

陈首序,董玉祥.风蚀气候侵蚀力研究进展[J].中国沙漠,2020,40(5):65-73.

风蚀气候侵蚀力研究进展

陈首序¹,董玉祥^{1,2}

(1.中山大学 地理科学与规划学院,广东 广州 510275; 2.中山大学 新华学院资源与城乡规划系,广东 广州 510520)

摘要:风蚀气候侵蚀力是土壤风蚀方程中的气候因子,计算模型经多次修正后已基本发展成熟,广泛应用于干旱半干旱地区风蚀气候条件评估与响应机理分析及其与风沙地貌、风沙灾害的相关性研究等方面,其中风蚀气候侵蚀力对区域气候变化的响应研究是当下的热点问题。目前,风蚀气候侵蚀力研究仍存在计算模型不完善、研究区域发展不平衡、气候变化响应分析不全面、风沙地貌及风沙灾害相关性争议较多等问题。未来应进一步从构建区域校准性计算模型、计算并分析沿海地区风蚀气候侵蚀力、综合分析风蚀气候侵蚀力对气候变化的响应、建立风沙地貌及风沙灾害相关的综合性风蚀气候评价指标等方面开展风蚀气候侵蚀力的研究。

关键词:风蚀;气候;风蚀气候侵蚀力

文章编号: 1000-694X(2020)05-065-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00013

中图分类号: P404

文献标志码: A

0 引言

风蚀气候侵蚀力是评价气候风蚀能力的基本指征^[1],是土壤风蚀方程(WEQ)的基本参数^[2-3],计算模型或方法被不断改进^[4-6],并被广泛应用于各地风蚀气候侵蚀力水平的评估及其时空变化特征分析、区域气候变化响应研究、土地沙漠化评价及沙尘暴相关性分析等诸多方面^[7-11]。为进一步拓展风蚀气候侵蚀力的研究,本文将基于其计算方法发展过程及区域风蚀气候侵蚀力水平评估等主要应用方面已有研究成果的总结,概括其主要进展,并针对现有研究中存在的问题提出风蚀气候侵蚀力在未来一定时期内的主要发展方向。

1 风蚀气候侵蚀力的计算

Chepil等^[12]提出的风蚀气候侵蚀力的计算公式,经联合国粮农组织(FAO)^[5]、Skidmore^[6]改良而广泛应用于世界各地。目前风蚀气候侵蚀力的计算方法有3种。

1.1 Chepil公式

Chepil在早期研究的基础上提出了风蚀气候侵蚀力的首个计算方法^[3,12-15]。

$$C = 34.483 \frac{v^3}{(P - E)^2} \quad (1)$$

式中: C 为风蚀气候侵蚀力(无量纲);系数34.483是100除以2.9的计算结果,其中2.9为美国堪萨斯州加尔登城 $\frac{v^3}{(P - E)^2}$ 计算结果的多年平均值; v 为9.14 m高处的年均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $P - E$ 为Thornwaite提出的 $P - E$ 指数^[16]:

$$P - E = 3.16 \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i}{1.8T_i + 22} \right)^{\frac{10}{9}} \quad (2)$$

式中: $P - E$ 为 $P - E$ 指数(无量纲);系数3.16是为避免计算结果出现小数,将原公式系数0.316扩大10倍的结果; P_i 为*i*月的降水量(mm), T_i 为*i*月的气温($^{\circ}\text{C}$),*i*为月份。

在WEQ及相关的研究中多选用基于 $P - E$ 指数的计算模型,但Chepil等^[3]还提出了基于湿度指数I

收稿日期:2020-01-16; 改回日期:2020-03-25

资助项目:国家自然科学基金项目(41871006)

作者简介:陈首序(1996—),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事海岸风沙地貌研究。E-mail: chenshouxu96@foxmail.com

通信作者:董玉祥(E-mail: eesdyx@mail.sysu.edu.cn)

的风蚀气候侵蚀力计算公式。

$$C = 52.632 \frac{v^3}{(I + 60)^2} \quad (3)$$

式中: C 为风蚀气候侵蚀力(无量纲); 系数 52.632 是 100 除以 1.9 的计算结果, 其中 1.9 为美国堪萨斯州加尔登城 $\frac{v^3}{(I + 60)^2}$ 计算结果的多年平均值; v 为 9.14 m 高处的年均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); I 为 Thornwaite^[17] 提出的湿度指数。

$$I = \frac{100s - 60d}{n} \quad (4)$$

式中: I 为湿度指数(无量纲); s 为剩余水量(mm); d 为缺水量(mm); n 为需水量(mm)。

1.2 FAO 公式

1979 年, FAO^[5] 对 Chepil 公式进行了修正, 提出了适用性更强的风蚀气候侵蚀力计算方法。

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} \bar{u}^3 \left(\frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right) d \quad (5)$$

