

准东地区土壤风蚀影响因子分析与风蚀量估算

吴芳芳^{1,2}，曹月娥²，卢刚³，杨建军^{1,2}，张婷婷^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站, 乌鲁木齐 830000)

摘要：为阐明准东地区土壤风蚀现状及影响因子，通过实地采样，结合气象、土地利用数据、DEM、遥感影像，从气候因子、地形因子、土壤因子以及植被盖度 4 个方面进行分析，利用 GIS 平台结合 WEQ 经验模型对各因子叠加计算的土壤风蚀状况进行分级，并对各侵蚀等级进行评价分析。结果表明：气候、土壤及植被盖度共同影响该区域的土壤风蚀状况。受各因子的影响，准东地区风蚀分级状况比较明显，侵蚀强度由南向北呈增强趋势，主要表现为重度侵蚀，占研究区面积的 43.02%。该区域平均侵蚀模数为 4 470.64 t/(km²·a)，风蚀量达 9 969.53 万 t。为验证模型的准确性，利用¹³⁷Cs 示踪法推算的风蚀模数与模型值进行对比，结果表明模型计算值与¹³⁷Cs 示踪法估算值间的平均相对误差 7.78%，证明该模型在研究区具有很好的适用性。

关键词：土壤风蚀影响因子；土壤侵蚀模数；土壤风蚀量；准噶尔盆地东部

中图分类号：S157.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2016)06-0056-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.010

Impact Factors of Soil Wind Erosion and Estimation of Soil Loss in Zhundong, Xinjiang

WU Fangfang^{1,2}，CAO Yuee^{1,2}，LU Gang³，YANG Jianjun^{1,2}，ZHANG Tingting^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046; 3. General Station of Soil and Water Conversation and Ecoenvironmental Monitoring of Xinjiang, Urumqi 830000)

Abstract: To clarify wind erosion condition and impact factor, based on wind erosion theories and GIS technologies, this article selected opencast mine area of east Junggar Basin (Zhundong) as the study area, took the environment conditions of the study area into consideration, used field observation data and combined with meteorological data, the land use data, DEM, and remote sensing image to analyze the influence of soil wind erosion from 4 aspects: climate, soil, landform and vegetation coverage. In addition, the paper carried out a quantitative research on 4 impact factors, and used WEQ model in the study area with impact factors to evaluate and analyze the erosion grade. The results showed that influenced by various factors, the wind erosion classification was obvious in study area, and erosion intensity showed a trend of increase from south to north. Severe erosion was the main erosion degree, accounting for 43.02% of the area. The average erosion modulus was 4 470.64 t/(km²·a), with wind erosion amount reaching 99.695 3 million tons. In order to verify the accuracy of the models, ¹³⁷Cs tracer method was used to comparatively analyze the model value. The verification results showed that the average relative error between ¹³⁷Cs tracer method and the model value was 7.78%, proving that the model in the study area had good applicability.

Keywords: soil wind erosion impact factor; soil erosion modulus; soil wind erosion amount; east Junggar Basin

土壤风蚀是一个综合的自然地理过程，它是造成干旱半干旱地区土壤退化和沙漠化的主要过程，是新疆主要的土壤侵蚀方式，根据第一次全国水利普查水土保持情况公报^[1]，新疆的风力侵蚀面积达 79.78 万 km²，占新疆国土总面积 48.35%。目前，有关风蚀影响因子研究已成为防治土壤风蚀的迫切需要。国外在风蚀因子方面的研究有较多成果，对于气候因子^[2-4]（降雨、风速、温度、湿度）、土壤因子^[5-7]（包括土壤类型、土壤可蚀性、土壤含水量、土壤有机质含量、土壤粒径等）及植被盖度因子^[8]等方面已有系统研

收稿日期：2016-05-19
资助项目：自治区自然科学基金项目“基于人工模拟降雨和¹³⁷Cs 示踪技术的新疆开发建设项目水土流失预测研究”（2014211A018）
第一作者：吴芳芳（1990—），女，河南南阳人，硕士研究生，主要从事干旱区土壤风蚀研究。E-mail:304270629@qq.com
通信作者：曹月娥（1976—），女，副教授，主要从事国土资源遥感研究。E-mail:xjdxcy@sina.com

