

冻融侵蚀研究的回顾与展望

魏霞^{1,2}, 丁永建², 李勋贵¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:对国内外冻融侵蚀研究的主要成果进行了介绍。首先探讨并明晰了冻融侵蚀的概念;介绍并分析了冻融侵蚀的成因、分类及侵蚀强度分级标准、冻融侵蚀量及其主要影响因素、冻融侵蚀预报和冻融侵蚀的防治等研究成果,指出了冻融侵蚀研究中存在的问题与不足;最后,结合我国冻融侵蚀研究的实际情况,提出了今后一定时期内,我国未来冻融侵蚀研究的方向与重点领域。

关键词:冻融侵蚀;研究成果;存在问题;未来展望

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0271-05

Review and Prospect of Freeze-thaw-induced Erosion Research

WEI Xia^{1,2}, DING Yong-jian², LI Xun-gui¹

(1. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Main advances at home and abroad in the field of freeze-thaw-induced erosion are reviewed. The notion of freeze-thaw-induced erosion is firstly discussed and clarified. Then some research results such as the cause, type, intensity classification, erosion rate, main influence factors, erosion prediction and prevention and control of freeze-thaw erosion are presented and analyzed. The problems and shortcomings of current freeze-thaw-induced erosion research are pointed out. Research directions and key issues of freeze-thaw-induced erosion in a certain period of the future are finally put forward in terms of the real research situations of freeze-thaw-induced erosion in China.

Key words: freeze-thaw-induced erosion; research results; current problems; prospect

土壤侵蚀是重要的环境问题之一,土壤侵蚀是指在陆地表面,水力、风、冻融和重力等外力作用下,土壤、土壤母质及其它地面组成物质被破坏、剥蚀、转运和沉积的全部过程。土壤侵蚀的主要类型有水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀和冻融侵蚀。前三种类型侵蚀多发生在春夏秋季,而冻融侵蚀则发生在冬春季节。目前有关土壤侵蚀的研究很多,但主要集中在水力侵蚀和风力侵蚀,尤其水力侵蚀的研究已非常成熟。由于侵蚀发生环境的恶劣、侵蚀过程的复杂性以及监测和实验模拟的困难等原因,冻融侵蚀的研究相对滞后。

我国冻土面积约占国土面积的 75%,冻融侵蚀分布广泛。据第二次全国土壤侵蚀遥感调查资料统计,全国水土流失总面积 356 万 km² 中,存在冻融侵蚀的面积就有 126.89 万 km²,所占比例为 35.6%^[1],占全

国总面积的 13.36%,主要分布在西藏、青海、新疆、内蒙古、甘肃、四川、黑龙江 7 省区,青藏高原及其附近的高山区是冻融侵蚀分布最集中且侵蚀最强烈的区域^[2]。虽然冻融侵蚀在我国以轻度、中度为主,强度侵蚀相对较少,但冻融侵蚀对人类生存与发展的影响已逐渐突显并引起了人们越来越多的关注。刘绪军等^[3]对黑龙江克拜黑土区沟壑冻融侵蚀主要形态特征进行了探索,指出克拜黑土区沟壑冻融侵蚀尤为严重,可使耕地中的沟壑每年扩张 50~100 cm。景国臣^[4]对黑龙江省冻融侵蚀形式及其危害进行了调查研究,认为冻融侵蚀加快了土壤流失速度,使大量农、林、草地被破坏,降低了土地生产力。王随继^[5]对黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力进行了评估,认为黄河中游多沙区的侵蚀产沙中冻融侵蚀的

收稿日期:2011-08-11

修回日期:2011-09-13

资助项目:国家自然科学基金项目(41001154);教育部博士点基金项目(20090211120021);中央高校基本科研业务费专项资金资助(lzujbky-2010-103,lzujbky-2012-139);中国博士后科学基金(20110490862)

作者简介:魏霞(1980—),女,陕西扶风人,副教授,博士后,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源等方面的研究。Email:weix@lzu.edu.cn

