

基于RWEQ的土壤粉砂和碳酸钙与土壤可蚀性关系研究

夏道雯, 董文明, 樊浩然

新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年11月23日; 录用日期: 2022年12月22日; 发布日期: 2022年12月30日

摘要

我国是世界上土壤侵蚀面积最大的国家之一, 因此我国学者对于土壤侵蚀进行了大量的研究。本文基于修正风蚀模型(RWEQ)对土壤粉砂含量、土壤碳酸钙含量与土壤可蚀性因子之间的关系进行研究。本文运用赋值法建立了一个由2330组数据构成的数据集, 绘制其特征图, 并对数据做相关性分析。结果表明: 1) 土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子呈正相关, 说明土壤粉砂含量越大, 土壤抗侵蚀能力越差; 2) 土壤粉砂含量越高, 土壤可蚀性因子增长速度越快, 说明土壤粉砂含量越大, 土壤抗侵蚀能力下降的就越快; 3) 土壤碳酸钙含量与土壤可蚀性因子成反比, 说明土壤中碳酸钙含量越大, 土壤抗侵蚀能力越强。通过以上结论, 本文在日后的风蚀预测上给出相应的启发。

关键词

RWEQ模型, 土壤粉砂含量, 土壤碳酸钙含量, 土壤可蚀性因子, 相关性

RWEQ Model Based Relationship between Sand Content or CaCO₃ Content and Soil Erodibility

Xiaowen Xia, Wenming Dong, Haoran Fan

Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang

Received: Nov. 23rd, 2022; accepted: Dec. 22nd, 2022; published: Dec. 30th, 2022

Abstract

Our country is one of the countries with the largest soil erosion area in the world, so the scholars

文章引用: 夏道雯, 董文明, 樊浩然. 基于 RWEQ 的土壤粉砂和碳酸钙与土壤可蚀性关系研究[J]. 水土保持, 2022, 10(4): 47-54. DOI: 10.12677/ojswc.2022.104008

in our country have done a lot of research on soil erosion. Based on the modified wind erosion model (RWEQ), the relationship between soil silt content, soil calcium carbonate content and soil erodibility factors was studied in this paper. In this paper, a data set composed of 2330 sets of data is established by the method of assignment, and its characteristic map is drawn, and the correlation analysis of the data is made. The results showed that: 1) the content of soil silty sand was positively correlated with soil erodibility factors, indicating that the higher the content of soil silty sand, the worse the soil anti-erodibility. 2) the higher the content of soil silty sand, the faster the growth rate of soil erodibility factors, indicating that the higher the content of soil silty sand, the faster the decline of soil anti-erodibility. 3) the content of soil calcium carbonate was inversely proportional to soil erodibility factors, indicating that the higher the content of soil calcium carbonate, the stronger the soil anti-erodibility. Based on the above conclusions, this paper gives the corresponding enlightenment in the future wind erosion prediction.

Keywords

RWEQ Model, Sand Content, Soil Calcium Carbonate Content, Soil Erodibility Factor, Correlation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤侵蚀是指土壤或其他地面组成物质在各种外营力作用下被剥蚀、破坏、分离、搬运和沉积的过程。土壤侵蚀这种复杂的自然地理现象不仅受降水、地形、植被等自然因素的影响，还受人类活动的影响[1]。在干旱且植被覆盖度低的地区，会发生风力大于土壤抗蚀能力的情况，土壤及其母质被风吹蚀、搬运、堆积，这种土壤侵蚀现象就被称为风力侵蚀，简称风蚀。土壤风蚀在世界土壤侵蚀中占很大比例。