究。其中气候是影响土壤风蚀的一个重要的自然因素,它是导致土地沙漠化过程特别是干旱多风环境下的主导因素,其中风速是影响土壤风蚀的首要因子。土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感性,也是土壤风蚀方程的重要参数,对土壤可蚀性进行研究^[9],可为 WEQ 模型提供充分的数据基础。植被能有效降低风速减少输沙率,保护地表,所以植被覆盖度的高低是风蚀危害的重要因素。

准东位于新疆准噶尔盆地东部北部风沙区,属典型的干旱大陆气候,为新疆维吾尔自治区人民政府公告的水土流失重点治理区。因此,准东可作为干旱环境下研究土壤风蚀的理想场所,开展准东煤田地区的土壤风蚀研究,对维持古尔班通古特沙漠南缘乃至整个准噶尔盆地东部的水土安全都具有重大意义。本文对准东地区的气候因子、土壤因子、植被盖度因子及地形因子进行综合分析,结合 WEQ 经验模型估算研究区的土壤风蚀量,利用研究区内¹³⁷Cs 示踪法推算的风蚀模数值对模型模拟值进行验证。并借助 Arcgis 平台进行侵蚀分级,以期为该区的土壤风蚀、水土流失防治提供一定的科学依据。

1 研究区概况

“准东”是指新疆准噶尔盆地东部从阜康市到木垒哈萨克自治县的一条狭长地带,东西长约 220 km,行政隶属于新疆昌吉州阜康市、吉木萨尔、奇台和木垒县,西起阜康市的沙丘河,东到木垒县的东部边界,北到昌吉州北部边界卡拉麦里山南麓,南接古尔班通古特沙漠北缘,属典型的干旱大陆气候。常年少雨,日照充足,热量丰富,昼夜温差大,春秋季多风,平均气温 7.0℃,多年平均降水量 183.5 mm,多年平均蒸发量 2 042.3 mm。全年主导风向为西北风,一般风力 3~5 级,多年平均风速 2.0 m/s,最大风速为 16 m/s。土地利用类型以沙地、戈壁、裸土地和裸岩石砾地为主。植被稀少,属于蒙古类型的灌木和半灌木荒漠,主要植物有盐生假木贼(*Anabasis salsa* (C. A. M.). Benth.)、蛇麻黄(*Ephedra distachya* L.)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge.)、琵琶柴(*Reaumuria songonica* (Pall)Maxim.)、常伴生少量猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、驼绒藜(*Ceratoides latens* (J. F. Gmel.) Reveal et Holmgren.)、戈壁藜(*Iljinia regelii* (Bunge) Korov.) 和霸王(*Sarcosygium xanthoxylon* Bunge.)等植物,生长十分稀疏,覆盖度约为 3%~5%。土壤以风沙土和灰棕漠土为主。

2 数据处理

2.1 数据来源

气象数据来源于研究区及周边共 13 个气象台站

(五彩湾、煤化基地、奇台、福海、富蕴、昌吉、阜康、吉木萨尔、木垒、达坂城、巴里坤、芨芨湖、恐龙沟),时间序列为 2008—2014 年,气象要素包括月平均风速、月平均降水量、月平均温度、月平均相对湿度,扬尘天气及沙尘暴天气出现日数。气象数据均来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),土地利用数据来源于第二次全国土地调查。采用的 Landsat 8/OLI 2014 年 6 月 24 日的 TM 影像,分辨率为 30 m。下载于 USGS,其轨道号分别为 141~29,142~29。查询中国土壤信息系统 1:5 数字化土壤空间数据(中科院南京土壤研究所)得到土壤类型数据。

2.2 处理方法

(1)风蚀气候因子。选用联合国粮农组织提出的风蚀气候因子指数计算公式^[10],计算准东地区的风蚀气候因子指数,计算方法为:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left[\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right] d$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)^2(1 - r_i) \quad (1)$$

