

模拟降雨下冻融作用对坡面侵蚀过程的影响

王飞超¹, 任宗萍¹, 李鹏¹, 李占斌^{1,2}, 王添¹, 李林¹, 马田田¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探究降雨条件下冻融作用对坡面土壤侵蚀的影响,利用室内人工模拟降雨试验研究了未冻融及冻融 2 种条件下,冻融前后土壤物理性质、产流、产沙和累计产流产沙过程。结果表明:经过冻融作用后,解冻土的所需产流时间增加了 24.39%。经过冻融作用后土壤容重降低了 3%,孔隙度增大了 2.98%,均达到显著差异水平($p < 0.01$)。经过冻融作用后在前 10 min 内冻融坡面的产流率减小了 10.59%,稳定入渗率为 0.52 mm/min。冻融坡面的稳定入渗率是未冻融坡面的 1.1 倍。冻融坡面的产沙是未冻融坡面总产沙量的 0.9 倍,冻融坡面即使在较小径流下产生较大的泥沙。冻融与未冻融坡面累计侵蚀产沙量随累计径流量呈线性增加趋势,满足 $y = ax - b$,线性方程中的参数 a 可以作为坡面的可蚀性指标之一。试验结果为完善冻融作用对坡面侵蚀的机理提供一定的参考价值。

关键词:模拟降雨;冻融;产流产沙;黄土

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0072-04

Effects of Freeze-Thaw on Soil Erosion and Sediment Under Simulated Rainfall

WANG Feichao¹, REN Zongping¹, LI Peng¹, LI Zhanbin^{1,2}, WANG Tian¹, LI Lin¹, MA Tiantian¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the effect of freeze-thaw on loess slope erosion under the condition of rainfall, the indoor rainfall simulator experiments was conducted to study the soil physical properties, runoff, sediment and runoff and sediment accumulation process before and after freeze-thaw. The results showed that: after freeze-thaw, the runoff-yielding time increased by 24.39%, the soil bulk density decreased by 3%, and the soil porosity increased by 2.98%, all were significant differences ($p < 0.01$); after freeze-thaw, the stable infiltration rate was 0.52 mm/min, and the runoff-yielding rate decreased by 10.59% during the first 10 minutes, the stable infiltration rate of loess slopes after freeze-thaw was 1.1 times of the slope without freeze-thaw, freeze-thaw may increase the amount of rainfall infiltration and reduce runoff. Looking from the total amount of sediment yield, the loess slope after freeze-thaw was 0.9 times of the loess slope without freeze-thaw. Larger amount of sediment was produced the under the less runoff on the loess slope after freeze-thaw. Freeze-thaw cumulative production and sediment yield appeared a liner increase with sediment concentration ($y = ax - b$). The parameter a in the linear equation can be used as one of the erodability indicators of the slope. The results may provide a supplement for improving the erosion mechanisms of slope soil.

Keywords: simulated rainfall; freeze-thaw; runoff and sediment; loess soil

世界性的土壤侵蚀问题是造成生态环境恶化的主要原因,严重威胁着人类的生存与发展。土壤在冻融的作用下所发生的一种土壤侵蚀现象叫做冻融侵蚀,是一种重要的土壤侵蚀类型。我国冻土面积约

75%,冻融侵蚀广泛分布^[1]。冻融是指土层由于温度降到零度以下和升至零度以上而产生冻结和融化的一种物理地质作用和现象,冬季冻结,夏季消融^[2]。Kirby 和 Mehuy 发现,温带地区 50%以上的年土壤