我国是世界土壤侵蚀最严重的国家之一[2]，其范围遍及全国各地，其中风蚀区主要分布在东北、西北和华北的干旱和半干旱地区以及沿海沙地。我国有超过陆地总面积一半的土地受到风蚀的影响，风蚀使土地土壤肥力下降进而导致土地生产力下降，对农牧业生产造成巨大影响，其产生的悬浮物造成空气污染、引起土地荒漠化和沙尘暴，对生态环境及公共健康产生不利影响[3]。风蚀引起了国内外很多专家学者的广泛关注，同时风蚀的治理研究也成为各级政府和科学家研究的热点[4]。科学家们对风蚀地区进行研究并构建风蚀模型，旨在通过模型预测土壤风蚀情况。20世纪60年代，Woodruff等对土壤风蚀进行了大量的研究并提出了第一个具有预报意义的风蚀方程(WEQ) [5] [6] [7] [8]。WEQ是建立在风蚀力学机理与风蚀影响因子之间的关系研究成果基础上的半经验方程，仅考虑到五组风蚀影响因子即气候因子、土壤可蚀性因子、土壤粗糙度因子、田间长度和农作物残留物，适用范围有限。在20世纪末，Fryrear [9] [10] [11]等提出了修正风蚀方程(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)。RWEQ模型综合考虑了气候条件因素、植被覆盖状况因素、土壤可蚀性因素、土壤结皮因素和地表粗糙度等因素，相比于WEQ模型，其大大提升了模型的适用范围，它能在区域尺度上对土壤风蚀进行长时间序列估算进而完成风蚀预测，该模型已在很多国家和地区得到验证、修订和应用，是目前全球使用最广泛的风蚀模型之一[12] [13] [14]。本文在对土壤风蚀和RWEQ模型研究的基础上，运用RWEQ模型中土壤可蚀性因子的计算公式，结合2330组土壤数据，针对土壤粉砂含量和土壤碳酸钙含量对土壤可蚀性因子的影响问题，研究土壤粉砂含量和土壤碳酸钙含量与土壤可蚀性因子之间的关系，可为砂土、壤土、粘土的可蚀性研究提供必要的科学依据。

2. 研究方法

2.1. 数据来源及处理

本次研究采用的是赋值法研究土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子之间的关系,以及土壤中碳酸钙的含量增加对土壤可蚀性因子的影响。依据 RWEQ 模型适用的土壤范围即土壤砂粒含量为 5.5%~93.6%、土壤粉砂含量为 0.5%~69.5%、土壤黏粒含量为 5.0%~39.3%、土壤有机质含量为 0.18%~4.79%、土壤中碳酸钙含量为 0%~25.2% [15], 将每组数据的有机质含量确定为 3%, 碳酸钙含量定为 0、5%、10%、15%、20%、25%。应用 EXCEL2019 软件构建一个土壤砂粒含量为 6%~94%、土壤粉砂含量为 1%~70%、土壤黏粒含量为 5%~39%且三者含量和为 100%的所有可能整数组组合数据集, 共计 2330 个组合, 并通过 EXCEL2019 软件计算在不同土壤砂粒含量、土壤粉粒含量、土壤黏粒含量及碳酸钙含量的条件下土壤可蚀性因子。EXCEL2019 软件中土壤可蚀性因子的计算公式为

$$G3 = (29.09 + 0.31 * B3 + 0.17 * C3 + 0.33 * (B3/D3) - 2.59 * E3 - 0.95 * F3) / 100$$

其中 B3 为土壤砂粒含量、C3 为土壤粉砂含量、D3 为土壤黏粒含量、E3 为土壤有机质含量、F3 为土壤中碳酸钙含量、G3 为土壤可蚀性因子。

用 EXCEL2019 软件统计土壤可蚀性因子在不同碳酸钙含量条件下的最大值和最小值以及各个土壤可蚀性因子值段的组合数。应用 Origin2022 软件“绘图”工具中的“点线图”绘制土壤可蚀性因子与粉砂含量的关系图, 其中左轴为土壤可蚀性因子, 下轴及右轴为土壤粉砂含量, 形成不同土壤砂粒含量下土壤可蚀性因子随土壤粉砂含量变化的点线图。最后, 分析土壤可蚀性因子随粉砂含量增加的变化特征, 运用 SPSS 27.0 软件“分析”工具中的 Pearson 相关系数对土壤可蚀性因子与粉砂含量作偏相关性分析, 分析得出土壤可蚀性因子与土壤粉砂含量的相关性和显著性。

