

# 基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素

梁会<sup>1,2</sup>, 田美荣<sup>2</sup>, 钱金平<sup>1</sup>, 张慧<sup>2</sup>, 宋杰<sup>3</sup>

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院/河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024;

2. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042; 3. 山东省环境规划研究院, 济南 250000)

**摘要:**为了阐明宁夏土壤风蚀情况,基于第一次全国水力普查中推荐的风蚀经验模型,通过野外土壤采样及风洞试验修正模型参数,运用遥感、地理信息系统技术,对2000—2015年土壤风蚀强度时空变化特征进行分析,运用变异系数法确定各影响因子权重,明确影响风蚀的主要因子。结果表明:空间分布上,微度、轻度风蚀的区域分布在石嘴山市西部,银川市西部和东部,吴忠市中北部,中卫市中部,固原大部分地区,中度及以上风蚀的区域分布在沙坡头区、灵武市、盐池县、平罗县、兴庆区、贺兰县、金凤区的沙地、荒漠地区;时间序列上,研究期间风蚀发生总面积和风蚀强度整体呈下降趋势;按风蚀地类分,风蚀强度排序为:沙地>耕地>裸地>草地>林地,平均风蚀强度分别为:47.39 t/(hm<sup>2</sup>·a), 5.77 t/(hm<sup>2</sup>·a), 1.82 t/(hm<sup>2</sup>·a), 1.48 t/(hm<sup>2</sup>·a), 1.00 t/(hm<sup>2</sup>·a);银川、吴忠、固原、中卫的风蚀强度的主要影响因子为土壤湿度,次要影响因子为植被覆盖度,石嘴山风蚀强度的主要影响因子为超过起沙风速累积时间。

**关键词:**土壤风蚀; 时空变化; 影响因素分析; 宁夏

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0034-07

## Soil Wind Erosion Characteristics and Influence Factors in Ningxia Based on Wind Erosion Model

LIANG Hui<sup>1,2</sup>, TIAN Meirong<sup>2</sup>, QIAN Jinping<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, SONG Jie<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Nanjing Institute of Environmental Science, ministry of Environmental Protection, Jiangsu, Nanjing 210042, China; 3. Shandong Academy for Environmental Planning, Jinan 250000, China)

**Abstract:** In order to illustrate the soil erosion characteristics in Ningxia, based on the wind erosion model which was recommend in the first national water resources census, and the model parameters revised by field soil samples and wind tunnel test, the spatiotemporal variation characteristics of soil wind erosion in Ningxia from 2000 to 2015 were analyzed by using remote sensing and geographic information system technology. Meanwhile, the main factor influencing wind erosion was confirmed by utilizing variation coefficient method. The results showed that the regions of mild and light wind erosion intensity included the west of Shizuishan, the west and east of Yinchuan, the central-north of Wuzhong, the central of Zhongwei and the most parts of Guyuan; the regions of moderate and higher wind erosion intensity included the sand and desert area of Shapotou, Lingwu, Yanchi, Pingluo, Xingqing, Helan and Jinfeng. In terms of time series, the total area and intensity of wind erosion decreased during the study period. In terms of wind erosion land type, the wind erosion intensity decreased in the order: sand>arable land>bare ground>grassland>woodland, of which average wind erosion intensities were 47.39 t/(hm<sup>2</sup>·a), 5.77 t/(hm<sup>2</sup>·a), 1.82 t/(hm<sup>2</sup>·a), 1.48 t/(hm<sup>2</sup>·a), 1.00 t/(hm<sup>2</sup>·a), respectively. The major impact factor on wind erosion intensities in Yinchuan, Wuzhong, Guyaun and Zhongwei was soil moisture, the vegetation coverage was the next factor affecting the wind erosion intensities in these areas. The major impact factor on wind erosion intensities in Shizuishan was the

收稿日期:2018-03-12

修回日期:2018-04-24

资助项目:国家重点研发计划项目“区域生态安全综合评估预警技术与示范”(2017YFC0506606)

第一作者:梁会(1992—),女,河北邢台人,在读研究生,主要研究方向为区域生态保护与修复。E-mail:lhui908@163.com

通信作者:钱金平(1963—),男,山东滕州人,教授,主要从事环境生态学研究。E-mail:hbsdhbs@163.com

accumulative time of exceeding the wind velocities causing sand move.

