

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.029

王鑫雨, 范昊明. 东北黑土区融雪径流侵蚀力时空分布[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 40-48, 59.

WANG Xinyu, FAN Haoming. Spatial and temporal distribution of snowmelt runoff erosivity in the black soil area of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 40-48, 59.

东北黑土区融雪径流侵蚀力时空分布

王鑫雨, 范昊明

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘 要: [目的] 融雪侵蚀是东北黑土区主要土壤侵蚀形式之一, 是该区土地退化的重要作用力, 融雪径流侵蚀力是计算融雪径流侵蚀量的关键因子, 因此研究融雪径流侵蚀力具有重要意义。融雪径流侵蚀力主要受积雪深度、辐射强度及升温速率影响, 其主要驱动力包括融雪速率和地表径流作用。[方法] 通过计算近 31 年日均融雪径流侵蚀力, 分析东北黑土区融雪径流侵蚀力时空分布特征, 并利用地理探测器辨析各区域融雪径流侵蚀力的主要影响因子。[结果] 3 个黑土亚区 1990—2020 年日均融雪径流侵蚀力均呈现先增大后减小态势, 近些年逐步趋于稳定, 多年日均融雪径流侵蚀力为 $0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$; 空间上多年日均融雪径流侵蚀力在 $0 \sim 0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 范围内, 基本呈现中间小、四周大规律。融雪径流侵蚀力影响因子空间上表现为积雪深度北部大、南部小, 太阳辐射强度呈现由西向东递减, 升温速率值从北部向南部递减。通过地探测器辨析融雪径流侵蚀力影响因子作用强弱发现, 升温速率对蒙东黑土亚区作用最强, 而积雪深度对松嫩黑土亚区及三江黑土亚区作用最强。[结论] 通过分析 1990—2020 年东北黑土区融雪径流侵蚀力时空特征及其影响因子, 对于深化研究区融雪径流侵蚀特征及融雪侵蚀防控具有一定的理论和实践意义。

关键词: 融雪径流侵蚀力; 时空分布; 地理探测器; 东北黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0040-09

Spatial and Temporal Distribution of Snowmelt Runoff Erosivity in the Black Soil Area of Northeast China

WANG Xinyu, FAN Haoming

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: [Objective] Snowmelt erosion is one of the main forms of soil erosion in the black soil area of Northeast China, which plays an important role in land degradation in the area. The erosivity of snowmelt runoff is the key factor for calculating the erosion amount of snowmelt runoff, so it is of great significance to study the erosivity of snowmelt runoff. The erosivity of snowmelt runoff is mainly affected by snow depth, radiation intensity and warming rate, and its main driving forces include snowmelt rate and surface runoff. [Methods] The erosivity of daily average snowmelt runoff in the past 31 years was calculated, the temporal and spatial distribution characteristics of snowmelt runoff erosivity in the black soil area of Northeast China were analyzed, and the main influence factors of snowmelt runoff erosivity in each region were analyzed by using geographic detectors. [Results] The daily average snowmelt runoff erosivity in the three black soil subregions from 1990 to 2020 showed a trend of first increasing and then decreasing, and gradually stabilized in recent years, and the erosivity of daily average snowmelt runoff for many years was $0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$. Spatially, the erosivity of multi-year daily average snowmelt runoff was in the range of $0 \sim 0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$, showing a pattern of small in the middle and large in the surrounding areas. The influence factors of snowmelt runoff erosivity in spatial were as follows, the snow depth was large in the

收稿日期: 2023-08-29

修回日期: 2023-09-25

录用日期: 2023-10-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-12-13

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500701); 国家自然科学基金项目 (41371272)

第一作者: 王鑫雨 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀规律研究。E-mail: Eroswang33@163.com

通信作者: 范昊明 (1972—), 男, 教授, 主要从事土壤侵蚀规律、流域水沙等研究。E-mail: fanhaoming@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

north and small in the south, the solar radiation intensity decreased from west to east, and the warming rate decreased from north to south. The influence factor of snowmelt runoff erosivity were analyzed by ground detector, and it was found that the warming rate had the strongest effect in the Mengdong black soil subregion, while the snow depth had the strongest effect in the Songnen black soil subregion and the Sanjiang black soil subregion. [Conclusion] Analyzing the spatiotemporal characteristics and influence factors of snowmelt runoff erosivity in the black soil region of Northeast China from 1990 to 2020 had certain theoretical and practical significance for deepening the study of snowmelt runoff erosivity characteristics and snowmelt erosion prevention in the study area.

Keywords: erosivity of snowmelt runoff; temporal and spatial distribution; geographical detector; Northeast Black Soil Region

Received: 2023-08-29

Revised: 2023-09-25

Accepted: 2023-10-18

Online(www.cnki.net): 2023-12-13

东北地区黑土资源退化^[1]制约了黑土区的经济和农业发展,威胁着国家的粮食安全^[2-3]。东北黑土区是我国融雪径流的主要形成区域之一^[4],春季积雪融化造成的融雪侵蚀是黑土区重要侵蚀形式^[5]。融雪侵蚀发生条件多变、过程复杂,其动力条件主要是融雪径流^[6]。而能量对融雪径流的产生有重要影响,主要包括温度、辐射和风等^[7],融雪径流的产生还受制于积雪的空间分布以及积雪性质^[8],积雪在消融过程中形成融雪径流,进而影响融雪侵蚀^[9-10]。日照也是影响积雪融化速率的主要因素。已有研究^[11]表明,积雪能大面积直接吸收太阳辐射,融化速率较快。温度的变化也影响融雪径流的产生。黄玉英等^[12]以克里雅河为对象,用 47 年数据探索冬季径流与冻土气候变化,结果表明,径流对气温有正反馈作用;张璞等^[13]在玛纳斯河流域研究了区域气候与融雪径流,结果表明,气温及积雪面积对径流影响很大。综上,要想阐明黑土区融雪侵蚀的机制,就要明确融雪径流侵蚀力影响因子情况以及量化融雪径流侵蚀力强弱。目前,国内外都进行了一些对于融雪侵蚀量计算相关探索,如美国的通用土壤流失方程 USLE 和修订通用土壤流失方程、1985 年美国农业部开发的水蚀预报模型—“WEPP 模型”等^[14]。CHANDRA 等^[15]通过加拿大东部地区 100 多个气象站点的降水量数据,推算了冬季侵蚀力,结果表明,在该区土壤侵蚀过程中融雪和径流影响显著;焦健等^[16]在东北地区利用融雪期与降雨期流域输沙模数和降雨侵蚀力计算出了融雪径流侵蚀力,且在空间上呈现从西北向东南递增规律。

