

# 高海拔寒区融水侵蚀研究进展

冯君园<sup>1,2</sup>, 蔡强国<sup>1</sup>, 李朝霞<sup>2</sup>, 孙莉英<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室,  
北京 100101; 2. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:**对比不同侵蚀类型侵蚀过程、机理, 阐述冻融侵蚀和融水侵蚀的区别与联系; 探讨并界定融水侵蚀概念, 指出融水侵蚀是季节性冻土在冰川积雪融水径流作用下的土壤侵蚀过程。分析融水侵蚀过程机理, 反复的冻融作用和不透水冻结层降低土壤抗蚀性, 二者同时促进坡面融水集流冲刷加速侵蚀。分析融水侵蚀主要影响因素, 气温、辐射和降水是影响冻融作用和融水径流的直接因素, 植被、风和地形通过影响雪的分布及辐射而间接影响融水侵蚀过程。评述融水侵蚀 GIS 定性评价方法和评价模型, 融水侵蚀评价研究需参考 GIS 的定性评价, 借鉴 USLE/WEPP 等土壤侵蚀模型方法。最后对融水侵蚀未来的研究方向进行了展望。

**关键词:**水土保持; 融水侵蚀; 过程机理; 影响因素; 评价方法

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0331-05

## Research Progresses of Melt Water Erosion in the High Altitude and Cold Regions of China

FENG Junyuan<sup>1,2</sup>, CAI Qiangguo<sup>1</sup>, LI Zhaoxia<sup>2</sup>, SUN Liying<sup>1</sup>

(1. 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;

2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** On the basis of comparing different erosion types and mechanisms, this paper analyzed the relation of freeze-thaw erosion and melt water erosion, and discussed the concept of melt water erosion. The melt water erosion is defined as the soil erosion progress that water runoff resulting from the melted ice and snow erodes seasonal frozen soil. This paper analyzed the mechanism and characteristics of the melt water erosion, and figured out that repeated freeze-thaw action and impervious permafrost reduced erosion durability of soil and promoted the slope melt water runoff scouring soil. This paper analyzed the main influence factors on melt water erosion. The temperature, radiation and precipitation are the immediate influence factors on melt water erosion, the vegetation, wind and terrain influence the distribution of the snow and the radiation. This paper narrated the evaluation methodologies and evaluation model, and figured out that the research of melt water erosion should consult GIS/WEPP/EUROSEM models. In the end, this paper discussed the main research directions combining with the physical conditions of melt water erosion in our country.

**Keywords:** soil and water conservation; melt water erosion; mechanism; influence factor; evaluation methodology

我国冻土面积巨大, 融水侵蚀是高海拔冻土区主要侵蚀类型。中国发生融水侵蚀的区域主要包括东北、内蒙古东部和北部、新疆北部和西部、青藏高原等稳定积雪区和冰川区, 都属于冻融作用强烈区域, 据

第 2 次全国土壤侵蚀遥感调查资料统计, 全国冻土面积约 215 万 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的 22.3% 左右。景国臣<sup>[1]</sup>研究表明高海拔冻土区最主要的侵蚀类型就是融水径流侵蚀。

收稿日期: 2014-05-20

修回日期: 2014-07-28

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“高海拔寒区融水土壤侵蚀机理与过程模拟研究”(41230746); 国家自然科学基金面上资助项目“坡面水蚀动力与细沟发育形态的相互作用机制及其影响因素”(41271304)

第一作者: 冯君园(1988—), 男, 山东枣庄人, 硕士, 研究方向为水土保持与融水侵蚀。E-mail: fengfangyuan112@126.com

通信作者: 孙莉英(1978—), 女, 河北灵寿人, 博士, 助理研究员, 主要从事水沙环境风险与控制研究。E-mail: sunliying@igsnr.ac.cn

融水径流对下游河道流量的贡献很大,融水侵蚀造成的水土流失对下游河道流量、输沙有直接影响,危害严重。孙辉等<sup>[2]</sup>研究表明,青藏高原几乎所有河流和湖泊在4—6月份解冻期间都比较浑浊。Swift等<sup>[3]</sup>分析了乌鲁木齐河的英雄桥站水文资料,结果显示:年径流量的增加会使河流的平均含沙量、输沙量明显增加。河流泥沙直接影响河床变化,对河流水情及河流变迁有重大影响,河流输沙增多引起水库、渠道淤积,给防洪、灌溉、供水带来困难。高寒区严重的融水侵蚀也给青藏铁路、公路、输油、输气管线的安全运行带来威胁<sup>[3-5]</sup>。

