

近 39 年东北地区风蚀气候侵蚀力及其对气候变化的响应

杨婉蓉^{1,2}, 刘志娟¹, 高伟达³, 任图生³, 赵锦¹, 杨晓光¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 湖南省常德市气象局,
湖南 常德 415000; 3. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要: 为评估东北地区风蚀气候侵蚀力及其对区域气候变化的响应, 基于东北地区 66 个气象站点 1981—2019 年气象数据, 采用风蚀气候侵蚀力计算方法, 解析东北地区风蚀气候侵蚀力空间分布特征、时间变化趋势及其对气候变化的响应。结果表明: 近 39 年(1981—2019 年), 东北地区风速和相对湿度呈下降趋势, 降水量呈波动增加趋势, 气温呈上升趋势; 风蚀气候侵蚀力整体呈西高东低趋势, 全区平均为 18.8, 空间变化范围为 0.9~63.8; 春、夏、秋和冬季的风蚀气候侵蚀力分别为 10.4、1.4、4.1 和 2.9; 全区年风蚀气候侵蚀力平均每 10 年减小 3.71, 春、夏、秋和冬季平均每 10 年分别减小 2.05、0.24、0.96 和 0.44; 风蚀气候侵蚀力有明显的空间性(西高东低)和季节性(春季高, 夏季低)。39 年来, 全年及四季的风蚀气候侵蚀力整体呈下降趋势。研究结果可为不同农业种植区土壤风蚀防治提供理论依据。

关键词: 风蚀气候侵蚀力; 东北地区; 气候因子; 风速; 降水量

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)03-0132-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.018

Wind Erosion Climatic Erosivity and Its Response to Climate Change in Northeast China in Recent 39 Years

YANG Wanrong^{1,2}, LIU Zhijuan¹, GAO Weida³, REN Tusheng³, ZHAO Jin¹, YANG Xiaoguang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; 2. Changde Meteorological Bureau of Hunan Province, Changde, Hunan 415000;
3. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: To evaluate the wind erosion climatic erosivity and its response to regional climate change in Northeast China, based on the weather data at the 66 meteorological stations in Northeast China from 1981 to 2019. The spatio-temporal characteristics of wind erosion climate erosivity and its response to climate change were analyzed by using the calculation method proposed by FAO. The results showed that in the past 39 years (1981—2019), the wind speed and relative humidity in Northeast China showed the downward trends, the precipitation showed a fluctuating increase trend, and the temperature showed an increasing trend. The overall trend of wind erosion climate erosivity was high in the west and low in the east, with a spatial average of 18.8 and a spatial range of 0.9 to 63.8. The wind erosion climatic erosivity in spring, summer, autumn, and winter were 10.4, 1.4, 4.1, and 2.9, respectively. The annual wind erosion climatic erosivity in the whole region decreased by 3.71 per decade on average, and decreased by 2.05, 0.24, 0.96 and 0.44 per decade in spring, summer, autumn and winter, respectively. The wind erosion climatic erosivity had obvious spatial character (high in the west and low in the east) and seasonal character (high in spring and low in summer). In the past 39 years, the annual and seasonal wind erosion climatic erosivity all showed the downward trends. This study provides theoretical basis for soil wind erosion control in different agricultural planting areas.

Keywords: wind erosion climatic erosivity; Northeast China; climatic factor; wind speed; precipitation

东北地区是我国粮食主产区之一, 东北黑土生产 是导致东北地区黑土退化的主要原因之一^[1]。在全
力较高, 是宝贵且不可再生的农业资源, 而土壤风蚀 球气候变化背景下, 东北地区是我国气候变化最敏感

收稿日期: 2022-10-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500701, 2019YFA0607402); 中国农业大学“2115 人才工程”项目

第一作者: 杨婉蓉(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事气候变化对农业影响研究。E-mail: 18773615552@163.com

通信作者: 刘志娟(1985—), 女, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事气候变化对作物体系的影响研究。E-mail: zhijuanliu@cau.edu.cn