式中: C 为风蚀气候因子指数(无量纲); u 为月平均风速(m/s); ETP_i 为月潜在蒸发量(mm),可用气温相对湿度公式求得^[6,11]; P_i 为月平均降水量(mm); i 为月份; d 为月天数; T_i 为月平均温度(℃); r_i 为月平均相对湿度(%)。

(2)土壤因子。于 2014 年 4 月对研究区 18 个采样点分层取样,每层深度 2 cm,共 10 层。将土样带回实验室风干后进行理化分析,土壤粒径由静水沉降法获得,然后根据国际制划分粘粒、粉粒、砂粒含量;有机碳含量利用重铬酸钾—外加热法测定。该区土壤类型包括风沙土、草甸土、灰漠土、灰棕漠土、碱土、盐土、石质土、棕钙土、漠境盐土、潮土、灌漠土等 11 种土壤类型。

土壤可蚀性指数作为通用流失方程(USLE)中的一个指标,被广泛应用于土壤侵蚀研究,但无论哪种获取 K 值的公式,均与土壤粒径、有机质含量有一定关系,这些因素与土壤风蚀关系密切。本文采用 EPIC 模型来计算土壤可蚀性指数:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[0.256 \text{SAN}(1 - \text{SIL}/100)]\} \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7 \text{SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SN1})} \right) \quad (2)$$

式中:SAN、SIL、CLA、 C 是砂粒、粉粒、粘粒和有机碳含量(%); $\text{SN1} = 1 - \text{SAN}/100$ 。 K 值单位($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 。

(3)植被盖度因子。通过 ENVI 软件计算遥感影

像的 NDVI 指数,能很好反映地表植被状况。NDVI 值越大,显示植被生长越旺盛,覆盖率越高其值越大,植被覆盖度越高^[12-14]。

(4)地形因子。采用 1 : 25 万的 DEM 数据,通过 ArcGIS 10.2 裁剪研究区域,提取 DEM 的坡度与坡长,在栅格计算器利用公式得到该区地形起伏度栅格图。地形因子 LS 计算公式为:

$$LS=(\frac{\lambda}{20})^{0.18}(\frac{\theta}{8.75})^{1.3}$$

(3)

式中: LS 为地形因子; λ 为坡长; θ 为坡度。

(5)土壤风蚀量计算模型。利用 WEQ 经验模型^[15]估算研究区的土壤风蚀量:

$$E=W\times K\times LS\times B$$

(4)

式中: E 为风力侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$; K 为可蚀性因子 $[(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^2)]$; W 为气候因子,无量纲; LS 为地形因子,无量纲; B 为植被覆盖度与作物管理因子 (kg/hm^2) 。

3 结果与分析

3.1 风蚀气候因子变化特征

根据风蚀气候因子公式计算其年内变化,从图 1 可以看出,风蚀气候因子 C 值变化范围为 2.07~30.37。最低在 2 月,最高 6 月,全年平均 14.48,从 4 月到 9 月均在平均水平以上。从季节变化来看,夏季最大, C 值平均为 24.28;春季和秋季次之,分别为 18.14 和 13.20;冬季最弱, C 值平均仅为 2.31。

影响风蚀气候侵蚀的因子主要是风速和降水,将 C 值与准东地区的平均风速及降水量进行回归分析(图 2,图 3)结果表明, C 值与风速存在显著的指数关系,随风速的增大而变大,决定系数 R^2 为 0.975。而 C 值与降水量的决定系数 R^2 仅为 0.324。说明准东地区降水对风蚀气候的影响极小,风速起主导作用,这也是干旱地区风蚀气候侵蚀力一个显著特点。

