

东北地区融雪期径流及产沙特征分析

焦 剑¹, 谢 云^{1*}, 林 燕¹, 赵登峰²

(1 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2 哈尔滨市水务局, 哈尔滨 150001)

摘要: 严重的水土流失已威胁到东北地区的土地资源, 融雪径流及其造成的侵蚀作为该地区水土流失的重要组成部分, 但相关研究较少。本文利用全区 93 个气象站降水资料, 分析了东北地区降雪与积雪的基本特征。利用 27 个典型流域水文站径流泥沙资料, 分析了融雪期内径流与产沙特征。结果表明: 东北各地雪期长度为 5~8 个月, 自南向北逐渐延长。年降雪量占年降水总量的比例多在 7~25%, 由此形成的融雪期径流深占全年径流深比例达 13.3~24.9%, 融雪期输沙模数占全年输沙模数比例达 5.8~27.7%。融雪期流域输沙模数受地貌影响十分显著: 丘陵漫岗区降雪量和径流深均低于山区, 但输沙模数平均为山区的 2.9 倍。融雪输沙模数与流域面积有十分显著的幂函数递减关系。为揭示融雪侵蚀影响因素及其作用机理, 今后应加强融雪期内流域侵蚀及产沙监测。

关键词: 降雪与积雪; 融雪期, 融雪径流; 融雪输沙模数; 东北地区

文章编号: 1000-0585(2009)02-0333-12

1 引言

全球年降雪总量约占降水总量的 5%^[1], 虽远小于降雨量, 但由于分布不均, 在降雪比例高的地区, 因积雪融化形成融雪径流所造成的土壤侵蚀十分可观。如加拿大 Fosheim 半岛融雪径流形成的土壤流失量占年侵蚀总量的 96%^[2]; 处于高纬地区的匹斯河流域, 融雪侵蚀比例可达 80%^[3]; 即使在加拿大南部的安大略省, 这一比例亦可达到 50%^[4]。美国西北部太平洋沿岸地区融雪侵蚀在全年侵蚀总量中所占的比重高达 90%^[5]。在北欧、中欧和东欧一些地区, 融雪侵蚀速率也可达到或超过降雨侵蚀速率^[6,7]。如德国东部的 Schafertal 流域, 融雪径流造成的输沙量占总量的 76%^[8]。总之, 在全球纬度高于 40° 的地区, 冬季水文过程作为流域水文过程的重要组成部分, 影响着土壤侵蚀的发生与发展^[9]。但由于观测资料的缺乏, 土壤侵蚀定量研究中, 融雪侵蚀研究起步较晚。1978 年, 第二版通用土壤流失方程^[5]依据小区观测资料, 提出冬季有大量积雪地区多年平均土壤流失量的计算方法。随着大量观测资料的积累, 有关融雪侵蚀的理论研究不断深入。1997 年, 修订版的通用土壤流失方程 (RUSLE) 对融雪侵蚀过程进行了重要修订; 20 世纪 90 年代开发的基于土壤侵蚀理论的机理模型 WEPP (Water Erosion Prediction Project)^[9] 和 EURO-SUM (European Soil Erosion Model)^[10] 则以不同形式考虑了融雪侵蚀过程。近年

收稿日期: 2008-01-26; 修订日期: 2008-12-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB407203); 国家自然科学基金面上项目 (40671111)

作者简介: 焦剑 (1983-), 男, 陕西西安人, 博士生。研究方向为土壤侵蚀与水土保持。

E-mail: 68283847@qq.com

* 通讯作者: 谢云 (1964-), 女, 教授, 博士生导师。主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xieyun@bnu.edu.cn

来, 一些流域土壤侵蚀模型也增加了模拟融雪产流产沙的模块^[11]。

我国一直十分重视冰川、冻土的水文观测试验研究^[12], 但这些研究主要集中在西部寒区, 侧重于水文过程及其对水资源的影响, 基本没有探讨融雪和冰川径流引起的土壤侵蚀过程^[13]。东北地区是我国降雪最多的地区^[14], 季节性积雪储量高于青藏高原地区^[15], 亦为全国最多。作为我国重要的商品粮基地, 目前该地区的土壤侵蚀已经对土地资源构成严重威胁^[16~18], 但长期以来, 许多有关土壤侵蚀的研究主要集中在降雨引起的侵蚀过程, 针对融雪侵蚀的研究很少, 只是有些初步了解^[19~21]。近年来, 有关本地区融雪侵蚀的研究只是在浅沟和切沟侵蚀研究有所涉及^[22, 23], 而有关融雪径流产沙的研究也仅限于个别报导^[24, 25]。因此, 研究融雪期径流及其产沙特征, 对揭示本地区水土流失规律具有重要意义。本文拟在分析东北地区降雪与积雪特征的基础上, 通过对水文站观测的径流泥沙资料分析, 初步阐述融雪形成的径流及其产沙特征, 为了解融雪侵蚀过程, 提高土壤侵蚀预报精度, 进行水土保持规划和流域侵蚀防治提供依据。

2 资料与方法

研究区位于东北三省及内蒙古东部地区(赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市)。收集了研究区内 93 个气象站点(图 1) 1961~1990 年共 30 年逐日气温、降水、积雪深度资料, 以分析本区降雪与积雪特征, 分析基本要素包括雪期、积雪雪期和年降雪量。雪期和积雪雪期分别指初终雪日和积雪初终日之间的时期。研究将当年下半年日最高气温低于 0°C 后、首次发生降水的日期确定为初雪日, 将翌年上半年日最高气温高于 0°C 以前、最后一次发生降水的日期确定为终雪日。积雪初终日可依据气象站的逐日积雪观测资料确定。依据我国气象观测规范^[26], 当测站四周视区内二分之一的范围被雪覆盖时就记为积雪, 积雪初、终日就是一年度中观测到的最早积雪和最后积雪的日期。年降雪量指雪期内降水量的总和, 流域平均降雪量依据流域内各气象测站的降雪量, 采用算术平均法获得。采用空间自协方差插值的 Kriging 方法进行气象站点之间的数值内插, 分别绘制本区多年平均雪期、积雪雪期、年降雪量和降雪量占年降水量百分比等值线图, 分析降雪积雪特征的空间变化。

