

近 50 年青海省风蚀气候侵蚀力时空演变趋势

祁栋林¹, 李晓东^{1,2}, 苏文将¹, 周万福¹, 肖宏斌¹

(1. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001; 2. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072)

摘要:利用青海省 43 个气象站 1961—2010 年的观测资料,选择联合国粮农组织给出的风蚀气候因子指数计算公式,计算了青海省风蚀气候因子指数值,以此阐述了风蚀气候侵蚀力的基本特征。结果表明,多年平均风蚀气候因子指数 C 值得分布范围为 $-12.9 \sim 160.1$,整个青海省的平均值为 32.4;从空间分布来看, C 值由西北部向东南部呈减小趋势,最大值出现在柴达木盆地的茫崖;风蚀气候因子指数具有显著的月际和季节变化,春季最大,冬季次之,夏季最小;近 50 a 来风蚀气候因子指数总体上呈现减小趋势,说明风蚀气候侵蚀力在降低;风蚀气候侵蚀力主要受风速的制约,与降水和沙尘暴日数的关系不显著。

关键词:风蚀气候侵蚀力; 风蚀气候因子; 相对贡献率; Mann-Kendall 检验; 青海省

中图分类号: P425.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0234-06

Tendency of Spatiotemporal Evolution of Wind Erosion Climatic Erosivity in Qinghai Province in Recent 50 Years

QI Donglin¹, LI Xiaodong^{1,2}, SU Wenjiang¹, ZHOU Wanfu¹, XIAO Hongbin¹

(1. Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001, China;

2. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China)

Abstract: By making use of calculation method of wind erosion climatic erosivity factor index developed by FAO and observation data from 43 meteorological stations during 1961 to 2010 in Qinghai Province, we analyzed the basic features of wind erosion climatic erosivity. The results showed that the range of wind erosion climatic erosivity factor index of C value varied from -12.9 to 160.1 ; the average of C value was 32.4 in Qinghai Province. Spatially, C value displayed the decrease trend from northwest to southeast and the maximum of C value appeared at Mangai in the Qaidam Basin. Wind erosion climatic erosivity factor had seasonal and inter-monthly variation, the highest value showed in spring, the second one in winter and the lowest one in summer. Wind erosion climatic erosivity factor had the decrease tendency in recent 50 years which revealed that wind erosion climatic erosivity was reducing. Wind speed was main restricting factors of wind erosion climatic erosivity. The relationship between wind erosion climatic erosivity, precipitation and sandstorm days was not significant.

Keywords: wind erosion climatic erosivity; wind erosion climatic erosivity factor; relative contribution rate; Mann-Kendall test; Qinghai Province

风蚀气候侵蚀力是对气候影响风蚀的可能程度的量度,国际上一般用风蚀气候因子指数表示,是土地沙化和农田风蚀评判的重要指标^[1]。该项研究中,国外继 Chepil 等^[2]提出风蚀气候因子的概念后已取得了较大进展^[3-5],此领域国内研究很少,直到 20 世纪 90 年代才开始了相关研究。董玉祥等^[6]计算分析了我国干旱、半干旱地区风蚀气候侵蚀力的基本特征,年风蚀气候因子指数基本上介于 $10 \sim 100$,侵蚀

力水平一般,主要是受降水与风速影响所致。方祖光等^[7]对福建沿海地区风蚀气候侵蚀力的基本特征得出沿海地区风蚀气候侵蚀力一般发生秋冬季节,影响主要因子是风速和降水。王永等^[8]和朱丽等^[9]分别对内蒙古阴山北麓地区风蚀气候侵蚀力和土壤侵蚀驱动机制进行分析研究,得出春季是风蚀气候侵蚀发生的主要季节,冬春季风力强劲的气候条件是土壤侵蚀的内在驱动力,风蚀气候侵蚀因子与沙尘暴日数的

