

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

祁栋林^{1,2}, 韩廷芳³, 赵全宁¹, 赵慧芳¹, 苏文将¹

(1. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室,
西宁 810001; 3. 青海省格尔木市气象局, 青海 格尔木 816099)

摘要:利用1961—2015年青海省43个气象站观测资料,选择联合国粮农组织给出的风蚀气候因子指数计算公式,计算和统计了青海省和4个不同生态功能区冬、春季风蚀气候因子指数值和起沙风日数,以此分析研究了风蚀气候侵蚀力和起沙风日数的基本变化特征。结果表明:青海省和4个生态功能区冬、春季风蚀气候因子指数和起沙风日数整体上呈现显著减小趋势;风蚀气候因子指数和起沙风日数的空间分布特征完全一致,均整体呈现出从西部向东部减小的分布特点。以大柴旦、格尔木、曲麻莱和杂多为界分为东西两区,东区的C值和起沙风日数大部分分别在40,10 d以下,以诺木洪、天峻和刚察为中心分别向南向北逐渐减小;西区的C值和起沙风日数均分别大于40,10 d以上,从西向东逐渐减小;冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数分别在1992年、1997年发生突变,且分别在1995年和1999年进入显著下降趋势;影响青海省和4个生态功能区冬、春季风蚀气候因子指数的气象因素存在差异,同一影响因素在不同地区的影响程度也不同。在干旱的柴达木盆地主要受制于风速的作用,东部农业区和环青海湖区则受风速和降水量的影响,三江源地区 and 全省则受风速、温度和降水等的共同作用与影响;青海省和4个生态功能区气候呈暖湿化发展、植被覆盖缓慢上升及风速显著下降趋势,将为防治风蚀气候因子指数的发生提供有利条件。

关键词:风蚀气候侵蚀力;起沙风日数;相对贡献率;Mann-Kendall检验;不同生态功能区;青海省

中图分类号:P425.6;S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0023-08

Characteristics of Regional Variation of Wind Erosion Climatic Erosivity and Number of Wind Days in Winter and Spring in Qinghai Province

QI Donglin^{1,2}, HAN Tingfang³, ZHAO Quanning¹, ZHAO Huifang¹, SU Wenjiang¹

(1. Institute of Qinghai Meteorological Science Research, Xining 810001, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Disaster Preventing and Reducing, Xining 810001, China; 3. Geermu Meteorological Bureau, Geermu, Qinghai 816099, China)

Abstract: By using the observation data of 43 meteorological stations in Qinghai Province in 1961—2015 years, and the wind erosion climate factor index formula given by Food and Agricultural Organization of the United Nations, the wind erosion climate factor index and the number of wind days in the 4 different ecological functional regions of Qinghai in winter and spring were calculated and counted. Based on the above analysis, the basic characteristics of the wind erosion climatic erosivity and the number of wind days were discussed. The results showed that the wind erosion climate factor index and the number of wind days in winter and spring in the 4 different ecological functional regions of Qinghai presented the significant decreasing trend, and the spatial distribution characteristics of the wind erosion climate factor index and the number of wind days were all the same, showing the decreasing distribution from the west to the east. It was divided into the eastern and western areas by taking the Dachaidan, Golmud, Qumalai and Zaduo as the boundary. The C value and the number of wind days in the eastern region were mostly below 40 d and 10 d, respectively, and decreased from Nuomuhong, Tianjun and Gangcha to the south and the north; the C value and the number of wind days in the western region were greater than 40 d and 10 d, respectively, and gradually decreased from the west to the east. The mutations of the wind erosion climate factor index and the number

收稿日期:2018-05-29

修回日期:2018-06-26

资助项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001);青海省科技厅项目(2017-SF-131,2013-N-148,2017-ZJ-Y02,2017-ZJ-Y28);青海省气象局重点项目“青海省空气质量客观预报方法研究”

第一作者:祁栋林(1967—),男(蒙古族),青海乐都人,高级工程师,大学本科,主要从事气候变化和大气成分研究。E-mail:qidl007@163.com

通信作者:赵慧芳(1986—),女,青海湟中人,工程师,大学本科,主要从事气候变化和应用气象研究。E-mail:414088284@qq.com

of wind days in winter and spring occurred in 1992 and 1997, respectively, and entered a significant downward trend in 1995 and 1999, respectively. The meteorological factors affecting the wind erosion climate factor index in winter and spring in the 4 different ecological functional regions of Qinghai were different, and the influence degree of the same influence factors in different regions was also different. It was mainly controlled by wind speed in arid Qaidam Basin, affected by wind speed and precipitation in the eastern agricultural area and the Qinghai Lake area, and affected by wind speed, temperature and precipitation in the Three-River headwater area and the whole province. The development of climate warm and humidification, the slow rise of vegetation cover and the significant decreasing trend of wind speed in the 4 different ecological functional regions of Qinghai, will provide favorable conditions for controlling the occurrence of wind erosion climate factor index.

Keywords: wind erosion climatic erosivity; number of wind days; relative contribution rate; Mann-Kendall test; different ecological function areas; Qinghai Province