2.2. RWEQ 模型

本文采用修正风蚀模型来研究土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子之间的关系, 以及土壤中碳酸钙含量对土壤可蚀性因子的影响, 因此本文只涉及到修正风蚀模型中 Fryrear 等人建立的土壤可蚀性因子的方程。计算公式[16]如下:

$$EF = (29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33Sa/Cl - 2.59OM - 0.95CaCO_3) / 100 \quad (1)$$

式中: Sa 为土壤砂粒含量(5.50%~93.60%); Si 为土壤粉砂含量(0.50%~69.50%); Cl 为土壤黏粒含量(5.00%~39.30%); OM 为土壤有机质含量(0.32%~4.74%); CaCO₃ 为土壤中碳酸钙含量(0.00%~25.20%)。

3. 结果分析

根据表 1, 当土壤有机质含量为 3%、土壤碳酸钙含量为 0 时, 数据集中所有粒径含量整数组组合的土壤可蚀性因子均小于 0.6, 土壤可蚀性因子最小值为 0.3258, 土壤可蚀性因子最大值为 0.5683, 其中 1310 个粒径组合的土壤可蚀性因子值介于 0.4 至 0.5 期间, 占总数的 56.2%; 当土壤有机质含量为 3%、土壤碳酸钙含量为 5%时, 数据集中所有粒径含量整数组组合的土壤可蚀性因子均小于 0.6, 土壤可蚀性因子最小值为 0.2783, 土壤可蚀性因子最大值为 0.5208, 其中 1591 个粒径组合的土壤可蚀性因子介于 0.3 至 0.4 期间, 占总数的 68.3%; 当土壤有机质含量为 3%、土壤碳酸钙含量为 10%时, 数据集中所有粒径含量整数组组合的土壤可蚀性因子均小于 0.5, 土壤可蚀性因子最小值为 0.2308, 土壤可蚀性因子最大值为 0.4733, 其中 1374 个粒径组合的土壤可蚀性因子介于 0.3 至 0.4 期间, 占总数的 59.0%; 当土壤有机质含量为 3%、土壤碳酸钙含量为 15%时, 数据集中所有粒径含量整数组组合的土壤可蚀性因子均小于 0.5, 土壤可蚀性因子最小值为 0.1833, 土壤可蚀性因子最大值为 0.4258, 其中 1563 个粒径组合的土壤可蚀性因子介于 0.2

至 0.3 期间, 占总数的 67.1%; 当土壤有机质含量为 3%、土壤碳酸钙含量为 20%时, 数据集中所有粒径含量整数组合的土壤可蚀性因子均小于 0.4, 土壤可蚀性因子最小值为 0.1358, 土壤可蚀性因子最大值为 0.3783, 其中 1432 个粒径组合的土壤可蚀性因子介于 0.2 至 0.3 期间, 占总数的 61.5%; 当土壤有机质含量为 3%、土壤碳酸钙含量为 25%时, 数据集中所有粒径含量整数组合的土壤可蚀性因子均小于 0.4, 土壤可蚀性因子最小值为 0.0883, 土壤可蚀性因子最大值为 0.3308, 其中 1519 个粒径组合的土壤可蚀性因子介于 0.1 至 0.2 期间, 占总数的 65.2%。表 1 直观地体现出土壤有机质含量相同时, 土壤碳酸钙含量越高, 土壤可蚀性因子越小, 即土壤越不容易被侵蚀。

