

中国土壤风蚀速率实测研究述评

杜鹏飞^{1,2}, 刘孝盈^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048)

摘要:风蚀速率的测定是风蚀相关研究的首要问题,在对风蚀速率实测方法进行总结对比的基础上,汇总了前人对中国不同区域风蚀速率的实测研究结果。考虑到不同方法之间的可比性和近几十年来中国北方干旱、半干旱地区的风沙活动呈现出的由强到弱的显著变化,对基于同一方法研究的相近地区或相似时间尺度的土壤风蚀速率从区域和土地利用方式两个方面进行了分析。在此基础上,讨论了这些实测研究中,风蚀速率的基本特点和影响各个区域风蚀速率的基本因素。旨在加深对风蚀速率实测方法可靠性和可比性以及中国已有风蚀速率实测结果的把握与理解。

关键词:中国; 土壤风蚀; 速率; 实测; 述评

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0275-07

A Review of Measurement of Wind Erosion Rate in China

DU Peng-fei^{1,2}, LIU Xiao-ying^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China)

Abstract: Acquiring accurate wind erosion rate is primary in the researches of wind erosion. Measurement methods for wind erosion and the results on wind erosion rate monitor in different regions of China have been summarized in this paper. In view of the poor comparability among different methods and the dramatically change of multiple arid phases in arid and semiarid China over the past five decades, these results measured by using same method have been analyzed in two aspects-region and land use, under the conditions of close space-scale and similar time-scale. Finally, the basic characteristics and factors in the existed measured wind erosion rates have been discussed. This review would be greatly helpful for the choices of field measurements on wind erosion and for the comparison of results on wind erosion rate in China.

Key words: China; soil wind erosion; rate; monitor; review

土壤风蚀是干旱半干旱地区及部分半湿润地区土地沙漠化过程的首要环节^[1],是侵蚀区土地沙漠化和下风向地区沙尘暴灾害的根源^[2],也是引起土壤退化的主要途径。从国外目前已有的研究来看,在风蚀过程、机制、影响因子、评价、防治及预测预报方面,已得到普遍的重视,并取得了显著的成就。我国的风蚀研究工作也已逐步从定性研究转向半定量和定量的实验研究^[3],并在风沙地貌与沙漠化、风蚀动力学、风蚀影响因子、风蚀评估模型、土壤风蚀强度分级以及风蚀防治技术等多个领域取得了一系列的成果^[4],其中,定量研究主要集中在风洞模拟试验或某一特定时段内的野外观测,或通过遥感普查和 GIS 技术从宏观上研究风蚀的时空演变动态。由于风蚀过程不易

捕捉,风蚀速率难以测定^[5],尚缺乏长时间序列的土壤风蚀实际观测记录^[6],而作为土壤风蚀防治的科学依据,土壤风蚀速率的测定不仅是划分土壤风蚀强度的主要指标,而且也是与风蚀相关的研究领域迫切需要解决的一个关键科学问题^[4],是风蚀评价和预测预报必不可少的重要环节,对制定科学的风蚀控制计划大有裨益。在这种情况下,总结我国土壤风蚀的已有实测结果,分析不同区域、不同土地利用方式下土壤风蚀速率的分布特点和影响因素,对于我国土壤风蚀的定量评价和风蚀预报系统的建立有着重要的意义。

1 我国风蚀灾害发生的范围

迄今为止,我国共进行过三次全国土壤侵蚀遥感

普查。分别是 1989—1990 年,以 1985—1986 年的 TM 影像进行的第一次遥感普查;1999—2000 年,以 1995—1996 年的 TM 影像进行的第二次遥感普查;以及 21 世纪初,采用 2000—2001 年的 TM 影像并结合土地利用图进行的第三次遥感普查。结果显示,全国的风力侵蚀面积呈持续增长的态势,从 1985—1986 年的 187.61 万 km² 增长到 2000—2001 年的 195.70 万 km²,15 a 间共增加了 8.09 万 km²,年均增长 0.54 万 km²。强度以上风蚀面积由占风蚀总面积的 34.98% 增加到 44.32%,增加了近 10 个百分点

(表 1)。受其影响因子的约束,风蚀在空间的分布上具有很强的地带性。第三次全国土壤风蚀强度遥感调查结果表明,我国土壤风蚀灾害的范围主要分布在西部地区的新疆、内蒙古、青海、甘肃和西藏五省区^[7]。其中强度以上的侵蚀区主要分布在塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠以及柴达木盆地,中度以下的侵蚀则主要分布于上述沙漠的边缘、浑善达克沙地、科尔沁沙地、青藏高原北部、四川省北部、以及零星分布于南方的滨海滨湖风沙区^[8]。