贡献是巨大的。谢飙等^[6]对三江源地区水土流失成因、特点及防治对策进行了研究,结果表明冻融侵蚀主要发生在海拔 4 500 m 以上,冻融侵蚀面积为 5.96 万 km²,占该区总面积的 19.5%,且侵蚀方式以寒冻风化剥蚀和热融滑塌最为常见。董瑞琨等^[7]、张建国等^[8]、刘淑珍等^[9]研究表明冻融侵蚀是西藏地区最主要的土壤侵蚀类型之一,也是该区所面临的主要生态环境问题之一。冻融侵蚀给当地的生产生活造成了很大危害,正严重威胁着耕地、草地资源以及公路、堤坝等建筑物,并已经成为制约西藏社会经济发展的主要因素之一。据松辽委调查报告,部分东北黑土侵蚀区,土壤冻融侵蚀的速度已不亚于暴雨造成的水土流失。而作为长江、黄河主要源头的青藏高原,冻融侵蚀面积达到 104 万 km²,严重地影响了当地人民的生产、生活和地区经济的发展。同时,冻融侵蚀的产物也成为长江、黄河泥沙的主要来源之一^[10]。因此,开展冻融侵蚀研究意义重大,当前急需开展冻融侵蚀机理、冻融侵蚀定量化、冻融侵蚀环境效益等方面的深入研究,对拓宽该领域的研究思路、完善冻融侵蚀研究框架和学科体系等方面具有重要的理论价值。本文通过对前人的研究成果进行归纳总结,旨在为该领域的发展指明方向。

1 冻融侵蚀研究成果

1.1 冻融侵蚀的概念

在我国,冻融侵蚀尚未列入现代侵蚀研究范畴^[11]。目前,国内外学者对于冻融侵蚀的定义与研究范畴,尚无全面、统一的认识,但从冻融侵蚀研究的主要发展轨迹来看^[11-14],人们对它的定义与研究范畴的界定,已经越来越清晰。一般认为,冻融侵蚀是高寒地区由于温度变化,导致土体或岩石中的水分发生相变,体积发生变化,以及由于土壤或岩石不同矿物的差异胀缩,造成土体或岩石的机械破坏并在重力等作用下被搬运、迁移、堆积的整个过程^[15-16],并且认为雪蚀作用是冻融侵蚀的一种作用形式。冻融侵蚀大都发生于土体融化后,因为在冻结状态下,土体中的水分主要以冰的形式存在,土粒间的联结力以冰凝聚力的形式存在,结构比较稳定;当冻结状态的土体融化时,土体间的联结力迅速减小,加上季节冻土层下永冻层

(多年冻土层)起着隔水层作用,使季节融化层土体含水量增大,这时季节层土体更易发生侵蚀作用^[17-19]。土壤冻融具有时间和空间的不一致性,当土体表层解冻,底层未解冻时形成一个不透水层,水分沿交接面流动,使两层间的摩擦阻力减小,此时即便不具有侵蚀性的降雨,也有可能引起土壤侵蚀的发生^[20-21]。

1.2 冻融侵蚀的成因、分类及侵蚀强度分级

谢飙等^[6]、孙中峰等^[22]将冻融侵蚀的成因概括为自然因素和人为因素两种。自然因素包括:①温度包括区域内年平均地温、地面温度年较差。温度为冻融侵蚀的决定性因素。②土壤指土壤质地与土壤含水量。③植被能保持土壤中的水分,降低地表温度年较差,因而减小最大季节融化(冻结)深度。④地形与坡向。地形的不同,冻融侵蚀的类型与程度也不同;坡向不同,冻融侵蚀也不同,南坡由于温差大,坡向冻结(融化)层深度也加大。人为因素是指自建国以来,人为活动十分频繁,采伐作业对地表进行扰动及破坏,导致冻土温差加大,冻土融化,特别是在多年冻土分布的南界,由于气候较北部暖和,更适于人们的生存,人口也较为密集,人为活动更加频繁,冻融侵蚀发生的可能性也就越大,危害也就愈加强烈。

