

晋北沙漠化地区土壤风蚀动态及防治效果

武志涛¹, 马志婷¹, 郭未旭¹, 李晋昌¹, 张红^{1,2}

(1. 山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006; 2. 山西大学环境与资源学院, 山西太原 030006)

摘要: [目的] 对晋北沙漠化区土壤风蚀状况及空间差异进行研究, 以为区域土地退化和京津风沙源治理工程的效益评估提供科学依据。[方法] 基于耕地和林草地不同地表类型的土壤风蚀模型, 逐像元地计算 2001—2014 年晋北沙漠化地区土壤风蚀状况及空间差异。[结果] (1) 2001—2014 年晋北沙漠化区的平均土壤风蚀模数达到 4.67 t/(hm²·a), 处于轻度风蚀状态。区域分布上, 北部区域风蚀状况明显高于南部。(2) 研究区 2001, 2005, 2010 和 2014 年的平均土壤风蚀模数分别为 6.83, 3.89, 4.36 和 2.55 t/(hm²·a); 土壤风蚀总量分别为 2.09×10⁷ t, 1.19×10⁷ t, 1.31×10⁷ t 和 7.65×10⁶ t。(3) 晋北沙漠化地区植被覆盖度提高和风力减弱是区域土壤风蚀强度削弱的主要原因。研究发现风力作用的减弱贡献率约为 77.7%, 而植被覆盖度的提高的贡献率为 22.3%。[结论] 晋北土壤风蚀状况空间差异较大, 风速减弱是导致区域土壤风蚀削弱的主要原因。晋北沙漠化地区植被覆盖度尚未恢复到良好的状态, 生态工程建设还需进一步实施, 生态工程实施的成果需加强保护。

关键词: 土壤风蚀模型; 生态工程; 风力; 植被盖度; 晋北

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0008-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 武志涛, 马志婷, 郭未旭, 等. 晋北沙漠化地区土壤风蚀动态及防治效果[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 008-014. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.002

Dynamics and Control Effect of Soil Wind Erosion in Desertification Region of Northern Shanxi Province

WU Zhitao¹, MA Zhiting¹, GUO Weixu¹, LI Jinchang¹, ZHANG Hong^{1,2}

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006,

China; 2. College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: [Objective] Dynamics of soil wind erosion in the desertification region of Northern Shanxi Province were analyzed to provide some supports for the prevention of land degradation and the benefit assessment of sand source control engineering for Beijing-Tianjin Cities. [Methods] Based on different types of surface soil erosion model, we studied the dynamics and spatial variability of soil wind erosion for each pixel in the desertification region of Northern Shanxi Province from 2001 to 2014 and then quantitatively evaluated the effects of different factors on regional soil wind erosion control. [Results] (1) Average annual soil wind erosion modulus in the desertification region of Northern Shanxi Province in 2001—2014 was 4.67 t/(hm²·a), which is in a state of mild deflation. In terms of regional distribution, the state of wind erosion desertification in the north of that region was more serious than that in the south. (2) The average soil erosion modul in 2001, 2005, 2010 and 2014 were 6.83, 3.89, 4.36 and 2.55 t/(hm²·a), respectively. And the total amounts of soil erosion were 20.90 million ton, 11.88 million ton, 13.10 million ton and 7.65 million ton, respectively. (3) The improvements of vegetation coverage and wind weakening were the main causes of decline of regional soil wind intensity in the desertification region of Northern Shanxi Province. The study found that the contribution rate of wind effect weakening was about 77.7% for the decrease of wind erosion, while the contribution rate of increase of vegetation coverage was 22.3%. [Conclusion] The soil wind erosion change

收稿日期: 2016-05-16

修回日期: 2016-05-26

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“极端气候变化下生态工程建设对区域植被变化的影响研究”(41401643); 山西省“十二五”科技重大专项(20121101011); 山西省软科学项目(2015041020-1); 国家自然科学基金项目(41271143)

第一作者: 武志涛(1985—), 男(汉族), 山西省文水县人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化与土地沙漠化监测与防治“3S”集成技术方面的研究。
E-mail: wuzhitao@sxu.edu.cn.

varied remarkably in spatial domain. Wind weakens is the main cause of regional soil wind intensity weaken in Northern Shanxi Province desertification region. The vegetation coverage in Northern Shanxi Province desertification region has not been restored to a good condition. This indicates that the implement of ecological engineering should be carried out and the effects of ecological project should be protected.