现阶段关于东北地区融雪侵蚀的研究尚且不足,基本没有探讨融雪和冰川径流引起的土壤侵蚀过程^[17];且在东北地区,融雪侵蚀相关研究^[18]多集中于坡面尺度上的侵蚀特征研究;在坡面尺度、小流域和中大流域连续多尺度上的研究^[19]也仅限于融雪系

数的比较。为填补我国东北黑土区融雪侵蚀研究的不足,解决融雪侵蚀研究存在的重要问题,想要更精准地对东北黑土区融雪侵蚀进行预报和防治,重要任务是掌握融雪径流侵蚀力的作用强弱。本文以刘宝元等^[20]界定的东北黑土区范围为例,采用 ZACHER^[21]提出的方法,通过对融雪径流侵蚀力的时空异质性及其主要影响因子特征进行分析,并进行融雪径流侵蚀力的计算与分区,进而明确融雪径流侵蚀力的区域时空分布特征,对预测和计算该区融雪侵蚀量将具有重要参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

东北黑土区位于我国东北部高纬度地区,属温带季风气候,地貌多漫岗丘陵区。东北黑土区面积 55.6 万 km²,含 146 个县级行政区,按地理位置自西向东划分为蒙东黑土亚区、松嫩黑土亚区和三江黑土亚区^[20]。研究区低温干燥,春秋多风、夏季多雨,日温差、年温差较大,春季融雪期径流作用明显;冬季低温多雪积雪深厚,存在季节性冻土层,属我国三大稳定积雪区域之一^[22]。黑土区冬季寒冷漫长,降雪不断累积,春季解冻期积雪消融形成融雪水,是研究区淡水的重要补给和农田灌溉的珍贵水源^[23];融雪水对融雪径流侵蚀力有促进作用,积雪的空间分布、积雪量、积雪性质等直接影响融雪径流的发生^[24],进而加剧融雪侵蚀。

1.2 数据及预处理

研究使用的温度、地表径流量、雪水当量、融雪水量数据来自 ERA5—Land 小时数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu/>);太阳辐射数据来自中国气象网(<http://data.cma.cn/>)太阳辐射数据;降水数据来源于国家环境信息中心 NCEI(<https://www.nccl.noaa.gov/>)1929—2022 年全球范围气象观测点逐日

降水量数据;雪深数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>) 中国雪深长时间序列数据集(1979—2021 年)。下载上述数据并将原始数据进行格式、单位转换,然后通过 ArcGIS 10.2 软件进行剪裁提取并将坐标系由 WGS1984 转换为 CGS2000,最后重采样到 1 km 空间分辨率。

采用 Excel 2021 软件进行 1990—2020 年东北黑土区融雪径流侵蚀力及其影响因子的时间特征分析、绘制线性趋势及 5 年滑动平均趋势。通过 ArcGIS 10.2 软件进行相关空间数据分析,绘制了多年平均融雪径流侵蚀力空间分布图并计算了融雪径流侵蚀力的变化趋势。最后,通过地理探测器探索相关因子单一作用及交互作用对融雪径流侵蚀力的解释程度。

1.3 融雪径流侵蚀力研究方法

(1)为了评估东北黑土区融雪径流侵蚀力强弱,本研究通过 ZACHER^[21]改进的经验公式计算研究区融雪期内日融雪径流侵蚀力,其认为融雪径流主要是在雪体持续融化的 20 天内发生的,并在 10~20 天内融化完成。HAYHOE 等^[25]在加拿大地区将该日径流模型中径流系数调整为 1,经计算发现该模型计算值与试验值一致。融雪径流开始时间:将每年 3—5 月最大积雪深度连续减小的第 5 天定义为融雪开始时间,通过雪深来判断融雪径流初日。融雪径流侵蚀力计算公式为:

$$R = mhK \quad (1)$$

式中: m 为 20 天日均融雪速率(mm/d); h 为 20 天内的融雪水量(cm); K 为径流系数。

(2)为揭示融雪径流侵蚀力影响因素对其影响力大小,本研究采用地理探测器来进行探测积雪深度、太阳辐射、升温速率 3 个主要影响因素对融雪径流侵蚀力的解释作用,并探究双因子间交互作用对融雪径流侵蚀力的解释程度。具体方法为:

分异及因子探测:用 q 值来度量融雪径流侵蚀力的空间分异性,以及探测积雪深度、太阳辐射、升温速率等影响因素对融雪径流侵蚀力的解释作用。 $q \in [0,1]$; q 值越大,表示影响因素对因变量的影响越大;反之则越小。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{\delta_h^2} \quad (2)$$

式中: h 为影响因子的分类; L 为每个驱动因子 X 的分层; N_h 为层 h 的单元数; σ_h^2 为层 h 的因变量值方差。

q 值满足非中心 F 分布:

$$F = \frac{N-L}{L-1} \frac{q}{1-q} \sim F(L-1, N-L; \lambda) \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{\delta^2} \left[\sum_{h=1}^L \bar{Y}_h^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{h=1}^L \sqrt{N_h} \bar{Y}_h \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: λ 为非中心参数, $\bar{Y}_h^2$ 为层 h 的均值交互作用探测。

交互作用探测:为了评估双因子共同作用下对因变量融雪径流侵蚀力的解释作用及各影响因素相互独立情况,探测结果包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强,具体见表 1。

表 1 影响因素交互作用类型

Table 1 Impact factors interaction types

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	相互独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

(3)为了进一步分析东北黑土区融雪径流侵蚀力的时空变化特征,时间序列比变化分析采用 Excel 软件进行。对于空间特征变化的区域性和异质性,采用最小二乘法来表征线性斜率趋势,利用 ArcGIS 10.2 软件进行逐像元的趋势分析。线性斜率趋势结果即为融雪径流侵蚀力影响因子的空间变化趋势,若 $\text{slope} > 0$,则该要素变化趋势为增加;若 $\text{slope} < 0$,则该要素变化趋势为减少;若 $\text{slope} = 0$,则该要素为变化趋势为不变。

计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中: n 为研究时段; x_i 为气象要素对应栅格数据的年平均值。

2 结果与分析

2.1 融雪径流侵蚀力影响因素时空分布特征

2.1.1 融雪期积雪深度时空分布特征 由图 1 可知,1990—2020 年东北黑土区年平均融雪期雪深为 1.25 cm,融雪期雪深平均值从大到小分别为蒙东黑土亚区(1.98 cm) > 三江黑土亚区(0.97 cm) > 松嫩黑土亚区(0.8 cm)。

通过气候要素的线性倾向估计来表征近 31 年东北黑土区各分区融雪期的雪深变化情况,东北黑土区融雪期雪深均呈现增加趋势,其中,雪深增加最明显的分区是三江黑土亚区,增加速率为 0.97 cm/10 a,并通过了 0.05 显著性检验;其次是松嫩黑土亚区,融雪期雪深增加速率为 0.82 cm/10 a,通过了 0.05 显著性检验;融

