

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.053.

武亚冰, 方海燕, 张威, 等. 东北黑土区融雪径流对流域产沙的贡献及因素分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 86-93.

WU Yabing, FANG Haiyan, ZHANG Wei, et al. Contribution of Snowmelt Runoff to Sediment Yield in the Black Soil Region of Northeast China and Factor Analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 86-93.

东北黑土区融雪径流对流域产沙的贡献及因素分析

武亚冰^{1,2}, 方海燕^{2,3}, 张威¹, 王硕², 翟钰钰^{2,3}, 赵紫远^{2,3}

(1. 辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所
陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: [目的] 揭示流域融雪期径流产沙特征及对全年总产沙的贡献, 阐明东北黑土区影响融雪期产沙贡献的主控因素, 并进而为东北黑土区流域综合治理提供科技支撑。 [方法] 基于东北地区 203 个气象站点数据以及 15 个流域水文站点径流泥沙资料, 通过提取流域降水、地形、气候、土壤和土地利用等因子, 采用多因素相关分析的方法, 开展融雪期产沙贡献影响因素研究。 [结果] 东北黑土区不同流域年均降雪量占年均降水量的比例为 3.7%~23.9%, 空间分布差异较大, 呈东南多、西北少的分布特点。融雪期径流深占全年径流深比例为 13.7%~32.5%, 融雪期产沙量对全年产沙量的贡献 3.8%~23.47%, 融雪期产沙模数占全年产沙模数的 3.1%~35.9%, 且它们空间分布规律性差。年均降水量、降雪量占降水量比例、融雪期径流深占全年径流深比例 3 个因素与融雪期产沙贡献在 0.05 的水平上呈显著相关。降雪量占降水量比例对流域融雪期产沙量和产沙模数的贡献率分别为 25.41% 和 30.22%。最大高程对流域融雪产沙量和产沙模数的贡献率分别为 24.36% 和 20.38%。 [结论] 东北区融雪期产沙对流域全年产沙有较大贡献, 且受多重因素影响, 未来应加强融雪期的侵蚀产沙观测研究。

关键词: 融雪; 产沙模数; 流域; 空间变化; 影响因素

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0086-08

Contribution of Snowmelt Runoff to Sediment Yield in the Black Soil Region of Northeast China and Factor Analysis

WU Yabing^{1,2}, FANG Haiyan^{2,3}, ZHANG Wei¹, WANG Shuo², ZHAI Yuyu^{2,3}, ZHAO Ziyuan^{2,3}

(1. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the contribution of catchment sediment yield to annual total as well as its main influencing factors, and then to provide scientific support. [Methods] Based on precipitation data from 203 meteorological stations and runoff and sediment data from 15 hydrological stations in northeastern China, the rainfall and snowfall, topographic, climatic, and land use characteristics in the selected catchments were examined, and the annual sediment yield contributions to annual total derived from snowmelt runoff were quantified. The factors influencing catchment runoff and sediment yield during snowmelt period were further analyzed through correlation analysis and multiple regression methods. [Results] Spatially, more snowfall occurred in the southeast and less in the northwest. The annual snowfall amount accounted for 3.8%~24.7% of the annual precipitation. The snowmelt runoff depth accounted for

收稿日期: 2022-06-13

修回日期: 2022-08-25

资助项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD1500703); 国家自然科学基金(41977066); 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA28020503)

第一作者: 武亚冰(1996—), 女, 河南洛阳人, 硕士生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wuyabing@igsnr.ac.cn

通信作者: 方海燕(1977—), 男, 山东济宁人, 研究员, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: fanghy@igsnr.ac.cn

<http://stbcjy.paperonce.org>

13.7%~32.5% of the annual totals. The contributions of sediment yield (SY) derived from snowmelt to annual total were 3.8%~23.47%, and the specific sediment yields (SSYs) derived from snowmelt runoff were 3.1%~35.9% of the annual total. Their distributions were disorderly in space. The contribution of snowmelt induced SY was significantly correlated with mean annual precipitation, the ratio of snowfall amount to annual precipitation, and the ratio of snowmelt runoff depth to annual runoff depth at the 0.05 significant level. The catchment SY and SSY contributions by the ratio of annual snowfall to annual precipitation were 25.41% and 30.22%, respectively. [Conclusion] Sediment yield derived from snowmelt runoff contributed a large part of catchment annual total, and was influenced by many factors. Field monitoring of snowmelt erosion and sediment yield in the black soil region of northeastern China should be strengthened in the future study.