式中: C 为风蚀气候侵蚀力(无量纲); \bar{u} 为 2 m 高处的月均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ETP_i 为 i 月的潜在蒸散量(mm); P_i 为 i 月的降水量(mm); d 为 i 月天数。该公式相较于 Chepil 公式, 受水分条件影响较小, 当降水量趋于 0 mm 时, 风蚀气候侵蚀力只受风速影响; 当降水量接近蒸发量时, 风蚀气候侵蚀力趋于 0, 不发生风蚀。

1.3 Skidmore 公式

Skidmore^[6] 对 Chepil 公式进行了修正, 提出了理论基础更可靠的第 3 种风蚀气候侵蚀力计算方法。

$$CE = \rho \int_R^{\infty} \left[u^2 - \left(u_i^2 + \frac{\gamma}{\rho \alpha^2} \right) \right]^{\frac{3}{2}} f(u) du \quad (6)$$

式中: CE 为风蚀气候侵蚀能 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$), 经换算可得到风蚀气候侵蚀力; ρ 为大气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); u 为风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); R 为积分下限 ($R = u_i^2 + \frac{\gamma}{\rho \alpha^2}$); u_i 为临界风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); γ 为吸附水粘聚抗力 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$), 与土壤含水量有关; α 为常数(与 Von·Karman 常数、风速观测仪器高度、地表粗糙度参数有关); $f(u)$ 为风速概率密度函数, 一般情况下 $f(u)$ 服从于 Weibull 分布^[18], 但中国存在不服从 Weibull 分布的情况^[19]。

$$f(u) = (k/c) \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp[-(u/c)^k] \quad (7)$$

式中: c 为尺度参数 ($c = 1.12\bar{u}$, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); k 为形状参数 ($k = 0.52 + 0.23c$, 无量纲)。

2 区域风蚀气候侵蚀力水平的评估

风蚀气候侵蚀力是评估区域风蚀气候条件的重要指标, 广泛应用于美国、中国等地, 为各国风蚀研究与防治提供了重要的理论依据。

2.1 美国

美国是最早通过计算风蚀气候侵蚀力来评估区域风蚀气候条件的国家。美国农业部的科学家基于美国及加拿大南部地区^[3]、美国中西部地区^[4, 20-22]、莫哈韦沙漠和索诺兰沙漠^[23]等地风蚀气候侵蚀力的计算结果绘制了数十幅详细的风蚀气候侵蚀力分布图。结果表明, 美国大部分地区风蚀气候侵蚀力为 0.00~150.00, 个别地区处于 150.00 以上的极强水平。其中, 美国中西部大平原地区、太平洋西北部、五大湖地区以及大西洋和墨西哥湾沿岸各州的气候条件最容易发生风蚀。

2.2 中国

中国以往风蚀气候侵蚀力的研究主要在干旱半干旱地区开展, 故一般采用适用于干旱环境的 FAO 公式来进行计算。董玉祥等^[24]利用 1951—1980 年的气象数据, 计算得出中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力一般处于 10.00~100.00; 同样区域, Yang 等^[25]根据 1961—2012 年气象数据, 得出的计算结果 2.00~166.00, 但其分布格局相近。除干旱半干旱区整体的评估外, 在新疆、内蒙古、甘肃等局部地区也有相关研究开展^[26-46]。

同期, 也有对沿海福建、山东风蚀气候侵蚀力的分析研究^[47-49], 结果表明中国沿海地区的风蚀气候侵蚀力也处于较高水平。

2.3 其他国家

阿根廷潘帕斯高原半干旱区的诸多研究都表明, Chepil 公式适用于当地风蚀气候侵蚀力计算^[50-52]。潘帕斯高原半干旱区在 1961—2004 年的风蚀气候侵蚀力平均值是 92.00, 1985—2004 年为 80.00, 而 1995—2005 年则降为 14.90。可见, 同一区域的风蚀气候侵蚀力在不同时间尺度上存在较大

差别。除阿根廷外,Chepil 公式还应用于阿尔及利亚、奥地利、南非、蒙古、匈牙利等国,具体计算结果显示:阿尔及利亚艾格瓦特地区在 1990—2014 年的风蚀气候侵蚀力为 5.73~76.71^[53],奥地利马尔克菲尔德地区在 1976—1990 年的风蚀气候侵蚀力为 5.64~7.75^[54],南非在 1973—1987 年的风蚀气候侵蚀力 10.00~130.00^[55],蒙古国 2010 年风蚀气候侵蚀力是 0.10~39.50^[56],匈牙利在 1961—1990 年 3、4 月的风蚀气候侵蚀力则处于 0.00~100.00^[57]。

此外,伊朗地区的研究选用 Skidmore 公式进行风蚀气候侵蚀力计算^[58],结果显示伊朗法尔斯省的风蚀气候侵蚀力为 65.40~134.60。

3 风蚀气候侵蚀力对区域气候变化的响应

风蚀气候侵蚀力对区域气候变化的响应一直是风蚀气候侵蚀力研究的重要内容,特别是在近期全球气候变暖、旱季湿季对比愈发强烈的发展趋势下^[59-60],风蚀气候侵蚀力的时空变化特征与驱动力及其对区域气候变化的响应机理备受关注。

