

京津风沙源区防风固沙功能的时空变化 及其区域差异

张彪¹, 李庆旭^{1,2}, 王爽^{1,2}, 谢高地^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 防风固沙功能是京津风沙源治理成效的关键监测指标。以往研究注重局地防风固沙功能的评估, 对全区防风固沙功能的时空变化与内部差异揭示不足。基于京津风沙源区多期遥感数据, 采用修正风蚀方程与GIS空间统计技术, 评估分析了2000-2015年防风固沙功能的整体变化及其区域差异。结果表明: (1) 京津风沙源区年均防风固沙量为28.98亿t, 防风固沙能力为68.24 t/hm², 且均随年份变化波动增加, 年均增速分别为1.10%和0.71%; (2) 京津风沙源区防风固沙能力呈西北高、东南低趋势, 有49.06%的区域防风固沙能力高于70 t/hm², 评估期内有54%的区域防风固沙能力明显提高; (3) 浑善达克沙地区、典型草原亚区和荒漠草原亚区的防风固沙量累计为全区防风固沙总量的88%, 燕山丘陵山地水源保护亚区和晋北山地丘陵亚区的防风固沙能力提升最显著; (4) 锡林郭勒盟、赤峰市和乌兰察布市的防风固沙量合计占全区防风固沙量的77%, 朔州市与包头市防风固沙能力较高, 北京市与天津市防风固沙能力增速较高。因此, 未来应重视分区施策治理与西部和北部防风固沙功能提升。

关键词: 防风固沙功能; 修正风蚀方程; 时空变化; 区域差异; 京津风沙源区

土地是人类赖以生存的物质基础和自然资源。由于人口数量持续增长和土地资源不合理利用, 中国土地退化态势较严重^[1], 目前仍有荒漠化土地261.16万km², 沙化土地172.12万km²^[2]。为遏制土地退化与环境恶化趋势, 中国相继实施了一系列重大生态保护与建设工程^[3]。但生态系统演化与恢复是一个漫长过程, 因此, 及时开展生态系统状况评估与生态恢复成效监测尤为重要^[4-6]。

京津风沙源治理工程是为遏制北京及周边地区土地沙化趋势、改善京津地区大气环境质量而实施的一项重大生态工程。一期工程(2001-2010年)已于2012年结束, 二期工程(2013-2022年)也于同年实施, 并将工程区范围由原来的75个县(旗、市、区)扩大至138个^[7], 其防风固沙成效也受到重点关注^[8]。比如, 巩国丽等^[9]运用修正风蚀方程(RWEQ), 结合草地覆盖度变化, 评估了20世纪90年代以来锡林郭勒盟的防风固沙能力变化。申陆等^[10]利用RWEQ模型定量分析了2000-2010年浑善达克地区防风固沙能力变化和土壤风蚀的驱动因素。江凌等^[11]基于RWEQ模型测算了2000-2010年内蒙古防风固沙量变化及其对土地利用变化的响应。此外, 吴丹等^[12]从生态系统结构、质量和服务功能的角度的角度, 综合评估了2000-2010年京津风沙源治理的生态效应。不过, 以往研究注重局地防风固沙功能的评估分析, 对全区防风固沙功能的整体变化及其内部差异揭示不足。

随着风沙源治理工程的持续实施, 亟需推进分区施策治理与精准修复提升。为此,

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2019-03-12

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0503403)

作者简介: 张彪(1980-), 男, 山东郓城人, 博士, 副研究员, 主要从事城市与区域生态学研究。

E-mail: zhangbiao@igsnrr.ac.cn

本文基于京津风沙源区遥感影像数据,采用RWEQ与GIS空间统计技术,评估分析2000-2015年京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异,为京津风沙源治理成效监测与二期工程分区施策治理提供参考依据。

1 研究方法与数据来源

京津风沙源区(109°30'~114°20'E、38°50'~46°40'N)位于中国北方,西起内蒙古达尔罕茂明安联合旗,东至河北省平泉县,南起山西省代县,北至内蒙古东乌珠穆沁旗。一期工程区国土面积45.8万km²^[13],涵盖北京、天津、锡林郭勒盟、乌兰察布、赤峰、承德、张家口等11地市的75个县(旗、市、区)。

京津风沙源区地貌由平原、山地和高原组成(图1)。其中,京津市区为海河平原的一部分,其西部与北部被太行山北端和燕山西部环绕,山地外侧为内蒙古高原;东部浑善达克沙地是锡林郭勒高原的重要组成部分,沙化土地广布;西部乌兰察布高原由阴山北麓的丘陵、地势平缓的凹陷地带及横贯东西的石质丘陵隆起带组成,境内多季节性河流;燕山山地和太行山地地形起伏较大,地形雨较多,易造成水土流失。

