

基于多源数据的京津风沙源区防风固沙功能变化

李 琪^{1,2,3}, 武志涛^{1,2,3}, 杜自强^{1,2,3}, 张 红^{1,2,3}

(1.山西大学黄土高原研究所,太原 030006;2.黄土高原生态恢复山西省实验室,
太原 030006;3.山西亚高山草地生态系统教育部野外科学观测研究站,太原 030006)

摘要: 防风固沙功能是评估区域生态安全程度的重要指标,研究其时空变化和内部差异可为改善生态环境和促进生态系统可持续发展提供重要参考。基于京津风沙源区多源遥感数据,利用修正风蚀方程(RWEQ)和 GIS 空间统计技术,评估分析了 2000—2017 年京津风沙源区防风固沙功能时空变化及其区域内部差异。结果表明:(1)区域防风固沙功能明显提升,年均防风固沙量为 40.06 亿 t,防风固沙能力为 56.38 t/hm²,且均随年份变化波动增加,年均增速分别为 0.41 亿 t,0.58 t/hm²。其中,二期新增区域防风固沙能力高于一期工程区域。(2)在亚区尺度上,5 个亚区整体防风固沙能力均呈增加趋势,其中鄂尔多斯高原沙化土地治理区增加最为明显,为 1 611.35 万 t/a。其中,鄂尔多斯高原沙化土地治理区和坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区是防风固沙功能的主要供给区,占比达 57.96%。(3)在像元尺度上,区域自西向东大致呈现出高一低一高的变化趋势,评估期内有 54.11%的地区防风固沙能力呈现增加趋势,变动值介于 0.10~12.22 t/(hm²·a)。此外,46.83%的地区防风固沙能力高于 45.00 t/hm²,防风固沙功能较强。

关键词: 防风固沙功能; 修正风蚀方程; 时空分异; 京津风沙源区

中图分类号:K903

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0156-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.022

Evaluation of Sand-fixing Service Based on Multi-resources Data in Beijing-Tianjin Sandstorm Source Region

LI Qi^{1,2,3}, WU Zhitao^{1,2,3}, DU Ziqiang^{1,2,3}, ZHANG Hong^{1,2,3}

(1.Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006; 2.Shanxi Key Laboratory for
Ecological Restoration of Loess Plateau China, Taiyuan 030006; 3.Field Scientific Observation and

Research Station of the Ministry of Education of Shanxi Subalpine Grassland Ecosystem, Taiyuan 030006)

Abstract: The function of sand-fixing is an important index to evaluate the degree of regional ecological security. Studying the temporal and spatial variations and internal differences can provide important reference for improving the ecological environment and promoting the sustainable development of the ecosystem. Based on multi-source remote sensing data of the Beijing-Tianjin sandstorm source region and using the revised wind erosion equation (RWEQ) and GIS spatial statistics technology, this paper evaluated and analyzed the spatial and temporal changes of sand-fixing function and regional difference in the Beijing-Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2017. The results showed that: (1) During 2000—2017, the regional sand-fixing function presented an increasing trend, with the average annual sand-fixing amount of 4.006 billion tons and sand-fixing capacity of 56.38 t/hm². Both of them increased with time, and the average annual increase rates were 41 million tons and 58 million t respectively. The sand-fixing capacity of the newly added areas in phase II was higher than that in phase I project. (2) In the sub-zone scale, five sub-zones' function of sand-fixing was enhanced, and the increasing of desertification land control area on the Ordos Plateau was most pronounced, with 16.113 5 million t/a. The desertification land control area on the Ordos Plateau and the water conservation and control areas in the Bashang Grassland and Hilly regions in north China were the main function supply area of sand-fixing, accounting for 57.96%. (3) On the pixel scale, the studied region showed a high-low-high variation trend from west to east. During the evaluation period, 54.11% of the region showed an increasing trend in sand-fixing capacity, which varied from 0.10 to 12.22 t/(hm²·a). In addition, 46.83% of

收稿日期:2020-11-03

资助项目:国家自然科学基金项目(41977412,U1810101,41871193);山西省高等学校科技创新项目(2020L0014)

第一作者:李琪(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事景观生态研究。E-mail:2450860941@qq.com

通信作者:武志涛(1985—),男,教授,主要从事水土保持生态修复与“3S”技术集成应用研究。E-mail:wuzhitao@sxu.edu.cn

the studied region had the higher sand-fixing capacity than 45.00 t/hm², showing a strong function of sand-fixing.