3.1 风蚀气候侵蚀力变化特征及其影响因素

不同时空条件下风蚀气候侵蚀力具有不同的变化特征。在美国,20 世纪 30—40 年代的“黑风暴”时期中西部大平原地区的风蚀气候侵蚀力处于极强水平(>100.00)^[61-62],而“黑风暴”过后该区域的风蚀气候侵蚀力则降至 10.00~100.00^[3,9]。整体而言,20 世纪 30—50 年代该地区的风蚀气候侵蚀力年际发展趋势不明显,而当地风蚀气候侵蚀力的季节特征表现出春季明显最强的特征^[21],这可能与春季高发的沙尘暴有关联^[9]。同样,阿根廷布宜诺斯艾利斯西南部和南非的研究也表明,春季风蚀气候侵蚀力水平在年内最高^[55,63]。在中国干旱半干旱地区,风蚀气候侵蚀力在 20 世纪 60—80 年代有过增长^[25],但 20 世纪 80 年代以来除甘肃、陕西、宁夏等地外^[37,44,64],干旱半干旱地区的其他区域以及沿海的山东省都表现为明显的下降趋势^[49,65];同期,中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力季节变化特征则整体表现为春季最强、夏季最弱、秋冬季逐渐增强^[24-25,27,64],但塔中地区^[32-34]、和田地区^[24]、甘肃敦煌雅丹地貌公园^[44]在夏季表现出最强的风蚀气候侵蚀力水平,而沿海的福建省则表现为冬季最强、春夏季较弱^[47-48]。

风速、降水量、蒸发量、干旱状况等都会影响风蚀气候侵蚀力的变化^[66-67]。20 世纪 80 年代至今,中国干旱半干旱地区年际风蚀气候侵蚀力的下降是风速、降水量、蒸发量、干旱等综合作用的结果^[24-25,68],其中风速是主要的驱动因子^[2,24,47]。风蚀气候侵蚀力的季节变化对气候变化的响应机制相比于年际变化更为复杂,影响因素不仅包括风速、降水量、蒸发量、干旱状况,还可能包括降雪^[31]、冬春季的温度变化和冻融过程^[28-29]、季节盛行风的风向^[44,47-48]等(表 1)。除此之外,在浑善达克沙地的研究表明,当地风蚀气候侵蚀力在拉尼娜时期比厄尔尼诺时期更低,可见 ENSO (the El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 也会影响风蚀气候侵蚀力的变化^[69]。

表 1 风蚀气候侵蚀力影响因素^[66-67]
Table 1 Some interactive factors affecting wind erosion climatic erosivity^[66-67]

影响因素	相关性
风速	正相关
风向	视情况而定
降雨量	负相关
降雪覆盖	负相关
湍流	负相关
蒸发	负相关
气温	正相关
气压	负相关
冻融过程	正相关

风蚀气候侵蚀力的时空变化特征不仅受风速等自然因素的影响,还受到耕作等人类活动的作用^[2]。例如,美国中西部大平原地区的研究表明,风蚀气候侵蚀力会影响作物留茬处理的最适宜高度^[70];阿根廷潘帕斯高原半干旱区的研究发现,耕作方式会在不同的降水条件下对风蚀气候侵蚀力的计算产生不同的影响:降水较多时,在未耕地风蚀气候侵蚀力的计算结果偏低而常规耕地正常;降水较少时,未耕地的计算结果偏低而常规耕地偏高^[50]。

3.2 风蚀气候侵蚀力对植被的响应

目前关于植被变化与风蚀气候侵蚀力的响应机制研究较少。在中国北方地区,通过对比当地 1981—2010 年风蚀气候侵蚀力和归一化植被指数发现,大部分地区表现为风蚀气候侵蚀力减少导致

植被增加,但不同区域的敏感性不同,部分区域还存在植被与风蚀气候侵蚀力变化不同步的现象^[65]。另外,有学者将风蚀气候侵蚀力引入前人提出的土壤风蚀率与植被覆盖度关系式^[71-72],提出了土壤风蚀率与植被覆盖度及风蚀气候侵蚀力的关系式,并根据该公式的计算结果发现武川县2002—2003年的总时空植被覆盖度与总土壤风蚀量呈“反相位”的动态变化。