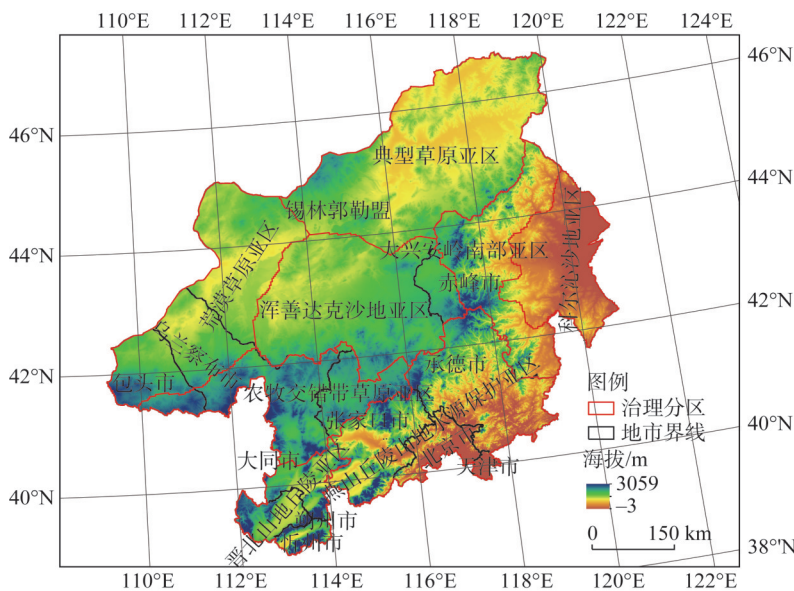


图1 京津风沙源区海拔及区域组成

Fig. 1 Altitudes and zones in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

风沙源区气候属于干旱、半干旱地区,多大风和沙尘天气,是京津地区风沙的主要来源地。此外,内蒙古高原地带性土壤以黑钙土、栗钙土、棕钙土为主,燕山山地以石灰土、石质土为主。风沙源区植被类型复杂,内蒙古高原天然植被以冷蒿、大针茅、克氏针茅和短花针茅等为主,人工植被以阔叶乔木和旱生灌木为主;燕山山地及太行山北部山地天然植被多为次生杨桦林及荆条、胡枝子、山杏等针叶灌丛,人工植被以油松为主,高海拔地带以落叶松为主^[14]。

由于风沙源区地域广阔,地貌差异大,涵盖不同生物气候带和土壤类型区,为分区开展生态治理与成效评估,一般分为荒漠草原亚区、典型草原亚区、浑善达克沙地

区、大兴安岭南部亚区、科尔沁沙地亚区、农牧交错带草原亚区、晋北山地丘陵亚区和燕山丘陵山地水源保护区等8个亚区^[15]。

1.2 研究方法

防风固沙功能是指生态系统抑制或降低土壤风蚀的作用, 风蚀模型是评估防风固沙功能的主要技术手段。Bangnold^[16]最早建立了主要适用于流沙地表的输沙率公式。20世纪60年代, 计算机以及地理信息系统、遥感等技术的发展与应用, 通用风蚀方程(WEQ)^[17]、德克萨斯侵蚀分析模型(TEAM)^[18]、Bocharov模型^[19]、RWEQ模型^[20]以及风蚀预报系统(WEPS)^[21]等风蚀模型被相继提出, 其中, RWEQ已被广泛应用于我国土壤风蚀状况的评估^[9-11, 22-25]。

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, 防风固沙量(SRQ)为区域年均潜在土壤风蚀量(SL_p)与实际土壤风蚀量(SL_r)的差值, 防风固沙能力(SRA)为单位土地面积的防风固沙量, 具体计算公式如下:

$$SRQ = 10 \times (SL_p - SL_r) \times A \quad (1)$$

$$SRA = \frac{SRQ}{A} \quad (2)$$

$$SL_p = \frac{2Z}{sp^2} \times Q_{p\max} \times e^{-(z/sp)^2} \quad (3)$$

$$Q_{p\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K') \quad (4)$$

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

$$SL_r = \frac{2Z}{sr^2} \times Q_{r\max} \times e^{-(z/sr)^2} \quad (6)$$

$$Q_{r\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (7)$$

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

式中: SRQ 为防风固沙量 (t/a); A 为研究区面积 (hm^2); SRA 为防风固沙能力 (t/hm^2); SL 为潜在风蚀量 (kg/m^2); $Q_{p\max}$ 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/m^2); $Q_{r\max}$ 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 表示下风向距离 (取50 m); WF 为气候因子 (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 参数处理

(1) 气象因子

自然条件下土壤风蚀受风速、温度、降雨、太阳辐射以及降雪等气象因素影响, 气象因子(WF)为各类气象因素对风蚀的综合影响, 计算公式如下:

$$WF = Wf \times (\rho/g) \times SW \times SD \quad (9)$$

$$Wf = u_2 \times (u_2 - u_1)^2 \times Nd \quad (10)$$

式中: WF 为气象因子 (kg/m); Wf 为风力因子 (m/s^3); g 为重力加速度 (取 $9.8 m/s^2$); ρ 为空气密度 (取气温 $20^\circ C$ 时 $1.205 kg/m^3$); SW 和 SD 分别为土壤湿度因子和雪盖因子; u_1 为起沙风速 (取 $5 m/s$); u_2 为气象站月均风速 (m/s); Nd 为各月风速大于 $5 m/s$ 的天数。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 在京津风沙源区内的26个气象站^[26], 采用月均风速、降水、气温、日照时数等数据插值得到风力因

子和土壤湿度因子。雪盖因子利用中国西部环境与生态科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 的中国雪深长时间序列数据集计算。

(2) 土壤可蚀性与结皮因子

土壤可蚀性受土壤颗粒粒径及有机质、黏土、碳酸钙等含量影响,土壤表层的坚硬结皮能有效防止风蚀的发生。因此,可从土壤理化条件判别土壤可蚀性因子 (EF),土壤结皮因子 (SCF) 为一定土壤理化条件下土壤结皮抵抗风蚀的能力^[27],计算公式为:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad (11)$$

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

式中: sa 为土壤粗砂含量 (%); si 为土壤粉砂含量 (%); cl 为土壤粘粒含量 (%); OM 为土壤有机质含量 (%); $CaCO_3$ 为碳酸钙含量 (%)。