变化具有较好的对应关系。冯伟等^[10]分析西气东输管道施工建设对干旱荒漠区土壤的影响主要表现为土壤地表的扰动破坏,容易造成风蚀。何清等^[11]通过一次沙尘天气过程和野外试验,得出摩擦速度与风速成正相关,并影响着风蚀起沙量变化。蒋冲等^[12]对黄土高原风蚀和水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力分析研究,表明整体呈现明显的减小趋势。杨兴华等^[13]对塔里木盆地风蚀气候侵蚀力分析研究,结果显示整体呈现明显的减小趋势,主要影响因子是风速。但是,上述研究多数关注农牧交错带或风水复合区以及局部地区的风蚀气候侵蚀力的变化,对于面积更广的青藏高原关注较少。

青藏高原地形复杂多变,平均海拔在4 000 m以上,是我国生态环境最脆弱的地区之一^[14],还是我国众多大江大河的源头。近年来,由于气候变化和人类活动影响,青藏高原已经成为我国重要的水土流失地区之一^[15]。青藏高原土壤侵蚀不仅会对该区域脆弱的生态环境造成破坏,还会严重影响江河水环境,威胁我国的水安全和水电工程安全。本研究利用联合国粮农组织给出的风蚀气候因子指数计算公式和青海省1961—2010年的气象资料,分析青海省风蚀气候因子指数的空间分布、时间变化趋势和突变特征,旨在深入理解青海省风蚀气候因子指数的成因和分布规律,为土壤风蚀灾害的评估提供参考,以期对青海省生态保护和生态安全屏障建设提供一定的背景支持。

1 资料和方法

1.1 资料

为了保证青海省范围内气象资料样本记录的均一性、代表性和连续性,选取了43个有50 a观测记录的站点资料,利用1961—2010年的平均气温、降水量、平均风速、平均相对湿度、大风日数、沙尘暴日数和日照时数等月资料。气象数据来源于青海省气候中心,通过算术平均法建立青海省整个区域各气象要素序列。季节的划分采用气象季节,即3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—2月为冬季。

1.2 风蚀气候因子指数C的计算

风蚀气候因子指数的计算最早由Chepil^[2]提出,由于该公式应用存在较大的局限性,1979年联合国粮农组织提供了改进后的相对成熟的计算公式:

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} U_i^2 \left(\frac{ETP_i - R_i}{ETP_i} \right) \quad (1)$$

式中: C ——风蚀气候因子指数; U_i ——2 m高处的月平均风速(m/s); ETP_i ——月潜在蒸发量(mm); R_i ——月降水量(mm); d ——月天数。

青海省范围内幂指数公式比对数公式能更能精确拟合风速的垂直廓线,故采用幂指数公式将气象站10 m平均风速转换为2 m处的平均风速^[16]。

ETP_i 的计算采用中国气象局推荐的生态气象监测标准中的计算方法^[17]:

$$ETP_i = \frac{22d_i(1.6 + U_i^{1/2})W_{oi}(1 - h_i)}{P_i^{1/2}(273.2 + t_i)^{1/4}} \quad (2)$$

式中: i ——月份; d ——该月天数; U_i ——10 m高度月平均风速(m/s); P_i ——月平均气压(mb); t_i ——月平均气温(°C); W_{oi} ——温度为 t_i 时的饱和水汽压(mmHg); h_i ——月平均相对湿度(%)。

1.3 分析方法

采用线性趋势分析^[18]和Mann-Kendall方法^[18]分析风蚀气候因子指数的年际变化趋势和突变特征。

由于影响风蚀气候因子指数的影响因子较多,因此采用多元线性回归方法分析各气象因子对风蚀气候因子指数变化的影响。公式(3)中回归系数可很好地说明同一要素时间变化,但并不能表明不同要素间对风蚀气候因子指数影响的差异。为此,按照方精云^[19]和张嘉琪等^[20]方法用SPSS软件求算各气象因子的标准回归系数,并按照(4)和(5)公式计算各气象因子对风蚀气候因子指数变化的相对贡献率,作为比较气象因子影响风蚀气候因子指数分布强弱的指标。

$$Y_1 = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \cdots + a_n X_n \quad (3)$$

$$Y_2 = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_3 + \cdots + b_n Z_n \quad (4)$$

$$\eta_1 = \frac{|b_1|}{|b_1| + |b_2| + |b_3| + \cdots + |b_n|} \times 100\% \quad (5)$$