土壤风蚀是北方农田和草场退化、沙化的主要影响因素,严重的土壤风蚀不仅破坏了表层土壤,造成土壤养分的损失,而且还使土壤逐渐退化、沙化,土地生产力急剧下降,严重影响农业生产,甚至成为沙尘暴的沙源地,这不仅给社会造成了严重的经济损失,同时导致当地及周边地区的生态环境不断恶化,已经成为影响社会可持续发展的重要因素之一。以往对北方风蚀沙化的研究,多偏重于定性的描述,缺乏比较系统的定量分析研究。风蚀气候侵蚀力一般用风蚀气候因子指数来度量气候影响风蚀的可能程度,是土地沙化和农田风蚀评判的重要指标^[1]。董玉祥等^[2]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,指出我国干旱地区侵蚀力水平一般,主要是受降水与风速的影响。内蒙古阴山地区^[3-4]、黄土高原^[5]和塔里木盆地^[6]风蚀气候侵蚀力主要发生冬春季,年风蚀气候侵蚀力整体呈现明显的减小趋势,主要影响气象因子是风速。上述研究多数关注农牧交错带或风水复合区具体范围内以及局部地区的风蚀气候侵蚀力的变化,对于面积广阔的青藏高原地区关注较少^[7-8]。风是引起土壤风蚀的最直接动力,风速越大,其风蚀能力越强。已有的许多风蚀起沙模型和研究结果表明^[9-12],地面风蚀起沙量的多少主要受摩擦速度和地表风蚀起沙的临界风速所影响;砂质壤土、壤质砂土和固定风砂土的起动风速是明显不同。胡霞^[13]、王翔宇^[14]等对不同地表状况(或植被覆盖)对土壤风蚀的影响进行研究得出,增加土壤粗糙度,抵抗风蚀的能力越强,植被覆盖可以降低近地表风速,减小侵蚀风的持续时数,可以增大临界起沙风速和地表粗糙度,可以降低近地表输沙率。

青海省地处青藏高原东北部,全省平均海拔在3 000 m以上,境内地貌特征复杂多样,各地气候条件和植被状况相差较大,以高寒草原(或高寒草甸)为主的自然生态系统基本保存完好,是我国生态环境最

脆弱的地区之一,也是我国的强风蚀气候侵蚀力中心^[8-9]和研究现代土地沙漠化过程及其驱动机制的重要地区^[15-16]。冬春季气温几乎都在0℃以下,干旱少雨、风力强劲的气候使得其大部分地区的风蚀气候侵蚀力较强,为风沙活动提供了必要的动力条件,土壤含沙量丰富,质地松散,内聚力差,具有较强的易碎性和不稳定性,易于风蚀起沙,为土地沙漠化提供了丰富的物质基础,植被稀疏低矮加之生长期短,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。本研究利用青海省1961—2015年的基本气象资料和联合国粮农组织给出的风蚀气候因子指数计算公式,对青海省和4个生态功能区冬、春季风蚀气候因子指数和起沙风日数的气候变化特征进行分析,找出其变化的差异,进一步分析确定影响冬春季风蚀气候因子指数的主要气象因子,以其为今后更好地认识不同生态功能区风蚀气候因子指数变化提供基础,为青海省环境保护和生态安全屏障建设提供一定的背景支持,并为其资源的合理开发利用与可持续发展提供科学依据。

1 研究区域、资料和方法

1.1 研究区域和资料

为了总体反映青海省冬春季(12—5月)风蚀气候因子指数的时空分布规律,根据青海省的自然地理位置状况、地貌和气候特征划分为柴达木盆地(以荒漠区为主,气候干燥,年降水量较少,沙化严重,主要分布一些灌木类植被,9个代表气象站)、东部农业区(主要以农作物为主,夏季植物覆盖度较好,冬春季主要以裸地为主,12个代表气象站)、环青海湖区(为天然草场区,主要分布草原草场,气候相对寒冷,8个代表气象站)和三江源地区(为天然草场区,主要分布高寒草甸,气候比较寒冷,总体上三江源区的植被状况

稍好于环青海湖区,14个代表气象站)4个生态功能区(31°39′—39°19′N,89°35′—103°04′E)^[17](图1)。利用青海省1961—2015年43个气象站逐月平均气温、降水量、风速、相对湿度、日照时数及逐日平均风速等资料,计算并统计各站冬、春季(12—5月)风蚀气候因子指数和起沙风日数,以算术平均值代表青海省和4个生态功能区冬、春季风蚀气候因子指数和起沙风日数。气象数据来源于青海省气象信息中心。

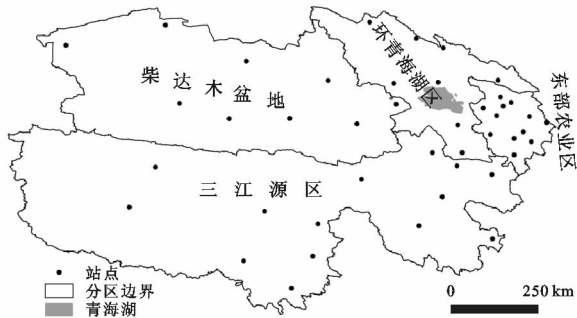


图1 青海省43个气象站的分布及生态功能区划分

1.2 研究方法

1.2.1 起沙风日数 风速只有在超过某一临界值的情况下才有可能搬运土壤表层中的颗粒物至空中,在地表土壤性质一定的情况下,超过临界值风速的大风日数越长,对土壤表面的侵蚀程度就越深^[11]。以日平均风速 ≥ 6.0 m/s来统计冬春季起沙风日数^[9]。

1.2.2 风蚀气候因子指数C的计算 风蚀气候因子指数的计算采用1979年联合国粮农组织提供的计算公式^[2]:

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

式中: U_i 为2 m高处的月平均风速(m/s); R_i 为月降水量(mm); ETP_i 为月潜在蒸发量(mm),采用中国气象局推荐的生态气象监测标准中的动力学模型的计算方法^[18]。

1.2.3 分析方法 采用线性倾向估计方法^[19]分析风蚀气候因子指数和起沙风日数的线性变化趋势,并应用Mann-Kendall检验法^[19]对风蚀气候因子指数和起沙风日数进行突变检验。

为定量地表示两幅图的相似程度,采用相似系数^[20]。由下式计算:

$$\cos\theta_{12} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}} \quad m=43 \quad (2)$$

式中: $\cos\theta_{12}$ 就是两幅图相似程度的定量指标,称为相似系数。相似系数等于1.0为完全相同,相似系数为-1.0为完全相反,为0.0时表示完全不相似。正值越大越相似,负值越大越相反。