**Keywords:** soil erosion; spatiotemporal variation; factor analysis; Ningxia

土壤风蚀是我国北方干旱、半干旱及部分半湿润地区土地退化的主要过程之一<sup>[1]</sup>,是制约区域可持续发展的关键因素之一<sup>[2]</sup>。土壤风蚀过程中,大量的气溶胶颗粒悬浮于大气中,造成所在地区及其周边大范围范围的粉尘污染或沙尘暴等问题<sup>[3]</sup>,不仅影响风蚀源区生态环境及社会经济可持续发展,还会影响周边地区的大气环境和人民正常的生产、生活<sup>[4]</sup>。因此,有效的土壤风蚀时空变化分析,是进行风沙治理的前提。

宁夏地处干旱荒漠区向半干旱草原过渡区<sup>[5]</sup>,生态环境脆弱,是土壤风蚀问题严重的地区之一。近年来,宁夏风蚀研究主要集中于宁夏中部干旱带,研究内容主要为土壤可蚀性的特征及差异性<sup>[6-7]</sup>、人工干预对退化生态改良效果<sup>[8-9]</sup>等方面,而对宁夏全区的土壤风蚀研究,多集中于农田土壤风蚀方面<sup>[10]</sup>,缺乏对宁夏全区土壤风蚀的基底情况研究。土壤风蚀分析主要基于土壤风蚀模型开展,经验模型有 WEQ<sup>[11]</sup>、RWEQ<sup>[12]</sup>、Pasak<sup>[13]</sup>、Bocharov<sup>[14]</sup>,理论模型有 TEAM<sup>[15]</sup>、WEAM<sup>[16]</sup>,风蚀预报系统 WEPS<sup>[17]</sup>。风蚀影响因子较多<sup>[18]</sup>,气候、植被、土壤等都是影响风蚀的主要因子,针对影响因子,我国研究人员通过试验也确定了相关风蚀经验模型,如高尚玉等<sup>[19]</sup>根据风洞试验结果,分别建立耕地、林(草地)、沙地的风蚀预报经验模型,该模型在 2010 年启动的第一次全国水利普查项目中应用于全国尺度的土壤风蚀调查与评价中<sup>[20]</sup>,并被相关研究采用<sup>[21-22]</sup>。本研究采用该风蚀模型,通过对模型参数修正,估算 2000—2015 年宁夏全区各风蚀土地的土壤风蚀模数,并确定影响因子权重大小,进而分析全区土壤风蚀强度的时空变化特征,为实现风蚀治理提供针对性方案。

## 1 研究区概况

宁夏回族自治区位于我国西部的黄河上游地区,地处东经 104°17′—107°39′,北纬 35°14′—39°23′,总面积为 6.64 万 km<sup>2</sup>,是我国面积最小的省区之一。宁夏全区自南向北跨中温带半湿润区、半干旱区、干旱区 3 个气候带,年平均气温为 5.3~9.9℃,呈北高南低分布,降水由南向北递减,降水年际变化剧烈。全区耕地面积最大,占全区土地总面积的 32.97%,其次为草地和林地,分别占 16.4%和 8.05%,境内有沙丘、沙地散布。宁夏深居内陆,三面环沙,生态环境脆弱,荒漠化严重,据调查研究,宁夏荒漠化土地总面

积为 289.88 万 hm<sup>2</sup>,占宁夏土地总面积的 43.7%,位居全国第四,远远高于 27.3%的全国比例<sup>[23]</sup>,严重沙质荒漠化土地集中分布于宁夏中北部的盐池、灵武、陶乐、中卫、同心等县。

## 2 研究方法和数据来源

本研究将宁夏风沙源区非风蚀地表类型(如水体、道路、城镇用地等)以外的易风蚀地表划分为林地、草地、耕地、沙地、裸地五大类,分别采用不同地表风蚀预报经验模型<sup>[19]</sup>,通过野外土壤调查、风洞试验、分析模拟等手段,修正模型参数,估算宁夏 2000 年、2015 年各风蚀土地在不同的植被覆盖度、土壤湿度和风力条件下的土壤风蚀模数。

### 2.1 风蚀模型

#### 2.1.1 耕地土壤风蚀模数估算方法

$$Q_{fa} = 10\hat{C}(1-W) \sum_{j=1} [T_j \exp \{a_1 + b_1/z_0 + c_1 [(A \cdot U_j)^{0.5}]\}] \quad (1)$$

式中: $Q_{fa}$ 为大田条件下耕地土壤风蚀模数[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $\hat{C}$ 为尺度修订系数取 0.001 8; $W$ 为表土湿度因子(%); $T_j$ 为一年内风蚀发生月份各风速等级的累积时间(min); $z_0$ 为地表空气动力学粗糙度(cm),对于我国北方传统耕作方式,翻耕后裸露耕地表面的空气动力学粗糙度约为 0.55 cm; $A$ 为与下垫面性质有关的风速修订系数; $U_j$ 为气象站点整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第  $j$  级风速; $a_1, b_1, c_1$ 为与土壤类型有关的常数,无量纲,分别取值为-9.208, 0.018, 1.955。

#### 2.1.2 林地、草地土壤风蚀模数估算方法

$$Q_{fg} = 10\hat{C}(1-W) \sum_{j=1} [T_j \exp \{a_2 + b_2 \cdot VC^2 + c_2 / [(A \cdot U_j)]\}] \quad (2)$$