谢飙等^[6]将冻融侵蚀分为寒冻风化剥蚀、热融滑塌、冻融泥流、风沙溶蚀坍塌。李辉霞等^[23]将冻融侵蚀分为冰川侵蚀和冻土侵蚀。其中冰川侵蚀又分为冰雪崩落、冰斗山谷、小型山谷冰川及雪蚀洼地等,冻土侵蚀又分为热融滑塌、融冻泥流和寒冻风化等。孙中峰等^[22]按照冻融侵蚀营力及地貌不同,将其分为 5 大类,即寒冻风化—重力(风力)作用下的土壤流失;冻缘蠕流作用引起的滑塌;热融作用下形成的沉陷与滑坡;冻胀—重力(风力)作用下的土壤流失;融雪径流引起的面蚀。景国臣^[24]将冻融侵蚀分为融雪径流侵蚀、沟壑冻融侵蚀、寒冻石流、冻融风蚀、冻融泥流、冰川侵蚀 6 类,并对各类型的侵蚀过程和特征进行了介绍。杜蓓等^[25]根据冻融发生的温度条件,拟定年平均气温小于 $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 作为划分冻融侵蚀类型的指标,结合植被类型、海拔高度、地貌部位、温度条件、地表组成物质等其它间接指标划分出冻融侵蚀强度分级。目前,冻融侵蚀分为 4 级,即微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀,侵蚀强度分级详见表 1。

表 1 冻融侵蚀强度分级指标^[25]

级别	分级指标
微度	在大片多年冻土条件下,土壤侵蚀强度很小,或几乎不发生侵蚀。主要在高寒和冰川、永久积雪地区,海拔高度一般低于 3 600 m
轻度	由于地貌类型,气候等的影响,分隔大片多年冻土,呈岛状分布,融化时造成轻度侵蚀,海拔高度在 3 600~4 000 m
中度	年均气温低于 $-1 \sim -2^{\circ}\text{C}$,但季节性冻融交替明显,融水可时断时续发生侵蚀,海拔高度在 4 000~4 500 m
强度	融化水可产生较大的径流,发生突发性侵蚀,甚至泥石流,侵蚀强度较大。海拔高度一般在 4 500 m 以上

1.3 冻融侵蚀量及其主要影响因素间的关系

景国臣等^[26]在东北典型黑土区,通过野外观测和室内试验,研究冻融作用与土壤水分的关系。结果表明:冻融作用使土壤水分由土水势高的下部向土水势低的上部迁移,增加了土壤冻结层的含水量;土壤水分迁移使得下部未冻结层的土壤含水量降低,其降低程度受下部土壤含水量和浅层地下水埋深的影响;冻结过程中土壤水分迁移导致土壤膨胀变形,而土壤的膨胀变形是发生土壤冻融侵蚀的主要因素。刘佳等^[20]对东北黑土室外冻结,室内表层融化下部冻结的冻融条件下进行室内模拟降雨试验,研究了春季解冻期黑土在不同含水率、不同解冻深度及降雨量条件下的侵蚀特征。结果表明:在春季解冻期,由于冻融作用,黑土坡面土壤解冻不完全、渗透能力差,此时降雨的侵蚀能力较强,导致这一时期坡面土壤侵蚀严重,土壤坡面侵蚀量受到含水率、降雨强度和解冻深度等因子的综合影响,并随三者变化呈现不同的侵蚀规律。范昊明等^[27]采用室外人工模拟降雨实验,研究了春季解冻期近地表草甸土解冻深度对该时期坡面降雨侵蚀过程的影响。结果表明:土壤解冻深度对入渗、产流以及侵蚀量有较大影响。由于降雨过程中冻土层逐渐向下移动,解冻土层厚度增加,坡面产流和入渗也随之经历着此消彼长的过程。对同一降雨强度,解冻深度愈小,坡面初始产流时间愈早,前期侵蚀率愈大,土壤侵蚀总量也愈大,但降雨后期侵蚀率增幅减小。随着降雨时间的延长,坡面随解冻深度不同发生不同程度的细沟侵蚀。降雨前期解冻深度越小,降雨过程中发展为细沟侵蚀的时间越早,侵蚀强度也越严重,降雨过程中侵蚀率大小的变化也受到细沟发育程度的影响。王随继^[5]从黄河中游丘陵沟壑区冻融侵蚀的环境背景、作用机理和表现方式等方面展开论述,认为砒沙岩区的冻融侵蚀量可以达到沟道产沙量的一半左右,最大可达流域侵蚀量的 1/3 左右。

