^[22]、WEAM^[23]也类似. 二是利用适合中国北方风蚀区的耕地模型、灌草地模型、沙地(漠)模型^[2,24,25], 但是忽略了京津风沙源土壤含水率、砾石覆盖度等的区域差异及其对临界起动风速和风蚀

引用格式: 赵晓萌, 程宏, 蒋宁, 等. 京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化. 科学通报, 2023, 68: 238-253

Zhao X M, Cheng H, Jiang N, et al. Spatial and temporal evolution of soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 238-253, doi: [10.1360/TB-2022-0300](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0300)

模数的影响^[10], 导致已有的研究不能真实地反映实际情况。

为了准确估算京津风沙源土壤风蚀, 本文结合野外实地调查、气象数据以及遥感影像等手段, 利用《全国水土流失动态监测规划(2018~2022年)》《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》中指定的风蚀模型, 计算了典型年份、土地利用变化和气候变化情形下京津风沙源土壤风蚀, 揭示京津风沙源土壤风蚀动态变化, 为京津风沙源治理工程宏观战略的调整与优化提供决策依据。

1 研究方法

1.1 研究概况

京津风沙源治理工程区涉及北京市、天津市、内蒙古自治区、河北省、陕西省、山西省的138个县(市、区、旗)^[26], 总面积为 $70.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。京津风沙源治理工程涉及暖温带湿润区、温带半湿润区、温带半干旱、干旱区, 年均气温和降水量分别为 $0.6 \sim 12^\circ\text{C}$ 、 $95 \sim 595 \text{ mm}$, 主要土壤类型有石质土、黑钙土、栗钙土、风沙土等。为了叙述方便, 按照黄晓霞等人^[26]的方案将京津风沙源划分为科尔沁沙地、大兴安岭南段、燕山丘陵、浑善达克沙地、典型草原、晋北山地丘陵、毛乌素沙地、库布齐沙地、荒漠草原、河套平原以及农牧交错带。

1.2 土壤风蚀模型

本文采用的土壤风蚀模型包括如下内容。

耕地风蚀模型:

$$Q_1 = 0.018(1 - W) \sum_{j=1} T_j \exp \left\{ a_1 + \frac{b_1}{z_0} + c_1 [(AU_j)^{0.5}] \right\}, \quad (1)$$

式中, Q_1 是耕地风蚀模数($\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), W 是表土湿度(%), T_j 是第 j 个风速等级的累计时间(min), Z_0 是地表粗糙度, A 是与耕作相关的修正系数, U_j 是第 j 个风速等级(m/s); a_1 、 b_1 、 c_1 分别为 -9.208 、 0.018 和 1.955 。

草(灌)地风蚀模型:

$$Q_2 = 0.018(1 - W) \sum_{j=1} T_j \exp \left(a_2 + b_2 V^2 + \frac{c_2}{AU_j} \right), \quad (2)$$

式中, Q_2 是草(灌)地风蚀模数($\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), V 是植被盖度(%), a_2 、 b_2 、 c_2 分别为 2.487 、 -0.001 和 -54.947 。

沙地(漠)风蚀模型:

$$Q_3 = 0.018(1 - W) \sum_{j=1} T_j \exp \left(a_3 + b_3 V + c_3 \frac{\ln(AU_j)}{AU_j} \right), \quad (3)$$

式中, Q_3 为沙地(漠)风蚀模数($\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), a_3 、 b_3 、 c_3 分别为 6.169 、 -0.074 和 -27.961 。

为了研究京津风沙源风蚀时空格局及其演化, 本文开展了以2000、2005、2010、2015年风蚀影响因子, 土地利用不变(2015年)但是其他因子发生变化, 以及土地利用改变但是其他因子不变(2015年), 3种情形下土壤风蚀计算。在这一过程中, 首先, 收集了2000、2005、2010和2015年的土地利用、整点风向风速、AMSR-E亮温数据、MODIS NDVI以及野外调查数据^[19]。其次, 按照国务院第一次全国水利普查土壤风蚀普查的方法, 将土地利用归类为耕地、沙地(漠)、草(灌)地和不可蚀地, 计算风力因子、表土湿度、植被盖度、地表粗糙度以及砾石盖度^[2]。最后, 利用土壤风蚀模型, 依次计算每半个月每个风速等级的风蚀模数, 累加每半个月不同风速等级以及所有半月情形, 得到京津风沙源土壤风蚀模数, 依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007), 确定土壤风蚀强度。

2 结果分析与讨论

2.1 京津风沙源风蚀时空格局

2.1.1 风蚀模数

2000、2005、2010、2015年京津风沙源风蚀模数分别为 2237.67 、 1524.95 、 1930.64 和 $1822.97 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图1), 对应的风蚀量为 157933.51 、 107630.28 、 136264.05 、 128664.17 wt 。无论是风蚀模数, 还是风蚀量, 都呈现出波动减小的趋势。风蚀量从2000~2015年减小了 18.53% , 说明京津风沙源治理工程发挥了重要的作用^[10,14]。其中, 2000~2005年风蚀量减小最为明显, 减小幅度为 31.85% , 但是相对于2005年, 2010年风蚀量增加了 26.60% , 不过2015年相对于2010年, 风蚀量减小了 5.58% 。随着京津风沙源治理工程的推进^[8], 植被盖度好转^[12], 生物多样性逐渐丰富^[27], 土地利用进一步调整与优化^[8], 使得土壤风蚀降低^[14]。但是相对2005年, 2010年风蚀大幅度增加, 说明风蚀不仅与人为活动有关, 还与气候变化息息相关^[10,13], 包括风速与作用时间^[28,29]、降雨量及其空间的分异^[30,31]导致植被盖度和表土湿度等的变化^[19,25]。无论是大于临界起动风速的风速平均

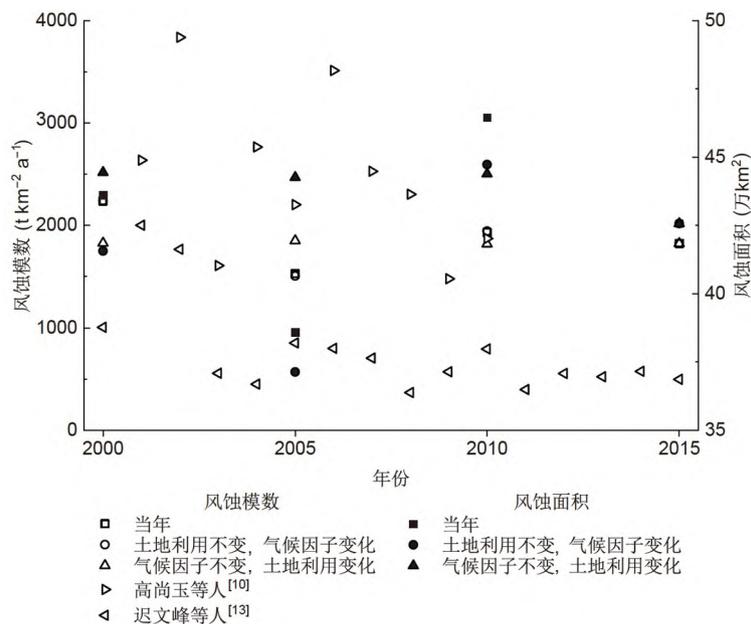


图1 京津风沙源不同情形下风蚀模数和风蚀面积
Figure 1 Wind erosion modulus and area under different scenarios in the Beijing-Tianjin sandstorm sources

值和累计时间, 还是表土湿度和植被盖度, 2005年均小于2010年. 其中, 大于临界起动风速的风速平均值和累计时间, 导致2005年京津风沙源风蚀量小于2010年. 从年均角度来看, 风速和累计时间分别增加了0.21 m/s、11.99 h. 风蚀发生的冬春季节差异更加明显, 譬如1、12月风速差为0.41、0.60 m/s, 累计时间差为56.82、69.06 h. 上述差异导致的风蚀量差异占总差异的74.48%. 2010年表土湿度和植被盖度大于2005年, 主要是前者降雨量明显大于后者所致. 京津风沙源降雨与风蚀的时间不同步, 土壤的渗透性使得表土湿度差异主要体现在雨季, 风蚀主要发生的冬春季节大致相当. 但是, 植被盖度还受前一年降雨量的影响^[32]. 譬如, 2005年降雨量偏低, 导致2006年春天发生了大范围的沙尘暴^[33], 仅北京市就承受了14次沙尘天气, 2006年4月17日晚上降尘量高达30.4万t^[34].

京津风沙源风蚀模数小于高尚玉等人^[10]、大于迟文峰等人^[13]的研究结果, 前者介于1477~3834 t km⁻² a⁻¹, 平均为2472.90 t km⁻² a⁻¹, 后者介于365~2087 t km⁻² a⁻¹, 平均为994.65 t km⁻² a⁻¹(图1). 可能的原因可以归纳为研究范围、方法以及数据源的不同. 高尚玉等人^[10]估算的是京津风沙源治理工程 I 期, 而本文是 II 期工程, 区别在于后者增加了毛乌素沙地、库布齐沙漠、河套平原以及一定面积的荒漠草原^[8], 使得下垫面状况、土壤可蚀性、风力因子等发生深刻变化^[19,25], 导致风蚀