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,分别采用京津风沙源区不同土壤类型及相应物质含量估算可蚀性因子与结皮因子。

(3) 植被因子

植被对土壤风蚀过程有重要影响,不仅增加地表糙度而增大起沙风速,且对土壤颗粒移动有阻碍作用^[28]。植被覆盖因子 (C) 代表植被对风蚀的抑制程度,计算公式为:

$$C = e^{-0.0438SC} \quad (13)$$

$$SC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (14)$$

式中: SC 为植被覆盖度 (%); $NDVI_{\max}$ 与 $NDVI_{\min}$ 分别为 $NDVI$ 的最大值和最小值。

$NDVI$ 数据来自美国地球资源观测系统数据中心的 MOD13Q1 产品。该数据已经过几何精纠正、辐射校正、大气校正等预处理,时空分辨率为 16 d 和 250 m。本文对该数据集去除噪声干扰后,利用 MRT 投影转换工具进行投影和格式转换批处理,并采用最大值合成法获得 2000-2015 年 $NDVI$ 数据。

(4) 地表糙度因子

地形因子对风蚀过程也存在明显影响^[29]。地表糙度 (K') 表示农田因耕作产生块状土及土垄而对风蚀产生的影响,包括随机糙度 (Crr) 和土垄糙度 (Kr)。由于区域尺度评估中,耕作产生的随机糙度难以获取,本文采用 smith-carson 方程计算土垄造成的地形起伏度来替代^[30],计算公式为:

$$K_r = 0.2 \frac{(\Delta H)^2}{L} \quad (13)$$

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.127C_{rr})} \quad (14)$$

式中: K_r 为土垄糙度 (cm); Crr 为随机糙度 (本次取 0); K' 为地形糙度因子 (cm); L 为地势起伏参数; ΔH 为距离 L 范围内海拔高度差 (cm)。

2 结果分析

2.1 防风固沙功能年际变化

评估结果表明,2000-2015 年京津风沙源区年均防风固沙量为 24.19 亿~32.84 亿 t,并

分别于2003年和2012年达到最低值和最高值,多年平均防风固沙量为29.98亿t。评估期内京津风沙源区的年均防风固沙量波动增加(图2),年均增速0.28亿t,且与年份变化显著正相关。2000-2015年全区防风固沙能力变动在56.97~73.98 t/hm²,多年均值为68.24 t/hm²,也与年份变化显著正相关。相对于防风固沙量,防风固沙能力的变化幅度较小(表1),原因在于防风固沙量受防风固沙能力与评估区面积的双重影响。此外,随着年份变化,防风固沙量与固沙能力的拟合曲线逐渐接近(图2),表明风沙源区防风固沙能力明显提升。

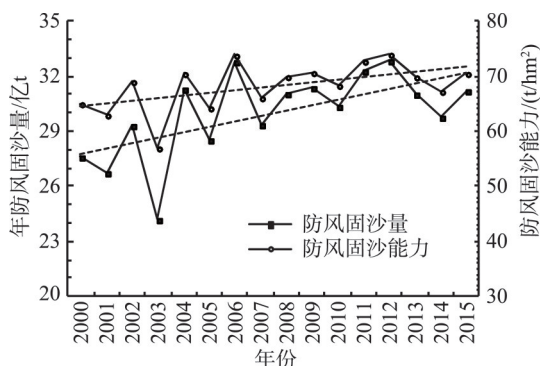


图2 京津风沙源区防风固沙功能变化

Fig. 2 Changes of sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

表1 2000-2015年京津风沙源区防风固沙功能变化统计

Table 1 Statistical variables on sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2015

防风固沙功能	最大值	最小值	平均值	相关系数 r	显著性Sig	年变化率/%
防风固沙量/亿t	32.84	24.19	29.98	0.611	0.012*	1.01
防风固沙能力/(t/hm ²)	73.98	56.97	68.24	0.524	0.037*	0.71

注: *为 $P=0.05$ 水平下显著。

京津风沙源治理工程实施以来,区域生态状况明显改善,植被覆盖度以年均0.32%的增速波动增加,且与防风固沙能力增加趋势基本一致(图3),表明植被覆盖度增加对防风固沙功能的提升有积极影响。经相关性检验,二者存在一定程度的正相关($r=0.377$),但不显著($\text{Sig}=0.15>0.05$),说明区域防风固沙能力同时受到土壤、地形、风力等其他因素的影响。

2.2 防风固沙功能空间变化

基于栅格单元(100 m×100 m)绘制京津风沙源区2000-2015年防风固沙能力空间分布图。结果表明,京津风沙源区防风固沙能力基本由西北向东南递减,高值区主要分布在正蓝旗、克什克腾旗、翁牛特旗、苏尼特左旗等地区,面积占风沙源区的19.64%(表2);防风固沙能力较高区面积最大,占全区面积的29.42%,集中分布在苏尼特右旗、四王子旗、张北县以及怀仁县等区域;防风固沙能力一般区占京津风沙源区的20.95%,零散分布特征明显;另外有19.15%的防风固沙能力较低区,主要分布在丰宁县、隆化县、围场县以及林西县、巴林左旗等;而防风固沙能力低值区约有10.84%,且零散分布于喀喇沁旗、宁城县等周边地区(图4)。