采用标准化回归分析方法^[21]分析风蚀气候因子指数的主要影响气候因子。计算公式:

$$\eta = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| + \dots} \times 100\% \quad (3)$$

$$Y = aZ_1 + bZ_2 + cZ_3 + \dots \quad (4)$$

式中: Y 为风蚀气候因子指数的标准化值; Z_1, Z_2, Z_3, \dots 分别为各气象因子的标准化值; a, b, c, \dots 为各气象因子序列标准化后对应的回归系数;标准化回归系数越大说明气候因子对风蚀气候侵蚀力的影响越大; η 为 Z_1 气象因子变化对 Y 变化的相对贡献率。

线性倾向估计分析方法由Excel完成;标准化回归分析方法由SPSS 17.0统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 风蚀气候因子指数和起沙风日数的年际变化特征

图2为青海省和4个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数及起沙风日数的年际变化图。由图2可知,近55 a来青海省冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数的年际波动变化基本一致,多年平均分别为24.2, 8.5 d,整体上均呈现减小趋势,气候倾向率分别为-3.8/10 a, -1.8/10 a,均通过0.05的显著性检验。4个生态功能区冬、春季风蚀气候侵蚀力气候倾向率分别为-7.4/10 a, -1.8/10 a, -3.3/10 a, -3.5/10 a,除三江源地区外其他3个生态功能区均通过0.05以上的显著性检验,起沙风日数气候倾向率分别为-3.1 d/10 a, -1.0 d/10 a, -1.8 d/10 a, -1.7 d/10 a,4个生态功能区均通过0.01的显著性检验,这与祁栋林^[7]及吴成永^[8]等研究得出的青海省年风蚀气候侵蚀力整体呈现显著的下降趋势一致。结合5 a滑动曲线可知,青海省整体和4个生态功能区冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数均表现为2个变化阶段,20世纪60—70年代中期快速增长,70年代中期以后进入快速下降阶段,进入21世纪00年代后变化相对平稳,特别注意的是东部农业区、环青海湖区和三江源地区风蚀气候侵蚀力进入21世纪00年代以后有反弹趋势。柴达木盆地1976年从上升阶段转换为下降阶段,东部农业区、三江源地区和环青海湖区均是在1973年从上升阶段转换为下降阶段。上升阶段风蚀气候侵蚀力气候倾向率分别为34.5/10 a, 4.8/10 a, 7.2/10 a, 43.3/10 a,起沙风日数气候倾向率分别为14.0 d/10 a, 3.5 d/10 a, 3.6 d/10 a, 19.8 d/10 a,下降阶段风蚀气候侵蚀力气候倾向率分别为-9.5/10 a, -1.7/10 a, -3.6/10 a, -6.0/10 a,起沙风日数气候倾向率分别为-4.6 d/10 a, -1.1 d/10 a, -2.3 d/10 a, -3.4 d/10 a,柴达木盆地和三江源地区风蚀气候侵蚀力和起沙日数均通过0.01显著性检验,东部农业区和环

青海湖区上升阶段的气候侵蚀力没有通过显著性检验。

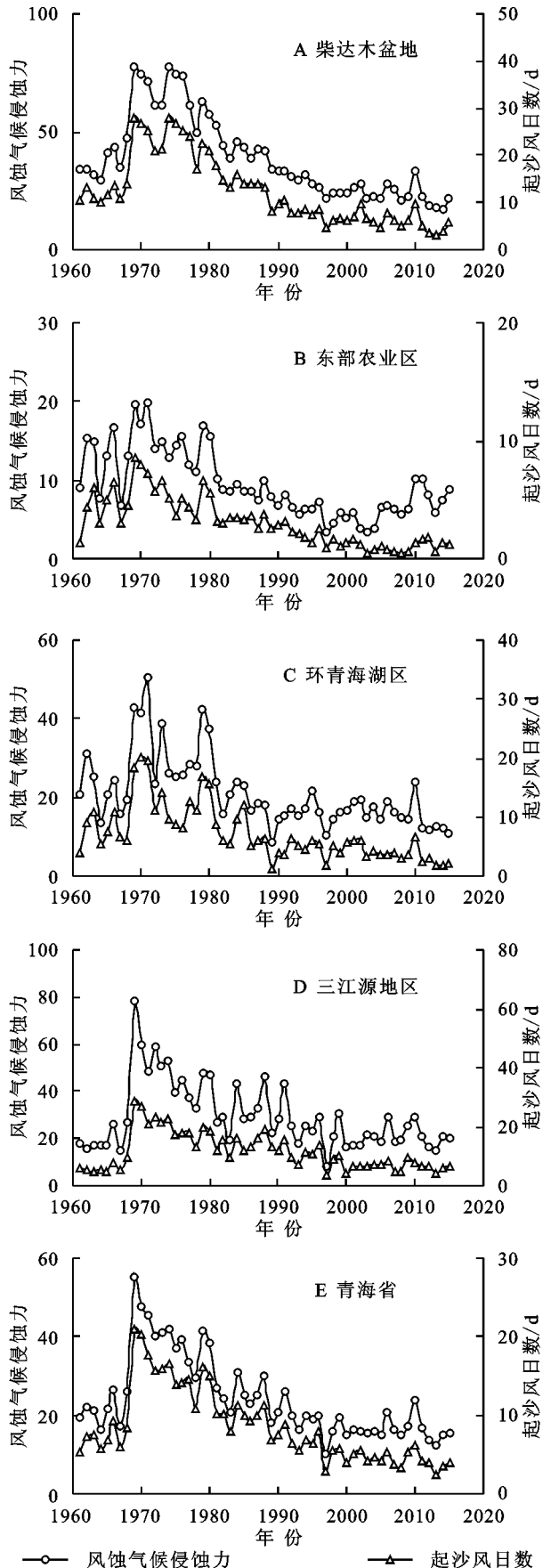


图2 青海省和4个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数及起沙风日数的年际变化

青海省4个生态功能区冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数大小均依次为柴达木盆地>三江源地区>环青海湖区>东部农业区。柴达木盆地多年平均为38.9,12.3 d,最大为77.4,27.8 d,出现在1974年和1969年,最小为17.2,3.0 d出现在2014年和2013年。东部农业区多年平均9.5,3.1 d,最大值为19.9,8.5 d均出现在1969年,最小为3.4,0.4 d,均出现在2003年;环青海湖区多年平均为21.1,7.1 d,最大为50.6,20.1 d,出现在1971年和1970年,最小为8.4,1.1 d出现在1984年和1989年;三江源区平均为29.2,11.5 d,最大均出现在1969年,分别为78.1,28.9 d,最小均出现在1997年,分别为8.0,3.9 d。4个不同功能区风蚀气候侵蚀力最大值是多年平均值的2.0~3.0倍,最小值是多年平均值的1/2~1/3。