Keywords: sand-fixing function; the revised wind erosion equation; spatio-temporal differentiation; Beijing-Tianjin sandstorm source region

我国北方地区生态环境脆弱,加之气候变化和不合理人类活动因素的共同作用,导致了以土壤风蚀为主要过程的水土流失和土地荒漠化问题^[1],对当地居民的生产生活和区域可持续发展产生了严重影响。防风固沙功能是北方风蚀地区生态系统的主要服务功能之一^[2],是指位于风蚀区生态系统的植被发挥固定表层土壤、提高土壤抗风蚀能力、降低风速等的作用,从而降低或避免土壤被吹蚀后产生沙尘天气带来的有害影响^[3],进一步改善区域生态环境,该功能的提升是风蚀区域生态安全屏障的重要基础^[4]。因此,及时开展防风固沙功能评估和监测工作十分必要。

风蚀模型是防风固沙功能分析的主要手段,目前已有的研究模型包括 Bangnold 等^[5]提出的输沙方程、德克萨斯模型 TEAM^[6]、风蚀方程 WEQ^[7]、修正风蚀方程模型(RWEQ)^[8]、风蚀预报系统(WEPS)^[9]等。RWEQ 模型充分考虑了气候、植被、土壤等因素,被越来越多地应用到中国北方地区的风蚀和防风固沙研究中^[10-11]。江凌等^[12]应用 EWEQ 模型对青海省年均风蚀模数进行了估算;巩国丽等^[13]运用 RWEQ 模型研究了锡林郭勒盟的土壤风蚀时空格局及其主要影响因素;彭婉月等^[14]使用 RWEQ 模型对黑河中下游地区防风固沙功能时空变化进行了分析;李艳娇^[15]应用 RWEQ 模型研究了陕北地区土地利用变化对防风固沙效益的影响等。本文主要采用 RWEQ 模型进行防风固沙功能的评估。

京津地区所处地理位置特殊,深受沙尘天气和水土流失的威胁^[16],为此我国规划和实施了京津风沙源治理工程,一期工程(2001—2012 年)已于 2012 年结束,二期工程(2013—2022 年)于后实施,工程范围也相应扩大,其防风固沙成效一直倍受关注。目前,国内外许多学者利用 RWEQ 模型在该区域防风固沙功能的时空分布^[17-20]、驱动机制^[20]、服务价值^[21]、服务流^[22-23]等多个方面展开了研究,但多集中在单个区域、单个土地类型或较短时间尺度上,且多以时空变化为研究重点和出发点,对全区长时间尺度防风固沙功能变化及其内部差异的揭示较为不足。因此,本文以京津风沙源二期工程区域为研究区,基于多源遥感影像数据,利用 RWEQ 模型和 GIS 空间统计技术,对 2000—2017 年京津风沙源区防风固沙功能时空分异规律进行了定量评估。研究结果为京津风沙源治理成效监测和二期工程后续开展提供参考和科学依据,促进生态建设,减轻风蚀带来的损害。

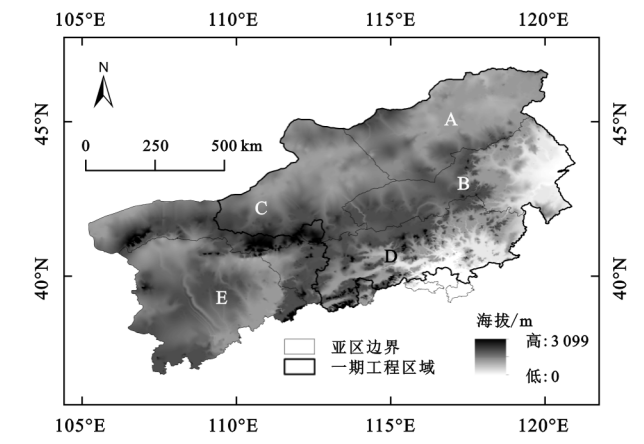
1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

京津风沙源区(105°30′—121°01′E, 36°49′—46°40′N)位于中国北方,西起内蒙古乌拉特后旗,东至内蒙古阿鲁科尔沁旗,南起陕西省定边县,北至内蒙古东乌珠穆沁旗。与一期工程范围相比,面积由 45.8 万 km²扩大到了 71.05 万 km²,包括北京、天津、张家口、承德、大同、朔州、忻州、赤峰、锡林郭勒盟等 16 个地市的 138 个县(旗、市、区)^[24]。

京津风沙源区地域广阔,地貌差异大,主要由平原、山地和高原三大地貌类型组成(图 1)。该区域气候为中温带干旱、半干旱气候,年温差大,年降水量 50~450 mm,由东北向西南递减,植被从东南向西北依次分布有森林草原、典型草原、荒漠草原、草原化荒漠和荒漠。此外,区域内土壤类型多样,以黑钙土、栗钙土、棕钙土和漠钙土为主。