Keywords: snowmelt; specific sediment yield; catchment; spatial variation; influencing factors

全球约有 60% 的陆地面积被(季节性)积雪覆盖^[1],融雪径流对土壤侵蚀的影响显著^[2]。在加拿大、北欧和东欧以及美国西北部太平洋沿岸等大部分高纬度地区,融雪侵蚀对全年侵蚀总量的贡献高达 50%~96%^[3-6]。在俄罗斯,也有研究利用融雪侵蚀模型和通用土壤流失方程开展了融雪侵蚀特征研究,并揭示了融雪径流对水力侵蚀的贡献^[7]。因此,高纬度寒区的融雪径流对流域产沙的影响不容忽视。

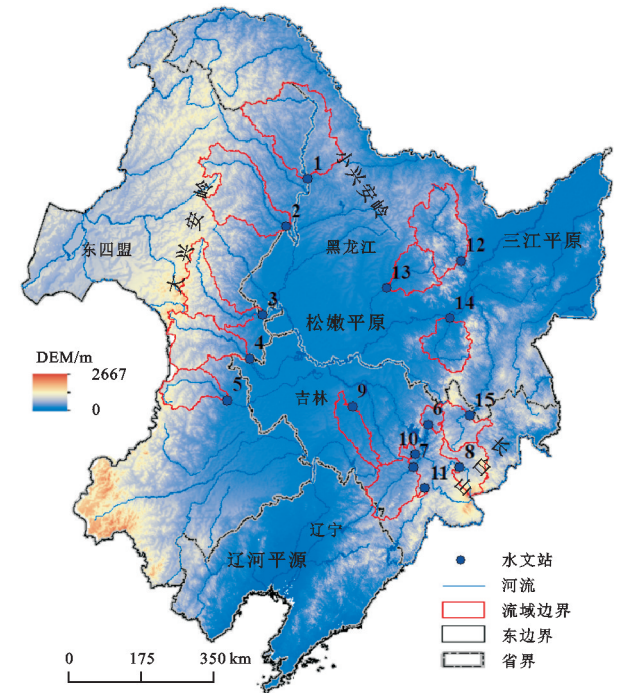
黑土地有“耕地中的大熊猫”之誉,然而我国东北黑土区土壤侵蚀严重^[8],尤其该区雪期长达 5~8 个月^[2],融雪径流造成的土壤侵蚀可观^[9]。长期以来,前人对黑土区土壤侵蚀动力的研究多集中在降雨上,而融雪侵蚀的研究较落后^[10]。目前,融雪侵蚀的研究多采用室内试验的方法开展,例如,范昊明等^[11]采用融雪水冲刷试验,研究春季解冻期多种因素对白浆土融雪侵蚀的影响,认为融雪径流首要影响土壤侵蚀。桑琦明等^[12]利用多种外营力模拟试验相结合的方法,结果显示前期土壤冻融和风蚀作用会进一步增加东北黑土区坡耕地坡面径流侵蚀能力。在野外,王平等^[13]在不同空间尺度上观测了融雪径流特征,并分析了融雪径流系数的尺度变化。然而,尽管现有研究已经注意到了融雪侵蚀产沙的重要性,但关于流域尺度上融雪径流对产沙的贡献研究很少。焦剑等^[2]基于松花江流域水文站点资料的研究表明,融雪期径流深和年降雪量之间存在幂函数关系,而产沙模数与降雪量二者关系较差。融雪径流对流域产沙的贡献必将受到多因素的影响,亟需深入开展融雪径流对流域产沙的影响研究。

因此,本文将基于东北黑土区 15 个流域的水文站水沙监测资料,结合流域地形地貌、降雪和降雨、土地利用和土壤等特征,揭示流域融雪期径流产沙特征及对全年总产沙的贡献,阐明东北黑土区影响融雪期产沙贡献的主控因素。该研究对于揭示东北黑土区融雪期内水土流失规律及水土流失防治具有重要意义。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江及内蒙古东四盟地区,地理位置在东经 115°24'—135°12',北纬 38°42'—53°36',总面积约为 124 万 km²^[14],海拔在 0~2 667 m (图 1)。气候类型为温带季风气候,气温和降水季节性特征显著。西部、东北和东南部分别坐落着大兴安岭、小兴安岭和长白山山脉,从南至东北依次分布着辽河平原、松嫩平原和三江平原,发育了辽河、嫩江和松花江三大水系。土壤类型主要有黑土、黑钙土和白浆土等^[15]。其中,黑土主要分布在黑龙江省和吉林省,此外,在三江平原也有小面积零星分布^[15]。土地利用类型主要以林地、草地和耕地为主。该区主要农作物类型有玉米,大豆和水稻。本文选用的 15 个水文站控制流域面积介于 390~32 229 km²之间(表 1),它们的空间分布见图 1。



注:图中水文站 1,2,3,...,15 为表 1 中对应的水文站点。
图 1 研究区地形特征及 15 个水文站控制流域的空间分布

表 1 研究区 15 个流域位置、面积及所使用水文站水沙监测资料年限

序号	水系	河流	水文站	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	面积/km ²	水沙资料年限
1	嫩江	嫩江	库漠屯	125.27	49.45	32229	2001—2018
2	嫩江	诺敏河	古城子	124.27	48.53	25292	2001—2018
3	嫩江	绰尔河	两家子	123.00	46.73	15544	2001—2018
4	嫩江	洮儿河	镇西	122.35	45.85	18462	2001—2018
5	嫩江	霍林河	白云胡硕	121.45	45.05	10355	2001—2015
6	二松	拉法河	蛟河	127.32	43.70	2426	2006—2018
7	二松	辉发河	五道沟	126.62	42.88	12391	2006—2018
8	二松	二道江	汉阳屯	127.95	42.65	8532	2006—2018
9	二松	伊通河	农安	125.20	44.42	6508	2006—2018
10	二松	金沙河	民立	126.75	43.13	1037	2006—2018
11	二松	珠子河	靖宇	126.80	42.38	390	2006—2018
12	松干	汤旺河	晨明	129.48	46.97	19186	2005—2018
13	松干	呼兰河	秦家	127.00	46.77	9809	2005—2018
14	松干	蚂蚁河	莲花	128.72	45.82	10425	2005—2018
15	松干	牡丹江	大山咀子	128.60	43.68	8075	2005—2018