目前国内外融水侵蚀研究较少,对融水侵蚀缺乏足够的认识,应该重视融水侵蚀研究,包括侵蚀机理的研究和预报模型的开发。

## 1 融水侵蚀概念

融水侵蚀是季节性冻土在低温环境反复的冻融作用下破碎、崩解,表层土壤随着气温上升解冻后,在冰川和积雪融化形成的地表径流冲刷作用下被剥离、搬运和堆积的土壤侵蚀过程。

融水侵蚀是区别于融雪侵蚀和冻融侵蚀的典型侵蚀类型:(1)融雪侵蚀是融雪径流作用下的侵蚀过程,主要是对土壤颗粒进行冲刷和搬运,同时冻融过程导致土壤性状改变,进而影响土壤抗蚀能力<sup>[6]</sup>。融雪侵蚀是融水侵蚀的一种形式,融雪侵蚀侧重于融雪径流,已有研究割裂了冰川、积雪的联系,片面地针对高纬度地区融雪径流作用而定义融雪侵蚀有失偏颇;融水侵蚀的定义包括冰川和积雪融水径流,考虑我国高海拔寒区冰川积雪交错分布的情况,融水侵蚀的定义更为全面、合理。(2)目前,国内外学者对于冻融侵蚀的定义与研究范畴的界定越来越清晰,大部分学者趋向于将由于温度的频繁变化造成的冻融交替所引起的土体或岩石机械破坏并在重力等作用下被搬运、迁移、堆积的过程定义为冻融侵蚀<sup>[7]</sup>。冻融侵蚀与融水侵蚀关系紧密但区别明显,二者都因前期冻融作用导致土壤破碎,为侵蚀提供丰富的物质来源,但是融水侵蚀后期动力源自冰川积雪融化后的坡面径流冲刷,与冻融侵蚀的重力侵蚀力不同。融水侵蚀与冻融侵蚀时间上同时发生、空间上交错分布,两种侵蚀类型都集中发生在温度上升后的春季解冻期,随着温度的继续升高,夏季仍是融水侵蚀的高发期;冻融侵蚀高发区也是融水侵蚀高发区,无法严格区分两种侵蚀类型。

## 2 融水侵蚀过程机理

融水侵蚀主要受冻融作用及冻土层的影响。季节性冻土的冻融作用是高海拔寒区土壤侵蚀的重要动力之一,冻土层对融水侵蚀有极大的促进作用。

### 2.1 冻融作用的影响机理

冻融作用破坏土体结构,影响土壤物理性质,降低土壤抗蚀性。冻融作用对土壤物理性质的影响,主要表现在水与冰转化过程中水分体积胀缩对土壤团聚结构的破坏。当气温下降到一定程度,土壤中的水分开始结冰。土壤孔隙中的冰晶增长使土壤团聚体受到挤压或破裂。冻融交替也影响到土壤抗侵蚀性能,主要通过影响土壤结构、土壤颗粒的粘聚力、水热分布及其表面粗糙度等物理特性进而影响土壤可蚀性和径流侵蚀输沙能力。冻融交替破坏后的土壤抗蚀性降低,极易发生融水侵蚀。Ferrick和Gatto<sup>[8]</sup>通过室内试验验证冻融过程显著增加坡地融冻土壤侵蚀的假设。结果表明,冻融循环显著增加地表径流,土壤侵蚀量是未冻土壤的2.4~5.0倍,特别是土壤含水量较高时更为严重。

