

平筛和旋筛测定土壤风蚀可蚀性的比较研究

王培信¹, 常春平¹, 王仁德², 李继峰¹, 杨 钦¹, 赵望龙¹, 郭中领¹

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050016; 2. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050021)

摘 要:选取河北坝上康保县境内四种地类(草地、林地、留茬地、翻耕地)74 个土壤样品,对土壤样品进行平筛、旋筛筛分,获取土壤干团聚体粒径分布。采用土壤风蚀度(EF, <0.84 mm 土壤干团聚体含量)、平均几何直径(GMD)两个干团聚体指标比较旋筛和平筛的筛分结果。通过 Mann-Whitney U 检验和相关性分析等统计学方法进行对比发现,经过平筛筛分处理后的 EF, GMD 普遍大于旋筛;同时将平筛、旋筛的筛分粒级(<0.5 mm, $0.84 \sim 0.5$ mm, $2 \sim 0.84$ mm, $5 \sim 2$ mm, $20 \sim 5$ mm, >20 mm)分别进行差异性比较分析发现,大团聚体颗粒较多的土壤样品(>0.84 mm)如草地、留茬地等出现较大差异性,在 ≤ 0.84 mm 粒级则差异性不显著,而 GMD 指标参数差异性显著。分析平筛和旋筛在土壤机械组成和土壤干团聚体指标上的差异性,揭示平筛和旋筛对于土壤可蚀性的影响,丰富土壤风蚀理论研究,为评价本地区土壤风蚀现状、制定风蚀防治措施提供理论依据。

关键词:平筛;旋筛;土壤风蚀可蚀性;平均几何直径;土壤风蚀度

中图分类号:S152.4; S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0047-05

Comparison of Flat Sieve and Rotary Sieve for Determining Soil Wind Erodibility of Different Land Uses

WANG Peixin¹, CHANG Chunping¹, WANG Rende², LI Jifeng¹,

YANG Qin¹, ZHAO Wanglong¹, GUO Zhongling¹

(1. Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China;

2. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: 74 soil samples of Kangbao County of Hebei Province including Grassland, tree windbreak, conservation tillage farmland, conventional tillage farmland were sieved by flat sieve and rotary sieve to determine geometric mean diameter (GMD) and erodible soil fraction (<0.84 mm dry soil aggregate, EF). The Mann-Whitney U Test and correlation analysis were used to investigate the differences of EF, GMD and <0.5 mm, $0.84 \sim 0.5$ mm, $2 \sim 0.84$ mm, $5 \sim 2$ mm, $20 \sim 5$ mm, >20 mm aggregates obtained from rotary sieve and those determined from flat sieve. The EF and GMD obtained from rotary sieve were lower than those obtained from the flat sieve. The results demonstrated that the difference of ≤ 0.84 mm aggregates was not significant, in contrast, the differences of >0.84 mm aggregates and GMD of total aggregates were significant. These results further indicated that sieving methods and procedures could significantly influence on determination of soil wind erodibility. The conclusion can provide the theoretical basis for planning wind erosion control measures.

Keywords: flat sieve; rotary sieve; soil erodibility; geometric mean diameter; wind-erodible fraction of soil

土壤风蚀是表层土壤在风力吹蚀及风沙流磨蚀下发生分离、搬运、沉积的动力过程,其发生与发展受地表风力强弱和土壤可蚀性的制约^[1]。土壤可蚀性的概念由 Middleton 在 1930 年水蚀研究中首次提出^[2],随后引入风蚀研究中,1942 年 Chepil 提出了

(Soil erodibility by wind) 土壤风蚀度(粒径 <0.84 mm)的概念,用来反映土壤遭受风蚀的脆弱性程度,它是土壤性质中的一个重要方面,它是评价土壤是否易受侵蚀营力破坏的性能,也是土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感性^[3]。干团聚体组成(ASD)是影响土壤可蚀

