

辽西北地区防风固沙辐射效应空间差异研究

王 耕, 张红玉

(辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要:为提高风域生态系统上风向与下风向区生态服务功能的协调与修复能力,基于修正风蚀方程(RWEQ)与 GIS 技术,并结合辽西北风域生态系统的风向、风速与土壤尘粒组成,评估分析了辽西北地区二期治沙工程后防风固沙功能的辐射效应。结果表明:受到气候、植被盖度、土壤类型、人类活动等诸多因素的影响,辽西北生态系统防风固沙功能具有空间地域差异性,整体呈现南北较强、中部较弱的空间分布格局。研究区防风固沙量为 3.754×10^7 t,防风固沙能力为 824.35 t/km²,产生辐射效应影响到的最远距离为 $1\ 250$ km,辐射区总面积 37.26 km²,是研究区自身面积的 8.18 倍。减少下风向区域的风沙量为 1.877×10^7 t,其中延边朝鲜族自治州享受到的辐射效应最大,减少沙尘量为 2.03×10^6 t,占总效应的 10.82% ;伊春市享受的辐射效应最小,沙尘量减少 1.1×10^3 t,占总效应的 0.005% 。总而言之,辽西北地区防风固沙功能空间分布差异性明显,风域生态系统防风固沙功能具有很强的辐射效应。

关键词:辽西北地区; 风域生态系统; 防风固沙功能; 空间差异; 辐射效应

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0161-06

Study on the Spatial Difference of Radiation Effect of Sand-fixing in Northwest Liaoning Province

WANG Geng, ZHANG Hongyu

(School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: To improve the coordination and restoration ability of the upwind and downwind ecological service functions of the wind domain ecosystem, based on revised wind erosion equation (RWEQ) and GIS technology, combined with wind direction, wind speed and soil dust composition, the radiation effect of sand-fixing function after the second phase of sand control project in Northwest Liaoning Province was evaluated and analysed. The functions of the sand-fixing of wind domain ecosystems in Northwest Liaoning Province have spatial and regional differences due to the influence of climate, vegetation coverage, soil types, human activities, and the overall distribution pattern is stronger in the north and south, and weaker in the central region. The amount of sand-fixing in the study area was 3.754×10^7 t, the capacity of sand-fixing was 824.35 t/km², the furthest distance affected by radiation effect is $1\ 250$ km, the total area of the radiation area is 37.26 km², which is 8.18 times of the study area itself. The amount of sand in the downwind area was reduced 1.877×10^7 t. Yanbian Korean Autonomous Prefecture experienced the largest radiation effect, with a reduction of 2.03×10^6 t of dust, accounting for 10.82% of the total effect. Yichun City experienced the least radiation effect, with a decrease of 1.1×10^3 t of dust, accounting for 0.005% of the total effect. In conclusion, there are obvious differences in the spatial distribution of sand-fixing functions in Northwest Liaoning, and the function of sand-fixing of wind region ecosystems has a strong radiation effect.

Keywords: Northwest Liaoning Province; wind domain ecosystems; sand-fixing function; spatial difference; radiation effect

风域生态系统指以风为传播介质所形成的生态单元,从发生学角度讲,是以空气为载体,以大气运动作为物质流传播方式,形成的复杂的多功能区域综合体^[1]。风域中,风蚀产生的沙尘会随风运移,由于途经各生态功能体数量或空间布局不合理,沙粒没有有效截留,沙尘沿特定迁移路线在各个功能体上不断累积,引发风域下风向城市沙尘暴问题,威胁城市生态安全,影响居民生活质量。在风沙源区,植被可以消减大风对土壤表层颗粒吹扬,使范围内风域生态系统结构与过程处于不受或少受破坏的状态,同时避免或减少下风向区域沙尘灾害发生^[2],这种辐射效应使得防风固沙功能可以在比其栖息地大得多的范围内产生经济价值^[3],所以分析防风固沙功能的辐射效应就显得尤为重要。防风固沙功能辐射范围受风速、土壤粒径等因素影响,辐射强度最直观体现在下风向区沙尘沉降量的减少^[4]。防风固沙功能具有空间流动性,以往的研究多注重防风固沙功能区域差异、时空变化规律及驱动力分析,但防风固沙作为流动性功能,着重于实现不同区域之间相互促进、共同发展,应从整体性、综合性、动态性方面分析其区际生态联系^[5]。分析风域生态系统防风固沙的辐射效应,有利于防风固沙生态屏障的建设与改善,同时为决策者因地制宜地进行生态环境保护与生态建设提供科学依据。