2.2 风蚀气候因子指数和起沙风日数的年代际变化特征

青海省4个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数C值和起沙风日数的年代际变化见表1,风蚀气候因子指数C值和起沙风日数在20世纪60—80年代均为正距平,说明这一阶段风蚀气候因子指数偏大和起沙风日数偏多,70年代达到最大值,而后90年代—21世纪的00年代均为负距平(环青海湖区21世纪00年代风蚀气候因子为正距平),表明风蚀气候因子指数处于偏低水平(或基本持平)和起沙风日数偏少,环青海湖区在90年代、其他3区在21世纪00年代达到最低水平。从年代际变化趋势可以看出,从60—70年代(80年代—21世纪00年代)4个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数C值和起沙风日数均呈增大(减少)趋势。

表1 青海省和4个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数及起沙风日数年代际距平变化

地区	项目	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s
全省	风蚀气候因子	7.4	18.9	4.6	-1.7	-2.7
	起沙风日数/d	3.1	8.3	2.7	-0.7	-2.0
柴达木盆地	风蚀气候因子	13.4	33.8	10.3	-4.0	-6.3
	起沙风日数/d	5.6	13.9	4.3	-1.8	-2.4
环青海湖区	风蚀气候因子	8.3	15.4	1.1	-1.2	0.2
	起沙风日数/d	4.6	7.6	1.2	-0.5	-0.8
东部农业区	风蚀气候因子	6.5	7.9	1.8	-0.9	-0.9
	起沙风日数/d	3.0	3.3	1.2	-0.2	-1.1
三江源地区	风蚀气候因子	3.7	20.6	5.2	-1.5	-3.7
	起沙风日数/d	0.4	9.2	3.8	-0.7	-3.2

2.3 风蚀气候因子指数和起沙风日数空间分布

图3给出了青海省冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数及其气候倾向率的空间分布。从图3A和3B可以看出,青海省冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数的空间分布特征完全一致,均整体呈现出从西部向东

部减小的分布特点。以大柴旦、格尔木、曲麻莱和杂多为界分为东西两区,东区的 C 值和起沙风日数大部分分别在 40,10 d 以下,以诺木洪、天峻和刚察为中心分别向南向北逐渐减小;西区的 C 值和起沙风日数均分别大于 40,10 d 以上,从西向东逐渐减小,最大值出现在三江源地区的五道梁和托托河站,C 值高达 135.2,105.5,起沙风日数达到 59.8 d 和 42.2 d,属于青海省气候侵蚀力水平最强和起沙风日数最多的地区,C 值最小值分别出现在三江源地区的玉树站和东部农业区的互助站,分别为 2.3,2.2,而起沙风日数最小出现在东部农业区的同仁和尖扎站,均为 0.2 d。

从图 3C 和 3D 可以看出,青海省冬春季风蚀气候因

子指数和起沙风日数的空间减小趋势基本一致,减小趋势最明显的有 3 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(−29.6 d/10 a 和 −12.0 d/10 a),一个为柴达木盆地的中东部,其中心为诺木洪站(−15.1/10 a 和 −7.5 d/10 a)和天峻站(−13.1/10 a 和 8.4 d/10 a),另一个为三江源地区的最东部,其中心为泽库站(−6.3/10 a 和 −4.4 d/10 a),全省其他地区变化趋势较小或不明显。从青海省冬春季风蚀气候因子指数值和起沙风日数及其气候倾向率空间分布来看,风蚀气候侵蚀力(起沙风日数)最强(最多)的地区与减弱最明显的地区略有差异。