Keywords: soil erosion model; ecological engineering; wind erosion; vegetation coverage; Northern Shanxi Province

土壤风蚀是造成土地退化的主要原因之一,我国是世界上受沙漠化影响最为严重的地区之一,土壤风蚀及土地沙漠化影响面积已占国土面积的1/2以上^[1-3]。土壤风蚀破坏土壤结构,使得区域土壤变得更加贫瘠,土地生产力水平急剧下降,严重威胁着人们的正常生产生活,影响着地区社会经济发展^[4]。土壤风蚀是以风蚀动力过程及影响因子为研究基础,来定量估算风蚀强度,并被用于指导风蚀防治实践^[5]。从Woodruff和Siddoway建立土壤风蚀研究历史上第一个风蚀方程(WEQ)开始^[6],许多学者从不同的角度和方法建立了各种行之有效的风蚀模型,如RWEQ,TEAM,WEAM,WEPS等模型^[7-9]。我国,部分学者以利用集沙仪器、室内外风洞和同位素示踪等方法来研究土壤风蚀预报技术^[10-12]。南岭等^[13]在前人研究基础上,根据应用空间尺度,将土壤风蚀模型分为田间尺度、区域尺度和大陆尺度3个层次。目前,多数风蚀经验模型通常是在田间尺度范围下建立的,模型的参数经过了大量实践的考验。由于区域空间上的异质性,在区域尺度上的应用这些模型时效果并不理想^[14-15]。随着“3S”技术与计算机模拟技术的发展,利用风洞试验和计算机模拟成为区域尺度土壤风蚀研究的重要手段^[16-17]。高尚玉等人^[18-20]利用风洞试验研发了适用于我国北方自然条件的土壤风蚀模型,并结合“3S”技术在第一次水利普查和京津风沙源治理工程中对该模型进行了应用和实践,是目前适合于我国北方干旱和半干旱地区自然条件的主要土壤风蚀预报模型之一。

晋北沙漠化地区是中国重要的防沙治沙工程试点之一。土壤风蚀是造成该地区沙漠化与土壤质量退化的主要原因。2000年以来,我国在该区实施了京津风沙源区治理工程。高尚玉等^[18-20]在对京津风沙源地区的土壤风蚀状况评价中对晋北地区的土壤风蚀状况进行了研究。该研究中由于数据获取的局限性,晋北地区的风速站点只有代县一个站点,利用一个风速站点和周边的风速站点通过插值来反映整个晋北地区的风速状况,对研究整个京津风沙源区的风速状况研究精度尚可。然而,对全面的反映晋北沙漠化区土壤风蚀的空间差异还存在一定的不足。因此,开展晋北沙漠化区土壤风蚀的动态监测及防治效果的研究,揭示该区土壤风蚀过程的发生发展规律,

可为防治该区风蚀危害和京津风沙源治理工程的生态效益评估提供一定的科学依据。

1 研究区概况、数据来源及处理方法

1.1 晋北地区概况

晋北沙漠化区的行政区范围包括大同市的南郊区、新荣区、浑源县、大同县、阳高县和天镇县,朔州市的平鲁区、朔城区、右玉县、应县和怀仁等,忻州市的偏关县、河曲县、五寨县、繁峙县和代县等,共计20个区县,国土面积约为 $3.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区平均海拔在1200~1800 m之间,黄土普遍分布,地势种类繁多多样。该区是山西省资源、矿产等自然资源的集中分布区,人类的活动对该区生态系统的干扰较为剧烈。研究区常年受温带大陆性季风气候控制,冬季漫长而寒冷干燥,春季短暂而干旱多风,夏季凉爽,秋季温和。年平均气温为7℃左右,历史极端最低气温为-40.4℃,历史极端最高气温为38.8℃^[21];年平均降水量介于350~460 mm,且多集中于7—9月;年均蒸发量约为2000 mm;年均日照时数约达3000 h,无霜期100~150 d^[23]。该区地处暖温带落叶阔叶林向温带草原的过渡地带。区内干旱多风、土壤贫瘠等恶劣的自然条件导致该区植物种类较为贫乏。乔木树种主要有油松、落叶松、白桦、杨树、柳树、刺槐等;灌木树种主要有沙棘、柠条、黄刺玫、虎榛子、绣线菊、黄蔷薇、胡枝子等;草本植物主要有百里香、长芒草、羊胡子草、铁杆蒿、冷蒿、针茅、芦苇等。总体来说,适生乔木树种较少,适生灌木树种和草种较多^[21-23]。