冻融作用对土壤物理性质的破坏程度受多因素影响。室内试验表明冻融过程降低团聚体稳定性,破坏程度主要取决于土壤类型、含水量、团聚体大小、冻结温度及冻融循环次数等因素<sup>[9]</sup>。Formanek等<sup>[10]</sup>通过室内测量显示,粉砂壤土内聚力强度经历第一次冻融循环后,比初始值的一半还要小,但是第二次和第三次冻融循环影响效果很小。Edwards等<sup>[11]</sup>的室内模拟降雨试验结果显示裸土冻后土壤流失增加了90%,这些土壤流失主要是由于冻融土壤入渗降低引起的地表径流量增加,融水径流强烈冲刷所致。

### 2.2 冻土层作用机理

冻土层对融水侵蚀的影响是全方面的。土体在冻结过程中固结了大量水分,为融水侵蚀的发生准备条件;土壤表层解冻后,下层的冻结层作为不透水层显著促进了融水侵蚀的发生;土壤解冻深度对融水侵蚀过程影响也很大。

冻土在形成过程中提高土壤含水量,为融水侵蚀做好前期准备。冻土在冻结形成过程中贮存了大量固态水,土壤含水量显著增大<sup>[12]</sup>。青藏高原多年冻土区10 m深度以内土层的平均重量含水量为18.1%。估计由于冻土变化平均每年从青藏高原多年冻土中由地下冰转化成的液态水资源将达到50~110亿 $m^3$ <sup>[13]</sup>,相当于黄河兰州站年径流量的1/6~

1/3,伴随着融水径流的侵蚀作用同样不可忽视<sup>[14]</sup>。

不透水冻结层对融水侵蚀的影响在于限制水分入渗,从而使表层解冻土壤含水量增大,饱和条件下的土壤抗剪强度降低<sup>[15-16]</sup>。另外,冻结层也使融水更容易集流并具有冲刷能力。Sharratt 等<sup>[17]</sup>试验表明,冻结层限制水的入渗,导致地表径流和土壤含水量增加,从而增大了侵蚀量。Oygarden<sup>[18]</sup>通过研究挪威冬季的一次降雨,认为未完全解冻层是导致大范围片蚀和较小细沟侵蚀发生的主要原因。

土壤解冻深度对融水侵蚀过程有显著影响。王荣军等<sup>[19]</sup>分析了天山北坡军塘湖流域春季融雪期季节性冻土湿度、雪深及流量数据,结果显示表层 10 cm 以下季节性冻土的湿度剧烈变化造成融雪水下渗增加,削弱了洪峰峰值。范昊明等<sup>[20]</sup>有关草甸土融雪侵蚀模拟研究表明,解冻深度越小,前期融雪径流侵蚀率越大,而后期侵蚀率缓慢增大,解冻深度越大,前期融雪径流侵蚀率越小,后期细沟侵蚀出现后侵蚀率急剧增大。

综上所述,笔者认为冻融作用固结土壤水分,破坏土体,是融水侵蚀的准备条件;随着表层土壤解冻,下层不透水的冻结层限制水分入渗,增大表层土壤含水量,降低土壤抗蚀性,冻结层也使冰川积雪融水更容易集流并加强其冲刷能力,极大地增强了融水侵蚀强度;随着解冻层深度增加,后期侵蚀率显著增大。

### 3 融水侵蚀影响因素分析

考虑融水侵蚀发生过程,气温、辐射、降水、植被、风和地形等是影响融水侵蚀的主要因素,其中气温、辐射和降水是影响冻融作用和融水径流的直接因素,植被、风和地形通过影响雪的分布及辐射而间接影响融水侵蚀过程。

融水径流量是融水侵蚀的首要影响因素,冰川积雪的消融是一个复杂过程,从宏观尺度看,季节变化与海拔高度是影响冰川积雪融化的主要因素。何元庆等<sup>[21]</sup>对玉龙雪山冰川进行分析研究,认为气候变暖是玉龙雪山冰川退缩的主要原因。李巧媛<sup>[22]</sup>研究了升温情景及降温情景下青藏高原冰川的变化规律。研究发现,青藏高原冰川在气候变暖情景下表现为不断退缩并最终可能消亡的变化趋势,其变化速度与气温变化速率直接相关。

在较小尺度上,辐射、地形、降雨、植被等是影响积雪融化的主要因素。李晶等<sup>[23]</sup>分析了 2005 年 6—9 月的野外观测资料。结果表明,雪面最主要的能量