防风固沙量的评估是防风固沙功能辐射效应研究的基础,主要通过风蚀模型进项估算。20世纪60年代,国外先后开发了通用风蚀方程(WEQ)^[6]、德克萨斯侵蚀分析模型(Team)^[7]、修正风蚀方程模型(RWEQ)^[8]和风蚀预报系统(WEPS)^[9]等,我国防风固沙评估模型研究进展较慢,在1998年由董治宝^[10]提出首个风蚀流失量模型。目前修正风蚀方程(RWEQ)是评估防风固沙功能的主要技术手段^[11],如王洋洋等^[12]基于RWEQ模型,对2000—2015年宁夏草地防风固沙服务功能进行了定量化的估算;申陆等^[13]利用RWEQ模型定量分析了浑善达克地区多年间防风固沙能力的变化以及其内在驱动力。RWEQ模型能够较准确地估算防风固沙量,而且广泛应用于中国北方防风固沙功能研究。基于此,本文应用RWEQ模型,针对2015年辽西北地区二期治沙工程后生态系统防风固沙功能及其空间流动产生的辐射效应进行评估,有助于辨识影响风域生态系统服务传递的关键区位,为未来生态治理提供针对性方案,提高风域生态系统上风向与下风向区生态服务功能的协调与修复效率,并为区域生态补偿政策制定提供科学依据,是实现可持续发展与保障区域生态安全的重要途径。

1 研究区概况

从风域生态系统来看,辽西北风域生态系统从上风向至下风向可依次划分为沙尘源区、防风固沙区、沙尘影响区,其中风沙源区主要处在内蒙古自治区的科尔沁沙地和浑善达克沙地,辽西北地区是防风固沙区,指辽宁省的西北部,位于118°56′—125°06′E,40°58′—43°26′N,由阜新市、朝阳市、铁岭市及沈阳市的康平县和法库县组成,总面积45 539 km²。该区处于亚干旱气候区,以温带大陆性季风气候为主,夏季受暖湿的西南季风的影响,炎热多雨,冬季受蒙古—西伯利亚高压控制,寒冷干燥,盛行西北风或北风,春秋两季受单一气团控制,多大风少降水,春季蒸发快且多大风天气,容易形成春旱。年平均降水量为400~800 mm,年平均蒸发量为1 000~1 500 mm,年平均气温7.4~9.5℃,年日照时数2 823~2 944 h,年平均风速为3.7~4.6 m/s,冬春两季大风频率可占全年的65%~80%^[14]。地形以山地丘陵为主,大体呈现自西南向东北阶梯式降低的格局^[15]。土壤受地形、气候、成土母质、植被、社会等影响,种类繁多,大体分为森林土、风沙土、草甸土、盐渍土,容易遭受土壤风蚀,水土流失严重,生态环境脆弱。

由于地形和气候原因,辽西北地区植被稀少、荒山遍布、十年九旱,常常是漫天风沙。为加强草原沙化治理,恢复和保护草原生态环境,针对辽西北土地沙化严重地区开展草原沙化治理一期工程(2009—2011年),2012年,再利用4 a时间在原有基础上实施辽西北草原沙化治理二期工程(2012—2015年),治理辽西北地区沙化、退化草原4.6×10⁵ hm²,沙化草原植被盖度提高到65%以上^[16],辽西北实现了绿进沙退的逆转,形成沿科尔沁沙地南缘网状分布的草原阻沙带,初步遏制草原沙化、退化势头,为辽宁中部城市群建起一道绿色屏障。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