式中: Y_1, Y_2 ——风蚀气候因子指数和风蚀气候因子指数的标准化值; $X_1, X_2, X_3, \cdots, X_n$ ——各气象因子的平均值; $a_0, a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——各气象因子对应的回归系数,其绝对值分别表示风蚀气候因子指数在各气象因子梯度上的变化率; $Z_1, Z_2, Z_3, \cdots, Z_n$ ——各气象因子的标准化值; $b_1, b_2, b_3, \cdots, b_n$ ——各气象因子序列标准化后对应的回归系数; n ——样本数; η_1 —— Z_1 变化对 Y_2 变化的相对贡献率。

2 结果与分析

2.1 风蚀气候因子指数的时间变化特征和未来变化

图1给出了青海省风蚀气候因子指数的月际和季节变化。可以看出,青海省 C 值有明显的月际和季节变化特征。7—9月份风蚀气候因子指数很小,说明就气候条件而言,一般不会发生或很少发生风蚀现象,10月以后风蚀气候因子指数逐渐增大(具体表

现为 9 月至 12 月增大趋势缓慢,1 月至 4 月增大趋势明显),4 月达到全年最大,多年平均为 5.7,以后逐月下降,7 月和 9 月达全年最小,多年平均均为 0.8。季节尺度上,风蚀气候因子指数 C 值四季排序为春季(15.6)>冬季(10.2)>秋季(5.1)>夏季(3.2)。风蚀气候因子指数 C 值的月际和季节分布与青海省季节性气候变化(干旱大风少雨的气候背景)有着十

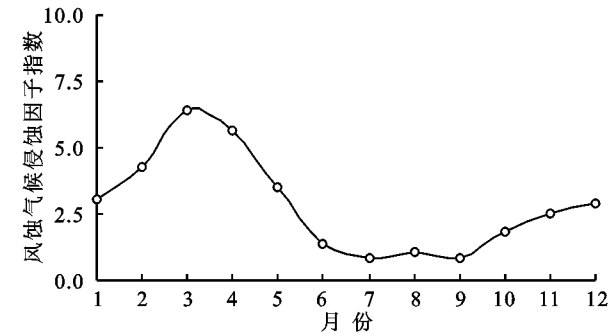


图 1 青海省风蚀气候因子指数的月际和季节变化

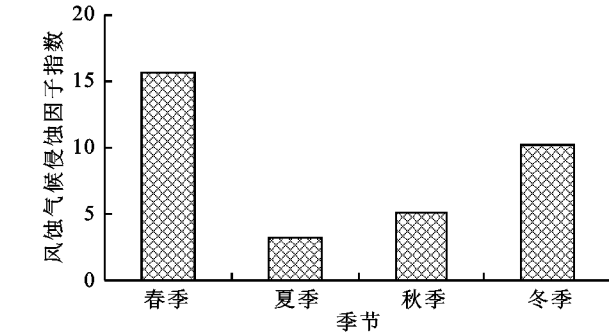
四季和年风蚀气候因子指数 C 值的年代际变化(见表 1),四季风蚀气候因子指数 C 值在 60 年代和 70 年代均为正距平,说明这一阶段风蚀气候因子指数偏大,70 年代达到最大值。而后 80 年代至 21 世纪的 00 年代均为负距平,表明风蚀气候因子指数处于偏低水平,21 世纪 00 年代达到最低水平。年风蚀气候因子指数 C 值的年代际变化与四季基本一致。