1.4 冻融侵蚀预报研究

冻融侵蚀预报模型的研究,是冻融侵蚀研究的前沿领域和冻融侵蚀过程定量研究的有效手段,对冻融侵蚀区土地的合理利用和水土保持规划,具有科学的指导作用。国际上冻融侵蚀预报模型研究,以美国、加拿大为代表,而我国在该领域的研究尚处于起步阶段。融雪侵蚀在国外已有一些研究,如美国的通用土壤流失方程 USLE 和修订通用土壤流失方程 RUSLE,曾先后对融雪侵蚀过程进行修订。USLE 通过在降雨侵蚀力因子中,增加 1 个冬季降水量次因子进行修订,考虑了融雪侵蚀的作用。RUSLE 则通过分

析融雪侵蚀导致的细沟侵蚀与细沟间侵蚀比例的差异,以及反复冻融过程对土壤可蚀性因子的影响,将融雪侵蚀过程分别在降雨侵蚀力和土壤可蚀性因子的计算中加以考虑。在 WEPP 模型中,则根据能量平衡的原理,增加 1 个冬季子程序,进行侵蚀预测。由于区域自然条件的差异,在很多情况下,通用的物理方程无法取得满意的效果。因此,区域性侵蚀预报经验方程的建立是十分必要的。B. S. Sharratt 等人^[28]在美国北部粮食产区,进行了为期 4 a 的冻融侵蚀观测研究,对可能影响径流和侵蚀量的各种因子和过程,进行了定量研究,最后建立起该区的径流与流失量预测方程,用于该区的土地利用与管理。

1.5 冻融侵蚀防治研究

目前,以水土保持为目的的冻融侵蚀防治的研究,主要集中在农用地水土流失的防治上。已有的研究表明,耕作的方式不同、作物残余物的存在与否及对作物残余物的管理不同,可以极大地影响土壤的性质、结构、地表水的入渗及冻融侵蚀的发生与发展。已有研究^[29-32]表明,将耕作残余物放置于垄沟等处进行条带覆盖,可以减少地表径流量和侵蚀的发生,有利于减少土壤冻结的深度、增加土壤的渗透性;同时,对耕作残余物的适当处理,在一定程度上可以增加作物的产量。

2 冻融侵蚀研究中存在的问题

2.1 原位研究不够

土壤冻融交替研究目前多是在实验室内利用生长箱或者培养箱,培养小体积土壤(均质土壤或原状土)开展研究工作,野外原位研究很少,这可能是因为野外控制实验难度大、成本高,另一方面也可能是因为土壤的高度异质性,限制了野外定位研究工作的开展。由于不同研究的材料不一致,以及研究方法的差异,例如研究土壤的类型及理化性质、取样时间和方法的差异,还有些研究没有说明采样时间或采样方法^[33-36],这些因素对冻融交替效应的研究至关重要,这也可能是导致不同的冻融交替的研究结果往往不一致、甚至相互矛盾的原因之一。

2.2 冻融交替格局设计不合理

冻融交替格局包括冻融交替周期长度和交替次数。已有研究中设置的不同时间(数天到数月)和温度(最低温度为 $-7\sim-20^{\circ}\text{C}$)交替格局与自然状况差异甚大,与野外冻融交替真实情况不符。已有研究中的冻融周期和频率的设置也各不相同,一些研究中冻融周期为 $1\sim 2\text{ d}$,而大多数研究中冻融周期则设定为 $1\sim 2\text{ 周}$,还有的冻融周期仅仅持续数小时(一般为最