1.2 数据来源

1.2.1 地表性质 晋北沙漠化地区面积广阔,地表性质复杂。对土壤风蚀而言,既广泛分布易于遭受风蚀的各种土地利用类型(如耕地、林地、草地等),也分布着不受风蚀影响的土地利用类型(如各种水体,裸岩等)。本文所采用的土地利用类型图为2000和2010年两期土地利用数据集。该数据集是课题组基于TM影像,通过建立判读标志,进行人机交互式判读建立起来的。根据野外试验抽样检验,landsat-TM数据人工解译的1:100000土地利用图的平均定性精度为90%以上。由此获得晋北沙漠化地区风蚀地表类型图,并在ArcGIS软件中输出像元

大小为 250 m×250 m 的栅格图。该图中将全部地表类型划分为不可蚀土地、林草地和耕地 3 类地表。在风蚀计算时,不可蚀土地风蚀模数直接取 0,其他两类土地分别采用各自的风蚀模型进行计算。

1.2.2 植被盖度因子 本文中的植被盖度利用基于 NDVI 的像元二分法模型^[24]计算得到。其中 NDVI 数据为 2001, 2005, 2010, 2014 年的 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer, 中分辨率成像光谱仪) 16 d 250 m NDVI 产品数据 (MOD₁₃Q₁)。由于土壤风蚀主要发生在植被非生长季,MODIS 影像很难真实反映地表植被状况,因此本研究采用与高尚玉等人的研究方法类似的方法,植被盖度的数据采用各年 5 月的 NDVI 数据来计算当年风蚀期内的植被盖度。

1.2.3 风力因子 为估算晋北沙漠化区 2001, 2005, 2010 和 2014 年的土壤风蚀量,需要统计这 4 a 风蚀活动期间临界风速以上各等级风速的累积时间。考虑到研究区面积大,对全部县的气象站点风速观测数据进行整理和统计难度较大,因此选取阳高县、大同县、右玉县、怀仁县、浑源县、偏关县、朔城县、繁峙县、代县和五寨县 10 个县的气象站。这 10 个均匀分布在晋北沙漠化地区。10 个气象站点每小时的风速数据来自山西省气象台。根据这 10 个气象站点沙尘天气的统计数据,该区 7—9 月沙尘天气极少,3—5 月是沙尘天气的集中月份^[22]。土壤风蚀是沙尘天气发生的直接原因,因此沙尘天气直接指示了土壤风蚀过程的存在。另外,7—9 月是该区降水最集中、植被生长状况最好的时期,土壤风蚀非常微弱,对全年的风蚀量贡献可以忽略不计。因此,将晋北沙漠化地区风蚀活动期确定为一年中除 7—9 月以外的其他月份。将上述 10 个站点的 4 a 中 1—6 月和 10—12 月大于 5.0 m/s 的各级风速数据统计。由于如果直接利用上述气象站点的风速累计数据计算该县所在县的土壤风蚀量,相邻两县的风蚀量计算结果可能相差很大,尤其是在县交界处会出现同种地表类型土壤风蚀量陡增或者陡降的现象,这与实际情况并不相符。为解决这一问题,对上述 10 个站点的各等级风速累积时数进行反距离加权插值,输出像元为 250 m×250 m 的栅格图。

1.3 土壤风蚀量估算方法

1.3.1 不同地表类型的土壤风蚀模数估算方法 本研究土壤风蚀模型采用高尚玉等研究成果^[18]。该研究中根据风洞试验和不同地表类型,分别对耕地、林草地和沙地建立了相应的风蚀经验模型。其中大田条件下耕地土壤风蚀模数计算公式为:

$$Q_a = 10 \times C \cdot \sum_{j=1}^n \{ T_j \cdot \exp\{a_1 + \frac{b_1}{z_0} + c_1 \cdot [(A \cdot U_j)^{0.5}]\} \} \quad (1)$$

式中: Q_a ——大田条件下的农田土壤风蚀模数 [t/(hm²·a)]; C ——从田间尺度到大田尺度的修订系数,约为 0.001 8; A ——风速修订系数, $U_{风洞} = A \cdot U_{气象站}$; U_j ——气象站整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第 j 级风速; T_j ——风蚀活动发生月份内风速为 U_j 的累积时间 (min)。我国北方旱作农田临界侵蚀风速一般略大于流沙地表的 5.0 m/s。与高尚玉等^[18]的研究类似,气象站整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第 1 个风速等级为 5.0~6.0 m/s,取平均值 5.5 m/s,因此 $U_{j=1} = 5.5$ m/s, $U_{j=2} = 6.5$ m/s,依次类推; Z_0 ——地表空气动力学粗糙度 (cm),约为 0.55 cm; a_1, b_1, c_1 ——常数项,分别取 -9.208, 0.018, 1.955。

大田条件下草(林)地土壤风蚀模数的计算公式为:

$$Q_b = 10 \times C \cdot \sum_{j=1}^n \{ T_j \cdot \exp[a_2 + b_2 \cdot VC^2 + C_2 / (A \cdot U_j)] \} \quad (2)$$

