

# 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望

张光辉<sup>1,2</sup>, 杨扬<sup>1,2</sup>, 刘瑛娜<sup>1,2</sup>, 王志强<sup>1,2</sup>

(1.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.北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

**摘要:** 东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,强烈水土流失导致的黑土厚度下降及土壤质量退化,直接威胁国家粮食安全。系统分析黑土区土壤侵蚀研究成果,对阻控黑土退化、维持土地生产力、保障国家粮食安全具有重要意义,论述了黑土区土壤侵蚀环境与侵蚀环境效应、土壤侵蚀过程与机理、土壤侵蚀时空变化和未来研究展望。多营力复合、缓坡长坡是黑土区独特的侵蚀环境,黑土厚度下降与坡耕地土壤质量退化是该区最典型的侵蚀环境效应。细沟间、细沟、浅沟、切沟及冻融侵蚀发育的动力机制与主控因素差异明显,输沙耗能驱动的泥沙输移对土壤分离的反馈效应是侵蚀强度沿坡长呈强弱交替的根本原因,浅沟和切沟主要发育在坡耕地,侵蚀强度受耕作方式等人类活动的显著影响。冻融侵蚀强度显著小于水力侵蚀,但可通过降低土壤抗蚀性能和促进坡面径流及壤中流发育影响水力侵蚀。土壤侵蚀类型与强度在小流域尺度上沿坡面呈明显的垂直分带特征,在区域尺度上呈南北与东西递变的纬度和经度地带性。全球气候变化可能导致黑土区水力侵蚀加强、冻融侵蚀减弱。未来亟需加强黑土厚度及土地生产力对侵蚀响应机理、复合侵蚀动力过程与耦合机制、典型侵蚀类型时空变化与主控因素等方面的研究。

**关键词:** 黑土; 侵蚀环境; 侵蚀过程; 时空变化; 水土保持

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0001-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.001

## Advances and Prospects of Soil Erosion Research in the Black Soil Region of Northeast China

ZHANG Guanghui<sup>1,2</sup>, YANG Yang<sup>1,2</sup>, LIU Yingna<sup>1,2</sup>, WANG Zhiqiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** The black soil region of Northeast China is an important commodity grain production base of our country. Intensive soil and water loss declines both the thickness and quality of the black soil, thereby threatening the national food security directly. It is therefore of great importance to systematically examine soil erosion research outcomes in the black soil region, which hold essential implications for the prevention and alleviation of black soil degradation, the maintenance of land productivity, and the assurance of national food security. In the current study, the researches on soil erosion environment and its effects, soil erosion processes and mechanisms, spatio-temporal variability of soil erosion in the black soil region were analyzed and concluded, and future research perspectives on soil erosion were proposed. The erosion environment of the black soil region is characterized by various erosive agents and their different combinations, as well as long gentle slopes. The direct impacts of such erosion environment are declining black soil thickness and soil quality degradation of slope farmlands. The erosion mechanisms and dominant influencing factors vary with erosion type, which include interrill, rill, ephemeral gully, gully and freeze-thaw erosion. The feedback of sediment transport induced by energy consumption to soil detachment is the dominant reason for the alternative pattern of strong and weak soil erosion intensity with slope length. Ephemeral gully and gully mainly emerge on slope farmlands, and soil erosion intensity is significantly affected by anthropogenic activities. Although notably weaker than water erosion, the freeze-thaw erosion in this region can influence water erosion via reducing soil erosion resistance and enhancing both surface and subsurface runoff. At the catchment scale,

收稿日期: 2022-01-25

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500803)

第一作者: 张光辉(1969—),男,甘肃静宁人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

the type and intensity of soil erosion apparently change vertically along the slope, i.e., from slope summit towards toe, whereas at the regional scale, they exhibit clear latitudinal and longitudinal zonality along the north-east and west-east directions, respectively. Global climate change may enhance water erosion but reduce freeze-thaw erosion in the black soil region. Future research should focus on the response mechanisms of black soil thickness and land productivity to soil erosion, the dynamic processes and coupling mechanisms of complex soil erosion, as well as the spatio-temporal variability and controlling factors of typical soil erosion types.