考虑到区域的广阔性和内部差异性,京津风沙源工程实行分区治理,二期工程区域被划分成为 5 个亚区(图 1),包括乌兰察布高原退化荒漠草原治理区、鄂尔多斯高原沙化土地治理区、浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区和坝上高原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区^[24]。



注: A 为锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区; B 为浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区; C 为乌兰察布高原退化荒漠草原治理区; D 为坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区; E 为鄂尔多斯高原沙化土地治理区。下同。

图 1 京津风沙源区海拔及亚区

1.2 研究方法

本文采用 RWEQ 模型评估京津风沙源区防风固沙功能的变化。其中,潜在风蚀量和实际防风固沙量的计算公式为:

$$SRQ=10\times (SL_p-SL_r)\times A \tag{1}$$

$$SRA=\frac{SRQ}{A} \tag{2}$$

$$SL_p=\frac{2z}{sp^2}\times Q_{pmax}\times e^{-(z/sp)^2} \tag{3}$$

$$Q_{pmax}=109.8\times (WF\times EF\times SCF\times K') \tag{4}$$

$$sp=150.71\times (WF\times EF\times SCF\times K')^{-0.3711} \tag{5}$$

$$SL_r=\frac{2z}{sr^2}\times Q_{rmax}\times e^{-(z/sr)^2} \tag{6}$$

$$Q_{rmax}=109.8\times (WF\times EF\times SCF\times K'\times C) \tag{7}$$

$$sr=150.71\times (WF\times EF\times SCF\times K'\times C)^{-0.3711} \tag{8}$$

式中:SRQ 为防风固沙量(t/a);A 为研究区面积(hm²);SRA 为防风固沙能力(t/hm²);SL_p为潜在风蚀量(kg/m²);Q_{pmax}为潜在风力的最大输沙能力(kg/m);sr 为潜在关键地块长度(m);SL_r为实际风蚀量(kg/m²);Q_{rmax}为实际风力的最大输沙能力(kg/m);sp 为实际关键地块长度(m);z 为下风向距离(取 50 m);WF 为气象因子(kg/m);EF 和 SCF 分别为土壤可蚀性因子和土壤结皮因子;K'和 C 分别为土壤糙度因子与植被因子。

1.3 数据来源与处理

(1)气象因子。气象数据均来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),降水数据来自中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集。气温、风速、日照等数据来自中国区域地面要素驱动数据集,分辨率为 0.1°,该数据集采用 ANU-Spline 统计插值,精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间,好于国际上已有再分析数据的精度,其中,风速数据包括逐日数据和逐月数据,由逐日风速数据计算得到风速>5 m/s 的天数,并用月值风速参与后续计算(公式(10))。雪盖因子利用中国雪深长时间序列数据集计算得到,其空间分辨率为 25 km。

气象因子(WF)综合了自然条件下风速、温度、降水以及降雪等气象因素对土壤风蚀产生的影响,其计算公式为:

$$WF=Wf\times (\rho/g)\times SW\times SD \tag{9}$$

$$Wf=u_2\times (u_2-u_1)^2\times Nd \tag{10}$$

式中:WF 为气象因子(kg/m);Wf 为风力因子(m/s³);g 为重力加速度(取 9.8 m/s²);ρ 为空气密度(取气温 20 ℃时1.205 kg/m³);SW 和 SD 分别为土壤湿度因子和雪盖因子;u₁为起沙风速(取 5 m/s);u₂为月均风速(m/s);Nd 为各月风速>5 m/s 的天数。

(2)土壤可蚀性和结皮因子。计算所需的土壤数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供的 1:100 万土壤图

及所附的土壤属性表和空间数据。

土壤可蚀性因子 EF 是在一定理化条件下土壤受风蚀影响的程度^[25],计算公式为:

$$EF=\frac{29.09+0.31sa+0.17si-0.33(sa/cl)-2.59OM-0.95m}{100} \tag{11}$$

而土壤结皮因子 SCF 指在一定土壤理化条件下土壤结皮抵抗风蚀能力的大小^[26],计算公式为:

$$SCF=\frac{1}{1+0.0066\ (cl)^2+0.021\ (OM)^2} \tag{12}$$

式中:sa 为土壤砂粒含量(%);si 为土壤粉砂含量(%);cl 为土壤黏粒含量(%);OM 为土壤有机质含量(%);m 为碳酸钙含量(%).

