

东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与 多营力复合侵蚀的研究重点

郑粉莉^{1,2}, 张加琼^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 范昊明³, 王彬⁴, 沈海鸥⁵

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110866; 4. 北京林业大学, 北京 100083; 5. 吉林农业大学, 吉林 长春 130118)

摘要: [目的] 分析东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征, 为该区复合土壤侵蚀研究及其有效防治提供重要科学依据。[方法] 基于大量野外调查和理论研究以及文献资料, 概述了复合土壤侵蚀的研究现状, 分析了东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征。[结果] 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特点主要为: 多营力复合侵蚀的季节更替和空间叠加作用, 农田沟蚀严重, 坡面汇流引起的土壤侵蚀更加突出, 雨滴打击作用和壤中流形成是坡面土壤侵蚀的主要驱动力。当前复合土壤侵蚀研究的主要内容为: 冻融作用对风蚀和水蚀的影响, 风水复合侵蚀, 东北黑土区多外营力复合侵蚀研究。[结论] 复合土壤侵蚀的研究重点为: ①多种外营力相互作用的坡面复合侵蚀过程机制; ②冻融作用对土壤抗侵蚀能力的影响机制; ③量化冻融作用、融雪、降雨径流和风力侵蚀对坡面侵蚀和沟蚀的贡献; ④多外营力作用的流域尺度泥沙来源诊断; ⑤复合土壤侵蚀预报模型研发; ⑥复合土壤侵蚀防治措施的有效性评价; ⑦东北黑土区复合土壤侵蚀防治分区。

关键词: 东北黑土区; 坡耕地; 土壤侵蚀特征; 复合侵蚀; 防治措施

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2019)04-0314-06

中图分类号: S157



文献参数: 郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀研的研究重点[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 314-319. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.049; Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, Liu Gang, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in Mollisol Region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 314-319.

Characteristics of Soil Erosion on Sloping Farmlands and Key Fields for Studying Compound Soil Erosion Caused by Multi-forces in Mollisol Region of Northeast China

Zheng Fenli^{1,2}, Zhang Jiaqiong^{1,2}, Liu Gang^{1,2}, Fan Haoming³, Wang Bin⁴, Shen Haiou⁵

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of

Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning 110866,

China; 4. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. Jilin Agriculture University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of soil erosion on sloping farmlands in the Mollisol region of Northeast China were analyzed in order to provide important scientific basis for the research, and the effective prevention and control of compound soil erosion. [Methods] Based on field investigation, theoretical researches and literature review, this paper outlined current status of compound soil erosion and analyzed characteristics of soil erosion on sloping farmlands in the Mollisol region of Northeast China. [Results] The characteristics of soil erosion on sloping farmlands in the Mollisol region of Northeast China included seasonal alternation and spatial overlapping of compound soil erosion induced by multi-forces, severe gully erosion in farmlands, strong

收稿日期: 2019-06-17

修回日期: 2019-06-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“黑土区多种外营力互作的坡面侵蚀过程与机制”(41571263); 国家重点研发计划项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900)

第一作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn.

performance of inflow erosion, and raindrop impact and seepage flow were key driving forces for hillslope soil erosion. The current research of compound soil erosion covered effects of freeze-thaw action on wind and water erosion, compound soil erosion by wind and water agents, and compound erosion caused by multi-forces in the Mollisol region of Northeast China. [Conclusion] The key fields for studying compound erosion caused by multi-forces were as follows: ① processes and mechanisms of hillslope compound erosion caused by multi-forces; ② mechanism of freeze-thaw impacts on soil anti-erosivity; ③ quantifying contribution of freeze-thaw, snow melting, rainfall and inflow to hillslope soil erosion and gully erosion; ④ identifying watershed sediment source under multi-forces actions; ⑤ developing compound soil erosion prediction model; ⑥ assessing effectiveness of conservation measures for controlling compound soil erosion; ⑦ prevention zonalization of compound soil erosion in the Mollisol region of Northeast China.