模数不同. 迟文峰等人^[13]采用修正风蚀模型(RWEQ), 高尚玉等人^[10]和本文采用相同的风蚀模型, 只不过考虑到表土湿度、砾石覆盖等因素在土壤风蚀过程中的重要作用, 本文在风蚀模型中增加了表土湿度、砾石覆盖两个影响因素, 使之更加符合土壤风蚀的实际情况. 与此同时, 本文修订了粗糙度因子、完善了风力因子. 相对于高尚玉等人^[10]将粗糙度因子取值为0.5 cm, 本文利用大量的野外调查单元实际调查结果^[2]对粗糙度因子予以赋值, 平均值为0.06 cm. 相对于高尚玉等人^[10]仅仅使用京津风沙源内12个气象站的风速风向数据^[10], 本文使用了超过150个气象站的风速风向数据(图S1), 仅京津风沙源内接近100个, 使得风力因子更符合实际情况. RWEQ是基于美国西部大平原耕地风蚀模型, 因模型因子存在因子交叉、构建基础存在一些问题^[21], 导致难以推广^[19], 更不要说耕地面积不到20%的京津风沙源. 虽然一些学者利用RWEQ估算了非耕地风蚀^[14], 但是同一区域相同时期不同学者的估算结果相差数倍至数量级^[13,35,36]. 一些学者的估算结果并不是当年实际风蚀^[10,13]. 譬如迟文峰等人^[13]利用1990、2000、2010、2015年土地利用估算了1990~2015年京津风沙源风蚀^[13], 高尚玉等人^[10]使用2000年的土地利用计算了2001~2010年的土壤风蚀模数^[11]. 本文的方法与国务院第一次全国水利普查采用的方法一致, 估算结果与正镶白旗、定边县等野外观测、¹³⁷Cs

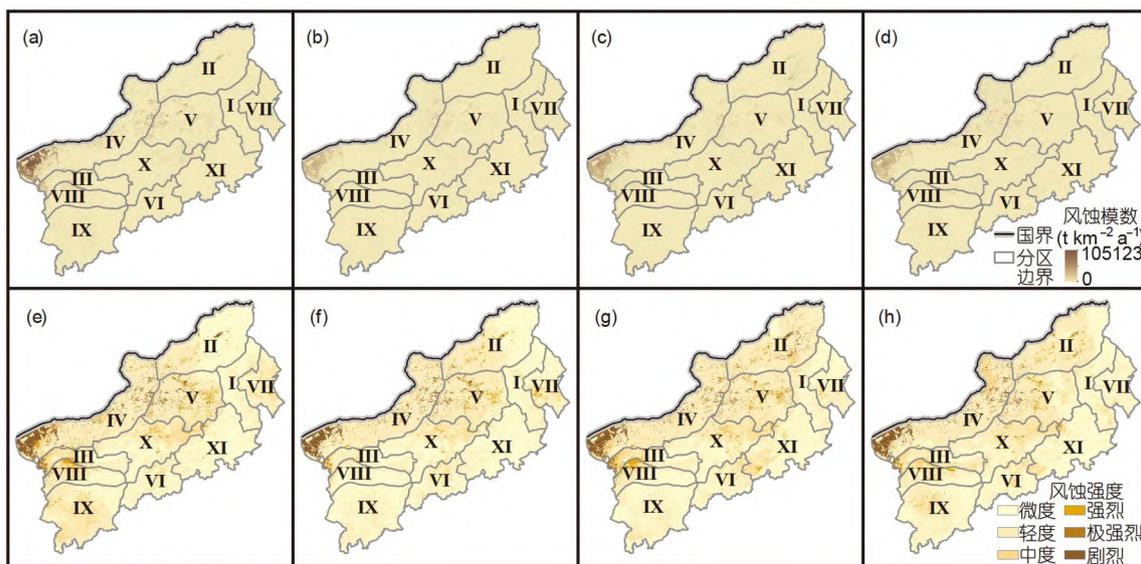
测定结果^[37-39]的平均误差为3.59%^[2],但是相同时期本文估算结果是RWEQ的2.23~3.68倍,这意味着RWEQ严重低估了京津风沙源土壤风蚀。相对于高尚玉等人^[10],考虑了表土湿度、砾石覆盖对风蚀的抑制作用及其空间差异,对粗糙度进行了修订和对风力因子进行了完善,使得估算结果更加符合实际情况,这也是本文结果小于高尚玉等人^[10]估算结果的原因。

京津风沙源风蚀模数总体从西北向东南逐渐降低,沙漠(地)高于周边地区,随着京津风沙源治理工程的推进,风蚀模数在空间上发生了明显的变化,不过风蚀模数最大的区域年际没有明显变化(图2),各亚区风蚀模数存在明显的不同。荒漠草原风蚀模数最大,是京津风沙源的2.67~2.98倍,不过年际差异较大,介于4265.44~6673.94 t km⁻² a⁻¹。河套平原和浑善达克沙地次之,风蚀模数与京津风沙源大致相当,平均为1864.97、1799.48 t km⁻² a⁻¹。其他亚区受气候因子、土地利用的影响,风蚀模数年际存在明显的不同,不过, Wald聚类分析将大兴安岭南部、典型草原、燕山丘陵划为一类,其余划为另一类,它们的风蚀模数平均为604.66、920.74 t km⁻² a⁻¹(图3)。总体来看,上述4类与风蚀模数空间分布一致(图2),风蚀模数较大的类或亚区分布在京津风沙源西北部,其次是除科尔沁沙地外的京津风沙源东部由北向南条带状分布,最后是其

余亚区。但是,各亚区每年风蚀模数大小顺序呈现不一致的情况(图3)。另外,2000、2005、2010、2015年浑善达克沙地、科尔沁沙地风蚀模数变化持续减小,其他亚区呈现出不同的变化趋势和变化幅度(图3)。大兴安岭南部、典型草原、晋北山地丘陵以2010年为界,先增后减。荒漠草原、库布齐沙漠、毛乌素沙地、农牧交错带,相对于2000年,2005年有所降低,但之后持续增长。河套平原、燕山丘陵,呈现明显的降低、增长、降低的趋势。此外,相对于2000年,2015年荒漠草原、河套平原、浑善达克沙地、库布齐沙漠、科尔沁沙地以及毛乌素沙地风蚀模数均出现了不同程度的降低,其中荒漠草原更是下降了20.11%,不过晋北山地丘陵、典型草原、燕山丘陵有微小的增长,农牧交错带和大兴安岭南部几乎没有发生变化,说明京津风沙源治理工程在不同亚区发挥的作用不同。

2.1.2 风蚀强度

2000、2005、2010、2015年京津风沙源风蚀面积分别为43.61、38.58、46.45、42.52万km²,风蚀面积的变化趋势与风蚀模数基本一致(图1),不过幅度较小。从2000~2005年,风蚀面积减少了5.03万km²,减少幅度为11.53%。但是相对于2005年,2010年增加20.40%,不过2015年又减少了8.37%。总体来看,相对于2000年,2015年风蚀面积减少了约1.05万km²,减少幅度近2.41%,明



审图号: GS京(2022)0550号

图2 不同时期京津风沙源土壤风蚀模数和强度空间分布图。(a)~(d)分别为2000、2005、2010、2015年风蚀模数;(e)~(h)分别为2000、2005、2010、2015年风蚀强度

Figure 2 Distribution of wind erosion modulus and intensity in the Beijing-Tianjin sandstorm sources in different years. (a)~(d) represents wind erosion modulus in 2000, 2005, 2010 and 2015, respectively; (e)~(h) represents wind erosion intensity in 2000, 2005, 2010 and 2015, respectively

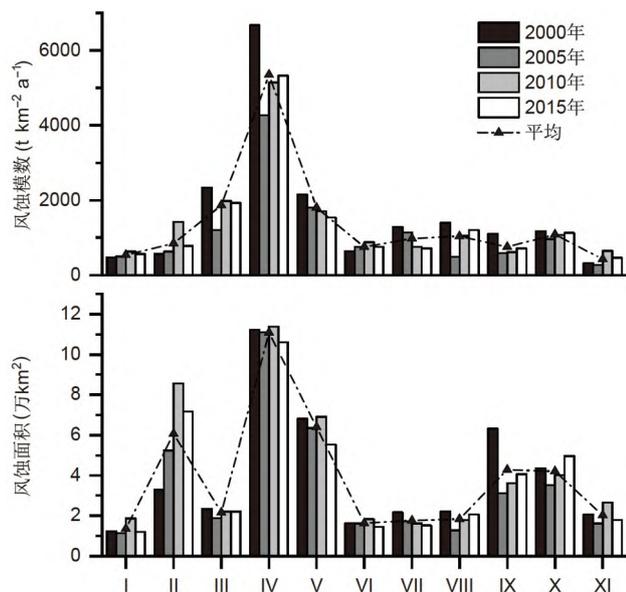


图3 不同时期京津风沙源各亚区风蚀模数和面积
Figure 3 Wind erosion modulus and area of each subregion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources in different years

显小于风蚀模数的减小幅度，意味二者的变化并不同步。京津风沙源风蚀面积占比介于54.67%~65.81%之间，尽管轻度、中度侵蚀面积在风蚀面积中的占比分别为79.00%、12.56%，但是轻度侵蚀的平均风蚀模数介于897.77~1009.68 $t\ km^{-2}\ a^{-1}$ (图2)。因此，京津风沙源土壤风蚀依然严重，需要长期、持续地开展土壤风蚀防治。从不同时期不同强度侵蚀面积变化来看，相对于2000年，2005年各强度风蚀面积均减少，分别减少了2.47%、50.27%、31.96%、9.61%、18.09%，但2010年相对于2005年又增加了16.99%、50.47%、45.42%、27.87%、8.01%。2015年相较于2010年，除轻度和极强烈侵蚀面积分别增加了22.69%、11.00%外，中度、强烈、剧烈侵蚀面积分别减小13.79%、50.45%、8.37%。从监测期变化来看，2015年相对于2000年，轻度侵蚀面积增加了1119.75 km^2 ，其他强度侵蚀面积出现不同程度的减少。其中，中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀分别减少了5567.5、1679.25、4051.56、340.31 km^2 ，对应的变化幅度为8.19%、14.71%、42.73%、1.80%。这说明京津风沙源治理发挥了很好的作用。

京津风沙源西北部风蚀强度高，风蚀面积和占比大，中部地区次之，最后是东南部地区(图2)。剧烈侵蚀集中分布在荒漠草原；极强烈侵蚀主要分布在河套平原西部，荒漠草原、浑善达克沙地等零星分布；强烈侵蚀主要分布在库布齐沙漠、浑善达克沙地；中度、轻