来源是消融期净辐射,感热供热也是积雪融化不可忽视的因素。焦剑等<sup>[24]</sup>对东北地区融雪期径流及产沙特征进行分析,结果表明:地貌对融雪期流域输沙模数有显著影响:丘陵漫岗区输沙模数较大,平均是山区的 29 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。史彦江等<sup>[25]</sup>对伊犁河谷缓坡地融雪侵蚀特征进行研究,结果表明:坡度与融雪强度呈正相关关系;融雪后,表层土壤含水量表现为:8°坡显著低于 5°,3°坡;日产沙量和泥沙侵蚀量与坡度呈正相关。Danny 等<sup>[26]</sup>对美国俄勒冈州研究表明,在一次同时有降雨发生的融雪过程中,没有林草覆盖区域积雪融化雪水当量是有较好林草覆盖区域的 5 倍。林草覆盖减缓了融雪速度,降雨对积雪融化具有重要的加速作用。Pomeroy 等<sup>[27]</sup>对加拿大北部 Yukon Territory 地区灌木冻土带研究发现,较高灌木区域冬季积雪数量虽然高出稀疏灌木区的 147%,但融雪速率也快于稀疏灌木区 47%,研究结果认为是出露的灌木反射率低,灌木吸收太阳总能量高于积雪出露状态,并把能量传递到地表积雪,从而加速融雪速率。灌木能很好实现这种能量传递,但高大乔木的能量传递较为有限。

已有研究大多利用一种分析方法对某一区域进行研究,相似研究很多,结果不尽相同,且研究区域局限,研究结果缺乏广泛的适用性。融水侵蚀包括复杂的冻融过程和融水径流作用,具体影响因素需要开展室内模拟试验对比研究、分析各影响因素的作用机制。

### 4 融水侵蚀评价方法探讨

融水侵蚀的评价方法比较少,参考已有研究成果,融水侵蚀评价可以借鉴 GIS 的定性评价方法和评价模型定量评估方法。

#### 4.1 GIS 定性评价

GIS 评价方法简便易行,适用于多种侵蚀类型的宏观评价。朱惇等<sup>[28]</sup>采用 NEFCLASS 模型通过地面监测调查数据建立客观、全面的评价标准,并结合 GIS 实现对研究区域土壤侵蚀的快速评价,经验证结果具有较高可靠性。李成六<sup>[7]</sup>基于 GIS 采用因子比较法对三江源区的冻融侵蚀强度进行了评价,结果显示冻融侵蚀强烈的区域主要分布在地形起伏较大的山区。倪晋仁等<sup>[29]</sup>提出基于遥感监测数据和最小图斑,建立了土壤侵蚀快速评估模型。张建国<sup>[30]</sup>选取气温年较差等 6 个因子建立冻融侵蚀分级评价指标体系,用加权加和的方法建立了适合西藏自治区的冻

融侵蚀相对分级评价模型,并在地理信息系统软件的支持下实现了西藏自治区冻融侵蚀相对分级。吴万贞等<sup>[31]</sup>通过野外调查建立解译标志分析,结合冻融发生的条件对三江源地区冻融侵蚀动力进行分析并对其进行了冻融侵蚀强度的分级,结果表明:三江源地区冻融侵蚀具有分布范围广,不同强度冻融侵蚀空间分布明显,冻融侵蚀地区分布差异明显等特点。张亦超<sup>[32]</sup>提出基于 GIS 技术构建土壤风蚀模型软件的思路和方法,该软件系统可以从时间和空间尺度上快速得到风蚀模数及风蚀强度分级结果。

综上所述,基于 GIS 的研究主要是采用因子比较法对侵蚀强度进行分级评价,该方法选取因子主观性太强,且各因子之间存在效果叠加作用,定性结果可信度不高。同时该方法需要实地调查资料作为结果验证的对照,需要大量的野外调查工作,耗费大量的时间、人力和物力。

#### 4.2 评价模型定量评估

融水侵蚀评价模型研究较少,没有针对的预报模型,可以对其他模型进行修订、校正实现融水侵蚀定量评估,常用的修订模型有 USLE (Universal Soil Loss Equation) 和 WEPP (Water Erosion Prediction Project) 模型。