流失量都发生在冻土层解冻时期^[3]。土壤经过冻融作用,在水力的复合作用下,加快了土壤流失的速度,其作用远远超过其自身的危害。冻融作用发生的条件,一是年内低于0℃气温的时间段足以使地球表层中积聚的水体完全凝结成冰,高于0℃气温的时间段能够使上述冰体完全消融;二是具备一定的降水量,使土壤具有一定的含水量,作为冻融作用的驱动主体。黄土高原丘陵沟壑区处于温带,年0℃以下天数有105~125 d/a,大致是年总天数的1/3左右,年平均降雨量主要在300~600 mm/a,而汛期降雨量达到全年的70%以上。显然,研究区具备冻融侵蚀作用发生的气候条件。一些研究学者对冻融对土壤的物理性质进行了研究,国内外一些研究学者对冻融对土壤物理性质进行了研究,李强等^[4]研究表明冻融作用改变了土壤的物理性质,使土体的结构稳定性有所降低;LEHRSCG^[5]研究表明冻融作用使大团聚体被破碎成小团聚体从而使其稳定性降低;另外一些学者将冻融作用对水力传导度^[6-7]、土壤容重^[8-9]、土壤水稳定性团聚体^[10-11]进行了研究。在可蚀性条件下,土壤结构发生改变必然会改变土壤侵蚀的能力。一些学者对冻融对水蚀作用的影响进行了研究,Sharratt等^[12]对春季融化后的坡面进行了径流冲刷试验,结果表明冻融后土壤的剥蚀率增强;李占斌等^[13]对冻融后的黄土坡面进行了模拟降雨试验,发现在冻融坡面在较小的径流量下会产生较大的土壤侵蚀;魏霞等^[14]对交替冻融后的淋溶土进行了模拟降雨试验,研究表明交替冻融作用都可以使产流产沙强度增大,且产沙强度的增大幅度大于产流强度。以上研究表明冻融作用对土壤结构及侵蚀过程有着重要影响,因此探讨冻融作用后坡面的侵蚀过程影响是相关学者关注的焦点之一。

本文基于人工模拟降雨试验,选取未冻融和冻融坡面两种处理,对比分析了冻融前后侵蚀过程及可蚀性,以期完善冻融作用对坡面侵蚀的机理提供一定的参考价值。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验所采用针管式模拟降雨装置。坡面实体模型为木质土槽,土槽长0.9 m、宽0.45 m、高0.15 m^[13]。本试验研究区位于陕北黄土高原丘陵沟壑区,该区土壤属于黄绵土,西安近郊土壤属黄壤土,黄壤土在土类上属于黄绵土,因此将西安郊区用土作为供试土壤。试验开始前在土槽底部铺一层纱布,再装入2 cm厚的天然沙,以保证试验用土的透水性

然坡面接近。然后将过1 cm孔径的黄土分层填入10 cm厚的黄土,将容重控制在 $(1.2 \pm 0.5) \text{ g/cm}^3$ 左右,初始含水量控制在 $(15.0 \pm 1.0)\%$ 左右。然后用测定容重的环刀取采集2个样品待测。试验冻土装置采用澳柯玛DW·40 W300超低温冰箱,冻结温度为 $-10 \sim -40^\circ\text{C}$,外形尺寸为 $1.15 \text{ m} \times 0.72 \text{ m} \times 0.84 \text{ m}$ (长×宽×高)。

1.2 试验设计

试验于2015年4月21日至29日在西北水资源与环境生态教育部重点实验室雨洪侵蚀大厅进行。将填土后的土槽及容重样品放入冻土装置,在 -18°C 环境下冻结12 h,然后放在室内解冻12 h。室内模拟降雨试验分为未冻融和冻融坡面模拟降雨试验两个阶段,降雨历时60 min。每组试验重复3次,分析数据为其平均值。试验设计坡度为12;雨强为 $(1.0 \pm 0.05) \text{ mm/min}$ ^[13],均匀度均大于80%。然后用水准仪对坡面进行校正并率定模拟降雨雨强,当雨强满足试验要求后,开始降雨。坡面出水口开始产流后,浑水样品每分钟收集一次,采用烘干法和置换法得到径流量和产沙量。

1.3 数据分析及处理方法

根据实时检测的雨强和径流资料,坡面平均入渗率按照如下公式反推计算^[13]:

$$f_i = (Pt \cos \alpha - 10R/S)/t$$

式中: f_i 表示坡面平均入渗率(mm/min); P 表示降雨强度(mm/min); α 表示坡度($^\circ$); R 表示降雨时间 t 内产生的径流量(ml); S 表示实际承雨面积(cm^2); t 表示降雨时间(min)。