表 1 全国三次土壤风蚀遥感调查结果对比

侵蚀强度	第一次		第二次		第三次	
	面积/万 km ²	百分比/%	面积/万 km ²	百分比/%	面积/万 km ²	百分比/%
轻度	94.11	50.16	79.00	41.36	80.89	41.33
中度	27.87	14.8	25.00	13.09	28.09	14.35
强度	23.17	12.35	25.00	13.09	25.03	12.79
极强度	16.62	8.86	27.00	14.14	26.48	13.53
剧烈	25.84	13.77	35.00	18.32	35.22	18.00
轻度及其以上	187.61	100.00	190.67	100.00	195.70	100.00
强度及其以上	55.63	34.98	87.00	45.55	86.73	44.32

2 风蚀速率的实测方法

在室内,风洞试验能够轻松实现对各风蚀因子的控制,但由于其模拟的时间短、土粒之间缺乏磨损、边界效应显著,不能完全真实再现自然状态下的风蚀过程,因而在计算实际风蚀量方面仍存在着一定的局限性^[9];遥感和 GIS 技术满足了对区域大尺度风蚀速率的快速估算,实现了风蚀研究在宏观空间尺度上的扩展,但利用该方法研究土壤风蚀,是在假定区域相同土地利用类型内,风蚀速率相同这一前提条件进行的^[10],忽略了地块尺度上,由于坡度、植被覆盖等条件的不同而引起的侵蚀变化,从而在这一空间尺度上,降低了土壤风蚀速率的计算精度;而代表着土壤风蚀科学研究水平的土壤风蚀预报模型虽已在国外取得显著的成就(如 WEQ、Pasak、Bocharov、TEAM、WEPS、RWEQ、WEAM 等),但国内相关研究由于起步晚,基础薄弱,仍然缺乏长期系统的观测和实验数据,到目前为止,还没有建立起适合我国国情的风蚀预报模型^[11]。因此,在野外实验场,通过布设相关仪器,对风沙进行实际监测,从而获得土壤风蚀起沙、输移、沉降等各个过程的观测数据,或对样品进行采集和处理后,通过一系列相应的实验,运用模型计算出土壤风蚀速率,对于模拟风蚀过程的整体动态、并实现风蚀研究从局部到整体的尺度转换仍具有十分重要的意义^[6]。目前,通过布设相关设备和样品采集分析,用来测定土壤风蚀速率的方法主要有以下几种:

插钎法。通过插钎,根据吹蚀或累积的土壤高度,估算次大风或多年的侵蚀速率或堆积速率。由于插钎容易出现沉降和外力扰动,导致这种方法的实际测定存在着一定的误差,较适用于风蚀强烈的地区。

调查法。通过野外调查相关地形和风蚀景观,如风蚀土墩、风蚀坑、建筑物基部风蚀出露状况、风沙堆积物形态和尺寸、雅丹地貌的深度和高度等,估算土壤风蚀速率。这种方法较为粗略,很难用来估算短时间的中轻度风蚀,对单次风蚀剧烈或中长时间尺度的强度风蚀较为适用。

扫描法。使用三维激光扫描仪、粒子图像测速仪等仪器,利用摄像技术,对地表进行扫描,通过对地表高程变化的实际测量实现对土壤风蚀情况的监测。这种方法可以基本实现对数据的自动采集和处理,可以用来研究风蚀引起的地貌演化特征及风沙流的规律,但鉴于仪器的分辨率,对中轻度的土壤风蚀速率计算时会存在着较大的误差。

风蚀盘法。通过在盘状容器中放置已知质量的土样测定土壤风蚀量。由于这种方法已知土壤风蚀面积,所以容易得出侵蚀量和侵蚀速率的关系。但受容器材质的影响,导致盘中土壤与自然状态下的环境土壤被隔离,很难形成通气透水的自然环境,盘中土样的水分蒸发较快,使得影响风蚀的因子发生变化,会导致风蚀测定量比实际侵蚀量大。因此,这种方法比较适合于监测单个风蚀事件中的风蚀量。

