

引用格式: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.[Wang Y Y, Xiao Y, Xie G D, et al. Sand-fixing function of the grassland ecosystem in Ningxia based on the revised wind erosion model[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 980-991.] DOI: 10.18402/resci.2019.05.14

基于RWEQ的宁夏草地防风固沙服务评估

王洋洋^{1,2},肖玉^{1,2},谢高地^{1,2},徐洁^{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:宁夏草地在区域防风固沙中发挥了重要的作用。现有研究大多是基于微观尺度,针对区域尺度的宁夏草地防风固沙时空格局及其变化规律尚不清楚。本文基于RWEQ模型,利用ArcGIS和ENVI,对2000—2015年间宁夏草地防风固沙服务功能进行了定量化的估算。结果表明:①2000—2015年宁夏草地年潜在风蚀总量为1028.30~7540.50万t,年实际风蚀总量为269.75~3318.71万t;②2000—2015年宁夏草地年防风固沙物质总量为729.80~4120.04万t,16年间共增加了124.13万t,平均单位面积年防风固沙物质量在0.33~1.77 kg/m²之间,空间分布呈现出“中高南北低”的特点;防风固沙保有率平均值为0.65~0.79;③草地防风固沙等级以“中等”和“较弱”为主,占总固沙量的47%~65%;“中等”及以上的草地面积波动增加,“弱”和“较弱”等级的草地面积减少;④中部干旱区和南部山区草地防风固沙量占总量的90%以上,北部灌区草地防风固沙量则呈现“先增后减”的趋势。北部灌区和中部干旱区是未来风沙治理需更加关注的区域。本文揭示了宁夏草地防风固沙的时空格局,为未来区域风沙治理提供了参考。

关键词:宁夏;草地;防风固沙;修正风蚀方程模型(RWEQ);生态系统服务;风蚀;时空格局

DOI: 10.18402/resci.2019.05.14

1 引言

防风固沙是干旱与半干旱气候区生态系统提供的重要生态系统服务,其物质量常通过风蚀模型进行计算。目前已有的研究模型包括Bangnold等提出的输沙方程^[1]、风蚀方程(Wind Erosion Equation, WEQ)^[2]、德克萨斯侵蚀分析模型(Texas Erosion Analysis Model, TEAM)^[3]、Bocharov提出的描述模型^[4]、修正风蚀方程模型(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)^[5,6]、风蚀预报系统(Wind Erosion Prediction System, WEPS)^[7]、以及风蚀随机仿真模型(Wind Erosion Stochastic Simulator, WESS)^[8]等。研究者们利用上述各类模型在不同地区进行了大量的风蚀模拟研究。如Mandakh等^[9]基于WEQ模型评价了内蒙古土壤风蚀;Singh等基于TEAM模

型^[10]对德克萨斯州伯克市进行了长期尘埃预测,并对加利福尼亚州的5号州际公路沙尘暴进行了模拟实证研究;基于WEPS模型学者们进行了加拿大阿尔伯塔地区土壤的风蚀风险评估^[11]、天津郊区土壤风蚀起尘量及在中心城区迁移量模拟^[12]、和民勤荒漠地区风蚀量预测^[13]等。此外,研究者们也在建立基于野外实测数据和模拟试验数据的风蚀量经验估算模型^[14,15]、以及基于风沙物理学原理的土壤风蚀模型^[16-18]进行探索和应用。在众多模型中,RWEQ模型由于较为充分地考虑植被、气候和土壤等因子而被越来越多地应用在中国的风蚀和防风固沙研究中。例如,巩国丽等^[19]对RWEQ模型相关参数进行调整,将其应用于中国北方草地的风蚀评估,分析了内蒙古地区风蚀状况^[20]及其影响因素^[21]。江凌

收稿日期:2018-01-04;修订日期:2018-05-04

基金项目:国家重点研发计划课题项目(2016YFC0503706);一二三产业融合发展科技创新示范项目(YES-16-10-1001);宁夏农林科学院科技创新先导资金项目(NKYZ-16-1001)。

作者简介:王洋洋,女,湖北黄冈人,硕士生,研究领域为生态系统服务。E-mail: wangyy.15s@igsrr.ac.cn

通讯作者:肖玉, E-mail: xiaoy@igsrr.ac.cn

2019年5月

等^[22]利用RWEQ模型对青海省风蚀模数进行了估算,还分析了内蒙古地区生态系统防风固沙服务对土地利用变化的响应^[23]。申陆等^[24,25]则将RWEQ模型应用到浑善达克沙漠化防治并探讨了防风固沙功能变化的驱动力。可以看出,RWEQ模型运用于风蚀量模拟具有较高的可行性,而且经过参数改进的RWEQ模型能较好地模拟中国北方植被防风固沙功能。

宁夏位于中国半湿润向半干旱气候过渡区域,也是典型的农牧交错区,干旱少雨,生态系统脆弱^[26]。同时,宁夏属于中国西北沙尘源区^[27],生态系统在防风固沙以及抑制区域沙尘天气中发挥着至关重要的作用^[28]。但是,目前有关宁夏植被防风固沙的研究多集中在部分区域固沙树种的研究上,例如崔强等^[29]研究了毛乌素沙地3种常用固沙植物的种群点格局;王博^[30]基于水分动态研究了盐池县人工固沙植被的稳定性。现有研究大多是基于微观尺度的研究,针对区域尺度的宁夏草地防风固沙时空格局及其变化规律还不清楚。因此本文通过模拟2000—2015年间宁夏草地生态系统的防风固沙服务质量,分析了草地防风固沙时空格局及其变化原因,为宁夏草地资源管理及可持续发展提供科学参考。

2 研究区概况

宁夏回族自治区位于中国西北内陆,在104°17'E—107°39'E,35°14'N—39°23'N之间,区域轮廓呈现南北长东西短的特点,在地势上南高北低,辖银川、石嘴山、吴忠、固原及中卫5个地级市,总面积为 $6.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。宁夏是典型的大陆性半湿润半干旱气候,全年平均气温在5~9℃之间,平均年降雨量166.90~647.30 mm。宁夏年平均风速为2.0~7.0 m/s,最大值出现在贺兰山和六盘山,分别为7.00 m/s和5.80 m/s;最小值出现在大武口,为2.00 m/s左右。大风日数(极大风速 $\geq 17.00 \text{ m/s}$ 的天数)在贺兰山和六盘山均大于100天,其他地区则在4~46天之间。草地是宁夏最主要的生态系统类型,约占全区面积的50%。草地生态系统主要包括温带草甸草原、温带草原、温带荒漠草原、温带草原化荒漠、温带荒漠、低地草甸、山地草甸和高寒草甸等^[31]。宁夏土壤类型包括:六盘山地主要为山地棕壤和山地灰褐