**Keywords:** black soil; erosion environment; erosion process; spatio-temporal variability; soil and water conservation

东北黑土区位于松辽流域,主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市)4省(自治区),面积 109 万  $\text{km}^2$ ,是我国重要的商品粮生产基地,玉米、大豆和粮食产量分别占全国总产量的 30%,56%,25%,商品粮供给量占全国的 1/3,是国家粮食安全的“压舱石”。受众多自然和人为因素的综合影响,黑土区水土流失面积高达 21.60 万  $\text{km}^2$ ,其中水蚀和风蚀面积分别为 13.82 万,7.78 万  $\text{km}^2$ <sup>[1]</sup>,强烈的水土流失导致黑土厚度年均下降 0.3~2 mm<sup>[2]</sup>。黑土质量退化是强烈水土流失的必然结果,典型黑土区部分水土流失严重的县市,近 20 年来土壤有机质含量以每年 1.35% 的速度下降<sup>[3]</sup>,直接降低作物产量<sup>[4]</sup>,威胁国家粮食安全。因此,系统研究东北黑土区土壤侵蚀,对于阻控土壤退化、维持耕地产能、保障国家粮食安全具有重要意义。

受独特地形条件影响,黑土区土壤侵蚀具有隐蔽性,坡面侵蚀严重,但河流输沙显著偏低<sup>[5]</sup>。比较流域面积相近的松花江佳木斯水文站和黄河陕县水文站,尽管前者流量比后者大 1 000  $\text{m}^3/\text{s}$ ,但后者平均含沙量、输沙量和输沙模数却分别是佳木斯站的 215,149,112 倍<sup>[6]</sup>,因此,长期以来公众普遍认为黑土区土壤侵蚀并不严重,土壤侵蚀研究和水土流失治理并未得到充分重视。进入 21 世纪以来,黑土区土壤侵蚀与水土保持逐步受到关注。2003 年国家启动东北黑土区水土流失综合防治试点工程,范围涵盖 72 个小流域。2005 年开始的水土流失与生态安全综合科学考察,就黑土区自然环境与社会经济、土壤侵蚀现状与趋势、水土流失危害、水土流失成因、水土保持成效与经验等开展了系统调查、分析和总结<sup>[7]</sup>,为该区土壤侵蚀研究和水土保持工作的快速发展奠定了基础。过去 10 年间,国家科技部、基金委、水利部等单位高度重视黑土区土壤侵蚀问题,先后启动了东北黑土区坡面水土流失综合治理技术、东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范、黑土侵蚀防治机理与调控技术等重大项目,在土壤侵蚀过程与机理、水土流失时空变化与驱动机制、土壤侵蚀环境效应、水土保持综合治理等诸多方面取得了丰硕的成果,为黑土地

保护和生态环境建设提供了强有力的科技支撑。

尽管在过去十多年,众多学者<sup>[5,8-13]</sup>系统分析、总结了黑土区土壤侵蚀特点、水力侵蚀、冻融侵蚀和水土流失现状等,但与其他区域特别是黄土高原相比,黑土区土壤侵蚀研究历史短、成果积累少,亟需加强或深化土壤侵蚀机理与过程、黑土退化机制与地力提升、水土保持综合治理关键技术等研究。因此,本文在系统梳理黑土区土壤侵蚀环境与侵蚀环境效应、土壤侵蚀过程与机理、土壤侵蚀时空变化等研究进展的基础上,提出了黑土区未来土壤侵蚀研究亟待加强的若干问题,以期在黑土地保护性利用、水土流失综合治理、黑土地粮食产能提升提供理论支持。