Keywords: the Mollisol region of Northeast China; sloping farmland; characteristics of soil erosion; compound soil erosion; conservation measures

全球黑土以其土质肥沃和粮食高产对人类的生存与发展做出了巨大贡献。但过度开发利用导致全球黑土地均出现了严重土壤侵蚀。1934年发生在美国的“黑风暴”事件,不但导致全美生态灾难,也敲响了全球农田侵蚀灾害的警钟;20世纪50年代前苏联发生的“黑风暴”事件导致前苏联的粮食危机。中国东北黑土区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区,其面积约 $1.03 \times 10^6 \text{ km}^2$,是国家最大的商品粮生产基地,商品率占全国的1/3以上,是国家粮食的“压舱石”^[1]。然而,仅有百余年垦殖历史的东北黑土地,由于高强度的开发利用和掠夺式经营,黑土发生严重退化,黑土生产力降低,平均黑土层厚度已由20世纪50年代60~80 cm下降到目前的20~40 cm^[1];每年仅因土壤侵蚀造成的全年粮食减产高达14.7%^[2],严重威胁中国粮食安全和生态安全。作为土壤侵蚀“癌症”表现的各类沟蚀在东北黑土区也非常严重。据中国水土流失与生态安全(东北组)报告^[1],东北现有侵蚀沟 2.50×10^5 余条,侵蚀沟占地面积 $4.83 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。农田侵蚀沟的发展使“黑土地破碎”,阻碍农机作业,限制农业可持续发展。更为严重的是由于缺乏有效的土壤侵蚀调控技术措施,黑土地土壤退化呈继续恶化的发展态势,是中国唯一仍呈退化加重的农田生态系统。如不及时保护黑土地,将极大削弱区域粮食生产能力和区域生态功能,导致中国最大的粮仓出现问题,影响国家粮食安全和中国人的生存问题。

近几十年来,中国的土壤侵蚀机理研究取得了重要进展,为水土流失综合治理提供了重要的科学依据。然而,过去的研究主要针对单一侵蚀营力,而对多营力相互作用的土壤复合侵蚀研究相对较少;尤其与其他水蚀区相比,中国东北黑土区的土壤侵蚀机理研究相对薄弱,从而一方面导致现有的适用于中国其他水蚀区的水土保持措施在该区域的适用性受到质

疑,另一方面也导致该区土壤侵蚀治理效果不显著。因此,迫切需要揭示东北黑土区复合土壤侵蚀过程,阐明多营力复合侵蚀的驱动机制,为黑土区土壤复合侵蚀防治和黑土资源的可持续利用提供重要理论依据。

近10 a余来,作者团队通过主持国家重点基础研究发展计划(973)项目课题和多项国家自然科学基金项目以及“十三五”国家重点研发计划项目等,在东北黑土区坡面土壤侵蚀主要驱动机制及其关键因子对坡面土壤侵蚀影响,坡面侵蚀—沉积空间分布规律,黑土区土壤可蚀性估算模型,保护性耕作措施对坡面土壤侵蚀阻控,土壤侵蚀强度对作物产量的影响,适用于坡面复合土壤侵蚀的水土保持措施筛选,复合土壤侵蚀防治分区等方面开展了大量研究工作,取得了重要研究进展。本文基于大量野外调查和理论研究以及文献资料,并集成作者团队长期的研究成果,综合分析东北黑土区坡面土壤侵蚀的特点,以期研究该区复合土壤侵蚀有效防治措施提供重要科学依据。

1 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特点

1.1 多营力复合侵蚀的季节更替和空间叠加

受特殊的地理环境和人为过度垦殖的影响,东北黑土区坡耕地最显著的侵蚀特点是多营力作用的复合侵蚀在时间上的更替和空间上的叠加。坡耕地晚春季节发生融雪侵蚀与昼融夜冻互相交替的复合侵蚀(图1),随后发生耕作侵蚀和风蚀叠加的复合侵蚀(图2)。

东北黑土区坡耕地多营力复合侵蚀在时间尺度上表现为季节性的更替。东北黑土区坡耕地夏季和秋季会发生严重的水蚀(图3);晚秋季节由于整地又发生耕作侵蚀以及冬季和早春季节土壤冻胀作用引起土壤颗粒位移和临空部分土体位移(图4)。在空间尺度上表现为水蚀(降雨和融雪径流侵蚀)、风蚀、冻融侵蚀并存,且相互叠加和相互作用,加剧了坡面土壤侵蚀的严重程度。



图 1 东北黑土区晚春季节的融雪侵蚀现象
(郑粉莉摄于 20170427)



图 2 东北黑土区晚春季节的耕作侵蚀与扬尘现象
(张加琼摄于 20170425)