低温度 $-4\sim 10^{\circ}\text{C}$)[36-37],这可能与早春气温回升有些类似;还有一些研究不但实验时间短,且冻融循环次数太少(已有大多数研究中,冻融循环次数少于5次),这也难以揭示冻融过程的长期效应和积累效应。

2.3 冻融侵蚀机理还不很清楚

冻融侵蚀机理是认识冻融侵蚀过程及其动态变化,量化冻融侵蚀量,评价冻融侵蚀环境效应等的基础。但目前,有关冻融侵蚀机理的研究几乎是一片空白,有研究者试图从冻融交替对于土壤粘聚力和土壤分散力的角度对侵蚀机理给予说明。其余的研究者大都是依据冻融侵蚀的定义,即冻融侵蚀的侵蚀营力——冻融交替作用来讨论冻融侵蚀机理。但系统的、大规模的类似水力侵蚀机理的实验研究在冻融侵蚀领域的研究尚未见报道。

3 我国未来冻融侵蚀研究的方向与重点

我国是一个冻融侵蚀分布较广的国家,冻融侵蚀的危害也日益凸现出来,但我国目前对冻融侵蚀的研究却很少,因此,对冻融侵蚀进行深入全面的研究,已十分必要。虽然冻融侵蚀不同于水蚀、风蚀等侵蚀形式,但我国的科研工作者对水蚀、风蚀等侵蚀形式的研究及对冰川冻土的研究,都为冻融侵蚀的研究打下了较好的基础。作者认为我国对冻融侵蚀的研究在今后应该主要集中在以下几个方面。

(1) 冻融侵蚀机理研究。如上所述,冻融侵蚀机理的研究是冻融侵蚀研究的基础,所以需要进行大量室内和野外的冻融侵蚀实验,弄清冻融侵蚀过程的动态变化及其主要影响因素,并且室内试验与野外试验相互验证。

(2) 冻融侵蚀模数和侵蚀量的确定。目前,有关冻融侵蚀模数和冻融侵蚀量的计算方法还很不成熟,这直接影响到了冻融侵蚀的定量评价。因此,很有必要建立一套冻融侵蚀模数或冻融侵蚀量的计算公式或预测模型,使冻融侵蚀的研究由定性转向定量。

(3) 冻融侵蚀预报研究。目前,我国对于以冻土研究为目的的冻胀——融沉量、冻结——融化深度、冻土中水分运动规律及雪盖变化趋势、融雪量计算等方面的预报模型,已经具有较好的基础。同时,我国在水蚀、风蚀等方面的预报模型研究也较多。我们可在此基础上,进一步研究冻融条件下土壤可蚀性的变化规律,冻土融化过程中降雨及融雪径流所造成的土壤侵蚀量的预报等。

(4) 冻融侵蚀防治研究。冻融侵蚀的危害,在我国已经成为一个不可回避的问题,对于冻融侵蚀防治技术的研究,已经刻不容缓。在影响冻融侵蚀的因素

中,温度、土壤、地形与坡向因子为不可变因子,而可变的只有植被与人为活动两个因子,所以冻融侵蚀的治理也要从这两方面进行突破。要选择适应性广、抗寒能力强、根系发达、经济价值高的树种及草种,选择适宜的工程措施防治或延缓冻融侵蚀发生。目前,冻融侵蚀的防治,应重点解决粮食高产区东北黑土区水土流失及大江大河源头青藏高原水土流失问题。对于农用地冻融侵蚀防治,可以首先从耕作方式、作物残余物管理、适当的水土保持工程入手。对于大江大河源头冻融侵蚀防治,应着重从提高植被覆盖度方面入手。