具备大于风蚀的临界风速是发生风蚀的条件之一。在其他条件一定的情况下,超过临近风速值的大风日数越多,对于表层土壤的侵蚀就越深,所以大风日数的分布与风蚀程度直接相关。由郭洪旭等^[16]于 2010 年关于古尔班通古特沙漠风沙运动规律观测的结果可知,该地的临界风速为 5.0 m/s。研究区的气象统计资料表明,该地区多年的平均风速为 3.5 m/s,4—6 月风力最强,12 月,1 月和 2 月风力最弱,其中大于 10 m/s 的平均风速为 11.5 m/s,4—6 月出现频率最高。

降水量通过增加土壤表层水分含量而达到抑制风蚀的作用,因此降水是影响土壤风蚀的一个重要的因素。根据研究区的气象统计资料,该地区降水量主要集中在 7 月,占全年的 20%。故可以推测气候侵蚀因子在 7 月降低是由于降水量增大造成的。

将各个气象站点得到的风蚀气候因子指数进行反距离权重空间插值,得到研究区内风蚀气候因子插值图(图 4(a))。

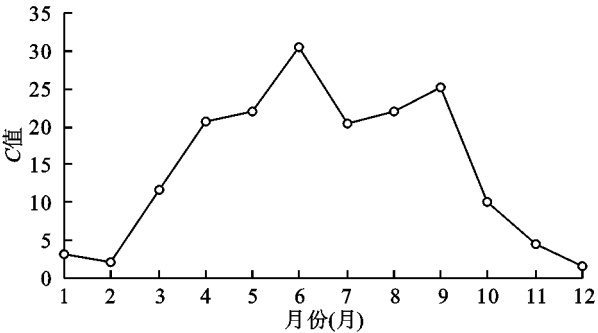


图 1 风蚀气候因子 C 值的年际变化

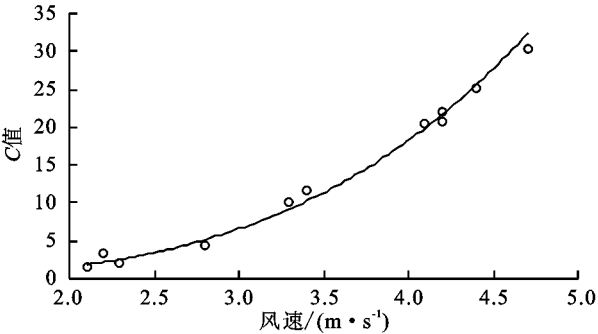


图 2 风蚀气候因子 C 值与风速的关系

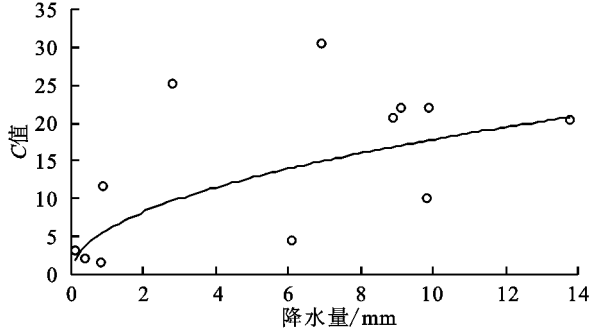


图 3 风蚀气候因子 C 值与降水量的关系

3.2 土壤因子

通过分析土壤粘粒、粉粒、砂粒的百分含量得到各类型土壤的可蚀性 K 值(表 1)表明,该区土壤可蚀性 K 值主要分布在 0.07~0.94,高值主要分布在研究区中部以及北部,植被覆盖度极低,地势平坦;低值则主要出现在南部植被覆盖度高的区域。依据土壤类型图,研究区共有 11 种土壤, K 值最大为灌漠土 0.94,最小为草甸土 0.07。基于 ArcGIS 平台,对每种土壤赋予相对应的 K 值并栅格化,得到研究区 K 值分布图 4(b)。

3.3 植被覆盖因子

植被可以固定沙丘,对沙丘的发展和变形产生很大影响,植物生长,增大地面的粗糙度,接近地面的风速减少,并阻碍气流直接对沙质地面的作用,使风的吹蚀搬运能力减弱。基于 ArcGIS 平台将 NDVI 指数重分类得到植被盖度分布图 4(c),结果显示研究