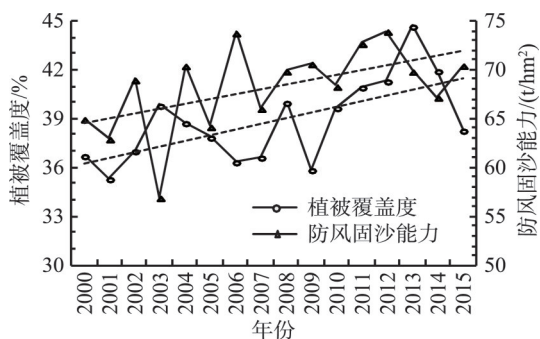


图3 京津风沙源区防风固沙能力与植被覆盖变化

Fig. 3 Changes of vegetation coverage and sand-fixing capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

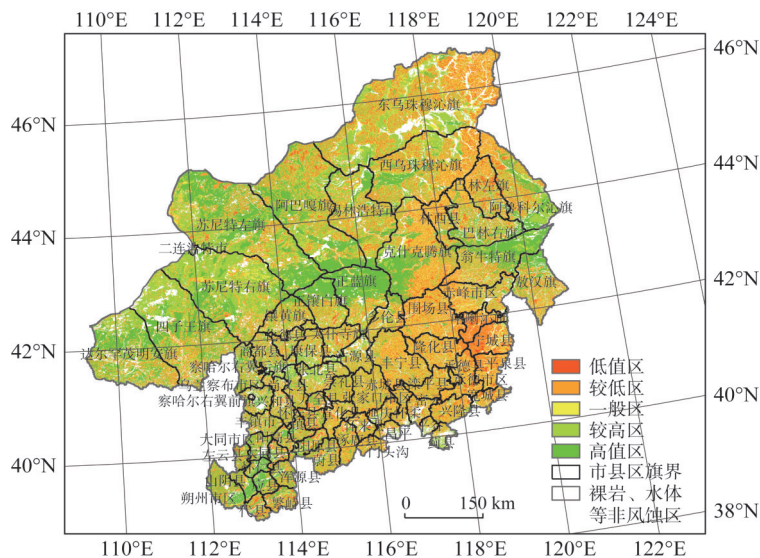


图4 京津风沙源区多年平均防风固沙能力空间分布

Fig. 4 Averaged sand-fixing capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

相比2000年，2015年京津风沙源区有53.74%的地区防风固沙能力增加（表2），其中，2.22%的区域防风固沙能力明显增加，主要为崇礼县、沽源县、丰宁县等；51.52%的地区防风固沙能力一般增加，广泛分布在京津风沙源区东南部的敖汉旗、宁城县、平泉县、滦鹿县、蔚县等。此外，全区有3.75%的地域防风固沙能力下降，其中，四王子旗、苏尼特右旗、苏尼特左旗和克什克腾旗的部分地区明显降低，面积约为全区的2.78%；四王子旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、达尔罕茂明安联合旗等西部区域，防风固沙能力一般降低，面积约占0.97%。其余42.51%的地区防风固沙能力未明显变化，主要为东乌珠穆沁旗、锡林浩特市、巴林左旗、正镶白旗、多伦县等西北部地区（图5）。可见，2000-2015年京津风沙源区东南部防风固沙能力增加明显，西部地区防风固沙能力明显下降，主要原因在于西部地区覆被多为荒漠沙地，植被覆盖度低，生态环境脆弱，被破坏的植被难以生长恢复。

2.3 亚区防风固沙功能差异

从京津风沙源区8个亚区防风固沙功能差异来看（图6），浑善达克沙地亚区防风固沙

表2 2000-2015年京津风沙源区防风固沙能力变化

Table 2 Changes of sand-fixing capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2015

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 变化分区	变化值（Δ）分级 依据/(t/hm ²)	变化区面积 比例/%
高值区	$SRA \geq 100$	19.64	明显增加区	$\Delta \geq 30$	2.22
较高区	$70 \leq SRA < 100$	29.42	一般增加区	$5 \leq SRA < 30$	51.52
一般区	$40 \leq SRA < 70$	20.95	无变化区	$-5 \leq SRA < 5$	42.51
较低区	$10 \leq SRA < 40$	19.15	一般降低区	$-30 \leq SRA < -5$	0.97
低值区	$SRA < 10$	10.84	明显降低区	$SRA < -30$	2.78

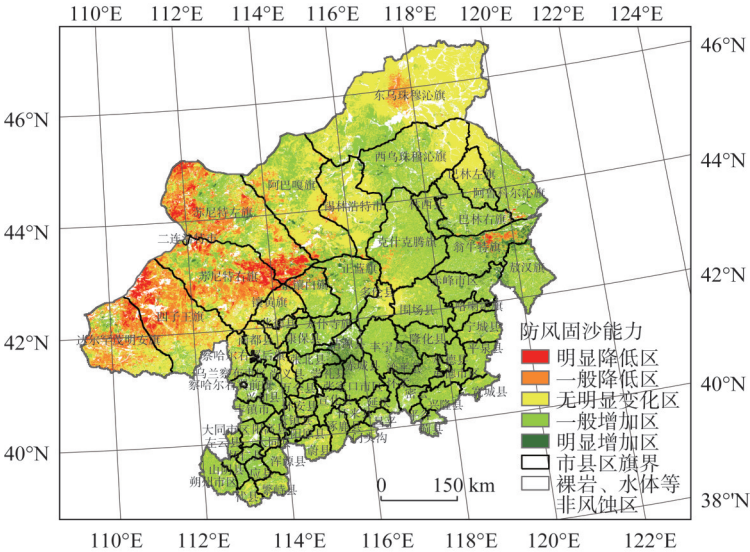


图5 京津风沙源区防风固沙能力变化区

Fig. 5 Changed areas of sand-fixing capacity in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