雪期雪深增加速率最缓的是蒙东黑土亚区,增加速率值为 0.24 cm/10 a,通过了 0.01 显著性检验。

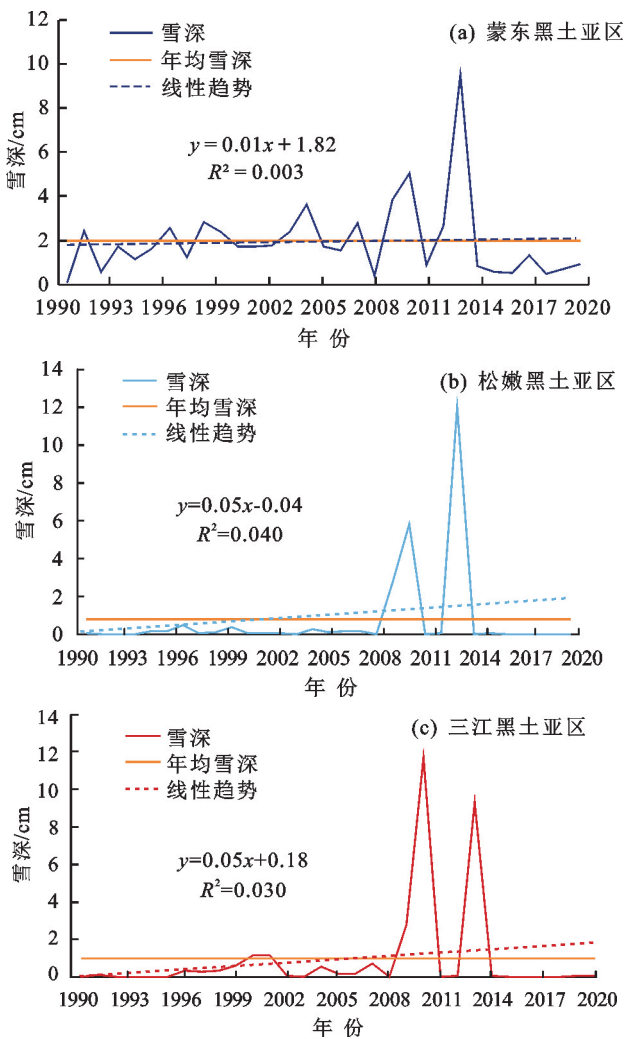


图 1 1990—2020 年东北黑土区融雪期积雪深度及线性趋势
Fig. 1 Snow cover depth and linear trend during snowmelt in northeast black soil area from 1990 to 2020

已有研究^[26]表明,气象条件、地形地貌、植被分布等的变异性致使积雪的时空分布、积累和消融特征变化差异显著。东北黑土区融雪期积雪主要特征是北部大、南部小,多年平均融雪期雪深在 0—12 cm。

由图 2 可知,1990—2020 年东北黑土区融雪期积雪深度存在 1 个高值区:西北部高值区,集中在蒙东黑土亚区北部呼伦贝尔地区,多年平均融雪期积雪深度最大值为 15.12 cm。东北黑土区融雪期雪深有 2 个低值区:一是南部低值区,集中在蒙东黑土亚区南部锡林郭勒盟地区、松嫩黑土亚区南部哈尔滨长春等地区;二是东部低值区,集中在三江黑土亚区。而 2 个低值区积雪深度均在 2 cm 以下。

2.1.2 融雪期太阳辐射时空分布特征 由图 3 可知,1990—2020 年近 31 年东北黑土区各亚区融雪期平均太阳辐射强度值为 491.71 MJ/m²,其中 3 个黑土亚区融雪期辐射值由大到小分别为蒙东黑土亚区

(524.03 MJ/m²)>松嫩黑土亚区(488.66 MJ/m²)>三江黑土亚区(462.45 MJ/m²)。

近 31 年,蒙东黑土亚区融雪期太阳辐射值在 2017 年最大,为 547.61 MJ/m²;松嫩黑土亚区、三江黑土亚区融雪期太阳辐射值在 2014 年最大,分别为 523.74,514.38 MJ/m²。

通过气候要素的线性倾向估计来表征近 31 年东北黑土区各分区融雪期的太阳辐射变化情况,结果显示:太阳辐射增加最明显的是蒙东黑土亚区,增加速率为 3.46 MJ/(m² · 10 a),并通过了 0.05 显著性检验;其次是松嫩黑土亚区,融雪期太阳辐射增加速率为 0.35 MJ/(m² · 10 a),也通过了 0.01 显著性检验;而融雪期太阳辐射变化呈下降趋势的是三江黑土亚,变化速率值为 -3.60 MJ/(m² · 10 a),通过了 0.05 显著性检验。

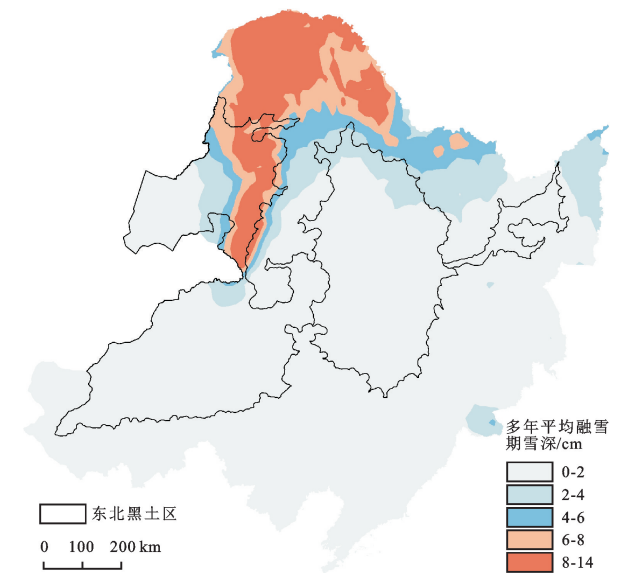


图 2 1990—2020 年东北黑土区融雪期积雪深度空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of snow depth during snowmelt in the northeast black soil region from 1990 to 2020

太阳辐射强度主要受地形及纬度等因子影响,东北黑土区各亚区海拔、纬度各有差异,所以太阳辐射值在空间上分异性明显。

由图 4 可知,在东北黑土区,融雪期太阳辐射强度值从西南向东北递减。多年平均融雪期辐射强度值为 491.71 MJ/m²。分区来看,蒙东黑土亚区多年平均融雪期太阳辐射值为 524.03 MJ/m²,其中太阳辐射值在 556.57~591.34 MJ/m² 占该区面积最大(58.54%);在松嫩黑土亚区太阳辐射值多年平均融雪期太阳辐射值为 488.66 MJ/m²,其中,太阳辐射值在 484.68~505.55 MJ/m² 占该区面积最大(53.91%);三江黑土亚区全区辐射值均在 445.26~484.68 MJ/m² 范围内,其多年平均融雪期太阳辐射值为 462.45 MJ/m²。