4 风蚀气候侵蚀力与风沙地貌分布等关系的研究

4.1 风蚀气候侵蚀力与风沙地貌分布

风蚀气候侵蚀力作为风沙活动强度的评价指标,能够揭示气候条件对风沙地貌分布格局的影响程度^[73-76]。风蚀气候侵蚀力与风沙地貌的分布特征在较大的空间尺度或典型的风蚀地貌分布区相关性较高。中国干旱半干旱地区1951—1980年的年均风蚀气候侵蚀力与沙漠的分布格局吻合程度较高^[24],其中风蚀气候侵蚀力大于100.00的区域与中国风蚀戈壁与风蚀残丘区完全对应。同样,通过雅丹地貌公园实地观测数据计算出的风蚀气候侵蚀力也在100.00以上^[44]。可见,风沙地貌特别是风蚀地貌的空间分布格局可能受到风蚀气候侵蚀力的长期作用,是风蚀气候侵蚀力、地形、植被等自然因素与耕作、种植等人类活动综合作用的结果^[47-48,77]。

4.2 风蚀气候侵蚀力与土地沙漠化

风蚀气候侵蚀力是土地沙漠化灾害危险度的评价指标之一^[7-8],用于评价其内在危险性^[10]。风蚀气候侵蚀力可能会影响土地沙漠化内在危险性的时间变化特征。对比2000、2010年的土地沙漠化灾害危险度发现,风蚀气候侵蚀力的降低是中国北方土地沙漠化灾害危险度减轻的主要驱动力^[78],但土地沙漠化分布格局的变化特征受风蚀气候侵蚀力影响较小。比较1951—1980年的多年平均风蚀气候侵蚀力与沙漠化土地的分布特征发现,二者存在较大差异^[24],故风蚀气候侵蚀力可评价土地沙漠化的内在危险性并影响其时间变化特征,但二者空间格局的相关性并不高。

4.3 风蚀气候侵蚀力与沙尘暴

目前,各国学者对风蚀气候侵蚀力与沙尘暴日

数的相关性存在较大争议。以往研究大多通过分析年际、季节尺度的沙尘暴日数和风蚀气候侵蚀力来确定二者之间的相关性,但得出的结论差别很大。美国堪萨斯州加尔登城和道奇城的沙尘暴日数与风蚀气候侵蚀力的高值相关性较强^[9],但在中国干旱半干旱地区二者相关性很弱^[24],在青海省的研究也得出相同结论^[38]。然而,对中国北方海拔小于2 000 m的地区整体^[11]、甘肃民勤^[30]的春季沙尘暴日数与风蚀气候侵蚀力研究发现其间相关性较强;从内蒙古阴山北麓的沙尘暴日数与风蚀气候侵蚀力的小波分析结果也能够看出二者的周期性较为吻合^[35]。风蚀气候侵蚀力与沙尘暴的相关性在不同的研究区域、不同的时间尺度得出的结论明显不同,还有待于进一步研究。

5 存在问题与研究展望

5.1 主要研究进展及问题

风蚀气候侵蚀力的计算模型经各国学者多次改良已基本发展成熟。在风蚀气候侵蚀力水平评估及其对气候变化的响应研究、土地沙漠化评价及沙尘暴相关性分析等方面取得了诸多进展,但仍存在一些问题有待解决。

5.1.1 计算模型的发展及存在问题

风蚀气候侵蚀力的计算模型在完善理论基础、拓宽适用范围等方面取得了诸多进展,特别是提高其在干旱环境下的适用性对风蚀防治有着重要意义,但还存在一些不足。其中,Chepil等^[3]提出的首个计算模型以 $P-E$ 指数随地表土壤水分变化而变化的假设为基础,一方面对此没有进行验证;另一方面选用 $P-E$ 指数作为参数会使得该公式对水分过于敏感。此外,该公式的参数设置和系数确定也具有很强的区域限制^[2],故其计算结果受降水条件、风向等的影响较大^[50-51,79]。FAO公式和Skidmore公式分别引入 ETP 与风速概率密度函数作为风蚀气候侵蚀力计算模型的参数,能够弥补Chepil公式中理论基础的不足、减少其在不同研究区尤其是在干旱半干旱地区的计算误差^[5-6]。从适用范围来看,Chepil公式仅适用于月均气温大于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、月均降水量远大于12.70 mm的地区^[16,20],不适用于寒冷、极端干旱地区。经FAO、Skidmore改良后,风蚀气候侵蚀力的计算模型对水分的敏感性得到控制且能够较准确地计算干旱环境下的风蚀气候侵蚀力^[6]。

考虑到 3 种计算模型的理论基础和适用范围的不同,实际应用时需要根据其优缺点及区域自然地理状况选取适宜的计算模型(表 2)。因此,现有计算模型虽然能基本满足风蚀气候侵蚀力相关研究的计算要求,但也存在诸如未充分考虑地表土壤水分的影响、未体现风向的作用及未考虑区域自然地理环境差异对参数与系数设置的影响等问题。

表 2 风蚀气候侵蚀力的计算方法及其优缺点
Table 2 Comparison of calculation methods of wind erosion climatic erosivity