## 1 土壤侵蚀环境与侵蚀环境效应

### 1.1 土壤侵蚀环境

黑土区具有相对独特的侵蚀环境,属中温带、寒温带半湿润大陆季风性气候,年降水量 350~1 000 mm,80% 集中在 6—9 月,多暴雨。春季多风少雨,每年 6 级以上风速的天数高达 65~80 天。年平均气温 -7~11  $^{\circ}\text{C}$ ,冬季寒冷漫长,无霜期短。季节性冻土广布,冻层深度 1.5~2.0 m,冻结时间 120~200 天<sup>[8]</sup>。水力、风力和冻融等侵蚀营力在时间上交替或同步、空间上交错或重叠,是黑土区水力、风力、冻融等侵蚀类型并存或复合的动力根源<sup>[5]</sup>。根据地形黑土区大致分为漫川漫岗区、山前冲积洪积台地区和洪积平原区。坡缓坡长是地形的主要特征,以典型黑土区为例,该区以山前波状起伏台地或漫岗丘陵为主,海拔高度 180~300 m,坡度  $1^{\circ}$ ~ $5^{\circ}$ ,个别地方高达  $8^{\circ}$ ,坡长 500~2 000 m,甚至长达 4 000 m<sup>[5,8]</sup>。长坡的径流汇水面积大,是切沟侵蚀强烈发育的根本原因。坡度是影响细沟间侵蚀的关键,也是控制坡面径流流速、水流剪切力的核心,土壤分离能力和径流挟沙力均随坡度的增大而增大<sup>[14-15]</sup>,因此,坡度沿坡长变化以及径流沿坡长累积是小流域土壤侵蚀垂直分带的动力基础。根据坡度沿坡长的变化,可将典型黑土区坡面划分为坡顶、上坡、中坡、下坡和坡脚 5 个景观单元,侵蚀类型与强度存在显著差异。黑土区成土母质以砂砾、黄土状亚黏土为主,厚度可达 10~

40 m,垂直分层明显,上层疏松,下层致密。土壤颗粒以粗砂或黏粒为主,质地黏重,透水性差,易形成“上层滞水”<sup>[5]</sup>。土壤类型主要有典型黑土、黑钙土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕色森林土等,有机质含量高,多为3%~6%,高者可达15%,团聚体发育,但遇水后易分散。黑土入渗性能较差,受“上疏下紧”土体结构、土层浅薄及季节性冻结的综合影响,壤中流发育。而壤中流一方面增加土壤含水量,显著降低土壤抗蚀性能,促进细沟间和细沟侵蚀;另一方面可能从坡面下部出露,增加切沟发育风险。黑土区土壤抗蚀性能差,抗冲性仅大于黄土,远小于红壤,受冻融作用影响土壤抗蚀性能季节变化强烈。黑土区森林集中分布,毁林开垦是侵蚀强烈发育的主要原因。在侵蚀较发育的地区,植被覆盖偏低,以农地为主。草原化草甸是典型黑土区的自然植被,以杂草群落“五花草塘”为主,空间分布受土壤水分的显著影响。雨热同季的气候,导致植物生长繁茂,根系发达,有机物质积累丰富,是黑土有机质含量高的基础<sup>[5]</sup>。土地利用方式显著影响土壤侵蚀及其强度<sup>[16]</sup>,过度开垦、土地利用结构单一和掠夺式经营是黑土区土壤侵蚀强烈发育的主要原因。黑土区坡耕地面积高达19.5万km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>,农田常被林带分割,以平行林带起垄行播为主,随垄向与等高线夹角增大,呈横坡、斜坡或顺坡耕作<sup>[18]</sup>。黑土区作物一年一熟,地表季节性裸露时间长,耕作以传统耕作为主。土壤侵蚀受人类活动强度的显著影响,随着人类活动强度增大,土壤侵蚀显著增大<sup>[19]</sup>。

## 1.2 侵蚀环境效应

土壤侵蚀环境效应包括本地和异地效应2类。就黑土区而言,小流域侵蚀产沙受控于泥沙输移过程,水文和泥沙连通性低下<sup>[20]</sup>,来自坡面的大量泥沙在坡脚或沟道内沉积,因此,黑土区土壤侵蚀环境效应研究的重点是小流域本地效应。坡耕地是小流域侵蚀泥沙的策源地,强烈的水土流失必然导致黑土厚度下降,但下降幅度随土壤侵蚀类型与强度以及研究方法的不同而有所差异。中国水土流失与生态安全综合科学考察结果<sup>[7]</sup>表明,黑土厚度年均下降3~10 mm,已由20世纪50年代的60~70 cm,下降至2010年前后的20~30 cm,但核素示踪和典型切沟调查<sup>[2,21]</sup>发现,黑土厚度年均下降速度介于0.3~2.0 mm。小流域内黑土厚度变化是侵蚀导致土壤再分布的结果,因而影响侵蚀类型与强度的关键因素,是决定黑土厚度空间变化的核心<sup>[22]</sup>。黑土厚度下降必然引起下伏黄土状亚黏土母质出露,典型黑土区26%的坡耕地出现了不同程度的“破皮黄”。强烈的水土流失势必导致土壤性质恶化、养分流失和质量退化。侵蚀对土壤质地的影响与其强度密切相关,随着