式中: $Q_{fg}$ 为林地、草地的风蚀模数[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $VC$ 为植被盖度(%); $a_2, b_2, c_2$ 为与土壤类型有关的常数,无量纲,分别取值为 2.486 9, -0.001 4, -54.947 2, 其他参数同上。

#### 2.1.3 沙地土壤风蚀模数估算方法

$$Q_{fs} = 10\hat{C}(1-W) \sum_{j=1} \{T_j \exp [a_3 + b_3 \cdot VC + c_3 \ln (A \cdot U_j) / (A \cdot U_j)]\} \quad (3)$$

式中: $Q_{fs}$ 为沙地的风蚀模数[t/(hm<sup>2</sup>·a)]; $a_3, b_3, c_3$ 为与土壤类型有关的常数,无量纲,分别取值为 6.168 9, -0.074 3, -27.961 3, 其他参数同上。

其中,通过实地考察和文献调研<sup>[22]</sup>,裸地土壤风蚀模数的估算方法,视为无植被覆盖的林草地。

2.2 数据来源

土壤风蚀模型中风速数据来源于中国气象数据共享网,依据研究区内气象站点的逐日观测的风速数据,按照线性插值方法<sup>[21]</sup>,计算出相邻时刻的整点风速,进而得到逐日 24 h 风速,统计 2000 年、2015 年大于 5 m/s 风速以上各等级风速的累积时间(表 1),运用

ArcGIS 软件生成各等级风速栅格图。植被覆盖度数据,基于美国航空航天局(NASA)数据中心,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d 的 MOD13Q1 数据提取得到。土地利用类型数据,是在 2000 年、2015 年宁夏土地利用图原有的一级分类基础上,将宁夏地区重新划分为林地、草地、耕地、裸地、沙地和非风蚀六大类(图 1)。

表 1 2000 年、2015 年宁夏各气象站点各等级风速发生的累积时数 h

| 气象站点 | 年份     | 风速/(m·s <sup>-1</sup> ) |     |     |     |      |       |       |
|------|--------|-------------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|
|      |        | 5~6                     | 6~7 | 7~8 | 8~9 | 9~10 | 10~11 | 11~12 |
| 惠农   | 2000 年 | 672                     | 336 | 216 | 192 | 72   | 24    | 96    |
|      | 2015 年 | 192                     | 96  | 24  | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 银川   | 2000 年 | 192                     | 168 | 72  | 48  | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 24                      | 0   | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 陶乐   | 2000 年 | 432                     | 96  | 48  | 24  | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 48                      | 0   | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 中宁   | 2000 年 | 888                     | 216 | 288 | 72  | 0    | 24    | 0     |
|      | 2015 年 | 24                      | 24  | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 盐池   | 2000 年 | 264                     | 144 | 24  | 0   | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 72                      | 48  | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 海源   | 2000 年 | 672                     | 192 | 120 | 48  | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 312                     | 0   | 24  | 24  | 0    | 0     | 0     |
| 同心   | 2000 年 | 312                     | 72  | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 744                     | 192 | 96  | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 固原   | 2000 年 | 264                     | 72  | 48  | 24  | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 72                      | 48  | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
| 西吉   | 2000 年 | 0                       | 24  | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |
|      | 2015 年 | 0                       | 0   | 0   | 0   | 0    | 0     | 0     |

土壤湿度数据采用野外实测与遥感反演相结合的方法采集,于 2016 年 3 月 20—28 日,6 月 23—29 日,10 月 8 日—20 日,根据土壤剖面特征,分别对宁夏地区林地、草地、耕地、裸地、沙地进行土壤采样,共布置 251 个土壤样点(图 1),每个样点重复 3 次采样,采用环刀对深度为 0—10 cm 的土壤进行取样,并及时称重,带回实验室,将土样放置在 105~110℃烘箱中烘至恒重,计算土壤湿度,在此基础上,采用表观热惯量模型(ATI)和温度植被干旱指数模型(TVDI)反演<sup>[24]</sup>宁夏全区表层土壤湿度,选取 112 个典型样点的土壤湿度数据进行建模和验证。

2.3 临界风速的确定

土壤采样过程中,采集耕地、沙地、裸地、林草地原状土,并将土运至中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的风洞实验室内进行测试,根据野外观测和风洞模拟试验分析结果,在风速修订和尺度修订后,对应的气象站风速观测高度(10 m),耕地临界侵蚀风速为 5.3 m/s,沙地临界侵蚀风速为 5 m/s,裸地临界侵蚀风速为 7 m/s,林草地临界侵蚀风速为 8 m/s,且与植被覆盖度呈正相关,当植被覆盖度>70%时,认为无论多大风速,林草地都不会产生风蚀。