图 3 东北黑土区夏季的坡耕地水蚀(左:范昊明摄于 20180625;右:郑粉莉摄于 20180729)



图 4 东北黑土区晚春季节的土壤冻胀裂隙与
土体位移现象(刘刚摄于 20190526)

1.2 农田沟蚀严重

黑龙江省沟蚀数量由 20 世纪 50 年代 4 000 余条增加到 2000 年的 15 000 余条^[1]。其中,黑龙江省沟蚀严重的克东县和拜泉县东部 10 个乡镇,侵蚀沟数量已从 1965 年的 1 712 条增加到 2005 年的 2 565 条,侵蚀沟面积占总面积的比例已由 5.97% 增加到

17.62%, 对应的沟壑密度也由 202 m/km^2 增加到 283 m/km^2 ^[1]。东北黑土区 14 县的 21 个典型小流域沟蚀调查表明,2005 年的沟壑密度较之 2004 年增加了 12.2%^[1];仅经过 2004 年一个雨季,调查的 7 条小流域的沟头溯源侵蚀速率介于 $0.05 \sim 5 \text{ m}$, 平均为 1.34 m ;沟床加深变化于 $1.6 \sim 9.0 \text{ cm}$ 之间,平均为 5.8 cm ;侵蚀沟加宽介于 $4 \sim 145 \text{ cm}$, 平均为 36.8 cm ^[1]。农田侵蚀沟的发展不但使“黑土地破碎”,阻碍农机作业,也使耕地面积减少。据张兴义等在美丽中国生态文明建设科技工程专项研究中的调查资料,60% 以上的侵蚀沟分布在耕地(图 5),损毁黑土地 $5 000 \text{ km}^2$ 以上。作者野外调查也表明,在克山县英民沟流域仅 2018 年的春季融雪径流使侵蚀沟沟头平均前进了 1.9 m ,沟深增加了 3.8 cm ;在 2018 年的雨季侵蚀沟沟头平均前进了 2.6 m ,沟深增加了 7.8 cm 。同时,坡耕地浅沟侵蚀也非常严重。

1.3 坡面汇流引起的土壤侵蚀更加突出

受长缓坡地形和顺坡垄作的影响,坡面汇流引起的土壤侵蚀更加明显。东北黑土区坡耕地坡长一般为

上百米至上千米,大多介于 300~500 m。刘宝元等的观测资料表明,对于顺坡垄作种植大豆的坡面径流小区,坡长为 300 m 的土壤侵蚀量($2\ 006.5\ \text{t}/\text{hm}^2$)是坡长为 20 m 土壤侵蚀量($5.6\ \text{t}/\text{hm}^2$)的 213 倍^[1]。加之顺坡垄作形成的一系列“垄—沟”系统,加大了坡面汇流作用对坡面侵蚀的贡献。室内模拟降雨试验表明,对于无垄作裸露坡面,在 50 或 100 mm/h 降雨强度

下,当坡面汇流速率由 10 L/min 增加到 20 L/min,坡面侵蚀量增加了 1.2~4.7 倍^[3];而对于顺坡垄作坡面,同样在 50 或 100 mm/h 降雨强度下,当坡面汇流由 10 L/min 增加到 20 L/min 时,坡面侵蚀量增加 1.4~7.6 倍^[4];充分说明了在东北黑土区特殊的长缓坡地形条件下,顺坡垄作明显加大了汇流对坡面土壤侵蚀的作用。



图 5 东北黑土区坡耕地的沟蚀现象(左:郑粉莉摄于 20170426;右:郑粉莉摄于 20170622)

1.4 雨滴打击和壤中流形成是坡面侵蚀的主要驱动力

雨滴打击和径流侵蚀是引起坡面侵蚀的主要动力。与中国其他水蚀类型区相比,雨滴打击是东北黑土区坡面土壤侵蚀的主要驱动力。黑土坡面雨滴打击作用对坡面侵蚀的贡献可达到 72%~96%,反映了雨滴打击对颗粒的分散占主导作用^[5-6];而不同区域的类似研究表明,黄土区雨滴打击对坡面侵蚀的贡献占 35%~61%^[7],红壤坡面雨滴打击对坡面侵蚀的贡献为 27%~76%^[8]。野外原位模拟降雨试验也表明^[9],当黑土坡面秸秆覆盖量仅为 $2\ \text{kg}/\text{m}^2$,即可减少 87%的坡面侵蚀量,进一步证明了雨滴打击作用是黑土区坡面侵蚀的主要驱动力。同时,由于东北黑土层下覆母质多为黄土状亚黏土或湖相沉积物,土壤质地较为黏重,加之长期耕作形成了坚硬的犁底层,容易导致在雨季和融雪过程中形成壤中流。壤中流的形成极大降低土壤颗粒间的黏结力,使土壤可蚀性增加,从而加剧坡面土壤侵蚀。已有研究结果表明,与自由入渗条件下相比,坡面壤中流的形成使坡面侵蚀量增加了 68.3%~74.3%^[5]。