1.2 数据来源

本文 203 个气象站点的降水、降雪和逐日气温数据源自中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>),日积雪深度数据源自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。15 个水文站 2000—2018 年逐日径流量和产沙数据源自中华人民共和国水文年鉴(表 1)。土壤数据源自联合国粮食与农业组织(The Harmonized World Soil Database, HWSD)。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)分辨率为 30 m 由中国科学院地理空间数据云平台获得。研究区 2000 年、2010 年和 2018 年 3 期土地利用数据(100 m 分辨率)源自中国科学院资源环境科学数据中心。

1.3 研究方法

本文选取流域地貌、土壤、土地利用、气候等变量研究它们对流域产沙的影响(表 2)。流域地形地貌因子由 DEM 数据通过 ArcGIS 水文模块提取得到。采用焦剑等^[2]提出的方法定义雪期,积雪初、终日是一年中最早积雪和最后积雪的日期。融雪期定义为雪期内逐日气温大于 0℃ 的时间段。依据气象数据中记录的降雪和降雨数据,剔除融雪期的降雨事件,得到融雪期内降水和降雪量总和,并依据算术平均法得到流域平均降雪量。

土壤可蚀性因子 K 反映土壤对侵蚀的敏感性和抵抗能力。本文根据 Sharpely^[16]和 Williams 等^[17]提出的 EPIC 模型方法并结合张科利等^[18]修正公式进行计算:

$$K_{\text{epic}} = 0.2 + 0.3e^{[-0.0256\text{SAN}(1 - \frac{\text{SIL}}{100})]} \times (\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}})^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + e^{(3.27 - 2.95C)}}\right] \times \left[1 - \frac{0.72\text{SN}}{\text{SN} + e^{(22.9\text{SN} - 5.51)}}\right] \quad (1)$$

$$K = -0.01383 + 0.51575K_{\text{epic}} \quad (2)$$

式中: K_{epic} 为修正前的 K 因子;CLA, SIL 和 SAN 分别为土壤黏粒、粉粒和砂粒含量(%); C 为有机碳含量(%); $\text{SN} = 1 - \text{SAN}/100$ 。我国学者就黑土区土壤可蚀性 K 研究已有丰富成果^[18],本文运用世界土壤数据库 HWSD,结合野外采样验证,得到各流域土壤可蚀性。

土地利用类型影响流域土壤侵蚀。本文根据 2000 年、2010 年和 2018 年 3 期土地利用数据,得到各流域不同时期耕地、林草地土地利用类型所占百分比,最后计算平均值。

1.4 分析方法

本文使用 ArcMap10.2 和 Origin2021 软件,研究 15 个流域 2001—2018 年降水、降雪以及水沙数据的时空分布特征。利用 SPSS 软件中相关分析和多元线性回归的方法,对各影响因素及相应年限的水沙资料数据(表 1)进行分析,研究各因子与融雪产沙的相关性及不同影响因子对流域产沙的影响。

在线性回归之前需对变量进行标准化处理,以消除自变量和因变量量纲的影响,具体处理公式为:

$$Z_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

其中: Z_i 为标准化后的变量值; X_i 为实际变量值; X_{\max} 为最大值; X_{\min} 为最小值。

表 2 研究中 15 个流域产沙影响因素特征

因素	缩写	描述	范围	均值
流域形态	A/km^2	流域面积	390~32229	10273.6
	P_e/km	流域周长	237~1451	927.18
	R_c	圆度比($R_c=4\pi A/P_e^2$)	0.004~0.232	0.143
	$S/(\text{°})$	平均坡度	1.6~9.4	6.4
	H_{\min}/m	最低高程	104~542	243
地形	H_{\max}/m	最高高程	655~2623	1440
	H_D/m	高程差($H_D=H_{\max}-H_{\min}$)	495~2176	1197
	H_{mean}/m	平均高程	225~831	546
	H_1	流域高程积分($H_1=(H_{\text{mean}}-H_{\min})/(H_{\max}-H_{\min})$)	0.12~0.41	0.25
	$R_R/(\text{m}\cdot\text{km}^{-2})$	地形起伏度 $R_R=(H_{\max}-H_{\min})/A$	0.03~3.29	0.56
气候	F_p/mm	多年平均降水量	398.4~766.5	572.6
	F_s/mm	多年平均降雪量	16.8~154.4	70.6
	$P_s/\%$	降雪量占降水量比例	3.8~24.7	11.5
	D_s/m	积雪深度	6~71	32.8
土壤	$K/(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2})$	USLE 土壤可蚀性因子	0.33~0.36	0.35
土地利用	$P_A/\%$	耕地百分比	2.3~71.9	21.25
	$P_L/\%$	林地草地百分比	9.2~94.3	73.03