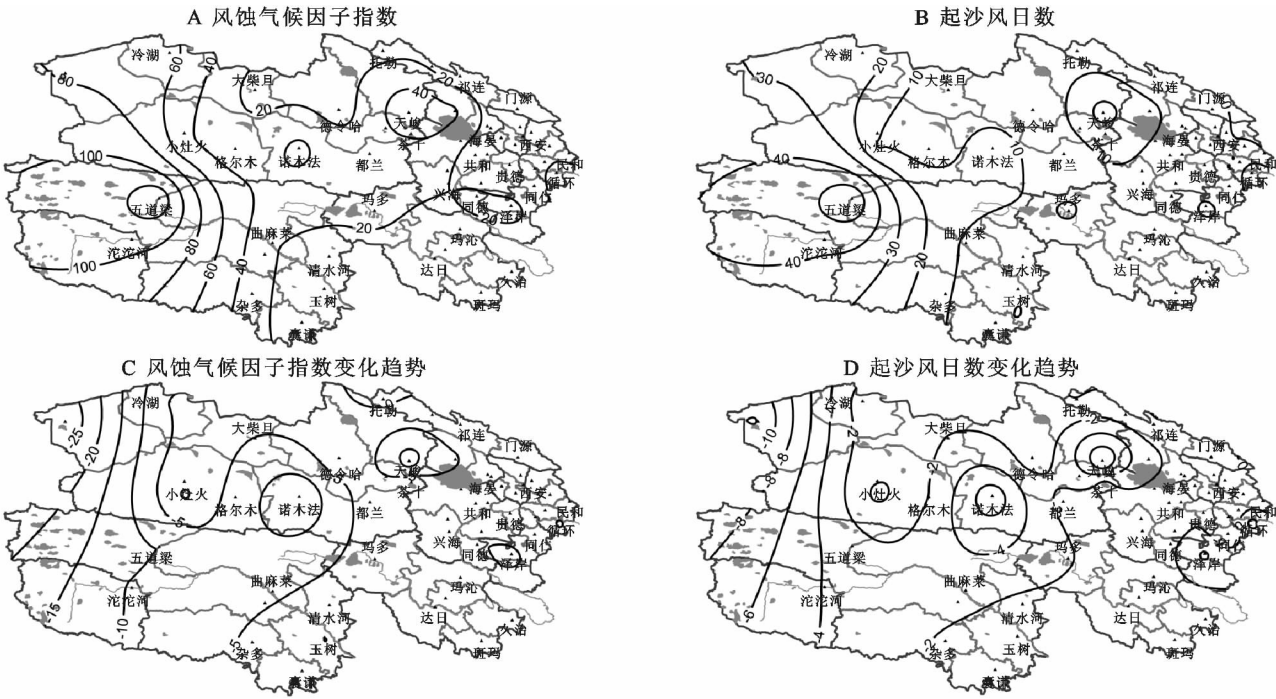


图 3 青海省冬春季风蚀气候因子指数、起沙风日数及其变化趋势的空间分布

对青海省 43 个气象站的冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数及其变化趋势与经度、纬度和海拔高度的线性回归分析来看,冬春季风蚀气候因子和起沙风日数与经度(海拔高度)呈显著负(正)相关,其变化趋势与经度呈显著正相关,与海拔高度和纬度的线性关系均不显著。比较青海省冬春风蚀气候因子指数和起沙风日数的空间分布结构特征,冬春风蚀气候因子指数与起沙风日数的空间分布图相似系数为 0.98,相似程度较高,这说明从平均状况来看冬春风蚀气候因子指数的多寡主要取决于起沙风日数的多少。

2.4 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。应用 Mann-Kendall 检验法^[19]对近 55 a 青海风蚀气候因子指数和起沙风日数进行突变分析。

图 4 为青海省和 4 个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数的突变检验(4 个生态功能区起沙风日数图略)。由图 4 可见,青海省冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数的 UF 和 UB 曲线分别在 1992 年、1997 年,且交点均在信度线之间,且分别在 1995 年和 1999 年进入显著下降趋势。

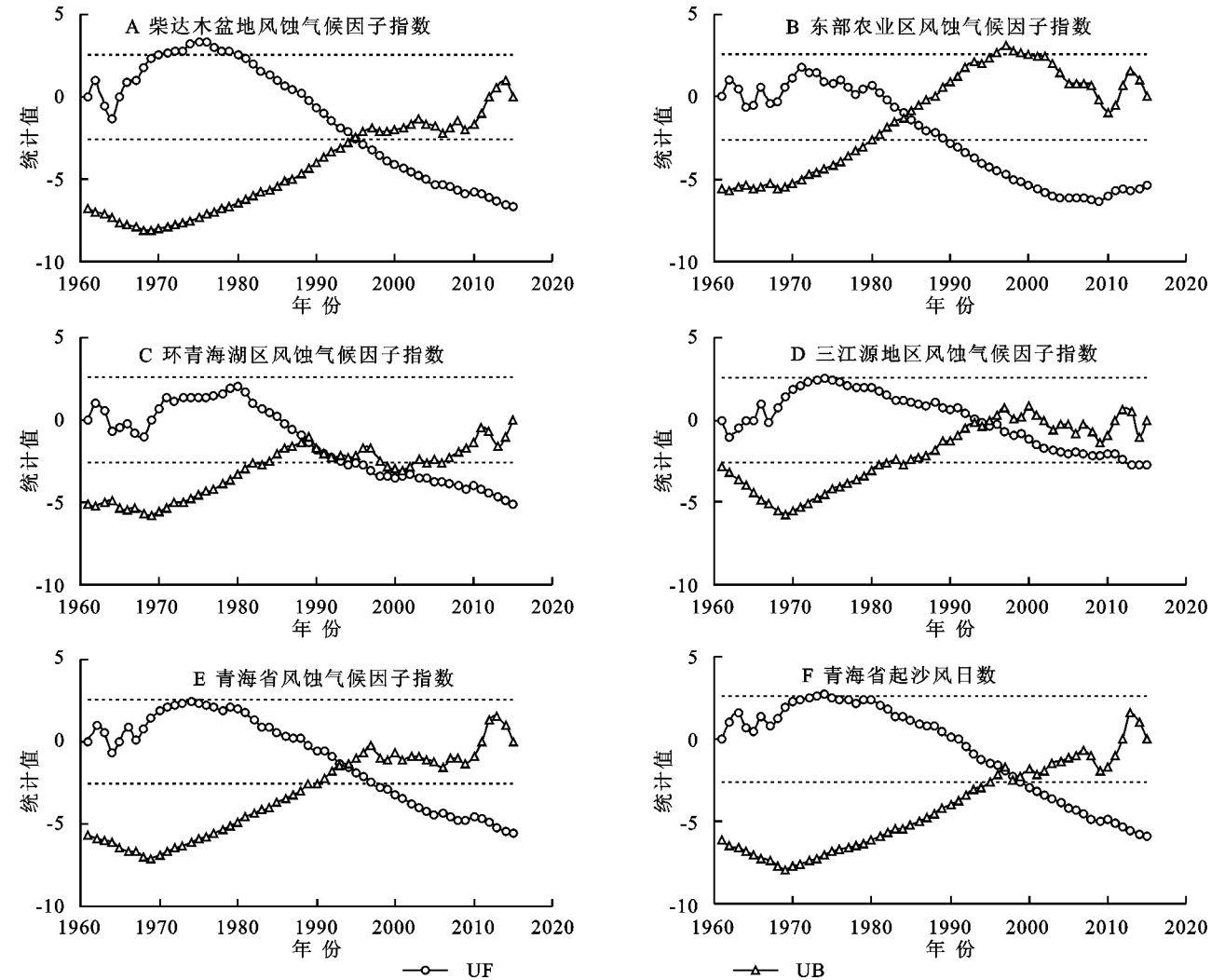
4 个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数的 UF 和 UB 曲线分别在 1994 年、1986 年、1987 年、1995 年出现交点,且交点均在信度线之间,且分别在 1997 年、1988 年、1992 年、2013 年进入显著下降趋势。起沙风日数的 UF 和 UB 曲线分别在 1996 年、1991 年、1996 年、1998 年出现交点,且交点均在信度线之间,且分别在 1997 年、1993 年、1997 年、2008 年进入显著下降趋势。