(3)植被因子。NDVI 数据来自美国地球资源观测系统(earth observation system,EROS)数据中心提供的月值的空间分辨率为 1 km 的 MODIS 植被指数产品(MOD13A3),经过处理后提取其中的 NDVI 影响序列进行后续运算。

植被因子 C 由植被覆盖度计算而来,计算公式为:

$$C=e^{-0.0438SC} \tag{13}$$

$$SC=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \tag{14}$$

式中:SC 为植被覆盖度(%),使用像元二分法进行计算,NDVI、NDVI_{max}和 NDVI_{min}分别为 NDVI 的实际值、最大值和最小值。

(4)地表粗糙因子。地表糙度因子 K'可以反映由地形起伏引起的地表粗糙度对风蚀产生的影响^[10],其表达式为:

$$K'=\cos \alpha \tag{15}$$

式中:α 为坡度(°),由 1 km DEM 数据经过 ArcGIS 的坡度模块计算得到。

所有数据在 ArcGIS 中进行运算时的投影坐标系统为 WGS_1984_UTM_ZONE_50N,空间分辨率为 1 km。将本文的各因子研究结果与已有研究结果进行对比(表 1),各因子值域与其他研究结果具有可比性。

表 1 模型各因子结果与已有研究对比

数据 来源	土壤可蚀 性因子 EF	土壤结皮 因子 SCF	地表糙度 因子 K'	植被 因子 C
王洋洋等 ^[10]	0~0.71	0.04~0.97	0.13~0.98	0.03~1.00
江凌等 ^[12]	0.08~0.55	0.09~0.95	0.19~1.00	0.01~1.00
本文	0.05~0.64	0.06~0.90	0.03~1.00	0.03~1.00

2 结果与分析

2.1 防风固沙功能年际变化

从图 2 可以看出,2000—2017 年京津风沙源区防风固沙功能明显提升。区域防风固沙量在 35.09 亿~43.26 亿 t 变动,2001 年最低,2013 年最高,多年

平均防风固沙量为 40.06 亿 t。评估期内区域年均防风固沙量呈波动增加趋势,年均增速 0.41 亿 t,且与年份变化显著正相关。防风固沙能力在 49.39~60.89 t/hm²变动,多年平均值为 56.38 t/hm²,也与年份变化显著正相关。

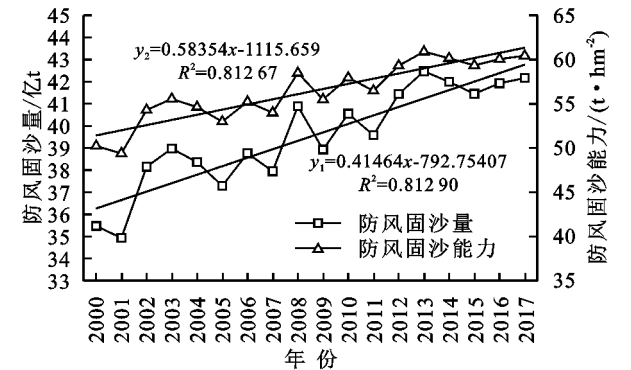


图 2 京津风沙源区防风固沙功能年际变化

进一步研究发现,一期区域防风固沙能力介于 44.7~50.8 t/hm²,2000 年最低,2017 年最高,平均值为 47.8 t/hm²,二期新增区域防风固沙能力为 57.4~80.4

t/hm²,最低值和最高值出现在 2001 年和 2016 年,平均值为 72.6 t/hm²,高于一期工程区域。此外,京津风沙源治理一期工程区域与二期新增区域防风固沙能力均随年份波动增加(图 3)。

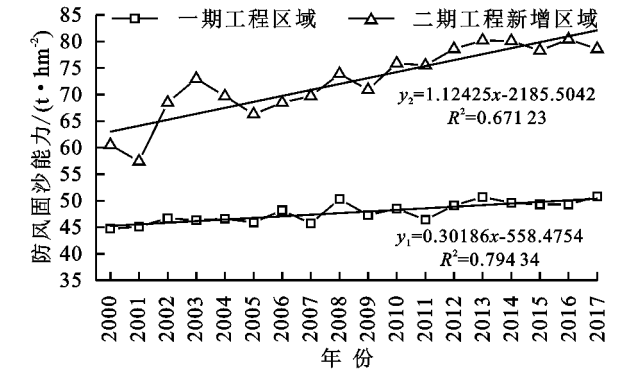


图 3 京津风沙源区一、二期工程区域防风固沙能力年际变化
将本文的模型计算结果与张彪等^[19]对于京津风沙源一期工程区域的结果进行对比(表 2),京津风沙源区防风固沙量、防风固沙能力的值域结果在可接受范围内。