Table 1. Table of distribution of EF values with different CaCO₃ values

表 1. 不同 CaCO₃ 值时 EF 数值的分布情况表

CaCO ₃ (%)	EF max	EF min	EF∈(0.0, 0.1)		EF∈(0.1, 0.2)		EF∈(0.2, 0.3)		EF∈(0.3, 0.4)		EF∈(0.4, 0.5)		EF∈(0.5, 0.6)	
			组数	占比 (%)										
0	0.5683	0.3258					868	37.3	1310	56.2	152	6.5		
5	0.5208	0.2783				105	4.5	1591	68.3	619	26.6	15	0.6	
10	0.4733	0.2308				777	33.3	1374	59	179	7.7			
15	0.4258	0.1833			65	2.8	1563	67.1	681	29.2	21	0.9		
20	0.3783	0.1358			687	29.5	1432	61.5	211	9				
25	0.3308	0.0883	34	1.5	1519	65.2	749	32.1	28	1.2				

注: 表 1 中的 CaCO₃、EF、EFmax 和 EFmin 分别土壤中碳酸钙含量、土壤可蚀性因子、土壤可蚀性因子的最大值和土壤可蚀性因子的最小值。

3.1. 土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子关系

分析土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子特征关系时, 首先将砂粒含量值固定, 由于粉砂含量为 94%时只有一组数据无法进行土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子关系的研究, 因此本研究分别对砂粒含量从 6%~93%的数据组进行分析, 运用 Origin 2022 软件绘制出自变量为土壤粉砂含量、因变量为土壤可蚀性因子的点线图, 通过对 88 张点线图的观察, 可以明显得出土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子呈正相关的结论(图 1 为部分点线图)。由图 1 可以观察到, 当粉砂含量越高时, 土壤可蚀性因子的斜率就越大, 也就是说当粉砂含量越高时, 土壤可蚀性因子增长的就越快。这种现象在表 1 中也可看出, 当碳酸钙为 0 时, 土壤可蚀性因子在 0.5~0.6 范围内的值只占总数的 6.5%; 当碳酸钙为 5%时, 土壤可蚀性因子在 0.5~0.6 范围内的值只占总数的 0.6%; 当碳酸钙为 10%时, 土壤可蚀性因子在 0.4~0.5 范围内的值只占总数的 7.7%; 当碳酸钙为 15%时, 土壤可蚀性因子在 0.4~0.5 范围内的值只占总数的 0.9%; 当碳酸钙为 20%时, 土壤可蚀性因子在 0.3~0.4 范围内的值只占总数的 9%; 当碳酸钙为 25%时, 土壤可蚀性因子在 0.3~0.4 范围内的值只占总数的 1.2%。

3.2. 土壤可蚀性因子与粉砂含量的相关性分析

用 SPSS 27.0 分析工具中的 Pearson 相关系数对土壤可蚀性因子与粉砂含量作偏相关性分析, 控制变量为土壤砂粒含量。为了增加研究的数据量, 提高研究的可靠度, 将碳酸钙含量为 0%、5%、10%、15%、20%、25%时的数据做了相关性分析, 显著性 $P < 0.05$, 表明土壤可蚀性因子与粉砂含量具有统计学意义。根据表 2, 粉砂含量与不同碳酸钙含量下土壤可蚀性因子的 Pearson 相关系数都为 0.97, 可见粉砂含量与