地区之一,近几十年来,温度、降水量和风速等气候因子均呈现出明显的变化^[2-3],而气候因子是土壤风蚀发生的决定性因素之一,气候条件的变化将影响土壤风蚀的发生^[4]。风蚀气候侵蚀力是用于表述气候条件对土壤风蚀影响的基本指标^[5]。风蚀气候侵蚀力在美国、中国和其他地区均有广泛应用,其时空变化特征研究对土壤风蚀的治理具有重要的意义^[6]。最早的风蚀气候侵蚀力计算方法由 Chepil 等^[7]提出,经过 FAO^[8] 和 Skidmore^[9] 订正后被广泛应用。Chepil 等^[7]的计算方法虽简单,但在干旱地区应用有很大的局限性;Skidmore^[9]修正公式采用的指标较为复杂,数据难以获取;而 FAO^[8]的公式计算简单,准确性较高,因此,在中国干旱半干旱地区的研究一般采用 FAO 修正后的公式^[10]。中国对于风蚀气候侵蚀力的研究主要集中在北部和西北部,李达净等^[11]研究表明,1981—2010 年,中国北方风蚀气候侵蚀力为 10~100;Yang 等^[12]研究表明,1961—2012 年,中国北方风蚀气候侵蚀力为 2~166;还有研究^[13-14]指出,中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力具有明显的季节性。影响风蚀气候侵蚀力变化的因子包括风速、降水量和湿度等,中国干旱半干旱地区年际风蚀气候侵蚀力下降是风速、降水量等气候因子综合作用的结果^[12,15]。但是,针对东北地区风蚀气候侵蚀力分析的研究却较为缺乏,因此,研究东北地区风蚀气候侵蚀力的变化及其对气候变化的响应,对气候变化背景下东北地区黑土地研究具有重要意义。鉴于此,将以东北地区作为研究区域,针对东北地区不同农业种植区,采用 FAO^[8]风蚀气候侵蚀力公式,分析东北地区近 40 年来风蚀气候侵蚀力时空变化特征及对气候变化的响应,以期对东北不同农业种植区的土壤风蚀研究与防治、保护性耕作措施的选择以及黑土地保护等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

研究区域为中国东北地区(38°43′13″—53°33′00″N,118°50′06″—135°02′30″E),即黑龙江、吉林和辽宁省。参照《中国农业自然资源和农业区划》^[16]中的农业种植区域的划分,将东北地区划分为 7 个区域(图 1),即辽河平原区(I区)、辽西北地区(II区)、长白山区(III区)、松嫩平原区(IV区)、黑吉西部区(V区)、三江平原区(VI区)、大小兴安岭区(VII区)。

辽河平原区(I区)位于辽宁省中西部,包括以辽河流域为主体的中部冲积平原,属于温带大陆性季风气候。长城沿线区(II区)包括辽宁省西部,属于温带大陆性季风气候。长白山区(III区)包括吉林省东部、辽宁省东部和黑龙江省东南部,属于温带湿润性季风气候。

松嫩平原区(IV区)位于黑龙江省西南部和吉林省西部,属温带大陆性半湿润、半干旱季风气候。黑吉西部区(V区)位于黑龙江省和吉林省西部,属于温带季风气候。三江平原区(VI区)位于黑龙江省东北部,属于寒温带湿润—半湿润大陆性季风气候。大小兴安岭区(VII区)位于黑龙江省东北部,属于北温带大陆性季风气候。

气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>),包括研究区域 66 个站点 1981—2019 年的逐日地面气象观测数据,气象要素包括平均气温、降水量、平均相对湿度和平均风速。将 3—5 月划分为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季。

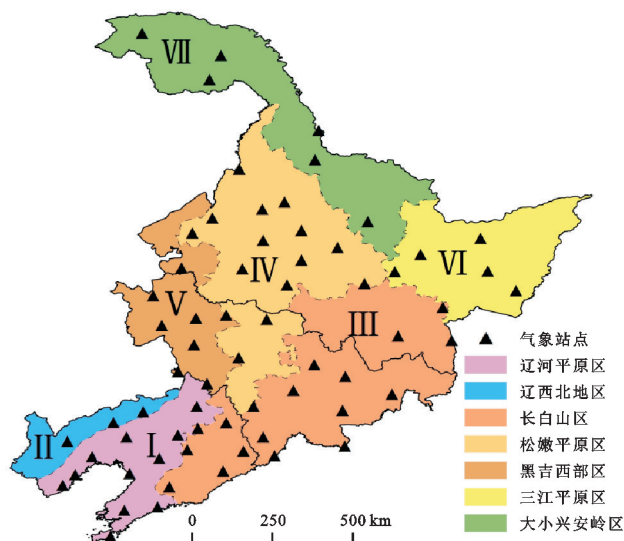


图 1 研究区域与 7 个分区分布

1.2 研究方法

1.2.1 风蚀气候侵蚀力计算方法 风蚀气候侵蚀力即土壤风蚀方程中的气候因子,是评估区域风蚀气候条件的重要指标。采用 FAO^[8]提出的风蚀气候侵蚀力计算方法,利用风速、降水量、温度和湿度进行计算。