同时收集了松花江流域 27 个水文站 1961~1990 年逐日径流量和泥沙含量(悬移质)资料(表 1), 以分析融雪径流及产沙特征。各水文站资料年限多在 20~25 年之间, 最长

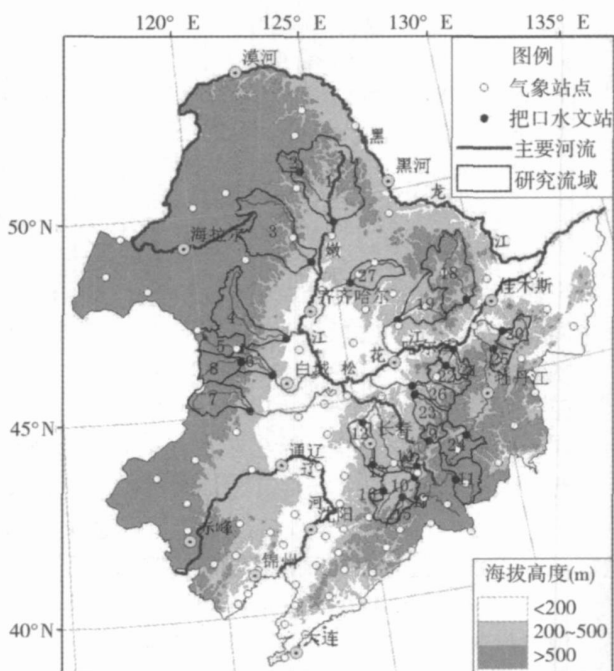


图 1 气象站、水文站及研究流域分布

Fig. 1 The distribution of weather stations, hydrological stations and selected watersheds

为 26 年，最短为 12 年，平均 21.6 年。松花江水系由嫩江、第二松花江和松花江干流三大水系构成，本文视直接注入嫩江、第二松花江或松花江干流的河流为一级支流，直接注入一级支流的称为二级支流，直接注入二级支流的称三级支流。上述水文站点中，2 个属于三级支流控制站，7 个属于二级支流控制站，16 个属于一级支流控制站，其余 2 个分别位于嫩江干流的上游和内流区。水文站控制的流域面积为 390km² ~ 32229km²，平均 8541 km²。

表 1 研究流域基本情况
Tab 1 The selected watersheds

流域序号	所属河流					水文站			
	水系	河流名称	支流级别	流域面积 (km ²)	地貌 类型	名称	经度 (°)	纬度 (°)	资料年限
1	嫩江	嫩江	—	32229	M	库漠屯	125. 27	49 45	1973~ 1989
2	嫩江	多布库尔河	1	3094	M	松岭	124 32	50 78	1973~ 1989
3	嫩江	诺敏河	1	25292	M	古城子	124 27	48 53	1963~ 1985
4	嫩江	绰尔河	1	15544	M	两家子	123 00	46 73	1973~ 1989
5	嫩江	洮儿河	1	5893	M	索伦	121 32	46 58	1974~ 1985
6	嫩江	洮儿河	1	18462	M	镇西	122 35	45 85	1963~ 1985
7	嫩江	霍林河	1	10355	M	白云胡硕	121 45	45 05	1964~ 1979
8	嫩江	归流河	2	7656	M	大石寨	121 35	46 28	1964~ 1988
9	二松	拉法河	1	2426	H	蛟河	127. 32	43 70	1964~ 1988
10	二松	辉发河	1	12391	H	五道沟	126 62	42 88	1963~ 1987
11	二松	二道江	1	8532	M	汉阳屯	127. 95	42 65	1964~ 1988
12	二松	伊通河	2	6508	H	农安	125 20	44 42	1963~ 1985
13	二松	伊通河	2	574	H	伊通	125 30	43 35	1964~ 1988
14	二松	金沙河	2	1037	H	民立	126 75	43 13	1963~ 1988
15	二松	三统河	2	1957	H	样子哨	126 15	42 45	1969~ 1988
16	二松	沙河	3	481	H	东丰	125 52	42 67	1969~ 1988
17	二松	珠子河	3	390	M	靖宇	126 80	42 38	1964~ 1988
18	松干	汤旺河	1	19186	M	晨明	129 48	46 97	1965~ 1988
19	松干	呼兰河	1	9809	H	秦家	127. 00	46 77	1973~ 1987
20	松干	倭肯河	1	4185	H	倭肯	130 52	46 02	1963~ 1988
21	松干	蚂蚁河	1	10425	H	莲花	128 72	45 82	1971~ 1989
22	松干	蚂蚁河	1	4580	H	延寿	128 35	45 45	1964~ 1989
23	松干	拉林河	1	5640	H	五常	127. 10	44 87	1963~ 1979
24	松干	牡丹江	1	8075	M	大山咀子	128 60	43 68	1963~ 1988
25	松干	乌斯浑河	2	3288	M	大盘道	130 08	45 65	1965~ 1984
26	松干	忙牛河	2	5240	H	大碾子沟	127. 07	45 10	1963~ 1985
27	内流区	乌裕尔河	—	7354	H	依安	125 52	47. 88	1963~ 1985

注：地貌类型“M”表示山地；“H”表示丘陵和漫川漫岗

松花江流域三面环山，西部和北部为大兴安岭和小兴安岭（合称兴安岭山地），流域东部及东南部为完达山脉、老爷岭、张广才岭和长白山脉（合称流域东部山地）。山地以

中低山为主, 海拔高度大多在 500m 以上。兴安岭山地和流域东部山地自其山前丘陵区 and 漫川漫岗区向流域中心地带的平原过渡, 区内海拔高度多在 200~ 500m 之间。其中, 兴安岭山前丘陵漫岗区地势逐渐变缓, 多为丘陵状、波状和稍倾斜的台地, 地面坡度多在 5° 以下, 坡长较长。流域东部山地山前的丘陵漫川漫岗区面积较广, 区内多为波状起伏的丘陵, 山前的冲积洪积台地区域地形复杂。研究流域中, 13 个流域主体海拔高度在 500m 以上, 地貌类型为山地 (图 1); 14 个主体海拔高度在 200~ 500m 之间, 地貌类型为丘陵漫川漫岗。