度侵蚀遍及整个京津风沙源。从不同时期各亚区不同强度风蚀面积变化来看，2000~2005年荒漠草原风蚀总面积下降了约0.12万 km^2 ，其中中度侵蚀几乎全部转为轻度侵蚀。浑善达克沙地除强烈侵蚀面积略有增加外，其他强度风蚀面积均有所减少，减少面积约为0.46万 km^2 ；典型草原风蚀东移，主要由微度侵蚀转为中度侵蚀，约为1.91万 km^2 ；晋北山地丘陵约0.14万 km^2 轻度侵蚀转为中度侵蚀；其余亚区所有强度的侵蚀面积均减少。2005~2010年，晋北山地丘陵、燕山丘陵、库布齐沙漠风蚀面积有所增加，主要分布在前两者交界处和后者西部。典型草原风蚀东移、毛乌素沙地北部风蚀加剧，除强烈侵蚀略有减少外，其他强度风蚀面积均增加。河套平原、大兴安岭南部和农牧交错带轻度、中度和极强烈侵蚀面积减少，减少面积介于10.56~887.13 km^2 ，其他强度风蚀面积增加。荒漠草原和浑善达克沙地剧烈侵蚀面积有所下降，但中度、轻度侵蚀面积分别增加了0.64、0.55万 km^2 。科尔沁沙地风蚀减弱，中度及以上的风蚀面积均减少。2010~2015年农牧交错带西南部、毛乌素沙地北部、库布齐沙漠东部和河套平原风蚀明显加剧，风蚀面积增加了96.62~9430.94 km^2 ，其余亚区减少了0.09~1.40万 km^2 。尽管风蚀面积减小，但风蚀强度的空间变化需要予以重视。譬如，荒漠草原东部存在轻度、极强烈侵蚀分别转为中度、剧烈侵蚀。总体来看，2000~2015年荒漠草原重点风蚀区由西北和北部转变为西北和东北部；典型草原和农牧交错带分别向东和西移动，风蚀面积增大；4个沙漠(地)风蚀面积有所减少。京津风沙源风蚀面积的上述变化，受控于大于临界起动风速的风速平均值和累计时间及其空间分布(图S2和S3)。

京津风沙源风蚀空间分布决定了各亚区存在明显的分异(图2)。荒漠草原风蚀面积最大，其他依次是浑善达克沙地、典型草原、毛乌素沙地、农牧交错带、河套平原、燕山丘陵、库布齐沙漠、科尔沁沙地、晋北山地丘陵以及大兴安岭南部，对应风蚀面积为11.08、6.40、6.06、4.28、4.21、2.16、2.03、1.84、1.76、1.63、1.36万 km^2 。不同强度侵蚀呈现不同的特征。轻度侵蚀超过10%的亚区有荒漠草原、浑善达克沙地、典型草原和毛乌素沙地，对应的比例为24.73%、15.63%、16.21%、10.63%；中度侵蚀超过10%的亚区有农牧交错带、荒漠草原和毛乌素沙地，对应的比例为20.61%、16.33%、11.69%；强烈侵蚀超过10%的亚区有浑善达克沙地、典型草原、库布齐沙漠、河套平

原、农牧交错带, 对应的比例为29.03%、14.16%、14.00%、11.13%、12.03%; 极强烈侵蚀主要分布在荒漠草原、浑善达克沙地, 分别占34.88%、30.46%; 剧烈侵蚀的84.38%分布在荒漠草原. 从风蚀面积占比来看, 荒漠草原最大, 其他依次是浑善达克沙地、河套平原、典型草原、农牧交错带、库布齐沙漠、毛乌素沙地、科尔沁沙地、晋北山地丘陵、大兴安岭南部以及燕山丘陵, 分别为94.34%、86.11%、66.20%、62.99%、58.80%、53.47%、50.14%、49.33%、42.51%、31.97%、26.12%.

综上所述, 荒漠草原是风蚀面积最大的亚区(图3, 4), 与前人研究结果一致^[10], 而且风蚀面积占比相当, 这是因为前人研究中荒漠草原及其风蚀面积分别为本文的54.68%、54.58%. 不过荒漠草原轻度、中度侵蚀分别减少13.02%、3.60%, 但由于本文研究范围的扩大(主要是西部), 极强烈和剧烈侵蚀增加, 分别占京津风沙源极强烈和剧烈侵蚀总面积的34.88%和84.38%, 这与风力因子较强(图S2)、土地利用单一^[40]、植被盖度低^[41]、表土湿度低^[42]有关. 高尚玉等人^[10]认为, 浑善达克沙地、科尔沁沙地是京津风沙源土壤风蚀的主体, 本文和其他学者^[13,14,43,44]支持前者, 但不支持后者, 主要是因为高尚玉等人^[10]的风蚀模数分别是本文的5.42、4.63倍, 导致浑善达克沙地、科尔沁沙地风蚀总面积的占比分别从95.92%、92.36%变化到14.95%、4.11%. 需要说明的是, 浑善达克沙地风蚀模数持续下降, 并不意味着风蚀面积也有类似的变化, 不过风蚀强

度向较低等级转化(图3). 再次是典型草原、农牧交错带及毛乌素沙地, 风蚀面积分别为60628.39、42104.03、42778.13 km², 总体上以轻度侵蚀为主, 尽管零星分布其他强度侵蚀. 考虑到京津风沙源治理工程 I 期不包括毛乌素沙地以及 I、II 期中农牧交错带范围不一致, 本文仅对比分析范围一致的典型草原. 高尚玉等人^[10]研究当中的风蚀面积(9.01万 km²)是本文的 1.50 倍, 但是以轻度侵蚀为主, 且风蚀模数(703.00 t km⁻² a⁻¹)略低于本文, 可能是京津风沙源治理和土壤风蚀因子完善及其空间变化所致. 2000~2015年 3 个亚区风蚀面积变化明显不同. 典型草原大幅度增加, 增幅达到118.01%; 农牧交错带波动增长, 变幅介于 -18.87%~14.19%. 毛乌素沙地波动减少, 2005年最低, 之后小幅度增长, 相对于2000年, 2015年减少了35.73%. 最后是大兴安岭南、燕山丘陵、晋北山地丘陵、河套平原与库布齐沙漠, 风蚀面积约为20000 km², 约占全区风蚀总面积的21.05%. 考虑到京津风沙源治理工程 I 期不包括河套平原与库布齐沙漠以及 I、II 期中晋北山地丘陵范围不一致, 本文仅对比分析范围一致的前两个亚区. 它们的风蚀面积^[10]大于本文, 主要体现在轻度侵蚀分别是本文的2.99、1.82倍, 造成上述变化的原因是京津风沙源治理工程使得轻度侵蚀转变为微度侵蚀. 相对于2000年, 2015年5个亚区风蚀面积均减少, 减少幅度从大到小依次为燕山丘陵、晋北山地丘陵、库布齐沙漠、河套平原、大兴安岭南, 对应的减幅为13.23%、10.25%、6.76%、5.47%、2.62%. 从风蚀面积在2000、2005、2010、2015年的变化来看, 河套平原和库布齐沙漠先减小后增加, 其他亚区先增加后减小, 对应的最低/高值出现在2005/2010年.

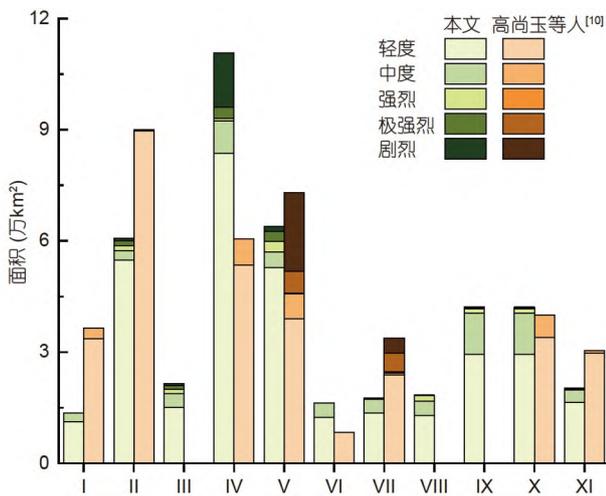


图 4 京津风沙源各亚区风蚀强度面积
Figure 4 The area of different wind erosion intensity of each subregion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources

2.2 土地利用变化对京津风沙源风蚀时空格局的影响

土地利用及其变化是土壤风蚀的重要原因, 京津风沙源治理使得土地利用发生深刻的变化^[45]. 因此, 评估土地利用变化对风蚀的影响有助于为京津风沙源综合治理规划、决策提供依据. 2000、2005、2010、2015年风力因子、植被盖度、表土湿度不变但是土地利用变化以及由此导致地表粗糙度改变情形下京津风沙源风蚀模数分别为1827.02、1849.82、1817.13、1822.97 t km⁻² a⁻¹(图1), 整体上呈现先增大后减小再增大的趋势, 但是幅度不大, 2000~2015、2005~2015、2010~2015年风蚀模数变化分别为4.05、26.86、

5.84 t km⁻² a⁻¹. 与之对应的2000、2005、2010、2015年风蚀面积分别为44.44、44.25、44.38、42.56万km² (图1), 整体上呈现先减小后增加再减小的趋势, 2000~2015、2005~2015、2010~2015年风蚀面积变化分别为1.88、1.69、1.81万km². 无论是风蚀模数, 还是风蚀面积, 变率均小于5%, 远低于风蚀模数变化大于0.1 t km⁻² a⁻¹的面积和变率(图5, 表1). 2000~2015、2005~2015、2010~2015年风蚀模数增加的面积分别为6.56、5.61、6.83万km², 减小的面积分别为8.01、7.82、7.47万km², 意味着风蚀模数变化的面积占京津风沙源国土面积的20.64%、19.02%、20.26%. 这说明直接利用风蚀平均模数/风蚀面积, 将严重低估土壤风蚀的实际变化. 不存在风蚀模数变化大于15000 t km⁻² a⁻¹的情形, 其他情形(0.1~200、200~2500、2500~5000、5000~8000、8000~15000 t km⁻² a⁻¹)占变化总面积的比例分别为16.87%、70.28%、12.33%、0.48%、0.03% (表1). 此外, 2000~2015、2005~2015、2010~2015年风

蚀模数净减小的面积为1.45、2.21、0.64万km², 这在一定程度上反映了治理的效果.