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

$$u = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (2)$$

$$ETP_i = 0.19(20 + T_i)2(1 - r_i) \quad (3)$$

式中: C 为风蚀气候侵蚀力(无量纲); u 为 2 m 高度处的月平均风速(m/s); ETP_i 为月潜在蒸发量(mm); P_i 为月降水量(mm); d 为月天数; u_{10} 为气象台站测定的 10 m 风速(m/s); z 为 10 m; T_i 为月平均气温(°C); r_i 为月平均相对湿度(%)。

1.2.2 时间变化趋势分析方法 采用最小二乘法计算风蚀气候侵蚀力的时间变化趋势,计算公式为:

$$y = a + bt \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: y 为样本; t 为时间(年); b 为线性回归系数, $b>0$ 表示 y 随时间变化呈增加趋势, $b<0$ 表示呈减小趋势^[17]。

2 结果与分析

2.1 东北地区气候资源时空变化特征

由图 2 可知,近 39 年(1981—2019 年),东北地区各分区各气候要素年均值的空间分布特征和时间变化趋势。近 39 年,东北地区年平均风速为 2.0 m/s,全区变化范围为 1.0~3.0 m/s。高值区位于辽西北地区、黑吉西部区和三江平原区,低值区位于长白山区和大小兴安岭区。东北大部分地区年平均风速呈减小趋势,全区平均每 10 年减小 0.1 m/s。

全区年平均降水量为 595.5 mm,空间分布呈现出东南高,西北低的趋势,全区变化范围为 376.3~1 061.9 mm,高值区位于长白山区,低值区位于黑吉西部区。年降水量呈波动变化趋势,全区平均每 10 年增加 3.3 mm,但区域间变化趋势不一致,位于北部的 3 个区域(松嫩平原区、三江平原区和大小兴安岭区)呈增加趋势,而其余 4 个区域:黑吉西部区和辽河平原区呈减少趋势,辽西北地区 and 长白山区呈微弱的减少趋势,每 10 年减少 1.0 mm。

全区年平均气温为 5.3 ℃,空间分布呈随纬度增加而下降的趋势,全区变化范围为 -3.8~11.4 ℃。年平均气温全区均呈上升趋势,全区平均每 10 年升高 0.3 ℃。

全区年平均相对湿度为 65%,空间分布呈现出东高西低的趋势,全区变化范围为 51%~73%,高值区位于三江平原区、长白山区和大小兴安岭区,低值区位于辽西北地区和黑吉西部区。年平均相对湿度大部分地区呈减小趋势,全区平均每 10 年减小 0.4%,仅三江平原区呈增加趋势。

由图 3 和表 1 可知,近 39 年(1981—2019 年),东北地区各分区各气候要素各季节的均值空间分布特征和时间变化趋势。近 39 年来,东北地区风速春季最大(平均 2.5 m/s),夏季最小(平均 1.8 m/s)。各季节平均风速除辽西北地区呈增加趋势外,其余地区均呈减小趋势,三江平原区减小趋势最大。各季节相比,7 个区域春季平均风速减小趋势最大,冬季平均风速减小趋势最小。

降水量夏季较大(平均 382.0 mm),冬季较小(平均 18.3 mm)。东北地区 7 个区域各季节降水量变化趋势差别较大;松嫩平原区和大小兴安岭区各季节降水量均呈现增加趋势。各季节相比,除松嫩平原区和大小兴安岭区秋季增加趋势最小外,其余地区均为夏季减小趋势最大。

平均气温夏季高(平均 21.4 ℃),冬季低(平均

-13.1 ℃)。7 个区域各季节平均气温均呈现上升趋势。各季节相比,除松嫩平原区秋季气温上升趋势最大外,其余地区均为春季,各地区冬季的气温上升趋势最小。

平均相对湿度夏季较高(平均 75%),春季较低(平均 54%)。各区域的季节平均相对湿度变化趋势差别较大。各季节相比,秋季平均相对湿度减小趋势最小,冬季平均相对湿度减小趋势较大。