式中: Q_b ——大田条件下植被盖度为 VC 时草地或林地土壤风蚀模数 [t/(hm²·a)]; a_2, b_2, c_2 ——常数项,分别取 2.486 9, -0.001 4 和 -54.947 2。其余与公式(2)中系数的含义相同。各级植被盖度对应的临界侵蚀风速与高尚玉等^[18]研究的参数一致。

1.3.2 土壤风蚀模数空间分布估算方法 由于晋北地区没有沙地类型,只有耕地和林草地两种地表类型,因此,基于公式(1)~(2)逐像元计算两种地表类型的土壤风蚀模数,其中第 i 个像元的土壤风蚀模数计算公式为:

$$Q_i = \begin{cases} Q_{a_i} & (\text{第 } i \text{ 个像元的土壤类型为耕地}) \\ Q_{b_i} & (\text{第 } i \text{ 个像元的土壤类型为林草地}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_i ——第 i 个像元的土壤风蚀模数 [t/(hm²·a)]; Q_{a_i} ——第 i 个像元为耕地时土壤风蚀模数 [t/(hm²·a)]; Q_{b_i} ——第 i 个像元为林地或草地的土壤风蚀模数 [t/(hm²·a)]。本研究假设在 250 m×250 m 的像元内地表类型是唯一的。例如第 i 个像元的地表类型为耕地,则该像元的土壤风蚀模数为 Q_{a_i} ,该像元内林草地的土壤风蚀模数则为 0。

1.3.3 土壤风蚀总量的计算方法 在得到土壤风蚀模数空间分布的基础上,将所有像元土壤风蚀模数进行累加,得到整个区域的土壤风蚀模数总量。然后,将土壤风蚀模数总量乘以每个像元的面积得到整个区域的年土壤风蚀总量。计算公式为:

$$Q_{total} = S \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

式中: Q_{total} ——区域的土壤风蚀总量(t/a); Q_i ——第*i*个像元的土壤风蚀模数[$t/(hm^2 \cdot a)$]; S ——每个像元的面积(hm^2),本研究取 6.25(每个像元的面积为 6.25 hm^2)。

1.4 侵蚀风力指数

为了定量评估晋北沙漠化地区整体风力条件对区域土壤风蚀的影响,将“侵蚀风力指数”即平均侵蚀风速与累积时间的乘积作为衡量区域风力环境强弱的定量指标^[18]。本研究侵蚀风力指数的具体计算公式为:

$$E_u = \sum_{j=1}^N T_j \cdot U_j \quad (5)$$

式中: E_u ——侵蚀风力指数; U_j ——气象站整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第*j*级风速(m/s); T_j ——风蚀活动发生月份内风速为 U_j 的累积时间(h); N ——风速等级数。

2 研究区土壤风蚀动态及防治效果

2.1 晋北沙漠化地区土壤风蚀现状评价

由于风力、植被和土地利用等风蚀因子存在年际变化,土壤风蚀强度势必存在年际差异。根据中华人民共和国水利部制定的风蚀强度分级标准(表 1),采用晋北沙漠化地区 2001,2005,2010 和 2014 年 4 a 的平均土壤风蚀模数来评价该沙漠化地区的土壤风蚀状况。统计表明,晋北沙漠化地区非风蚀土地为 $1.676 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占土地总面积的 5.28%,微度风蚀总面积为 $1.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占土地总面积的 39.71%;轻度风蚀总面积为 $3.17 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占总面积的 55.01%。

总体来说,晋北沙漠化地区 4 a 的平均风蚀模数达到 $4.67 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,处于轻度风蚀。

表 1 土壤风蚀强度分级

风蚀强度级别	微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈
风蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	<2	2~25	25~50	50~80	80~150	>150

区域分布上,晋北沙漠化地区北部区域风蚀明显高于南部,整体上从东北向西南呈递减的趋势(图 1)。其中,平均风蚀模数超过 $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的区域主要分布在研究区的北部,如右玉县、左云县、新荣区、大同县、阳高县、浑源县。除此之外,研究区西南地区五寨县的中部区域风蚀模数超过了 $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。而研究区中部区域平均风蚀模数为 $6 \sim 10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。风蚀模数较弱的区域主要分布在研究区的西部和东南部,具体包括保德县、偏关县、河曲县、代县和繁峙县等。