土地利用变化对京津风沙源土壤风蚀影响在不同时期存在明显空间分异(图5). 相对于2000年, 土地利用变化导致2015年一些区域风蚀加强/减弱, 但是不发生变化的区域约占80%, 而且风蚀加强和减弱区域呈现南多北少且交错分布, 这与区域性的土地利用、治理工程措施相关^[46]. 对于气候条件相对较好的南部地区主要以退耕还林为主, 辅以小流域治理、天然林保护^[47], 使得植被快速恢复, 风蚀减弱的面积增大^[45]. 随着区域社会经济的发展, 开垦了大量的土地用于大规模现代化农业生产(图S4), 导致风蚀加剧的面积增加. 相对而言, 北部地区主要是禁牧轮牧、圈养为主, 辅以人工种草、植被封育, 降雨少、气温低等使得植被恢复速度慢^[45]. 此外, 风蚀减弱的区域面积小, 相对分散, 涉及科尔沁沙地、大兴安岭南部、农牧交错带、晋北山地丘陵、河套平原、毛乌素沙地; 风蚀加剧的区域

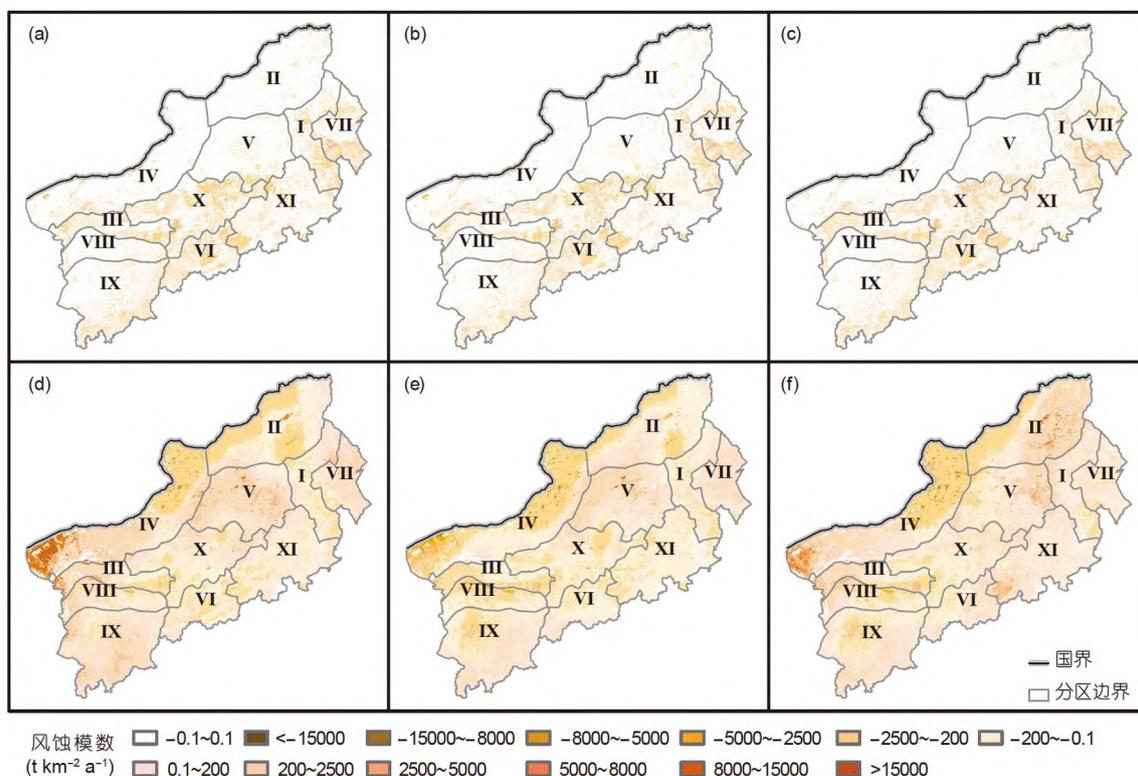


图5 土地利用和气候变化下京津风沙源风蚀模数变化空间分布. (a)~(c)分别为2000和2015、2005和2015、2010和2015年土地利用变化下风蚀模数变化; (d)~(f)分别为2000和2015、2005和2015、2010和2015年气候变化下风蚀模数变化

Figure 5 Distributions of the variations of wind erosion modulus under land-use and climate change scenarios in the Beijing-Tianjin sandstorm sources. (a)~(c) represents the variations of wind erosion modulus due to land-use change between 2000 and 2015, 2005 and 2015, and 2010 and 2015, respectively; (d)~(f) represents the variations of wind erosion modulus due to climate change between 2000 and 2015, 2005 and 2015, and 2010 and 2015, respectively

还包括分布相对集中的燕山丘陵亚区。

土地利用变化对京津风沙源土壤风蚀的影响在各个亚区呈现明显的分异。首先,库布齐沙漠、浑善达克沙地、荒漠草原、典型草原风蚀模数变化的面积占比低于京津风沙源平均占比,对应的值分别为10.83%、8.76%、7.45%、5.56%(图6),其他亚区(晋北山地丘陵、科尔沁沙地、农牧交错带、河套平原、大兴安岭南部、燕山丘陵、毛乌素沙地)分别为44.30%、40.51%、34.47%、34.45%、28.81%、24.17%、21.46%(图6)。其次,不同时期不同亚区风蚀模数变化存在明显的差异(图7)。相对于2000年,2015年风蚀模数变化的面积从大到小依次为农牧交错带、燕山丘陵、毛乌素沙地、晋北山地丘陵、科尔沁沙地、大兴安岭南部、河套平原、荒漠草原、浑善达克沙地、典型草原、库布齐沙漠,对应的面积为2.54、2.00、1.95、

1.74、1.46、1.26、1.13、0.89、0.68、0.55、0.38万km²。尽管风蚀加剧或减弱情形与风蚀模数变化面积的大小顺序多数一致,但是风蚀加剧情形的河套平原和大兴安岭南部、浑善达克沙地和荒漠草原,以及风蚀减弱情形的毛乌素沙地和燕山丘陵、荒漠草原和河套平原的顺序互换,风蚀加剧情形对应的面积依次为1.18、0.94、0.89、0.86、0.61、0.61、0.52、0.30、0.25、0.25、0.15万km²,风蚀减弱情形对应的面积依次为1.35、1.07、1.05、0.88、0.85、0.74、0.64、0.53、0.38、0.30、0.23万km²。再次,无论是风蚀加剧,还是减弱,只有荒漠草原亚区风蚀加剧情形低于95%,其他情形模数变化面积的99%介于0.1~5000 t km⁻² a⁻¹。最后,相对于2000~2015年,2005~2015年土壤风蚀加剧、减弱的面积分别减少了14.43%、2.46%。不过风蚀加剧面积较大的4个亚区均是农牧交错带、燕山丘

表1 土地利用和气候变化情形下京津风沙源不同时期风蚀模数变化幅度占比^{a)}

Table 1 The proportion of change ranges for wind erosion modulus under land-use and climate change scenarios in the Beijing-Tianjin sandstorm sources in different years

模数变化 (t km ⁻² a ⁻¹)	2000~2015年		2005~2015年		2010~2015年		均值	
	土地利用变化情形(%)	气候变化情形(%)	土地利用变化情形(%)	气候变化情形(%)	土地利用变化情形(%)	气候变化情形(%)	土地利用变化情形(%)	气候变化情形(%)
0.1~200	16.51	48.93	17.22	60.21	16.90	51.75	16.87	53.63
200~2500	70.98	45.66	67.68	35.89	71.97	43.35	70.21	41.63
2500~5000	11.99	2.31	14.47	2.52	10.65	2.76	12.37	2.53
5000~8000	0.47	0.98	0.57	0.88	0.43	1.13	0.49	1.00
8000~15000	0.04	1.32	0.04	0.39	0.03	0.77	0.03	0.83
>15000	0.00	0.78	0.00	0.10	0.00	0.23	0.00	0.37

a) 风蚀模数变化小于0.1 t km⁻² a⁻¹视为没有变化

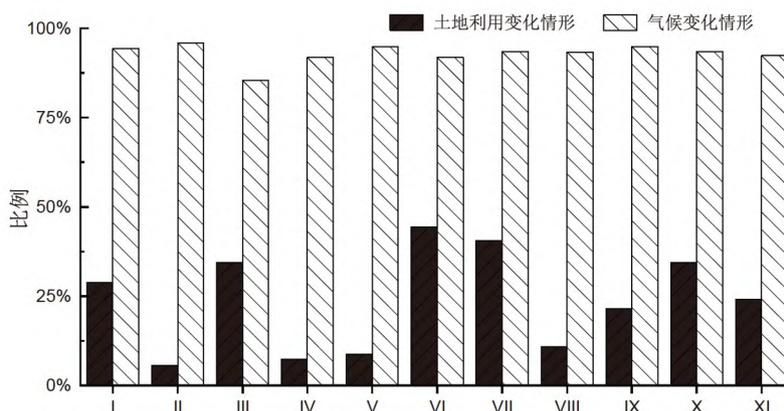


图6 京津风沙源各亚区风蚀模数变化的面积占对应亚区总面积的比例

Figure 6 The ratio of the area of the wind erosion modulus change to the total area of the corresponding subregion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources

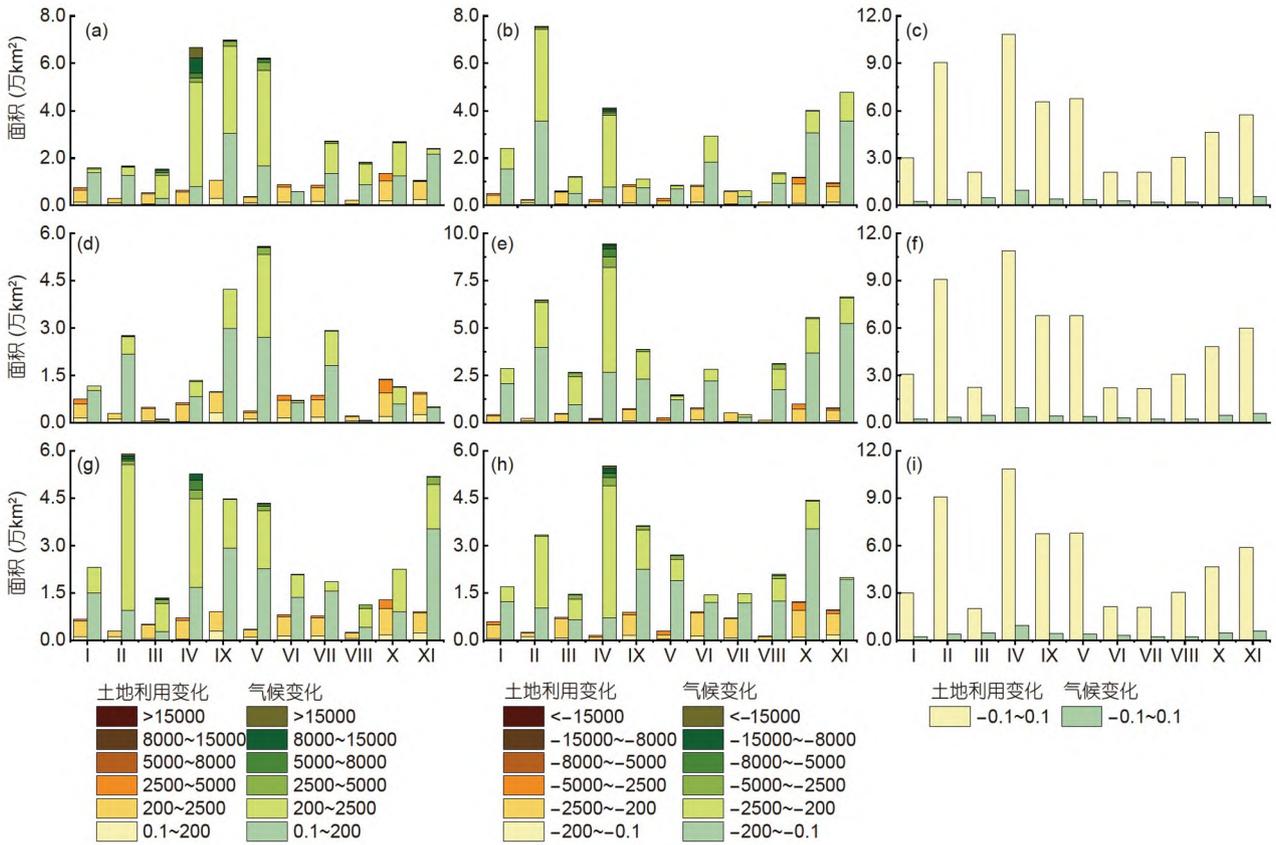


图7 土地利用和气候变化导致京津风沙源各亚区风蚀模数不同程度变化的面积。(a)~(c)分别为2000和2015年风蚀模数减小、增大和不变3种情形下各亚区的面积；(d)~(f)分别为2005和2015年风蚀模数减小、增大和不变3种情形下各亚区的面积；(g)~(i)分别为2010和2015年风蚀模数减小、增大和不变3种情形下各亚区的面积

Figure 7 The area of different variations of wind erosion modulus in each subregion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources due to land-use change and climate change. (a)~(c) represents the area of the decreasing, increasing and no variation of wind erosion modulus in each subregion between 2000 and 2015, respectively; (d)~(f) represents the area of the decreasing, increasing and no variation of wind erosion modulus in each subregion between 2005 and 2015, respectively; (g)~(i) represents the area of the decreasing, increasing and no variation of wind erosion modulus in each subregion between 2010 and 2015, respectively

陵、晋北山地丘陵、毛乌素沙地，加剧面积之和为3.32万km²，占京津风沙源加剧面积的59.11%；科尔沁沙地、河套平原、大兴安岭南部平均面积为0.48万km²；其余亚区介于0.14~0.25万km²。风蚀加剧面积较大亚区和科尔沁沙地是风蚀减弱面积较大的亚区，减弱面积之和为5.07万km²，占京津风沙源减弱面积的64.81%，其余亚区介于0.21~0.74万km²。由此可见，农牧交错带、科尔沁沙地、大兴安岭南部，既是风蚀加剧面积减少，又是风蚀减弱面积增加的区域，但是加剧情形的变化幅度大于减弱情形，依次介于12.90%~18.00%、0.85%~2.41%；其余亚区风蚀加剧、减弱的面积都减少，减幅分别为6.92%~18.49%、1.73%~8.35%。相对于2000~2015年，2010~2015年风蚀加剧的面积增加了4.21%、减弱的面积减少了6.83%。除了加剧情形的晋

北山地丘陵和毛乌素沙地、河套平原和科尔沁沙地、典型草原和荒漠草原，以及减弱情形的燕山丘陵和毛乌素沙地、荒漠草原和大兴安岭南部顺序互换外，其他顺序没有变化，这意味着加剧/减少面积较大的亚区也没有改变。风蚀加剧面积较大的4个亚区和减弱面积较大的3个亚区面积之和分别为3.98、3.10万km²，占加剧/减弱总面积的58.27%、41.46%，面积相对较小的3个亚区的平均值分别为0.18、0.30万km²，其他亚区面积平均为0.58、0.70万km²。由此可见，浑善达克沙地、毛乌素沙地加剧、减弱面积均减少，对应的减幅分别为1.59%和4.27%、0.28%和15.48%；荒漠草原和库布齐沙漠加剧面积分别减少35.63%、8.80%，减弱面积分别增加11.82%、9.14%，其余亚区加剧面积增幅介于1.51%~19.17%、减弱面积减幅介于2.08%~13.91%。

从风蚀加剧/减弱的程度变化来看(图7, 表S1), 2005~2015年均呈现先增加后减小的趋势, 拐点分别为-2500~-200、200~2500 t km⁻² a⁻¹. 相对于2000~2015年, 2005~2015年不同程度加剧/减弱面积有所不同. 对于加剧情形, 模数变化介于-5000~-0.1 t km⁻² a⁻¹的面积减少、其余增加; 对于减弱情形, 仅模数变化在200~2500 t km⁻² a⁻¹的面积减少、其余增加. 另一方面, 各个亚区风蚀加剧/减弱不同程度的面积、幅度呈现不同的特征. 这里不讨论风蚀模数变化大于5000 t km⁻² a⁻¹的情形, 因为多数亚区的面积很小(表S1). 对于加剧情形, 库布齐沙漠和晋北山地丘陵风蚀模数变化介于-200~-0.1 t km⁻² a⁻¹面积增加、介于-5000~-200 t km⁻² a⁻¹面积减少, 其余亚区均减小; 河套平原、科尔沁沙地减幅先增大后减小, 燕山丘陵刚好相反, 其他亚区减幅随程度的增大而减小. 对于减弱情形, 荒漠草原不同程度风蚀面积均减少, 减幅最大值介于200~2500 t km⁻² a⁻¹; 库布齐沙漠、典型草原风蚀模数变化介于0.1~2500 t km⁻² a⁻¹面积减少, 2500~2500 t km⁻² a⁻¹面积增加; 其余亚区均先减小后增加(表S1). 2010~2015年不同程度风蚀加剧/减弱的面积变化趋势和拐点与2005~2015年相同. 相对于2000~2015年, 2010~2015年加剧情形下模数变化介于-2500~-0.1、-8000~-2500 t km⁻² a⁻¹面积分别增加、减小; 减弱情形下风蚀模数变化介于0.1~8000、8000~15000 t km⁻² a⁻¹面积减小、增加. 模数变化介于-5000~0 t km⁻² a⁻¹的加剧情形下, 库布齐沙漠面积均减少、减幅一直降低, 科尔沁沙地面积增大但是增幅先增后减, 最大增幅为16.52%. 河套平原、农牧交错带、大兴安岭南部风蚀模数变化介于-2500~-200、-200~-0.1 t km⁻² a⁻¹面积增加, 介于-5000~-2500 t km⁻² a⁻¹面积减小. 晋北山地丘陵风蚀模数变化介于-5000~-2500、-2500~-200、-200~-0.1 t km⁻² a⁻¹面积依次减少1.17%、增加10.20%、减少11.40%. 其余亚区风蚀模数变化介于-200~-0.1、-5000~-200 t km⁻² a⁻¹面积增加、减少, 变幅介于5.92%~20.37%、0.47%~40.63%. 模数变化介于0~5000 t km⁻² a⁻¹的减弱情形下, 荒漠草原、库布齐沙漠风蚀模数变化介于0.1~200 t km⁻² a⁻¹面积减少3.67%, 介于200~2500 t km⁻² a⁻¹增加12.12%, 但是在2500~5000 t km⁻² a⁻¹范围内前者面积增加35.28%, 后者面积减小21.23%. 其余亚区在不同程度变化下的面积均减小, 但是减幅不同; 典型草原、毛乌素沙地减幅随程度增大而增大, 燕山丘陵先增大后减小, 其他亚区

相反, 拐点为200~2500 t km⁻² a⁻¹.