集沙仪法。按排气方式的不同,集沙仪分为主动

式和被动式两种。由于被动式集沙仪易于制作且使用方便,所以使用较广。按旋转与否,集沙仪分为旋转式和固定式两种。旋转式集沙仪会随着风向的变化而自动调整方向,可收集多个方向、任意角度的输沙通量,但不能确定来沙面积,无法推知区域单位面积上的风蚀量。相比而言,固定式集沙仪虽然只能收集某一方向的输沙量,但通过在上下风向的合理布设,可以明确特定区域面积的风蚀量。集沙仪可对风蚀实现任一时间尺度的观测,观测时间越长,成本越高。在明确集沙效率的前提下,可以获得较为准确的风蚀速率数据。

集沙盘法(沉尘缸法)。通过在风蚀区布设集沙盘,来监测单位面积土壤的沉积量。当集沙盘全部布设于地表以下时,可“诱捕”土壤吹蚀过程中的蠕移量和沉降量,当集沙盘布设于地表以上时,收集的只是大气输移过程中的浮尘沉降量。由于大气中的浮尘来源具有不确定性,因此用这种方法很难确定单位土地面积上的土壤风蚀量。

粒度对比分析法。该方法通过确定风蚀粗化层的厚度、土体容重和风蚀前后粗化层下部及粗化层中不可蚀颗粒的百分含量,实现对土壤风蚀量的估算。利用该方法时基于以下三个假设条件^[12]:①在地表物质的粒配组成中,既含有可蚀颗粒,又含有不可蚀颗粒;②未经风蚀时,物质的粒配组成在计算所涉及深度内的垂向变化是可以忽略的;③与风蚀过程相比,引起地表粒配变化的其它因子忽略不计。由于该方法没有考虑流水侵蚀和冻融侵蚀,使得该方法不能在风水复合侵蚀区和青藏高原区进行有效的利用,而粗化层深度和不可蚀颗粒的界定标准尚未统一,也在一定程度上影响了该方法的推广。

核素示踪法。利用在水蚀研究方面已逐渐成熟的¹³⁷Cs核素示踪技术,通过确定区域的¹³⁷Cs背景值,利用相关模型可间接计算出中等时间尺度上(近50~60 a来)的平均土壤风蚀速率。应用¹³⁷Cs核素示踪法,需要在研究区或附近找到一个既未发生过侵蚀,也未发生过堆积,且未被扰动过的背景值采样点,这在很多地区难以实现。此外,利用该方法得到的是风水复合侵蚀速率,很难从中甄别出具体的风蚀速率,因此在风蚀研究应用上具有一定的局限性,但利用该方法得出的计算结果,由于无须考虑风沙活动的时空变化特征,因而具有很好的可比性。

3 风蚀速率的实测结果与分析

综合已发表的有关中国土壤风蚀速率实测研究的相关文献,在测定地点、测定方法、气候类型、土地利用类型等方面对这些文献进行总结归纳,得出我国

若干地区年度平均土壤风蚀速率实测值,具体结果如表2所示。

除表2中列出的基于较长时间尺度计算得出的年度平均土壤风蚀速率研究,还有一些学者在不同地点对从次大风到几个月不等的较短时间尺度上的土壤风蚀速率进行了测定。如:李忠辉等^[33]采用粒度对比分析法和风蚀盘法,对内蒙古武川县旱农试验站一个东西走向的丘陵进行了研究,发现坡顶风蚀量最大,北坡次之,南坡最小;孙兴邦等^[34]通过布设集沙仪,对山西省右玉县的风沙量进行了监测,得出了3 a的集沙量,距地面0,0.5,1.5,4,8 m五个不同高度收集的沙量分别为112.9,11.7,1.7,0.8,0.7 g;海春兴^[35]采用土壤表面形态变化测量仪,用7级风的强度对河北坝上不同土地利用类型的土壤进行了吹蚀,发现草地、林地、耕地和交通用地的吹蚀深度分别为1.51,1.61,13.82,38 mm;樊自立^[36]对阿克苏农垦三团场三连二斗东条田的风蚀情况进行了监测,发现1977年4月14日—21日连续几次大风刮走的表土达16 cm之厚;冯晓静等^[37]在内蒙古正蓝旗,利用集沙仪,对小麦秸秆残茬覆盖保护性耕作农田和传统翻耕耙碎农田进行了监测,监测结果显示,小麦秸秆残茬覆盖保护性耕作农田中的集沙量远低于传统翻耕耙碎农田的集沙量等。但这些研究没有得出单位面积地块具体的土壤风蚀量,从而无法计算出准确的土壤风蚀速率。还有一些学者,通过对一定面积上的土壤风蚀进行短时间的观测,得出了基于这一时间尺度的土壤风蚀速率,具体研究结果见表3。