2.2 东北地区年风蚀气候侵蚀力时空变化特征

由图 4a 可知,近 39 年(1981—2019 年),东北地区各分区年总风蚀气候侵蚀力的平均值。全区平均值为 18.8,空间分布呈西高东低的趋势,变化范围为 0.9~63.8。高值区主要位于黑吉西部区、辽西北地区和辽河平原区,低值区主要位于长白山区和大小兴安岭区。其中,黑吉西部区风蚀气候侵蚀力平均值为 36.1,变化范围为 19.3~58.9;辽西北地区风蚀气候侵蚀力平均值为 31.1,变化范围为 20.7~50.2;辽河平原区风蚀气候侵蚀力平均值为 27.0,变化范围为 13.5~63.8;松嫩平原区风蚀气候侵蚀力平均值为 21.0,变化范围为 6.1~32.0;三江平原区风蚀气候侵蚀力平均值为 18.5,变化范围为 7.4~26.4;长白山区风蚀气候侵蚀力平均值为 7.4,变化范围为 0.9~26.6;大小兴安岭区风蚀气候侵蚀力平均值为 6.5,变化范围为 3.2~12.3。

由图 4b 可知,近 39 年(1981—2019 年),东北地区各分区年总风蚀气候侵蚀力的变化趋势。近 39 年,东北大部分地区风蚀气候侵蚀力呈减小趋势,全区平均每 10 年减小 3.71。全年风蚀气候侵蚀力减小趋势较大的区域主要为黑吉西部区和辽河平原区,减小趋势较小的区域主要在长白山区。黑吉西部区、辽河平原区、三江平原区、松嫩平原区、辽西北地区、大小兴安岭区和长白山区平均每 10 年风蚀气候侵蚀力分别减小 8.86,5.92,5.06,5.02,1.13,1.06 和 0.18。

2.3 东北地区不同季节风蚀气候侵蚀力时空变化特征

由图 5 可知,近 39 年,东北地区各分区不同季节风蚀气候侵蚀力均值。春季、夏季、秋季和冬季全区 39 年平均风蚀气候侵蚀力分别为 10.4,1.4,4.1 和 2.9。可见,东北地区风蚀气候侵蚀力春季最大,夏季最小。春季全区平均风蚀气候侵蚀力的变化范围为 0.6~29.5,总体呈西部大,东部小的空间分布特征。夏季全区平均风蚀气候侵蚀力的变化范围为 0.03~5.7,区域间差异较小。秋季全区平均风蚀气候侵蚀力的变化范围为 0.1~15.8,西部和东部部分地区风蚀气候侵蚀力较大。冬季全区平均风蚀气候侵蚀力的变化范围为 0.1~22.4,西南部地区的辽河平原区、辽西北地区和黑吉西部区平均风蚀气候侵蚀力较大。