收稿日期:2017-01-06

修回日期:2017-03-06

资助项目:国家自然科学基金重点项目“土壤风蚀影响因子参数化”(41330746);国家自然科学基金青年项目“RWEQ 模型在河北坝上农田土壤风蚀估算中的应用研究”(41301291);河北省软科学项目“河北坝上农田防护林空间配置模式与建设对策研究”(13454213D);河北省普通高等学校青年拔尖人才计划(BJ2016030)

第一作者:王培信(1991—)男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事土壤风蚀研究。E-mail: wang_px@yeah.net

通信作者:郭中领(1983—)男,河北巨鹿人,博士,副教授,主要从事土壤风蚀、可持续农业研究。E-mail: gzldhr@163.com

性的重要参数,同时也是土壤风蚀模型的重要影响参数,通过对干团聚体平均几何直径(GMD)的计算可以进一步阐述出干团聚体特征从而间接量化土壤可蚀性,而土壤的机械组成是分析土壤各项指标参数,搭建模型,进行风蚀预报的先行步骤之一。

20 世纪 40 年代美国土壤学家 Chepil 进行风洞试验分析土壤风蚀与地表粗糙度、干土块结构时提出用干筛测量风力作用下土壤可蚀性的方法^[3],1952 年 Chepil 设计旋转筛分法对土壤进行旋筛处理,这种方法成为确定可蚀性颗粒含量的经典方法^[4],1982 年 Skidmore 等人使用旋转筛分法将粒度组成与风蚀度联系起来,将 >0.84 mm 的土壤颗粒称为不可蚀颗粒(NEP)而 <0.84 mm 的土壤颗粒称为可侵蚀颗粒(EP)而 $0.005 \sim 0.5$ mm 的土壤颗粒称为最容易被侵蚀的颗粒 MEP^[5],旋转筛分法在后期得到 Fryrear 的增补改进,主要是增加了马达、支架、筒筛,但基本原理没变^[6]。20 世纪中叶美国中西部大平原地区频发沙尘暴,逐步引起美国政府开始加快风蚀研究的进程,90 年代末美国农业部提出 RWEQ, WEPS 两个土壤风蚀模型,其中土壤颗粒组成数据来源同样沿用旋转筛分法进行粒度分析。旋转筛分成为确定土壤中抗蚀物含量的经典方法^[7-8]。在美国土壤协会杂志的调查显示在 1996—2000 年之间其绝大多数研究均使用旋筛筛分法进行研究^[9],随着遥感和地理信息技术的深入发展结合模型模拟在干旱半干旱地区进行应用,王牧兰等利用 GIS 方法对浑善达克沙地景观格局变化进行了研究^[10];康相武等以及敖艳红等通过对遥感影像的解译分析了 20 世纪末和 21 世纪初浑善达克沙地土地沙漠化时空演变规律^[11-12],李春兰等通过高程数据对浑善达克沙地典型区正镶白旗的荒漠化的特征分析^[13];国内有利用 RWEQ 模型结合遥感和地理信息技术的应用^[14],张国平从全国的风蚀面积的蚀积变化中通过 RWEQ 模型计算出全国风场的风力指数^[15];巩国丽等应用 RWEQ 模型分析了锡林郭勒盟防风固沙服务功能的时空变化趋势^[16];江凌等应用 RWEQ 青海省年均风蚀模数进行了估算^[17],同时和 ^{137}CS 相互印证进行修正的研究^[18-20]。而国内的风蚀研究的粒度组成分析主要利用平筛筛分法,而且在我国适用范围广泛,同时也有通过修正其方程的工作,平筛震荡机对土壤大颗粒组织的破坏,相对于旋筛的筛分方式有可能造成可蚀性颗粒的质量分数的偏差,尤其是对于不同土地利用方式的土壤。