为研究方便, 对各研究流域进行编号。流域编号为 1 至 27 的顺序编码。排序时, 位于嫩江水系的流域居前, 其次是第二松花江水系的流域, 再次为松花江干流水系的流域。同一水系流域排序时, 支流级别高者居前; 若支流级别相同, 则按照自北至南的顺序, 流域所处纬度高者居前。

研究区冬季有相当数量的降雪, 随着春季升温开始融化形成融雪径流, 并产生融雪侵蚀。为了分析融雪径流及其产沙情况, 规定融雪期是指积雪初日到积雪终日之间的时期。实际上, 积雪初日之前和积雪终日之后, 也有降雪发生, 但降雪量很少, 且无法依据气象资料确切推知降水的形式是降雪或降雨, 故此段时期未被列入融雪期。某站一年中融雪期内径流量与泥沙量 (指观测的悬移质, 下同) 分别为此段时期内该站观测的逐日径流量 (m^3) 与泥沙量 (t) 之和。各流域多年平均融雪径流及其产沙状况分别用融雪径流深 (mm) 和融雪输沙模数 (t/km^2) 表示, 两者分别由多年平均融雪期径流量 (m^3) 和多年平均融雪期泥沙量 (t) 除以流域面积 (km^2) 获得。值得注意的是, 观测的径流量中虽含有基流部分, 但本区河流流经地区多属基岩裂隙水, 富水性弱, 因此河流获取地下水补给量小^[27], 融雪期内基流很少, 对产流产沙的影响微弱。考虑到本研究主要分析融雪期径流与泥沙情况在全年的比重, 基流全年存在并假设不变, 因此实际径流计算时没有扣除基流部分。

本研究将分析东北地区降雪与积雪占全年降水比例及其空间分布特征, 融雪期内融雪径流与输沙模数占全年径流和输沙模数比例, 及其与降雪量、地形、流域面积等自然因素的关系, 为进行融雪侵蚀预报提供依据。

3 结果分析

3.1 东北地区降雪与积雪特征

东北地区雪期 5~ 8 个月 (图 2-a), 由南向北逐渐延长。辽宁南部雪期只有 4.5 个月, 大兴安岭北部地区可达 8 个月以上。积雪期一般比雪期短 17~ 34 天。其中积雪初日比初雪日晚 11~ 18 天, 积雪终日则比终雪日早 6~ 17 天。各地积雪期一般在 3.5~ 7 个月, 分布规律与雪期相同 (图略): 北部山区积雪期超过 6 个月, 部分地区达 7 个月以上, 为全区最长; 松嫩平原大多在 5~ 6 个月之间, 辽河平原多在 4~ 5 个月之间; 南部沿海地区不足 4 个月, 为全区最短。

年降雪量大部分地区在 30~ 150mm 之间 (图 2-b), 其中长白山地部分地区年降雪量可达 150mm 以上, 为全区最多; 科尔沁沙地年降雪量不足 25mm, 为全区最少。全区年降雪量总体由东 (小兴安岭及长白山地)、西 (大兴安岭) 两侧山地向中部平原区减少, 平原内部则明显由北向南减少。全年降雪量占降水总量的比例多在 7~ 25% (图 2-c), 分布规律与降雪量相同, 山区年降雪占 15% 以上, 部分海拔较高的山区可达 30% 以上, 平原

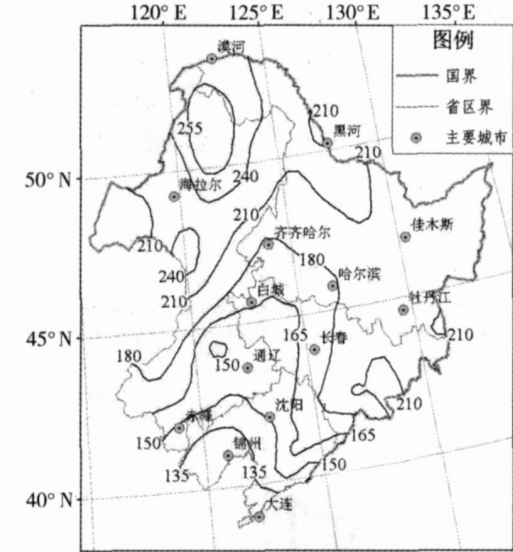


图 2-a 东北地区多年平均雪期 (天)
Fig. 2-a The distribution of snow period in Northeast China (day)

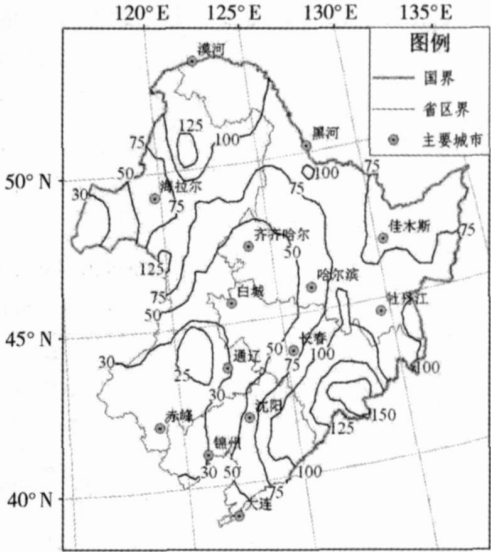


图 2-b 东北地区多年平均降雪量 (mm)
Fig. 2-b The distribution of snowfall in Northeast China (mm)