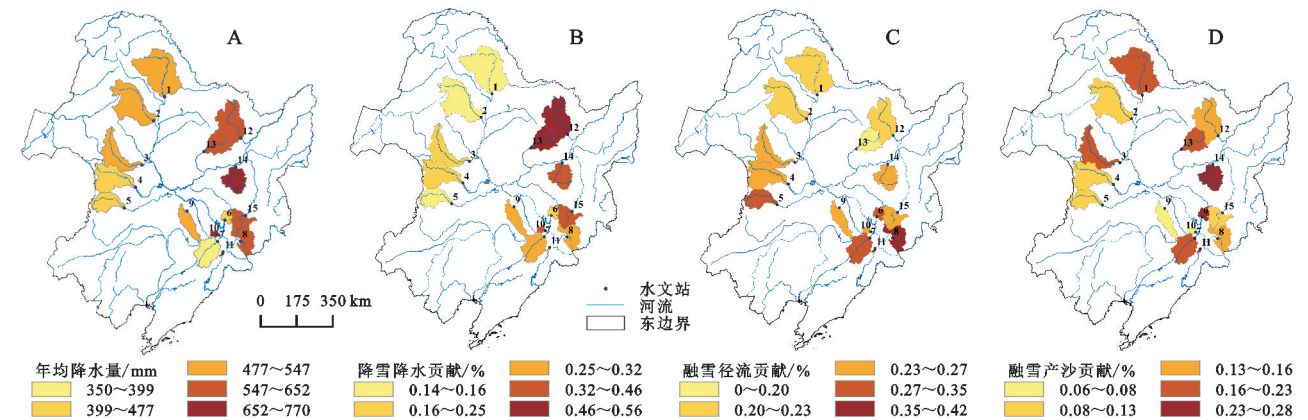


图 2 研究时段 15 个流域年均降水量(A)、降雪对降水的贡献(B)、融雪径流量对年径流量贡献(C)及融雪产沙对流域年产沙贡献(D)的空间分布

2 结果与分析

2.1 降水特征

研究区 15 个流域多年平均降雪量 15.9~149.1 mm(图 3A),平均值为 71.6 mm。其中 13 号秦家水文站控制流域降雪量最大达 149.1 mm,5 号白云胡硕水文站控制流域降雪量最小,年均降雪量仅为 15.9 mm。15 个流域年均降水量 393.6~781.2 mm(图 3B),平均值为 570.8 mm。空间上呈东南部多、西北部少的分布特征(图 2A)。其中 11 号靖宇水文站控制的流域降水量最大为 781.2 mm,7 号五道沟水文站控制的流域降水量最小为 393.6 mm。

15 个流域年降雪量占全年降水量的比例为 3.7%~23.9%(图 3C),平均为 12.6%。空间上与各

流域降雪量分布态势大致趋同(图 2B),东部地区流域降雪占降水比例较高,降雪对降水贡献空间上差异较大。13 号秦家水文站点控制流域降雪贡献最高为 23.9%,12 号晨明控制的流域次之达 23.1%,5 号白云胡硕水文站点控制流域降雪贡献最小为 3.7%。

2.2 径流特征

研究时段流域融雪期年均径流深差别较大(图 4A),15 个流域融雪期径流深变化范围为 4.6~137.1 mm,平均径流深为 49.1 mm。5 号白云胡硕控制霍林河流域融雪期径流深最小,11 号靖宇站流域融雪期径流深最大。

15 个流域年径流深 31.1~489.9 mm,平均径流深为 140.9 mm(图 4B)。融雪期径流深占全年总径流深在 13.7%~32.5%之间,平均值为 23.5%,6 号

蛟河水文站流域占比最大,2号古城子水文站流域占比最小(图4C)。研究时段,15个流域全年径流深与融雪期径流深基本一致(图4A,B),呈现南大北小的特征(图2C)。