土;黄土高原区主要为黑垆土;鄂尔多斯高原区和同心县间山盆地主要为灰钙土;黄河冲积平原主要为浅色草甸土、盐渍化草甸土、淡灰钙土、沼泽土、盐土和白僵土;贺兰山地则主要为淡灰钙土、山地灰钙土、山地灰褐土、山地中性灰褐土和山地草甸土^[32]。

人类活动是影响宁夏草地变化的重要因素。在2000年以前,由于人类过度放牧和开垦,宁夏出现了天然草地面积急剧下降、草地严重退化、荒漠化面积增加、草地生产力下降及生态环境的恶化等问题^[33-35]。1991—2000年间盐池县草原退化严重,中高盖度草场占土地总面积比重从51.21%下降至17.29%^[36]。2000年后由于“退耕还草”和“禁牧封育”工程的实施,宁夏草地状况有所改善^[37,38]。2000—2010年间,盐池县整体草地占土地总面积比重从51.45%增加至58.40%^[39]。因此,明确宁夏草地在区域防风固沙中的重要作用,有助于推进全区草地资源保护与建设,实现草地资源可持续发展。

3 数据与方法

3.1 数据来源

本文需要的土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所提供的1:100万土壤数据,雪盖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>),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>),土地利用数据和数字高程模型(DEM)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),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>)。所有数据在ArcGIS中进行运算时的投影坐标系统统一为Krasovsky_1940_Albers,空间分辨率为30 m。

3.2 防风固沙量估算

本文使用的RWEQ模型考虑了气候、土壤、植被和地形等因素,利用裸土条件下的潜在风蚀量和植被覆盖条件下的实际风蚀量之间的差值计算防风固沙物质质量^[40],具体计算公式如下:

$$SL = \frac{2z}{s^2} \times Q_{\max} \times e^{-\left(\frac{z}{s}\right)^2} \quad (1)$$

$$Q_{\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (2)$$

$$s = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (3)$$

$$SLr = \frac{2z}{sr^2} \times Qr_{\max} \times e^{-\left(\frac{z}{sr}\right)^2} \quad (4)$$

$$Qr_{\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K') \quad (5)$$

$$sr = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711} \quad (6)$$

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

式中: SL 表示单位面积年实际风蚀量 (kg/m^2); z 表示下风向距离 (m), 本次计算取 50 m ; s 表示关键地块长度 (m); Qr_{\max} 表示风力的最大输沙能力 (kg/m); WF 表示气候因子 (kg/m); EF 表示土壤可蚀性因子 (无量纲); SCF 表示土壤结皮因子 (无量纲); K' 表示土壤糙度因子 (无量纲); C 表示植被因子 (无量纲); SLr 表示单位面积年潜在风蚀量 (kg/m^2); sr 表示潜在关键地块长度 (m); Qr_{\max} 表示潜在风力的最大输沙能力 (kg/m); G 表示单位面积年防风固沙物质量 (kg/m^2).

气候因子 WF 表征了在考虑降雨、温度、日照及雪盖等因素的条件下风力对土壤颗粒的搬运能力, 其表达式如下:

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

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

式中: WF 为气候因子 (kg/m); Wf 为风力因子 (m/s^3); g 为重力加速度 (m/s^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3); SW 为土壤湿度因子 (无量纲); SD 为雪盖因子 (无积雪覆盖天数/研究总天数, 雪盖深度 $< 25.4 \text{ mm}$ 为无积雪覆盖); u_1 为起沙风速, 本次计算取 5 m/s (参考江凌^[22]和巩国丽^[40]的相关参数取值); u_2 为 2 m 处的风速 (m/s); N_d 为各月风速大于 5 m/s 的天数。

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, 其表达式如下:

$$EF = 29.09 + 0.31 \times sa + 0.17 \times si + 0.33 \times \frac{sa}{cl} - 2.59 \times OM - 0.95 \times CaCO_3 \quad (10)$$

式中: sa 为土壤砂粒含量 (%); 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 (%), 参考王吉智^[41]的

研究结果取各类土壤碳酸钙含量平均值进行计算。土壤质地数据采用拟合精度较高的对数正态分布模型进行土壤粒径转化^[40], 转化后的土壤数据符合 RWEQ 标准数据库中的物质含量范围 (表 1)。

土壤表层的坚硬结皮能有效防止风蚀的发生。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, 其表达式如下:

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

式中: cl 和 OM 含义同式 (10)。

地表糙度 K' 是由地形所引起地表粗糙程度对风蚀影响的反映, 其表达式如下:

$$K' = \cos \alpha \quad (12)$$

式中: α 为坡度, 由 1 km 的 DEM 数据经过 ArcGIS 的 Slope 模块进行计算。

植被因子表示一定植被条件下的风蚀发生程度, 植被因子越高越容易发生侵蚀, 其表达式如下:

$$C = e^{-0.0483 \times SC} \quad (13)$$

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

式中: SC 为植被覆盖度 (%); $NDVI$ 、 $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 分别代表 $NDVI$ 实际值、最大值及最小值。

同时本文采用防风固沙保有率 F 来表征草地生态系统的固沙贡献率^[40], 计算公式如下:

$$F = \frac{G}{SLr} \quad (15)$$

式中: G 和 SLr 含义同式 (7)。

4 结果与分析

4.1 RWEQ 模型因子时空格局

4.1.1 气候因子计算结果

宁夏草地生态系统气候因子在 $0.00 \sim 62.53 \text{ kg}/\text{m}$ 之间 (表 2), 2000 年 WF 最高, 2010 年最低。2000—2015 年 WF 平均值从 $15.61 \text{ kg}/\text{m}$ 波动式降至 $14.30 \text{ kg}/\text{m}$, 2010 年最小。在空间分布上中南部较高, 南部和东北部较低 (图 1)。其中中部 WF 值偏高的主要原因是该地区处于半干旱荒漠区, 温度高,

表 1 土壤物质含量对照表

Table 1 Comparison of soil material content between the revised wind erosion equation (RWEQ) database and this study (%)

数据来源	sa	si	cl	sa/cl	OM	$CaCO_3$
RWEQ 数据库 ^[40]	5.50~93.60	0.50~69.50	5.00~39.30	1.20~53.00	0.18~4.79	0.00~25.20
本文	1.52~42.54	25.17~92.16	2.60~35.50	1.47~31.87	0.31~17.70	0.30~20.00