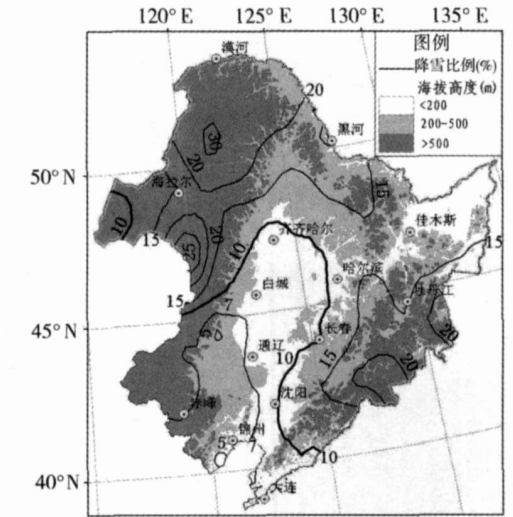


图 2-c 东北地区降雪量占年降水量的百分比 (%)
Fig. 2-c The distribution of the average percentage of snowfall to annual precipitation (%)

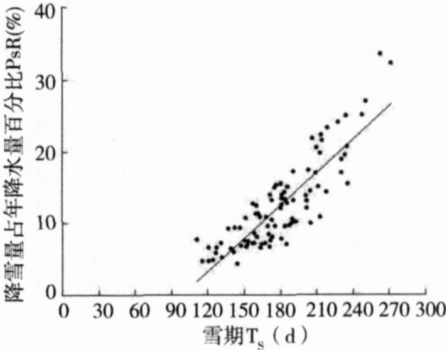


图 3 多年平均降雪量占年降水量百分比与雪期的关系
Fig. 3 The relationship between the average percentage of snowfall to annual precipitation and snow period

地区则在 15% 以下。

由 93 个气象站点的降雪特征可知研究区内降雪量占年降水量比例与雪期有着极为显著 (置信水平 0.01) 的线性关系 (图 3):

$$PsR = 0.155 Ts - 15.4, R^2 = 0.74 \tag{1}$$

式中, PsR 是降雪量占年降水量的百分比 (%), Ts 是雪期 (d)。

3 2 融雪期径流与输沙模数估算及东北地区融雪侵蚀区域的确定

研究区内各流域多年平均融雪期径流深差别很大，变化于 2 9~ 118 7mm，平均为 38 0mm (表 2)，占全年径流深的 11. 0%~ 29 6%，平均为 20 2%。27 个流域多年平均融雪期径流深 D (mm) 与年降雪量 P_s (mm) 有着十分显著的幂函数关系 (置信水平 0 01) (图 4):

$$D = 0.004P_s^{1.99}, \quad R^2 = 0.85$$

(2)

式中各项意义同上。

表 2 研究流域多年平均融雪径流深和输沙模数

Tab 2 Snowmelt runoff depth and sediment transport modulus in the selected watersheds

流域 序号	流域基本情况			多年平均 降雪/ 降 水 (%)	径流深 (mm)		输沙模数 (t/ km ²)	
	支流 级别	流域面积 (km ²)	地貌 类型		融雪期	融雪期/ 全年 (%)	融雪期	融雪期/ 全年 (%)
1	—	32229	M	22 1	31 8	20 9	1 1	29 0
2	1	3094	M	25 1	44 1	20 7	0 9	24 8
3	1	25292	M	18 2	34 7	22 3	1 7	15 9
4	1	15544	M	15 4	36 2	23 6	4 6	16 6
5	1	5893	M	21 4	26 3	27 2	0 9	20 5
6	1	18462	M	10 8	11 4	19 4	3 1	12 8
7	1	10355	M	9 4	2 9	11 0	0 6	7 2
8	2	7656	M	10 0	7 5	20 5	2 5	11 0
9	1	2426	H	13 8	60 3	20 6	18 2	14 9
10	1	12391	H	17 3	39 5	20 1	15 7	14 7
11	1	8532	M	24 9	105 8	29 6	6 9	22 2
12	2	6508	H	9 5	8 5	20 8	2 0	6 3
13	2	574	H	10 5	15 7	14 4	30 9	6 5
14	2	1037	H	12 0	54 5	17 5	10 9	8 1
15	2	1957	H	16 0	64 2	23 6	19 3	16 8
16	3	481	H	13 7	18 7	16 4	37 4	10 8
17	3	390	M	24 1	118 7	29 2	12 4	23 0
18	1	19186	M	16 5	55 4	22 5	2 3	16 1
19	1	9809	H	13 7	27 7	17 3	3 0	19 5
20	1	4185	H	12 9	15 2	15 0	3 8	15 5
21	1	10425	H	17 7	35 6	18 9	4 8	21 8
22	1	4580	H	18 0	42 7	21 5	9 0	22 5
23	1	5640	H	18 8	42 8	18 7	6 7	23 3
24	1	8075	M	17 8	44 7	18 8	2 9	16 2
25	2	3288	M	15 6	26 4	20 0	9 1	15 4
26	2	5240	H	18 3	45 1	19 4	5 0	20 5
27	—	7354	H	13 0	8 6	14 8	2 8	15 1
平均		8540 9		16 2	38 0	20 2	8 1	16 5

注：地貌类型“M”表示山地；“H”表示丘陵和漫川漫岗

各流域融雪期输沙模数变化于 0. 6~ 37. 4 t/ km²，平均为 8 1 t/ km²，占全年输沙总量的 6. 3%~ 29 0%，平均为 16 5%。与融雪径流不同的是，融雪输沙模数与降雪量的关