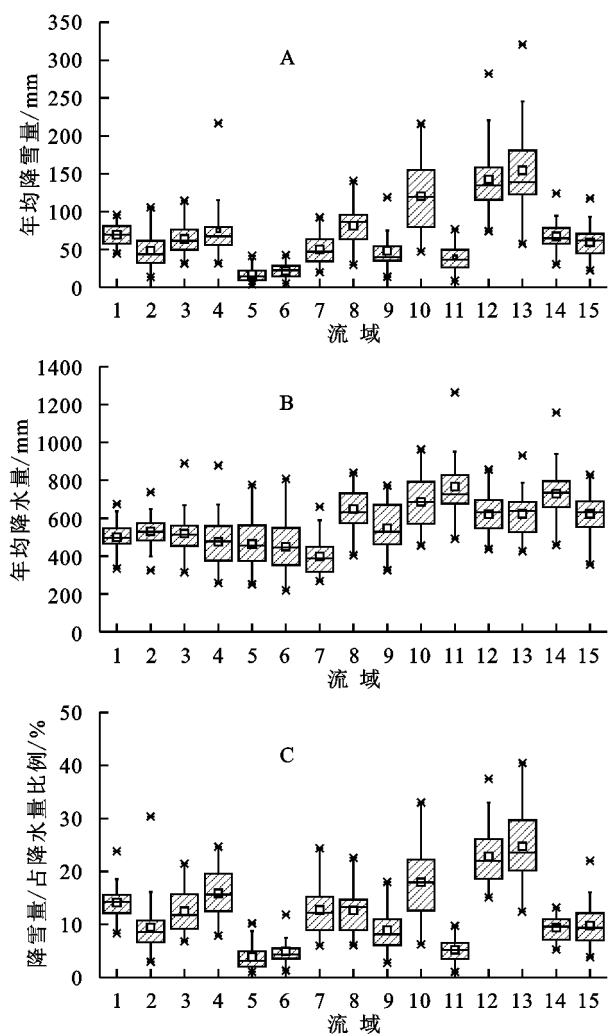


图3 2001—2018年15个流域降水特征

2.3 流域产沙及融雪贡献

研究区15个流域产沙量和产沙模数空间变异性较大(图5)。全年产沙量变异系数高达93.8%,产沙量在 $3.061 \times 10^4 \sim 1.33776 \times 10^6$ t/a之间,平均值为 4.7162×10^5 t/a。全年产沙模数变异系数高达179.35%,产沙模数在 $0.65 \sim 106.03$ t/(km²·a)之间,平均值为16.72 t/(km²·a)。研究时段15个流域融雪期产沙量差异较大(图5A),变化范围在 $6.98 \times 10^3 \sim 2.0117 \times 10^5$ t/a之间,平均值为 6.055×10^4 t/a。融雪期产沙模数变异系数为139.52%,产沙模数在 $11.08 \sim 489.65$ t/(km²·a)之间,平均值为104.92 t/(km²·a)。

各流域融雪产沙量平均贡献量在3.8%~23.5%之间(图5C)。总体来看,15个流域间产沙贡献差异较大,空间上分布规律性较差(图2D),这可能与产沙的影响因子复杂多变有关。

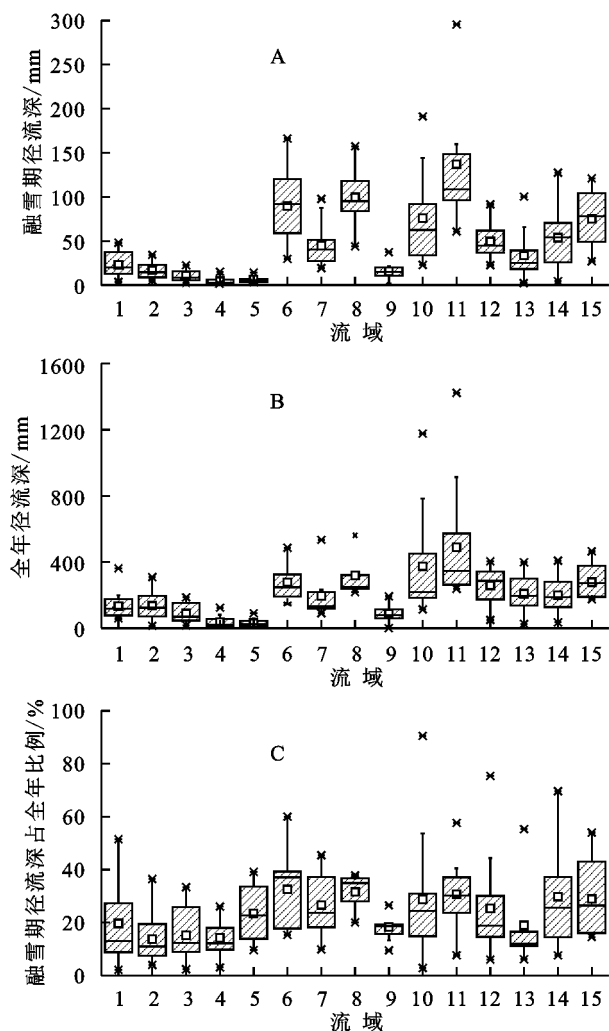


图4 2001—2018年流域径流统计特征

3 讨论

流域产沙贡献受到多因素的影响^[19]。皮尔逊相关系数表明,流域年融雪产沙贡献(C_{sy})与多年平均降水量(F_p)、降雪量占年降水量比值(P_{sp})、融雪期径流深与年径流深比值(P_{sr})3个因素在0.05水平上呈显著相关(表3)。在本研究中,融雪期产沙模数随流域面积呈负相关关系(图6B),这与前期研究中一致^[20]。地表径流是土壤颗粒输送的主要驱动力^[21],融雪径流强烈影响着流域土壤侵蚀和泥沙输送过程。因此,降雪占降水比例与径流的相关性较好。

土地利用如流域内林草地面积占比、耕地面积占比等对沉积物输送量有重要影响。研究证实,林草地能增加截流和地表粗糙度、拦截泥沙,进而减少雨滴分离和流域输沙能力^[22]。相比之下,坡耕地则可加剧土壤侵蚀和流域产沙^[23]。在本研究中,产沙贡献与林草地比例(P_L)的相关性违背了植被对土壤侵蚀的负向影响,这可能是由于融雪期地表覆盖的林草处于枯萎状态有关。