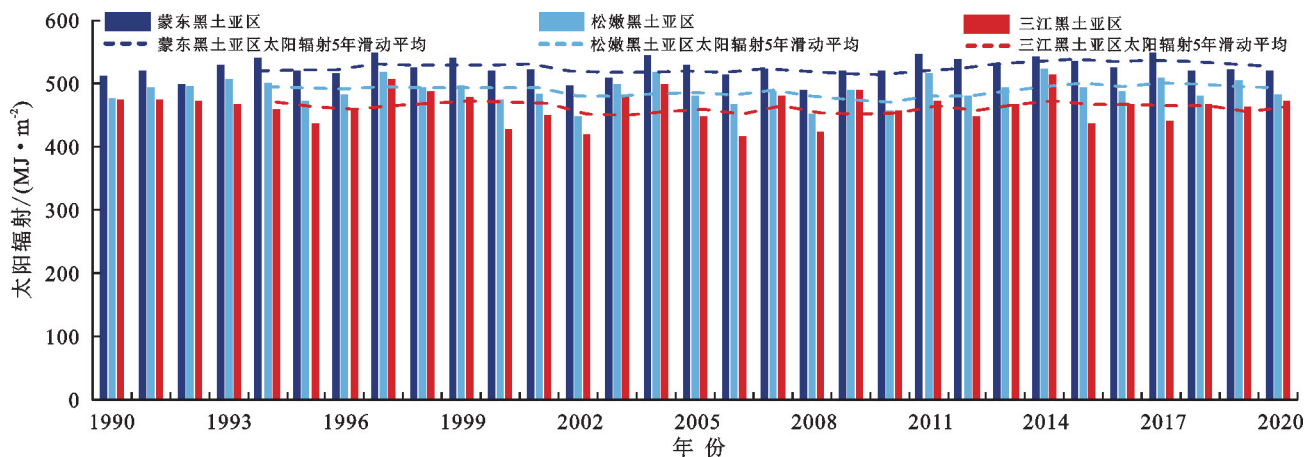
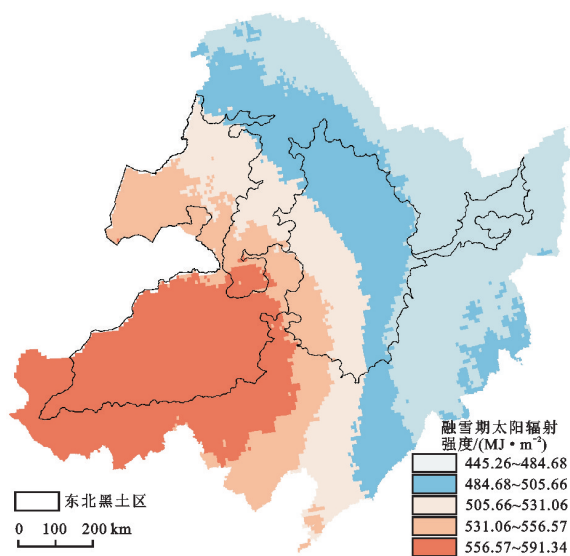


图 3 1990—2020 年东北黑土区融雪期太阳辐射时间变化

Fig. 3 1990—2020 solar radiation time variation sequence during snowmelt in the northeast black soil region

图 4 1990—2020 年东北黑土区融雪期太阳辐射强度空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of solar radiation intensity during snowmelt in the northeast black soil region from 1990 to 2020

2.1.3 融雪期升温速率时空分布特征 由图 5 可知,近 31 年东北黑土区融雪期年平均升温速率为 $0.184\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,其中,三江黑土亚区最大($0.190\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$),松嫩黑土亚区次之,平均值为 $0.182\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$,而蒙东黑土亚区最小,为 $0.180\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$;蒙东黑土亚区、松嫩黑土

亚区、三江黑土亚区多年平均融雪期升温速率在 1999 年最大,分别为 $0.26, 0.27, 0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。通过线性倾向估计分析近 31 年的融雪期升温速率变幅,结果表明,蒙东黑土亚区与三江黑土亚区呈现下降趋势,线性倾向率分别为 $-0.003, -0.004\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$,通过了 0.05 显著性检验;而松嫩黑土亚区融雪期升温速率变化则呈现上升趋势,线性倾向率为 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$,也通过了 0.05 显著性检验。

东北黑土区幅员辽阔,升温速率差异性明显。由图 6 可知,1990—2020 年东北黑土区平均融雪期升温速率从北部向南部递减,多年平均融雪期升温速率为 $0.184\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$;东北黑土区多年平均融雪期升温速率在 $0.23\sim 0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 占比 14.91%,在 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 以下占比基本为 0。本研究结论与周晓宇等^[27]和刘斌辉^[28]对东北地区积雪及气候变化相关的研究结论一致。升温速率受纬度、地形等因子的影响明显,东北黑土区北部虽处于高纬度地区,海拔较高又多为山地、丘陵地貌,融雪期初始温度相对最低,到了春季干旱多风,对升温速率有促进作用,温度变化幅度相对较大;而在研究区南部,多为丘陵、平原地貌,纬度相对较低,在春季融雪期初始温度较高,故温度变幅相对较小。

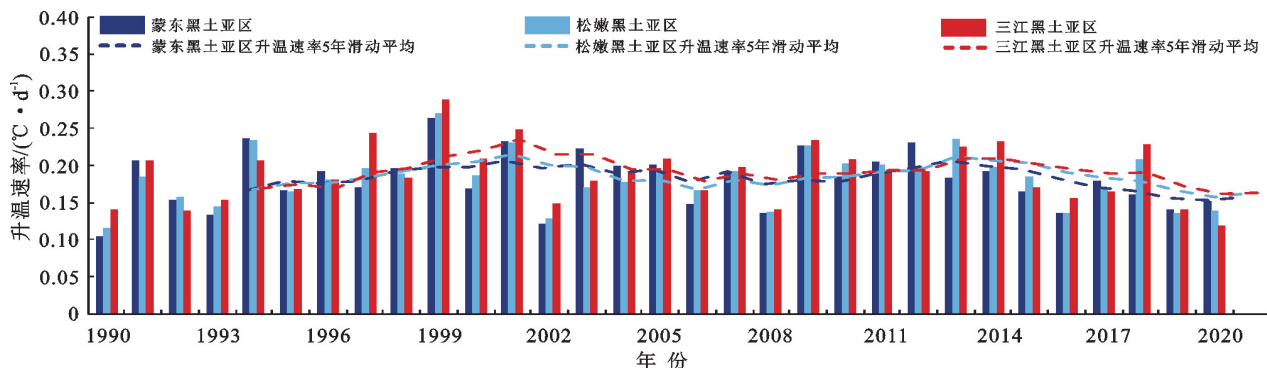


图 5 1990—2020 年东北黑土区融雪期升温速率时间变化

Fig. 5 Time variation series of warming rate during snowmelt in the northeast black soil region from 1990 to 2020