2.5 气象因子对风蚀气候因子指数的影响分析

为了探讨青海省及 4 个生态功能区冬春季风蚀

气候因子指数变化的成因,主要选择了热力因子(气温 T 和日照时数 RZ)、水分因子(相对湿度 HU 和降水量 R)和动力因子(风速 WS)5 个气象因子,根据相对贡献率公式计算出青海省和 4 个生态功能区各气象因子对风蚀气候因子指数变化的相对贡献率(表 3),结果表明冬春季复相关系数较大(0.96 以上),其贡献率在 93%以上。青海省和 4 个生态功能区风速的变化对冬春季风蚀气候因子指数变化影响均最大,青海省贡献率为 75.1%,柴达木盆地贡献率为最大(89.5%),三江源地区最小为 68.5%,次要影响

因子全省及 4 个生态功能区略有不同,全省为温度(10.1%)和降水量(8.3%),东部农业区和环青海湖区均为降水量,贡献率分别为 17.1%和 16.1%,三江源地区为降水量和温度,贡献率分别为 12.8%和 12.0%,柴达木盆地为相对湿度,贡献率为 4.0%;日照时数对冬春季风蚀气候因子指数变化的影响较小,表明引起青海省和 4 个生态功能区冬春季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;这也表现出在相同风力作用下,不同地表类型因抗风蚀力不同,其风蚀强度亦有明显的差别。



注:UF 为顺序,UB 为逆序。

图 4 青海省和 4 个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数突变检验

表 3 青海省和 4 个功能区各气象因子对风蚀气候因子指数变化的相对贡献率 %

地区	降水量	风速	温度	相对湿度	日照时数
全省	8.3	75.1	10.1	4.6	1.8
柴达木盆地	2.6	89.5	3.3	4.0	0.6
东部农业区	17.1	76.0	3.2	0.9	2.7
环青海湖区	16.1	72.9	6.1	3.3	1.6
三江源地区	12.8	68.5	12.0	2.6	4.2

区冬春季风蚀气候因子指数的影响,建立了青海省和 4 个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数对各气象因子及起沙风日数(QSday)变化响应的统计回归模型和统计检验结果(表 4),从相关系数来看,均在 0.90 以上,所有线性模型都通过了显著水平为 0.05 的 F 检验,说明回归方程能够比较客观地反映风速、气温、降水和相对湿度与冬春季风蚀气候因子指数之间的关系,风速和气温的变化对冬春季风蚀气候因子

为定量评估气象因子对青海省和 4 个生态功能

指数起促进作用,而降水和相对湿度起抑制作用;风速项的系数远大于气温、降水和相对湿度项的系数,说明风速对冬春风蚀气候因子指数的影响远大于

气温、降水和相对湿度的影响。冬春风蚀气候因子指数与风速完全呈正相关,相同条件下风速越大风蚀气候因子指数越强。

表 4 青海省和 4 个功能区风蚀气候因子指数与气象因子及起沙风日数的回归方程和统计检验

地区	回归方程	R^2	绝对误差	相对误差/%	预测值与原始值相关系数
全省	$C=-51.124+32.582WS-0.059R+1.171T$	0.948	1.5	7.4	0.98
	$C=5.771+2.171QS_{\text{day}}$	0.967	1.5	7.0	0.98
柴达木盆地	$C=-62.65+39.422WS-0.448HU$	0.978	2.1	6.0	0.99
	$C=9.058+2.422QS_{\text{day}}$	0.982	1.8	5.2	0.99
东部农业区	$C=-13.622+13.357WS-0.032R$	0.929	0.9	11.6	0.97
	$C=3.769+1.875QS_{\text{day}}$	0.844	1.4	18.0	0.92
环青海湖区	$C=-53.142+31.645WS-0.089R$	0.919	1.9	9.2	0.96
	$C=7.782+1.858QS_{\text{day}}$	0.902	2.2	10.5	0.95
三江源地区	$C=-52.242+37.487WS-0.149R+2.043T$	0.944	2.7	11.4	0.97
	$C=4.708+2.137QS_{\text{day}}$	0.917	3.1	12.3	0.96

从表 3—4 可以看出,影响青海省和 4 个生态功能区冬春风蚀气候因子指数的气象因素存在差异,同一影响因素在不同地区的影响程度也不同。在干旱的柴达木盆地主要受制于风速和相对湿度的作用,东部农业区和环青海湖区则受风速和降水量的影响,三江源地区和全省则受风速、温度和降水等的共同作用与影响,这表明不同地表类型条件下的风速与降水对风蚀气候侵蚀力的影响程度是不同的。

比较青海省冬春风蚀气候因子指数和风速、降水的空间分布结构,冬春风蚀气候因子指数与风速的空间分布图相似系数为 0.91,相似程度较高,这说明从平均状况来看冬春风蚀气候因子指数的多寡主要取

决于风速大小;冬春风蚀气候因子指数和降水的空间分布图的相似系数是-0.59,说明它们的空间分布特征基本相反。

图 5 给出了利用统计模型预测青海省和柴达木盆地冬春风蚀气候因子指数拟合曲线与原始序列曲线(其他 3 个生态功能区图略)。对比可知,以风速、气温和降水及起沙风日数分别为预报因子做的冬春风蚀气候因子指数预测结果与原始序列变化基本一致。对青海省和 4 个生态功能区冬春风蚀气候因子指数预测值与原始值求相关可知,青海省和 4 个生态功能区的相关系数均在 0.95 以上,均远远超过了 0.001 的信度标准。