除土地利用外,流域地形因素改变着运输泥沙的侵蚀能力^[24]。东北地区位于高纬度地区,三大山系围绕(图 1);山区冬季气温低,容易保存更多的冰雪,春季融雪期气温回升,冰雪大量融化,加上融雪期植被覆盖率低,坡度陡峭更是增大了径流冲刷力,导致地表土壤更易被侵蚀^[25]。此外,较低的流域圆度比(R_c),使得泥沙被输移的路径更远,沉积下来的可能性越大^[26]。

土壤可蚀性 K 因子越大,流域侵蚀和产沙量越大。以往的研究表明,融雪期由于土壤受温差影响而受到反复冻融的作用,会导致土壤可蚀性增强,从而为融雪期侵蚀提供更多侵蚀物源^[10]。

为进一步探讨融雪期流域产沙贡献与各影响因子之间的关系,本文建立了流域融雪产沙贡献与主成分的多元回归方程:

$$C_{sy}=0.439A+0.256P_L-0.739H_{max}+0.161K-0.106F_s+0.771P_{sp}+0.562P_{sr}-0.256$$
$$R^2=0.778,n=15$$

(4)

$$C_{ssy}=0.427P_L-0.718H_{max}+0.256K-0.560F_s+0.890P_{sp}+0.094P_{sr}-0.092$$
$$R^2=0.556,n=15$$

(5)

式中: C_{sy} 为融雪期产沙量与全年产沙量的比值(%); C_{ssy} 为融雪期产沙模数与年产沙模数比值(%); A 为流域面积(km^2); P_L 为流域林草地面积与流域总面积比值(%); H_{max} 为流域最大高程(m); K 为流域平均土壤可蚀性因子 $[\text{t}\cdot\text{h}/(\text{MJ}\cdot\text{mm})]$; F_s 为年降雪量(mm); P_{sp} 表示年降雪量与降水量比值(%); P_{sr} 为融雪期径流深与全年径流深比值(%)。

因此,融雪产沙贡献可用地形地貌、土地利用、流域土壤可蚀性和流域降水特征决定,它们对流域融雪产沙和产沙模数贡献决定系数分别为 77.8%和 55.6%。表 4 表明,降雪量占比对流域融雪产沙量的贡献最大为 25.41%。最大高程贡献为 24.36%,融

雪期径流深占比影响为 18.52%,年平降雪量的解释度最小仅为 3.49%。与融雪对流域总产沙量贡献相似,降雪占降水量的比例和最大高程两个因素对融雪产沙量的影响最大,解释度分别占到 30.22%和 20.38%,多年平均降雪量则对产沙模数的解释度为 19.02%。融雪期径流深占全年径流深的比例影响最小,解释度仅为 3.19%。

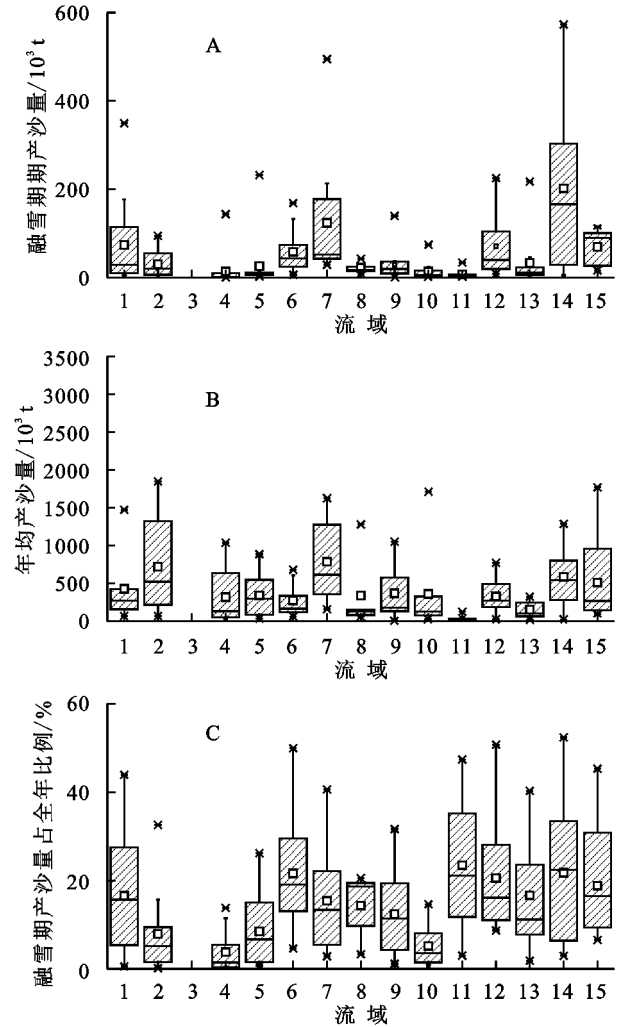


图 5 2001—2018 年流域年均融雪期产沙量(A)、年均产沙量(B)、融雪期产沙量占全年比例(C)特征

表 3 研究区 15 个流域产沙统计特征

统计特征	时段	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
产沙量/(10 ³ t·a ⁻¹)	全年	1337.76	30.61	471.62	327.29	93.82
	融雪期	210.17	6.98	60.55	56.81	69.39
产沙模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	全年	106.03	0.65	16.72	29.98	179.35
	融雪期	489.65	11.08	104.92	146.38	139.52