区内的植被覆盖度分布明显,且高值主要分布在研究区南部,主要为人类居住及耕作地带,且多有林带作

为防护,而中部和北部多为戈壁荒漠及裸地,植被覆盖度普遍较低。

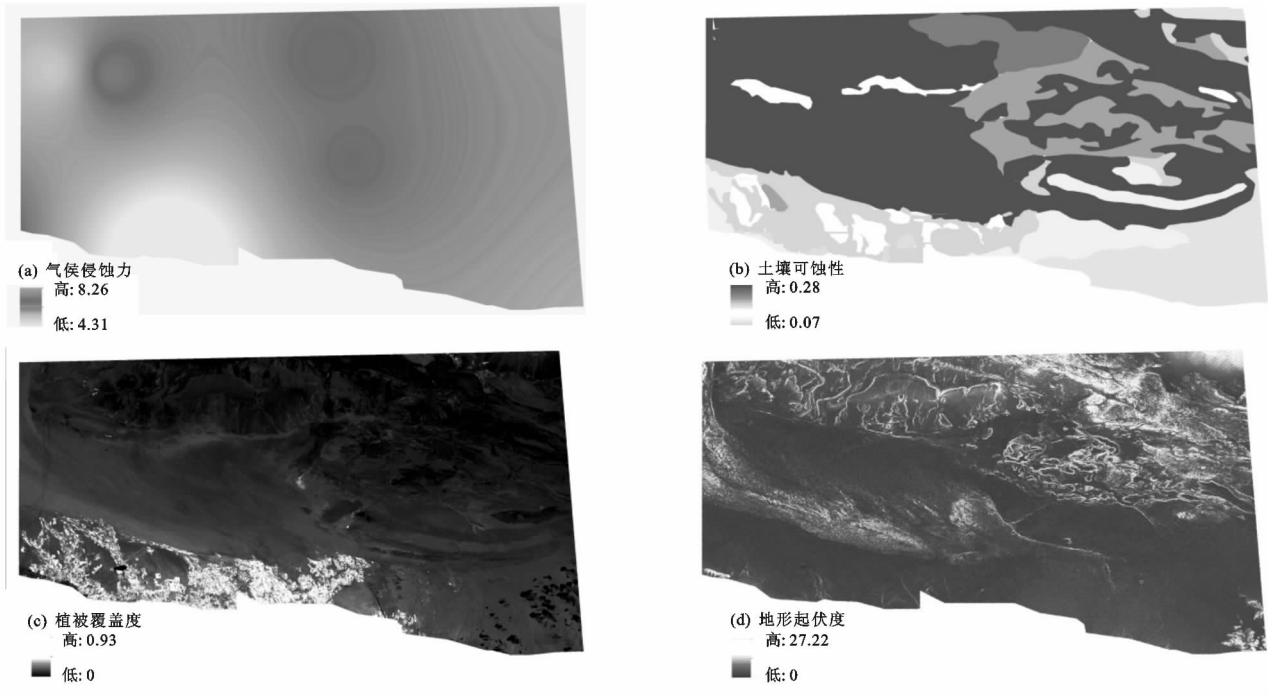


图 4 准东地区土壤风蚀因子空间分布

表 1 准东地区各类土壤可蚀性 K 值

$(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$

土壤类型	风沙土	碱土	草甸土	灰漠土	灰棕漠土	盐土	石质土	棕钙土	漠境盐土	潮土	灌漠土
K 值	0.27	0.26	0.07	0.15	0.22	0.13	0.20	0.23	0.17	0.09	0.94

3.4 地形因子

土壤风蚀多发生在北方地势平坦区域。学者们^[17-19]认为地形起伏度与土壤风蚀存在一定关系,地形可通过地表粗糙度影响土壤抗风蚀性能。地形平坦区域,地表粗糙度较小,土壤风蚀较为强烈,而在坡度较大区域,地表粗糙度增大,进而会增强土壤颗粒抗风蚀性,土壤风蚀程度减弱。通过地形起伏度(图 4(d))可以看出,整个研究区内地形起伏度较高,且差异明显,北部起伏度明显高于南部,但都位于土壤可蚀性较高区域,且植被盖度低。