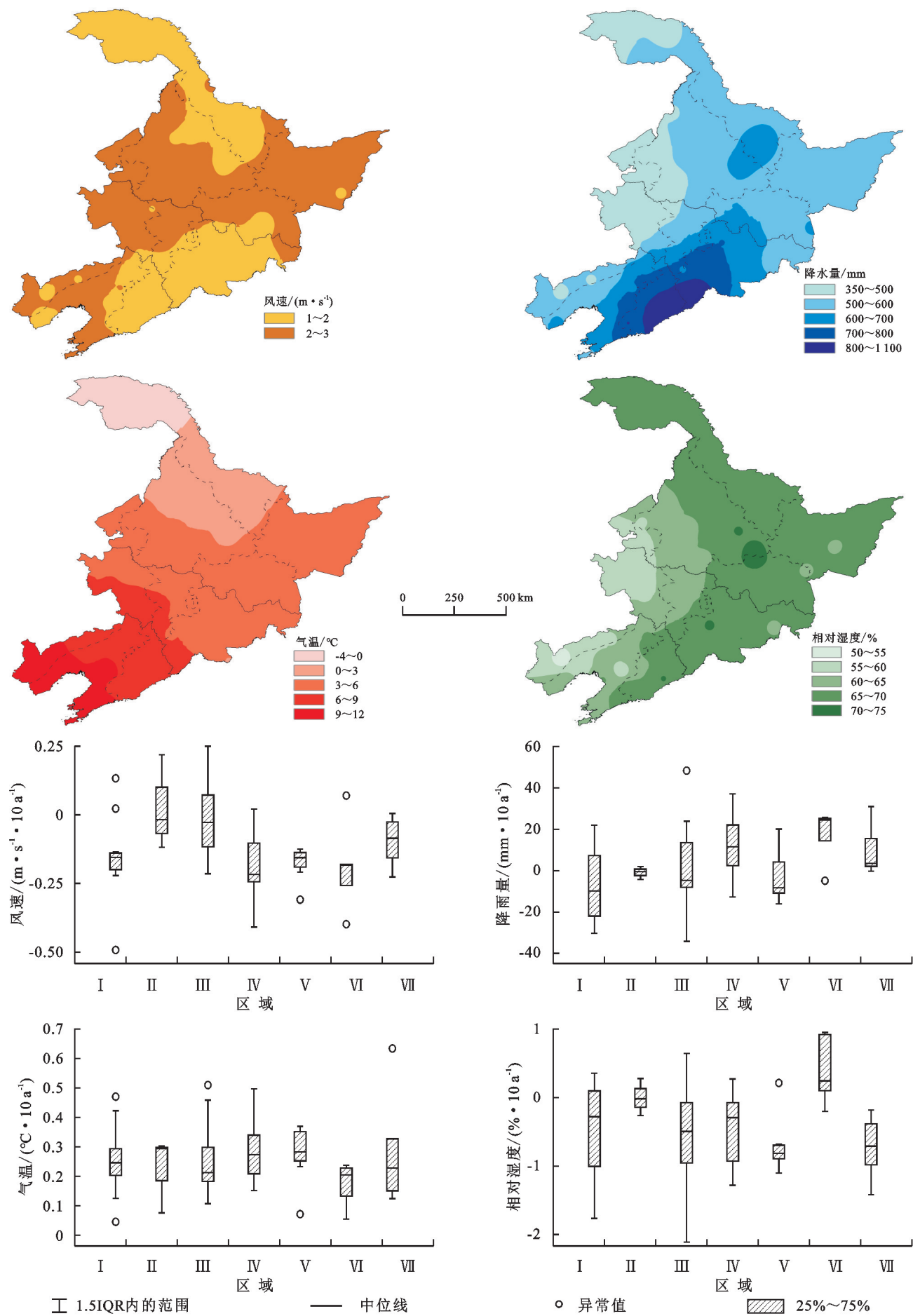


图 2 1981—2019 年东北地区各分区气候要素年均值及其变化趋势

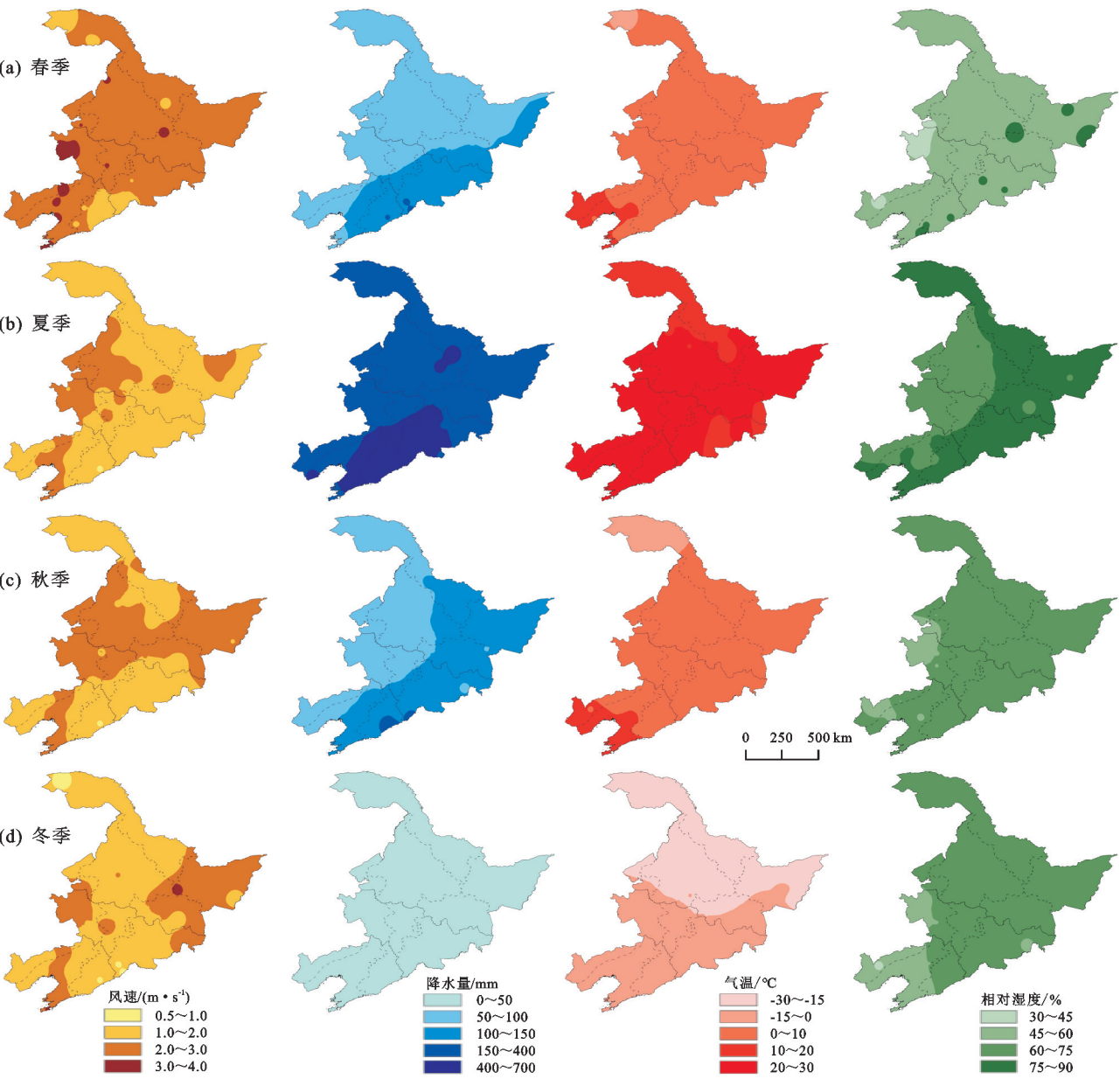


图 3 1981—2019 年东北地区各分区气候要素季节均值

表 1 1981—2019 年东北地区各分区气候要素季节变化趋势均值

气候要素	季节	I 区	II 区	III 区	IV 区	V 区	VI 区	VII 区	全区
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)	春	-0.20	0.01	-0.05	-0.23	-0.22	-0.20	-0.11	-0.15
	夏	-0.14	0.04	-0.02	-0.17	-0.15	-0.17	-0.08	-0.10
	秋	-0.15	0.01	-0.04	-0.20	-0.19	-0.21	-0.11	-0.13
	冬	-0.15	0.05	0.01	-0.13	-0.15	-0.18	-0.08	-0.09
降水量/($\text{mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)	春	3.5	3.8	5.4	6.5	7.0	11.5	6.0	5.9
	夏	-7.8	-2.8	-9.1	2.1	-13.4	-1.7	1.9	-4.9
	秋	4.2	-2.7	0.7	0.2	1.7	3.1	0.1	-0.2
	冬	1.8	0.7	3.0	2.6	2.2	4.0	1.3	2.4
气温/($^{\circ}\text{C} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)	春	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
	夏	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
	秋	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3
	冬	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0	0.1	0.1
相对湿度/($\% \cdot 10 \text{ a}^{-1}$)	春	-1.1	-0.8	-0.7	-0.1	-1.0	0.7	-0.5	-0.5
	夏	-0.5	0.1	-0.4	-0.1	-0.6	0.7	-0.3	-0.3
	秋	-0.1	0.3	-0.1	-0.5	-0.7	0.6	-0.2	-0.2
	冬	-0.3	0.5	-0.9	-1.0	-0.5	-0.4	-1.9	-0.8