在本研究中,15 个流域降雪和降水差异性大,特别是流域面积、高程、土壤可蚀性和土地利用不仅差异大,且在空间上并没有很好的分布规律。因此,使得融雪期径流产沙对年产沙的贡献也没有规律可循。流域产沙受多因素的影响,而研究区处于高纬度寒区,流域产沙动力除了受降雨影响外,还受降雪的影响。尽管在东

北黑土区就流域产沙^[27-28]、融雪产沙^[2]开展了一些工作,但融雪径流产沙贡献的影响因素更为复杂。特别是在东北黑土区,坡面缓长,坡面上侵蚀的泥沙大部分在坡底沉积^[26],为更好地研究融雪径流对水力侵蚀的影响,未来应加强野外观测及模型模拟研究,为该区水土流失防治和保护黑土地提供科技支撑。

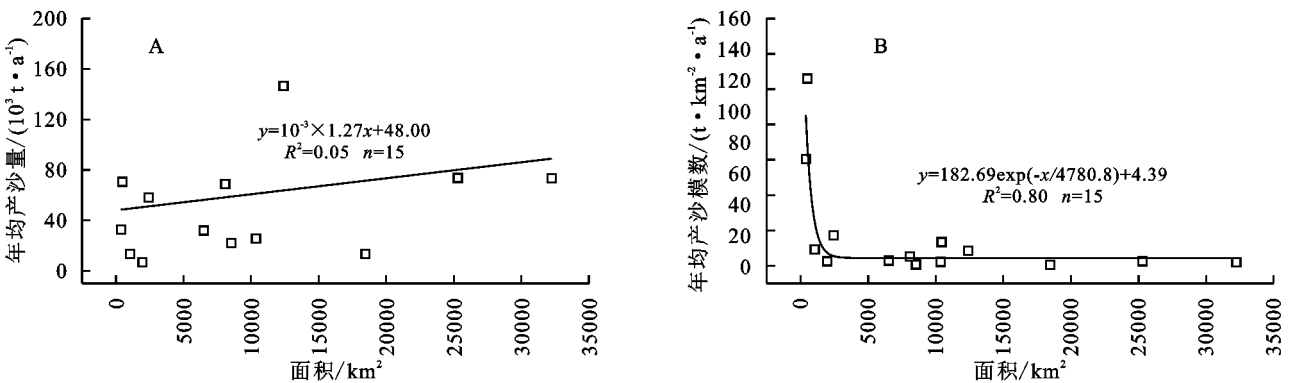


图 6 研究区流域面积与融雪期内产沙量(A)和产沙模数(B)的关系

表 4 融雪径流产沙贡献与不同变量间的 Pearson 相关系数关系矩阵

指标	A	P_L	P_A	S	H_{\min}	H_{\max}	H_{mean}	H_D	H_1	R_R	k	P_e	R_c	F_S	F_p	P_{sp}	P_{sr}
P_L	0.387																
P_A	-0.277	-0.954 **															
S	0.020	0.503	0.463														
H_{\min}	-0.175	0.432	0.368	0.034													
H_{\max}	0.120	0.589 *	-0.557 *	0.525 *	0.380												
H_{mean}	0.206	0.783 **	-0.0738 **	0.485	0.627 *	0.668 **											
H_D	0.183	0.500	-0.485	0.576 *	0.099	0.958 **	0.524 *										
H_1	0.327	0.633 *	-0.629 *	0.388	0.137	0.082	0.706 **	0.046									
R_R	-0.547 *	-0.194	0.022	0.071	0.263	0.083	0.383	0.008	0.329								
k	0.432	0.605 *	-0.638 *	0.519 *	0.239	0.328	0.156	0.427	0.249	0.185							
P_e	0.689 **	0.412	-0.456	0.111	0.176	0.007	0.257	0.062	0.520 *	0.171	0.358						
R_c	0.443	0.043	0.128	0.320	0.056	0.196	0.060	0.228	0.051	-0.637 *	0.146	-0.287					
F_S	-0.313	-0.097	-0.054	0.089	0.291	0.130	0.299	0.230	0.368	0.839 **	0.293	-0.035	0.430				
F_p	-0.458	0.132	-0.158	0.084	0.374	0.097	0.012	0.011	0.243	0.286	0.180	-0.217	0.334	0.395			
P_{sp}	-0.665 **	-0.340	0.192	0.116	0.107	0.013	0.418	0.019	-0.533 *	0.719 **	0.148	0.363	0.429	0.751 **	0.621 *		
P_{sr}	-0.554 *	0.023	-0.020	0.052	0.504	0.157	0.008	0.013	0.348	0.013	0.113	-0.659 **	0.139	0.088	0.439	0.325	
C_{sy}	-0.360	0.000	-0.073	0.134	0.050	0.183	0.410	0.184	0.386	0.345	0.108	-0.155	0.313	0.250	0.546 *	0.541 *	0.557 *