表 2 模型计算结果与已有研究对比

数据 来源	防风固沙量/亿 t	最低值/ 最高值年份	多年平均防风 固沙量/亿 t	防风固沙能力/ (t·hm ⁻²)	多年平均防风固沙 能力/(t·hm ⁻²)
张彪等 ^[19]	24.19~32.84	2003/2012	29.98	56.97~73.98	68.24
本文	35.09~43.26	2001/2013	40.06	49.39~60.89	56.38

2.2 亚区防风固沙功能差异

从京津风沙源区 5 个亚区防风固沙功能差异来看(表 3),鄂尔多斯高原沙化土地治理区防风固沙量最高(13.27 亿 t),约占全区防风固沙量的 33.14%;其次是坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区(9.94 亿 t),占到防风固沙总量的 24.82%;浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治治理区和锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区防风固沙量较为接近,分别为 5.83 亿、

6.63 亿 t,相应占比 14.55%和 16.54%;乌兰察布高原退化荒漠草原治理区防风固沙量最低(4.38 亿 t),仅占到总量的 10.95%。此外,各亚区的防风固沙能力分布规律也和防风固沙量一致,表现为鄂尔多斯高原沙化土地治理区>坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区>锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区>浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治治理区>乌兰察布高原退化荒漠草原治理区。

表 3 京津风沙源区亚区防风固沙功能及其变化统计

治理分区	多年平均防风 固沙量/亿 t	占比/%	多年平均防风固沙 能力/(t·hm ⁻²)	防风固沙量变化/ (万 t·a ⁻¹)	防风固沙能力变化/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
鄂尔多斯高原沙化土地治理区	13.27	33.14	89.25	1611.35	1.08
坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区	9.94	24.82	64.79	496.81	0.32
乌兰察布高原退化荒漠草原治理区	4.38	10.95	25.28	1341.82	0.77
浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区	5.83	14.55	50.45	161.20	0.14
锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区	6.63	16.54	55.54	535.11	0.45

从变化趋势来看,2000—2017 年京津风沙源区各亚区防风固沙量和防风固沙能力随着年份变化呈现波动上升趋势,与植被盖度变化趋势相同(图 4)。鄂尔多斯高原沙化土地治理区防风固沙量增量最多,为 1 611.35 万 t/a,表明该区域风蚀总量减少,生态环境状况大有好转;乌兰察布高原退化荒漠草原治理区次之,为 1 341.82 万 t/a;其次为坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区和锡

林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区,防风固沙变化量分别为 496.81 万,535.11 万 t/a;浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治治理区防风固沙量变化值最低,仅为 161.20 万 t/a,表明区域内环境状况改善程度较轻。此外,各亚区防风固沙能力变化值介于 0.14~1.08 t/(hm²·a),鄂尔多斯高原沙化土地治理区防风固沙能力增量最多,浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区最低。