本文通过对平筛和旋筛测定土壤干团聚体指标 GMD 和土壤可蚀性分数 EF,并对两种筛分获得的结果进行对比,探讨在不同的筛分方式对土壤干团聚体筛分结果的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

坝上高原位于内蒙古高原的东南前缘,包括康保、沽源、张北地区以及尚义、丰宁、围场县的一部分区域。本次采样区域主要位于康保县内,该地区为低山丘陵区,岗梁盆地纵列分布,是河北省唯一没有外流河的县,气候属于中温带季风气候,大陆性气候特征显著,有“十年九旱”的说法。植被属于干旱半干植被,农牧业发展对该地区的植被的破坏较为严重,年降水量较少且集中,年均降水量不足 400 mm,年蒸发量较大平均值为 1 762.7 mm,全县由北向南无霜期为 85~100 d,热量资源不足。尤其在秋冬季干旱时节,西北季风的影响下容易发生风蚀。裸露旱作农田的土壤风蚀问题仍十分突出,其主要原因是旱作农田仍是河北坝上主要的土地利用方式,且以传统的、非保护性耕作方式为主。

1.2 试验方法

通过对该地区地形环境的调查,将不同土地利用方式的林地、草地、翻耕地、留茬地的风蚀站点作为研究对象。2015 年 4—5 月份采集土壤样品,根据土壤类型选取 22 个取样点(图 1),每个取样点考虑林地、草地、翻耕地、留茬地等土地利用方式,由于部分站点某些土地利用方式缺失,共采集 74 个土壤样品。采样方式为表层土壤采样器采样,采样深度为 5 cm,土壤样品风干后分别进行平筛和旋筛的处理。

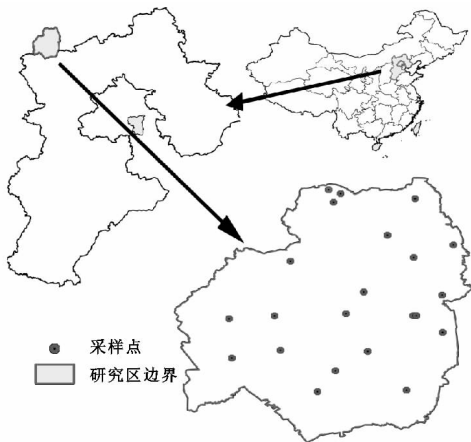


图 1 采样点示意图

旋筛分为 6 个粒级(<0.5 mm, $0.84 \sim 0.5$ mm, $2 \sim 0.84$ mm, $5 \sim 2$ mm, $20 \sim 5$ mm, >20 mm)由柱状孔筛组成,设定转速为 7 r/min,筛分时间为 30 min。平筛采用使用南京土壤仪器厂生产的 SZS 型三维振筛机对土壤样品进行干筛筛分分析。共分为 6 个粒级(<0.5 mm, $0.84 \sim 0.5$ mm, $2 \sim 0.84$ mm, $5 \sim 2$ mm, $20 \sim 5$ mm, >20 mm),筛分时间为 15 min。

1.3 计算方法

几何平均直径(GMD)的计算公式为

$$GMD=\exp \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \overline{x_i}}{\sum_{i=1}^n w_i}$$
 (1)

式中: $\overline{x_i}$ 为土壤粒级的平均直径(mm); w_i 为不同土壤粒级干团聚体占总干团聚体的比例; i 为粒级排序。为了比较旋筛和平筛筛分结果,我们使用绝对误差法进行分析。绝对误差计算方法为

$$ARE=|R_i-P_i|/R_i\times 100\%$$
 (2)

式中:ARE 为绝对误差值; R_i 为平筛干团聚体指标参数; P_i 为旋筛干团聚体指标参数。使用 Excel 2016 进行制图,利用 SPSS 10 软件对平筛和旋筛的土壤干团聚体进行 Mann-Whitney U 差异性分析、二元相关性分析。