土壤侵蚀强度增加,土壤沙化加剧<sup>[23]</sup>。土壤水分特征曲线是土壤水文、水力特性的综合反映,随着土壤侵蚀加剧,黑土持水能力显著下降<sup>[18]</sup>,当表土流失70 cm时,黑土田间持水量和有效水分别降低7%和11%<sup>[24]</sup>。大面积林地开垦是造成黑土区水土流失的关键,林地开垦后会显著降低>2 mm团聚体含量及其稳定性<sup>[25]</sup>。土壤侵蚀对土壤养分的影响,与土壤侵蚀强度及其空间分布直接相关,随土壤侵蚀强度增加,侵蚀区土壤有机碳和氮含量显著下降,而沉积区则显著增大<sup>[26]</sup>。随开垦年限延长,侵蚀对土壤养分的影响逐渐加剧<sup>[27]</sup>,导致土壤矿物结合态有机碳垂直分布曲线下移<sup>[28]</sup>。在流域尺度上,侵蚀导致的养分流失,整体呈上游<中游<下游<sup>[29]</sup>,与径流流量、含沙量及团聚体大小和数量密切相关<sup>[30]</sup>。土壤侵蚀导致的土壤质量退化,势必降低作物产量,其影响与土壤侵蚀类型、强度、作物类型及田间管理措施与水平等多种因素有关。作物产量随侵蚀强度增加呈指数函数递减,侵蚀导致大豆减产的主导因素是土壤有机质、氮、磷养分含量的降低,其次为土壤容重增大和持水能力下降<sup>[6]</sup>。

## 2 土壤侵蚀过程与机理

黑土区土壤侵蚀类型多样、过程复杂,表现为多营力耦合、多过程重叠和受冻融作用影响显著等特点<sup>[13]</sup>。侵蚀类型包括水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀和复合侵蚀,水力侵蚀又分为细沟间侵蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀和切沟侵蚀。因水力侵蚀分布广、强度高、影响大,下文将细沟间与细沟、浅沟和切沟与冻融和复合侵蚀平行论述,同时因作者并不从事风力侵蚀研究、且风力侵蚀对黑土区粮食安全的影响显著小于其他侵蚀类型,后文论述不包括风力侵蚀。

### 2.1 细沟间与细沟侵蚀

细沟间侵蚀是雨滴击溅土壤的结果,是降雨强度、坡度、土壤性质、植被覆盖和地表积水的函数,受降雨时风向和风速的显著影响。随降雨强度或降雨动能增大,细沟间侵蚀增大<sup>[31]</sup>。细沟侵蚀是径流冲刷的结果,只有当径流剪切力大于土壤临界剪切力、输沙率小于挟沙力时,径流才会冲刷地表,形成具有明显沟壁、可以被耕作消除、再次出现位置随机的小型侵蚀沟,在黑土区广泛分布于顺坡或斜坡垄沟内。控制细沟侵蚀的关键因素是坡面径流侵蚀动力和土壤侵蚀阻力<sup>[32]</sup>。前者是径流深、坡度和下垫面糙率的函数,后者则是土壤性质、砾石含量、生物结皮和根系特性的函数。径流深受降雨特性和土壤入渗性能影响,降雨量、强度、降雨历时及雨型都会影响径流深。对于黑土较薄的地区或当春季冻土融化深度很浅时,蓄满产流占主导,降雨量和土壤含水量是影响径流深的关键;而对于黑土相对较厚的地区、且无冻