2.3 气候变化对京津风沙源土壤风蚀时空格局的影响

气候变化对京津风沙源土壤风蚀的影响体现在风速、降雨. 风速大小、不同风速累计时间及其在空间的变化(图S2和S3)是区域风力侵蚀因子^[21]. 降雨量及其在空间的变化影响表层土壤含水量^[19]、团聚体^[48]、结皮和植被盖度以及根系密度等^[48,49]. 因此, 气候变化导致风蚀动力学理论的三大因子(风蚀侵蚀因子、表土抗蚀因子、地表粗糙因子)均发生改变^[19,21], 定量评估气候变化对土壤风蚀的影响具有重要意义. 土地利用变化不变, 但是风力因子、植被盖度、表土湿度改变情形下, 2000、2005、2010、2015年京津风沙源风蚀模数分别为2239.21、1505.34、1942.80、1822.97 t km⁻² a⁻¹(图1), 由此导致2000~2015、2005~2015、2010~2015年风蚀模数变化分别为416.25、-317.62、119.84 t km⁻² a⁻¹. 与风蚀模数对应的土壤风蚀面积分别为41.55、37.12、44.72、42.56万km²(图1), 2000~2015、2005~2015、2010~2015年土壤风蚀面积分别变化了-1.01、-5.44、2.16万km². 从土壤风蚀模数和面积变化的变率来看, 前者大于后者, 分别介于-17.42%~22.83%、-12.70%~5.18%. 但是2000~2015、2005~2015、2010~2015年土壤风蚀模数变化大于0.1 t km⁻² a⁻¹的面积分别为65.92、65.89、65.89万km², 风蚀模数增加的面积分别为31.04、45.35、29.77万km², 风蚀模数减小的面积分别为34.89、20.54、36.13万km². 这意味着无论是风蚀模数, 还是风蚀面积, 均在一定程度上掩盖了气候变化导致的风蚀的真正变化. 风蚀模数变化的面积占京津风沙源国土面积的比例超过93%, 而且随着风蚀模数变化的增大, 对应的面积占比减少(表1). 譬如, 风蚀模数变化介于0.1~200、200~2500、2500~5000、5000~8000、8000~15000以及大于15000 t km⁻² a⁻¹的面积占变化总面积的比例分别为53.63%、41.63%、2.53%、1.00%、0.83%、0.37%(表1).

气候变化对土壤风蚀的影响在不同时期存在明显的空间分异(图5). 2000~2015年风蚀没有变化的区域集中在荒漠草原和河套平原, 风蚀减弱区为京津风沙源西部、浑善达克沙地和科尔沁沙地, 其他区域总体上风蚀有所增强(图5). 相对于2000~2015年, 2005~2015、2010~2015年风蚀减弱和加剧的区域发生

了深刻的变化. 其中, 2005~2015年风蚀减弱区明显减少, 集中分布在除库布齐沙漠以外的3个沙漠(地), 风蚀加剧区面积明显增多(图5). 2010~2015年风蚀减弱区集中在京津风沙源西部、南部和东北部, 西部4个亚区、科尔沁沙地和浑善达克沙地存在风蚀减弱区转化为加剧区以及风蚀减弱程度降低的情形, 风蚀加剧区主要分布在京津风沙源北部和中部, 如典型草原东部以及燕山丘陵和晋北山地丘陵的交界处存在加剧区转化为减弱区的情形(图5). 相对于2005~2015年, 2010~2015年风蚀减弱区明显增加, 集中在京津风沙源西部4个亚区、典型草原区东部以及燕山丘陵和晋北山地丘陵的交界处, 且浑善达克沙地、科尔沁沙地整体上风蚀减弱程度有所降低, 但是浑善达克沙地西部减弱、东部加剧(图5). 纵观2000~2015、2005~2015、2010~2015年风蚀减弱、加剧的上述变化, 2005年风蚀最弱, 这与迟文峰等人^[13]的研究结果在趋势上一致. 另一方面, 京津风沙源部分区域风蚀持续好转或恶化或没有发生变化. 好转区域主要是毛乌素沙地南部(图5), 这与该区降雨量增多^[50]以及防沙治沙工程的快速推进^[44]使得植被快速恢复密切相关^[50]; 恶化区域主要是荒漠草原东北部、典型草原北部(图5), 需要在后续京津风沙源治理中予以重点关注; 没有发生变化的区域主要是荒漠草原西南部、河套平原北部(图5).

气候变化对风蚀的影响在各个亚区存在明显的分异(图6). 除了燕山丘陵、荒漠草原、晋北山地丘陵、河套平原外, 其他亚区风蚀模数变化的面积占各自国土面积的比例均超过京津风沙源. 相对于2000年, 2015年典型草原风蚀加剧面积最大, 占加剧总面积的24.40%, 最小的5个亚区有河套平原和4个沙漠(地), 累计仅占16.76%. 不过毛乌素沙地、浑善达克沙地和荒漠草原是风蚀减弱面积最大的3个亚区, 累计占减弱总面积的56.89%, 最小的是晋北山地丘陵, 仅占1.71%(图7). 无论是风蚀加剧还是减弱, 多数亚区风蚀模数变化介于 $0.1\sim 2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的面积占变化总面积的比例超过95%, 两种情形下的荒漠草原和减弱情形下的浑善达克沙地、河套平原、库布齐沙漠除外. 其中, 荒漠草原加剧/减弱模数变化幅度介于 $2500\sim 5000$ 、 $5000\sim 8000$ 、 $8000\sim 15000$ 、 $>15000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 面积占它们总面积的比例依次为30.44%、26.83%、26.60%、16.13%、12.85%、13.78%、43.76%、29.61%. 此外, 上述减弱的4个亚区风蚀模数变化大于 $2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的面积占它们总面积的比例为62.24%、21.88%、

11.67%、4.20%, 而且荒漠草原占大于 $15000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 面积的93.56%、风蚀模数变化随强度增加先增大后减小, 但是3个亚区急剧减小. 相对于2000~2015年风蚀加剧和减弱的面积 31.03 、 34.89 万 km^2 , 2005~2015年前者增加了46.15%、后者减少了41.14%. 其中, 风蚀加剧面积较大的4个亚区一致, 分别是燕山丘陵、农牧交错带、毛乌素沙地、库布齐沙漠, 不过增加了37.35%, 达到 28.13 万 km^2 , 而4个沙漠(地)累计仅为19.58%, 科尔沁沙地更是小于1.00%. 风蚀减弱面积较大的4个亚区是浑善达克沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地和典型草原, 累计占风蚀减弱总面积的75.43%, 但是4个沙漠(地)高达62.42%, 尽管库布齐沙漠仅占0.41%. 另一方面, 多数亚区风蚀加剧面积增加17.73%~243.45%、减弱面积减少10.06%~95.41%, 增幅超过100%的亚区分布在京津风沙源西部; 但是, 科尔沁沙地、典型草原和晋北山地丘陵风蚀加剧面积减少、减弱面积增加, 不过科尔沁沙地减幅、增幅分别为33.00%、8.00%, 非沙漠亚区分别为9.00%、41.00%. 相对于2005~2015年, 2010~2015年风蚀加剧面积减少了34.37%、减弱面积增加了75.91%; 不过相对于2000~2015年, 2010~2015年风蚀加剧面积减少了4.08%、减弱面积增加了3.54%. 风蚀加剧面积较大的4个亚区累计面积占有风蚀加剧面积的比例为56.85%, 包括荒漠草原、农牧交错带、典型草原, 此外燕山丘陵转变为毛乌素沙地. 风蚀减弱也有类似特征, 除了科尔沁沙地、农牧交错带转变为燕山丘陵、典型草原外, 毛乌素沙地、荒漠草原、浑善达克沙地没有发生变化. 风蚀加剧和减弱的其余亚区平均占比介于4.82%~9.08%、3.09%~6.40%. 另一方面, 大兴安岭南部、燕山丘陵、典型草原、晋北山地丘陵风蚀加剧面积减少29.95%~58.47%、减弱面积增加45.34%~253.23%. 其他亚区风蚀加剧面积增加11.16%~221.35%、减弱面积减少14.01%~39.17%, 其中浑善达克沙地、毛乌素沙地风蚀加剧面积更是超过200%. 相对于2000~2015年, 2005~2015年不同程度风蚀加剧的面积均增大、减弱的面积均减少, 而且随着程度增大, 它们呈现迅速减少的趋势, 不过风蚀加剧/减弱的面积变化幅度呈现不同的特征(图7, 表S2). 前者先减小后增大再减小, 对应的拐点为 $-2500\sim -200$ 、 $-8000\sim -5000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 后者持续增大. 但是, 每一个亚区不同程度风蚀加剧/减弱的面积及其变化幅度呈现不同的特征, 这里不讨论风蚀模数变化大于2500或小于 $-2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 情形, 因为多数亚区在此范围内变化

的面积很小(表S2)。对于风蚀加剧情形, 典型草原、大兴安岭南部和晋北山地丘陵风蚀模数变化介于 $-200\sim-0.1$ 的面积增大、介于 $-2500\sim-200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的面积减小, 科尔沁沙地均减小, 其他亚区均增加, 不过变化幅度存在明显的区别。浑善达克沙地、燕山丘陵变化幅度持续减小, 荒漠草原先减小后增大再减小, 对应的拐点分别是 $-2500\sim-200$ 、 $-5000\sim-2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 剩余的亚区随程度的增大而增大。对于风蚀减弱的情形, 科尔沁沙地、浑善达克沙地不同风蚀模数变化程度所对应的面积增减与典型草原等加剧情形一致; 典型草原、晋北山地丘陵的面积在不同程度地增加, 前者在 $0.1\sim 200$ 、 $200\sim 2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内增幅分别为71.59%、58.64%, 后者分别为6.83%、916.90%; 荒漠草原在 $0.1\sim 200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内面积增加, 在其他范围内面积减少, 减少幅度在 $2500\sim 5000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内最小, 其后随程度的增加而增大; 其他亚区不同程度的面积均减少, 减少幅度均值介于20.32%~95.32%。

相对于2000~2015年, 2010~2015年不同程度风蚀加剧的面积先减少后增加, 拐点为 $-2500\sim-200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$; 风蚀减弱情形下, 模数变化在 $0.1\sim 200$ 、 $5000\sim 8000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内的面积增加, 在其他范围内面积减少。与前述类似, 仍然不考虑风蚀模数变化大 2500 或小于 $-2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的情形。对于风蚀加剧的情形, 典型草原、晋北山地丘陵、大兴安岭南部、燕山丘陵的面积均不同程度减小, 典型草原的减幅随加剧程度的增大而减少, 其他3个亚区相反; 河套平原、农牧交错带风蚀模数变化在 $-200\sim-0.1\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内的面积增加, 在 $-2500\sim-200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内的面积减少, 荒漠草原则刚好相反; 4个沙漠(地)的面积不同程度均增加, 其中科尔沁沙地随加剧程度的增大, 对应的面积减少, 其他3个沙漠(地)相反。对于风蚀减弱的情形, 农牧交错带、库布齐沙漠、毛乌素沙地不同程度的面积均减少, 前2个亚区减幅随程度的增大而减少, 毛乌素沙地相反; 浑善达克沙地、科尔沁沙地风蚀模数变化在 $0.1\sim 200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内面积增加, 在 $200\sim 2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内的面积减少, 典型草原则刚好相反; 荒漠草原风蚀模数变化在 $200\sim 2500\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 以及大于 $8000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$