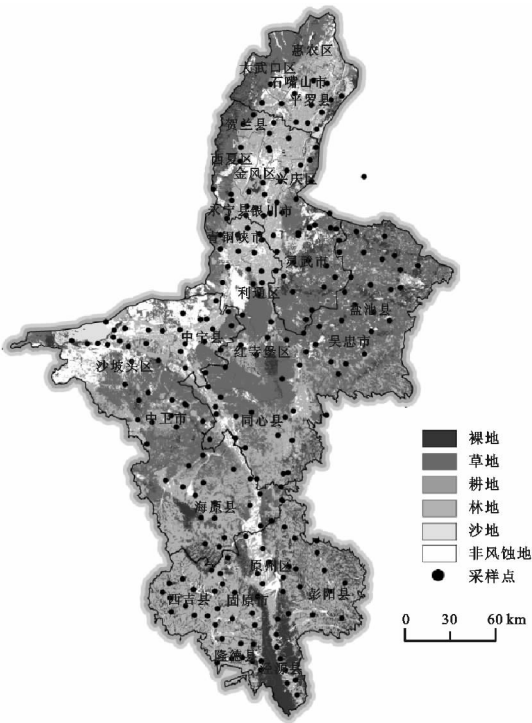


图 1 2016 年宁夏采样点

2.4 宁夏风蚀影响因子权重分析

为了更好分析模型参数中植被覆盖度、土壤湿度特征、风速累计时间三大影响因子对各市各风蚀土地

的风蚀强度影响程度,本研究引入变异系数法<sup>[25]</sup>计算影响因子权重。变异系数法,是一种客观赋权的方法,避免专家赋权重的偏好性,削弱极值指标对评价结果的影响。一般来讲,对于各市各土地利用类型,若空间分布相距较远,则植被覆盖特征、土壤湿度特征、风速累计时间差异较大,表现为影响因子离散程度高、波动性大,即影响因子的方差大,对风蚀强度影响程度大。本研究基于标准差、平均数计算变异系数的方法确定各影响因子权重,由于各影响因子的量纲和量级存在差异,需对各影响因子的数据进行标准化处理,文章中采用极差标准化法<sup>[26]</sup>对原始数据无量纲化。影响因子权重的计算:

$$V_i=\frac{\sigma_i}{\bar{X}_i}\quad (i=1,2,3)$$

(4)

式中: $V_i$  是第  $i$  项影响因子的变异系数,无量纲; $\sigma_i$  是第  $i$  项影响因子的标准差,无量纲; $\bar{X}_i$  是第  $i$  项影响因子的平均数,无量纲。

$$W_i=\frac{V_i}{\sum_{i=1}^3V_i}\quad (i=1,2,3)$$

(5)

式中: $W_i$  表示各影响因子的权重。

3 结果与分析

3.1 宁夏风蚀强度空间分布特征分析

利用风蚀模型对宁夏全区进行土壤风蚀模数的计算,依据中华人民共和国水利部于 2007 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准 SL190—270》,划分宁夏全区

土壤侵蚀情况的等级强度,得到 2000 年、2015 年宁夏风蚀强度等级变化率(表 2)及空间分布格局(图 2),分析表明:全区土壤风蚀强度等级在不同时期的分布格局总体上相似,风蚀强度较低区域为林草地分布区,较高区域为耕沙地分布区。微度风蚀区域,占全区面积 2000 年为 39.98%,2015 年增长到 42.03%,分布在石嘴山市西部,银川市西部和东部,吴忠市中北部,中卫市中部,固原大部分零散分布区,主要土地利用类型为林地和草地。轻度风蚀区域,占全区面积 2000 年为 30.78%,2015 年降到 26.37%,分布在石嘴山的中东部,银川中部,吴忠的西北部 and 南部,中卫的沙坡头区东部、中宁县中部及海原县大部,固原大部分地区,主要土地利用类型为耕地。中度及以上等级风蚀区域,占全区面积 2000 年为 1.83%,2015 年为 1.82%,基本维持不变,分布在沙坡头区、灵武市、盐池县、平罗县、兴庆区、贺兰县、金凤区的沙地、荒漠地区。

表 2 宁夏全区土壤侵蚀强度分级与变化率

| 分级标准/<br>( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ) | 2000 年/<br>$10^4 km^2$ | 2015 年/<br>$10^4 km^2$ | 2015—2000 年<br>变换率/% |
|---|------------------------|------------------------|----------------------|
| I 微度(0~2)                                   | 2.655                  | 2.791                  | 5.095                |
| II 轻度(2~25)                                 | 2.044                  | 1.751                  | -14.371              |
| III 中度(25~50)                               | 0.044                  | 0.117                  | 167.506              |
| IV 强烈(50~80)                                | 0.079                  | 0.003                  | -96.851              |
| V 极强烈(80~150)                               | 0.002                  | 0.0009                 | -40                  |
| VI 剧烈(>150)                                 | —                      | 0.00004                | —                    |