土壤孔隙度公式为^[15]:

$$P = 93.947 - 32.995\rho$$

式中:其中 P 表示土壤孔隙度(%); ρ 表示土壤容重(g/cm^3)。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对坡面产流所需时间的影响

坡地产流时刻综合说明了产流前坡地土壤物理状况存在差异^[16]。土壤物理特性的差异可通过模拟降雨下产流时间来表示。冻融作用对坡地降雨—入渗—产流过程有着重要的影响,随土壤物理性质和前期含水量的变化,裸地土壤产流时刻表现最为明显^[26]。冻融作用影响土壤容重^[17-18]和渗透性^[18-19],进而影响着坡面的产流时间,入渗产流过程,尤其裸地的土壤物理性质对坡面产流时间的表现最为显著^[20]。

表 1 冻融前后土壤容重、孔隙度及产流时间统计特征

冻融状态	雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度/ %	产流 时间/min
未冻融	1.04	1.24	52.7	5.13
	1.03	1.26	52.7	5.85
	1.03	1.25	52.7	4.12
冻融	0.97	1.21	53.91	7.1
	1.02	1.22	53.91	5.75
	0.97	1.21	53.91	5.93

由表 1 可以看出,在冻融过程中,土壤外部环境的改变影响土壤内部结构的变化^[20]。相比于未冻融坡面产流所需时间,解冻坡面的所需产流时间增加了 24.39%,冻融作用对坡面的产流时间有重要影响;与对照组土壤容重和孔隙度相比,经过冻融作用后土壤容重降低了 3%,孔隙度增大了 2.98%,均达到显著差异水平($p < 0.01$)。李强^[4]在野外观测了冻融

前后土壤相关物理性质的差异,结果同样表明冻融作用对土壤容重没有产生显著性影响。土壤容重越小,土壤入渗速率越大,产流历时越晚^[21]。

冻融交替作用会对土壤内部结构产生一定的影响,进而使土壤容重和孔隙度有所变化。土壤在冻结过程中液体水向固体冰晶转化的过程中,造成土壤体积膨胀,使土壤颗粒发生一定的位移,造成土壤孔隙度增大,产流时间延迟。

2.2 冻融作用对坡面径流入渗过程的影响

坡面产流入渗的关系由降雨和下垫面条件因素共同决定,不同的下垫面条件,坡面径流率随时间的变化过程也不同。土壤入渗率是表征土壤入渗状况的一个重要指标^[6],当下垫面条件(容重、初始含水量等)有一定的差异时,入渗特性也随之变化。图 1 为冻融与未冻融条件下坡面产流和入渗的过程曲线。

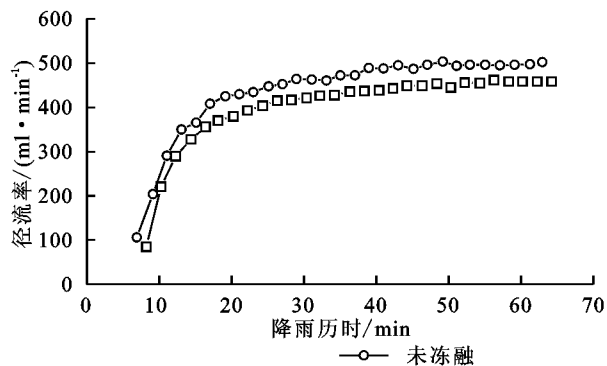
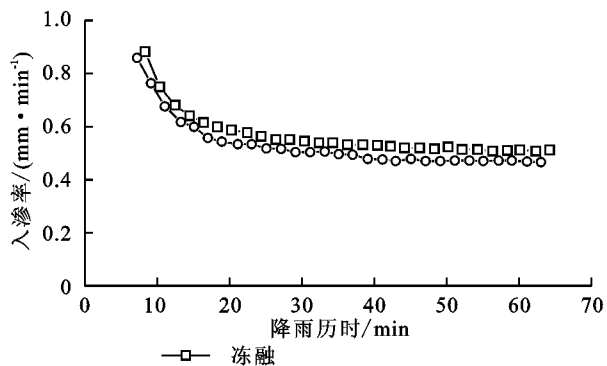