2 结果与分析

2.1 平筛、旋筛粒度分析

对草地、林地、留茬地、翻耕地的土样样品的 EF

进行分析,按照土壤样品的筛分粒级(>20 mm,20~5 mm,5~2 mm,2~0.84 mm,0.84~0.5 mm,<0.5 mm)进行 Mann-Whitney U 检验的差异性分析,以期进一步确认平筛、旋筛测定的各粒级差异性(表 1),分析数据在 0.84 mm 处呈现出分异,平筛、旋筛在小粒级(<0.84~0.5 mm,<0.5 mm)处差异性不显著,而对于大团聚体(>0.84 mm)呈现出差异性显著现象,进一步说明平筛、旋筛在筛分过程中存在大、小粒级水平下的差异性,平筛的振荡筛分作用破坏了土壤的干团聚体组织,而旋筛的破坏性相对较小,使得一部分直径较大的土壤干团聚体得到保留,使得大粒级差异性显著,尤其在土壤干团聚体中大颗粒较多、土壤干团聚体较大的情况下更体现的明显,这进一步说明了平筛、旋筛的筛分方式存在较大分异,并且有可能影响分析结论当干团聚体中大颗粒较多的情况下,并且平筛和旋筛在不同的土地利用类型包括草地、林地、留茬地、翻耕地下均呈现出该现象。通过对 EF 指标进行差异显著性分析,发现在草地、林地、留茬地、翻耕地中 EF 差异性均不显著,符合对于小粒级差异性不显著的结论。

表 1 平筛、旋筛测定的不同地类与筛分粒级的差异分析

土地利用类型	>20 mm	20~5 mm	2~5 mm	2~0.84 mm	0.84~0.5 mm	<0.5 mm
草地	0.003	0.04	0.003	0	0.917	0.663
林地	1.21	0.08	0	0	0.924	0.411
留茬地	0	0.03	0	0	0.872	0.082
翻耕地	0	0.01	0	0	1	0.222
结论	显著,(林地不显著)	显著,(林地不显著)	显著	显著	不显著	不显著

注:显示渐进显著性,显著性为 Sig. <0.05。

2.2 土壤干团聚体指标特征分析

土壤干团聚体组成是衡量土壤可蚀性的重要参数。对 74 个土壤样品分别进行平筛、旋筛的处理后得出土壤样品粒级分布,进而通过计算得出样品的平均几何直径(GMD)、风蚀度(EF)(表 2)。通过对以上土壤干团聚体指标参数的分别进行计算,用于进一步比较基于不同筛分方式下的土壤干团聚体特征,对计算出的干团聚体指标参数进行相关性分析。

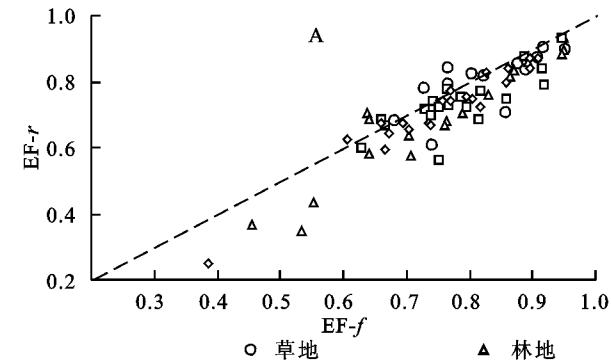
表 2 干团聚体指标统计

团聚体 指标	地类	平筛			旋筛		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
GMD	草地	2.812	0.956	1.792	1.899	1.12	1.346
	林地	6.238	1.021	1.956	4.063	1.1	1.956
	留茬地	3.654	0.854	1.933	2.614	1.05	1.562
	翻耕地	6.805	1.129	2.249	5.553	1.177	1.695
EF	草地	0.949	0.679	0.816	0.611	0.909	0.799
	林地	0.951	0.456	0.75	0.934	0.348	0.75
	留茬地	0.945	0.628	0.786	0.931	0.561	0.737
	翻耕地	0.91	0.386	0.754	0.873	0.252	0.715