表 1 青海省风蚀气候因子指数年代际变化

年代	年	春	夏	秋	冬
60 年代	3.6	0.6	0.7	0.8	1.5
70 年代	18.2	8.8	2.5	2.1	4.8
80 年代	-1.0	-0.8	-0.1	-0.1	0.1
90 年代	-9.3	-3.5	-1.3	-0.9	-3.6
21 世纪 00 年代	-11.8	-5.0	-1.7	-2.1	-3.0

图 2 给出了青海省年和春季风蚀气候因子指数的年际变化(夏秋和冬季图略)。1969 年之前,年风蚀气候因子指数为一个相对较低值期,除 1966 年,1968 年分别为 35.3,38.0 外,其他年份均在多年平均值(32.4)以下,风蚀气候因子指数呈增加趋势,增加速率为 10.3/10 a($R^2=0.159\ 6$, $p<0.05$);1969—1997 年期间,年风蚀气候因子指数呈现出明显的降低趋势,减少速率 15.6/10 a($R^2=0.831\ 1$, $p<0.001$),年风蚀气候因子指数处于一个相对较高值期,在多年平均值以上(除 1982 年,1983 年,1985 年,1986 年);1969 年风蚀气候因子指数出现最大值(73.2),1997 年出现最小值(15.2),二者相差为 58.0,是多年平均值的 1.79 倍,表明风蚀气候因子指数变幅较大。1998 年以后风蚀气候因子指数又呈现出显著的上升趋势,

分密切的关系^[21],也与我国干旱半干旱地区的最强风蚀气候因子指数出现在春季完全相同^[6,8-13],与沿海地区最强风蚀气候因子指数出现在秋冬季完全不同^[7]。在冬春季节,青海省气温几乎都在 0℃ 以下,植被几乎停止生长,并且大部分枯萎,广大地区经常处于裸露或半裸露状态,从而使得植被对地表的保护作用减弱,为地表风蚀起沙创造了极为有利的条件。



1998—2010 年平均为 20.5,2010 年达到了 1998 年以来的最大值(27.3),上述结果表明近 50 a 来,青海省年风蚀气候因子指数整体上呈现出显著减小趋势,减少速率为 5.5/10 a($R^2=0.329\ 9$, $p<0.001$),即风蚀气候侵蚀力总体上呈减少趋势。

四季的风蚀气候因子指数均呈现显著的减小趋势,减小速率春季最大(2.2/10 a, $p<0.001$),冬季次之(1.6/10 a, $p<0.001$),夏秋季减小速率大致相当(约 0.8/10 a, $p<0.001$)。

表 2 给出了青海省风蚀气候因子指数各月的年际变化,各月(除 9 月)风蚀气候因子指数均呈现显著减少趋势,冬末春初减少速率较大,3 月最大(1.03/10 a, $p<0.01$),夏秋季减少速率较小,9 月变化趋势不明显。

2.2 风蚀气候因子指数空间分布

图 3 给出了青海省年风蚀气候因子指数和气候倾向率的空间分布。从图 3a 可以看出,青海省年风蚀气候因子指数呈现出从西北部向东南部减小的分布特点,以大柴旦、都兰、曲麻莱和杂多为分界线,该线以东的 C 值均在 40 以下,该线以西地区均大于 50,最大值出现在柴达木盆地的茫崖站,高达 160.1,最小值出现在三江源地区的清水河站(-12.9)。青海省有两个相对高值区,一个为柴达木盆地和三江源地区的西部,属于青海省气候侵蚀力水平强的地区,超过风蚀气候侵蚀“极重”级($C\geq 100$)的分级标准,一个为环青海湖地区。三江源地区东部和祁连山地区年风蚀气候因子指数相对较小,很少发生风蚀现象。这就是说在青海省风蚀气候侵蚀力从西北部向东南部是逐渐减小的,风蚀气候侵蚀力最强的地方为茫崖。