图 1 不同冻融条件下径流率—入渗率随降雨历时的变化

由图 1 可知在两种不同冻融条件下径流率随降雨历时的延续先增加而后趋于稳定。未冻融坡面在产流后 12 min 内径流率迅速增加,14~60 min 内径流率缓慢增长并趋于稳定。冻融坡面在产流后 10 min 内径流率迅速增加,12~60 min 内冻融坡面的产流率径流率趋于稳定,稳定中微小波动,从图 1 上看未冻融坡面径流率大于冻融坡面的径流率。冻融作用后,前 10 min 内冻融坡面的产流率减小了 10.59%。

未冻融坡面与冻融坡面径流率变化特征呈现迅速上升—稳定的过程。上升是因为降雨初期在雨滴打击作用下土粒容易分散成细颗粒,在径流作用下堵塞土壤孔隙,借助于雨滴夯实作用逐渐形成一层致密层(结皮),入渗降低,径流强度随着增大;稳定是因为随着降雨历时的延长土壤的入渗率达到稳定,故径流率过程平缓下来。冻融坡面和未冻融坡面产流过程的变化与王辉等^[16]研究结果一致。未冻融坡面大于冻融坡面的总径流量。经过冻融作用土壤孔隙度增大,冻融土壤的入渗率较大径流量较小,这可能与坡面入渗特性有关,这一结论与李占斌等^[16]研究结果一致。

两种不同坡面的入渗特征,入渗率随降雨量的增加



而缓慢降低并趋于平稳,由于下垫面条件的不同,土壤的初始物理状况存在较大差异。冻融坡面的入渗率为 0.50~0.88 mm/min,稳定入渗率为 0.56 mm/min;未冻融坡面入渗率范围为 0.46~0.86 mm/min,稳定入渗率为 0.52 mm/min。冻融作用下土壤孔隙度增大会增大降雨的入渗量,减小地表径流。

2.3 冻融作用对坡面产沙过程的影响

通过比较未冻融和冻融坡面的土壤流失量随降雨历时的变化(图 2),侵蚀率随降雨量的增加先迅速上升,后逐渐趋于平稳降低,侵蚀量大小表现为:冻融坡面>未冻融坡面。

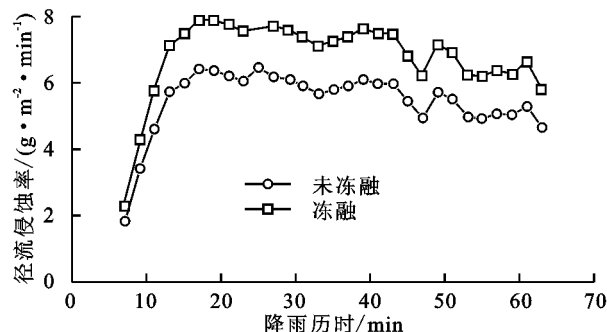


图 2 不同条件下侵蚀率随降雨量的变化

从侵蚀总量上看冻融坡面的产沙是未冻融坡面总产沙量的 0.9 倍。经过冻融作用降雨径流减小,入渗增大,而产沙量增大,说明冻融坡面即使在较小径流下也能产生较大的泥沙,由于冻融坡面土壤容重降低,孔隙度变大,造成土壤的抗剪强度和抗蚀能力下降^[18-19]。在产流后 10~36 min 内未冻融坡面的侵蚀量占总侵蚀量的 45%,冻融坡面的侵蚀量占总侵蚀量的 50%,主要产沙时间提前。冻融坡面的侵蚀率呈现上升—下降—平稳过程,上升是因为在降雨初始阶段,坡面表层比较疏松,在雨滴的击溅作用下土粒分散,一部分土粒飞溅到坡面外,另一部分发生迁移沉降到坡面上,在坡面堆积松散的颗粒,当坡面开始产流后这些松散的颗粒被薄层水流挟带搬运至出口,此时侵蚀速率迅速上升。上升是因为土壤松散主要产沙时间提前,径流稳定趋势趋于平稳。