计算方法	所需数据	优缺点
Chepil 公式	风速、降水量、气温	优点:计算简单,数据容易获取 缺点:不适用于寒冷、极端干旱地区
FAO 公式	风速、降水量、ETP	优点:计算简单,数据易获取,适用范围较广 缺点:暂未确定 ETP 的最佳计算方法
Skidmore 公式	风速、大气密度、吸附水粘聚抗力、 α 常数、风速概率密度函数	优点:理论基础坚实,计算结果准确 缺点:数据获取难度大,计算方法复杂,可能不适用于中国部分地区

5.1.2 主要应用领域的研究进展与存在问题

自美国最早开展风蚀气候侵蚀力相关研究以来,研究区域集中于内陆干旱半干旱地区。研究内容从风蚀气候力的一般水平及时空变化特征分析,逐渐拓展为对气候变化的响应研究、风蚀气候侵蚀力与风沙地貌、风沙灾害相关性研究等。通过选用适当的计算模型在诸多研究区域开展相关研究,分析了不同国家干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的水平及其时空特征,认识到其变化是在风速主导下降水、气温、干旱状况以及季节性天气等综合驱动的结果,明确了其中单一气象因素的正负效应以及植被等的响应机理。此外,风蚀气候侵蚀力不仅能够影响风沙地貌的空间分布格局,而且可以用作土地沙漠化内在危险性的评价指标,在某些地区还能够应用于沙尘暴的分析和预测。但是,以往研究中仍存在以下问题有待解决。

研究区域不平衡。现有风蚀气候侵蚀力研究集中于内陆干旱半干旱地区,相比而言同样具备较强风蚀气候侵蚀力水平的沿海地区相关研究明显不足^[21],其时空变化特征也与内陆存在较大差异^[47-49],特别是在海、陆、气综合作用下风蚀气候侵蚀力对气候变化的响应机制可能比内陆更为复杂^[80-81]。

美国北阿拉斯加沿岸^[82]和新泽西沿岸^[83]、澳大利亚西南海岸^[84-85]、英国北爱尔兰沿岸^[86]、中国河北昌黎^[87-89]与福建平潭岛^[90-92]及海南岛^[93]等地广泛分布的海岸沙丘、风蚀坑等海岸风沙地貌也是风蚀气候条件长期作用的结果,但关于沿海地区,尤其是中国沿海地区风蚀气候侵蚀力的一般水平、变化特

征、响应机制及其与海岸风沙地貌分布的关系等方面的研究还较为缺乏。

气象要素综合作用机理认识有待深化。风蚀气候侵蚀力的计算模型提出之初就是以风速、地表土壤含水量作为主要参数,而再选用风速等单一气象要素进行研究或许不能准确揭示风蚀气候侵蚀力的气候响应机理,分析干旱指数、多元 ENSO 指数等气候指标与风蚀气候侵蚀力的关系可能更具有说服力^[48,69,94]。

风蚀气候侵蚀力的变化是风速等多个气象要素综合作用的结果,仅初步研究风速、降水量等单一要素的正负效应还不足以了解风蚀气候侵蚀力对气候变化的综合响应机理。

风蚀气候侵蚀力与风沙地貌、风沙灾害相关性研究存在较多争议。由于风沙地貌分布、土地沙漠化、沙尘暴影响因素作用机理的复杂性,以往研究在不同时空尺度、不同研究区域得出的结论存在一定的差异,目前各国学者对风蚀气候侵蚀力与风沙地貌分布、土地沙漠化、沙尘暴的关系仍未有定论。

5.2 研究展望

针对上述问题,未来一定时期内中国风蚀气候侵蚀力的研究可从以下方面逐步拓展。

构建区域校准性的风蚀气候侵蚀力计算模型。综合分析风向等区域特征较强的气象要素对风蚀气候侵蚀力的影响,建立能充分体现自然地理环境的区域特征而进行相应校准处理的计算模型,进一步提高风蚀气候侵蚀力计算的准确性。

沿海地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析。选

用合适的模型计算中国沿海地区风蚀气候侵蚀力,评估沿海地区整体的风蚀气候侵蚀力水平并概括其基本特征,分析其对气候变化的响应机制及其与海岸风沙地貌分布的关系,填补中国风蚀气候侵蚀力研究区域的空白。

风蚀气候侵蚀力对气候变化响应的综合分析。近期全球气候变暖、旱季湿季对比愈发强烈^[59-60],特别是2010年以来全球风速由降转升^[95],这与风蚀发生的气候条件相吻合^[96],在此背景下,须结合气象站监测数据、野外观测数据及相关的气候变化指标,综合分析风蚀气候侵蚀力对全球及区域气候变化的响应过程及其特征,进一步探究多种气象要素综合作用的机理及其对ENSO、植被、人类活动等的响应。