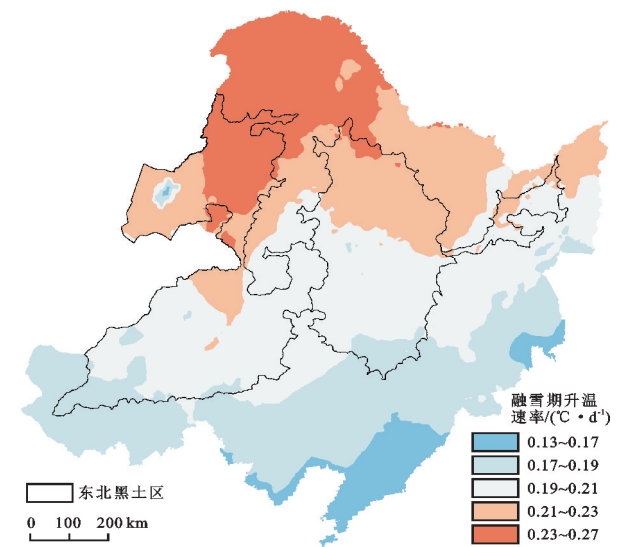


图 6 1990—2020 年东北黑土区融雪期升温速率的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of warming rates during snowmelt in the northeast black soil region from 1990 to 2020

2.2 融雪径流侵蚀力时空变化分析及影响因子探测

2.2.1 融雪径流侵蚀力时间分布特征

通过日径流模型计算东北黑土区融雪径流侵蚀力值,由图 7 可知,1990—2020 年近 31 年东北黑土区融雪径流侵蚀力多年日平均值为 $0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$,其中,三江黑土亚区最大 [$R = 0.08 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$],蒙东黑土亚区次之 [$R = 0.02 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$],松嫩黑土亚区最小 [$R = 0.005 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$].东北黑土区各亚区多年平均 R 值的线性趋势均为单峰曲线;蒙东黑土亚区融雪径流侵蚀呈先增长后减小态势,其多年日均融雪径流侵蚀力值在 2009 年最大 [$R = 0.11 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$];松嫩黑土亚区融雪径流侵蚀力呈现增长—减小态势,其多年平均 R 值最高点在 2009 年 [$R = 0.05 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$];三江黑土亚区,其融雪径流侵蚀力趋势线峰值点在 2000 年,在 2000 年后至今呈现减小态势,多年平均 R 最大值在 2001 年 [$R = 1.12 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$].

2.2.2 融雪径流侵蚀力空间分布特征 (1)东北黑土区融雪径流侵蚀力受地形、降水、积雪与地表径流等因子作用,空间异质性较强。由图 8 可知,近 31 年,东北黑土区多年日均融雪径流侵蚀力空间分布主要特征为中间小、周围大。多年日平均融雪径流侵蚀力为 $0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$;融雪径流侵蚀力日平均值在 $0 \sim 0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 内, R 在 $0 \sim 0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 占比最多,为 88.54%, R 最大值在 $0.15 \sim 0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 占比 0.34%。其中,蒙东黑土亚区北部部分地区多年日平均融雪径流侵蚀力最大, R 平均值

在 $0.10 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 以上,面积占全研究区的 1.60%;中部松嫩黑土亚区 R 值最小。东北黑土区多年日平均融雪径流侵蚀力分布存在 1 个高值区:西北部高值区,主要集中在海拉尔至阿尔山地区及附近, R 最大值达到 $0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 。分区来看,蒙东黑土亚区多年日平均融雪径流侵蚀力在 $0 \sim 0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 范围内,其中, R 值最大在 $0.15 \sim 0.21 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 范围内,像元面积占该区域的 3.03%;松嫩黑土亚区多年日均融雪径流侵蚀力相对较小,全区 R 值在 $0 \sim 0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 占比最大(99.94%);三江黑土亚区多年日均融雪径流侵蚀力在 $0 \sim 0.05 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$ 范围内,其中, R 最大值在 $0.01 \sim 0.02 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$,像元面积占该区域的 11.53%。

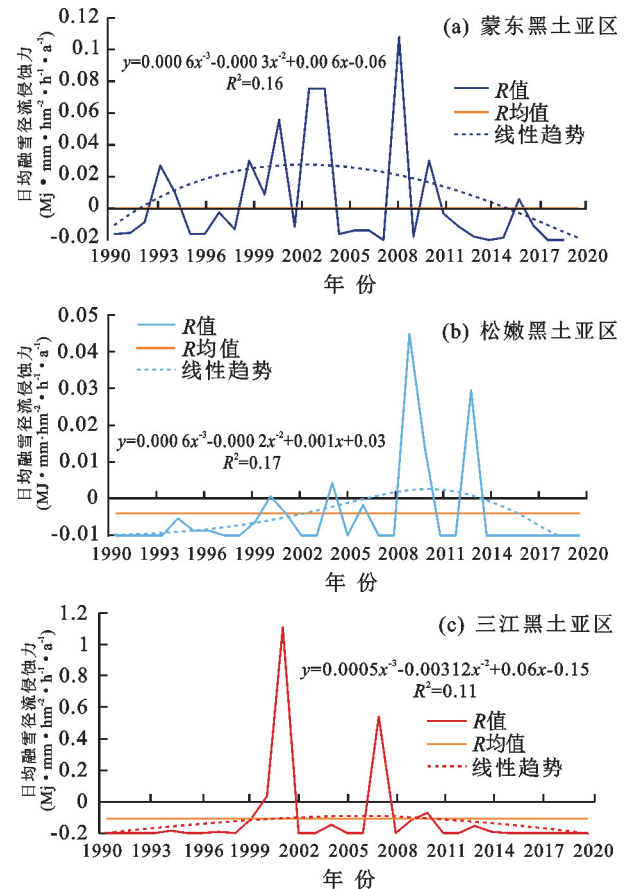


图 7 1990—2020 年东北黑土区日平均融雪径流侵蚀力及线性趋势
Fig. 7 Erosivity and linear trend of daily average snowmelt runoff in the northeast black soil region from 1990 to 2020