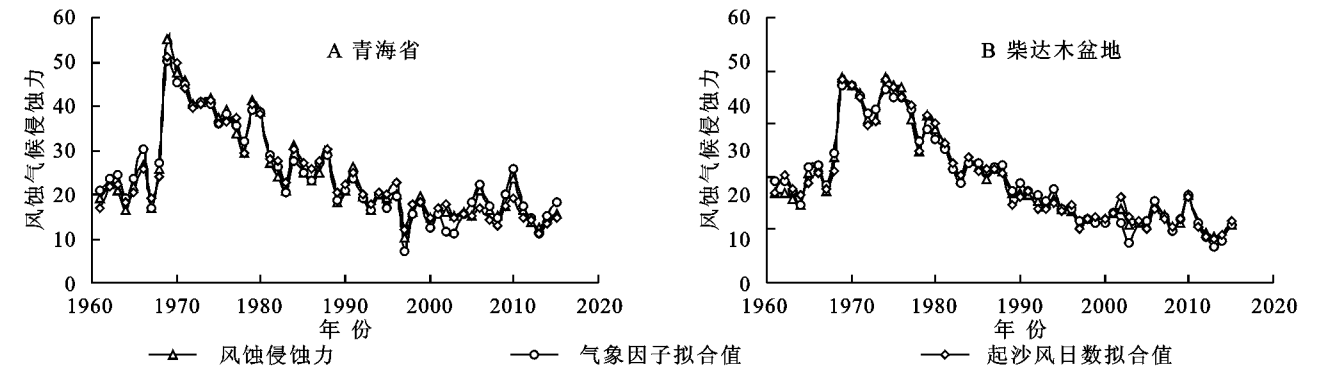


图 5 青海省冬春风蚀气候因子指数对比分析

2.6 气候变化对冬春风蚀气候因子指数发展趋势的影响

生态功能区与生态环境有着密切、直接的联系,地表植被的分布是对气候条件长期适应过程中形成的,气候变化将引起地表的变化进而影响风蚀气候因子指数的发生与发展。气候暖湿化导致土壤含水量增加,抵御风力侵蚀能力提高。风速为风蚀气候因子指数发生的先决条件,也是动力源泉,风速大小的变

化趋势亦直接影响风蚀气候因子指数强弱的发展趋势。对青海省 4 生态功能区 1961—2006 年气象资料分析得出^[22],近 46 a 来柴达木盆地、环青海湖区、东部农业区及三江源地区年平均气温气候倾向率分别为 0.44℃/10 a,0.34℃/10 a,0.24℃/10 a,0.32℃/10 a,柴达木盆地增暖最为明显,其增幅明显高于全省乃至全国。年降水量变化的空间差异较为明显,其中柴达木盆地年降水量呈现增多趋势,其气候倾向率达 6.67

mm/10 a,通过了 0.05 的显著性检验;东部农业区年降水量则呈现减少趋势,气候倾向率为 $-5.23 \text{ mm}/10 \text{ a}$;环青海湖区与三江源地区年降水量变化呈微弱的增加趋势。表明在青海省普遍变暖的前提下,除东部农业区以外的大部分地区降水呈现增多趋势,说明青海省总体气候变化具有暖湿化趋势,特别是环境脆弱区的柴达木盆地和三江源地区暖湿化趋势比较明显。王慧^[23]和田莉^[24]等分别对青海省和西北地区平均风速变化分析表明,发现风速均呈整体显著下降趋势,气候变率均为 $-0.12 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$;2000—2015 年青海省 NDVI 呈波动性缓慢上升趋势,变化率为 $0.012/10 \text{ a}$,东部农业区和柴达木盆地增加趋势显著^[25],植被覆盖变化受气候和人类活动的共同影响,大部分地区植被未来呈改善趋势^[26]。从以上综合分析来看,青海省和 4 个生态功能区气候向暖湿化发展、植被覆盖缓慢上升及风速的下降趋势,地表湿度随之增大,从而增强了地表土壤颗粒物之间的内聚力和拖曳系数,这样地表沙粒的临界起动风速增加,风沙发生发展的几率就会大大减少,加之多年来退耕还林(或退牧还草)和三江源生态环境保护工程的实施,天然植被保护力度加大,致使风沙天气出现次数和强度明显减弱,这些都将为防治风蚀气候因子指数的发生提供有利条件。

3 结论

(1) 青海省和 4 个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数整体上呈现显著的减小趋势,二者的年际和年代际波动变化完全一致。

(2) 青海省冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数的空间分布特征完全一致,均整体呈现出从西部向东部减小的分布特点。以大柴旦、格尔木、曲麻莱和杂多为界分为东西两区,东区的 C 值和起沙风日数大部分分别在 40,10 d 以下,以诺木洪、天峻和刚察为中心分别向南北逐渐减小;西区的 C 值和起沙风日数均分别大于 40,10 d,从西向东逐渐减小。

(3) 青海省冬春季风蚀气候因子指数和起沙风日数分别在 1992 年、1997 年发生突变,且分别在 1995 年和 1999 年进入显著下降趋势。

(4) 影响青海省和 4 个生态功能区冬春季风蚀气候因子指数的气象因素存在差异,同一影响因素在不同地区的影响程度也不同。在干旱的柴达木盆地主要受制于风速的作用,东部农业区和环青海湖区则受风速和降水量的影响,三江源地区 and 全省则受风速、温度和降水等的共同作用与影响。

(5) 青海省和 4 个生态功能区气候暖湿化的发展、植被覆盖缓慢上升及风速的显著下降趋势,将为防治风蚀气候因子指数的发生提供有利条件。

(6) 青海省整体冬春季风蚀气候侵蚀力不算很严重。风蚀气候侵蚀力是多种因素共同作用的结果,除气候因子外,还与土壤含水量、粗糙度、植被覆盖状况等有关。本文仅分析了影响风蚀气候侵蚀力的气候因子,其他影响因素有待在今后的研究过程中继续开展。