建立风沙地貌、风沙灾害相关的综合性风蚀气候评价模型。根据风沙地貌与风沙灾害的特点并结合气候、植被、地形等影响因子,构建以风蚀气候侵蚀力为基础的综合性风蚀气候评价模型,更准确地分析其相互关系。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 93.
- [2] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Proceedings of the Soil Science Society of America, 1965, 29(5): 602-608.
- [3] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, 17(4): 162-165.
- [4] Woodruff N P, Armbrust D V. A monthly climatic factor for the wind erosion equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1968, 23(3): 103-104.
- [5] FAO. A Provisional Methodology for Soil Degradation Assessment[M]. Rome, Italy: FAO, 1979.
- [6] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity[J]. Climatic Change, 1986, 9(1): 195-208.
- [7] FAO, UNEP. Provisional Methodology for Assessment and Mapping of Desertification[M]. Rome, Italy: FAO, 1984.
- [8] 董玉祥. 沙漠化灾害危险度评价的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 103-109.
- [9] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic index of wind erosion conditions in the Great Plains[J]. Proceedings of the Soil Science Society of America, 1963, 27: 449-452.
- [10] 董玉祥. 中国北方沙漠化灾害危险度分区评价[J]. 地理学报, 1997, 52(2): 146-153.
- [11] 王金艳, 王式功, 马艳, 等. 我国北方春季沙尘暴与气候因子之关系[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 296-300.
- [12] Chepil W S, Milne R A. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel[J]. Scientific Agriculture, 1939, 19: 249-257.
- [13] Chepil W S. Relation of wind erosion to water-stable and dry clod structure of soil[J]. Soil Science, 1942, 55: 275-287.
- [14] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. New York, USA: Morrow & Company, 1943: 265.
- [15] Zingg A W. Wind-tunnel Studies of the Movement of Sedimentary Material[C]. Atlanta, USA: Proceedings of the Fifth Hydraulics Conference, 1953: 111-135.
- [16] Thornthwaite C W. The climates of north America: according to a new classification[J]. Geographical Review, 1931, 4(21): 633-655.
- [17] Thornthwaite C W. An Approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55-94.
- [18] Justus C G, Hargraves W R, Mikhail A. Reference Wind Speed Distributions and Height Profiles for Wind Turbine Design and Performance Evaluation Applications (Technical Report for ERDA Division of Solar Energy)[R]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 1976: E(40-1)5-108.
- [19] 邹学勇, 程宏, 王周龙, 等. 全国风力侵蚀普查[R]. 北京: 中华人民共和国水利部水土保持监测中心, 2013: 61-88.
- [20] Lyles L. Erosive wind energy distributions and climatic factors for the West[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38: 106-109.
- [21] Skidmore E L, Woodruff N P. Wind erosion forces in the United States and their use in predicting soil loss[J]. USDA-ARS Agriculture Handbook, 1968(346): 42.
- [22] Moldenhauer W C, Duncan E R. Principles and Methods of Wind Erosion Control in Iowa[M]. Iowa, USA: The Iowa Agricultural and Home Economics Experiment Station Publications. Special Report No. 62, 1969: 54.
- [23] Brazel A J, Nickling W G. Dust storms and their relation to moisture in the Sonoran-Mojave Desert region of the southwestern United States[J]. Journal of Environmental Management, 1987, 24: 279-291.
- [24] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7.
- [25] Yang F B, Lu C H. Assessing changes in wind erosion climatic erosivity in China's dryland region during 1961-2012[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9): 1263-1276.
- [26] 哈斯, 陈渭南. 耕作方式对土壤风蚀的影响: 以河北坝上地区为例[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 10-16.
- [27] 何文清. 北方农牧交错带农用地风蚀影响因子与保护性农作制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [28] 王永, 赵举, 程玉臣. 阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 华北农学报, 2005, 20(专辑): 57-60.
- [29] 高旺盛, 秦红灵, 赵沛义. 内蒙古阴山北麓干旱区不同种植模式对农田风蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 112-122.