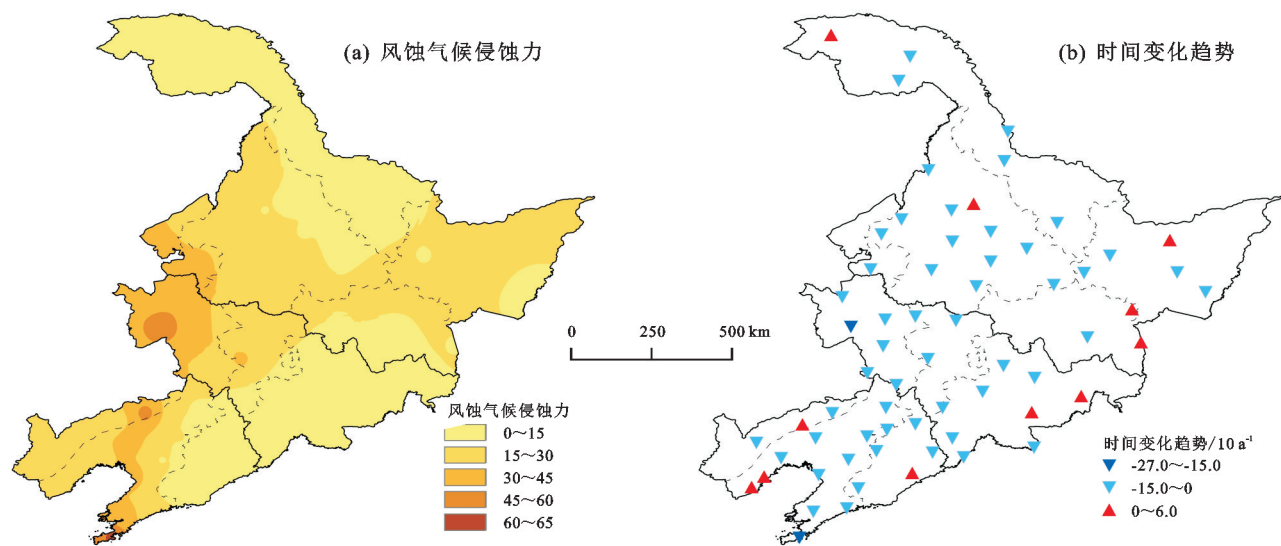


图 4 1981—2019 年东北地区各分区风蚀气候侵蚀力年均值及时间变化趋势

由图 5 可知,近 39 年,东北地区各分区不同季节风蚀气候侵蚀力的变化趋势。近 39 年,东北地区全区四季风蚀气候侵蚀力均呈减小趋势,春季、夏季、秋季和冬季平均每 10 年分别减小 2.05,0.24,0.96 和 0.44。春季风蚀气候侵蚀力减小趋势最大,其次为秋季,夏季减小趋势最小。春季风蚀气候侵蚀力减小趋势较大的区域主要为黑吉西部区和松嫩平原区。夏季在辽西北地区,减小趋势较大的区域主要为辽河平原区。

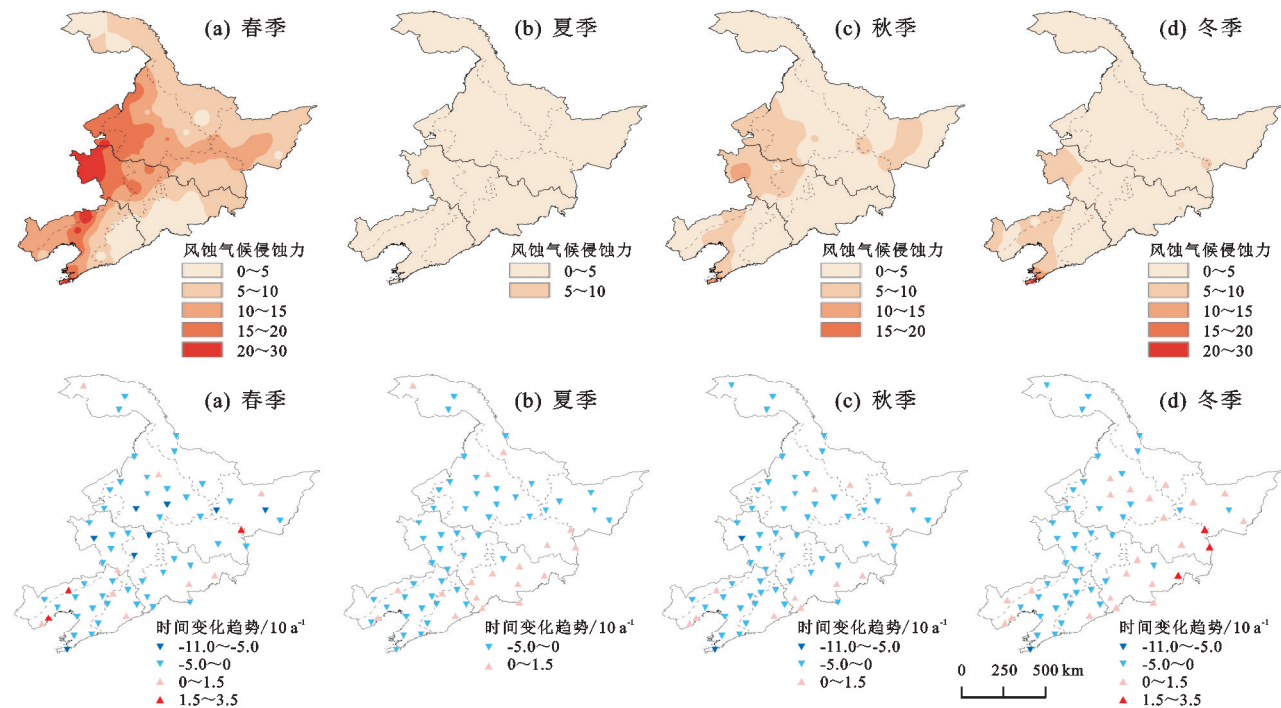


图 5 1981—2019 年东北地区各分区各季节风蚀气候侵蚀力平均值及时间变化趋势

3 讨论

东北地区风蚀气候侵蚀力分布具有明显的空间与季节差异性,西部风蚀气候侵蚀力高,特别是黑吉西部区风速大、降水少、平均气温高和平均相对湿度低的气候条件更容易发生风蚀。本文研究结果与任景全等^[18]关于吉林省风蚀气候侵蚀力由西部向东部逐渐递减的空间分布规律基本一致。东北地区春季风蚀气候侵蚀