图 2 和表 3 中显示,GMD 指标的平、旋筛的相关性系数为 0.863 **, $p<0.01$,呈极显著正相关性;风蚀度的平、旋筛的相关性系数为 0.91 **, $p<0.01$,呈极显著正相关。所有指标均呈现极显著正相关性,尤其风蚀度下的平筛、旋筛的相关性极为显著,一定程度上反映出平筛在替代旋筛筛分土壤的可行性,但存在相对于 1:1 线时均呈现一定程度的偏差,而 GMD 的偏差程度明显大于 EF。Lopez 在阿根廷干旱半干旱草原地区使用平筛和旋筛对 EF 进行测定分析,认为平筛可以通过拟合筛分结果替代旋筛测定 EF 值,而平筛和旋筛的 EF 值的偏差主要受到碳酸钙、有机质含量过高的影响^[21]。本文通过对土壤干团聚体指标 GMD 进行差异显著性分析,发现在草地、林地、翻耕地、留茬地中平筛和旋筛的 GMD 值均为显著性差异,显著性依次为:0.003,0.004,0,0, Sig. <0.05 差异性显著。

土壤样品共有四种不同的土地利用形式(草地、林地、留茬地、翻耕地),使用平、旋筛,两种筛分方式对不同土地利用方式的土壤样品进行筛分处理后,分

别计算出干团聚体特征指标 GMD,EF 后进行相关性分析,观察不同地类在土壤可蚀性上的差异以及其反映土壤可蚀性的敏感度,同时对其进行差异性显著性分析(Mann-Whitney *U* 检验),以期明确在土壤粒级存在差异性的情况下对于干团聚体指标的影响。表 3 中反映出 GMD 与 EF 在相关性分析中显著相关,各地类均体现出 EF 相关性优于 GMD,但其在差异显著性分析中 GMD 指标差异性显著,而 EF 差异性却不显著,这与上文提到的各粒级差异性分析中得



到的小粒级($<0.84\text{ mm}$)的差异性不显著的结论相印证,正因如此风蚀度($\leq 0.84\text{ mm}$)表现出的差异性不显著,并在各地类中均显示出该现象。

表 3 不同地类团聚体指标相关性分析

项目	翻耕地	林地	留茬地	草地	所有地类
GMD	0.929 **	0.795 **	0.561 **	0.641 *	0.863 **
EF	0.965 **	0.948 **	0.792 **	0.759 **	0.91 **

注: * 0.01 水平上显著相关、* 0.05 水平上显著相关。

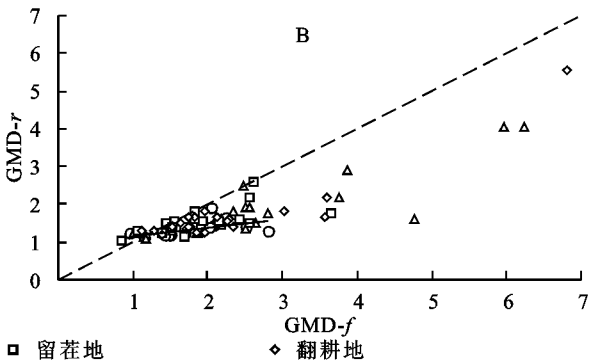


图 2 平旋、筛 GMD 相关性分析

对于不同地类(草地、林地、留茬地、翻耕地)的 GMD,EF 指标的相关性分析中发现,草地相关性最差,其次为留茬地,这是由于草地、留茬地中的原状土样里存留植物根系导致部分土壤固结,平筛振荡作用使其散碎造成相关性比较差,同时差异性显著。而翻耕地中土壤粒度分布均匀,使得在相关性分析中翻耕地相较于草地、留茬地的相关性强,呈现显著相关的情况。同时根据图 2A,2B 显示 1 : 1 线图中拟合线发生偏差,平筛值普遍大于旋筛,使得干团聚体指标(GMD,EF)偏大,其作为干团聚体指标参数,其数值越高则土壤干团聚体稳定性就越高,即对于机械破损的抗侵蚀能力越强,指标偏大的现象在风蚀研究中的差异需要注意,尤其是粒径较大、植被根须混杂的干团聚体的土壤样品的偏差更大。