表2 气候因子WF值

Table 2 Descriptive statistics of climatic factor values

年份	最大值/(kg/m)	最小值/(kg/m)	平均值/(kg/m)
2000	62.53	0.00	15.61
2005	48.84	0.99	19.01
2010	27.08	0.00	5.56
2015	61.27	0.02	14.30

蒸发量大,同时也是西北风的主要通道,极易受到风蚀影响。在年际变化上,西部地区在2000—2005年间显著增加,2005—2010年间则显著降低,西南部呈现出“减小—增加—减小”的特点,东部则呈现出“先增后减”的特点。

4.1.2 土壤及地形因子计算结果

宁夏草地土壤可蚀性因子EF的取值范围在0.08~0.55之间,平均值为0.36(图2,以2015年草地分布图作为底图层)。空间分布上中部较高,南部则较低。草甸灰钙土和荒漠风沙土EF值最高,这是由于其砂粒总含量达90%以上,容易发生风蚀;黑毡土最低,为0.08,这是因为其有机质含量和粘粒含量达44.25%,相比于其他土壤类型不易发生风蚀。

土壤结皮因子SCF的取值范围在0.09~0.95之间,平均值为0.42,在空间分布上东北部和东部较高,中南部和南部较低。土壤结皮因子值越高说明

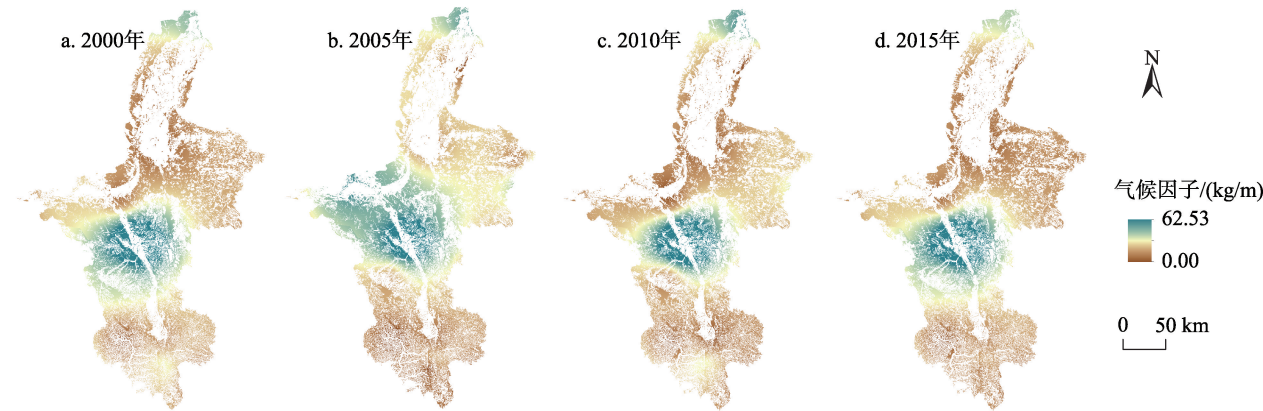


图1 气候因子分布图

Figure 1 Spatial distribution of climatic factor values, 2000, 2005, 2010, and 2015

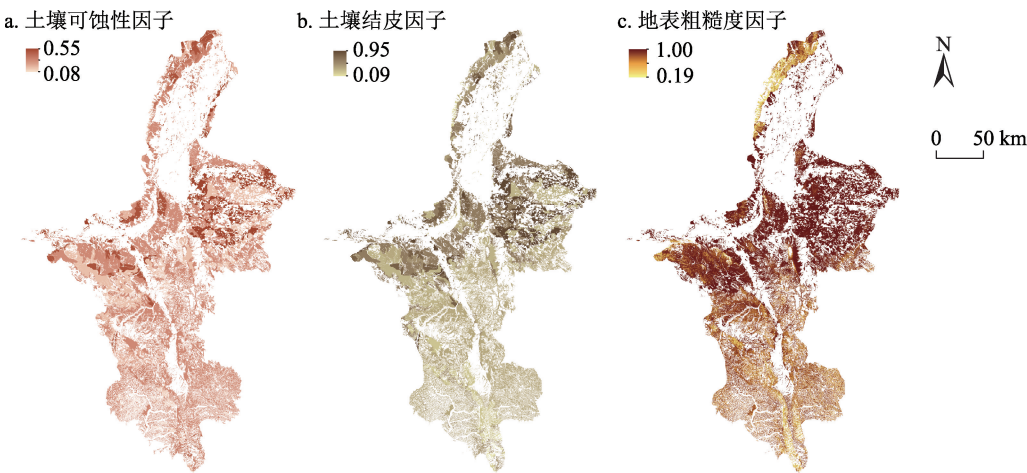


图2 2015年土壤因子分布图

Figure 2 Spatial distribution of soil factors, 2015

抗风蚀能力越差^[22],草甸灰钙土土壤结皮因子值最高,为0.95,抗风蚀能力最差,最容易发生侵蚀;黑毡土则最低,为0.09,抗风蚀能力最强,不易发生侵蚀。

地表粗糙度因子 K' 的取值范围在 0.19~1.00 间,平均值为 0.99,反映了地形对风蚀强度大小的影响。在空间分布上中部较高,西北部边缘带及南部较低。其中六盘山、月亮山、南华山、罗山、贺兰山等山地由于海拔较高和起伏较大,不利于侵蚀的发生,因此 K' 值较低;而银川盆地、中卫盆地以及间山盆地等由于地势较低,更容易发生侵蚀。

4.1.3 植被因子计算结果

宁夏植被因子 C 取值范围在 0.01~1.00 之间(图 3), C 值较高的区域主要分布在北部和中西部地区,这些区域更容易被风力侵蚀;而 C 值较低的区域则集中于南部,这些区域不易被风力侵蚀。在 2000—2015 年间,宁夏整体植被因子呈现不断降低的趋势,但局部地区在年际间有一定程度的波动。最北部区域 C 值在 2000—2010 年间呈逐渐降低趋势,但在 2010—2015 年间则有了比较明显的上升;东部盐池地区 C 值在 2000—2010 年降低明显,但在 2010—2015 年间则呈聚集式增长。

将本文的各因子研究结果与江凌^[22]的研究结果进行对比(表 3),宁夏气候因子 WF 、土壤可蚀性因子 EF 、土壤结皮因子 SCF 和地表糙度因子 K' 和植被因子 C 的值域的结果在可接受范围内,与其他研究结果具有可比性。