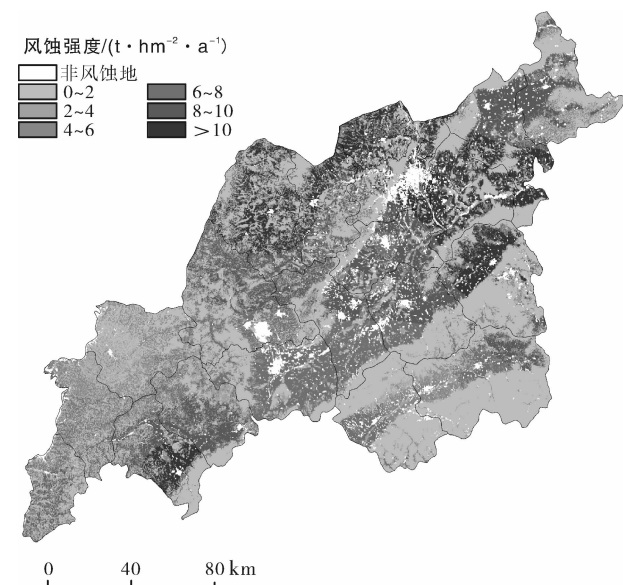


图 1 近 15 a 晋北沙漠化地区土壤风蚀强度空间分布

2.2 晋北沙漠化地区土壤风蚀动态变化

晋北沙漠化地区 2001,2005,2010 和 2014 年土壤风蚀模数和土壤风蚀总量总体呈减小的趋势。其中 2001,2005,2010 和 2014 年的平均土壤风蚀模数分别为 6.83,3.89,4.36,2.55 $t/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;土壤风蚀总量分别为 $2.09 \times 10^7 \text{ t}$, $1.19 \times 10^7 \text{ t}$, $1.31 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $7.65 \times 10^6 \text{ t}$ 。2005,2010 和 2014 年土壤风蚀强度均低于治理工程最初实施的 2001 年。表 2 为 2001,2005,2010,2014 年不同等级风蚀强度的面积比例图。由表 2 可知,2001 年晋北沙漠化地区主要以轻度风蚀为主,约占整个研究区面积的 76.47%。随着生态工程的建设,到 2005 年,整个研究区则以微度风蚀为主,约占整个研究区面积的 52.48%。2005,2010,2014 年研究区微度风蚀的面积分别为:52.84%,53.13%和 53.84%,轻度风蚀的面积分别为 43.86%,41.59%和 41.24%。2005,2010 和 2014 年整个研究区的微度风蚀和轻度风蚀的百分比变化较小。

表 2 晋北沙漠化地区 4 a 各等级风蚀强度面积比例 %

年份	非风蚀地	微度风蚀	轻度风蚀
2001	3.66	19.87	76.47
2005	3.66	52.48	43.86
2010	5.28	53.13	41.59
2014	5.28	53.48	41.24

这是由于中华人民共和国水利部制定的风蚀强度分级标准是针对全国范围,在晋北沙漠化区相对来说分级较为粗泛。因此,本文进一步分析了晋北沙漠化地区土壤风蚀强度的空间分布。

图 2 为 2001, 2005, 2010, 2014 年研究区不同等级土壤风蚀模数的空间分布图。由图 2 可知, 2001, 2005, 2010 和 2014 年晋北沙漠化区的土壤风蚀模数空间差异较大。2001 年研究区大部分地区土壤风蚀模数在 $8 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上, 其中模数超过 $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上的区域呈现出明显的西南—东北的条带状, 主要分布在天镇县、阳高县、大同县、怀仁县、山阴县、应县、朔城区、神池县和五寨县等区域。这主要是由于 2001 年工程实施的初期, 植被覆盖度较差, 风力大导致的。随着生态工程建设的实施, 2005 年研究区大

部分区域土壤风蚀模数在 $8 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以下, 超过 $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 的区域主要集中在南郊区、大同县和五寨县的部分区域。到 2010 年, 研究区的土壤风蚀模数有上升的趋势, 超过 $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上的区域主要集中在研究区的东北部和五寨县的部分区域。造成这种现象的主要原因为: (1) 尽管生态建设工程在实施, 但研究区的植被覆盖度还没达到预期的效果; (2) 2010 年的各级等级风速累积时数比 2005 年各级等级风速累积时数大。随着工程的进一步实施, 到 2014 年, 研究区的土壤风蚀模数主要集中在 $6 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以下, 超过 $10 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 以上的区域主要集中在研究区的大同县和浑源县的西北部。这主要是由于 2014 年的植被覆盖较高和风速减弱共同作用导致的。