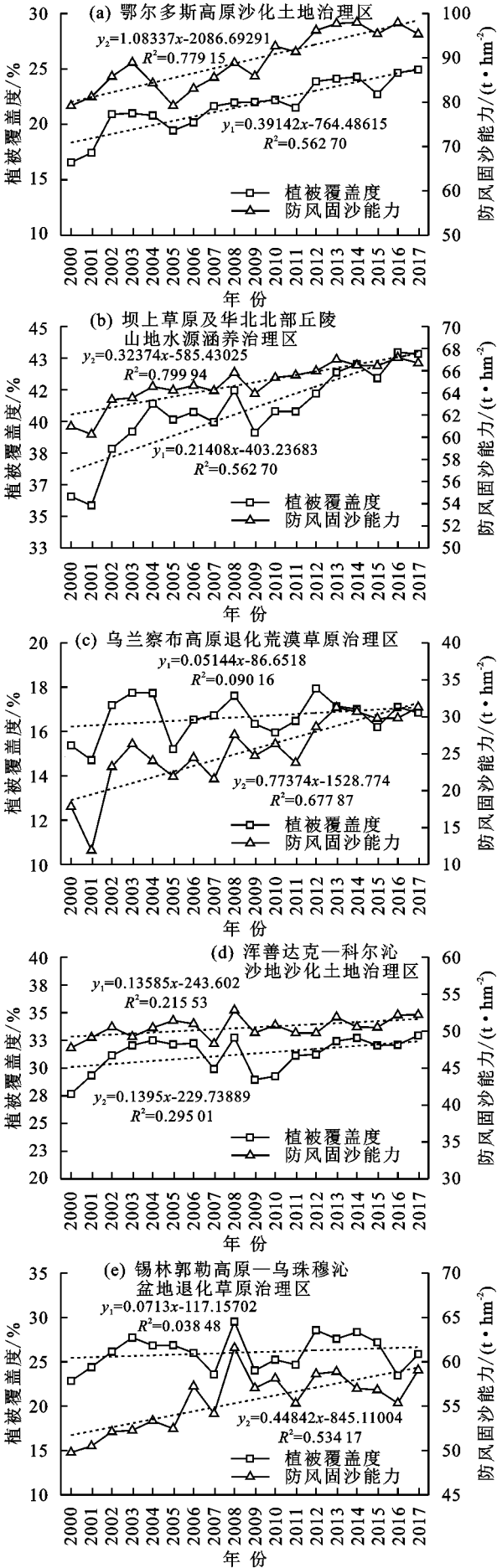


图 4 京津风沙源区不同亚区植被覆盖变化与防风固沙能力

2.3 防风固沙功能空间变化

由图 5 可知,2000—2017 年京津风沙源区防风固沙能力空间分布自西向东大致呈现高一低一高的变化趋势,高值区面积最大,占到全区的 33.09%(表 4),主要分布在鄂尔多斯沙化土地治理区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区东北部和浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区中部等地区;防风固沙能力较高区域较为零散,面积仅占风沙源区的 12.74%;防风固沙能力一般区域占到该区域总面积的 18.57%,主要分布在乌兰察布高原退化荒漠草原治理区东部、中部地区和锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区中部等地区;而防风固沙能力较低区分布范围较大,约为 25.69%,集中分布在乌兰察布高原退化荒漠草原治理区和锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区西部等地区;防风固沙能力低值区面积最小,约占到 9.91%,主要分布在乌兰察布高原退化荒漠草原治理区西北边缘地区、锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区中部和浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区西南缘等地区(图 5)。

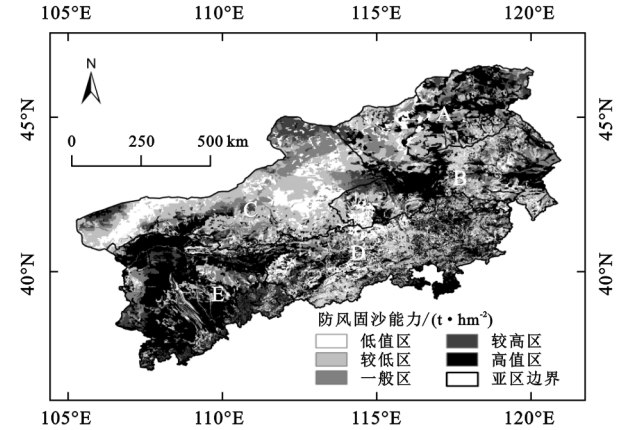


图 5 京津风沙源区多年平均防风固沙能力空间分布

在研究时间段内,京津风沙源区有 54.11%的地区防风固沙能力增加(表 4),其中,33.78%的区域防风固沙能力明显增加,集中分布在鄂尔多斯沙化土地治理区、乌兰察布高原退化荒漠草原治理区东北部地区和锡林郭勒高原—乌珠穆沁盆地退化草原治理区东北部等地区(图 6);20.33%的地区防风固沙能力一般增加,主要分布在浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区、乌兰察布高原退化荒漠草原治理区东南边缘地带和坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区南部等地区。全区有 29.19%的地域防风固沙能力无明显变化,分布较为零散。此外,16.7%的地区防风固沙能力下降,零散分布在乌兰察布高原退化荒漠草原治理区中部、浑善达克—科尔沁沙地沙化土地治理区中部和鄂尔多斯沙化土地治理区西南边缘地带等区域,防风固沙能力一般降低区域约占全区面积的 14.12%,明显降低区约为 2.58%。

表 4 2000—2017 年京津风沙源区防风固沙功能变化

防风固沙能力分区	固沙能力(SRA) 分级依据/(t·hm ⁻²)	分区面积 比例/%	防风固沙能力 变化趋势	变化趋势(Δ)分级依据/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	变化区面积 比例/%
高值区	SRA>65	33.09	明显增加区	Δ>0.3	33.78
较高区	45≤SRA<65	12.74	一般增加区	0.1≤Δ<0.3	20.33
一般区	25≤SRA<45	18.57	无明显变化区	-0.1≤Δ<0.1	29.19
较低区	5≤SRA<25	25.69	一般降低区	-0.3≤Δ<-0.1	14.12
低值区	SRA<5	9.91	明显降低区	Δ<-0.3	2.58