由表2—3可见,我国已有土壤风蚀速率的实测研究主要分布在半干旱区,总体上涵盖了干旱、半干旱、半湿润三个主要气候类型区。具体集中在内蒙古地区、西北的青藏高原和新疆地区、东北的松辽流域、华北半湿润区、海南滨海以及位于风力水力交错侵蚀区内的其它地区。测定方法除了插钎法、陷阱诱捕法、集沙仪法等传统方法以外,刚刚在风蚀研究领域兴起的¹³⁷Cs法逐渐成为近10 a风蚀速率研究的主要方法。

各种测定方法在风蚀量的测定和风蚀速率的计算上各有优势,但具体到每一种测定方法,其测定结果的精准性难以得到有效地厘定。即使对同一区域的土壤风蚀速率进行研究,采用不同的方法,也可能得出相异的结果,对这些结果的横向比较也难以得到有效的确定。而由于风沙环境的演变和春季降水量的波动制约,最近50 a来,中国北方干旱、半干旱地区的风沙活动呈现出由强烈到减弱的显著变化,20世纪80年代以来,部分地区的输沙能力仅为1960s—1970s的20%~50%^[43-45]。因此,在不同时间测定的

风蚀速率也很难进行纵向的比较。基于以上两点考虑,本文只对表 2 中所列的基于同一方法研究的相近地区、相似时间尺度的土壤风蚀速率,从区域和土地利用方式两个方面进行分析。

表 2 年度平均土壤风蚀速率结果及测定方法

测定地点	测定方法	气候类型	土地利用类型	风蚀厚度/ (mm·a ⁻¹)	风蚀速率/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	参考文献
内蒙古呼伦贝尔	插钎法	半湿润	沙地	10.40	156.00	马玉堂 ^[13]
内蒙古奈曼旗	插钎法	半干旱	留茬农田	3.00~18.00	43.50~261.10	徐斌等 ^[14]
			新垦农田	32.00~271.00	464.20~3931.50	
内蒙古科尔沁	插钎法	半干旱	开垦沙地	11.60~23.30	174.00~349.50	赵羽等 ^[15]
内蒙古乌兰察布后山地区	插钎法	半干旱	伏沙带	37.50	562.50	林儒耕 ^[16]
山东夏津	插钎法	半湿润	沙地	1.00~2.00	15.00~30.00	赵存玉 ^[17]
			河滩地	9.25	138.75	
北京永定 河沙地	插钎法	半湿润	稀疏荒草地	5.95	89.25	岳德鹏等 ^[18]
			荒草地	1.05	15.75	
			农田	1.70	25.50	
山西省右玉县	插钎法	干旱	农田	10.65	159.75	李建华 ^[19]
			林地	1.00	15.00	
内蒙古多伦县	插钎法、 Cravailovic 风蚀方程	干旱	沙地	0.34	5.15	姚洪林等 ^[20]
			林地	0.002	0.03	
			农田	0.16	2.32	
内蒙古武川县	粒度对比分析	半干旱	农田	3.00	45.00	朱震达等 ^[21]
内蒙古四子王旗	粒度对比分析/插钎	半干旱	农田	2.31	34.65	李晓丽等 ^[22]
内蒙古后山地 区(商都、化德) 新疆罗布泊	粒度对比分析 风蚀遗迹 风蚀遗迹	半干旱	农田	0.96~2.74	14.40~41.10	董治宝等 ^[12] Hedin ^[23]
			雅丹	30.00~100.00	450.00~1500.00	
		干旱	雅丹	4.00	60.00	
青藏高原	¹³⁷ Cs 法	半干旱	灌丛	5.68	84.14	Yan 等 ^[24]
			沙地	4.31	69.43	
			草地	1.80~2.16	22.62~22.69	
			农田	2.40	30.68	
青海共和盆地	¹³⁷ Cs 法	半干旱	沙地	1.51~2.67	3.10~55.18	严平等 ^[25]
			草地	0.24~0.91	3.18~16.86	
			农田	0.34~0.64	11.79~22.36	
西藏	¹³⁷ Cs 法	半干旱	草地	—	33.03~45.85	Zhang 等 ^[26]
			农田	—	51.33	
新疆库尔勒	¹³⁷ Cs 法	半干旱	荒地	2.64~4.14	39.54~62.08	濮励杰等 ^[27]
			草地	1.34~3.36	20.08~50.39	
			农田	0.57~3.82	8.60~57.31	
海南岛滨海地区	¹³⁷ Cs 法	半干旱	沙地	12.50(年风积厚度)	187.50	张素红等 ^[28]
河北丰宁	¹³⁷ Cs 法	半干旱	草地	1.84~2.90	27.6~43.5	赵烨等 ^[29]
河北丰宁	¹³⁷ Cs 法	半干旱	林地	12(年风积厚度)	—	Chen 等 ^[30]
河北康保	¹³⁷ Cs 法	半干旱	农田	5.50	89.50	Zhang 等 ^[31]
晋陕蒙接壤地区	集沙仪	半干旱	沙地	0.15~2.91	2.30—43.60	刘连友 ^[32]