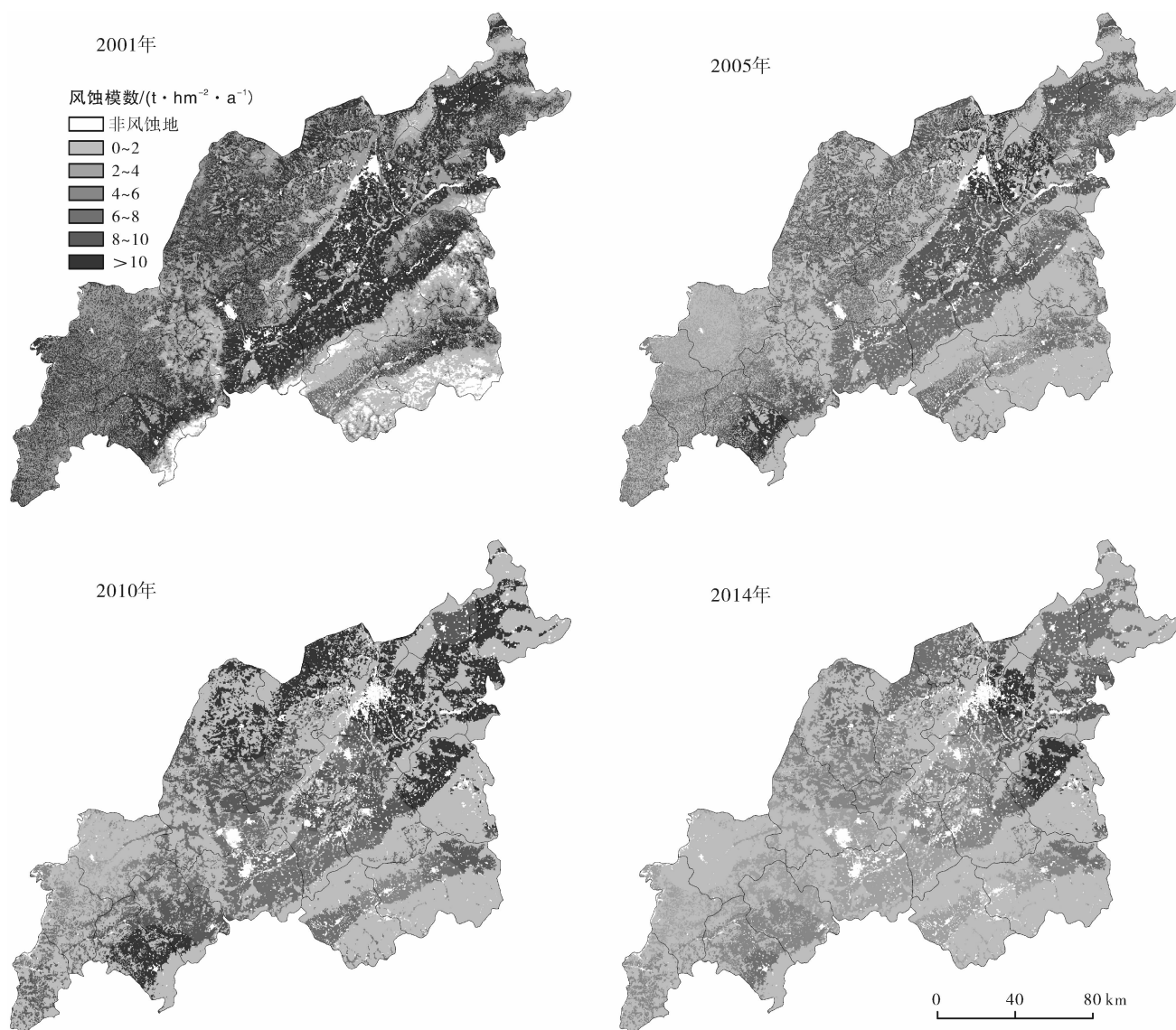


图 2 晋北沙漠化地区 4 a 不同等级土壤风蚀模数的空间分布

2.3 土壤风蚀防治效果的影响因素分析

2001, 2005, 2010 和 2014 年晋北沙漠化地区土壤风蚀状况的波动变化, 既与该地区各年份气候因素的变化有关, 也与区域生态工程建设的实施有关。因此, 在分析区域土壤风蚀防治效果影响因素时, 必须区分该地区气候因素和生态工程建设对土壤风蚀防治效果的影响。

2.3.1 气候因素 降水是限制晋北沙漠化地区植被生长的主要气象因子。因此, 降水的变化通过影响区域植被生长状况和土壤水分状况, 从而提高或者降低地表的抗风蚀能力。

由研究区 10 个站点的降水量与土壤风蚀模数的散点图分析可知, 降水量与土壤风蚀模数之间相关性很小, 且很难发现二者呈现出的规律性, 因此, 降水量的变化并不是晋北沙漠化地区土壤风蚀强度变化的主要原因。