土壤可蚀性因子的相关性呈现正相关，且接近于完全正相关。综上，本文认为土壤可蚀性因子与粉砂含量强相关。

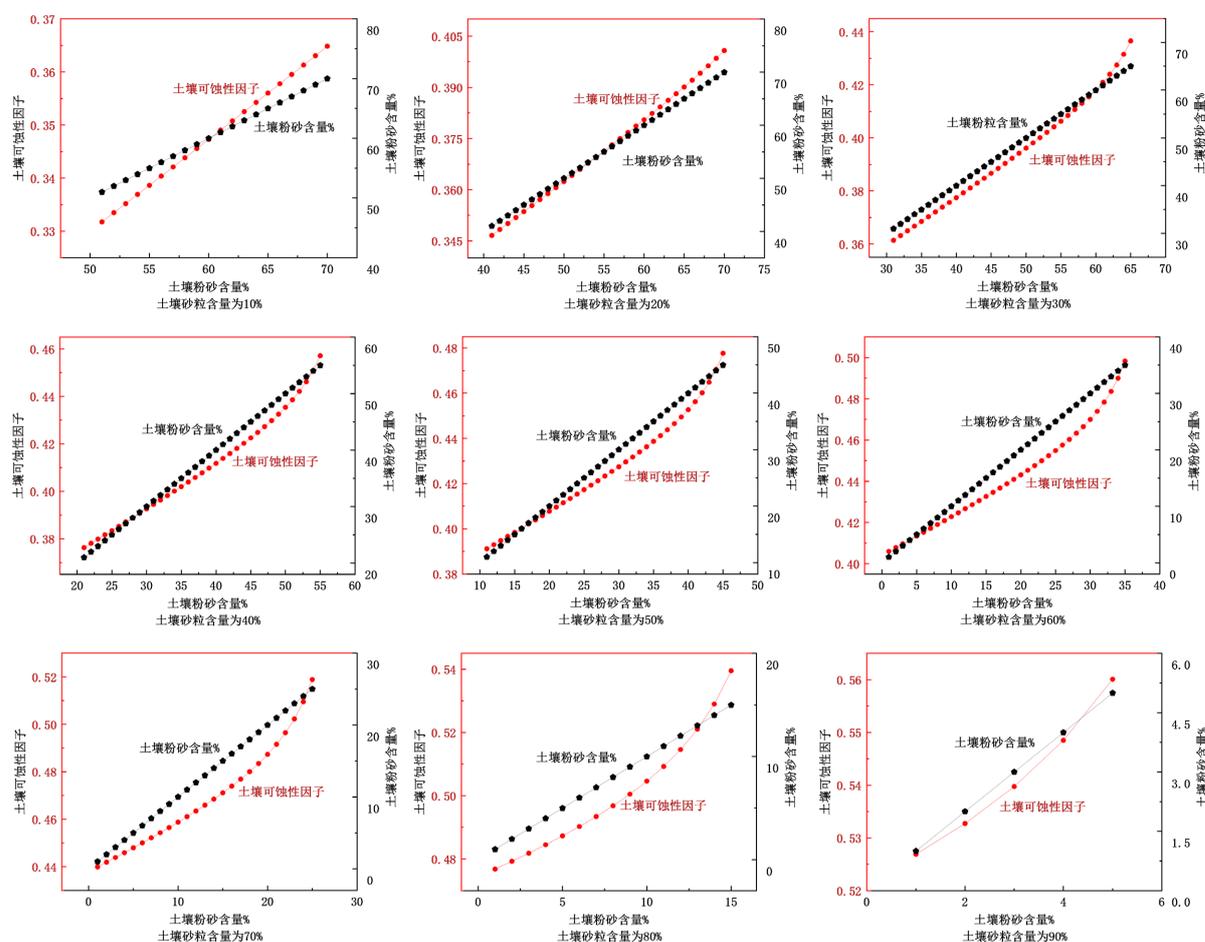


Figure 1. Characteristics of soil erodibility factors with silt content

图 1. 土壤可蚀性因子随粉砂含量变化特征

Table 2. Correlation coefficient matrix between soil silty sand (Si) content and soil erodibility factor (EF)

表 2. 土壤粉砂(Si)含量和土壤可蚀性因子(EF)间的相关系数矩阵

	Si	EF(1)	EF(2)	EF(3)	EF(4)	EF(5)	EF(6)
Si	1.000						
EF(1)	0.970	1.000					
EF(2)	0.970	1.000	1.000				
EF(3)	0.970	1.000	1.000	1.000			
EF(4)	0.970	1.000	1.000	1.000	1.000		
EF(5)	0.970	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
EF(6)	0.970	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

注：表 2 中的 EF(1)、EF(2)、EF(3)、EF(4)、EF(5)、EF(6)分别为土壤碳酸钙含量为 0%、5%、10%、15%、20%、25% 时土壤可蚀性因子值。