表 3 不同时段内的土壤风蚀速率结果及测定方法

测定地点	测定方法	气候类型	土地利用类型	风蚀厚度	风蚀速率	参考文献
内蒙古科尔沁	陷阱诱捕法	半干旱	沙地	—	0.23 t/(hm ² ·d)	Li 等 ^[38]
内蒙古科尔沁	陷阱诱捕法	半干旱	沙地	—	0.67~31.2 t/(hm ² ·d)1	Li 等 ^[39]
山西	陷阱诱捕法	半湿润	农田	—	8 小时 29.7 t/hm ²	Cai 等 ^[40]
内蒙古锡林郭勒	调查法/粒度分析法	半干旱	农田	两个月 30 mm	两个月 323~340 t/hm ²	Hoffmann 等 ^[41]
内蒙古科尔沁	集沙仪法	半干旱	新垦农田	—	0.26 t/(hm ² ·h)	张华等 ^[42]
			翻耕农田	—	0.16 t/(hm ² ·h)	
			免耕农田	—	0.03 t/(hm ² ·h)	
			未垦草地	—	0.02 t/(hm ² ·h)	

3.1 不同区域土壤风蚀速率的变化分析

内蒙古是我国研究风蚀速率研究最为集中的地区,从表2可见,对内蒙古风蚀速率实测研究的主要方法是插钎法和粒度对比分析法,实测结果在 $0.03 \sim 3\,931.50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,随着土地利用类型的不同而有明显的不同,变化幅度极大。根据水利部土壤风蚀强度分级标准^[46],位于内蒙古中部的多伦县、武川县、四子王旗,以及商都、化德地区的土壤风蚀强度均在中度以下,而20世纪90年代中期以前研究的同在中部的乌兰察布后山地区,以及位于内蒙古东部的呼伦贝尔、奈曼旗、科尔沁的农田和沙地的风蚀强度均达到了剧烈的标准。

同样用插钎法研究的山东夏津、北京永定河和山西右玉县的风蚀速率也存在一定的差别。同在上世纪90年代初测定的位于夏津的沙地和右玉县的林地风蚀强度相当,均为中度侵蚀,远小于右玉县农田的风蚀速率。一方面,这些结果从区域上反映了不同气候类型对风蚀的重要影响,另一方面,也在区域内部揭示了由土地利用方式的不同而引起的土壤风蚀量的差异。

基于¹³⁷Cs法计算的半干旱地区近50a以来的平均土壤风蚀速率显示,海南滨海区风蚀强度最高,年均风积厚度达到了12.50 mm,与河北坝上地区的林地(12 mm)相当。西北地区中,新疆、青海、西藏地区的风蚀速率实测值,除灌丛和沙地的个别点外,多集中在 $10 \sim 60 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,与河北坝上丰宁的草地 $27.6 \sim 43.5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 相当。集沙仪法测定的晋陕蒙接壤地区的沙地,风蚀速率在 $2.30 \sim 43.60 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,属于轻、中度侵蚀。此外,用粒度对比分析法对内蒙古中部地区农田的研究结果显示,随着研究时间的后移,风蚀速率呈减小的趋势,这可能也是对20世纪80年代以来这一地区风力输沙能力逐渐降低的一种响应。

对于较短时段内风蚀速率实测研究,表3表明,对内蒙古科尔沁的沙地、农田和草地的研究较多,由于沙地类型不同,风蚀速率相差也较大。受这些研究所选择的时段和具体的观测时间所限,研究结果间不具可比性。但值得注意的是,对山西半湿润区和内蒙古半干旱区农田的研究均表明,风蚀强度均较大,尤其是对锡林郭勒的研究,短短两个月间,每公顷农田土壤的风蚀量就达到了323 t,远远超过了年均土壤风蚀的剧烈标准。