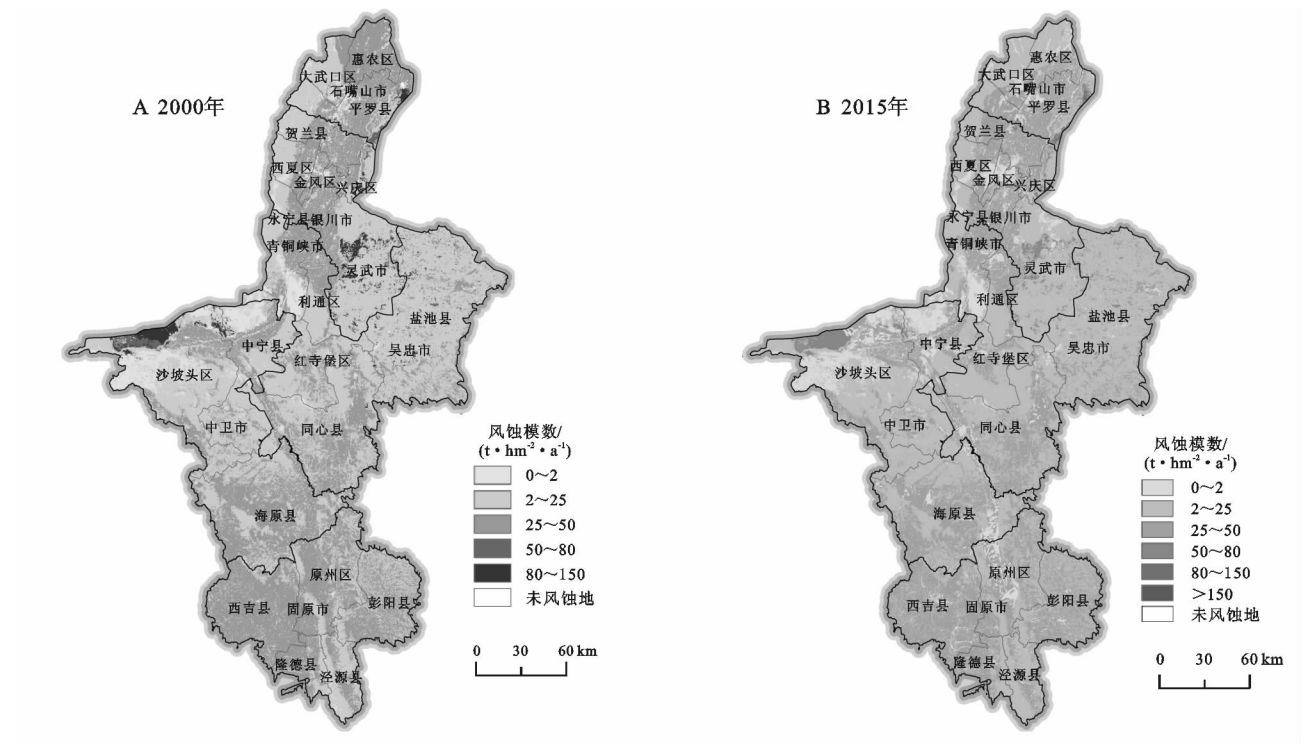


图 2 宁夏土壤风蚀强度分布

### 3.2 宁夏风蚀强度时间动态变化分析

2000—2015年宁夏风蚀强度时间动态变化分析结果表明:微度风蚀区域分布面积总体呈上升趋势,增加率为5.10%,增加区域是由轻度侵蚀转化为微度侵蚀的区域,主要分布在石嘴山市大武口区东北部、惠农区北部,吴忠市红寺堡区东南部,海原县东部,固原市中部地区。轻度风蚀区域分布面积总体呈下降趋势,降低率为14.37%,降低区域部分转化为微度侵蚀区域,另一部分转化为人工表面的非风蚀地。中度风蚀区域分布面积总体呈上升趋势,增加率为167.51%,增加区域主要由强烈、极强烈侵蚀转化为中度侵蚀区域,主要分布在沙坡头区、灵武市、盐池县、平罗县、兴庆区的沙地分布区。2015年零星分布的剧烈侵蚀区分布在平罗县和贺兰县中部交界地带的沙地分布区。未风蚀地增加区域主要分布在金凤区、灵武市东北部、同心县与海原县交界处延续到原州区西部地区。整体来看,研究期间宁夏全区风蚀总面积由48 243 km<sup>2</sup>降低到46 615 km<sup>2</sup>,土壤风蚀强度呈下降的趋势。