3.3. 土壤碳酸钙含量对土壤可蚀性因子的影响

本文运用 Origin 2022 软件绘制了土壤碳酸钙含量不同的条件下土壤可蚀性因子随粉砂含量变化特征。由图 2 可以明显的看出, 当土壤中碳酸钙含量越高时, 土壤可蚀性因子反而越低, 表明土壤可蚀性因子与土壤碳酸钙含量成反比。说明土壤中土壤碳酸钙含量越高, 土壤抗侵蚀能力越强。

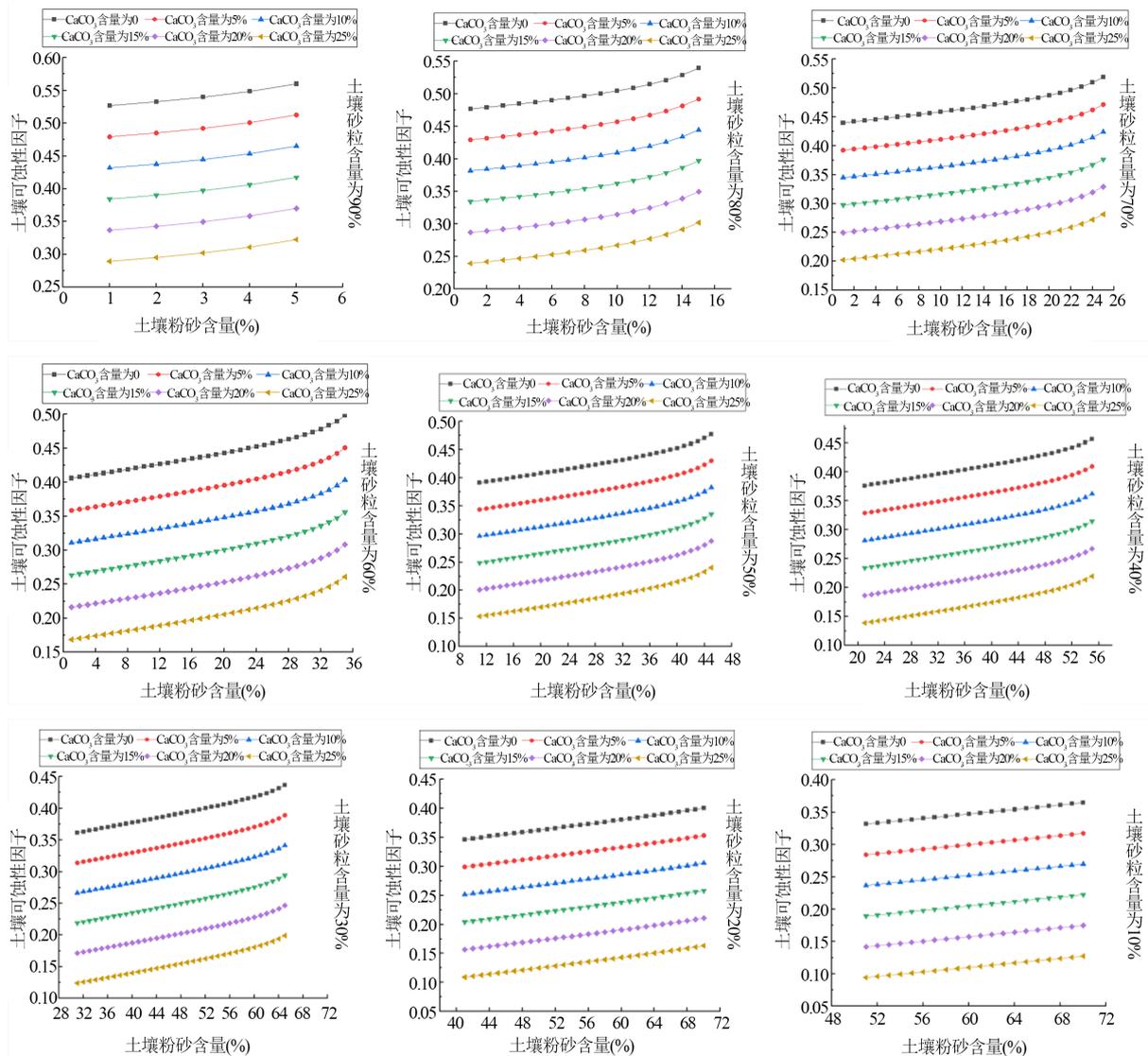


Figure 2. Characteristic map of soil erodibility factors with soil silty sand content under different calcium carbonate content
图 2. 不同碳酸钙含量条件下土壤可蚀性因子随土壤粉砂含量变化特征图

3.4. 土壤可蚀性因子与土壤碳酸钙含量的相关性分析

用 SPSS 27.0 软件分析工具中的 Pearson 相关系数对土壤可蚀性因子与土壤碳酸钙含量作双变量相关性分析。做双变量相关性分析, 显著性 $P < 0.05$, 表明土壤可蚀性因子与土壤碳酸钙含量的相关性具有统计学意义。根据表 3, 土壤可蚀性因子与土壤碳酸钙含量的 Pearson 相关系数为 -1.000 , 可见土壤可蚀性因子与土壤碳酸钙含量呈完全负相关。

Table 3. Correlation coefficient matrix between soil calcium carbonate (CaCO_3) content and soil erodibility factor (EF)
表 3. 土壤碳酸钙(CaCO_3)含量和土壤可蚀性因子(EF)间的相关系数矩阵

元素	CaCO_3	EF
CaCO_3	1.000	
EF	-1.000**	1.000

注: **0.01 水平(双侧)相关; *0.05 水平(双侧)相关。

4. 结果