作为土壤风蚀的根本驱动力, 风力的增强会加剧土壤风蚀, 减弱则会降低风蚀强度。根据 2001, 2005, 2010, 2014 年 4 a 晋北沙漠化地区平均风速 ≥ 5 m/s 累积时间分布图分析可知, 晋北地区的风速累积时间的空间分布图与土壤风蚀强度的空间分布基本一致, 风速累积时间大的区域, 土壤风蚀的强度较大, 主要分布在大同县, 阳高县和五寨县等区域。相反, 风速累积时间较小的区域, 土壤风蚀的强度也在减弱。主要分布在偏关县、河曲县、繁峙县和代县等区域(图 3)。利用区域内 10 个气象点 4 a 的 ≥ 5 m/s 风速的统计结果和累积时间, 分别计算了 4 a 每个站点的侵蚀风力指数。由侵蚀风力指数与土壤风蚀模数之间的散点图分析可知, 晋北沙漠化地区的风蚀模数与侵蚀风力指数之间具有很好的线性相关性 ($R^2 = 0.908$), 进一步说明风速变化是晋北沙漠化地区土壤风蚀强度波动变化的主要原因。统计分析发现, 整个晋北沙漠化地区 2005, 2010 和 2014 年的侵蚀风力指数分别为 3 968, 4 282 和 2 654, 均小于 2001 年的侵蚀风力指数 5 366。因此, 风速减弱是晋北沙漠化地区土壤风蚀强度削弱的主要原因。

2.3.2 植被覆盖因素 风力变化并不是土壤风蚀强度变化的唯一原因。本文进一步分析了 2001, 2005, 2010 和 2014 年的植被覆盖度的空间分布。研究发现, 不同年份植被覆盖的空间分布与相应年土壤风蚀模数的空间分布基本一致。植被覆盖度较高的区域, 土壤风蚀模数则较低。

相反, 植被覆盖度较低的区域, 土壤风蚀模数则较高。2005, 2010 和 2014 年这 3 a 的植被覆盖度均比 2001 年的植被覆盖度高。植被覆盖度的提高对土壤

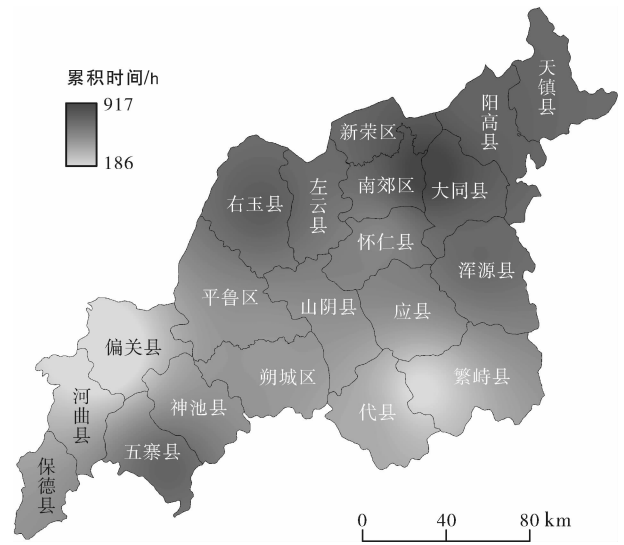


图 3 研究区 4 a 平均风速 ≥ 5 m/s 累积时间分布

风蚀有削弱的作用。因此, 晋北沙漠化地区植被覆盖度提高和风力减弱是区域土壤风蚀削弱的主要原因。

2.3.3 风速变化和植被覆盖变化对土壤风蚀防治效果的贡献 为了定量评价风力作用和植被覆盖对缓解晋北沙漠化地区土壤风蚀的作用, 本文利用 2001 年的风速数据, 计算了在 2014 年植被覆盖度条件下的土壤风蚀量。结果表明, 晋北沙漠化地区在 2001 年风速, 2014 年的植被覆盖度条件下, 土壤风蚀总量约为 1.80×10^7 t, 比 2001 年实际土壤风蚀量减少了 2.95×10^6 t, 比 2014 年实际的土壤风蚀量增加了 1.03×10^7 t。换言之, 如果植被盖度在 2014 年的水平, 那么风力环境的改变促使区域内土壤风蚀量比 2014 年的实际土壤风蚀量减少了 1.03×10^7 t。植被覆盖度的提高促使区域土壤风蚀量比 2014 年减少了 2.95×10^6 t。

因此, 风力作用的减弱的贡献率约为 77.7%, 而植被覆盖度的提高的贡献率为 22.3%。这也说明晋北沙漠化地区植被覆盖度尚未恢复到良好的状态, 生态工程建设还需进一步实施。