为反映“十三五”期间辽西北地区防风固沙生态服务功能差异,选取沙化治理二期工程后的数据。用于计算土壤湿度和气象因子的气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)的气象站数据,包括2015年月均风速、降水、气温、日照时数等通过数据插值得到。雪盖因子利用中国科学院旱区寒区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的2015年中国雪深长时间序列数据集计算。土壤数据来源于中国科学院旱区寒区科学数据中心

(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的1:100万土壤图,以及所附的土壤属性表和空间数据。数字高程模型(DEM)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。辽西北地区2015年NDVI数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)。

2.2 研究方法

2.2.1 防风固沙量估算 在充分考虑风速^[17]、土壤^[18]、地形^[19]、植被^[20]等要素情况下,应用修正风蚀方程模型(RWEQ)计算研究区裸土条件下潜在风蚀量和植被覆盖条件下的实际风蚀量,取二者之差作为生态系统防风固沙量^[21]。

$$Q'_{\max} = 109.8(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K') \quad (1)$$

$$S' = 150.71(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K')^{-0.3711} \quad (2)$$

$$SL' = \frac{2z}{(S')^2} Q'_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{z}{S'}\right)^2} \quad (3)$$

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

$$S = 150.71(WF \cdot EF \cdot SCF \cdot K' \cdot C)^{-0.3711} \quad (5)$$

$$SL = \frac{2z}{S^2} Q_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{z}{S}\right)^2} \quad (6)$$

$$G = SL' - SL \quad (7)$$

式中:SL'为潜在风蚀量(kg/m²);Q'_{\max}为潜在风力的最大输沙能力(kg/m);S'为潜在关键地块长度(m);SL为实际风蚀量(kg/m²);Q_{\max}为风力的最大输沙能力;S为关键地块长度(m);z为下风向距离(m);WF为气象因子;EF为土壤可蚀性因子;SCF为土壤结皮因子;K'为地表糙度因子;C为植被因子;G为防风固沙量(kg/m²)。

(1) 气象因子。气象因子(WF)即风速、温度及降雨等各类气象因子对风蚀综合影响的反映,其表达式如下:

$$WF = Wf \cdot \frac{\rho}{g} \cdot SW \cdot SD \quad (8)$$

$$Wf = u_2(u_2 - u_1)^2 \cdot N_d \quad (9)$$

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(m/s²);ρ为空气密度(kg/m³);SW为土壤湿度因子;SD为雪盖因子;u₁为起沙风速(m/s),本次计算取5 m/s^[22];u₂为气象站月均风速值(m/s);N_d为各月风速大于5 m/s的天数。

(2) 土壤可蚀性因子。土壤可蚀性因子(EF)是一定土壤理化条件下土壤受风蚀影响大小^[23],其表达式如下:

$$EF = \frac{29.09 + 0.31s_a + 0.17s_i + 0.33\left(\frac{s_a}{c_1}\right) - 2.59OM - 0.95c_2}{100} \quad (10)$$

式中:s_a为土壤砂粒含量(%);s_i为土壤粉砂含量(%);c₁为土壤黏粒含量(%);OM为土壤有机质含量(%);c₂为碳酸钙含量(%)。

(3) 土壤结皮因子。土壤结皮因子(SCF)即在一定土壤理化条件下土壤结皮抵抗风蚀能力的大小^[23],其表达式如下:

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(c_1)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (11)$$