USLE 模型研究较多,高峰等<sup>[33]</sup>基于 GIS 和 USLE 模型对钦江流域土壤侵蚀进行定量评估,并得出钦江流域年均土壤侵蚀模数为 2 608.87 t/(km<sup>2</sup>·a)。国内外有针对 USLE 模型适用于冬季过程的修订研究以实现融雪侵蚀的评估<sup>[32]</sup>,但是由于经验模型基本不考虑融雪侵蚀的物理过程,经过反复修订后可能在本地应用较好,但若进行其他区域应用,则需进行大量修订、校正,没有广泛适用性<sup>[1]</sup>。

WEPP 模型起步较晚,但应用广泛。代龙华等<sup>[34]</sup>基于 WEPP 模型研究紫色土坡面水蚀,结果表明该模型不仅预测较为准确,还可估算土壤侵蚀的时空分布及全坡面或坡面任意一点的净土壤流失量及随时间的变化。WEPP 模型对融雪侵蚀的预报则通过空气温度、太阳辐射、蒸发传热、降水过程几个方面的能量平衡计算,实现对雪的累积、雪密度、积雪是否融化、融雪径流发生、土壤冻结与融化等方面的模拟,进而对融雪侵蚀进行以小时为单位的模拟预报<sup>[35]</sup>。虽然 WEPP 模型对融雪侵蚀物理过程的模拟考虑相对完备,但仍有不足之处,如模型中并未考虑冻融作用对土壤水分、热量迁移而造成的土壤可蚀性变化等问题,而这种变化将直接影响到侵蚀量预测的精度<sup>[1]</sup>。

综上所述,笔者认为融水侵蚀评价要参考 GIS 的定性评价结合我国冻融侵蚀的普查标准,进行流域的坡面和沟道划分,建立产流汇水模型;利用已建立的坡面和沟道侵蚀产沙模型实现流域侵蚀产沙模拟;实现从坡面到沟道到流域的侵蚀产沙预报。

## 5 研究展望

高海拔寒区冰川融水、融雪与土壤融冻交互作用,实际上是一个水热耦合、多因素综合作用的复杂侵蚀过程,融水侵蚀机理等各方面研究都需要进一步加强和补充。

(1) 融水侵蚀的机理研究较少,也缺乏融水侵蚀模型的开发研究,参考已有模型的研究,借鉴 WEPP 等土壤侵蚀模型方法,以融水坡面侵蚀过程模型为基础,结合已建立的气象模型和土壤融冻模型,采取室内模拟试验的侵蚀参数,利用有限元计算方法进行数值计算,进行坡面和沟道侵蚀产沙过程的模拟。以 GIS 为基础,进行流域的坡面和沟道划分,建立产流汇水模型;利用已建立的坡面和沟道侵蚀产沙模型实现流域侵蚀产沙模拟;实现从坡面到沟道到流域的侵蚀产沙预报。

(2) 融水侵蚀过程是一个多因素共同影响的过程,了解各因素对融水侵蚀的影响效应和影响机理是对融水侵蚀进行预报和防治的基础。目前融水侵蚀影响因素缺乏系统的研究,应该加强野外监测、室内试验等,定量地给出各因素对融水侵蚀影响的效应。

(3) 在深入分析融水侵蚀过程机理和影响因素的基础上,合理制定融水侵蚀评价标准,对我国融水侵蚀区侵蚀强度合理分级,并采取相应的防治措施减轻融水侵蚀的危害。

#### 参考文献:

- [1] 景国臣. 冻融侵蚀及其形式探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2003, 31(4): 111-112.
- [2] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融侵蚀交替生态效应研究进展[J]. 土壤, 2008, 40(4): 505-509.
- [3] Swift D A, Nienow P W, Hoey T B. Basal sediment evacuation by subglacial meltwater: Suspended sediment transport from Haut Glacier d'Arolla, Switzerland[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30(7): 867-883.
- [4] Haritashya U K, Singh P, Kumar N. Suspended sediment from the Gangotri Glacier: Quantification, variability and associations with discharge and air temperature[J]. Journal of Hydrology 2006, 321(1): 116-130.