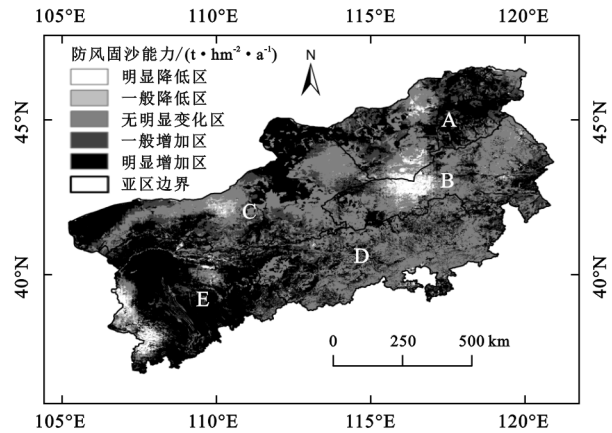


图 6 京津风沙源区防风固沙能力变化区

3 讨论

本文分析了 2000—2017 年京津风沙源区防风固沙功能的变化及其区域差异,结果表明,区域防风固沙功能明显提升,这与黄麟等^[27]、潘梅等^[20]研究认为,京津风沙源区土壤风蚀呈现削弱态势的结论一致。此外,本次估算结果防风固沙能力约为 56.38 t/hm²,较高于江凌等^[28]估算 2000—2010 年内蒙古生态系统年均防风固沙 48.80 t/hm²的结果,原因可能与内蒙古北部地区防风固沙能力较小有关。进一步研究发现,京津风沙源区二期工程新增区域防风固沙能力高于一期区域,主要原因是二期新增区域降水相较充足,可以满足沙化土地植被恢复的需求,且部分区域以前也被其他工程如“三北”防护林、退耕还林等工程覆盖^[28];而一期实施时间较长,区域内整体风蚀状况有所好转,在工程后期实际发挥的防风固沙能力较低。

随着京津风沙源工程的持续推进,研究期间各亚区防风固沙能力均呈增加趋势,与植被覆盖度变化具有一致性(图 4)。其中,鄂尔多斯高原沙化土地治理区、坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区和浑善达克—科尔沁沙化土地治理区的防风固沙功能都较强,与江凌等^[28]得出的结论一致,其研究发现,科尔沁沙地、浑善达克沙地以及鄂尔多斯高原是固沙物质量较多的区域。而乌兰察布高原退化荒漠草原治理区发挥的防风固沙功能较小,主要原因是该

区域植被覆盖率低(图 4),同时受过度放牧、不合理樵采等人为因素影响,区域内草地沙化、退化严重。未来该区域的治理应以封育为主,进行重点治理^[29]。

本文研究发现,区域西南部边缘地带、达尔罕茂明安中部和浑善达克沙地东南部地区防风固沙能力明显下降,主要原因在这些地区多为荒漠沙地,植被覆盖率低,生态环境脆弱,植被难以生长恢复。其中,浑善达克沙地区域防风固沙能力总体呈减弱趋势这一结论,与申陆等^[11]评估 2000—2010 年浑善达克沙地防风固沙功能的结论一致,该区域应作为防风固沙功能治理与修复的重点区域。

本文使用 RWEQ 模型对京津风沙源区的防风固沙功能时空变化进行了研究,由于 RWEQ 模型为经验性模型,且参与计算因子多、精度要求高,在具体使用时应对具体参数加以修正^[23]。本文中采用的部分数据时空分辨率并不一致,例如,在计算土壤可蚀性和结皮因子时使用的 1:100 万土壤图分辨率较低,因此在实际计算过程中,对这些数据进行了重采样,此举可能带来误差和不确定性。今后将进一步完善和验证,使结果更好地为区域生态保护和修复方案制定提供参考和依据。

4 结论

本研究表明,2000—2017 年京津风沙源区防风固沙功能明显提升,区域年均防风固沙量为 40.06 亿 t,防风固沙能力达 56.38 t/hm²;二期新增区域防风固沙能力均值高于一期区域,二期防风固沙能力均值为 72.6 t/hm²,一期为 47.8 t/hm²。从亚区来看,2000—2017 年京津风沙源区各个亚区防风固沙能力呈现波动上升趋势,其中,鄂尔多斯高原沙化土地治理区增加最为显著,为 1 611.35 万 t/a。此外,鄂尔多斯高原沙化土地治理区和坝上草原及华北北部丘陵山地水源涵养治理区是防风固沙功能的主要供给区,百分比分别为 33.14%,24.82%,且防风固沙能力提升显著。在像元尺度上,区域防风固沙能力自西向东呈现为高一低一高的变化趋势,50%以上的区域防风固沙能力增加,主要集中在风沙源区的西部和北部