式中:c₁为土壤黏粒含量(%);OM为土壤有机质含量(%)。

(4) 植被因子。植被覆盖因子(C)表示一定植被条件对风蚀的抑制程度^[24],其表达式如下:

$$C = e^{-0.0438SC} \quad (12)$$

$$SC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (13)$$

式中:SC为植被覆盖度(%);NDVI, NDVI_{MAX}, NDVI_{MIN}分别为NDVI实际值、最大值及最小值。

(5) 地表糙度因子。地表糙度因子(K')是由地形所引起地表粗糙程度对风蚀影响的反映^[25],其表达式如下:

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

$$K_r = 0.2 \frac{(\Delta H)^2}{L} \quad (15)$$

式中:K_r为土垄糙度(cm);C_{rr}为随机糙度;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)。

2.2.2 辐射距离估测 根据沙尘粒子自沙面外移后在空中传输距离的经验公式^[26],评估不同粒径沙尘在大风环境下的水平传输距离,利用ArcGIS将其作为缓冲区,在此基础上沿辽西北地区边界选取主频风向线,作为辽西北地区防风固沙功能的辐射范围^[27]。

$$L = \frac{40\epsilon\mu^2u}{\sigma^2g^2d^4} \quad (16)$$

式中:L为沙尘粒子传输距离(km);ε为湍流交换系数;μ为运动黏性系数;u为大风风速(m/s);σ为沙粒密度(kg/m³);d为沙粒直径(μm);g为重力加速度(m/s²)。

2.2.3 辐射效应估算 减少沙尘量(Q_p)是指因植被防风固沙功能而减少风蚀作用对周边区域降落沙尘的物质质量。

$$Q_p = A \cdot G \cdot (d_{<0.002} + d_{0.002 \sim 0.02}) \quad (17)$$

式中:A为研究区面积(m²);G为防风固沙量(kg/m²);d_{<0.002}和d_{0.002~0.02}分别为粒径小于0.002 mm和0.002~0.02 mm的土壤颗粒含量。

3 结果与分析

3.1 防风固沙功能空间分布特征

为揭示辽西北防风固沙功能空间差异,依据生态系统服务功能评估分级,将研究区防风固沙服务功能重要性差异划分为“一般重要”“重要”和“极重要”3个等级^[28](图 1)。

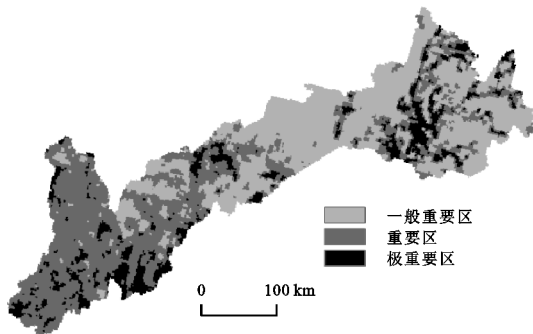


图 1 辽西北地区防风固沙功能重要性

结果表明,辽西北防风固沙功能一般重要区主要在科尔沁沙地南缘内陆部分,约占研究区面积的 43.07%;重要区受海洋暖湿气的影响主要分布在研究区南部,约占研究区面积的 44.38%;另外,分布有 12.55%极重要区,主要位于辽河、大凌河、饶阳河流域附近,整体呈现南北较强、中部较弱的空间分布特征。