3.2 不同土地利用方式下土壤风蚀速率的变化分析

土地利用方式不同,土壤特性以及土壤对外界环境变化的抵抗力也会不同^[47],影响土壤风蚀的主要

因子就会存在着一定的差别,从而引起土壤风蚀速率的变化。已有研究中,主要对农田、沙地、草地、灌丛和林地五种土地利用方式下的土壤风蚀速率进行了实测和计算,从结果来看,土壤风蚀速率随土地利用方式的不同而显著不同。内蒙古奈曼旗新垦农田的土壤风蚀速率最大,为 $464.20 \sim 3\,931.50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,多伦县林地的土壤风蚀速率最小,仅为 $0.03 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。在同用插钎法对同一地区不同土地利用方式下的风蚀研究中,稀疏荒草地的侵蚀速率大于荒草地(永定河)、农田的侵蚀速率大于林地(右玉县),而在农田中,新垦农田的侵蚀速率则又远大于留茬农田(奈曼旗),这些结果都突出地体现了植被覆盖度在抵抗风蚀过程中的重要作用。

由表2可见,在河北坝上地区,用¹³⁷Cs法计算的农田土壤风蚀速率几乎是草地的两倍。而在西北地区,不同土地利用方式下的土壤风蚀速率相差远没有其它地区悬殊。以新疆库尔勒地区为例,荒地、草地和农田的风蚀速率相近,最大值都在 $50 \sim 60 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 左右,农田风蚀速率的最小值甚至低于荒地和草地。在对青海共和盆地和青藏高原的研究中,草地和农田的风蚀速率结果也基本相同,灌丛和沙地的风蚀速率则较大,达到剧烈侵蚀标准。

3.3 影响我国土壤风蚀速率特点的因素分析

土壤风蚀作为一个复杂的风沙物理过程,是在特定环境条件下,自然、人为因素及其相互作用的综合表现。在大尺度上,气候格局决定了土壤风蚀的范围和程度,在地形、土壤类型、土地利用方式等因素的综合影响下,侵蚀强度又因土壤风蚀发生的方式和过程的不同而有所不同。

总体来看,达到强度标准以上的侵蚀区降雨几乎都在200 mm年降雨量线以下。在上述风蚀研究区中,内蒙古的土壤风蚀量最大,除农业土壤外,风沙土和沙质土壤等非农业土壤也受到强烈侵蚀。究其原因,除了与内蒙古的高原地形有关外,稀疏低矮的植被,在冬春大风季节,也未起到很好的保护作用,强烈的风蚀在很大程度上抵消了成土作用,致使土层浅薄,而降雨少、风速大、大风日数多等气候条件的影响则进一步加速了土壤风蚀过程,加剧了土壤风蚀程度;西北地区中,研究区库尔勒位于天山南麓、塔里木盆地东北部,深处大陆腹地,暖温带荒漠性气候决定了其降雨量少、大风日数多的基本特点,冬春季节的强风易于引起表土的风蚀,其中,草地土壤风蚀量之所以与农田相当,主要是由于研究样点位于农区的边缘,且与戈壁相连,盛行风向引起严重的侵蚀所致。与库尔勒有所不同,根据严平的研究结果,在青藏高

原,沙地和灌丛的风蚀灾害严重,草地和农田的风蚀量略小,危害稍轻。在此过程中,植被覆盖起了关键作用;风水交错侵蚀区,分布范围虽广,但作物一年一熟的共同特点,却为春季风蚀灾害的发生提供了条件,不仅农田风蚀相当严重,而且由于在冬春季节,多数林木落叶、草地枯黄,防护作用差,致使林草地的风蚀危害不容小觑;而华北半湿润区的土壤风蚀则主要受土地利用类型的影响,在覆盖度较低的河滩地和稀疏荒草地,风蚀程度比覆盖度相对较好的荒草地大;东北地区中,松辽流域地处温带、寒温带大陆季风气候区,由于草甸草原、落叶林区、针阔混交林的广泛存在,遏制了风蚀灾害的进一步发展,因此,风蚀灾害相对较轻。总之,土壤风蚀强度的空间格局不仅与研究区的风力强度、降水量等气候因子有关,还受土壤质地、植被覆盖度以及土地利用方式的影响。