4.2 防风固沙物质质量及其时空格局

4.2.1 潜在风蚀量

2000—2015 年间,宁夏草地年潜在风蚀总量为 1028.30~7540.50 万 t(表 4),其中 2005 年潜在风蚀总量最高,2010 年最小;与 2000 年相比,2015 年减少了 594.23 万 t。草地单位面积年潜在风蚀量为 0.00~36.58 kg/m² 且呈降低趋势。平均单位面积年潜在风蚀量为 0.15~3.19 kg/m², 且呈“增加—减少—增加”的变化特点;与 2000 年相比,2015 年平均单位面积年潜在风蚀量下降了 0.24 kg/m²。在空间分布上,潜在风蚀强度较轻的区域,主要集中在风场强度较低、降雨量较大的南部区域;北部和中部潜在风蚀较剧烈(图 4)。其中中部地区变化幅度最明显,在 2000—2005 年间显著降低,2005—2015 年间则显著升高。可见,2000—2015 年间宁夏草地潜在风蚀量呈现出“增加—减少—增加”的波动变化,整体呈下

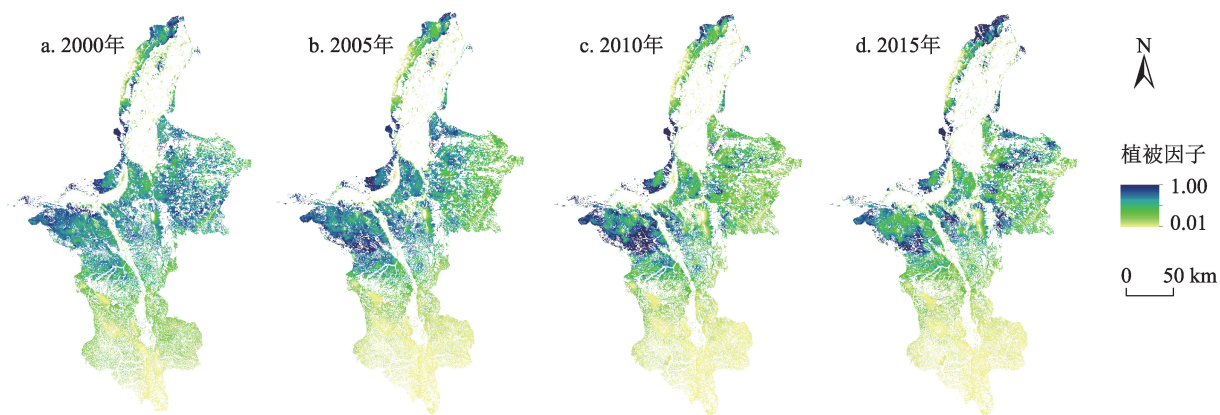


图3 2000、2005、2010、2015年植被因子分布图

Figure 3 Spatial distribution of vegetation factor values, 2000, 2005, 2010, and 2015

表3 模型各因子结果与已有研究对比

Table 3 Comparison between the results of this model and a previous study

数据来源	$WF/(kg/m^2)$	EF	SCF	K'	C
江凌 ^[22]	0.03~36.99	0.00~0.71	0.04~0.97	0.13~0.98	0.03~1.00
本文	0.02~62.53	0.08~0.55	0.09~0.95	0.19~1.00	0.01~1.00

2019年5月

表4 不同年份宁夏草地生态系统风蚀量及防风固沙量

Table 4 Wind erosion and sand-fixing function of the grassland ecosystem in Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

项目/单位		2000年	2005年	2010年	2015年
潜在风蚀	单位面积年最大值/(kg/m ²)	36.58	29.35	14.00	36.38
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	1.99	3.19	0.45	1.75
	总量/万t	4 562.59	7 540.50	1 028.30	3 968.38
实际风蚀	单位面积年最大值/(kg/m ²)	19.16	23.32	9.44	22.53
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	0.87	1.42	0.12	0.58
	总量/万t	2 002.08	3 318.71	269.75	1 290.18
防风固沙	单位面积年最大值/(kg/m ²)	36.14	29.07	13.57	35.36
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	1.11	1.77	0.33	1.71
	总量/万t	2 477.28	4 120.04	729.80	2 601.41

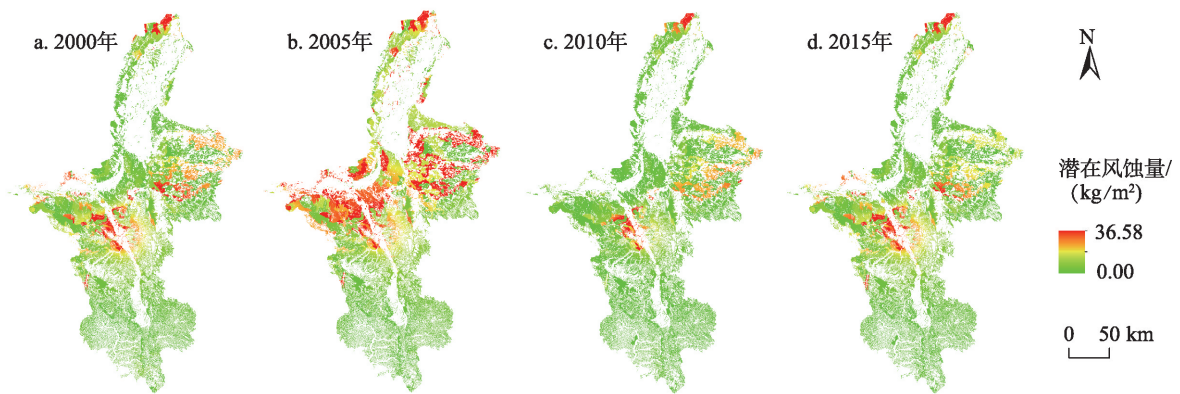


图4 宁夏草地生态系统潜在风蚀量分布图

Figure 4 Spatial distribution of potential wind erosion of the grassland ecosystem in Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

降趋势。

4.2.2 实际风蚀量

2000—2015年间,宁夏草地年实际风蚀总量为269.75~3318.71万t(表4),其中2005年实际风蚀总量最高,2010年最低;与2000年相比,2015年减少了711.90万t。草地单位面积年实际风蚀量为0.00~23.32 kg/m²。平均单位面积年实际风蚀量呈现出“增加—减少—增加”的变化特点。在空间分布上,实际风蚀强度较轻的区域,主要集中分布于植被盖度较高、风场强度较低及降雨量较大的南部广大区域;中部干旱区的腾格里沙漠附近草地风蚀量较高(图5)。在年际变化上,2000—2005年中部草地年实际风蚀量分布明显增加,2005—2010年东部草地