系很差，说明径流产沙除由降雪量多寡影响外，还受其他因素影响，如下垫面基本特性、流域地貌形态、面积大小等地理特征（详见下文分析）。但流域融雪期输沙模数占全年输沙模数比例(*STR*) 却与降雪量占年降水量百分比(*PsR*) 有着十分显著的幂函数关系（置信水平 0. 01），融雪期径流深占全年径流深比例(*RR*) 也与该比例(*PsR*) 有着十分显著的幂函数关系(图 5)。本区降水形式以降雨和降雪为主，若将一年中除融雪期之外的部分均视为降雨期，则流域降雨期输沙模数与降雨量的关系也很差，而降雨期输沙模数占全年输沙模数比例与降雨量占年降水量百分比同样有着十分显著的关系(图略)。由此可见，流域降水量虽与输沙模数无显著联系，但降雪和降雨两种降水形式在年内的分配状况却对融雪和降雨产沙在全年总量中的分配具有显著影响。

$STR = 0.521PsR^{1.23}, R^2 = 0.75 \quad (3)$

$RR = 5.10PsR^{0.493}, R^2 = 0.44 \quad (4)$

从上式不难看出，如果降雪量占全年降水量的比例为 10%，则融雪径流将占全年的 15.9%，融雪输沙模数将占全年比例的 8.9%。根据前文分析，东北地区全年降雪量比例为 7%~25%，表明该地区融雪径流比例可达到 13.3%~24.9%，融雪输沙模数比例可到达 5.8%~27.7%。

值得注意的是，本文采用的水文测站资料，既没有包括推移质泥沙量，也没有考虑进入河道前已经沉积下来的流域侵蚀量。东北地区主要侵蚀区位于大小兴安岭山前的丘陵漫岗区，由于坡缓坡长，被侵蚀物质极易在进入河道前重新沉积。此外冬季长期冻结以及春季的反复冻融过程会增加土壤可蚀性^[28]，加强重力侵蚀过程^[29]。因此总体上本文估算的融雪径流量及融雪输沙模数应该偏低，且流域产沙量无法准确反映融雪侵蚀的实际状况。从这个角度而言，在东北地区不能忽视融雪侵蚀。但由于各地降雪比例差异较大，并考虑到资料的可获得性及计算方便，在实际应用时，可根据不同精度的要求，选择 7%~25% 降雪比例的地区考虑融雪侵蚀。如取降雪比例在 10% 时，该等值线主体大致与研究区 200m 等高线一致（图 2-c），恰好是平原区与丘陵区分界线。

3.3 融雪期输沙模数影响因素分析

根据前文分析，东北地区需要考虑融雪侵蚀的地区主要位于长白山地、大小兴安岭地区、及其山前丘陵漫岗区，地貌类型主要为山地与丘陵漫岗。研究视年降雪量占降水总量

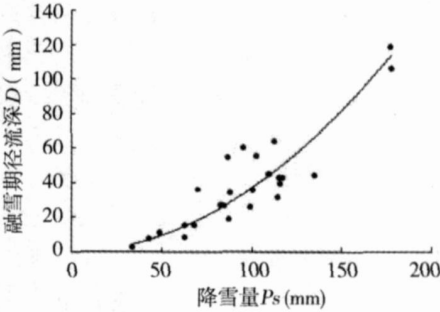


图 4 多年平均融雪期径流深与年降雪量的关系
Fig. 4 The relationship between snowmelt runoff depth and snowfall

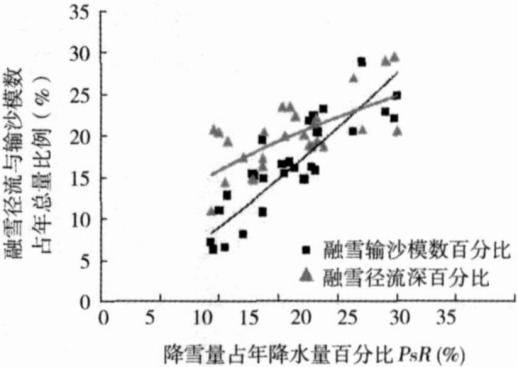


图 5 多年平均融雪期径流深、输沙模数占全年总量比例和降雪量占年降水量百分比关系
Fig. 5 The relationship between the average percentage of snowfall to annual precipitation and the ratio of snowmelt runoff depth and sediment transport modulus to the annual

的比例 $\geq 10\%$ 的流域为降雪较多、融雪侵蚀较为显著的地区。需要考虑融雪侵蚀的流域共 25 个, 12 个位于山地区, 13 个位于丘陵漫岗区。按照两种地貌类型分别统计各流域融雪期输沙模数发现, 输沙模数受地貌形态影响十分明显。山区流域年降雪量 43.3~177.8mm, 平均 104.2mm; 径流深 7.5~118.7mm, 平均 45.3mm; 输沙模数 0.9~12.4t/km², 平均 4.0t/km²。丘陵漫岗区流域降雪量 62.6~116.9mm, 平均 93.5mm; 径流深 8.6~64.2mm, 平均 36.2mm; 输沙模数 2.8~37.4t/km², 平均 12.9t/km²。平均而言, 山区流域降雪量高于丘陵漫岗区, 径流深也较高, 但输沙模数却低于丘陵漫岗区。山区较同纬度丘陵漫岗区气温低, 初雪日早, 终雪日晚, 故雪期较长, 一年中有更多的降水以降雪的形式到达地表, 而以积雪的形式储存在地表的降水亦多于丘陵漫岗区, 这使得春季积雪融化时, 位于山区的流域易产生更多融雪径流。虽然山区融雪径流深高于丘陵漫岗区, 但植被覆盖度相对较高, 土壤流失程度相对较轻, 进入河道中的泥沙少于丘陵漫岗区。

进一步考虑不同地貌类型下, 不同级别流域对输沙模数的影响, 也表明了同样规律: 随着流域级别提高, 输沙模数总体增大, 但丘陵漫岗区流域输沙模数明显高于山地区 (图 6), 二者的比值对于各个级别流域而言变化于 2.4~3.0, 相对比较稳定。如果不考虑流域级别, 则二者比例为 2.9。