2.4 冻融作用对坡面累计产流产沙过程的影响

在分析不同冻融条件下径流、产沙以及降雨入渗规律的基础上,将冻融坡面和未冻融坡面侵蚀过程中累计产沙量与径流量进行了拟合,发现两种坡面类型下累计产沙量与径流量均呈线性增加趋势,符合方程 $y=ax-b$ (y 为累计产沙量, x 为径流量),相关系数均在 0.99 以上。结合数学概念分析和实际物理意义得知,系数 a 则更多地体现了不同下垫面条件下的产沙能力。在冻融坡面和未冻融坡面下冻融坡面的系数 a 要大于未冻融坡面,因此产沙其产沙能力就大。线性关系式中冻融与未冻融系数 a 的比值为 0.83,且冻融总侵蚀产沙量与未冻融的总侵蚀产沙量比值为 0.90,表明线性方程中的参数 a 可以作为坡面的可蚀性指标之一。

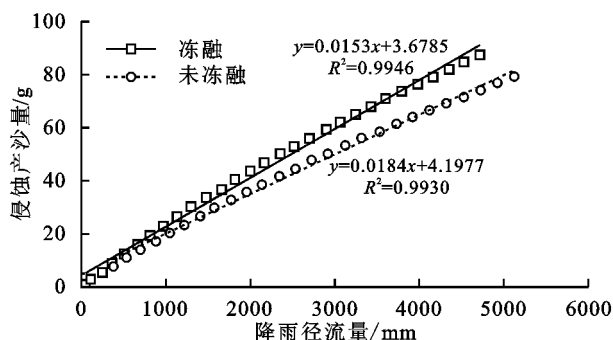


图3 累计产沙量与累计径流量的函数关系

3 结论

通过室内降雨模拟试验,从侵蚀产流所需时间入渗过程产沙过程累计产流产沙过程的变化规律及彼此相关性角度探讨了不同下垫面条件下的侵蚀产流产沙特性,得出以下结论:

(1) 相比于未冻融土产流所需时间,解冻土的所

需产流时间增加了 24.39%。经过冻融作用后土壤容重降低了 3%,孔隙度增大了 2.98%,均达到显著差异水平($p < 0.01$)。

(2) 冻融作用后,前 10 min 内冻融坡面的产流率减小了 10.59%冻融坡面的稳定入渗率是未冻融坡面的 1.1 倍。

(3) 冻融坡面的产沙是未冻融坡面总产沙量的 0.9 倍,冻融坡面即使在较小径流下产生较大的泥沙。冻融坡面在产流后 10~36 min 内未冻融坡面的侵蚀量占总侵蚀量的 45%,冻融坡面的侵蚀量占总侵蚀量的 50%,主要产沙时间提前。

(4) 冻融与未冻融坡面累计产侵蚀产沙量随径流量呈线性增加趋势,满足 $y=ax-b$,线性方程中的参数 a 可以作为坡面的可蚀性指标之一。

参考文献:

- [1] 陈雷,焦居仁,刘震,等.中国土壤侵蚀图册[M].北京:中国标准出版社,2002.
- [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(4):17-19.
- [3] Kirkby M J. Modeling water erosion processes[M]// Kirkby M J, Morgan R P C. Soil Erosion. Great Britain: Wiley Chichester, 1980.
- [4] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):105-112.
- [5] Lehrschg A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability[J]. Journal of Soil Science, 1998, 163:63-70.
- [6] Benoit G R, Voorhees W B. Effect of freeze-thaw activity on water retention, hydraulic conductivity, density and surface strength of two soils frozen at high water content[R]. Frozen Soil Impact on Agricultural, Range and Forest Lands. Spokane, WA: Proceedings International Symposium, 1990:45-53.
- [7] Othman M A, Benson C H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of three compacted clays from Wisconsin[J]. Transp. Res. Rec., 1993,1369:118-125.
- [8] Asare S N, Rudra R P, Dickinson W T, et al. Frequency of freeze-thaw cycles, bulk density and saturation effects on soil surface shear and aggregate stability in resisting water erosion[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1997,39(4):273-280.
- [9] 温美丽,刘宝元,魏欣,等.冻融作用对东北黑土容重的影响[J].土壤学报,2009,40(3):492-493.
- [10] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. Catena, 2006,67(3):175-182.