2 当前复合土壤侵蚀的研究现状

目前水蚀和风蚀研究取得了重要成果,并研发了各类水蚀和风蚀模型,为世界范围的土壤侵蚀防治做出了重要贡献。有关复合土壤侵蚀研究,目前主要集中在融雪和降雨复合侵蚀、冻融—水力复合侵蚀等方

面,同时在冻融作用对土壤可蚀性影响等方面取得了一定的进展;而有关冻融—风力复合侵蚀,水力—风力—冻融复合侵蚀方面的研究还十分薄弱。

2.1 冻融作用对风蚀和水蚀的影响

冻融作用与风蚀、水蚀、重力侵蚀等共同作用或交替发生,使复合土壤侵蚀过程不同于单一营力侵蚀过程。当前在冻融作用影响水蚀的方式、速率和土壤团聚体稳定性等方面的研究都取得了重要进展,而对冻融—风力复合侵蚀研究还相对薄弱。有关的研究报道多为冻融作用对土壤风蚀速率和土壤风力可蚀性的影响以及冻融与风蚀的相互关系研究^[10-14]。而目前冻融—风力复合侵蚀研究大多集中在风蚀较严重的干旱或半干旱区,而有关湿润和半湿润区冻融—风力复合侵蚀研究还鲜见报导,有待进一步加强。

2.2 风水复合侵蚀

风水复合侵蚀是风力和水力对同一对象的共同或交替作用,从而产生有别于单一营力(风力或水力)的侵蚀、搬运和沉积过程。按照风力和水力的耦合方式,可分为动力耦合和媒介耦合两种。动力耦合是风力作用于雨滴形成“风驱雨”(wind driven rainfall),从而改变雨滴的侵蚀动能。这实质是风力影响下的水蚀,风力和水力具有时间和空间同步性。媒介耦合是风力和水力对可蚀性下垫面的交错或交互叠加作用^[15]。风力和水力的交错或交互叠加作用,导致一种侵蚀营力对地表物质的侵蚀、搬运和沉积改变另一

种侵蚀发生的物质基础和地表条件,从而形成有别于单一营力作用的复合侵蚀^[16]。因此,媒介耦合式的风水复合侵蚀在时间上交错或交互叠加发生,在空间上同地或异地发生。这种模式的风水复合侵蚀较“风驱雨”侵蚀更为复杂,是目前研究的难点和重点。目前在风水复合侵蚀的区域划分、时空变化、侵蚀强度、侵蚀能量特征、驱动因素、过程和机理等方面取得了重要进展^[10,17-21]。然而有关研究仍然存在以下几方面的不足:①研究区域多为干旱区河流—沙丘系统的风水复合侵蚀,而较少涉及半干旱和半湿润区风水复合侵蚀。由于半干旱或半湿润区的地形地貌、土壤和地表物质组成、降水(尤其是降雪)特征、植被条件和土壤含水量动态变化等与干旱和半干旱区完全不同,导致风水复合侵蚀更为复杂,且半干旱和半湿润区大多是粮食主产区,更需要明确风水复合侵蚀过程和机理,以便为风水复合侵蚀防治和维持粮食产能提供科学依据。②关于风蚀和水蚀相互作用的研究有待深入。目前的研究更注重两者的相互促进效应,而对二者的相互抑制效应重视不够^[15]。风力的强烈分选作用导致地表粗化,从而影响水蚀过程中降水入渗、径流路径和流速,进而影响水蚀速率^[22]。另一方面,水蚀形成沟谷加剧风力磨蚀,从而加剧风蚀^[23];但细沟发育也可能增大地表粗糙度,又可减小风蚀。因而,需要加强风蚀和水蚀的相互作用研究。③风水复合侵蚀过程和机理研究亟需加强。由于风蚀和水蚀在发生范围、影响区域、侵蚀物质输移方向与维度、风力和水力的搬运能力、侵蚀事件的时间尺度等方面均存在巨大差异^[10],而当前风水复合侵蚀机理多为简单的定性描述^[18-19],有待进一步加强。