量最大 (6.46 亿 t/a), 约占全区防风固沙量的 32.32%; 其次为典型草原亚区和荒漠草原亚区, 年均提供 5.80 亿 t 和 5.37 亿 t 的防风固沙量; 燕山丘陵山地水源保护亚区、科尔沁沙地亚区和农牧交错带草原亚区年均供给全区防风固沙量的 15.64%、14.14% 和 14.07%; 大兴安岭南部亚区的防风固沙量较低 (2.01 亿 t/a), 而晋北山地丘陵亚区防风固沙量最低 (1.58 亿 t/a), 不及防风固沙总量的 7.91%。从防风固沙能力来看, 浑善达克沙地亚区最高 (90.09 t/hm²), 其次为荒漠草原亚区和科尔沁沙地亚区, 晋北山地丘陵亚区、农牧交错带草原亚区和典型草原亚区防风固沙能力为 61~75 t/hm², 大兴安岭南部亚区和燕山丘陵山地水源保护亚区的防风固沙能力较低, 多年均值分别为 48.08 t/hm²和 44.53 t/hm², 主要由于该区域山体阻挡风力降低, 裸地及沙化土地覆被少, 土壤潜在风蚀风险低, 因而实际发挥的固沙能力较小。

从变化趋势来看, 2000-2015 年京津风沙源区亚区防风固沙功能均与年份变化正相关 (表 3), 其中, 科尔沁沙地亚区、大兴安岭南部亚区、农牧交错带草原亚区、燕山丘陵山地水源保护亚区和晋北山地丘陵亚区为显著正相关, 而浑善达克沙地亚区、典型草原亚区和荒漠草原亚区的相关性不显著。为此, 对亚区防风固沙功能线性拟合发现, 燕山

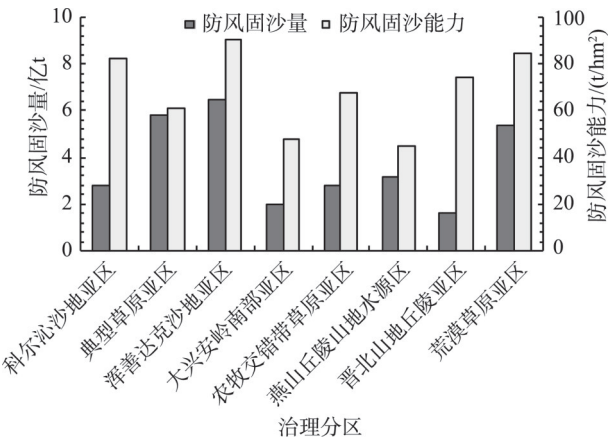


图6 京津风沙源不同亚区防风固沙功能差异

Fig. 6 Changes of sand-fixing service in eight subzones of the Beijing-Tianjin sandstorm source region

表3 京津风沙源区亚区防风固沙功能变化统计

Table 3 Statistical variables on the sand-fixing services in subzones of the Beijing-Tianjin sandstorm source region

治理分区	防风固沙量相关检验与拟合			防风固沙能力相关检验与拟合		
	相关系数 <i>r</i>	显著性 Sig.	防风固沙量 变化/(万 t/a)	相关系数 <i>r</i>	显著性 Sig.	防风固沙能力 变化/(t/hm ²)
科尔沁沙地亚区	0.596	0.015*	218.44	0.506	0.045*	0.50
典型草原亚区	0.368	0.161	—	0.183	0.498	—
浑善达克沙地亚区	0.490	0.054	—	0.304	0.253	—
大兴安岭南部亚区	0.562	0.023*	210.00	0.534	0.033*	0.45
农牧交错带草原亚区	0.505	0.046*	291.56	0.432	0.094	0.55
燕山丘陵山地水源保护亚区	0.745	0.001**	681.56	0.745	0.001**	0.97
晋北山地丘陵亚区	0.518	0.040*	145.31	0.533	0.034*	0.71
荒漠草原亚区	0.327	0.217	—	0.121	0.657	—

注：*、**分别为0.05、0.01水平下显著，—为非线性关系下未拟合其趋势变化，下同。

丘陵山地水源保护亚区防风固沙功能提升最大，防风固沙量和防风固沙能力分别增加681.56万 t/a 和0.97 t/hm²；农牧交错带草原亚区、大兴安岭南部亚区与科尔沁沙地亚区防风固沙功能的提升程度接近；虽然晋北山地丘陵亚区防风固沙能力增幅明显（0.71 t/hm²），但受土地面积较小影响，防风固沙量仅增加145.31万 t/a（表3）。

2.4 地市防风固沙功能差异

京津风沙源区11个地市防风固沙功能也存在明显差异（图7）。锡林郭勒盟防风固沙量最高（14.42亿t/a），贡献了全区防风固沙量的48.11%；其次为赤峰市（5.59亿t/a）和乌兰察布市（3.04亿t/a），分别供给了18.64%和10.16%的防风固沙量；张家口市、承德市和包头市年均防风固沙量较高，而大同市、朔州市、北京市和忻州市年防风固沙量较低；天津市防风固沙量最低（0.08亿t/a），不及防风固沙总量的0.26%，主要因该地区（蓟县）面积较小所致。不过，从防风固沙能力来看，朔州市最高（84.38 t/hm²），其次为包头市（81.71 t/hm²），锡林郭勒、乌兰察布市和大同市防风固沙能力分布在71.45~74.23 t/hm²；相比之下，北京市和承德市防风固沙能力较低，分别为46.33 t/hm²和38.21 t/hm²，主要原因是京承地区山体高大，受阻后的风力变小，加上茂密植被覆盖，土壤风蚀的风险很小，因而实际发挥的防风固沙功能较低。