3 结论

(1) 近 15 a 晋北沙漠化地区的平均风蚀模数达到 4.67 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 处于轻度风蚀。区域分布上, 晋北沙漠化地区北部区域风蚀明显高于南部。其中, 平均风蚀模数超过 10 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$) 的区域主要分布右玉县、左云县、新荣区、大同县、阳高县、浑源县和五寨县。晋北沙漠区的中部区域平均风蚀模数为 $8 \sim 10$ t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。风蚀模数较弱的区域主要分布在研究区的西部和东南部, 具体包括偏关县、河曲县、

代县和繁峙县等。

(2) 研究区 2001, 2005, 2010 和 2014 年的平均土壤风蚀模数分别为 6.83, 3.89, 4.36, 2.55 t/(hm²·a); 土壤风蚀总量分别为 2.09×10⁷ t, 1.19×10⁷ t, 1.31×10⁷ t 和 7.65×10⁶ t。

(3) 晋北沙漠化地区植被覆盖度提高和风力减弱是区域土壤风速强度削弱的主要原因。研究发现风力作用的减弱的贡献率约为 77.7%, 而植被覆盖度的提高的贡献率为 22.3%, 表明晋北沙漠化地区植被覆盖度尚未恢复到良好的状态, 生态工程建设还需进一步实施。

[参 考 文 献]

- [1] 董治宝, 李振山, 严平. 国外土壤风蚀的研究历史与特点[J]. 中国沙漠, 1995, 15(1): 100-104.
- [2] 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.
- [3] 李玉宝. 干旱半干旱区土壤风蚀评价方法[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 48-52.
- [4] 王涛, 朱震达, 赵哈林. 我国沙漠化研究的若干问题-4: 沙漠化的防治战略与途径[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 115-123.
- [5] 刘章, 杨明义, 张加琼. 黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀速率空间分布[J]. 科学通报, 2016, 61(S1): 511-517.
- [6] Woodruff S F. A wind erosion equation [J]. Soil Science Society of American Journal, 1965, 29(5): 602-608.
- [7] Fryrear D, Saleh A, Bilbro J, et al. A single event wind erosion model [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1369-1374.
- [8] Singhub G W. Texas erosion analysis model: Theory and validation [C]. Manhattan K S; Skidmoree proceedings of an international symposium/workshop, 1997.
- [9] Shao Y, Raupach M, Short D. Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling Basin (Australia) [J]. Recombinant Dna Technical Bulletin, 2007, 47(3): 323-339.
- [10] 刘纪远, 齐永青, 师华定, 等. 蒙古高原塔里亚特一锡林郭勒样带土壤风蚀速率的¹³⁷Cs 示踪分析[J]. 科学通报, 2007, 52(23): 2785-2791.
- [11] 王仁德, 邹学勇, 赵妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 640-646.
- [12] 张春来. 现代沙质荒漠化(沙漠化)动力机制若干问题研究[D]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [13] 南岭, 杜灵通, 王锐. 土壤风蚀模型研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(4): 505-509.
- [14] 王涛, 陈广庭, 赵哈林, 等. 中国北方沙漠化过程及其防治研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 507-516.
- [15] 沙占江, 马海洲, 李玲琴, 等. 基于遥感和¹³⁷Cs 方法的半干旱草原区土壤侵蚀量估算[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 589-595.
- [16] 曹晓仪, 董治宝, 李静, 等. 基于 GIS 的榆林市土壤风蚀危险度评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 206-210.
- [17] 巩国丽, 刘纪元, 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: 以内蒙古典型草原为例[J]. 地球信息科学, 2014, 16(3): 426-434.
- [18] 高尚玉, 张春来, 邹学勇, 等. 京津风沙源治理工程效益 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012.
- [19] 张伟. 基于遥感的土壤风蚀模型研究与应用: 以新疆兵团农师垦区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [20] 张亦超. 基于 GIS 的土壤风蚀模型软件设计与实现 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [21] 刘光磊. 晋北地区土地沙化致灾孕育因子时空特征及危险性评价[D]. 山西太原: 山西大学, 2014.
- [22] 薛占金, 秦作栋, 王孟本, 等. 晋北地区土地沙化现状及其成因分析[J]. 山西大学学报, 2008, 31(2): 168-172.
- [23] 马义娟, 苏志珠. 晋西北地区环境特征与土地荒漠化类型研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 124-126.
- [24] 陈巧, 陈永富. 应用高分辨率卫星影像监测退耕地植被的覆盖度[J]. 林业科学, 2006, 42(S1): 5-9.