3.5 土壤侵蚀量

在 Arcgis 平台下将风蚀各影响因子利用 WEQ 经验模型进行栅格计算,得到研究区土壤风蚀模数,依据水利部(SL 190—2007)《土壤侵蚀强度分级标准》将研究区侵蚀强度划分为 5 级,分别为微度、轻度、中度、重度和强度,其中微度侵蚀模数为 $<200 t/(km^2 \cdot a)$ 、轻度侵蚀模数为 $200 \sim 2500 t/(km^2 \cdot a)$ 、中度侵蚀模数为 $2500 \sim 5000 t/(km^2 \cdot a)$ 、重度侵蚀模数为 $5000 \sim 8000 t/(km^2 \cdot a)$ 、强度侵蚀模数 $>8000 t/(km^2 \cdot a)$ 。通过分类得到研究区的侵蚀等级见图 5。

从表 2 可以看出,研究区的土壤风蚀状况整体表现为重度侵蚀,平均侵蚀模数 $4470.64 t/(km^2 \cdot a)$,

占研究区面积 43.02%。

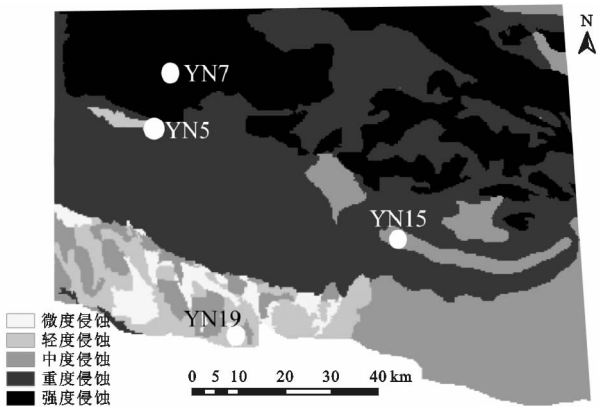


图 5 研究区土壤侵蚀等级

微度侵蚀:侵蚀模数 $114.50 \sim 200 t/(km^2 \cdot a)$,面积 $973.33 km^2$,占整个研究区的 4.36%。分布于研究区南部,主要土地利用类型为农田、林地防护带,以及研究区内的水面及滩涂。该区域植被覆盖度相对较高,土壤可蚀性较小,抗风蚀能力较强,符合该区域的实际情况。

轻度侵蚀:侵蚀模数为 $200 \sim 2500 t/(km^2 \cdot a)$,面积 $1124.20 km^2$,占整个研究区的 5.04%。主要集中于研究区南部,部分出现在中部及北部区域。该区域植被覆盖度较高,坡度高,包括村镇农田及人工绿化林,有效的降低了风蚀的发生。

中度侵蚀:侵蚀模数 2 500~5 000 t/(km² · a),面积 4 511.35 km²,占整个研究区的 20.23%。主要位于研究区南部及中部区域。该区域土地利用类型为天然牧草地,但植被覆盖度较低。在此侵蚀等级中,植被覆盖度与土壤类型对土壤风蚀起到极大作用。

重度侵蚀:侵蚀模数 5 000~8 000 t/(km² · a),面积 9 592.40 km²,占整个研究区的 43.02%,为该

研究区主要的侵蚀等级。主要集中在研究区中部,属戈壁荒漠,植被覆盖度极低,地势平坦,沙地面积大,导致风蚀侵蚀较剧烈。

强度侵蚀:侵蚀模数 8 000~10 641.23 t/(km² · a),面积 6 098.72 km²,占整个研究区的 27.35%。位于研究区北部风蚀气候因子最强烈的区域,主要土地利用类型为裸地,植被覆盖极低。