2000-2015年京津风沙源区地市防风固沙功能均与年份变化有相关性（表4），其中，赤峰、承德、张家口、北京、天津、大同以及忻州等地市为显著正相关，包头市、乌兰

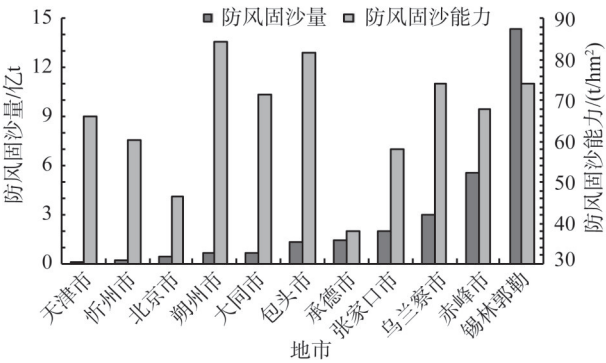


图7 京津风沙源区不同地市防风固沙功能差异
Fig. 7 Municipal differences of sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

表4 京津风沙源区地市防风固沙功能变化统计

Table 4 Statistical variables on the sand-fixing service of cities in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

地市	相关系数 <i>r</i>	显著性 Sig.	防风固沙 变化/(万 t/a)	相关系数 <i>r</i>	显著性 Sig.	防风固沙能力 变化/(t/hm ²)
锡林郭勒盟	0.505	0.046 [*]	1095.00	0.306	0.248	—
赤峰市	0.582	0.018 [*]	463.13	0.525	0.037 [*]	0.45
包头市	0.146	0.590	—	-0.158	0.559	—
承德市	0.722	0.002 ^{**}	368.44	0.719	0.002 ^{**}	0.95
张家口市	0.717	0.002 ^{**}	360.94	0.704	0.002 ^{**}	0.96
乌兰察布市	0.396	0.129	—	0.225	0.403	—
北京市	0.736	0.001 ^{**}	89.06	0.750	0.001 ^{**}	1.05
天津市	0.718	0.002 ^{**}	15.94	0.729	0.001 ^{**}	1.42
大同市	0.562	0.024 [*]	70.31	0.575	0.020 ^{**}	0.78
朔州市	0.468	0.068	—	0.480	0.060	—
忻州市	0.512	0.043 [*]	20.63	0.532	0.034 [*]	0.56

察布市及朔州市的相关性不显著,虽然锡林郭勒盟防风固沙能力与年份变化不显著相关,但是受其面积影响,防风固沙量呈显著相关性,且增幅明显。对地市防风固沙功能线性拟合发现,北京市和天津市(蓟县)防风固沙能力增幅明显,但因其地域面积较小,防风固沙量增幅并不大;张家口与承德市防风固沙功能变化接近,而忻州市和赤峰市防风固沙能力增幅较小,但受地域面积影响,赤峰市防风固沙量增幅相对较大(表4)。

3 结论与讨论

3.1 结论

研究表明,2000-2015年京津风沙源区防风固沙功能明显提升,年均防风固沙量为28.98亿t,防风固沙能力达68.24 t/hm²,且呈西北高、东南低的空间格局,近一半地区防风固沙能力高于全区平均值;相比2000年,2015年东南部地区防风固沙能力增加明显,而西部地区防风固沙能力有所下降,需要重点加以关注。此外,浑善达克沙地亚区、典型草原亚区和荒漠草原亚区是防风固沙功能的主要供给区,评估期内燕山丘陵山地水源保护亚区和晋北山地丘陵亚区的防风固沙能力提升显著。从地市来看,锡林郭勒盟、赤峰市和乌兰察布市是防风固沙功能的主要供给区,不过朔州市与包头市防风固沙能力较高,京津冀地区防风固沙能力增速最明显,未来需重点提升北部和西部地区防风固沙功能。

为此,建议将京津风沙源区依据区域防风固沙能力、提升潜力以及生态功能定位划分为重点提升区、生态维护区与综合优化区,并施以不同的管理措施。重点提升区以目前防风固沙能力较低且有较大提升潜力的西部与北部区域为主,加大生态工程治理力度,高效提升区域防风固沙功能;生态维护区集中在目前防风固沙能力较高且生态恢复效果较稳定区域,逐步减少生态工程治理与人工干扰措施,增强生态系统的自然演替;综合优化区分布在土壤风蚀风险较低且需保障综合生态功能的区域,比如张家口—承德地区,重点优化水源涵养、水土保持、防风固沙等生态屏障功能,恢复与维护丰富多样

的生态系统。

3.2 讨论

本文评估分析了2000-2015年京津风沙源区防风固沙功能的变化及其区域差异, 结果发现, 京津风沙源区防风固沙功能有所提升, 这与滑永春等^[31]、吴丹等^[12]研究认为京津风沙源区土地沙化状况已有所改善的结论一致。此外, 测算京津风沙源区防风固沙能力多年均值为 68.24 t/hm^2 , 略高于江凌等^[11]估算2000-2010年内蒙古生态系统年均防风固沙 48.80 t/hm^2 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。此外, 本研究统计典型草原区防风固沙能力均值为 61.04 t/hm^2 , 与巩国丽等^[9]测算内蒙古典型草原区防风固沙能力 $50\sim 70 \text{ t/hm}^2$ 的结果一致。不过, 本文中浑善达克沙地区防风固沙能力均值为 90.09 t/hm^2 , 高于申陆等^[10]评估浑善达克沙地防风固沙功能区的结论, 主要原因是后者研究区包括浑善达克沙地区以及丰宁、围场、张北等风蚀低风险地区, 降低了区域防风固沙能力的均值。此外, 京津风沙源区防风固沙功能的变化, 不仅受风沙源治理工程的影响, 而且与气象条件的波动有一定关系, 未来研究应重点关注该区域防风固沙功能与工程布局、措施以及气象波动之间的关系解析。