层影响时,以超渗产流为主,降雨强度是控制径流深的核心<sup>[33]</sup>。受黑土厚度空间分异、冻融作用季节变化和降水随机性的综合影响,黑土区坡面径流深时空变化复杂。虽然从短期来看坡面坡度相对稳定,但长期侵蚀导致的土壤再分布以及横坡(或斜坡)垄作、林带建设、沟蚀发育及沟道内泥沙沉积等都会改变局地坡度,从而影响坡面径流侵蚀动力。下垫面糙率受土壤机械组成、砾石含量、土壤物理结皮发育、生物结皮类型与盖度、植被茎秆直径与密度、枯落物蓄积量与盖度、侵蚀导致的根系出露、耕作类型与强度、农事活动、土地利用方式以及冻融作用等多种因素的影响,具有明显的时空分异。影响土壤侵蚀阻力的土壤性质主要包括质地、团聚体及其稳定性、有机质含量和冻融作用。黏粒越多,土壤团聚体越发育,且稳定性越高,土壤侵蚀阻力越大;砂粒越多,土壤侵蚀阻力偏小,但入渗快、坡面径流不发育<sup>[34]</sup>,且因砂粒直径较大径流挟沙力偏小,侵蚀量较低,综合表现为黏质和砂质土壤侵蚀阻力大,粉质土壤侵蚀阻力小。有机质是团聚体形成的黏结剂,随有机质含量增加,团聚体更发育、稳定性更强,土壤侵蚀阻力相应增大。冻融作用显著影响土壤侵蚀阻力,详细讨论见后文。砾石对土壤侵蚀的影响与其含量相关,随砾石含量增大,在坡面径流增加、侵蚀动力增大的同时,土壤侵蚀阻力增强,砾石对侵蚀的影响取决于这 2 种作用的相对大小,因而砾石含量对土壤侵蚀的影响存在阈值。生物结皮是半干旱区植物群落重要的近地表组成,显著影响土壤侵蚀阻力,随生物结皮盖度增大,土壤侵蚀阻力呈指数函数增大<sup>[35]</sup>。植物根系可通过物理捆绑和化学吸附作用强化土壤侵蚀阻力,随根系密度增大,侵蚀阻力呈指数函数增大<sup>[36]</sup>。根系强化土壤侵蚀阻力的功能与其结构密切相关,直根系的作用显著小于须根系。

黑土区近期关于降雨特性对细沟间与细沟侵蚀影响的研究,主要集中在降雨强度、降雨强度—上方来水、降雨强度—坡度—坡长及其交互作用、雨型等方面。随降雨强度增大,细沟间和细沟侵蚀同时增加<sup>[37]</sup>,降雨强度对侵蚀的影响显著大于上方来水<sup>[38]</sup>。细沟一旦形成会显著增加径流挟沙力,导致侵蚀量显著增大<sup>[39]</sup>。侵蚀随降雨强度、坡长的增大而增大,但坡度对侵蚀的影响较为复杂,降水强度、坡度和坡长交互作用对侵蚀的影响,远大于各因素单独或任意 2 个因素交互作用的影响<sup>[38]</sup>。当然,上述研究结果多在控制条件下获得,可能无法真正反映黑土区长坡长对侵蚀过程的影响,换言之,细沟间和细沟侵蚀量的相对大小,可能会因坡长大于某个临界值而发生根本性变化。雨型对坡面侵蚀的影响是近年来