力为四季中最高,春季风速大、降水少和相对湿度较低的气候条件容易引起风蚀,与杨新等^[19]的研究结果一致。前人^[12]研究结果表明,干旱、半干旱和半湿润区的风蚀气候因子分别为 56.2,48.1,24.6,风蚀较严重区一般>50。本研究得出,东北地区近 39 年平均风蚀气候侵蚀力为 18.8,说明总体上东北地区气候条件不易发生风蚀,但对于西部地区存在风蚀气候侵蚀

力 >50 的站点,如通榆、彰武和大连。

东北地区风蚀气候侵蚀力的下降是风速、降水量、温度和湿度等综合作用的结果。本研究表明,年风蚀气候侵蚀力高值区分布与年平均风速高值区有高度的重合,说明风速是主要的驱动因子,而在风速高值区出现西部地区风蚀气候侵蚀力大于东部地区,是由于东部地区降水量大,相对湿度相对较高。与我国干旱半干旱地区的研究^[20-22]结果类似。近 39 年来,东北地区平均风速呈减小趋势且春季风速下降趋势最大,是导致东北地区风蚀气候侵蚀力下降尤其在春季下降较快的主要原因,与前人^[23-24]研究结果一致。

东北地区在春秋存在冻融过程,一定程度上影响东北地区风蚀气候侵蚀力^[25]。因此,在未来的研究中,还应当考虑冻融过程对土壤风蚀的影响。另外,风蚀气候侵蚀力只从气候条件的角度来考虑,实际土壤风蚀还受到植被覆盖、土壤类型、水分情况和耕作措施等因素的影响,未来还需要在风蚀气候侵蚀力的基础上,结合其他影响因子,针对不同种植区的作物种植情况,综合评估东北地区土壤风蚀。

4 结论

1981—2019 年东北地区年平均风速和相对湿度整体呈减小趋势,年平均气温整体呈上升趋势,年降水量变化趋势存在较大的空间异质性。近 39 年,东北地区风蚀气候侵蚀力平均值为 18.8,空间上呈西高东低的分布规律。7 个分区年平均风蚀气候侵蚀力从大到小依次为黑吉西部区 $>$ 辽西北地区 $>$ 辽河平原区 $>$ 松嫩平原区 $>$ 三江平原区 $>$ 长白山区 $>$ 大小兴安岭区。其中,春季风蚀气候侵蚀力最大(39 年平均为 10.4),其次为秋季(39 年平均为 4.1),夏季最小(39 年平均为 1.4)。近 39 年,全年及四季的风蚀气候侵蚀力整体呈减小趋势,特别是黑吉西部区减小趋势较大。

参考文献:

- [1] 林艺,李和平,肖波.东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J].水土保持学报,2017,31(4):44-50.
- [2] Liu Z J, Yang X G, Chen F, et al. The effects of past climate change on the northern limits of maize planting in Northeast China[J].Climatic Change,2013,117:891-902.
- [3] Ge Q, Wang H J, Dai J. Shifts in spring phenophases, frost events and frost risk for woody plants in temperate China[J].Climate Research,2013,57(3):249-258.
- [4] 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(3/4):1-10.
- [5] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2010:93.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] FAO. A provisional methodology for soil degradation assessment[M].Rome, Italy: FAO,1979.
- [9] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity[J].Climatic Change,1986,9(1/2):195-208.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Yue S P, Yang R X, Yan Y C, 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.
- [15] 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.
- [16] 全国农业区划委员会.中国农业自然资源和农业区划[M].北京:农业出版社,1991:58-59.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 杨新,郭江峰,刘洪鹄,等.东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J].地理科学,2006,26(4):4443-4448.
- [20] 马茜茜,肖建华,姚正毅,等.1960—2017 年阿拉善高原风蚀气候侵蚀力时空演变[J].地理科学,2021,41(6):1096-1104.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 韩柳,王静璞,王光镇,等.中国北方风蚀区风速变化时空特征分析[J].干旱区地理,2018,41(5):963-971.
- [24] 丁一汇,李霄,李巧萍.气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J].应用气象学报,2020,31(1):1-12.
- [25] 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):126-129.