(2)通过逐像元值 slope 计算出 1990—2020 年东北黑土区日均融雪径流侵蚀力变化情况。由图 9 可知,1990—2020 年东北黑土区日均融雪径流侵蚀力年均变化幅度为 $-0.03 \sim 0.01 \text{ (MJ} \cdot \text{mm)/(hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a)}$,其中,呈现不变趋势地区面积占比最大(89.45%),小幅下降次之,面积占比 8.25%,面积

占比最小的变化趋势为中幅上升,仅为 0.01%。分区来看,近 31 年蒙东黑土亚区多年日均融雪径流侵蚀力以不变趋势为主(86.91%),该区域年平均变化幅度最大值在 0.005~0.01 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$)内,像元面积占该区域的 0.03%;松嫩黑土亚区多年日平均 R 值变化趋势以不变趋势为主(99.46%);三江黑土亚区多年日平均融雪径流侵蚀力年平均变化幅度范围为 -0.01~0.005 ($\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$),其中,呈下降趋势占比最大,像元面积占该区域的 60.30%,有 95.46% 为小幅下降。

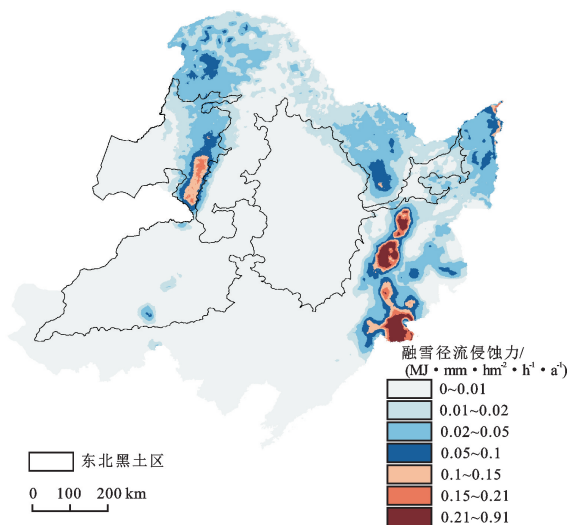


图 8 1990—2020 年东北黑土区日平均融雪径流侵蚀力空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of erosivity of daily average snowmelt runoff in the northeast black soil region from 1990 to 2020

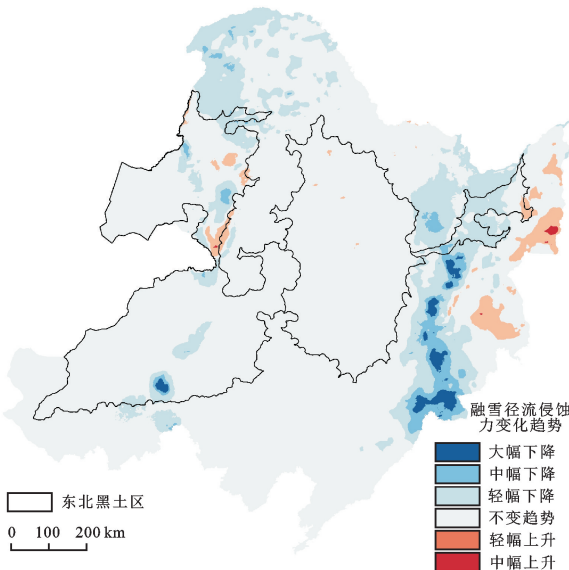


图 9 1990—2020 年东北黑土区日平均融雪径流侵蚀力年变化程度空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of annual variation of daily average snowmelt runoff erosivity in northeast black soil region from 1990 to 2020

2.2.3 融雪径流侵蚀力影响因子作用探测 采用地

理探测器进一步探测 3 个主要影响因子对融雪径流侵蚀力的解释作用,以及彼此之间交互作用对融雪径流侵蚀力的解释程度。 q 为度量值,表示某因子对因变量的解释程度, q 值越接近 1,表示该自变量对因变量的解释力越强^[29]。在交互作用探测中,探究 2 种影响因子共同作用时,是否增强或者减弱融雪径流侵蚀力。

(1) 融雪径流侵蚀力影响因子探测

将各亚区多年日平均融雪径流侵蚀力影响因子进行探测。由表 2 可知,近 31 年,对蒙东黑土亚区融雪径流侵蚀力分异结果解释力最强的因子为升温速率,其度量值 $q=0.59$ ($p=0.01$),太阳辐射对该区域 R 值的解释力最弱($q=0.05$);在松嫩黑土亚区及三江黑土亚区,积雪深度的变化对该区域融雪径流侵蚀力的解释力最有力,松嫩黑土亚区的雪深因子度量值 q 高达 0.92;对东北黑土区各亚区多年平均融雪径流侵蚀力影响最小的因子为太阳辐射,其度量值 q 分别为 0.05, 0.04, 0.01。

表 1 近 31 年东北黑土区各亚区融雪径流侵蚀力影响因子探测
Table 1 Detection of the influence factors of erosivity of snowmelt runoff in various subregions of the northeast black soil region in the past 31 years

区域	结果	sd	sun	vt
蒙东黑土亚区	度量值 q	0.14	0.05	0.59
	p 值	0.36	0.55	0.01
松嫩黑土亚区	度量值 q	0.92	0.04	0.39
	p 值	0	0.56	0.12
三江黑土亚区	度量值 q	0.47	0.01	0.18
	p 值	0.06	0.87	0.24

注: sd 为积雪深度因子; sun 为太阳辐射因子; vt 为升温速率因子。

(2) 融雪径流侵蚀力影响因子交互作用分析

交互作用探测器可以进一步辨析不同影响因子间对融雪径流侵蚀力的交互作用。

由表 3 可知,在蒙东黑土亚区,积雪深度与太阳辐射因子、太阳辐射和升温速率因子分别交互作用后,均为对该区域 R 值的解释程度最强,而积雪深度与升温速率因子交互作用为双因子增强,对该区域 R 值的解释程度稍弱;在松嫩黑土亚区,交互作用最强的 2 个因子为太阳辐射和升温速率,解释程度为非线性增强,而雪深与太阳辐射及雪深与升温速率交互作用均为双因子增强,即雪深与太阳辐射或与升温速率因子交互后解释力均大于各个影响因子单一作用程度;对三江黑土亚区多年平均融雪径流侵蚀力交互作用解释强的因子包括:积雪深度和太阳辐射、积雪深度和升温速率、太阳辐射和升温速率,其中,交互作用为双因子增强的为积雪深度与太阳辐射因子,其余均为非线性增强。

表 3 东北黑土区融雪径流侵蚀力影响因子双因子交互作用

Table 3 Two — factor interaction of influence factors of snowmelt runofferosivity in the northeast black soil region