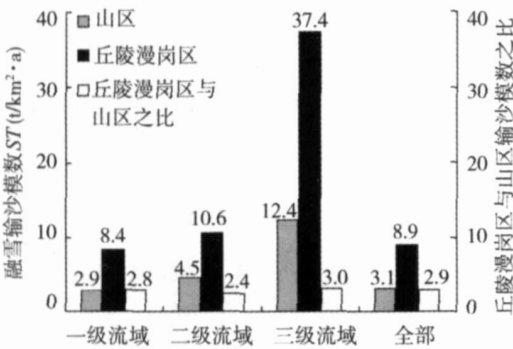


图 6 山区与丘陵漫岗区流域融雪输沙模数的比较
Fig. 6 Comparison between snowmelt sediment transport modulus in mountainous and hilly regions

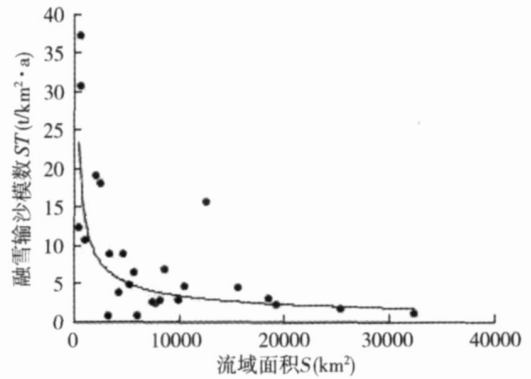


图 7 研究区融雪输沙模数与流域面积的关系
Fig. 7 The relationship between snowmelt sediment transport modulus and the watershed area in selected watersheds

研究表明, 流域侵蚀产沙具有尺度效应, 输沙模数会随流域面积发生变化^[30~33], 我们的研究揭示了这一规律: 总体来说, 在不区分地貌类型的情况下, 需要考虑融雪侵蚀的 25 个流域输沙模数随流域面积增大呈比较明显的幂函数递减规律 (图 7, 置信水平 0.01)。如果进一步区分不同地貌类型, 则输沙模数与流域面积关系有明显差别。在丘陵漫岗区, 13 个流域输沙模数与流域面积的幂函数关系进一步得到改善 (图 8-a, 置信水平 0.005)。但在山区, 输沙模数随流域面积的变化关系更为复杂: 当流域面积大于 4000 km² 时, 随着流域面积增大, 输沙模数呈先递增, 后递减的变化趋势。这个流域面积的转折点大致为 10000~12000km² (图 8-b)。本研究中, 五道沟流域面积为 12391km², 其 54% 为丘陵漫岗区, 34% 为山区, 12% 为河谷平原。由于其地形复杂多样, 且丘陵区绝大部分已垦为耕地, 人为破坏使森林面积减少, 因而荒山凸岭较多, 水土流失严重^[34], 导致输沙模数相对于其他一级支流明显偏高, 五道沟流域融雪输沙模数为 15.7 t/km², 其

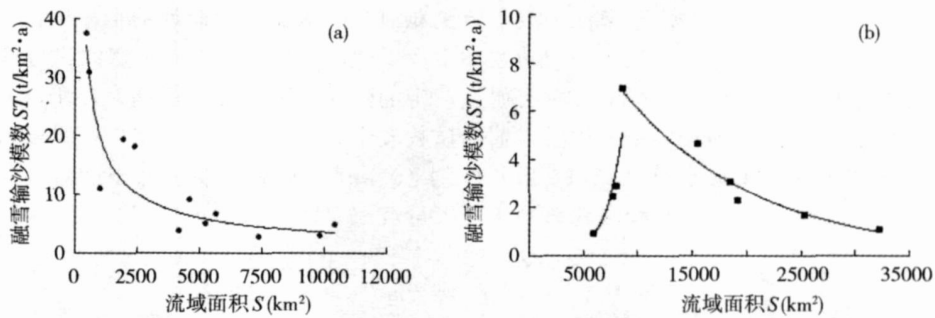


图 8 研究区丘陵漫岗区 (a) 和山区 (b) 融雪输沙模数与流域面积的关系

Fig 8 The relationship between snowmelt sediment transport modulus and the watershed area in hilly (a) and mountainous (b) regions

他一级支流流域平均为 $4.9 t/km^2$ ，前者为后者的 3.2 倍。为了深入分析不同地貌类型下输沙模数与流域面积的变化规律，还需要更为详细的资料继续深入研究。

综上所述，研究区融雪输沙模数与流域面积的关系式为：

如果不考虑地貌类型差异，则全区为： $ST = 798S^{-0.640}$ ， $R^2 = 0.46$ （置信水平 0.01）

如果考虑地貌类型差异，则分别为：

$ST = 3825S^{-0.759}$ ， $R^2 = 0.80$ （置信水平 0.005），丘陵漫岗区；

$ST = 0.0162e^{0.0007S}$ ， $R^2 = 0.91$ （置信水平 0.05），山区， $4000km^2 < S < 12000km^2$ ；

$ST = 3.30 \times 10^6 \cdot S^{-1.43}$ ， $R^2 = 0.93$ （置信水平 0.01），山区， $S > 12000km^2$ ；

式中， ST 是融雪期流域输沙模数 (t/km^2)， S 是流域面积 (km^2)。

现进一步以五道沟水文站控制的流域和镇西水文站控制的流域为例，说明地貌形态对流域融雪输沙模数的影响。五道沟流域面积 $12391km^2$ ，位于长白山区与松辽平原的过渡地带，属丘陵漫岗区。境内东丰、样子哨和五道沟三个水文站分别位于第二松花江三级支流、二级支流上和一级支流流域出口处（图 9-a），三个水文站多年平均融雪输沙模数随着流域面积增大、支流级别的变大而明显减少（图 10-a）。这主要是由于地势逐渐平缓融雪侵蚀产生的泥沙不断堆积。镇西流域面积 $18432km^2$ ，位于大兴安岭南端，属于山区，境内的