情形下的面积减少, 反之面积增加, 风蚀模数变化在大于 $15000\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 范围内的减幅最大(98.24%); 其余亚区的面积不同程度均减少, 减少幅度介于3.16%~57.84%。

3 结论

基于当年风蚀因子、气候因子不变但土地利用发生变化、土地利用不变但气候因子发生变化(2000~2015年)情形下京津风沙源风蚀计算结果, 得到如下结论。

(1) 2000、2005、2010、2015年京津风沙源风蚀模数波动减小, 风蚀模数和变率分别为 $1524.95\sim 2237.67\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $-16.35\%\sim 22.75\%$ 。风蚀模数从西北向东南逐渐降低, 沙漠(地)高于周边地区, 而且随着治理工程的推进, 风蚀模数的空间分布发生了明显的变化。荒漠草原最大, 约为京津风沙源的2.67~2.98倍; 河套平原、浑善达克沙地次之, 与京津风沙源大致相当; 其他亚区平均为京津风沙源的42.69%, 而且它们的排序年际变化明显。

(2) 2000、2005、2010、2015年京津风沙源风蚀面积和变率分别为 $38.58\sim 46.45$ 万 km^2 、 $-9.35\%\sim 9.14\%$ 。轻度、中度侵蚀风蚀面积占比为91.56%。西北部风蚀面积大、占比高, 中部次之, 东南部最小。荒漠草原风蚀面积占比最大(25.88%), 大兴安岭南部最小(3.18%), 4个沙漠(地)为33.36%。剧烈、极强烈侵蚀集中在荒漠草原与河套平原西部, 强烈侵蚀主要分布在库布齐沙漠、浑善达克沙地, 中度、轻度侵蚀涉及每个亚区。2000~2005、2005~2010、2010~2015年各亚区风蚀面积和强度变化存在明显的不同。

(3) 气候变化、土地利用变化对京津风沙源风蚀具有重要的影响。气候变化导致风蚀模数和面积的变率与当年对应的变率相当, 大于土地利用变化的影响, 但是均远低于风蚀模数变化大于 $200\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的面积占比。无论是气候变化, 还是土地利用变化, 风蚀模数变化大于 $0.1\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 的面积中加剧/减弱的面积以及不同强度加剧/减弱的面积在2000~2005、2005~2010、2010~2015年各亚区呈现显著变化。

参考文献

- 1 Liu Z. Talk about the general survey of soil and water conservation and its application (in Chinese). *Soil Water Conserv China*, 2013, (10): 4-7 [刘震. 谈谈全国水土保持情况普查及成果运用. *中国水土保持*, 2013, (10): 4-7]

- 2 Zou X Y, Cheng H, Wang Z L, et al. Report on the Calculation, Analysis and Mapping of Soil Wind Erosion Intensity in First National Water Conservancy Census of the State Council, the People's Republic of China (in Chinese). Technical Report, 2013. 61–88 [邹学勇, 程宏, 王周龙, 等. 国务院第一次全国水利普查土壤风力侵蚀强度计算分析与制图成果报告. 科技报告, 2013. 61–88]
- 3 Ye D Z, Chou J F, Liu J Y, et al. Causes of sand-stormy weather in Northern China and control measures (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2000, 55: 513–521 [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. 地理学报, 2000, 55: 513–521]
- 4 Dong G R, Li C Z, Jin J, et al. Some results of wind tunnel simulation experiments on soil wind erosion (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1987, 32: 297–301 [董光荣, 李长治, 金炯, 等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果. 科学通报, 1987, 32: 297–301]
- 5 Fang X Q, Li L J, Xie Y. Difference of air pollution during the duststorm process in Beijing (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2003, 39: 407–411 [方修琦, 李令军, 谢云. 沙尘天气过境前后北京大气污染物质量浓度的变化. 北京师范大学学报(自然科学版), 2003, 39: 407–411]
- 6 Liu C M, Young C Y, Lee Y C. Influence of Asian dust storms on air quality in Taiwan. *Sci Total Environ*, 2006, 368: 884–897
- 7 Sun Y L, Zhuang G S, Yuan H, et al. Physicochemical characteristics and component sources of the 2002 Beijing sandstorm (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 340–346 [孙业乐, 庄国顺, 袁蕙, 等. 2002年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析. 科学通报, 2004, 49: 340–346]
- 8 Lu Q, Wu B, Bao Y S, et al. Study on the Second Phase Planning of Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2012 [卢琦, 吴波, 包英爽, 等. 京津风沙源治理工程二期规划思路研究. 北京: 中国林业出版社, 2012]
- 9 Li Z G, Xu Y L, Wang Y S. Contents and assessment methods of water and soil conservation target responsibility (in Chinese). *Sci Soil Water Conserv*, 2019, 17: 74–81 [李智广, 许永利, 王永胜. 水土保持目标责任的内容及其考核方法. 中国水土保持科学, 2019, 17: 74–81]
- 10 Gao S Y, Zhang C L, Zou X Y, et al. Benefits of Beijing Tianjin Sand Source Control Engineering (in Chinese). 2nd Ed. Beijing: Science Press, 2012 [高尚玉, 张春来, 邹学勇, 等. 京津风沙源治理工程效益. 第二版. 北京: 科学出版社, 2012]
- 11 Yan E P, Lin H, Dang Y F, et al. The spatiotemporal changes of vegetation cover in Beijing-Tianjin sandstorm source control region during 2000–2012 (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 14 [严恩萍, 林辉, 党永峰, 等. 2000–2012年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34: 14]
- 12 Li Q X, Zhang B, Wang S, et al. Regional differences of vegetation cover in the Beijing-Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2015 (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2018, 25: 298–304 [李庆旭, 张彪, 王爽, 等. 京津风沙源区2000—2015年植被覆盖状况的区域差异研究. 地学前缘, 2018, 25: 298–304]
- 13 Chi W F, Kuang W H, Jia J, et al. Study on dynamic remote sensing monitoring of LUCC and soilwind erosion intensity in the Beijing-Tianjin sandstorm source control project region (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2018, 33: 965–974 [迟文峰, 匡文慧, 贾静, 等. 京津风沙源治理工程区LUCC及土壤风蚀强度动态遥感监测研究. 遥感技术与应用, 2018, 33: 965–974]
- 14 Zhao Y, Chi W, Kuang W, et al. Ecological and environmental consequences of ecological projects in the Beijing-Tianjin sand source region. *Ecol Indic*, 2020, 112: 106111
- 15 Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D, et al. Revised wind erosion equation. Technical Documentation. Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory, Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, 1998
- 16 Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet user needs. *J Soil Water Conserv*, 1991, 46: 105–111
- 17 Singh U B, Gregory J M, Wilson G R. Texas erosion analysis model: Theory and validation. In: Skidmore E L, Tatarko J, eds. *Wind Erosion Proceedings of an International Symposium/Workshop*. Manhattan: United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service, Wind Erosion Research Unit, 1999
- 18 Böhner J, Schäfer W, Conrad O, et al. The WEELS model: Methods, results and limitations. *Catena*, 2003, 52: 289–308
- 19 Zou X Y, Li J F, Cheng H, et al. Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of Northern China. *Catena*, 2018, 167: 429–439
- 20 Liu L Y, Wang J H, Li X Y, et al. Wind tunnel simulation determination of erodible particles in cultivated soil (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1998, 43: 1663–1666 [刘连友, 王建华, 李小雁, 等. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定. 科学通报, 1998, 43: 1663–1666]
- 21 Zou X Y, Zhang C L, Cheng H, et al. Classification and representation of factors affecting soil wind erosion in a model (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2014, 29: 875–889 [邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达. 地球科学进展, 2014, 29: 875–889]
- 22 Leys J F, Butler H J, Yang X, et al. CEMSIS Modelled Wind Erosion. Project Report. Environment Sciences, NSW Department of Environment, 2010
- 23 Shao Y P, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Soil Res*, 1996, 34: 309
- 24 Guo S Y, Liu B Y, Li Z G, et al. Soil Erosion Investigation and Evaluation (in Chinese). Beijing: China Water&Power Press, 2014 [郭索彦, 刘宝元, 李智广, 等. 土壤侵蚀调查与评价. 北京: 中国水利水电出版社, 2014]
- 25 Niu C H, Guo S Y, Li Z G, et al. Water and Soil Conservation Survey Report (in Chinese). Beijing: China Water&Power Press, 2017 [牛崇桓, 郭索彦, 李智广, 等. 水土保持情况普查报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2017]
- 26 Huang X X, Cheng H, Li J F, et al. Impacts of sandstorm source management on ecosystem services in Beijing and Tianjin and its benefit accounting (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, doi: 10.1360/TB-2022-0295 [黄晓霞, 程宏, 李继峰, 等. 京津风沙源治理对生态系统服务的影响