1) 土壤粉砂含量与土壤可蚀性因子呈正相关, 研究表明其他条件相同, 土壤中粉砂含量越高土壤抗侵蚀能力越弱, 土壤越容易被侵蚀。在分析两种不同土壤的侵蚀情况时, 可以此为依据。

2) 其他条件一致时, 土壤粉砂含量越高土壤可蚀性因子增长速度越快, 说明当土壤粉砂含量处在较高的数值时, 土壤抗侵蚀能力下降越快。该结论在今后的水土保持和荒漠化治理中可以给出启发即我们可通过相应的措施减少土壤中粉砂的含量来提高土壤的抗侵蚀能力以解决土壤风蚀问题。

3) 土壤碳酸钙含量与土壤可蚀性因子成完全负相关, 说明土壤中碳酸钙的含量越大, 土壤可蚀性因子就越大, 土壤抗侵蚀能力就越强。在今后的荒漠化治理中, 可采取增加土壤中碳酸钙含量的方法增强土壤抗侵蚀能力。

5. 讨论

1) 土壤侵蚀按照外营力可分为很多种, 包括水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀、重力侵蚀、淋溶侵蚀、山洪侵蚀、泥石流侵蚀及土壤坍塌等。在现实生活中, 大多土壤都不仅仅受单一的外营力影响, 土壤侵蚀的结果往往是由几种不同类型的侵蚀造成, 因此, 在进行土壤侵蚀研究的时候考虑单一的侵蚀显然是不全面不充分的。目前, RWEQ 模型是包含影响因子最多的模型之一, 然而它也仅仅考虑到了气候条件因素、植被覆盖状况因素、土壤可蚀性因素、土壤结皮因素和地表粗糙度等因素, 像重力因素中的滑坡、崩塌和山剥皮等就没有在模型中体现。在今后的研究中, 可尝试对该模型做进一步的完善, 将一些特殊的地理现象考虑进去。

2) 对于模型中涉及到的植被, 不单是植被覆盖度会对土壤造成影响, 植物本身也会对土壤造成很大的影响, 土壤影响植物生长的同时, 植物的生长也会反作用与土壤, 例如有的植物在生长过程中会产生微量元素, 这些微量元素通过土壤的水盐运移等活动被释放到土壤中, 从而改变土壤中的微生物、矿物质的含量, 进而改变土壤的抗侵蚀能力。如果在今后的研究中可以把这点考虑进去那么对土壤侵蚀的预测会更加的准确。