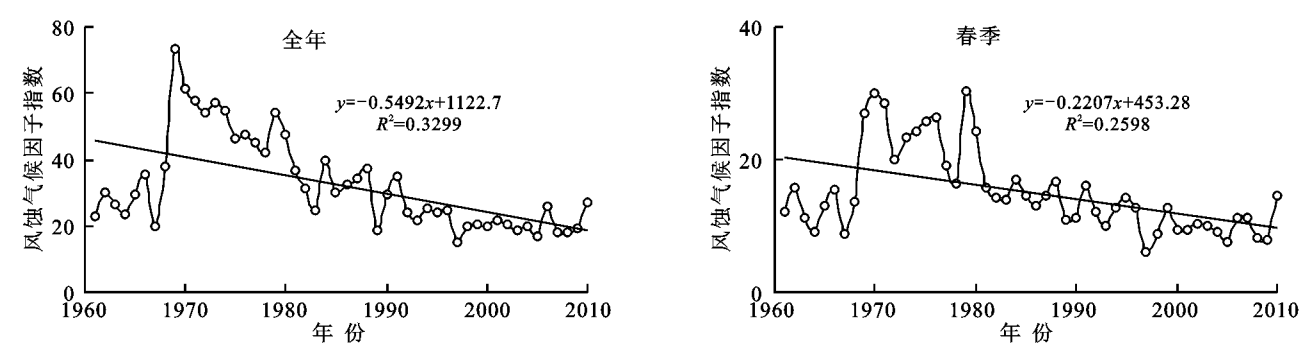


图 2 青海省风蚀气候因子指数的年际变化

表 2 青海省风蚀气候因子指数各月的年际变化

10 a

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气候趋势系数	0.42**	0.43**	0.49***	0.44**	0.43*	0.46***	0.32*	0.32*	0.28	0.40**	0.52***	0.47***
气候倾向率	-0.41	-0.73	-1.03	-0.68	-0.50	-0.43	-0.24	-0.19	-0.17	-0.27	-0.39	-0.45

注:*, **, *** 表示通过 0.05, 0.01, 0.001 的显著性检验。

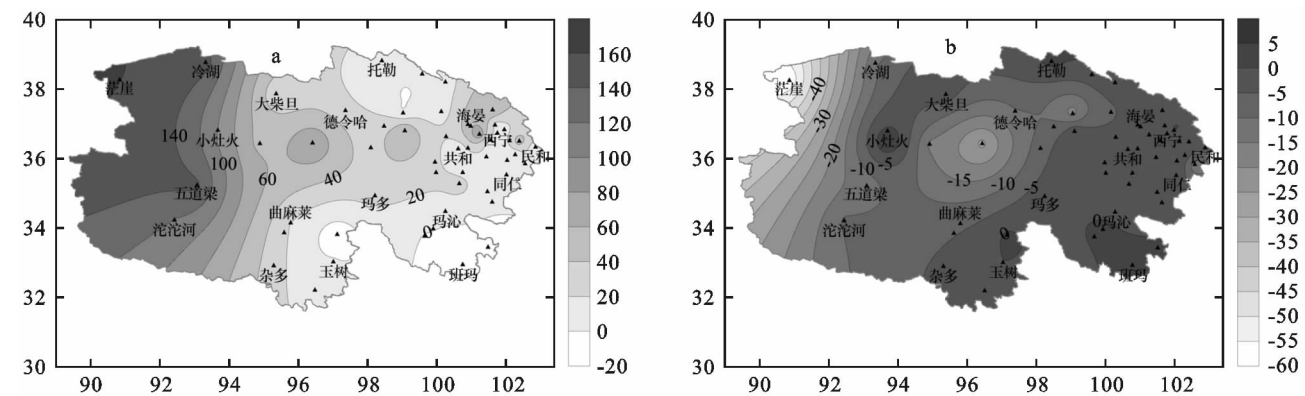


图 3 青海省年风蚀气候因子指数值和气候倾向率的空间分布

从图 3b 可以看出,青海省年风蚀气候因子指数的减小趋势最明显的有两个相对高值区,一个为柴达木盆地和三江源地区的西部,减弱趋势最明显的是茫崖站(−59.4/10 a),一个为柴达木盆地的中部,其中心为诺木洪站(−26.3/10 a),全省其他地区变化趋势较小或不明显。