3.2 不同市县防风固沙功能差异

受到气候、土壤、地形、植被、人类活动等诸多因素的影响,不同市县的防风固沙功能具有空间差异性^[29](图 2)。基于评估结果,2015 年辽西北草原沙化治理完成二期工程后防风固沙量 3.754×10^7 t。阜新蒙古族自治县防风固沙量最高(4.82×10^6 t),贡献了全区防风固沙量的 12.84%;其次为朝阳县(4.69×10^6 t)和建平县(4.38×10^6 t),分别供给了 12.49%, 11.67%的防风固沙量;北票市、凌源市和昌图县防风固沙量较高;开原市、喀喇沁左翼蒙古族自治县、彰武县、法库县、西丰县、铁岭县和康平县防风固沙量较低;调兵山市防风固沙量最低(3.8×10^5 t),占防风固沙总量的 1.01%,主要因该地区面积较小所致。从防风固沙能力来看,调兵山市最高($1\,310.34$ t/km²),其次为凌源市($1\,083.01$ t/km²)和喀喇沁左翼蒙古族自治县($1\,062.38$ t/km²),朝阳县、建平县、铁岭县、法库县和北票市防风固沙能力分布在 $831.64 \sim 996.81$ t/km²;阜新蒙古族自治县、西丰县、开原市和昌图县防风固沙能力低于平均值分布在 $708.34 \sim 742.11$ t/km²;相比之下,康平县和彰武县防风固沙能力较低,分别为 $588.82, 580$ t/km²。主要原因是地处科尔沁沙地南缘,植被覆盖度差且脆弱,降水量少,

蒸发量大,水土保持能力差,实际土壤风蚀量较高,因而实际发挥的防风固沙能力较低。

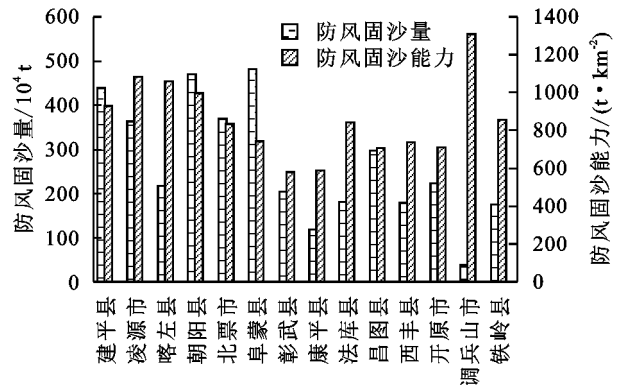


图 2 辽西北地区不同市县防风固沙功能

3.3 沙尘粒子传输范围

根据研究区气象观测数据,将风向分为 8 个方位,统计研究区 2015 年主导风向为西南风,频率为 41.37%,其次为西北风和东北风,频率分别为 21.64%, 20.82%。同时,研究区沙尘及大风天气多发生在春季,春季西南风频率为 48.91%,所以将西南风视为主导风向,分析了西南风作用下沙尘粒子的传输范围。利用 ArcGIS 软件获取研究区沙尘粒子的传输范围(图 3)。结果显示,研究区粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 的沙尘可以传输 $1\,250$ km,包括延边朝鲜族自治州、牡丹江市、鸡西市等地区,涉及 21 个市(自治州),辐射面积达 2.795×10^5 km²;粒径为 $20\ \mu\text{m}$ 的沙尘能传输 117 km,包括四平市、抚顺市、葫芦岛市等 17 个地级市,面积 9.31×10^4 km²。