年实际风蚀量分布明显减少,2010—2015年中部和东部草地年实际风蚀量分布略有增加。由此可见,2000—2015年间宁夏草地实际风蚀强度降低,整体风蚀情况有了明显的改善。

4.2.3 防风固沙量

2000—2015年间,宁夏草地年防风固沙物质总量在729.80~4120.04万t之间,且呈现出“增加—减少—增加”的变化特点,整体草地防风固沙量略有增加(表4)。其中,2005年防风固沙总量最高,2010年最低;2015年比2000年增加了124.13万t。草地单位面积年防风固沙物质量为0.00~36.14 kg/m²,且在空间分布上呈现出“中部高南北低”的分布特点(图6)。在年际变化上则呈现出“增加—显著减小—显

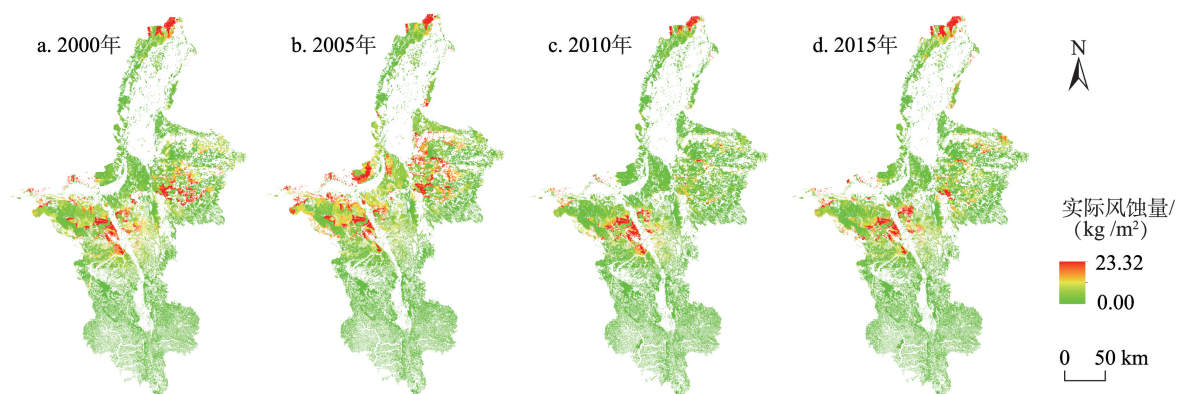


图5 宁夏草地生态系统实际风蚀量分布图

Figure 5 Spatial distribution of actual wind erosion of the grassland ecosystem in Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

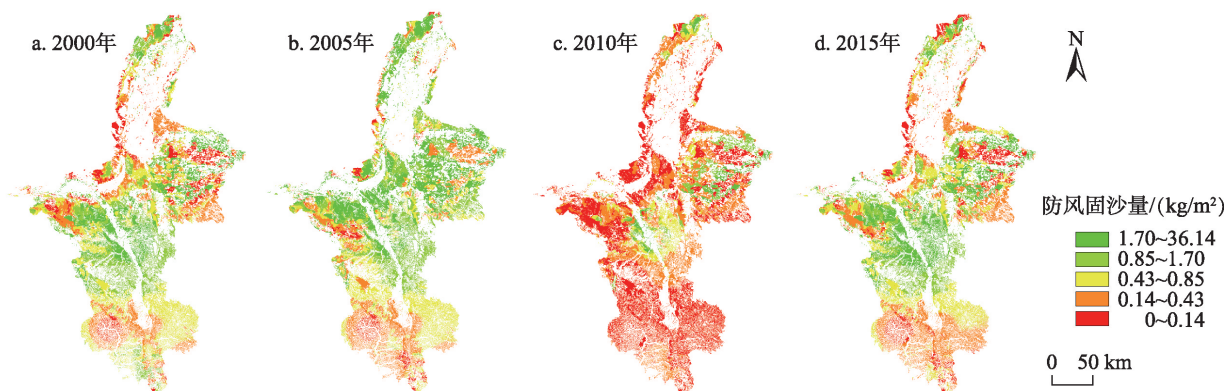


图6 宁夏草地生态系统单位面积防风固沙量

Figure 6 Sand-fixing function per unit area of the grassland ecosystem in Ningxia 2000, 2005, 2010, and 2015

著增加”的变化特点,其中2005—2010年中部减少幅度最大,主要是由于这一时期气候因子降低且植被因子升高,即风场强度降低、植被盖度出现大幅度下降,导致草地防风固沙量显著减少。

4.3 不同防风固沙等级草地防风固沙量时空格局

利用 ArcGIS 软件的 Quantile 分级模块将草地按照防风固沙量的差异划分为“弱”“较弱”“中等”“较强”和“强”等5个等级(表5)。在防风固沙量上,2000—2015年间宁夏草地防风固沙等级以“中等”和“较弱”为主,占总固沙量的46.99%~64.76%。其中,“强”“较强”及“较弱”等级草地的年防风固沙量均呈现出“增加—降低—增加”的变化特点;“中等”等级的草地“先减后增”,且变化量最大,共增加了126.72万t;“弱”等级的草地“先减后增”。在草地面

积上,“弱”等级的草地面积最大,占比47%~90%,且呈“减少—增加—减小”的趋势;其次为“较弱”的草地,“中等”及以上等级的草地面积则均呈增加趋势(图7)。可见,2000—2015年间,宁夏较高等级草地的年防风固沙量及面积增加,较低等级草地的年防风固沙量及面积减少,整体草地固沙等级提升。

4.4 不同区域防风固沙量时空格局

按照气候条件,宁夏可划分为北部灌区、中部干旱区和南部山区,各地区防风固沙量在年际间变化差异明显(表6)。2000—2015年间,北部灌区草地年防风固沙物质量和平均单位面积年防风固沙量呈现出“先减后增”的减少趋势,共减少了67.25万t;中部干旱区草地和南部山区则均呈“增加—减小—增加”的趋势,分别增加了169.10万t和22.28

2019年5月

表5 宁夏草地生态系统不同等级防风固沙物质质量

Table 5 Sand-fixing function levels of the grassland ecosystem in Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