不过, RWEQ模型是美国农业部20世纪80年代建立的经验模型, 计算参数均来源于美国大平原的统计值, 缺乏一定的理论与物理过程基础^[32], 且具有很强的地域性, 比如土壤粒径分类系统、管理措施以及可蚀性边界等, 具体应用时需进行修正。本文在借鉴前人研究成果基础上^[9-11], 采用了中国北方沙化地区修正后的关键参数和计算公式。为满足模型对数据空间和时间分辨率的要求, 对部分输入参数进行了插值处理, 可能导致评估结果的误差与不确定性, 未来需要进一步完善与验证。此外, RWEQ模型在风蚀因子分类与相互影响方面存在不足, 以至于风蚀影响因子仅是特定区域的经验表达, 不具有普适性的风蚀动力学理论基础^[33]。因此, 重新构建具有理论基础与广泛适用性的土壤风蚀模型势在必行。

参考文献(References):

- [1] 张克峰, 李宪文, 张定祥, 等. 中国土地资源退化时空变化分析. 环境科学, 2006, 27(6): 1244-1251. [ZHANG K F, LI X W, ZHANG D X, et al. Spatial-temporal dynamic change of land resource degradation in China. Environmental Science, 2006, 27(6): 1244-1251.]
- [2] 屠志方, 李梦先, 孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析. 林业资源管理, 2016, (1): 1-5, 13. [TU Z F, LI M X, SUN T. The status and trend analysis of desertification and sandification. Forest Resources Management, 2016, (1): 1-5, 13.]
- [3] 沈国舫, 吴斌, 张守攻, 等. 新时期国家生态保护和建设研究. 北京: 科学出版社, 2017. [SHEN G F, WU B, ZHANG S G, et al. Research on the State Ecological Protection and Development in the New Era. Beijing: Science Press, 2017.]
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-Being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [5] 张力小. 关于重大生态建设工程系统整合的思考. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(12): 73-77. [ZHANG L X. Systematic integration of key ecological construction projects in China. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(12): 73-77.]
- [6] 黄麟, 曹巍, 徐新良, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设工程的宏观生态效应. 自然资源学报, 2018, 33(3): 398-411. [HUANG L, CAO W, XU X L, et al. The ecological effects of ecological security barrier protection and construction project in Tibet Plateau. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 398-411.]

- [7] 京津风沙源治理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. 北京: 中国林业出版社, 2013. [The Study Team of the Second Stage of the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project. The Planning Thoughts on the Second Stage of the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.]
- [8] 韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 等. 黑河下游重要生态功能区植被防风固沙功能及其价值初步评估. 自然资源学报, 2011, 26(1): 58-65. [HAN Y W, TUO X S, GAO J X, et al. Assessment on the sand-fixing function and its value of the vegetation in eco-function protection areas of the lower reaches of the Heihe River. Journal of Natural Resources, 2011, 26(1): 58-65.]
- [9] 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. 地球信息科学学报, 2014, 16(3): 426-434. [GONG G L, LIU J Y, SHAO Q Q. Effects of vegetation coverage change on soil conservation of typical steppe in Inner Mongolia. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(3): 426-434.]
- [10] 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. 应用生态学报, 2016, 27(1): 73-82. [SHEN L, TIAN M R, GAO J X, et al. Spatio-temporal change of sand-fixing function and its driving forces in desertification control ecological function area of Hunshandake, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 73-82.]
- [11] 江凌, 肖赓, 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. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747. [JIANG L, XIAO Y, RAO E M, et al. Effect of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3743-3747.]
- [12] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 等. 京津风沙源治理工程生态效应评估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123. [WU D, GONG G L, SHAO Q Q, et al. Ecological effects assessment of Beijing and Tianjin sandstorm source control project. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 117-123.]
- [13] 高尚玉, 邹学勇, 张春来, 等. 京津风沙源治理工程效益. 北京: 科学出版社, 2008. [GAO S Y, ZOU X Y, ZHANG C L, et al. Benefits of the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Project. Beijing: Science Press, 2008.]
- [14] 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(2): 86-92. [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. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 86-92.]
- [15] 石莎, 冯金朝, 周芸芸. 京津风沙源治理工程区植被地上生物量与净第一性生产力生产动态. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 886-894. [SHI S, FENG J C, ZHOU Y Y. Dynamic change of the aboveground biomass and net primary productivity in the areas of Beijing and Tianjin sand source control project. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6): 886-894.]
- [16] BANGNOLD R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941.
- [17] WOODRUFF N P, SIDDOWAY F H. A wind erosion equation. Proceedings of the Soil Science Society of America, 1965, 29: 602-608.
- [18] GREGORY J M, BORRELLI J, FEDLER C B. TEAM: Texas erosion analysis models. Proceeding of 1998 Wind Erosion Conference, Lubbock, 1998: 13-88.
- [19] BOCHAROV A P. A Description of Devices Used in the Study of Wind Erosion of Soil. New Delhi: Oxbnian Press, 1984.
- [20] FRYREAR D W, BILBRO J D, SALEH A, et al. RWEQ: Improved wind erosion technology. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55: 183-189.
- [21] HAGEN L J. Evaluation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion submodel on cropland fields. Environmental Modelling and Software, 2004, 19: 171-176.
- [22] 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(6): 825-834. [GONG G L, LIU J Y, SHAO Q Q, et al. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since 1990s using the Revised Wind Erosion Equation. Progress in Geography, 2014, 33(6): 825-834.]
- [23] 江凌, 肖赓, 欧阳志云, 等. 基于RWEQ模型的青海省土壤侵蚀模数估算. 水土保持研究, 2015, 22(1): 21-25, 32. [JI-