(下转第83页)

- [10] 汝海丽,张海东,焦峰,等. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. 自然资源学报,2016,31(10):1752-1763.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 孙小妹,肖美玲,师瑞玲,等. 营养元素添加对青藏高原亚高寒草甸物种多度分布格局的影响[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2014,50(6):853-859.
- [13] 杨晓霞,任飞,周华坤,等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. 植物生态学报,2014,38(2):159-166.
- [14] 辛小娟,王刚,杨莹博,等. 氮、磷添加对亚高山草甸地上/地下生物量分配的影响[J]. 生态科学,2014,33(3):452-458.
- [15] 祁瑜,黄永梅,王艳,等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J]. 生态学报,2011,(18):5121-5129.
- [16] Majdi H, Andersson P. Fine root production and turnover in a Norway spruce stand in northern Sweden: Effects of nitrogen and water manipulation [J]. Ecosystems,2005,8(2):191-199.
- [17] 詹书侠,郑淑霞,王扬,等. 羊草的地上一地下功能性状对氮磷施肥梯度的响应及关联[J]. 植物生态学报,2016,(1):36-47.
- [18] Lan Z, Bai Y. Testing mechanisms of N-enrichment-induced species loss in a semiarid Inner Mongolia grassland: Critical thresholds and implications for long-term ecosystem responses [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2012, 367 (1606):3125-3134.
- [19] 潘庆民,韩兴国,杨景成. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. 植物生态学报,2005,29(2):311-317.
- [20] Müller I, Schmid B, Weiner J. The effect of nutrient availability on biomass allocation patterns in 27 species of herbaceous plants[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2000,3(2):115-127.
- [21] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance [J]. New Phytologist, 2004,164(2):243-266.
- [22] 黄菊莹,赖荣生,余海龙,等. N添加对宁夏荒漠草原植物和土壤 C:N:P 生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(11):2850-2856.
- [23] 常云妮,钟全林,程栋梁,等. 氮添加对华润楠苗木碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2013,48(5):94-99.
- [24] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.
- [25] 张海东,汝海丽,焦峰,等. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征[J]. 环境科学,2016,37(3):1128-1137.
- [26] 刘昊,赵宁,曹喆,等. 干扰对草地植被与土壤的影响之研究进展[J]. 中国农学通报,2008,24(5):8-16.
- [27] 魏金明,姜勇,符明明,等. 水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳、氮、磷及 pH 的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(8):1642-1646.
- [28] 德科加,张德里,王伟,等. 施肥对高寒草甸植物及土壤 N, P, K 的影响[J]. 草地学报,2014,22(2):299-305.
- [29] 卡着才让,德科加,徐成体. 不同施肥时间及施氮水平对高寒草甸生物量和土壤养分的影响[J]. 草地学报,2015,23(4):726-732.
- [30] 陆景陵,胡霭堂. 植物营养学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.



(上接第75页)

- [11] Li G Y, Fan H M. Effect of Freeze-Thaw on Water Stability of Aggregates in a Black Soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2014,24(2):285-290.
- [12] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Run-off and soil erosion during spring thaw in the northern US Corn Belt [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000,55(4):487-494.
- [13] 李占斌,李社新,任宗萍,等. 冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(5):56-60.
- [14] 魏霞,李勋贵, Huang Chihua. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(13):157-163.
- [15] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):186-189.
- [16] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报,2008,24(5):65-68.
- [17] 温美丽,刘宝元,魏欣,等. 冻融作用对东北黑土容重的影响[J]. 土壤学报,2009,40(3):492-493.
- [18] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟. 典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1744-1750.
- [19] 邓西民,王坚,朱文珊,等. 冻融作用对犁底层土壤物理性状的影响[J]. 科学通报,1998,43(23):2538-2541.
- [20] 袁建平,将定生,甘淑. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报,1999,17(3):259-264.
- [21] 潘云,吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. 灌溉排水学报,2009(2):59-61,77.