- 及其效益核算. 科学通报, 2022, doi: 10.1360/TB-2022-0295]
- 27 Bao Y F, Yang L, Long C, et al. Review of 60 years combating desertification in China and prospects on it (in Chinese). *Sci Soil Water Conserv*, 2018, 16: 144–150 [包岩峰, 杨柳, 龙超, 等. 中国防沙治沙60年回顾与展望. *中国水土保持科学*, 2018, 16: 144–150]
 - 28 Youssef F, Visser S M, Karssen D, et al. the effect of vegetation patterns on Aeolian mass flux at regional scale: A wind tunnel study. In: Ringersma J, Stroosnijder L. *Agro Environ 2012*. Wageningen: Universiteit Gent, 2012
 - 29 Burri K, Gromke C, Lehning M, et al. Aeolian sediment transport over vegetation canopies: A wind tunnel study with live plants. *Aeolian Res*, 2011, 3: 205–213
 - 30 Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces. *Earth Surf Process Landf*, 1986, 11: 505–514
 - 31 Buckley R. The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind. *Nature*, 1987, 325: 426–428
 - 32 Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982–2012 (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2015, 35: 5331–5342 [刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982~2012年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35: 5331–5342]
 - 33 Zhang Z S, Dong Z B, Zhao A G. Trends of near surface meteorological elements and sediment transport fluxes in Tengger Desert under spring weather background in 2006 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 1953–1960 [张正德, 董治宝, 赵爱国. 2006年春季天气背景下腾格里沙漠近地面气象要素与输沙通量的变化趋势. *科学通报*, 2008, 53: 1953–1960]
 - 34 Zhang Z G, Gao Q X, Jiao H Y, et al. Analysis on source locations and transportation paths of sand-dusts affecting Beijing (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2007, 20: 21–27 [张志刚, 高庆先, 矫梅燕, 等. 影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析. *环境科学研究*, 2007, 20: 21–27]
 - 35 Pi H W, Sharratt B, Lei J Q. Wind erosion and dust emissions in central Asia: Spatiotemporal simulations in a typical dust year. *Earth Surf Process Landf*, 2019, 44: 521–534
 - 36 Zhang F. Study on soil wind erosion in Northern China based on RWEQ model (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing Normal University, 2020 [张峰. 基于RWEQ模型的中国北方土壤风蚀研究. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学, 2020]
 - 37 Xu B, Liu X M, Zhao X Y. Soil wind erosion in farmland and its control in the middle part of Naiman Banner, Inner Mongola Autonomous (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 1993, 7: 75–80, 88 [徐斌, 刘新民, 赵学勇. 内蒙古奈曼旗中部农田土壤风蚀及其防治. *水土保持学报*, 1993, 7: 75–80, 88]
 - 38 Liu L Y. The quantity and intensity of regional aeolian sand erosion and deposition: The case of Shanxi-Shaanxi-Nei Monggol Region (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1999, 54: 59–68 [刘连友. 区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究——以晋陕蒙接壤区为例. *地理学报*, 1999, 54: 59–68]
 - 39 Liu J Y, Qi Y Q, Shi H D, et al. ¹³⁷Cs tracer analysis of soil wind erosion rate in the Taliyat-Xilin Gol transboundary of the Mongolian Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 2785–2791 [刘纪远, 齐永青, 师华定, 等. 蒙古高原塔里亚特-锡林郭勒样带土壤风蚀速率的¹³⁷Cs示踪分析. *科学通报*, 2007, 52: 2785–2791]
 - 40 Chen X Q, Wang H. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003 (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2009, 64: 84–94 [陈效速, 王恒. 1982~2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化. *地理学报*, 2009, 64: 84–94]
 - 41 Wang J F, He L, Lu S J, et al. Photosynthetic vegetation cover response to precipitation on the Inner Mongolian Steppe (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2020, 40: 5620–5629 [王举凤, 何亮, 陆绍娟, 等. 内蒙古不同类型草原光合植被覆盖度对降水变化的响应. *生态学报*, 2020, 40: 5620–5629]
 - 42 Jiang Q, Yao X L, Li L W, et al. Temporal and spatial variations in soil moisture in Northern China as demonstrated by CCI data (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2020, 56: 177–187 [姜淇, 姚晓磊, 李卢伟, 等. 基于CCI数据的中国北方地区土壤水分时空变化特征分析. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56: 177–187]
 - 43 Gong G L, Liu J Y, Shao Q Q. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation (in Chinese). *Prog Geogr*, 2014, 33: 825–834 [巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于RWEQ的20世纪90年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究. *地理科学进展*, 2014, 33: 825–834]
 - 44 Zhang B, Li Q X, Wang S, et al. Spatial-temporal changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region (in Chinese). *J Nat Resour*, 2019, 34: 1041–1053 [张彪, 李庆旭, 王爽, 等. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异. *自然资源学报*, 2019, 34: 1041–1053]
 - 45 Huang L, Wu D, Sun C Y. The ecological effects of ecosystem conservation and restoration in Beijing-Tianjin sand source regions based on the planning objects (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2020, 40: 1923–1932 [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. *生态学报*, 2020, 40: 1923–1932]
 - 46 Wu B, Li X S, Liu W, et al. Desertification control regionalization and rehabilitation countermeasures of source area of the sand and dust endangering Beijing-Tianjin (in Chinese). *Sci Silv Sin*, 2006, 42: 65–70 [吴波, 李晓松, 刘文, 等. 京津风沙源工程区沙漠化防治区划与治理对策研究. *林业科学*, 2006, 42: 65–70]
 - 47 Shi S, Zou X Y, Zhang C L, et al. Investigation of vegetation restoration in the area of Beijing and Tianjin sandstorm source control project (in Chinese). *Sci Soil Water Conserv*, 2009, 7: 86–92 [石莎, 邹学勇, 张春来, 等. 京津风沙源治理工程区植被恢复效果调查. *中国水土保持科学*, 2009, 7: 86–92]
 - 48 Chepil W S, Englehorn C L, Zingg A W. The effect of cultivation on erodibility of soils by wind. *Soil Sci Soc Am J*, 1952, 16: 19–21

- 49 Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2000, 24: 379–382 [李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型NDVI动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24: 379–382]
- 50 Wang L X, Liu H M, Yang J, et al. Climatic change of Mu Us sandy land and its influence on vegetation coverage (in Chinese). *J Nat Resour*, 2010, 25: 2030–2039 [王立新, 刘华民, 杨劫, 等. 毛乌素沙地气候变化及其对植被覆盖的影响. *自然资源学报*, 2010, 25: 2030–2039]
-

补充材料

图S1 气象站分布图

图S2 京津风沙源不同时期大于临界起动风速的平均值的空间分布图

图S3 京津风沙源不同时期大于临界起动风速的累计时间空间分布图

图S4 京津风沙源大规模现代农业生产示意图

表S1 土地利用变化情形下各亚区不同风蚀模数变化程度的面积和变幅

表S2 气候变化情形下各亚区不同风蚀模数变化程度的面积和变幅

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化”

Spatial and temporal evolution of soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources

Xiaomeng Zhao^{1,2,3}, Hong Cheng^{1,2,3*}, Ning Jiang^{1,2,3}, Xueyong Zou^{1,2,3}, Bo Wu⁴, Lingmei Jiang³, Kaidi Zhang^{1,2,3} & Weiwei He^{1,2,3}

¹ State Key Laboratory of Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

³ Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁴ Institute of Desertification, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China

* Corresponding author, E-mail: chengh@bnu.edu.cn

Dust emissions due to soil wind erosion and its transport are the most important natural sources of inhalable particulate matter in the atmospheric environment of sandstorm sources and the regions where sandstorms occur. To control the impact of dust emissions caused by soil wind erosion on the atmospheric environment in the Beijing-Tianjin resources, the Chinese government implemented a strategic significance ecological governance project in the Beijing-Tianjin sandstorm sources at the beginning of this century. However, there is still much controversy about soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources and the resulting dust emissions. Based on field surveys, laboratory tests, remote sensing images and meteorological data, this paper calculated soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources under three conditions, including the typical years of 2000, 2005, 2010, and 2015, land-use change conditions (land use in 2000, 2005, 2010, and 2015 but other factors with 2015), and climate change conditions (land use in 2015 but other factors with 2000, 2005, 2010, and 2015), by using the specified soil wind erosion model in the National Plan for Dynamic Monitoring of Soil and Water Loss from 2018 to 2022 and the Technical Regulations for Dynamic Monitoring of Regional Soil and Water Loss (Trial Version). In 2000, 2005, 2010, and 2015, the fluctuation in wind erosion modulus in the Beijing-Tianjin sandstorm sources decreased. Wind erosion modulus gradually decreased from northwest to southeast, and the value in desert or sandy land was higher than that in the surrounding areas. With the advancement of governance projects in the Beijing-Tianjin sandstorm sources, the distribution of wind erosion modulus changed significantly. Wind erosion modulus in the desert steppe was the largest and was approximately 2.67–2.98 times that of the Beijing-Tianjin sandstorm sources. Wind erosion modulus in the Hetao Plain and Hunshandake Sandy Land, were roughly the same as that in the Beijing-Tianjin sandstorm sources. Wind erosion modulus in other subregions was 42.69% of that in the Beijing-Tianjin sandstorm sources. Wind erosion area and variability in the above years in the Beijing-Tianjin sandstorm sources were 385800–464500 km² and –9.35%–9.14%, respectively. The area of mild and moderate wind erosion accounted for 91.56%. Overall, wind erosion area in the northwestern Beijing-Tianjin sandstorm sources was large, and its area proportion was high, followed by that in the middle area, and the southeast area had the smallest area. The wind erosion area in desert steppe accounted for the largest proportion, with a value of 25.88%, and that in the southern part of the Greater Khingan Mountains was only 3.18%. Intense and extremely intense soil wind erosion was concentrated in the desert steppe and the western part of the Hetao Plain. Intense soil wind erosion was mainly distributed in the Kubuqi Desert and Hunshandake Sandy Land. Moderate and mild erosion involved each subregion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources. There were obvious differences in the changes in the wind erosion area and intensity in each subregion during 2000–2005, 2005–2010, and 2010–2015. Climate change and land-use change had important impacts on soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources. The variability of the wind erosion modulus and the area affected by climate change was equivalent to the corresponding variability of the year but greater than the influence of land-use change. In addition, the area of wind erosion under land-use change generally decreased, especially from 2010 to 2015, which had a decrease of 4.10%, indicating that the Beijing-Tianjin sandstorm source control project played an important role. These results provide a scientific basis for the evaluation of the benefits of the Beijing-Tianjin sandstorm source control project and the optimization of its layout.

Beijing-Tianjin sandstorm sources, soil wind erosion, spatial-temporal evolution, climate change, land-use change

doi: [10.1360/TB-2022-0300](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0300)