4 结论

纵观国内已有的相关研究可以发现,我国所开展的土壤风蚀速率实测研究已取得了一系列重要成果。研究结果表明,在区域尺度上,内蒙古东部的土壤风蚀最为严重,次之为海南滨海地区,再次为内蒙古中部、西北、华北和北方的风水交错侵蚀区,风蚀最轻的为东北地区。由于抗风蚀能力不同,缺少覆盖的农田土壤更易于受到近地表气流的动量传输而引起侵蚀。

土地利用类型不同,土壤风蚀速率也存在着一定的差异,但因研究地区不同,规律也有所不同。在内蒙古和其它中东部地区,土壤风蚀量基本呈现出按农田、沙地、草地、林地依次减小的规律。在西北地区中,灌丛和沙地的风蚀速率较大,农田和草地的风蚀速率则相对较轻。

各种测定方法在风蚀速率的计算和风蚀量的评估上各具优势,但具体到每一种测定方法,其测定结果的精准性难以确定,长期系统的定位观测仍很缺乏。由于已有研究的实验条件不同,采用的方法不同,即使对同一区域的土壤风蚀速率进行研究,也可能得出不同的结果,因此各方法的相互印证工作需要得到进一步的研究与重视。由于 ^{137}Cs 法计算得出的结果是近 50~60 a 以来的平均土壤风蚀速率,可以方便地对不同地区或同一地区不同时段内的平均土壤风蚀速率进行比较,即便在外界条件(如土地利用方式、气候因子)发生变化的条件下,也能够得出风蚀速率的变化趋势,因此在背景值点能够确定的前提下,有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 董光荣,李长治,垒炯,等. 关于土壤风蚀风洞实验的某些结果[J]. 科学通报,1987,82(4):297-301.
- [2] 刘目兴,刘连友,孙炳彦,等. 耕作地表土块状况及其对近地表风场的影响[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(1):12-17.
- [3] 杨秀春,严平,刘连友. 土壤风蚀研究进展与评述[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(4):147-153.
- [4] 史培军. 我国土壤风蚀研究的现状与展望[R]. 第十二届国际水土保持大会邀请学术报告,2002.
- [5] 严平. 土壤风蚀的 ^{137}Cs 研究[D]. 北京:北京师范大学,2001.
- [6] 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):288-285.
- [7] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全:水土流失数据卷[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [8] 张国平,张增祥,刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. 地理学报,2011,56(2):146-158.
- [9] Cole G W. A method for determining field wind erosion rates from wind tunnel derived functions[J]. Transactions of ASAE,1984,27(1):110-116.
- [10] 张国平. 基于遥感和 GIS 的中国土壤风力侵蚀研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2002.
- [11] 廖超英,李靖,郑粉莉,等. 国外土壤风蚀预报的研究历史与动向[J]. 水土保持研究,2004,11(4):50-53.
- [12] 董治宝,陈广庭. 内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,11(2):84-90.
- [13] 马玉堂,徐兆生,姚文权. 呼伦贝尔草原土壤风蚀研究[J]. 草地学报,1981,2(3):67-74.
- [14] 徐斌,刘新民,赵学勇. 内蒙古奈曼旗中部农田土壤风蚀及其防治[J]. 水土保持学报,1993,7(2):75-80.
- [15] 赵羽,金争平,史培军,等. 内蒙古土壤侵蚀[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [16] 林儒耕. 内蒙古乌盟后山地区农田沙化现象的初步研究[J]. 内蒙古师范学院学报:自然科学版,1977,8(3):45-51.
- [17] 赵存玉. 鲁西北风沙化农田的风蚀机制、防治措施:以夏津风沙化土地为例[J]. 中国沙漠,1992,12(3):46-50.
- [18] 岳德鹏,刘永兵,臧润国,等. 北京市永定河沙地不同土地利用类型风蚀规律研究[J]. 林业科学,2005,41(4):62-66.
- [19] 李建华. 晋西北丘陵风沙区风力侵蚀规律及防治途径[J]. 中国农业科学,1991,24(5):70-76.
- [20] 姚洪林,闫德仁,李宝军,等. 多伦县风蚀地貌及风蚀量评价研究[J]. 内蒙古林业科技,2002(4):3-7.
- [21] 朱震达,刘恕. 我国北方地区的沙漠化过程及其治理区划[M]. 北京:中国林业出版社,1981.
- [22] 李晓丽,申向东,张雅静. 内蒙古阴山北部四子王旗土壤风蚀量的测试分析[J]. 干旱区地理,2006,29(2):