交互因子	解释程度		
	蒙东黑土亚区	松嫩黑土亚区	三江黑土亚区
积雪深度∩太阳辐射	0.28 *	0.93	0.49
积雪深度∩升温速率	0.70	0.93	0.79 *
太阳辐射∩升温速率	0.77 *	0.69 *	0.47 *

注: * 为非线性增加交互形式,未标注均为双因子增强。

3 结 论

(1)近 31 年来,东北黑土区多年平均融雪期雪深为 1.25 cm,空间上融雪期积雪主要特征为北部大、南部小;多年平均融雪期太阳辐射值强度值为 491.71 MJ/m²,融雪期平均太阳辐射空间上呈现由西向东递减;多年平均融雪期升温速率为 0.184 ℃/d,融雪期升温速率值在空间上从北部向南部递减。

(2)1990—2020 年,东北黑土区融雪径流侵蚀力多年日平均值为 0.01 (MJ · mm)/(hm² · h · a),各亚区按 R 值从大到小依次为三江黑土亚区>蒙东黑土亚区>松嫩黑土亚区。研究区多年日平均融雪径流侵蚀力空间上在 0~0.21 (MJ · mm)/(hm² · h · a)范围变化,多年平均日融雪径流侵蚀力年变化幅度在-0.03~0.01 (MJ · mm)/(hm² · h · a)范围内,其中,以呈现不变趋势为主(89.45%)。

(3)1990—2020 年,对蒙东黑土亚区融雪径流侵蚀力分异结果解释力最强的为升温速率($q=0.59$)。交互作用探测中,积雪深度与太阳辐射因子、太阳辐射和升温速率因子交互作用的解释力程度最强(非线性增强);松嫩黑土亚区及三江黑土亚区积雪深度的变化对该区域融雪径流侵蚀力最有解释力($q=0.92, 0.47$);松嫩黑土亚区和三江黑土亚区交互作用最强的 2 个因子为太阳辐射和升温速、积雪深度与太阳辐射因子。

研究运用 ArcGIS 软件进行数据的时空特征分析,从影响因子的时空分布特征进行定量深入,辨析黑土区不同区域融雪径流侵蚀力的关键驱动因子,更好地阐明关键影响因子的时空分布以及区域性差异特征。通过模型计算了东北黑土区融雪径流侵蚀力,使对于黑土区融雪侵蚀的研究从一个新的角度获得新的结论,对预测融雪径流潜在侵蚀能力有更深入的探索,为接下来进一步完成研究区土壤融雪侵蚀量的计算与分区打下了良好基础,也为黑土区融雪侵蚀提供了时空驱动的分异信息。

融雪侵蚀的深入研究对于我国黑土区土壤侵蚀的影响深远,是难点问题,对于侵蚀力的量化还需进

一步精确,不仅要考虑地表径流带来的土壤侵蚀量,也要考虑降雨时雨水对土壤的冲刷侵蚀量。在融雪状态下,侵蚀因子与侵蚀过程尤为重要,雨和雪带来的径流量也受地形和土壤理化性质影响,包括地形构造及土壤可蚀性等。在春季,土壤从表面开始融化,对于温度突升地区,融雪侵蚀一定是严重的,如果融雪过程中还伴随着降雨,则在一定程度上加速了侵蚀。所以未来还需对融雪进程中的径流侵蚀过程进行深入了解,考虑建立适用于东北黑土区的地表径流侵蚀的冲刷效应方程,为区域水土保持与治理工作的开展提供相应有力支撑。综上,文章通过研究融雪侵蚀影响因子和时空分布特征问题,在借鉴前人研究的基础上深化了关于融雪径流侵蚀力时空分布特征的研究,在一定程度上弥补了我国现阶段对融雪侵蚀问题研究的不足,也提出了对于融雪侵蚀深入探索的展望。

参考文献:

[1] ZHANG T Y, LIU G, DUAN X W, et al. Spatial distribution and morphologic characteristics of gullies in the Black Soil Region of Northeast China: Hebei watershed[J].Physical Geography,2016,37(3/4):228-250.

[2] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.

LIU X T, YAN B X. Soil erosion and food security in black soil region of Northeast China[J].Soil and Water Conservation in China,2009(1):17-19.

[3] FENG Z Z, ZHENG F L, HU W, et al. Impacts of mollic epipedon thickness and overloaded sediment deposition on corn yield in the Chinese Mollisol region[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,257:175-182.

[4] 张瑞芳,王瑄,范昊明,等.我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J].中国水土保持科学,2009,7(2):24-28.

ZHANG R F, WANG X, FAN H M, et al. Study on the regionalization of freeze-thaw zones in China and the erosion characteristics [J]. Science of Soil and Water Conservation,2009,7(2):24-28.

[5] 魏星,陈晓飞,范昊明,等.东北主要旱地耕作土壤冻融环境分析[J].水土保持研究,2009,16(1):39-42.

WEI X, CHEN X F, FAN H M, et al. Freezing-thawing condition of main dryland farming soil areas in Northeast China[J].Research of Soil and Water Conservation,2009,16(1):39-42.

[6] 谭娟.东北低山区不同水保措施坡面融雪侵蚀研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.

TAN J. Study on slope snowmelt erosion under different water conservation measures in low-mountainous areas of Northeast China[D].Shenyang: Shenyang Agricultural University,2017.