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(4):111-112.
- [2] 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. 中国水土保持, 2003(10):17-18.
- [3] 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[J]. 水土保持科技情报, 1999(1):28-30.
- [4] 景国臣, 任现平, 刘丙友, 等. 黑龙江省冻融侵蚀形式及其危害[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(3):97-102.
- [5] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6):1-7.
- [6] 谢飙, 熊成品, 刘寻续. 三江源地区水土流失成因、特点及防治对策[J]. 中国水土保持, 2007(11):19-21.
- [7] 董瑞琨, 许兆义, 杨成永. 青藏高原的冻融侵蚀问题[J]. 人民长江, 2000, 31(9):39-41.
- [8] 张建国, 刘淑珍, 杨思全. 西藏冻融侵蚀分级评价[J]. 地理学报, 2006, 61(9):911-918.
- [9] 刘淑珍, 张建国, 辜世贤. 西藏自治区土壤侵蚀类型研究[J]. 山地学报, 2006, 24(5):592-596.
- [10] 唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2):2-7.
- [11] 辛树帜, 蒋德麟. 中国水土保持概论[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [12] 张洪江, 吴发启, 胡春元, 等. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000:121-137.
- [13] 郭延辅. 水土流失及其综合治理技术[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- [14] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4):50-55.
- [15] 张瑞芳, 王璋, 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.
- [16] 张建国, 刘淑珍. 界定西藏冻融侵蚀区分布的一种新方法[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(2):32-34.
- [17] 董瑞琨, 许兆义. 含水量变化对冻融指标影响试验研究[J]. 中国水土保持, 2003(8):18-19.
- [18] Froese J C, Cruse R M, Ghaffarzadeh M. Erosion me-

- chanics of soils with an impermeable subsurface layer [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6):1836-1841.
- [19] McCool D K, Walter M T, King L G. Runoff index values for frozen soil areas of the pacific northwest[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50(5): 466-469.
- [20] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 64-67.
- [21] 张瑞芳, 范昊明, 王瑄, 等. 辽宁省冻融侵蚀发生的气候环境条件分析[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(2): 8-12.
- [22] 孙中峰, 宋朝峰, 李文淑, 等. 浅析冻融侵蚀机理与防治对策[J]. *黑龙江水专学报*, 1999, 26(3): 34-35, 42.
- [23] 李辉霞, 刘淑珍, 钟祥浩, 等. 基于 GIS 的西藏自治区冻融侵蚀敏感性评价[J]. *中国水土保持*, 2005(7): 44-46.
- [24] 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. *中国水土保持*, 2003(10): 17-20.
- [25] 杜蓓. 青藏铁路格尔木至拉萨段水土流失现状及其控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [26] 景国臣, 任宪平, 刘绪军, 等. 东北黑土区冻融作用与土壤水分的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(5): 32-36.
- [27] 范昊明, 张瑞芳, 武敏, 等. 草甸土近地表解冻深度对坡面降雨侵蚀影响研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 5-8.
- [28] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the northern U. S. corn belt[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55(4): 487-494.
- [29] Benoit G R, Mostaghimi S, Young R A, et al. Tillage-residue effects on snow cover, soil water, temperature and frost[J]. *Transactions of the ASAE*, 1986, 29(2): 473-479.
- [30] Van Klaveren R W, McCool D K. Facility for hydraulic tests of a frozen soil[J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36(6): 1721-1725.
- [31] Piku J L, Wilkins D E, Aase J K, et al. Contour ripping: A tillage strategy to improve water infiltration into frozen soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996(1): 76-83.
- [32] Schillinger W F, Wilkins D E. Deep ripping fall-planted wheat after fallow to improve infiltration and reduce erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1997, 52(3): 198-202.
- [33] Wang F L, Bettany J R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon-dioxide from soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(4): 709-714.
- [34] Ferrick M G, Gatto L W. Quantifying the effects of a freeze-thaw cycle on soil erosion: laboratory experiments[J]. *Earth Surface Process and Landform*, 2005, 30(10): 1305-1326.
- [35] Walker V K, Palmer G R, Voordouw G. Freeze-thaw tolerance and clues to the winter survival of a soil community[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 1784-1792.
- [36] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 505-509.
- [37] Lipson D A, Schmidt S K. Seasonal changes in an alpine soil bacterial community in the Colorado Rocky Mountains[J]. *Applied and Environment Microbiology*, 2004, 70(5): 2867-2879.