3) 土壤侵蚀不仅仅是自然因素造成的, 还有一个非常重要且不可忽视的是人为因素。人类滥伐森林滥垦草原、无节制地抽取地下水、不经妥善处理就滥排放放射性元素以及人类的日常活动和大型工程设施的建设等都会无形之中加剧土壤侵蚀, 因此在今后的研究中除了要从土壤本身着手, 也要更全面的考虑外部因素。

4) RWEQ 模型是美国农业部开发出来用于预测农田土壤风蚀量的经验模型, 是基于美国大平原上大量野外实验得出的一种经验模型[17]。虽然我国有很多科学家通过大量的野外实验验证了该模型在中国是完全适用的, 但我们始终无法说该模型在我国是完全适用的, 如果能运用我国的大量野外实测数据, 建立一个完全贴合我国情况的模型, 那么就可以大大提高中国的土壤侵蚀预测精度, 进而为我国的农业、水利、建筑等行业的发展提供科学依据。

基金项目

新疆水土保持监督管理项目(213031003)。

参考文献

- [1] 张忠扬, 吕明侠, 王一博, 等. 基于 WaTEM/SEDEM 模型的洮河源区土壤侵蚀产沙模拟及其空间驱动力分析[J/OL]. 水土保持研究. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.047>, 2022-10-18.
- [2] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志, 2008(1): 12-16+63.
- [3] 邢丽珠, 张方敏, 邢开成, 等. 基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 111-119.
- [4] 张鹏, 尹忠东, 尚河英, 兰瑞君. 新疆卡拉贝利工程区不同地表风蚀特征[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(9): 115-122.
- [5] Chepil, W.S. and Woodruff, N.P. (1963) The Physics of Wind Erosion and Its Control. *Advances in Agronomy*, **15**, 211-302. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60400-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60400-9)
- [6] Woodruff, N.P. and Siddoway, F.H. (1965) A Wind Erosion Equation. *Soil Science Society of America Journal*, **29**, 602-608. <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900050035x>
- [7] Chepil, W.S. and Woodruff, N.P. (1954) Estimations of Wind Erodibility of Field Surfaces. *Journal of Soil and Water Conservation*, **9**, Article No. 285.
- [8] Woodruff, N.P. and Armbrust, D.V. (1968) A Monthly Climatic Factor for the Wind Erosion Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **23**, 103-104.
- [9] Fryrear, D.W., Bilbro, J.D., Saleh, A., et al. (2000) RWEQ: Improved Wind Erosion Technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, **55**, 183-189.
- [10] Fryrear, D.W., Sutherland, P.L, Davis, G., Hardee, G. and Dollar, M. (1999) Wind Erosion Estimates with RWEQ and WEQ. *Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm, 10th International Soil Conservation Organization Meeting*, Purdue University, West Lafayette, 24-29 May 1999, 760-765.
- [11] Saleh, A. and Fryrear, D.W. (1999) Soil Roughness for the Revised Wind Erosion Equation (RWEQ). *Journal of Soil and Water Conservation*, **54**, 473-476.
- [12] 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.
- [13] 邢春燕, 郭中领, 常春平, 等. RWEQ 模型在河北坝上地区的适用性[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1180-1192.
- [14] 郭茵, 雷加强, 范敬龙, 等. 近 20a 蒙古国土壤风蚀变化特征及主要影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1200-1211.
- [15] 巩国丽, 黄麟. RWEQ 模型中土壤结皮和可蚀性因子的改进和应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 271-274+280.
- [16] 张寒冰, 高阳, 崔艳智. 基于 RWEQ 模型的典型沙区风蚀治理成效研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 342-350.
- [17] 巩国丽, 刘鑫, 要玲, 等. RWEQ 模型中风因子的改进及应用[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(4): 143-148.