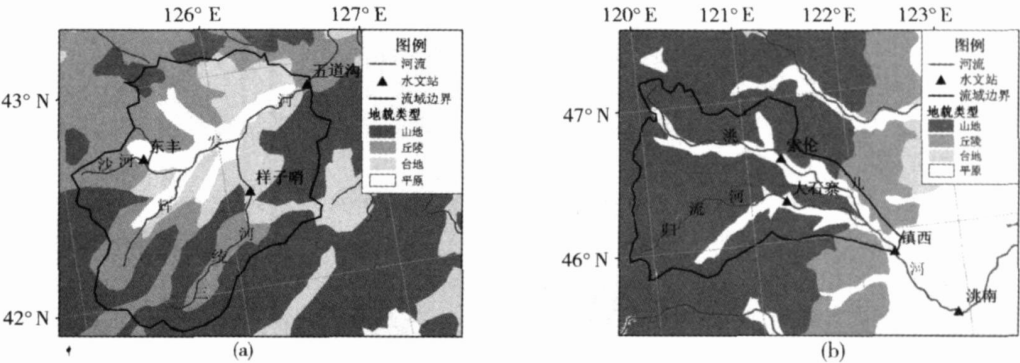


图 9 五道沟 (a) 和镇西 (b) 流域水文站分布地貌图

Fig 9 Geomorphology and the distribution of hydrological stations in Wudaogou (a) and Zhenxi (b) watershed

索伦和大石寨水文站分别位于嫩江一级支流洮儿河和二级支流归流河的上游山区中, 镇西水文站位于洮儿河中游, 地处山口处 (图 9-b), 其多年平均融雪输沙模数明显高于前两者。这表明山区流域汇流过程中, 融雪侵蚀产生的泥沙不断增加。但是, 位于洮儿河下游平原区的洮南水文站, 其多年平均融雪输沙模数较中游明显减少, 就多年平均输沙模数而言, 镇西和洮南水文站分别为 23.9 t/km^2 和 14.0 t/km^2 , 后者亦明显低于前者。表明径流出山后, 融雪侵蚀产生的泥沙因地势平缓而大量沉积 (图 10-b)。

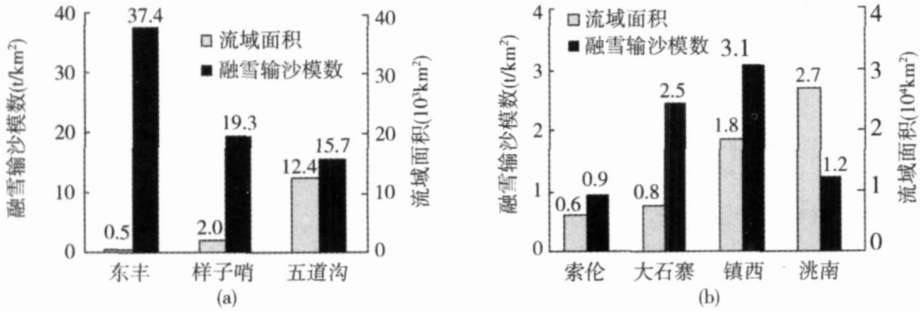


图 10 五道沟 (a) 和镇西 (b) 流域不同级别支流融雪输沙模数输沙模数

Fig 10-a Snowmelt sediment transport modulus of streams with different class in Wudaogou (a) and Zhenxi (b) watershed

实际上, 流域融雪侵蚀产沙还受其他因素影响, 但受资料限制无法进一步探讨。进行融雪侵蚀观测已刻不容缓, 不仅会为水土流失治理提供科学依据, 而且将有助于提高土壤侵蚀预报的精度。

4 结论和讨论

本文在分析东北地区降雪与积雪特征的基础上, 探讨了 27 个典型流域融雪期内径流与输沙模数的基本规律及其影响因素, 得出以下主要结论:

(1) 东北各地雪期为 5~8 个月, 积雪期为 3.5~7 个月, 均由南向北逐渐延长。年降雪量为 30~150 mm, 占年降水总量的比例多在 7~25% 之间。降雪量占年降水量百分比随着雪期的增长呈极显著的线性递增关系。

(2) 融雪期径流深占全年径流深比例 (RR) 和融雪期输沙模数占全年输沙模数比例 (STR) 均与降雪量占年降水量百分比 (P_sR) 有着十分显著的幂函数关系: $RR = 5.10 P_s R^{0.493}$, $STR = 0.521 P_s R^{1.23}$ 。据此可确定该地区融雪径流占年径流量的 13.3~24.9%, 融雪输沙模数占年输沙模数的 5.8~27.7%。但在实际应用时, 可根据不同精度要求, 确定应考虑融雪侵蚀的适当比例。

(3) 融雪输沙模数 (ST) 与流域面积 (S) 有十分显著的幂函数关系: $ST = 798 S^{-0.640}$ 。但在不同的地貌形态下, 两者关系又有所差异: 在丘陵漫岗区, 这种呈幂函数递减关系更为明显, 但在山区, 随着流域面积的增加, 融雪输沙模数先增后减。同时, 流域融雪输沙模数受地貌形态影响十分显著。丘陵漫岗区降雪量和径流深均低于山区, 但输沙模数平均为山区的 2.9 倍。

研究结果初步表明, 融雪侵蚀在东北地区不容忽视。但目前以水文站为基础的观测资料显然无法全面反映融雪侵蚀状况。为此, 应加强融雪期的侵蚀及产沙监测, 以进一步揭示融雪侵蚀影响因素及其作用机理。

参考文献:

- [1] Homkes H. Glaciology in the international hydrological decade In: IAHS Publication No 79. Berlin: IUGG General Assembly, 1967. 7~ 16
- [2] Lewkowicz A G, Kokelj S V. Slope sediment yield in arid continuous permafrost environments, Canadian Arctic Archipelago. *Catena*, 2002, 46(4): 261~ 283
- [3] van Vliet L J P, Hall J W. Effects of two crop rotations on seasonal runoff and soil loss in the Peace River region. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71: 533~ 544
- [4] Dickinson W T, Scott A, Wall G. Fluvial sedimentation in southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 1975, 12: 1813~ 1819
- [5] Wischmeier W H, Szmith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington D C: U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 537, 1978. 7~ 8
- [6] Demidov V V, Ostroumov V Y, Niktishena I A, *et al.* Seasonal freezing and soil erosion during snow melt. *Eurasian Soil Science*, 1995, 28: 78~ 87
- [7] Lundekvam H. EROCOR/USLENO, New empirical erosion models for Norwegian conditions. International Symposium on Snowmelt Erosion and Related Problems, 28~ 30 March 2001, Oslo, Norway.
- [8] Ollesch G, Kistner I, Meissner R, *et al.* Modelling of snowmelt erosion and sediment yield in a small low-mountain catchment in Germany. *Catena*, 2006, 68(2-3): 161~ 176
- [9] Flanagan D C, Nearing M A. USDA- Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette, Indiana: U. S. Department of Agriculture-Agriculture Research Service, 1995
- [10] Botterweg P. Snowmelt and frozen soils in simulation models. In: Boardman J, David F M. *Modelling Soil Erosion by Water*, NATO ASI Series: vol 55. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 365~ 376
- [11] Neitsch S L, Arnold J J, Kiniry J R, *et al.* Soil and water assessment tool: Theoretical documentation, version 2000. Texas: Texas Water Resources Institute, 2002
- [12] 杨针娘, 刘新仁, 曾群柱, 等. 中国寒区水文. 北京: 科学出版社, 2000. 1
- [13] 林燕, 谢云, 王晓岚. 土壤侵蚀模型中的融雪侵蚀模拟研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 16~ 20
- [14] 周琳. 中国气候丛书—东北气候. 北京: 气象出版社, 1991. 55
- [15] 车涛, 李新. 1993~ 2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 64~ 67
- [16] 王玉玺, 解运杰, 王萍. 东北黑土区水土流失成因分析. *水土保持科技情报*, 2002, (3): 27~ 29
- [17] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 66~ 70
- [18] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 50~ 54
- [19] 陈书. 克拜地区土体冻融作用与侵蚀沟发育特征浅析. *中国水土保持*, 1989, (11): 44~ 46
- [20] 刘绪军, 景国臣, 齐恒玉. 克拜黑土区沟壑冻融侵蚀主要形态特征初探. *水土保持科技情报*, 1999, (1): 28~ 30
- [21] 王国志, 勾智慧, 张丽琦. 北部引嫩渠道侵蚀及其治理措施. *泥沙研究*, 2000(2): 76~ 78
- [22] 张永光, 伍永秋, 汪言在, 等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析. *地理研究*, 2008, 27(1): 145~ 154
- [23] Wu Y Q, Zheng Q H, Zhang Y G, *et al.* Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 683~ 691
- [24] 林燕. 松花江流域降雨-径流侵蚀力研究. 北京: 北京师范大学硕士学位论文, 2004 年 5 月.
- [25] 于春冬. 龙凤山水库融雪径流预报. *黑龙江水专学报*, 2004, 31(2): 40~ 41.
- [26] 王树廷, 王伯民. 气象资料的整理和统计方法. 北京: 气象出版社, 1984. 137~ 138
- [27] 李秀云, 汤奇成, 傅肃性, 等. 中国枯水径流研究. 北京: 海洋出版社, 1993. 81~ 83
- [28] Renard K G, Forster G R, Weesies G A, *et al.* Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington D C: U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 703, 1997. 32~ 35, 81~ 87.
- [29] 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究. *中国水土保持*, 2003, (10): 17~ 18
- [30] Wailing D E. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 1983, 65: 209~ 237.
- [31] Church M, Slaymaker O. Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia. *Nature*, 1989,

337: 452~ 454

- [32] 闫云霞, 许炯心. 黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探. 中国科学, D 辑, 2006, 36(8): 767~ 776
- [33] 师长兴. 长江上游输沙尺度效应研究. 地理研究, 2008, 27(4): 800~ 810
- [34] 张学俭, 武龙甫. 东北黑土地水土流失修复. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 95~ 96

Study on snowmelt runoff and sediment yields in Northeast China

JIAO Jian¹, XIE Yun¹, LIN Yan¹, ZHAO Deng-feng²

(1. School of Geography; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 Heilongjiang Water Resource Bureau, Harbin 150001, China)

Abstract: Severe soil erosion has threatened land resources in Northeast China. Distributed at mid- and high latitudes, soil loss caused by snowmelt runoff plays a main part in soil erosion in this region. But there is little research on it. In this study, the characteristics of snowfall and snow cover were studied by using daily precipitation records from 93 climate stations, and the characteristics of snowmelt runoff and sediment yields were analyzed based on daily runoff and sediment yield data from 27 typical hydrological stations. The results showed that the snow period was 5-8 months and the snow cover period was 3.5-7 months in Northeast China, which prolonged gradually from south to north for both of the periods. The average proportion of snowfall to annual precipitation was 7%-25%, which caused 13.3%-24.9% of snowmelt runoff and 5.8%-27.7% of snowmelt sediment yields over the whole year. Although the snowmelt sediment transport modulus did not have significant relationship with snowfall, the distribution of snowfall and rainfall in a year had great influence on the ratio of snowmelt sediment yields to the year's total. The topography has great impacts on snowmelt sediment transport modulus. The snowfall and snowmelt runoff are less in hilly regions than in mountainous regions, but the sediment transport modulus in hilly regions was 2.9 times higher than that in mountainous regions. The sediment transport modulus (ST) has a good power function with the watershed area (S): $ST = 797.62S - 0.6395$. This trend is more apparent in hilly regions, while in the mountainous regions, the relationship between them is complex. The analyzed runoff and sediment yields in this paper were based on the observations in the hydrological stations which did not include deposited part before flowing into the river. It is necessary to strengthen the monitoring of runoff and soil loss during snowmelt season in order to get a better understanding of snowmelt erosion and mechanisms of causing factors.

Key words: snowfall and snow cover; snowmelt season; snowmelt runoff; snowmelt sediment transport modulus; Northeast China