2.3 东北黑土区多外营力复合侵蚀研究

多外营力复合侵蚀除冻融—水力侵蚀、冻融—风力侵蚀、风水复合侵蚀外,还包含冻融—风力—水力侵蚀、冻融—水力—重力侵蚀、风力—水力—重力侵蚀等。目前,针对多营力复合作用的土壤侵蚀研究较多关注两个侵蚀营力相互作用,而对三个及以上营力相互作用下的侵蚀过程研究极少^[10-11, 20]。中国的东北黑土区正是三个及以上侵蚀营力复合作用的侵蚀区域,尤其是嫩江下游的 $1.04 \times 10^5 \text{ km}^2$ (包括黑龙江西南部、内蒙古东部和吉林西部),受水力、风力、冻融、融雪、重力等作用的共同影响,土壤侵蚀剧烈,但有关多营力复合侵蚀研究进展非常缓慢^[24-25]。已有研究主要是通过核素示踪、实验模拟、模型估算、GIS/RS 等方法,初步区分了风蚀和水蚀对坡面土壤侵蚀的贡献,明晰了降雨径流和融雪径流对土壤侵蚀的作用,分析了冻融作用对土壤可蚀性相关土壤性质的影响,

明确了不同季节黑土坡面侵蚀的主要影响因素^[26-32]。但目前关于多营力复合侵蚀的理论还十分薄弱,有待今后进一步加强。

3 结论

本文基于以上东北黑土区复合土壤侵蚀特点和研究现状的分析,提出黑土区复合土壤侵蚀研究的重点领域。

(1) 多种外营力相互作用的坡面复合侵蚀过程机制。目前大多研究聚焦单一侵蚀外营力作用下的坡面侵蚀特征和过程研究,但有关不同季节坡面侵蚀过程与主控影响因子研究,以及多种外营力互作过程机制等研究相当薄弱。因此,当前迫切需要强化复合土壤侵蚀的理论研究,揭示多种外营力相互作用的复合侵蚀过程机制。

(2) 冻融作用对土壤抗侵蚀能力的影响机制。虽然这方面的研究取得了重要进展,但冻融作用对土壤抗侵蚀能力的影响机理、融雪侵蚀过程土壤抗侵蚀能力的动态变化机制等方面的研究还相当薄弱。当前研究重点应是冻融作用下土壤可蚀性动态变化机制,土壤抗侵蚀能力对冻融作用的响应机制等。

(3) 区分和量化冻融作用、融雪、降雨径流和风力侵蚀对坡面侵蚀和沟蚀的贡献。由于各种侵蚀外营力相互叠加、相互影响,且彼此互作机理及作用贡献尚不清楚。因此区分多种侵蚀营力对坡面片蚀、细沟和浅沟侵蚀过程的主导作用,量化各侵蚀营力对切沟侵蚀的贡献是当前需要强化的研究领域。

(4) 复合侵蚀作用的流域尺度泥沙来源的诊断。由于多营力相互作用和相互叠加,东北黑土区流域泥沙来源更加复杂,需要建立针对这种特殊侵蚀环境的复合指纹示踪方法,以便能有效地诊断流域泥沙来源,为流域水土保持规划提供重要科学支持。

(5) 复合土壤侵蚀预报模型研发。国内外现有成熟的土壤侵蚀模型,皆是针对单一营力的水蚀或风蚀预报,目前尚未有适用于复合侵蚀的预报模型,因此亟待开展研究。

(6) 防治复合土壤侵蚀措施的有效性评价。数十余年来,国家先后启动了一系列东北黑土区水土流失综合治理试点工程。但由于理论研究滞后于生产实践,从而使治理工程实施效果不佳。因此,迫切需要开展复合土壤侵蚀防治措施评价工作,科学回答保护黑土地应采取哪些技术措施等重大技术问题,为国家宏观决策和工程实施提供重要科技支撑。

(7) 东北黑土区复合土壤侵蚀防治分区。黑土区属于多营力叠加的复合土壤侵蚀区,但现阶段中国

尚未有关于黑土区复合侵蚀分区的图件,严重影响了黑土侵蚀防治工作的开展。因此亟待开展东北黑土区复合土壤侵蚀防治分区研究。

[参 考 文 献]