- [5] Singh P, Ramasatri K S, Kumar N. Suspended sediment transport from the dokriani glacier in the Garhwal Himalayas[J]. *Nordic Hydrology*, 2003, 34(3): 221-244.
- [6] 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.
- [7] 李成六, 马金辉, 唐志光, 等. 基于 GIS 的三江源区冻融侵蚀强度评价[J]. *中国水土保持*, 2011(4): 41-43.
- [8] Ferrick M G, Gatto L W. Quantifying the effect of a freeze-thaw cycle on soil erosion: Laboratory experiments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(10): 1305-1326.
- [9] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [10] Formanek G E, McCool D K, Papendick R I. Freeze-thaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(6): 1749-1752.
- [11] Edwards L M, Burney J R. Soil erosion losses under freeze/thaw and winter ground cover using a laboratory rainfall simulator[J]. *Canadian Agricultural Engineering*, 1987, 29(2): 109-115.
- [12] 常学向, 王金叶, 金博文, 等. 祁连山林区季节性冻土冻融规律及其水文功能研究[J]. *西北林学院学报*, 2001, 16(S1): 26-29.
- [13] 丁永建, 潘家华. 气候与环境变化对生态和社会经济影响的利弊分析[M]// 秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变(下卷). 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究: 现状、趋势及关键问题[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4): 187-195.
- [15] 刘海昆, 黄树祥, 王慧. 论冻土对土壤水分动态的影响[J]. *黑龙江水利科技*, 2002, 30(3): 87.
- [16] 王金叶, 康尔泗, 金博文. 黑河上游林区冻土的水文功能[J]. *西北林学院学报*, 2001, 16(S1): 30-34.
- [17] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern US corn belt[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(4): 487-494.
- [18] Oygarden L. Rill and gully development during an extreme inter runoff event in Norway[J]. *Catena*, 2003, 50(2): 217-242.
- [19] 王荣军, 刘志辉, 李诚志, 等. 融雪期季节性冻土湿度变化对融雪洪水的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 277-281.
- [20] 范昊明, 武敏, 周丽丽, 等. 草甸土近地表解冻深度对融雪侵蚀影响模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 28-31.
- [21] 何元庆, 章典. 气候变化是玉龙雪山冰川退缩的主要原因[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 230-231.
- [22] 李巧媛. 不同气候变化情景下青藏高原冰川的变化[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2011.
- [23] 李晶, 刘时银, 张勇. 天山难破科契卡尔巴西冰川消融期雪面能量平衡研究[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 366-373.
- [24] 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.
- [25] 史彦江, 宋锋惠, 罗青红, 等. 伊犁河谷缓坡地融雪侵蚀特研究[J]. *新疆农业科学*, 2009, 46(5): 1111-1116.
- [26] Danny M, John K, Dave T, et al. The sensitivity of snowmelt process to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: A case study of the 1996 Pacific Northwest flood[J]. *Hydrol Process*, 1998, 12: 1569-1587.
- [27] Pomeroy J W, Bewley D S, Essery R L H, et al. Shrub tundra snowmelt [J]. *Hydrol Process*, 2006, 20(4): 923-941.
- [28] 朱悫, 王天巍, 蔡崇法, 等. 基于模糊神经网络与 GIS 的区域土壤侵蚀快速评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 103-107.
- [29] 倪晋仁, 李秀霞. 基于最小图斑的土壤侵蚀快速评估方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2007, 15(4): 425-434.
- [30] 张建国, 刘淑珍, 杨思全, 等. 西藏冻融侵蚀分级评价[J]. *地理学报*, 2006, 61(9): 911-918.
- [31] 吴万贞, 刘峰贵. 三江源地区冻融侵蚀动力分析及其分布特点[J]. *青海师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 26(1): 57-61.
- [32] 张亦超, 史明昌, 岳德鹏, 等. 基于 GIS 的土壤风蚀模型软件构建[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(1): 69-74.
- [33] 高峰, 华瑾, 卢远, 等. 基于 GIS 和 USLE 的钦江流域土壤侵蚀评估[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 18-22.
- [34] 代龙华, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 基于 WEPP 模型的紫色土坡面水蚀预报[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2): 60-65.
- [35] 刘宝元, 谢云, 张科利, 等. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.