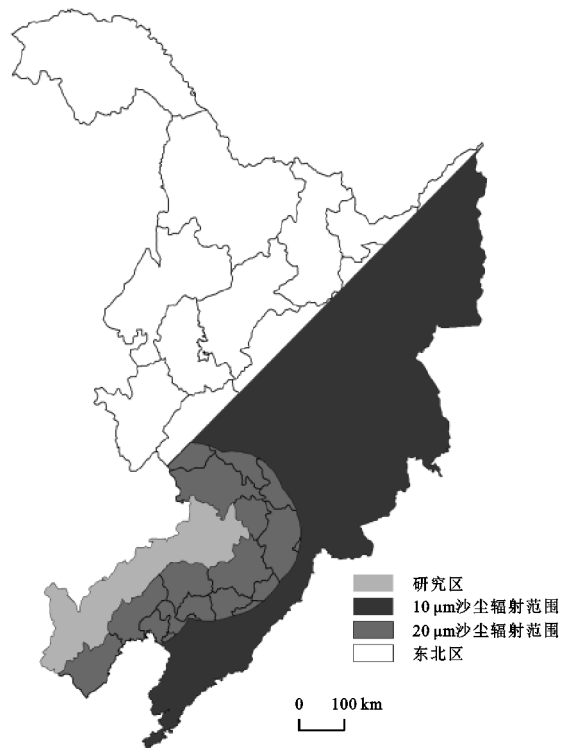


图 3 防风固沙功能辐射效应空间分布

3.4 防风固沙辐射效应评估

2015 年研究区风域生态系统减少东北地区沉积量为 1.877×10^7 t,单位面积减少沉积量为 50.38 t。分析风域生态系统防风固沙功能辐射到东北不同地级市的情

况(表 1),其中延边朝鲜自治州享受到的辐射效应最大,减少沙尘量为 2.03×10^6 t,占总效应的 10.82%,其次为牡丹江市和哈尔滨市等,伊春市享受的辐射效应最小,沙尘量减少为 1.1×10^3 t,占总效应的 0.005%。

表 1 各区域辐射面积和辐射效应

地区	辐射面积/ 10 ³ km ²	减少沙尘量(辐射效应)/ 10 ⁴ t	地区	辐射面积/ 10 ³ km ²	减少沙尘量(辐射效应)/ 10 ⁴ t
朝鲜延边族自治州	40.30	203.02	牡丹江市	36.07	181.69
哈尔滨市	35.67	179.67	吉林市	25.94	130.68
佳木斯市	23.70	119.37	鸡西市	20.22	101.86
双鸭山市	19.84	99.94	长春市	18.79	94.65
白山市	16.12	81.22	通化市	14.58	73.45
四平市	13.53	68.18	丹东市	13.10	65.99
大连市	11.27	56.76	抚顺市	10.55	53.13
葫芦岛市	9.06	45.66	鞍山市	8.80	44.33
锦州市	8.67	43.71	沈阳市	7.71	38.82
本溪市	7.61	38.34	松原市	7.04	35.45
七台河市	5.53	27.84	营口市	5.11	25.74
辽源市	4.78	24.08	辽阳市	4.61	23.24
盘锦市	2.81	14.15	鹤岗市	1.17	5.90
伊春市	0.02	0.11	总计	372.60	1876.98

4 讨论与结论

4.1 讨论

辽西北地区作为阻止科尔沁沙地、浑善达克沙地沙尘侵入东北平原最前沿、最重要的生态屏障^[30],在区域防风固沙中发挥着显著作用。辽西北地区防风固沙功能具有空间差异性,整体呈现南北较强、中部较弱的空间分布特征,主要原因是研究区北部水系分布集中且是灌溉农业区,中部大片沙地、荒漠化现象严重且大风频繁,而南部因为其下垫面多为林地及河渠,风沙活动少,实际土壤风蚀量小,防风固沙能力高。因此,在今后的生态建设过程中,可以把重点放在容易发生土壤风蚀地区,监测其生态环境,以有效提高整体生态系统防风固沙功能。

辽西北草原沙化治理二期工程加快推进科尔沁沙地南缘沙化、荒漠化专项治理,改善辽西北地区生态环境,同时防风固沙功能辐射到东北不同地级市,产生的辐射效应影响到的最远距离为 1 250 km,涉及域外面积达 3.726×10^5 km²,其中延边朝鲜自治州享受到的辐射效应最大,减少沙尘量为 2.03×10^6 t,占总效应的 10.82%,其次为牡丹江市和哈尔滨市等,伊春市享受的辐射效应最小,沙尘量减少为 1.1×10^3 t,占总效应的 0.005%。明确了辽西北风域生态系统防风固