- [1] 水利部. 中国水土流失防治与生态安全:东北黑土区卷[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 刘兴土,阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持,2009(1):17-19.
- [3] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等. 降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J]. 生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [4] 温磊磊. 降雨和汇流对典型黑土区农耕地侵蚀过程的影响研究[D]. 陕西 杨陵:西北农林科技大学,2013.
- [5] 安娟,郑粉莉,李桂芳,等. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响[J]. 生态学报,2011,31(24):7580-7590.
- [6] An Juan, Zheng Fenli, Lu Jia, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions [J]. Soil Science, 2012,177(8):517-526.
- [7] 郑粉莉,唐克丽,张成娥. 降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J]. 人民黄河,1995(7):22-24.
- [8] 李朝霞. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀特点[D]. 湖北 武汉:华中农业大学,2005.
- [9] 杨青森,郑粉莉,温磊磊,等. 秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(2):1-5.
- [10] Field J P, Breshears D D, Whicker J J. Toward a more holistic perspective of soil erosion: Why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions [J]. Aeolian Research, 2009,1(1):9-17.
- [11] Liu Tiejun, Xu Xiangtian, Yang Jie. Experimental study on the effect of freezing-thawing cycles on wind erosion of black soil in Northeast China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017,136:1-8.
- [12] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Xu Xiangtian, et al. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Natural Hazards, 2017,85(2):829-850.
- [13] Wang Lin, Shi Zhihua, Wu Gaolin, et al. Freeze/thaw and soil moisture effects on wind erosion [J]. Geomorphology, 2014,207:141-148.
- [14] 刘佳. 东北黑土冻融作用机理与春季解冻期土壤侵蚀模拟研究[D]. 辽宁 沈阳:沈阳农业大学,2011.
- [15] 杨会民. 半固定风沙土坡面风水复合侵蚀试验研究[D]. 北京:北京师范大学,2017.
- [16] Song Yang, Yan Pan, Liu Lianyou. A review of the research on complex erosion by wind and water [J]. Journal of Geographical Science, 2006,16(2):231-241.
- [17] Bullard J E, Livingstone I. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments [J]. Area, 2002,34(1):8-16.
- [18] Gendugov V M, Glazunov G P. Unity of mechanisms of water and wind erosion of soils [J]. Eurasian Soil Science, 2009,42(5):553-560.
- [19] Xu Jiongxin. The wind-water two-phase erosion and sediment-producing processes in the middle Yellow River basin, China [J]. Science in China (Series D): Earth Science, 2000,43(2):176-186.
- [20] Zhang Jiaqiong, Yang Mingyi, Sun Xijun, et al. Estimation of wind and water erosion based on slope aspects in the crisscross region of the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017,18(4):1620-1631.
- [21] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持,2000(11):1-17.
- [22] Tuo Dengfeng, Xu Mingxiang, Gao Liqian, et al. Changed surface roughness by wind erosion accelerates water erosion [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016,16:105-114.
- [23] 张庆印,樊军,张晓萍. 水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J]. 水土保持学报,2012,26(2):75-79.
- [24] 王玉玺,解运杰,王萍. 东北黑土区水土流失成因分析[J]. 水土保持科技情报,2002(3):27-29.
- [25] 张兴义,隋跃宇,宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. 土壤与作物,2013,2(1):1-6.
- [26] An Juan, Zheng Fenli, Wang Bin. Using ¹³⁷Cs technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, Northeast China [J]. Catena, 2014, 123:243-251.
- [27] Li Runkui, Zhu Axing, Song Xianfeng, et al. Seasonal dynamics of runoff-sediment relationship and its controlling factors in black soil region of northeast China [J]. Journal of Resource and Ecology, 2010,1(4):345-352.
- [28] Lu Jia, Zheng Fenli, Li Guifang, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 161:79-5.
- [29] 刘绪军,景国臣,杨亚娟,等. 冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J]. 中国水土保持科学,2015,13(1):42-46.
- [30] 王禹,杨明义,刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J]. 核农学报,2010,24(4):790-795.
- [31] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟. 季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(4):889-894.
- [32] 王恩姮,卢倩倩,陈祥伟. 模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响[J]. 土壤学报,2014,51(3):490-496.