### 3.3 不同风蚀土地类型的风蚀强度变化特征分析

为了明确宁夏各市各风蚀土地风蚀强度变化特

征,统计宁夏各市各年各风蚀土地风蚀模数(图3),分析表明:同一年份各市风蚀土地风蚀强度排序为:沙地>耕地>裸地>草地>林地,平均风蚀强度分别为:47.39 t/(hm<sup>2</sup>·a),5.77 t/(hm<sup>2</sup>·a),1.82 t/(hm<sup>2</sup>·a),1.48 t/(hm<sup>2</sup>·a),1.00 t/(hm<sup>2</sup>·a),分布在银川、吴忠、固原、中卫的林地风蚀区,风蚀强度增大,增幅分别为:7.02%,20.34%,8.96%,14.15%;分布在石嘴山的林地风蚀区,风蚀强度由1.57 t/(hm<sup>2</sup>·a)降低到1.49 t/(hm<sup>2</sup>·a),降幅为5.10%。分布在银川、吴忠、中卫的草地风蚀地区,风蚀强度增大,增幅分别为:15.79%,15.56%,8.15%;石嘴山的草地风蚀区风蚀强度降低,降幅为40%,固原草地风蚀区风蚀强度基本维持不变。分布在银川、吴忠、固原、中卫的裸地风蚀区,风蚀强度增大,增幅分别为:18.37%,8.93%,25.81%,3.57%;石嘴山裸地风蚀区,风蚀强度由3.51 t/(hm<sup>2</sup>·a)降低到2.58 t/(hm<sup>2</sup>·a),降幅为26.50%。银川、石嘴山、吴忠、固原、中卫的耕地风蚀区,风蚀强度降低,降幅分别为:37.41%,37.96%,34.21%,24.96%,30.10%;。银川、石嘴山、吴忠、中卫的沙地风蚀区,风蚀强度降低,降幅分别为:27.89%,13.43%,22.29%,29.29%。

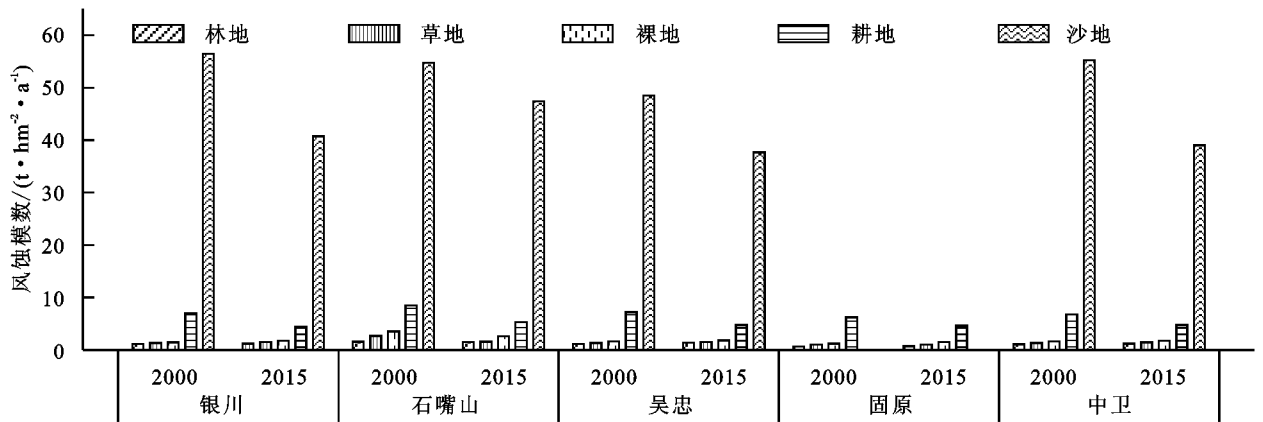


图3 2000年、2015年宁夏各市各风蚀土地类型风蚀模数

### 3.4 风蚀强度影响因子分析

利用变异系数法求权重,得到2000年和2015年各市各风蚀土地类型的影响因子权重见表3。

由表3中两年风蚀各影响因子权重综合看出,银川、吴忠、固原、中卫的风蚀强度的主要影响因子为土壤湿度,次要影响因子为植被覆盖度,石嘴山风蚀强度的主要影响因子为超过起沙风速累积时间,与石嘴山地处于风口的的位置有关。对宁夏风蚀土地风蚀强度增大区域的影响因子进行分析,林地、草地、裸地风蚀强度增大区,风蚀强度增大的主要影响因子为表土湿度,且表土湿度因子下降趋势,表土越干,土壤粘着

力越低,增大风蚀的可能性。

## 4 讨论

本研究通过野外实地土壤湿度数据收集及风洞试验起沙风速模拟,进一步修正了土壤风蚀模型参数,提高风蚀模拟精度,但在分析年度变化中,由于土壤湿度历史数据缺失,依托土壤现状调查数据通过反演技术获得,为更精准化评估宁夏土壤风蚀,应固定采样点并实施长期监测。

下垫面形态、气象条件、土壤特征是影响土壤风蚀的三大方面,该三大方面所包含影响土壤风蚀的因子众

多,本文主要是针对模型所涉及到的植被覆盖度、土壤湿度特征、风速累计时间三大影响因子,通过变异系数法找出最主要的影响因子,以期为减缓风蚀对策提供数据支撑。下垫面形态如植被类型以及地形等,土壤特征