地区,而西南部边缘地带、达尔罕茂明安中部和浑善达克沙地东南部地区防风固沙能力有所下降,未来应对这些区域进行重点治理。

参考文献:

- [1] 吴晓光,姚云峰,迟文峰,等.1990—2015 年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征[J].中国农业大学学报,2020,25(3):117-127.
- [2] 巩国丽,刘纪远,邵全琴.草地覆盖度变化对生态系统防风固沙服务的影响分析:以内蒙古典型草原区为例[J].地球信息科学学报,2014,16(3):426-434.
- [3] 苏凯,王计平,王茵然,等.基于 HYSPLIT 和 PSCF 的防风固沙生态服务功能空间模拟[J].农业机械学报,2020,51(10):232-242.
- [4] 沈亚楠,仇梦梦,岳耀杰.中国北方土地沙漠化灾害危险性评价[J].干旱区研究,2017,34(1):174-184.
- [5] Bangnold R A, Sandford K S, Shaw W B K, et al. A further journey through the Libyan Desert [J].The Geographical Journal,1933,82(2):126-129.
- [6] Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. Team: Texas erosion analysis model [C]//Proceedings of 1988 Wind Erosion Conference. Lubbock, Texas. Texas Technology University,1988:88-103.
- [7] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation 1 [J].Soil Science Society of America Journal,1965,29(5):602-605.
- [8] Fryrcar D W, Chen W N, Lester C. Revised wind erosion equation [J].Annals of Arid Zone,2001,40(3):265-279.
- [9] Hagen L J. Evaluation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion sub model on cropland fields [J].Environmental Modelling & Software,2004,19(2):171-176.
- [10] 王洋洋,肖玉,谢高地,等.基于 RWEQ 的宁夏草地防风固沙服务评估[J].资源科学,2019,41(5):980-991.
- [11] 申陆,田美荣,高吉喜,等.浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力[J].应用生态学报,2016,27(1):73-82.
- [12] 江凌,肖懿,欧阳志云,等.基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25.
- [13] 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[J].地理科学进展,2014,33(6):825-834.
- [14] 彭婉月,王兆云,李海东,等.黑河中下游防风固沙功能时空变化及影响因子分析[J].环境科学研究,2020,33(12):2734-2744.
- [15] 李艳娇.陕北地区土地利用变化对防风固沙效益的影响[J].西部大开发(土地开发工程研究),2020,5(3):56-63,70.
- [16] 郭磊,陈建成.京津风沙源治理工程效益评价研究综述[J].中国林业产业,2006(3):56-58.
- [17] 王俊枝,常屹冉,匡文慧,等.浑善达克沙漠化防治重点生态系统功能区防风固沙功能动态特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(3):348-356.
- [18] 何旭宁,于皓,王宗明.基于多源数据的内蒙古东部地区防风固沙能力变化研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(7):138-141,144.
- [19] 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[J].自然资源学报,2019,34(5):1041-1053.
- [20] 潘梅,陈天伟,黄麟,等.京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5151-5167.
- [21] 刘金雅,汪东川,张利辉,等.基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算[J].生态学报,2018,38(12):4192-4204.
- [22] 张彪,王爽,李庆旭,等.基于防风固沙服务空间流动的区域关联度:以京津风沙源治理工程区为例[J].资源科学,2020,42(5):969-979.
- [23] 勒斯木初.1980—2015 年西北地区土壤风蚀评估与防风固沙服务流研究[D].西安:长安大学,2019.
- [24] 刘彦平,张国红,杨跃军,等.《京津风沙源治理工程二期规划》战略调整[J].林业调查规划,2013,38(6):92-95.
- [25] Skidmore E L, Tatarko J. Stochastic wind simulation for erosion modeling [J].Transactions of the ASAE,1990,33(6):1893-1899.
- [26] Hagen L J, Skidmore E L, Saleh A. Wind erosion: Prediction of aggregate abrasion coefficients[J].Transactions of the ASAE,1992,35(6):1841-1850.
- [27] 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.
- [28] 江凌,肖懿,饶恩明,等.内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J].生态学报,2016,36(12):3734-3747.
- [29] 京津风沙源工程二期规划思路研究项目组.京津风沙源治理工程二期规划思路研究[M].北京:中国林业出版社,2013:144-145.