等级	2000年		2005年		2010年		2015年	
	固沙量/万t	占比/%	固沙量/万t	占比/%	固沙量/万t	占比/%	固沙量/万t	占比/%
弱	534.75	21.59	477.04	11.58	337.71	46.27	495.38	19.04
较弱	908.74	36.68	1 184.08	28.74	312.86	42.87	850.13	32.68
中等	695.66	28.08	751.86	18.25	58.30	7.99	822.38	31.61
较强	192.89	7.79	1 488.72	36.13	19.99	2.74	238.73	9.18
强	145.23	5.86	218.35	5.30	0.93	0.13	194.79	7.49
总计	2 477.28	100.00	4 120.04	100.00	729.80	100.00	2 601.41	100.00

注:防风固沙等级以防风固沙量来划分(x 单位为 kg/m^2),弱: $x \leq 0.85$;较弱: $0.85 < x \leq 2.41$;中度: $2.41 < x \leq 5.24$;较强: $5.24 < x \leq 11.06$;强: $x > 11.06$ 。

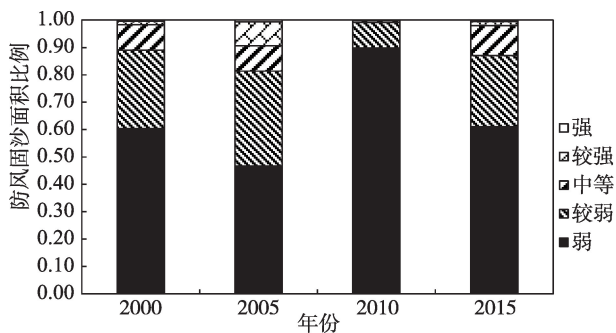


图7 宁夏不同防风固沙等级草地生态系统面积占比

Figure 7 Percentage of areas of the grassland ecosystem with different levels of sand-fixing function in Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

万t。草地单位面积年防风固沙量及总量的排序为:中部干旱区>南部山区>北部灌区。其中中部干旱区草地防风固沙量占比最高,达49.57%~61.73%;其次是南部山区;北部灌区占比最小。可见,中部干旱区和南部山区草地在宁夏草地防风固沙服务中发挥的作用相对较高,南部山区则相对较低。

造成各区域草地防风固沙量差异的原因是多方面的:首先,土壤和地形因子决定了风蚀易发生区域主要位于中部干旱区;其次,气候因子和植被因子的空间分布导致了实际风蚀较剧烈的区域集中在中南部。在影响风蚀的各因子中,如果不考虑地表粗糙度因子,只有植被因子可以通过人类活动而改变。因此,为了改善草地生态系统防风固沙服务,可通过禁牧、围栏封育、人工种草、草地灌溉、草地施肥、灭鼠等措施增加植被覆盖度,降低植被因子,从而增强草地生态系统防风固沙服务功能。

4.5 防风固沙保有率时空格局

2000—2015年间,宁夏草地防风固沙保有率平

均值在0.65~0.79之间,且呈波动增加趋势。在空间分布上,保有率较高的区域主要分布在植被覆盖度较高(植被因子较低)的南部、东部和西北边缘,北部边缘和中部保有率较低(图8,图2),说明草地防风固沙保有率与植被覆盖度成正相关。在年际变化上,单位面积防风固沙保有率呈现出“整体增加局部显著降低”的特点,其中中西部草地防风固沙保有率降低趋势最显著,而盐池东部的草地防风固沙保有率的增加趋势最为显著。植被覆盖度的变化是导致防风固沙保有率变化的最主要原因,因此应继续增加草地植被覆盖度,提升草地防风固沙保有率。

5 结论

宁夏位于我国农牧交错带,生态系统脆弱,面临风蚀威胁。草地是宁夏主要生态系统类型,在区域防风固沙中发挥着重要作用。本文通过RWEQ模型模拟了2000—2015年间宁夏草地生态系统的防风固沙服务功能、物质质量变化及其空间格局,可以为区域草地生态系统管理提供科学依据。研究结果如下:

(1)2000—2015年宁夏草地平均单位面积年潜在风蚀强度为 $0.45 \sim 3.19 \text{ kg}/\text{m}^2$;平均单位面积年实际风蚀强度为 $0.12 \sim 1.42 \text{ kg}/\text{m}^2$,年实际风蚀总量减少了711.90万t,宁夏草地整体风蚀情况有了明显的改善。

(2)2000—2015年宁夏草地年防风固沙物质总量为729.80~4120.04万t,共增加了124.13万t;单位面积年防风固沙量分布格局为中西部较高,北部和南部较低。

表6 宁夏不同区域草地生态系统防风固沙量

Table 6 Sand-fixing function of the grassland ecosystem in different regions of Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

年份	项目	北部灌区	中部干旱区	南部山区
2000	单位面积年最大值/(kg/m ²)	1.91	36.14	30.17
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	0.51	1.45	1.06
	年总固沙量/万 t	227.70	1 291.15	958.43
	占比/%	9.19	52.12	38.69
2005	单位面积年最大值/(kg/m ²)	1.79	29.06	23.65
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	0.43	2.15	2.03
	年总固沙量/万 t	196.46	2 042.37	1 881.22
	占比/%	4.77	49.57	45.66
2010	单位面积年最大值/(kg/m ²)	0.47	13.57	11.11
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	0.07	0.49	0.28
	年总固沙量/万 t	30.23	450.50	249.07
	占比/%	4.14	61.73	34.13
2015	单位面积年最大值/(kg/m ²)	1.75	35.35	30.52
	单位面积年最小值/(kg/m ²)	0.00	0.00	0.00
	单位面积年平均值/(kg/m ²)	0.35	1.62	1.12
	年总固沙量/万 t	160.45	1 460.25	980.70
	占比/%	6.17	56.13	37.70

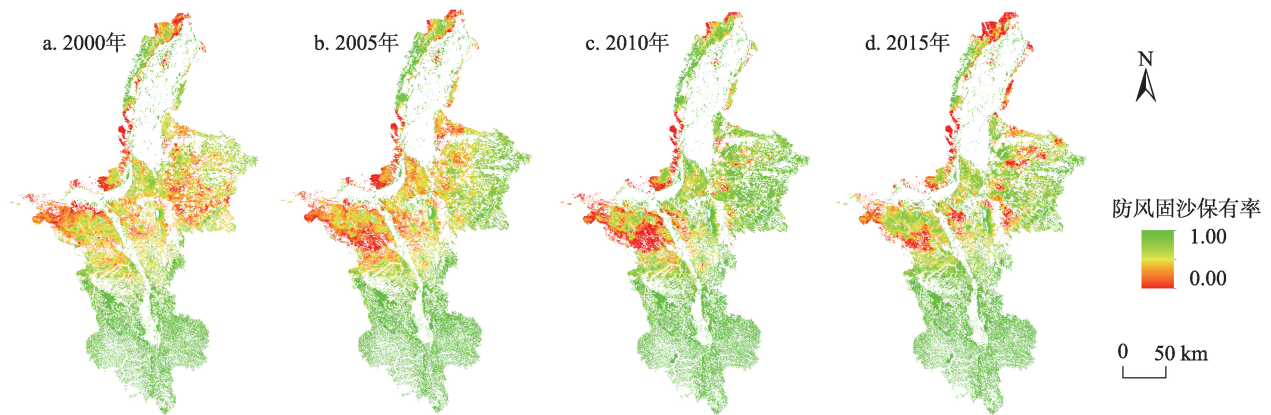


图8 宁夏草地生态系统单位面积防风固沙量

Figure 8 Retention rates per unit area of grassland ecosystem in Ningxia, 2000, 2005, 2010, and 2015