如团聚体、颗粒特征等均会对风蚀产生影响,如何量化分析这些影响,明确土壤团聚体、颗粒特征与起沙风速及风沙传输路径关系,下垫面形态与风速耦合特征等,这将是我們下一步工作研究的重点。

表 3 宁夏各市各风蚀土地类型风蚀强度影响因子权重

| 城市  | 土地利用类型 | 湿度权重   |        | 植被覆盖度权重 |        | 超过起沙累积时间权重 |        |
|-----|--------|--------|--------|---------|--------|------------|--------|
|     |        | 2000 年 | 2015 年 | 2000 年  | 2015 年 | 2000 年     | 2015 年 |
| 银川  | 林地     | 0.480  | 0.508  | 0.419   | 0.321  | 0.101      | 0.171  |
|     | 草地     | 0.602  | 0.609  | 0.297   | 0.201  | 0.101      | 0.190  |
|     | 裸地     | 0.717  | 0.661  | —       | —      | 0.283      | 0.339  |
|     | 耕地     | 0.413  | 0.456  | 0.339   | 0.270  | 0.248      | 0.274  |
|     | 沙地     | 0.549  | 0.585  | 0.294   | 0.159  | 0.158      | 0.256  |
| 石嘴山 | 林地     | 0.284  | 0.312  | 0.304   | 0.313  | 0.413      | 0.375  |
|     | 草地     | 0.258  | 0.307  | 0.309   | 0.311  | 0.433      | 0.381  |
|     | 裸地     | 0.366  | 0.382  | —       | —      | 0.634      | 0.618  |
|     | 耕地     | 0.227  | 0.422  | 0.202   | 0.197  | 0.571      | 0.381  |
|     | 沙地     | 0.546  | 0.294  | 0.141   | 0.145  | 0.313      | 0.561  |
| 吴忠  | 林地     | 0.420  | 0.552  | 0.364   | 0.274  | 0.216      | 0.174  |
|     | 草地     | 0.510  | 0.490  | 0.218   | 0.270  | 0.272      | 0.240  |
|     | 裸地     | 0.696  | 0.765  | —       | —      | 0.304      | 0.235  |
|     | 耕地     | 0.407  | 0.529  | 0.411   | 0.282  | 0.182      | 0.190  |
|     | 沙地     | 0.374  | 0.473  | 0.402   | 0.307  | 0.224      | 0.220  |
| 固原  | 林地     | 0.387  | 0.601  | 0.410   | 0.248  | 0.203      | 0.151  |
|     | 草地     | 0.352  | 0.599  | 0.346   | 0.214  | 0.303      | 0.187  |
|     | 裸地     | 0.510  | 0.633  | —       | —      | 0.490      | 0.367  |
|     | 耕地     | 0.318  | 0.563  | 0.351   | 0.249  | 0.331      | 0.187  |
|     | 林地     | 0.361  | 0.490  | 0.365   | 0.351  | 0.275      | 0.159  |
| 中卫  | 草地     | 0.425  | 0.514  | 0.308   | 0.373  | 0.266      | 0.114  |
|     | 裸地     | 0.588  | 0.792  | —       | —      | 0.412      | 0.208  |
|     | 耕地     | 0.425  | 0.515  | 0.306   | 0.339  | 0.269      | 0.145  |
|     | 沙地     | 0.384  | 0.484  | 0.176   | 0.420  | 0.440      | 0.096  |

大气环境质量是我国环保考核的重点内容,PM10 和 PM2.5 浓度变化是表征大气环境质量的重要指标,其中地表自然开放源释尘是 PM10 和 PM2.5 浓度的重要来源之一,而不同风蚀土地类型的风蚀量是摸清自然开放源释尘量研究的前提,本研究结果将对宁夏风蚀土地的释尘量研究奠定基础,为宁夏生态环境针对性分区治理提供研究借鉴。

5 结 论

以遥感、GIS 技术法为依托,在实地调研表土湿度因子的基础上,利用涵盖各种风蚀土地类型的风蚀模型,综合遥感数据、风速数据,对宁夏全区 2000—2015 年的风蚀强度的空间分布特征、时间动态变化特征、各

风蚀土地风蚀强度变化特征以及影响因子进行了分析,结果显示:空间分布上,微度、轻度风蚀强度地区分布在石嘴山市西部,银川市西部和东部,吴忠市中北部,中卫市中部,固原大部分分布区,中度及以上风蚀强度地区分布在沙坡头区、灵武市、盐池县、平罗县、兴庆区、贺兰县、金凤区的沙地、荒漠地区;时间序列上,2000—2015 年风蚀发生总面积和风蚀强度整体呈下降趋势;按风蚀地类分,风蚀强度排序为:沙地>耕地>裸地>草地>林地,平均风蚀强度分别为 47.39 t/(hm<sup>2</sup>·a),5.77 t/(hm<sup>2</sup>·a),1.82 t/(hm<sup>2</sup>·a),1.48 t/(hm<sup>2</sup>·a),1.00 t/(hm<sup>2</sup>·a);银川、吴忠、固原、中卫的风蚀强度的主要影响因子为土壤湿度,次要影响因子为植被覆盖度,石嘴山风蚀强度的主要影响因子为超过起沙风速累