- ANG L, XIAO Y, OUYANG Z Y, et al. Estimation of the wind erosion modules in Qinghai province based on RWEQ model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 21-25, 32.]
- [24] DU H Q, DOU S T, DENG X H, et al. Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, China. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 117-131.
- [25] PI H W, SHARRATT B, FENG G, et al. Evaluation of two empirical wind erosion models in arid and semiarid regions of China and the USA. *Environmental Modeling & Software*, 2017, 91: 28-46.
- [26] 覃云斌, 信忠保, 易扬, 等. 京津风沙源治理工程区沙尘暴时空变化及其与植被恢复关系. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 196-204. [QINN Y B, XIN Z B, YI Y, et al. Spatiotemporal variation of sandstorm and its response to vegetation restoration in Beijing-Tianjin sandstorm source area. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(24): 196-204.]
- [27] HAGEN I J, SKIDMORE E L, SALEH A. Wind erosion: Prediction of aggregate abrasion coefficients. *Transaction of the ASAE*, 1992, 35(6): 1847-1850.
- [28] 尚润阳, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 37-39. [SHANG R Y, QI Y X, ZHAO T N, et al. Field investigation on the influence of vegetation on wind and soil erosion. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4): 37-39.]
- [29] 李秀霞, 倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析. *地理科学进展*, 2009, 8(2): 161-166. [LI X X, NI J R. Spatial similarity between soil erosion and its influencing factors based on information entropy theory. *Progress in Geography*, 2009, 8(2): 161-166.]
- [30] 李军, 游松财, 黄敬峰. 基于GIS的中国陆地表面粗糙度长度的空间分布. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2006, 24(2): 185-189. [LI J, YOU S C, HUANG J F. Spatial distribution of ground roughness length based on GIS in China. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2006, 24(2): 185-189.]
- [31] 滑永春, 彭道黎, 陈鹏飞. 基于MODIS NDVI的京津风沙源工程治理区荒漠化动态监测. *西北林学院学报*, 2010, 25(6): 210-215. [HUA Y C, PENG D L, CHEN P F. MODIS NDVI based on dynamic monitoring of desertification in the sandstorm sources control project area around Beijing and Tianjin. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(6): 210-215.]
- [32] 董治宝, 高尚玉, 董光荣. 土壤风蚀预报研究述评. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 312-317. [DONG Z B, GAO S Y, DONG G R. A review of wind erosion prediction research. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 312-317.]
- [33] 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(8): 875-889. [ZOU X Y, ZHANG C L, CHENG H, et al. Classification and representation of factors affecting soil erosion in a model. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(8): 875-889.]

Spatial-temporal changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region

ZHANG Biao¹, LI Qing-xu^{1,2}, WANG Shuang^{1,2}, XIE Gao-di^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Wind erosion is an important soil degradation process that takes place in arid and semiarid environments, and the sand-fixing service has been used as one of the key indicators of the ecological restoration effects in the Beijing-Tianjin sandstorm source region. Over the past few decades, some studies have focused on the sand-fixing service at local areas in the Beijing-Tianjin sandstorm source region, but few researchers explored the entire changes and regional differences of sand-fixing service. The inadequate information on the sand-fixing service heterogeneity has hindered the implementation of the diversified measures for land management. This paper investigated the dynamic changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region from 2000 to 2015 through multi-period RS data and GIS spatial statistical technologies. The annual amount of fixed sand and average amount of fixed sand per hectare of land served as two indicators for the changes and differences of sand-fixing service. The results indicated that, the annual amount of fixed sand nearly reached 2.90 billion tons in the study region, the average capacity of sand-fixing was 68.24 t/hm², and the two indexes annually increased by 1.10% and 0.71%, respectively. The average sand-fixing ability in the northwest of sandstorm source region has a significantly higher level than the southeast part. Approximately 49.06% of the Beijing-Tianjin sandstorm source region generated the sand-fixing capacity higher than 70 t/hm², and nearly 54% presented an obvious increase in the sand-fixing ability from 2000 to 2015. The Hunshadake sand subzone, the typical grassland subzone and the desert grassland subzone provided 88% of the total amount of fixed sand in the sandstorm source region, whereas the sand-fixing ability in the Jinbei mountain-hill subzone and the Yanshan mountain-hill-water source protection subzone showed higher annual increase rates. In addition, the accumulated amount of fixed sand in Xilin Gol, Chifeng and Ulanqab exceeded 77% of the total amount of sand-fixing service, however, those regions with higher sand-fixing ability are mainly located in Shuozhou and Baotou, and the lands in Beijing and Tianjin showed higher increase rates in sand-fixing abilities. Therefore, we should take differential strategies in different sand-fixing service restoration zones, and pay more attention to the improvement of sand-fixing service in the western and northern parts of the Beijing-Tianjin sandstorm source region.

Keywords: sand-fixing service; revised wind erosion equation; spatial-temporal change; regional difference; Beijing-Tianjin sandstorm source control region