从青海省年风蚀气候因子指数值和气候倾向率空间分布来看,风蚀气候侵蚀力最强的地方也是减弱

最明显的地方。

四季的风蚀气候因子指数值和气候倾向率的空间分布与年的空间分布基本一致。

2.3 风蚀气候因子指数突变检验

气候突变是普遍存在于气候变化中的一个重要现象,是气候预测和模拟应考虑的重要因素^[18]。应用 Mann-Kendall 检验法对近 50 a 青海风蚀气候因子指数进行突变分析。

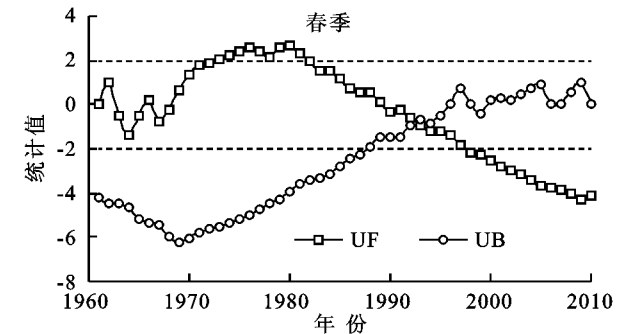
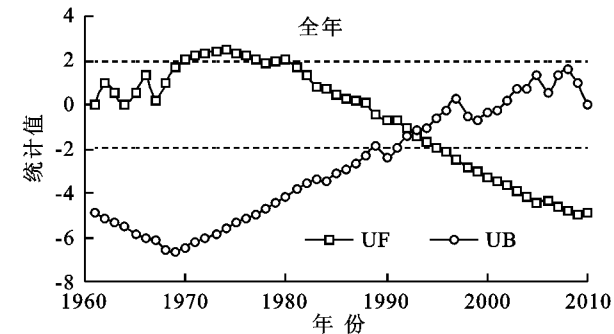


图 4 青海省风蚀气候因子指数的突变检验

图 4 为 1961—2010 年青海省风蚀气候因子指数的 Mann-Kendall 突变检验。由图 4 可见,青海省年风蚀气候因子指数的 UF 和 UB 曲线在 1993 年出

现交点,且交点在信度线之间,因此 1993 年是青海省风蚀气候因子指数减少突变的时间点。自 1961 年左右以来,虽然总的趋势是下降,但在 70 年代中期前呈

增加趋势,且在 1970—1975 年增加趋势明显,进入 1976 年以后在置信区间范围内下降,1996 年以后,这种减少趋势超过 0.05 的显著性水平,表明在 1996 年后青海省风蚀气候因子指数整体进入显著下降阶段。春夏秋 3 季突变发生分别在 1994 年,1995 年,1998 年,1999 年后均进入显著减少趋势,冬季 1991 年发生突变,1996 年进入显著减小趋势。

2.4 气象因子对风蚀气候因子指数的影响分析

选择了热力因子(气温和日照时数)、水分因子(相对湿度和降水量)和动力因子(风速、大风日数和沙尘暴日数),分析其对风蚀气候因子指数的影响。按(3)式求算气象因子对各季和年风蚀气候因子指数的回归系数,结果表明各季和年的复相关系数较大(0.93 以上)。根据相对贡献率公式计算出各气象因子对风蚀气候因子指数变化的相对贡献率(表 3),从