注:(1) * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 的水平上显著相关;(2) P_{sp} 和 P_{sr} 表示降雪量占年降水量比值、融雪期径流深与年径流深比值; C_{sy} 表示流域年融雪产沙贡献(流域年融雪产沙量与年总产沙量比值); P_{sr} 为融雪期径流深与年径流深比值;(3) 其他变量含义同表 2。

4 结论

本文根据东北黑土区 15 个流域水文站的多年水沙监测数据,通过提取流域产沙的潜在影响因子,运用相关分析和多元回归的方法,探讨了研究区流域产沙特征及融雪期产沙贡献。

东北黑土区降雪量占全年降水量比值、融雪期径流深占全年径流深比例以及融雪期产沙量和产沙模数的空间变异较大。降雪量占全年降水量比值在 3.7%~23.9%之间,融雪期径流深占全年径流深比值在 13.7%~32.5%之间,融雪产沙量占全年产沙量的 3.8%~23.47%,融雪期产沙模数与流域产沙模数比值为 3.1%~35.9%,空间分布规律性较差。

融雪产沙对流域产沙的贡献受多重因素影响。

年均降水量、降雪量占年降水量比值、融雪期径流深与年径流深比值 3 个因素与融雪产沙贡献在 0.05 的水平上呈显著相关。流域降雪量占降水量比值和流域最大高程对流域融雪产沙的贡献最大,其中融雪与降水比值对流域融雪产沙量和产沙模数的贡献分别为 25.41%和 30.22%,最大高程对流域融雪产沙量和产沙模数的贡献分别为 24.36%和 20.38%。

东北区融雪期产沙对流域产沙有重要影响,而东北黑土区坡缓坡长,大部分坡面上的产沙在坡地沉积。因此,基于水文站观测资料难以全面反映融雪侵蚀产沙的空间分布特征,以后应加强模型模拟及融雪期的侵蚀产沙观测研究。

参考文献

[1] 蒋玲梅,崔慧珍,王功雪,等.积雪、土壤冻融与土壤水分

- 遥感监测研究进展[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1237-1262.
- [2] 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.
- [3] Dickinson W T, Scott A, Wall G. Fluvial sedimentation in southern Ontario[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1975,12(11):1813-1819.
- [4] Demidov V V, Ostroumov V Y, Nikitishena I A, et al. Seasonal freezing and soil erosion during snowmelt [J]. Eurasian Soil Science, 1995,28(10):78-87.
- [5] Ollesch G, Kistner I, Meissner R, et al. Modelling of snowmelt erosion and sediment yield in a small low-mountain catchment in Germany[J]. Catena, 2006,68(2/3):161-176.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning [M]. United States: Department of Agriculture. Agriculture Handbook,1978.
- [7] Maltsev K, Yermolaev O. Assessment of soil loss by water erosion in small river basins in Russia [J]. Catena, 2020,27(9):607-621.
- [8] 雷廷武,李法虎.水土保持学[M].北京:中国农业大学出版社,2012.
- [9] 徐兴奎.1970—2000年中国降雪量变化和区域性分布特征[J].冰川冻土,2011,33(3):497-503.
- [10] 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.
- [11] 范昊明,郭萍,武敏,等.春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究[J].水土保持通报,2011,31(6):130-133.
- [12] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.
- [13] 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.
- [14] 刘育成.中国土地资源调查数据集[M].北京:中华商务联合印刷有限公司,2000.
- [15] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
- [16] Sharpley A N. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator;1, Model Documentation [J]. Usda Techn. Bull, 1990,17(5):225-235.
- [17] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983,38(5):381-383.
- [18] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [19] 梁石正雄,方海燕.钱塘江流域产沙空间变异特征及影响因素[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2019,47(4):67-75.
- [20] 方海燕,蔡强国,李秋艳.产沙模数与流域面积关系研究进展[J].地理科学进展,2008,27(6):63-69.
- [21] 方海燕,蔡强国,李秋艳.东北典型黑土区乌裕尔河中游泥沙输移月年时间尺度特征[J].泥沙研究,2009,6(2):16-21.
- [22] 冷疏影,冯仁国,李锐,等.土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J].水土保持学报,2004,18(1):1-6,26.
- [23] 王硕,方海燕,和继军.植被覆盖和降雨因子变化及对东北黑土区土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2021,41(2):66-75.
- [24] Rajbanshi J, Bhattacharya S. Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar river basin, India [J]. Journal of Hydrology, 2020,587:124935.
- [25] Tamene L, Park S J, Dikau R, et al. Analysis of factors determining sediment yield variability in the highlands of northern Ethiopia [J]. Geomorphology, 2006,76(1/2):76-91.
- [26] Fang H Y. Quantifying farmland shelterbelt impacts on catchment soil erosion and sediment yield for the black soil region, northeastern China [J]. Soil Use and Management, 2021,31:181-195.
- [27] 李建伟,焦剑,高燕,等.松花江流域产沙时间变化特征及影响因素分析[J].泥沙研究,2014,8(3):12-19.
- [28] 李致颖,方海燕.基于 TETIS 模型的黑土区乌裕尔河流域径流与侵蚀产沙模拟研究[J].地理科学进展,2017,36(7):873-885.