积时间。石嘴山风口地区减少工矿开发,增加植被盖度降低风速;对耕地占比高的银川应改变传统的耕作方式,采取免耕式等效降低耕地风蚀强度<sup>[27]</sup>;加强政策引导,在补贴、税收等方面落实优惠政策,发展生态农业、生态工业和生态旅游业<sup>[28]</sup>,改变传统土地利用方式<sup>[29]</sup>,从根本上对抗土壤风蚀。

#### 参考文献:

- [1] 陈渭南,董光荣,董治宝. 中国北方土壤风蚀问题的研究进展和趋势[J]. 地球科学进展,1994,99(5):6-12.
- [2] 于国茂,刘越,艳燕,等. 2000—2008年内蒙古中部地区土壤风蚀危险度评价[J]. 地理科学,2011,31(12):1493-1499.
- [3] 周建忠. 土壤风蚀及保护性耕作减轻沙尘暴的试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
- [4] 胡云锋,刘纪远,庄大方. 土壤风力侵蚀研究现状与进展[J]. 地理科学进展,2003,22(3):288-295.
- [5] 赵光平,陈楠,王连喜. 宁夏中部干旱带生态恢复对沙尘暴的降频与减灾潜力分析[J]. 生态学报,2005,25(10):2750-2756.
- [6] 左忠,王东清,温学飞. TOPSIS法综合评价宁夏中部干旱带5种风蚀环境抗风蚀性能[J]. 中国农学通报,2017,33(18):61-64.
- [7] 周海燕,王瑛珏,樊恒文,等. 宁夏中部干旱带砂田抗风蚀性能研究[J]. 土壤学报,2013,50(1):41-49.
- [8] 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.
- [9] 庞吉林. 宁夏盐池荒漠化草场生态恢复研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [10] 南岭,肖锋军,董治宝. 宁夏农田土壤粉尘释放过程试验研究[J]. 水土保持学报,2016,30(5):135-139.
- [11] Woodruff N, Siddoway F. A wind erosion equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1965,29(5):602-608.
- [12] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D. A single event wind erosion model [J]. Transactions of the ASAE, 1998,41(5):1369-1374.
- [13] Pasak V. Wind erosion on soils[M]. Vum Zbraslav: Scientific Monographs, 1970.
- [14] Bocharov A P. A description of devices used in the study of wind erosion of soils[M]. Aa Balkema, 1984.
- [15] Singh U B, Gregory J M, Wilson G R. Texas erosion analysis model: theory and validation [C]. Skidmore El. Proceedings of An International Symposium/Workshop. Manhattan, Ks, 1997.
- [16] Shao Y, Raupach M, Short D. Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling Basin [Australia] [J]. Australian Journal of Soil and Water Conservation(Australia),1994,47(3):323-339.
- [17] Hagen L. A wind erosion prediction system to meet user needs [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,46(2):106-111.
- [18] 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[J]. 地球科学进展,2014,29(8):875-889.
- [19] 高尚玉,张春来,邹学勇,等. 京津风沙源治理工程效益 [M]. 北京:科学出版社,2008:33-42.
- [20] 郭索彦,刘宝元,李智广,等. 土壤侵蚀调查与评价 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2014:107-132.
- [21] 刘红,王卫,郝彦莉,等. 基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价[J]. 水土保持通报,2016,36(2):12-17.
- [22] 陈莉,姬亚芹,刘爱霞,等. 天津市近郊地表风蚀型开放源对中心城区影响估算研究[J]. 环境科学,2011,32(9):2769-2776.
- [23] 王占军,邱新华,唐志海,等. 宁夏1999—2009年土地荒漠化演变影响因素分析[J]. 中国沙漠,2013,33(2):325-333.
- [24] 邸兰杰,王卫,成贺玺,等. 基于ATI和TVDI模型的河北平原土壤湿度遥感反演[J]. 中国生态农业学报,2014,22(6):737-743.
- [25] 赵微,林健,王树芳,等. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学,2013,34(4):1277-1283.
- [26] 李仕川,郭欢欢,侯鹰,等. 土地集约利用空间分异研究中指标标准化方法研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(10):1771-1778.
- [27] 左忠,王峰,蒋齐,等. 免耕与传统耕作对旱作农田土壤风蚀的影响研究:以玉米田为例[J]. 西北农业学报,2005,14(6):55-59.
- [28] 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.
- [29] 张加琼,刘章,杨明义,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带坡面土壤侵蚀特征及其影响因素[J]. 水土保持研究,2018,25(1):1-6,22.