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] 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.
- [3] 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(S1):57-60.
- [4] 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.
- [5] 蒋冲,陈爱芳,喻小勇,等. 黄土高原风蚀和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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 吴成永,陈克龙,曹广超,等. 近 30 年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J]. 地理研究,2018,37(4):717-730.
- [9] 张胜邦,董旭,刘玉璋,等. 柴达木盆地东南部土壤风蚀研究[J]. 中国沙漠,1999,19(3):293-295.
- [10] 贺大良,邹本功,李长治,等. 地表风蚀物理过程风洞试验的初步研究[J]. 中国沙漠,1986,6(1):25-31.
- [11] 申彦波,沈志宝,杜明远,等. 风蚀起沙的影响因子及其变化特征[J]. 高原气象,2005,24(4):611-616.
- [12] 王雪芹,张元明,张伟民,等. 古尔班通古特沙漠生物结皮对地表风蚀作用影响的风洞试验[J]. 冰川冻土,2004,26(5):632-638.
- [13] 胡霞,刘连友,严平,等. 不同地表状况对土壤风蚀的影响:以内蒙古太仆寺旗为例[J]. 水土保持研究,2006,13(4):116-119.
- [14] 王翔宇,原鹏飞,丁国栋,等. 不同植被覆盖防治土壤风蚀对比研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):38-41.
- [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] 李森,高尚玉,杨萍,等. 青藏高原冻融荒漠化的若干问题:以藏西—藏北荒漠化区为例[J]. 冰川冻土,2005,27(4):476-485.

岩区微度侵蚀所占比例分别为 74.53% 和 66.19%，是 4 种岩组中所占比例最大的，但石灰岩区剧烈侵蚀比例最高为 0.52%，白云岩区域剧烈侵蚀比例最低为 0.23%，说明石灰岩区域虽然总体侵蚀程度不高，但是局部侵蚀较为严重。

普安县土壤侵蚀景观格局特征来说，4 种岩组区域土壤侵蚀景观基质都是微度侵蚀。微度侵蚀具有斑块分布较为集中，斑块形状较为复杂，斑块间的差异性较大，异质性程度不高，说明微度侵蚀受到外界干扰不严重；相比剧烈侵蚀，斑块分布较远，且形状较为规整，斑块破碎度、异质性程度较高，受到外界影响程度较严重。

普安县不同地层岩组土壤侵蚀景观格局存在差异，由研究分析可知，白云岩区景观最为破碎，具有较高的异质性，石灰岩区侵蚀斑块分布较为集中；通过 Shannon 均匀度指数分析可知，玄武岩区具有最高的多样性，斑块间的信息交流最为频繁。

参考文献：

- [1] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [2] 蒋学纬,周正立,李凯荣. 景观生态学原理在流域规划中的应用[J]. 西北林学院院报,2003,18(2):112-115.
- [3] 孟庆华,傅伯杰. 景观格局与土壤养分流动[J]. 水土保持学报,2000,14(3):116-121.
- [4] 傅博杰,陈利顶,王军. 土地利用结构与生态过程[J]. 第四纪研究,2003,23(3):247-255.
- [5] 刘立文,邢立新,郭青霞,等. 基于景观格局分析的土壤侵蚀时空关系研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(25):7443-7449.
- [6] 朱惇,韩小波,李超. 基于景观空间格局分析的土壤侵蚀时空演变研究[J]. 人民长江,2014,45(5):71-74.
- [7] 杨翠林. 农牧交错带小流域景观格局与土壤侵蚀耦合关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [8] 杨泽. 兴县土壤侵蚀及景观格局研究[D]. 山西晋中:山西农业大学,2015.
- [9] 张乃夫. 安徽新安江流域景观格局特征及土壤侵蚀评价[D]. 山东泰安:山东农业大学,2014.
- [10] 傅伯杰,赵文武,陈利顶,等. 多尺度土壤侵蚀评价指数[J]. 科学通报,2006,51(16):1936-1943.
- [11] 向万丽,高华端,李兴春. 清镇市土壤侵蚀强度景观空间格局分析[J]. 中国水土保持,2012(5):40-43,76.
- [12] 谭秋,周梦维,王华,等. 贵州连续性白云岩小流域的石漠化景观格局[J]. 生态学杂志,2009,28(8):1613-1618.
- [13] 谭秋. 贵州连续性石灰岩小流域石漠化景观格局研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,2009,28(3):217-222.
- [14] 唐睿,王晓红,舒天竹,等. 喀斯特山区土壤侵蚀垂直景观格局分析[J]. 山地农业生物学报,2017,36(1):30-35.
- [15] 何鹏,张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J]. 林业科学研究,2009,22(4):470-474.
- [16] 布仁仓,胡远满,常禹,等. 景观指数之间的相关分析[J]. 生态学报,2005,25(10):2764-2775.
- [17] 李阳兵,邵景安,杨华,等. 重庆市土壤侵蚀空间格局研究[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2007,24(4):12-15.
- [18] 中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册[M]. 北京:气象出版社,2011.
- [19] 刘多森,汪纵生. 可能蒸散量动力学模型的改进及其对辨识土壤水分状况的意义[J]. 土壤学报,1999,33(1):21-27.
- [20] 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.
- [21] 顾骏强,施能,薛根元. 近 40 年浙江省降水量、雨日的气候变化[J]. 应用气象学报,2002,13(3):322-329.
- [22] 陈晓光,李林,朱西德,等. 青海省气候变化的区域性差异及其成因研究[J]. 气候变化研究进展,2009,5(5):249-254.
- [23] 王慧. 近 50 年青海省风速的变化特征分析[J]. 科技资讯,2013(1):130-131.
- [24] 田莉,奚晓霞. 近 50 年西北地区风速的气候变化特征[J]. 安徽农业科学,2011,39(32):20065-20068.
- [25] 代子俊,赵霞,李冠稳,等. 2000—2015 年青海省植被覆盖的时空变化特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(7):1-12.
- [26] 李璠,徐维新. 2000—2015 年青海省不同功能区 NDVI 时空变化分析[J]. 草地学报,2017,25(4):701-710.

(上接第 30 页)