表 3 青海省各气象因子对风蚀气候因子指数变化的相对贡献							%
气候因子	降水量	风速	大风日数	沙尘暴日数	温度	相对湿度	日照时数
年	8.3	64.2	5.6	6.2	11.8	1.3	2.6
春	5.7	73.4	10.5	1.0	4.9	2.9	1.6
夏	13.8	38.8	8.1	1.1	10.2	9.6	18.5
秋	24.6	52.6	8.2	0.7	7.6	1.3	4.9
冬	22.5	46.0	2.6	4.9	18.1	4.1	1.8

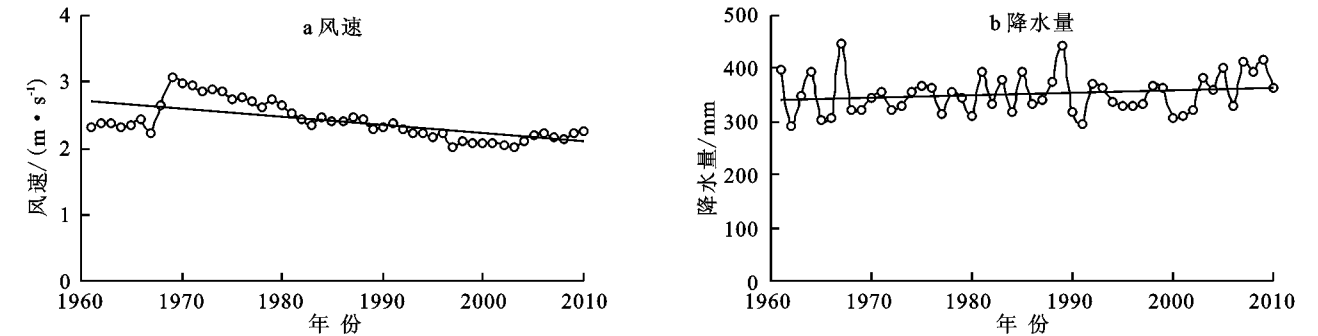


图 5 青海省风速和降水量的年际变化

图 5 给出了青海省风速和降水量的年际变化,结合图 5 和图 2a 可以看出,风蚀气候侵蚀因子指数与风速有很好的对应关系,与降水量的对应关系较差,这说明在青海省风速与降水对风蚀气候侵蚀力的影响与作用是不同的,这与中国其他地区风蚀气候侵蚀力受到降水和风速的共同制约存在一定的差别^[7-9,12],这是青海省干旱半干旱区的一个显著特点,另一方面也解释了青海省风蚀气候因子指数的季节变化变化特点原因。青海省冬春季风速较大,空气干燥,降水较少,风蚀气候侵蚀力大于夏秋季,因此,C 值在春季最大,以上分析表明,在青海省可以利用 C 值与风速的回归方程来估算风蚀气候因子指数的值。

3 结论

(1) 青海省 C 值有明显的月际和季节变化特征,

相对贡献率分析可知,就年尺度而言,青海省整个区域风速变化对风蚀气候因子指数变化影响最大,贡献率为 64.2%,温度影响次之,贡献率在 12%左右,相对湿度、日照时数、降水量、大风日数和沙尘暴日数对风蚀气候因子指数变化的影响较小;就季节尺度来看,风速变化对四季风蚀气候因子指数变化影响均最大,春季贡献率高达 73.4%,夏季贡献率为 38.8%,影响风蚀气候因子指数的次要因子不同季节略有不同,春季为大风日数,夏季为日照时数、降水量和温度,秋季为降水量,冬季为降水量和温度,表明引起 1961—2010 年青海省风蚀气候因子指数变化的主要因子是风速,而次要因子表现略有不同。这与国外^[6]利用沙尘暴日数和风蚀气候因子指数回归方程预报风蚀强度完全不同,但与国内塔里木盆地^[13]的主要影响因子相一致。