(3)宁夏草地防风固沙等级以“中等”和“较弱”为主,占总固沙量的47%~65%;防风固沙等级为“强”的草地防风固沙量最小,不足7%。具有较高防风固沙等级的草地面积增加,较低防风固沙等级草地面积减小。

(4)中部干旱区草地年防风固沙量占比最高,

达50%~62%;其次是南部山区,占比34%~46%之间。北部灌区草地年防风固沙量“先减后增”,中部干旱区和南部山区则呈“增加—减小—增加”的趋势。防风固沙保有率平均值为0.65~0.79,空间分布上“南北高中间低”,变化趋势为“整体增加局部显著降低”,其中中西部草地防风固沙保有率显著降

2019年5月

低,因此这些区域应该成为后续风蚀及沙化治理的重点区域。

(5)植被盖度是影响防风固沙功能的主要因素,过牧、开垦等引起的草地退化以及由于城镇化等土地利用的变化导致的草地面积减少,均会引起整体草地防风固沙量的下降。另外,虽然进行退耕还草、围牧禁牧等措施在局部地区和部分时间段内对遏制草地退化有很大的成效,但是由于草地开发利用的程度超过保护管理和恢复的速率,整体草地防风固沙功能依然呈降低趋势,需要继续加大草地保护和管理力度,提高草地防风固沙服务功能。

本文中使用的RWEQ模型由于方法较为成熟、参数较易获得且操作简便,已应用于中国的农牧交错带及草地的风蚀研究,在基础实验数据欠缺及中国统一的风蚀模型尚未建立的情况下,RWEQ模型可较好地模拟风蚀量和防风固沙量。但是RWEQ模型中的参数主要是基于美国农田数据,因此未来在应用于中国的特定区域时,需要进一步考虑不同研究区的自然条件差异,以及可蚀性边界的确定;同时需要通过样地实验对模型参数进行校正,以便更为准确地模拟草地生态系统的防风固沙服务物质量,为区域草地生态系统管理提供科学参考。

参考文献(References):

- [1] Bagnold R A, Sandford K S, Shaw W B K, et al. A further journey through the Libyan Desert (continued)[J]. *Geographical Journal*, 1933, 82(3): 211-235.
- [2] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation I[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29(5): 602-608.
- [3] 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.
- [4] Bacharov A P. A Description of Devices Used in the Study of Wind Erosion of Soils[M]. Boca Raton: CRC Press, 1984.
- [5] Fryrear D W, Chen W N, Lester C. Revised wind erosion equation [J]. *Annals of Arid Zone*, 2001, 40(3): 265-279.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Pelt R S V, Zobeck T M, Potter K N, et al. Validation of the wind erosion stochastic simulator (WESS) and the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(2): 191-198.
- [9] Mandakh N, Tsogtbaatar J, Dash D, et al. Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(4): 473-483.
- [10] Singh U B, Gregory J M, Wilson G R. Texas Erosion Analysis Model: Theory and Validation[C]. Manhattan: Proceedings of Wind Erosion: An International Symposium/Workshop (Computer File), 1997.
- [11] Coen G M, Tatarko J, Martin T C, et al. A method for using WEPS to map wind erosion risk of Alberta soils[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2004, 19(2): 185-189.
- [12] 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 等. 基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2197-2203. [Chen L, Han T T, Li T, et al. Estimation of the effect derived from wind erosion of soil and dust emission in Tianjin suburbs on the central district based on WEPS Model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2197-2203.]
- [13] 王燕, 王萍. 风蚀预报系统(WEPS)在民勤荒漠地区的应用分析研究[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 109-117. [Wang Y, Wang P. Application of wind erosion prediction system in Minqin Desert Area[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1): 109-117.]
- [14] 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): 56-63. [Dong Z B. Establishing statistic model of wind erosion on small watershed basis[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(5): 56-63.]
- [15] 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. [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[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(1): 58-65.]
- [16] 丁国栋. 风沙物理学中两个焦点问题研究现状与未来研究思路刍议[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(3): 395-398. [Ding G D. Status and prospect of study on two focuses in Aeolian physics[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(3): 395-398.]
- [17] 丁国栋, 李素艳, 蔡京艳, 等. 浑善达克沙地草场资源评价与载畜量研究: 以内蒙古正蓝旗沙地区为例[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1038-1042. [Ding G D, Li S Y, Cai J Y, et al. Pasture resources evaluation and stocking density in Hunshandake Sandy Land: Case study of Zhenglan Banner, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(9): 1038-1042.]
- [18] 高君亮, 郝玉光, 丁国栋, 等. 乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(12): 41-46. [Gao J L, Hao Y G, Ding G D, et al. Primary assessment on the wind breaking and sand fixing function of the vegetation and its value in Ulan Buh desert ecosystem[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(12): 41-46.]