实际情况中,平筛具有尺寸小,可操作性强、采购成本低等优势,使用较旋筛广泛,因此也有其应用的合理性,但是振筛的时长、筛子的直径、振筛的样品重量等会影响试验结果的细化试验标准还没有统一规

定,相比旋筛的较为完备的规格标准和试验标准而言平筛的使用中的问题依然有很多;同时也可以进一步分析平筛和旋筛的差异性,建立平筛与旋筛试验结果预测方程,尝试将平、旋筛的结果相统一。

2.3 平筛、旋筛误差分析

对比平、旋筛的误差分析见表 4,发现在平均值中发现除了林地地类大于该地区的四个地类的平均误差,其余均小于平均误差,尤其是在 1 : 1 线图中也体现出了旋筛小于平筛的现象,尤其是在土壤地类中的团聚体颗粒较大时会产生较大偏差。RWEQ, WEPS 等风蚀估算模型中 EF,GMD 是重要的输入参数。上述模型获取土壤干团聚体粒径特征的标准方法是旋筛筛分法。本研究表明使用平筛代替旋筛获取 EF,GMD 存在一定偏差,这种误差也会对 RWEQ,WEPS 等风蚀估算模型预测精度产生影响。相对于旋筛,平筛的筛分流程比较多样,这会对获取的土壤风蚀可蚀性精度产生影响。因此,需要制定一个标准的平筛筛分流程。

表 4 平、旋筛 GMD,EF 指标误差分析

土地利用 类型	绝对误差(ARE)							
	EF/%				GMD/%			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
草地	20.95	0.47	6.05	6.44	24.53	3.34	54.25	13.33
林地	53.37	1.74	15.54	14.47	27.71	0.3	65.93	16.43
留茬地	34.03	0.1	7.52	8.47	19.52	0.23	52.21	14.35
翻耕地	53.27	0.04	7.37	10.87	23.07	0.34	52.77	13.95
总计	53.37	0.04	9.13	11.05	24.53	0.23	56.29	14.58

3 结论

本文对康保县境内 74 个土壤样品为研究对象,比较平筛和旋筛的方式下的土壤风蚀度 EF、土壤干团聚体 GMD、土壤机械粒度组成特征,在研究中发现:平筛、旋筛所得出的土壤粒度组成进行 Mann-Whitney U 检验的差异性分析发现,平筛和旋筛在小粒级($<0.84 \sim 0.5 \text{ mm}$, $<0.5 \text{ mm}$)处差异性不显著,在大粒级($>20 \text{ mm}$, $20 \sim 5 \text{ mm}$, $5 \sim 2 \text{ mm}$, $2 \sim 0.84 \text{ mm}$)差异性显著,以 0.84 mm 粒级为分异界限,呈现出大粒级的土壤颗粒差异性显著,而小粒级不显著的现象。同时 $<0.84 \text{ mm}$ ($<0.84 \sim 0.5 \text{ mm}$, $<0.5 \text{ mm}$)粒级差异性不显著也是平筛与旋筛 EF 差异性不显著的原因。通过对平筛和旋筛的 GMD, EF 干团聚体指标进行二元相关性分析和 Mann-Whitney U 检验差异性分析,在平筛、旋筛团聚体指标二元相关性分析中,EF, GMD 极显著正相关;平筛和旋筛的差异显著性分析中 EF 指标差异性不显著,EF($<0.84 \text{ mm}$)差异性不显著符合粒度组成分析中的结论,而 GMD 差异性显著,同时在相关性分析的 1:1 线图中呈现出平筛 GMD 值普遍高于旋筛,由于平筛的震荡作用打散较大团聚体土壤颗粒,一定程度上影响土壤机械组成,使粒径较大的土壤颗粒被破碎后造成不可蚀性颗粒有所增多,同时 $<0.84 \text{ mm}$ 土壤粒级组成也有增加,虽未引起显著性差异,但是同样存在少量的可蚀性颗粒增加。因此,土壤粒级的变化使平筛的 EF, GMD 值高于旋筛。