沙功能辐射效应的受益主体,防风固沙功能的流动大大减少了下风向地区沙尘的沉积量,为制定生态补偿政策提供科学依据,从而协调区域生态、经济、社会可持续发展。本文仅研究了防风固沙功能在其下风向地区的直接效应,而防风固沙功能不仅减少了下风向区的沙尘侵害,同时对生命健康、农业、交通等产生积极影响,可以促进下风向区域经济社会的持续发展,并由此带来更为深远的间接效应。因此,如何全面系统的评估风域生态系统防风固沙的辐射效应,今后需要进一步探讨。

4.2 结论

(1) 受气候、土壤、地形、植被等因素影响,辽西北地区防风固沙功能空间差异性较大。防风固沙功能极重要区和重要区主要分布在河流沿岸以及暖湿气候区域,而一般重要区位于沙地荒漠等区域,防风固沙功能较弱。

(2) 从市县来看,阜新蒙古族自治县、朝阳县、建平县、北票市和凌源市提供的防风固沙量占总量的 56.5%,是防风固沙功能的主要供给区,不过调兵山市、凌源市和喀喇沁左翼蒙古族自治县防风固沙能力较高,未来需重点提升中部地区如彰武县、康平县防风固沙功能。

(3) 辽西北防风固沙功能可以辐射到延边朝鲜

族自治州、牡丹江市、哈尔滨市、吉林市等27个市,减少下风向区域的沙尘沉降量 1.877×10^7 t, 辐射面积 3.726×10^5 km², 是辽西北地区自身面积的8.18倍, 可见辽西北生态系统防风固沙功能具有很强的辐射效应, 加强该地区林草生态系统建设, 对于提高东北地区的城市生态安全以及居民生活质量具有现实意义。

参考文献:

- [1] 陈艳梅, 高吉喜, 年蔚, 等. 风域视角京津冀生态廊道空间格局识别[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3418-3426.
- [2] 高吉喜. 区域生态学核心理论探究[J]. 科学通报, 2018, 63(8): 693-700.
- [3] 郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题[J]. 生物多样性, 2003, 11(1): 63-69.
- [4] 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[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 58-65.
- [5] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4213-4222.
- [6] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602-608.
- [7] Gregory J M, Wilson G R, Singh U B, et al. TEAM: Integrated, process-based wind-erosion model [J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(2): 205-215.
- [8] 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.
- [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] 董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 55-62.
- [11] 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): 171-181.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李秀芬, 蔡慧君, 金磊, 等. 辽西北土地利用动态变化及影响因素分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(3): 257-265.
- [15] 王辅强. 辽西北低山丘陵区水土流失特点及主要影响因素分析[J]. 中国水土保持, 2017(9): 64-66.
- [16] 辽宁省人民政府. 辽西北近50万亩退化草原实现补播改良[EB/OL]. 沈阳: 辽宁省人民政府, [2021-06-19]. http://www.ln.gov.cn/qmzx/dtzls/gztj_148685/202106/t20210619_4198315.html.
- [17] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China [J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 534-547.
- [18] 魏慧, 赵文武, 王晶. 土壤可蚀性研究述评[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2749-2759.
- [19] Laura A, Juan C, Daniel E. RWEQ: wind erosion predictions for variable soil roughness conditions [J]. Aeolian Research, 2016, 20: 139-146.
- [20] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 33-40.
- [21] 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.
- [22] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873.
- [23] 巩国丽, 黄麟. RWEQ 模型中土壤结皮和可蚀性因子的改进和应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 271-274, 280.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 李江风. 沙漠气候[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [27] 韩永伟, 王宝良, 刘成程, 等. 关于重点生态功能区生态补偿量计算中应用辐射效应理论的探讨: 以黑河下游防风固沙重点生态功能区为例[J]. 生态经济, 2015, 31(1): 31-34, 54.
- [28] 国家发展和改革委员会. 生态保护红线划定指南[EB/OL]. 北京: 环境保护部, [2017-07-20]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm.
- [29] 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.
- [30] 翟国海, 李洪彪, 陈曦. 辽西北草原沙化治理的路径探索[J]. 辽宁经济, 2009(1): 26-27.