- [19] Gong G L, Liu J Y, Shao Q Q, et al. Sand-fixing function under the change of vegetation coverage in a wind erosion area in Northern China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(2): 105-114.
- [20] 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. [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[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(6): 825-834.]
- [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. [Gong G L, Liu J Y, Shao Q Q. Effects of vegetation coverage change on soil conservation service of typical steppe in Inner Mongolia[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(3): 426-434.]
- [22] 江凌, 肖赓, 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. [Jiang L, Xiao Y, Ouyang Z Y, et al. Estimate of the wind erosion modules in Qinghai province based on RWEQ model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 21-25.]
- [23] 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[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3734-3747. [Jiang L, Xiao Y, Rao E M, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3734-3747.]
- [24] 申陆, 田美荣, 高吉喜. 基于RWEQ模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀与主要影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 90-97. [Shen L, Tian M R, Gao J X. Analysis on wind erosion and main factors in desertification control ecological function area of Hunshandake using the revised wind erosion model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 90-97.]
- [25] 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. [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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 73-82.]
- [26] 王晓君, 周立华, 石敏俊. 农牧交错带沙漠化逆转区禁牧政策下农村经济可持续发展研究: 以宁夏盐池县为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(10): 2166-2173. [Wang X J, Zhou L H, Shi M J. Sustainable development of a rural economy under grazing prohibition in a desertification control region and agro-pastoral transitional zone [J]. *Resources Science*, 2014, 36(10): 2166-2173.]
- [27] 刘明哲, 魏文寿, 周宏飞, 等. 中国西北沙尘源区与日本沉降区大气气溶胶粒子理化特征及对比[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 408-414. [Liu M Z, Wei W S, Zhou H F, et al. Physiochemical properties of atmospheric aerosol particles over sand-dust source areas and sedimentary areas in Asia[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4): 408-414.]
- [28] 潘德成, 孟宪华, 吴祥云, 等. 不同气象因子及植被类型对矿区排土场扬尘的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(1): 136-141. [Pan D C, Meng X H, Wu X Y, et al. The effects of different meteorological factors and vegetation types on dust of mine dump[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(1): 136-141.]
- [29] 崔强, 高甲荣, 李柏, 等. 宁夏毛乌素沙地3种常用固沙植物种群点格局分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 58-63. [Cu Q, Gao J R, Li B, et al. Point patterns of colonies of three common sand-binding plants in the Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3): 58-63.]
- [30] 王博. 基于水分动态的毛乌素沙地人工固沙植被稳定性评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Wang B. Moisture Dynamics Stability Evaluation of Sand-fixing Plants in Mu Us Sand Land[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.]
- [31] 王蕾, 孙玉荣, 黄文广. 宁夏主要草地类型生态系统服务价值评估[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2010, (1): 97-98. [Wang L, Sun Y R, Huang W G. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Ningxia[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2010, (1): 97-98.]
- [32] 赵爱桃, 郭思加. 宁夏草地类型、特点及其利用[J]. *中国草地*, 1996, (6): 18-22. [Zhao A T, Guo S J. The types, properties and rational utilization of natural grassland in Ningxia[J]. *Grassland of China*, 1996, (6): 18-22.]
- [33] 刘库, 谢应忠, 马红彬. 宁夏南部黄土丘陵区退化天然草地改良效果综合评价[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1): 139-141. [Liu K, Xie Y Z, Ma H B. The improvement effects evaluation of degraded grassland in the Loess Hilly of Southern Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(1): 139-141.]
- [34] 张强, 赵雪, 赵哈林. 中国沙区草地[M]. 北京: 气象出版社, 1998. [Zhang Q, Zhao X, Zhao H L. Grassland in Desert Areas of China[M]. Beijing: Meteorological Press, 1998.]
- [35] 李谭宝, 张广军, 文妙霞. 宁夏重点风沙区土地沙化成因分析[J]. *西北林学院学报*, 2003, 18(4): 70-73. [Li T B, Zhang G J, Wen M X. Causes of soil desertification in the key windy-sandy region in Ningxia[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2003, 18(4): 70-73.]
- [36] 张学俭, 冯仲科. RS和GIS支持下的我国农牧交错生态脆弱区LUCC研究: 以宁夏盐池县为例[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1): 32-38. [Zhang X J, Feng Z K. LUCC in farming pasture ecotonal areas based on RS and GIS: A case study of Yanchi county in Ningxia[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 32-38.]
- [37] 李美君. 围栏封育措施对草地植被动态变化的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. [Li M J. Effects of Enclosure on the Dynamics of Grassland Communities[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.]
- [38] 王冠琪. 2003-2013年宁夏盐池沙化草地生态恢复研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. [Wang G Q. The Studies on Ecological Restoration of Desertification Grassland in Yanchi of Ningxia from

- 2003–2013[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.]
- [39] 马明德. 宁夏东部风沙区生态安全评价研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014. [Ma M D. Analysis of Ecological Security of Sandy Area in Eastern Ningxia: A Case of Yanchi County of Ningxia Hui Autonomous Region in China[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.]
- [40] 巩国丽. 中国北方土壤风蚀时空变化特征及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. [Gong G L. Research on the Spatio-temporal Changes of Wind Erosion in Northern China and the Influence Factors[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.]
- [41] 王吉智. 宁夏土壤通性综论[J]. 宁夏农林科技, 1990, (4): 10–12. [Wang J Z. A general review of soil in Ningxia[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 1990, (4): 10–12.]

Sand-fixing function of the grassland ecosystem in Ningxia based on the revised wind erosion model

WANG Yangyang^{1,2}, XIAO Yu^{1,2}, XIE Gaodi^{1,2}, XU Jie^{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: Grassland in Ningxia Hui Autonomous Region plays a crucial role in sand-fixing. But most of the existing studies are based on micro-scale research, therefore the temporal and spatial patterns of grassland wind-breaking and sand-fixing functions at the regional scale in Ningxia are still unclear. Based on the revised wind erosion equation (RWEQ) model, we quantitatively estimated the sand-fixing function of the grassland ecosystem in Ningxia from 2000 to 2015 with ArcGIS and ENVI. The results show that: (1) The amount of total potential wind erosion ranged from 1028.30×10^4 t to 7540.50×10^4 t while the amount of total actual wind erosion was calculated to be from 269.75×10^4 t to 3318.71×10^4 t. (2) The total amount of fixed material of the grassland in Ningxia ranged from 729.80×10^4 t to 4120.04×10^4 t, increased by 124.13×10^4 t through the study period, and the average amount of fixed material per unit area ranged between 0.33 kg/m^2 and 1.77 kg/m^2 , with a spatial distribution pattern of high in the central region and low in the north and south. Retention rates increased and averaged between 0.65 and 0.79. (3) The levels of sand-fixing function of grassland in Ningxia from 2000 to 2015 were mainly moderate and weak, accounting for 47% to 65% of the total amount of sand fixation. The area of grassland with moderate and above levels of sand-fixing function increased, while the area with weak and relatively weak grades kept reducing. (4) The proportion of sand-fixing function in the grasslands of the southern mountainous areas and the central arid areas was more than 90%, while that in the northern irrigation grassland decreased first and then increased. The northern and central arid areas need more attention on the management of sandstorm in the future. This study revealed the temporal and spatial patterns of sand fixation of grassland in Ningxia, providing a reference for future wind and sand management.

Key words: Ningxia; grassland; sand-fixing function; revised wind erosion equation (RWEQ); ecosystem services; wind erosion; spatiotemporal patterns