- [7] 杨鑫,刘刚,谢云,等.东北黑土区北部典型小流域融雪径流及发生条件分析[J].中国水土保持科学,2019,17(4):34-40.
YANG X, LIU G, XIE Y, et al. Analysis of snowmelt runoff and its formation condition in typical small watersheds in the northern black soil region of Northeast China[J].Science of Soil and Water Conservation,2019,17(4):34-40.
- [8] 张峰,张超.内蒙古积雪时空分布研究进展[J].北方农业学报,2017,45(2):90-93.
ZHANG F, ZHANG C. Research progress of spatial and temporal distribution of snow cover in Inner Mongolia[J].Journal of Northern Agriculture,2017,45(2):90-93.
- [9] 包安明,陈晓娜,李兰海.融雪径流研究的理论与方法及其在干旱区的应用[J].干旱区地理,2010,33(5):684-691.
BAO A M, CHEN X N, LI L H. Theories and methods of snowmelt runoff and its application in arid regions[J].Arid Land Geography,2010,33(5):684-691.
- [10] LANA-RENAULT N, ALVERA B, GARCÍA-RUIZ J M. Runoff and sediment transport during the snowmelt period in a Mediterranean high-mountain catchment[J].Arctic, Antarctic and Alpine Research,2011,43(2):213-222.
- [11] 陈卫东,张波,霸广忠.春雪消融产生的森林径流特征及其影响[J].黑龙江水利科技,2001,29(3):54-55.
CHEN W D, ZHANG B, BA G Z. Characteristics and influence of forest runoff from spring snow melt and its effects[J].Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy,2001,29(3):54-55.
- [12] 黄玉英,刘景时,商思臣,等.昆仑山克里雅河冬季径流及冻土与气候变化[J].干旱区研究,2008,25(2):174-178.
HUANG Y Y, LIU J S, SHANG S C, et al. Study on monthly runoff volume in winter, frozen earth and climate change in the Keriya River Basin in the Kunlun Mountains[J].Arid Zone Research,2008,25(2):174-178.
- [13] 张璞,王建,刘艳,等.SRM模型在玛纳斯河流域春季洪水预警中的应用研究[J].遥感技术与应用,2009,24(4):456-461.
ZHANG P, WANG J, LIU Y, et al. Application of SRM to flood forecast and forwarning of Manasi River Basin in spring[J].Remote Sensing Technology and Application,2009,24(4):456-461.
- [14] 范昊明,武敏,周丽丽,等.融雪侵蚀研究进展[J].水科学进展,2013,24(1):146-152.
FAN H M, WU M, ZHOU L L, et al. Review on the snowmelt erosion[J].Advances in Water Science,2013,24(1):146-152.
- [15] CHANDRA A, 刘正杰.加拿大东部地区的降雨与径流侵蚀指数[J].水土保持科技情报,1990(4):40-43,39.
CHANDRA A, LIU Z J. Rainfall and runoff erosion index in eastern Canada[J].Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation,1990(4):40-43,39.
- [16] 焦剑,谢云,林燕,等.东北地区降雨-径流侵蚀力研究[J].中国水土保持科学,2009,7(3):6-11.
JIAO J, XIE Y, LIN Y, et al. Study on rainfall-runoff erosivity index in Northeastern China[J].Science of Soil and Water Conservation,2009,7(3):6-11.
- [17] 林燕,谢云,王晓岚.土壤水蚀模型中的融雪侵蚀模拟研究[J].水土保持学报,2003,17(3):16-20.
LIN Y, XIE Y, WANG X L. Review of studies on snowmelt erosion in soil water erosion models[J].Journal of Soil Water Conservation,2003,17(3):16-20.
- [18] 焦剑,谢云,林燕,等.东北地区融雪期径流及产沙特征分析[J].地理研究,2009,28(2):333-344.
JIAO J, XIE Y, LIN Y, et al. Study on snowmelt runoff and sediment yields in Northeast China[J].Geographical Research,2009,28(2):333-344.
- [19] 王平,李浩,陈强,等.典型黑土区不同尺度观测场地融雪径流[J].水土保持通报,2014,34(5):244-247,253.
WANG P, LI H, CHEN Q, et al. Different scale observation sites of snow melt runoff in typical black soil area[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2014,34(5):244-247,253.
- [20] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.
LIU B Y, ZHANG G L, XIE Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China[J].Chinese Science Bulletin,2021,66(1):96-106.
- [21] ZACHAR D. Soil erosion[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific,1982.
- [22] 施雅风.中国冰川与环境:现在、过去和未来[M].北京:科学出版社,2000.
SHI Y F. Glaciers and the environment in China: Now, past and future[M]. Beijing: Science Press,2000.
- [23] 陈蕾,戴长雷,王润蒲.寒区融雪径流研究进展[J].水利科学与寒区工程,2022,5(3):6-10.
CHEN L, DAI C L, WANG R P. Research progress of snowmelt runoff in cold region[J].Hydro Science and Cold Zone Engineering,2022,5(3):6-10.
- [24] 曹志,范昊明.我国东北低山区不同坡位积雪特性研究[J].冰川冻土,2017,39(5):989-996.
CAO Z, FAN H M. Research on the snow characteristics at different slope position in the low mountain areas in Northeast China[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(5):989-996.

(下转第 59 页)

- LIU B, WANG Y S, ZHANG L, et al. Study on the sources of floodplain sediment in Laolai River Basin of Heilongjiang Province[J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(6):59-65.
- [40] 郭进,文安邦,严冬春,等.复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J].农业工程学报,2014,30(2):94-104.
- GUO J, WEN A B, YAN D C, et al. Quantifying catchment scale sediment source using composite fingerprinting technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(2):94-104.
- [41] 李占斌.黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究[J].西安理工大学学报,1996,12(3):177-183.
- LI Z B. Study on small watershed single storm erosion sediment yield in loess region[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1996,12(3):177-183.
- [42] ZHANG J Q, YANG M Y, ZHANG F B, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the loess plateau, PR China[J]. Land Degradation and Development, 2017,28(8):2527-2539.
- [43] 万赐航,周慧平,王强,等.植被覆盖度和降雨侵蚀力变化对小流域泥沙连通性的影响[J].农业工程学报,2022,38(12):127-134.
- WAN C H, ZHOU H P, WANG Q, et al. Effects of vegetation coverage and rainfall erosivity changes on sediment connectivity in small watersheds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(12):127-134.
- [44] 周涛,苏正安,刘刚才,等.工程堆积体典型生态修复措施对土壤侵蚀水动力过程的影响[J].农业工程学报,2022,38(9):91-100.
- ZHOU T, SU Z A, LIU G, et al. Effects of typical ecological restoration measures for engineering accumulation on sediment yield and hydrodynamic process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(9):91-100.
- [45] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
- LIU D H, LI Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003,17(3):34-37,117.
- [46] 刘翊涵,苏正安,潘洪义,等.张家口市土地利用和土壤保持功能的变化特征[J].草业科学,2020,37(7):1281-1292.
- LIU Y H, SU Z A, PAN H Y, et al. Changes in land use and soil retention functions in Zhangjiakou City[J]. Pratacultural Science, 2020,37(7):1281-1292.
- (上接第48页)
- [25] HAYHOE H N, 张宝颖.加拿大融雪径流侵蚀指数的估算[J].水土保持科技情报,1996(2):39-42.
- HAYHOE H N, ZHANG B Y. Estimation of erosion index of snowmelt runoff in Canada[J]. Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 1996(2):39-42.
- [26] 张娜.积雪特性与辐射能量对积雪融化过程的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- ZHANG N. Study on the influence of snow cover characteristics and radiant energy on snow melting process[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University, 2017.
- [27] 周晓宇,赵春雨,李娜,等.东北地区积雪变化及对气候变化的响应[J].高原气象,2021,40(4):875-886.
- ZHOU X Y, ZHAO C Y, LI N, et al. Spatiotemporal variation of snow and its response to climate change in Northeast China[J]. Plateau Meteorology, 2021,40(4):875-886.
- [28] 刘斌辉.东北地区气候变化特征及对林业相关气候指标的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- LIU B H. Climate change characteristics and impacts on forestry-related climate indicators in Northeast China[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2011.
- [29] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.