- [30] 李晋昌,董治宝,王训明,等.民勤50年来水热风组合变化及其与风沙活动的关系[J].干旱区资源与环境,2008,22(11):38-44.
- [31] 戴全厚,喻理飞,刘明义,等.吉林省西部沙地土壤风蚀机理分析[J].水土保持通报,2008,28(3):81-84.
- [32] 杨兴华,何清,艾力·买买提明,等.1996—2008年塔中地区的风沙环境特征[J].沙漠与绿洲气象,2010,4(2):21-25.
- [33] 何清,杨兴华,艾力·买买提明,等.塔中地区土壤风蚀的影响因子分析[J].干旱区地理,2010,33(4):502-508.
- [34] He Q, Yang X H, Mamtimin A, et al. Impact factors of soil wind erosion in the center of Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land, 2011, 3(1): 9-14.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 蒋冲,陈爱芳,喻小勇,等.黄土高原风蚀和风水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力变化[J].干旱区研究,2013,30(3):477-484.
- [38] 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.
- [39] 刘旭东.锡林郭勒地区风蚀气候侵蚀力时空变化规律研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [40] 祁栋林,韩廷芳,赵全宁,等.青海省冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数的区域变化差异特征[J].水土保持研究,2019,26(2):23-30.
- [41] 刘旭东,左合君,闫敏.锡林郭勒地区风蚀气候侵蚀力时空变化规律研究[J].内蒙古师范大学学报(自然科学版),2019,48(2):142-147.
- [42] 刘慧,李晓英,肖建华,等.1961—2015年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化[J].地理科学,2019,39(4):688-695.
- [43] 任景全,郭春明,李建平,等.气候变化背景下吉林省风蚀气候侵蚀力时空特征[J].水土保持研究,2017,24(6):233-237.
- [44] 牛清河,屈建军,安志山.甘肃敦煌雅丹地质公园区风蚀气候侵蚀力特征[J].中国沙漠,2017,37(6):1066-1070.
- [45] 刘明义,代全厚,张黎辉,等.沙地土壤风蚀动力因子分析[J].中国水土保持,2000(7):30-32.
- [46] 雷金银,吴发启,马璠,等.毛乌素沙地土壤风蚀的气候因子分析[J].水土保持研究,2007,14(2):104-105.
- [47] 谢皎如,方祖光.福建沿海地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].福建地理,1997,12(2):19-21.
- [48] 方祖光,谢皎如.福建沿海地区干燥度和风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].福建师范大学学报(自然科学版),1997,13(3):96-103.
- [49] Tian S G, Ma L. Spatiotemporal variation of wind erosion climatic factor in Shandong Province: applied mechanics and materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295/298: 919-923.
- [50] Panebianco J E, Buschiazzo D E. Erosion predictions with the Wind Erosion Equation (WEQ) using different climatic factors[J]. Land Degradation & Development, 2008, 19(1):36-44.
- [51] Buschiazzo D E, Zobeck T M. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(12):1839-1850.
- [52] Mendez M J, Buschiazzo D E. Wind erosion risk in agricultural soils under different tillage systems in the semiarid Pampas of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2):311-316.
- [53] Saadoud D, Guettouche M S, Hassani M, et al. Modelling wind-erosion risk in the Laghouat region (Algeria) using geomatics approach[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10:363.
- [54] Klik A. Wind Erosion Assessment in Austria using Wind Erosion Equation and GIS[R]. Paris, France: 2004.
- [55] Hallward J. An Investigation of the Areas of Potential Wind Erosion in the Cape Province, Republic of South Africa[D]. South Africa: University of Cape Town, 1988.
- [56] Mandakh N, Tsogtbaatar J, Dash D, et al. Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(4):473-483.
- [57] Mezosi G, Blanka V, Bata T, et al. Assessment of future scenarios for wind erosion sensitivity changes based on ALADIN and REMO regional climate model simulate on data[J]. Open Geoscience, 2016, 8(1):465-477.
- [58] Pouyan S, Ganji A, Behnia P. Regional analysis of wind climatic erosivity factor: a case study in Fars province, southwest Iran[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 105(3):1-10.
- [59] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [60] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers[R]. IPCC, 2013.
- [61] 董治宝,董光荣,陈广庭.以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J].干旱区资源与环境,1996,10(2):31-37.
- [62] Sporcic M A, Skidmore E L. 75 years of wind erosion control: The history of wind erosion prediction[C]. St. Joseph, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2011.
- [63] Silenzi J C, Echeverría N E, Vallejos A G, et al. Wind erosion risk in the southwest of Buenos Aires Province Argentina, and its relationship to the productivity index[J]. Aeolian Research, 2012, 3(4):419-425.
- [64] Yue S, Yang R, Yan Y, et al. Spatial and temporal variations of wind erosion climatic erosivity in the farming-pastoral zone of Northern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135(3):1339-1348.
- [65] 李达净,许端阳,丁雪,等.1981—2010年中国北方风蚀气候侵蚀力演变与植被动态响应[J].水土保持研究,2018,25(2):15-20.
- [66] Shi P J, Yan P, Yuan Y, et al. Wind erosion research in China:

- past, present and future [J]. *Progress in Physical Geography-earth and Environment*, 2004, 28(3):366-386.
- [67] Blanco H, Lai R. Principles of soil conservation and management[M]. New York, USA: Springer, 2008:626.
- [68] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004, 62(2):228-236.
- [69] Lou J P, Wang X M, Cai D W. Spatial and temporal variation of wind erosion climatic erosivity and its response to ENSO in the Otindag Desert, China[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(10):614.
- [70] Skidmore E L, Kurnar M, Larson W E. Crop residue management for wind erosion control in the Great Plains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1979, 34(2):90-94.
- [71] 赵彩霞, 郑大玮, 何文清. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. *植物生态学报*, 2005(1):68-73.
- [72] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. *环境科学学报*, 1996(4):437-443.
- [73] 董治宝, 吕萍, 胡光印. 沙漠流动性的气候评价[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2):276-282.
- [74] Tsoar H, Blumberg D G. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(11):1147-1161.
- [75] Tsoar H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2005, 357(1):50-56.
- [76] Hugenholtz C H, Wolfe S A. Recent stabilization of active sand dunes on the Canadian prairies and relation to recent climate variations[J]. *Geomorphology*, 2005, 68:131-147.
- [77] 郑达贤, 方祖光, 沙济琴, 等. 木麻黄生态系统研究[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1994:174-293.
- [78] 沈亚楠, 仇梦梦, 岳耀杰. 中国北方土地沙漠化灾害危险性评价[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1):174-184.
- [79] Huang Q, Badreldin N, Lobb D A, et al. Uncertainty and sensitivity analyses of the modified wind erosion equation for application in Canada [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7):2298-2307.
- [80] 范代读, 李从先. 中国沿海响应气候变化的复杂性[J]. *气候变化研究进展*, 2005(3):111-114.
- [81] Abeyirigunawardena D S, Gilleland E, Bronaugh D, et al. Extreme wind regime responses to climate variability and change in the inner south coast of British Columbia Canada[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2009, 47(1):41-62.
- [82] Galloway J P, Cater L D. Pateowind directions for late Holocene dunes on the western Arctic coastal plain, northern Alaska, US[J]. *Geological Survey Bulletin*, 1994, 2107:27-30.
- [83] Gares P A, Nordstorm K F. A cyclic model of foredune blow-out evolution for a Leeward Coast: Island Beach, New Jersey [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1995, 85(1):1-20.
- [84] Hesp P A. Fore dune formation in southeast Australia [J]. *Coastal Geomorphology in Australia*, 1982:69-96.
- [85] Hesp P A. Foredunes and blowouts: initiation geomorphology and dynamics[J]. *Geomorphology*, 2002, 48(1):245-268.
- [86] Carter R W G, Stone G W. Mechanisms associated with the erosion of sand dune cliffs, Magilligan, Northern Ireland [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(1):1-10.
- [87] 傅启龙, 沙庆安. 昌黎海岸风成沙丘的形态与沉积构造特征及其成因初探[J]. *沉积学报*, 1994(1):98-105.
- [88] 李志星, 李志忠, 靳建辉, 等. 2008—2018年河北昌黎海岸输沙势时空变化与沙丘形态演变[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(3):1-12.
- [89] Dong Y X, Hesp P A, Huang D Q, et al. Flow dynamics and sediment transport over a reversing barchan, Changli, China [J]. *Geomorphology*, 2017, 278:121-127.
- [90] 陈方. 海坛岛海岸风沙特征及其发育[J]. *海洋科学*, 1994(6):46-50.
- [91] Yang L, Dong Y X, Huang D Q. Morphological response of coastal dunes to a group of three typhoons on Pingtan Island, China[J]. *Aeolian Research*, 2018, 32:210-217.
- [92] 杨林, 董玉祥, 黄德全, 等. 海岸沙席形态及近表层沉积物粒度对台风的响应[J]. *地理科学*, 2017, 37(8):1243-1250.
- [93] Li S, Liu X W, Li H C, et al. A wind tunnel simulation of the dynamic processes involved in sand dune formation on the western coast of Hainan Island[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(4):453-468.
- [94] 贾莲莲, 高海东, 樊冰, 等. 中国北方风蚀水蚀侵蚀动力时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3):19-23.
- [95] Zeng Z, Ziegler A D, Searchinger T, et al. A reversal in global terrestrial stalling and its implications for wind energy production[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12):979-985.
- [96] Shao Y P. Physics and Modelling of Wind Erosion[M]. New York, USA: Springer, 2008:14.

A review of the research on wind erosion climatic erosivity

Chen Shouxu¹, Dong Yuxiang^{1,2}

(1.School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2.Department of Resources and Urban Planning, Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China)

Abstract: Wind erosion climatic erosivity is a climatic factor in the Wind Erosion Equation. Since wind erosion climatic erosivity was proposed, its calculation model had been improved several times, then wind erosion climatic erosivity was widely used in assessing the level of wind erosion climatic erosivity in the inland arid and semi-arid regions of various countries, analyzing the response mechanism of climatic factors to wind erosion climatic erosivity, exploring the correlation between wind erosion climatic erosivity and aeolian geomorphology or aeolian disaster and made lots of progress. Among them, the research on the response to regional climate change is a hot topic of current research. At present, the research on wind erosion climatic erosivity still has some problems, such as imperfect calculation models, imbalanced development of the study area, incomplete analysis of climate change response, and controversies about the relationship between it and aeolian landform or aeolian disaster. To solve these problems, the research of wind erosion climatic erosivity in China in the future should work on the establishment of a regional calibrated calculation model, the calculation and analysis of wind erosion climatic erosivity in coastal areas, more comprehensive analysis of the response mechanism of wind erosion climatic erosivity to climate change, and the establishment of comprehensive wind erosion climate assessment indicators for aeolian geomorphology and aeolian disaster separately.

Key words: wind erosion; climate; wind erosion climatic erosivity