[1] 董光荣,李长治,垒炯,等. 关于土壤风蚀风洞实验的某

- 292-296.
- [23] Hedin S. Scientific Results of a Journey in Central Asia 1899—1902[M]. Stockholm: Lithographic Institute of the General Staff of the Swedish Army, 1905.
- [24] Yan P, Dong Z B, Dong G R, et al. Preliminary results of using ^{137}Cs to study wind erosion in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(4): 443-452.
- [25] 严平, 董光荣, 张信宝, 等. 青海共和盆地土壤风蚀的 ^{137}Cs 法研究. II: ^{137}Cs 背景值与风蚀速率测定[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 391-397.
- [26] Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Yan Ping, et al. Wind tunnel test and ^{137}Cs tracing study on wind erosion of several soils in Tibet[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(2): 269-282.
- [27] 濮励杰, 包浩生, 彭补拙, 等. ^{137}Cs 应用于我国西部风蚀地区土地退化的初步研究: 以新疆库尔勒地区为例[J]. *土壤学报*, 1998, 35(4): 441-449.
- [28] 张素红, 严平, 李森. 海南岛滨海沙地风沙活动的 ^{137}Cs 示踪初步研究[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(6): 932-935.
- [29] 赵烨, 岳建华, 徐翠华, 等. ^{137}Cs 示踪技术在滦河源区栗钙土风蚀速率估算中的应用[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 562-566.
- [30] Chen Zhifan, Zhao Ye, Qiao Jiejuan, et al. Retrospection of recent 30 year changes in the process of soil wind erosion in the Luanhe River Source Area of North China using Cesium-137[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67(10): 1785-1789.
- [31] Zhang Chunlai, Yang Shuo, Pan Xinghui, et al. Estimation of farmland soil wind erosion using RTK GPS measurements and the ^{137}Cs technique: a case study in Kangbao County, Hebei province, northern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(2): 140-148.
- [32] 刘连友. 区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究: 以晋陕蒙接壤区为例[J]. *地理学报* 1999, 54(1): 59-64.
- [33] 李忠辉, 郑大玮, 潘志华. 农牧交错带缓坡丘陵区土壤风蚀研究: 以内蒙古后山地区为例[J]. *中国水土保持*, 2004(6): 17-18.
- [34] 孙兴邦, 苗敬达, 张提. 右玉县风蚀规律的研究[J]. *水土保持通报*, 1990, 10(5): 55-62.
- [35] 海春兴. 河北坝上土地利用与土壤风蚀的动力学过程研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.
- [36] 樊自立. 塔里木河流域自然环境与自然资源的合理利用[J]. *新疆地理*, 1984, 7(4): 30-42.
- [37] 冯晓静, 高焕文, 李洪文, 等. 北方农牧交错带风蚀对农田土壤特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(5): 51-54.
- [38] Li F R, Zhao L Y, Zhang H, et al. Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin Sandy Land of eastern Inner Mongolia, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 75(2): 121-130.
- [39] Li F, Kang L, Zhang H, et al. Changes in intensity of wind erosion at different stages of degradation development in grasslands of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(4): 567-585.
- [40] Cai D X, Wang X B, Zhang Z T, et al. Conservation Tillage Systems for Spring Corn in the Semi-humid to Arid Areas of China[C] // Stott D E, Mohtar R H, Steinhardt G C. Sustaining the Global Farm. The 10th International Soil Conservation Organization Meeting, 2002: 366-370.
- [41] Hoffmann C, Funk R, Reiche M, et al. Assessment of extreme wind erosion and its impacts in Inner Mongolia[J]. *China Aeolian Research*, 2011, 3(3): 343-351.
- [42] 张华, 季媛, 苗苗. 科尔沁沙地土地利用与耕作方式对土壤风蚀的影响[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(6): 861-866.
- [43] 吴薇. 近 50 a 来科尔沁地区沙漠化土地的动态监测结果与分析[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 646-651.
- [44] 王训明, 李吉均, 董光荣, 等. 近 50 年来中国北方沙区风沙气候演变与沙漠化响应[J]. *科学通报*, 2007, 52(24): 2882-2888.
- [45] Wang Xunming, Chen Fahu, Hasi Eerdun, et al. Desertification in China: an assessment[J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 88(3/4): 188-206.
- [46] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [47] Brady N C. The Nature and Properties of Soils[M]. New York: Macmillan Publishing Co., 1990.