春季最大,冬季和秋季次之,夏季最小。年和四季风蚀气候侵蚀力总体上呈显著的减少趋势。

(2) 青海省年风蚀气候因子指数呈现出从西北部向东南部减小的分布特点,以大柴旦、都兰、曲麻莱和杂多为分界线,该线以东的 C 值均在 40 以下,该线以西地区均大于 50。有两个相对高值区,一个为柴达木盆地和三江源地区的西部,属于青海省气候侵蚀力水平强的地区,超过风蚀气候侵蚀“极重”级($C \geq 100$)的分级标准,一个为环青海湖地区。风蚀气候侵蚀力最强的地方也是减弱最明显的地方。

(3) 青海省年风蚀气候因子指数突变发生的时间为 1993 年,1996 年后整体进入显著下降阶段,春夏秋 3 季突变发生分别在 1994 年,1995 年,1998 年,1999 年后均进入显著减少趋势,冬季 1991 年发生突变,1996 年进入显著减小趋势。

(4) 青海省整个区域风速的变化对风蚀气候因子指数变化影响最大,风蚀气候侵蚀因子指数与风速有很好的对应关系,与降水量和沙尘暴日数的对应关系较差,可以利用C值与风速的回归方程来估算风蚀气候因子指数的值。

青海省整体风蚀气候侵蚀力不算很严重,柴达木盆地西部局部达到“极重”级,但土壤风蚀的灾害却非常严重,表明土壤风蚀是多种因素共同作用的结果,本文仅仅研究了土壤风蚀的气象因素,更多有关土壤风蚀的研究尚待开展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, 17(4): 162-165.
- [3] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity[J]. Climatic change, 1986, 9(1/2): 195-208.
- [4] 柯克比 M J, 摩根 R P C. 土壤侵蚀[M]. 王礼先, 吴斌, 洪惜英, 译. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [5] 拉尔 R. 土壤侵蚀研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [6] 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和分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 朱丽, 秦富仓, 杨翠林, 等. 阴山北麓农牧交错带土壤侵蚀驱动机制研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 34-37.
- [10] 冯伟, 张兴昌, 高照良. 风力侵蚀对西气东输(甘肃段)工程影响分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 244-251.
- [11] 何清, 胡文峰, 杨兴华, 等. 拐子湖地区沙尘天气风蚀起沙量的估算[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 6-10.
- [12] 蒋冲, 陈爱芳, 喻小勇, 等. 黄土高原风蚀与水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力变化[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 477-483.
- [13] 杨兴华, 何清, 李红军, 等. 塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算和分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 990-995.
- [14] 郑度. 青藏高原形成环境与发展[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003.
- [15] 王根绪, 李元寿, 王一博. 青藏高原河源区地表过程与环境变化[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 李林, 汪青春, 时兴合, 等. 青海省太阳能风能监测评估服务技术[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [17] 中国气象局. 生态质量气象评价规范[M]. 北京: 中国气象局, 2005.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [19] 方精云. 地理要素对我国温度分布影响的数量评价[J]. 地理学报, 1992, 12(2): 97-104.
- [20] 张嘉琪, 任志远. 1977—2010年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2103-2112.
- [21] 王江山, 李锡福. 青海天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 2004.

(上接第233页)

- [10] 柳长顺, 齐实, 史明昌. 土地利用变化与土壤侵蚀关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 10-17.
- [11] 姜鑫, 安裕伦, 杨柏林, 等. 基于GIS和RS的水源地生态环境现状分析: 以贵阳市红枫百花流域为例[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2006, 23(4): 46-49.
- [12] 杜军, 杨青华. 基于土地利用变化和空间统计学的区域生态风险分析: 以武汉市为例[J]. 国土资源遥感, 2010(2): 102-106.
- [13] 孙丽娜, 宋戈. 松嫩高平原黑土区土地利用/覆被变化及其景观生态风险分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 148-158.
- [14] 徐岚, 赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 272-277.
- [15] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘: 以江苏省苏州市为例[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1497-1507.
- [16] 赵哲远, 马奇, 华元春, 等. 浙江省1996—2005年土地利用变化分析[J]. 中国土地科学, 2009, 23(11): 55-60.
- [17] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.