土壤干团聚体指标作为描述土壤可蚀性的重要方面,土壤风蚀估算模型中的重要参数,由于平筛、旋筛而导致的差异值得注意。为了更加准确地获取土壤干团聚体粒径分布,需要制定一个标准平筛操作流程,或者构建平筛、旋筛的筛分结果的预测转化方程。

参考文献:

- [1] 董光荣,李长治,金炯,等. 关于土壤风蚀风洞试验的若干结果[J]. 科学通报,1987,32(2):297-301.
- [2] Middleton H E. Properties of soils which influence soil erosion[M]. USDA: Technical Bulletin, 1930.
- [3] Chepil W S. Measurement of wind erosiveness of soils dry sieving procedure[J]. Scientific Agriculture, 1942, 23(3):154-160.
- [4] Chepil W S. Improved rotary sieve for measuring state-stability of dry soil structure[J]. Soil Science, 1952,16(2):113-117.

- [5] Skidmore E L, Powers D H. Dry soil aggregate stability: Energy-based index[J]. Soil Science Society America Journal, 1982,46:1274-1279.
- [6] Fryrear D W. Determining soil aggregate stability with a rapid rotary sieve[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1985,40(2):231-233.
- [7] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D, et al. Revised Wind Erosion Equation [R]. Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin No. 1,1998.
- [8] Hagen L J, Wagner L E, Tatarko J. Wind Erosion Prediction System (WEPS) [R]. Wind Erosion Research Unit, USDA-ARS, Technical Documentation, 1996.
- [9] DiAz-Zorita M, Perfect E, Grove J H. Disruptive methods for assessing soil structure[J]. Soil & Tillage Research, 2002,64(1/2):3-22.
- [10] 王牧兰. 浑善达克沙地景观格局动态变化及其原因分析[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2003.
- [11] 康相武,吴绍洪,刘雪华. 浑善达克沙地土地沙漠化时空演变规律研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):1-6.
- [12] 敖艳红,裴浩,王永利,等. 浑善达克沙地遥感监测研究[J]. 中国沙漠,2010,30(1):33-39.
- [13] 李春兰,银山,包玉海,等. 基于高程的浑善达克沙地典型区正镶白旗的荒漠化特征分析[J]. 水土保持研究,2014,21(4):295-306.
- [14] 郭中领. RWEQ 模型参数修订及其在中国北方应用研究[D]. 北京:北京师范大学,2012.
- [15] 张国平. 基于遥感和 GIS 的中国土壤风力侵蚀研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2002.
- [16] 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]. 地理信息科学学报,2014,16(3):426-434.
- [17] 江凌,肖焱,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):21-33.
- [18] 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(I): ^{137}Cs 分布特征[J]. 中国沙漠,2003,23(3):62-68.
- [19] 张春来,邹学勇,董光荣,等. 干草原地区土壤 ^{137}Cs 沉积特征[J]. 科学通报,2002,47(3):221-225.
- [20] 刘纪远,齐永青,师华定,等. 蒙古高原塔里亚特—锡林郭勒样带土壤风蚀速率的 ^{137}Cs 示踪分析[J]. 科学通报,2007,52(23):2785-2791.
- [21] López M V, de Dios Herrero J M, Hevia G G, et al. Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies[J]. Geoderma, 2007, 139(3):407-411.