表 2 研究区土壤侵蚀分级

危险度等级	微度侵蚀	轻度侵蚀型	中度侵蚀	重度侵蚀	强度侵蚀
侵蚀模数/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	114.50~200	200~2500	2500~5000	5000~8000	8000~10641.23
面积/km ²	973.33	1124.20	4511.35	9592.40	6098.72
风蚀量/万 t	11.14~19.47	22.48~281.05	1127.84~2255.68	4796.20~7673.92	4878.98~6489.79
占总面积百分比/%	4.36	5.04	20.23	43.02	27.35

4 模型验证

为验证 WEQ 经验模型计算的土壤风蚀模数的准确性,利用研究区内¹³⁷Cs 示踪法^[20]估算的风蚀模数进行对比(表 3)。¹³⁷Cs 样品为层样,即每个点分层取样(采样点见图 5 标注),取样间隔为 2 cm,深度为 20 cm,通过样点与背景值间的¹³⁷Cs 活度含量差计算土壤侵蚀总厚度与侵蚀模数。

由表 3 可知,YN5 为半固定沙丘,无人类活动,植被盖度 5%左右,主要植被为白刺。处在侵蚀等级的中度侵蚀区域,WEQ 模型结果与¹³⁷Cs 结果相对误

差为 7.16%。样点 YN7 位处裸地,土壤类型为灰棕漠土,气候侵蚀力较强,模拟值与实测值间的相对误差为 2.93%,模型模拟值较为准确。样点 YN15 的相对误差最小,为 2.4%,该点的土地利用类型为其他草地,处在一个随时间演化而成的干湖盆内,土壤类型为灰漠土,植被覆盖度较高,模型值与实测极为接近。YN19 为光板地,无植被覆盖,土壤类型为草甸土,土壤可蚀性小。该点的模拟值与实测值间的相对误差为 18.63%。误差原因可能为该点在人类活动较少的光板地,经过一段时间会自然形成盐结皮,从而影响到遥感提取影像信息的准确性。

表 3 土壤风蚀量模拟值与实测值的对比

样点号	YN5	YN7	YN15	YN19
实测值/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	2993.42	10962.1	4392.96	197.16
模拟值/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	2778.95	10641.23	4287.73	160.43
误差值/(t · km ⁻² · a ⁻¹)	214.47	320.87	105.23	36.73
相对误差/%	7.16	2.93	2.40	18.63
备注	半固定沙丘、风沙土、植被盖度较低	裸地、灰棕漠土、无人类活动 极低	其他草地(干湖盆)、灰漠土、植被盖度相对较高	光板地、潮土,无植被覆盖。

由模拟与实测结果对比分析可知,WEQ 经验模型计算值与¹³⁷Cs 示踪法的平均相对误差为 7.78%,证明该模型在研究区具有很好的适用性。

5 结论

(1)在风蚀气候侵蚀力因子中,风速是引起风蚀的主要因素,但气候条件对风蚀的作用和影响不仅表现在风力作用上,而是风速、降水、温度和湿度综合作用的结果。受各因子的影响,准东地区风蚀分级状况比较明显,侵蚀强度由南向北呈增强趋势。

(2)风蚀强度分级及 WEQ 模型的风蚀量估算表明,研究区主要属于重度侵蚀,占研究区总面积的 43.02%。微度侵蚀和轻度侵蚀主要发生在土壤可蚀性较小且植被覆盖度较高的区域,抗风蚀能力较强;裸露地表区域、土质疏松区域、地表较平缓区域为重度及强度风蚀发生的主要区域。

(3)通过¹³⁷Cs 示踪法验证 WEQ 模型,结果表明利用 WEQ 模型在准东地区进行风蚀量估算具有较高的准确性,但未涉及其他土壤风蚀的影响因子,应更加深入的研究,以便能够更客观、更准确地分析区域土壤风蚀状况。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持,2013(10):2-3,11.

[2] 杨兴华,何清,李红军,等. 塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 中国沙漠,2012,32(4):990-995.

[3] 邹春霞,申向东,李夏子,等. 内蒙古阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):1172-1178.

[4] 祁栋林,李晓东,苏文将,等. 近 50 年青海省风蚀气候侵蚀力时空演变趋势[J]. 水土保持研究,2015,22(6):234-239.