黑土区重要的研究内容。尽管受试验条件的影响,不同试验结果存在一定差异,但总体趋势是雨型对径流的影响显著小于其对侵蚀的影响。当降雨量相同时,变化雨强下的侵蚀量显著大于恒定雨强,减弱型降雨的侵蚀量显著大于其他雨型<sup>[40]</sup>。雨型对侵蚀的影响可能涉及多个过程,主要与土壤物理结皮形成、团聚体消散作用、产流机制及径流流量密切相关。减弱型降雨初期强度大,细沟间侵蚀发育,土壤物理结皮快速形成,导致土壤入渗速率显著下降,坡面径流增加;同时降雨初期的快速入渗,迅速增加表土含水量,促进团聚体崩解、降低土壤团聚体含量及其稳定性,土壤可蚀性增大。坡面径流增大和土壤抗蚀性能降低,必然导致土壤侵蚀加剧。而上述过程与土壤前期含水量、土壤质地以及土体构型密切相关,随前期含水量增大,雨型对侵蚀的影响减弱。当黏粒含量接近 20% 时,物理结皮极易发育,雨型对侵蚀的影响更为显著。坡面产流机制受土体构型的显著影响,以超渗产流为主的流域,侵蚀对雨型的响应可能更加明显。地形是影响土壤侵蚀的重要因素,长坡是黑土区显著的地形特征,随坡长增大,汇水面积增加,径流流量增大,当径流剪切力大于土壤临界剪切力时,细沟开始形成。随着细沟的持续发育,沿程细沟间侵蚀泥沙被不断输移到细沟,径流输沙率迅速增大。受黑土区缓坡的制约,土壤侵蚀受控于泥沙输移过程,挟沙力是决定土壤侵蚀强度的核心因素。随输沙率增大,径流紊动性下降、阻力增大、流速降低、挟沙力下降<sup>[41]</sup>,导致细沟土壤分离速率随输沙率增大呈线性函数降低,当输沙率接近挟沙力时,土壤分离速率接近 0<sup>[42]</sup>。随着坡长的进一步增大,径流流量增加,当挟沙力大于输沙率时,径流开始再次分离土壤,侵蚀强度增大。因此,侵蚀强度沿坡长呈强弱交替分布<sup>[10]</sup>,在平整的坡耕地上侵蚀强弱交替的坡长约为 142 m,可用正弦函数模拟<sup>[43]</sup>。坡型显著影响汇流路径,进而影响细沟间和细沟侵蚀强度<sup>[44]</sup>。耕作措施、残茬覆盖、秸秆还田、轮作制度、林带建设、景观格局等人类活动显著影响细沟间和细沟侵蚀。耕作措施显著改变土壤理化性质,影响坡面水文过程,如免耕增加土壤孔隙度,特别是大孔隙比例,从而强化土壤入渗性能<sup>[45]</sup>。横坡垄作显著增大地表糙率,增加地表蓄积径流能力,同时截短坡长、降低局地坡度,因而具有显著的水土保持功能<sup>[46]</sup>。垄向(与等高线夹角)会改变径流流路、汇流面积、局地坡度以及地表蓄积径流能力,从而影响细沟侵蚀,随垄向增大径流和侵蚀显著增加<sup>[47]</sup>。当然,垄作对土壤侵蚀的影响,与降雨强度密切相关,暴雨导致的断垄会使横垄耕作坡面的土壤侵蚀急剧增加<sup>[48]</sup>。垄作规格也会影响其水土保持功能,顺坡

宽垄明显大于顺坡窄垄<sup>[49]</sup>。残茬覆盖和秸秆还田可有效保护地表,抑制细沟间侵蚀;同时增大地表糙率,降低径流流速,延长入渗时间,降低侵蚀动力,阻控细沟侵蚀。残茬和秸秆分解后增加土壤有机质,提升土壤抗蚀性能。因此,残茬覆盖和秸秆还田具有显著的水土保持功能<sup>[50]</sup>,功能大小与残茬和秸秆类型、规格、盖度及还田方式等密切相关。轮作制度显著影响细沟间和细沟侵蚀,降低坡面产流和产沙量<sup>[51]</sup>。林带直接抑制细沟间侵蚀,同时通过改变局地地形、降低径流流速等多种途径影响细沟发育,沿林带下坡方向距离增大,土壤侵蚀强度越大<sup>[52]</sup>。坡面景观格局显著影响细沟间和细沟侵蚀,与顺坡垄作耕地面积和景观聚集度呈正相关,与灌木和草地面积、生物多样性指数呈负相关<sup>[53]</sup>。

## 2.2 浅沟与切沟侵蚀

浅沟和切沟是黑土区重要的侵蚀类型,是小流域侵蚀泥沙的主要来源<sup>[54]</sup>。尽管在黑土区浅沟和切沟经常被笼统地称为侵蚀沟,但它们发育的动力条件、危害程度及治理措施差异明显,需严格界定和区分。浅沟是由间歇性股流冲刷形成、可被耕作措施消除、深度 $>20$  cm、会在同一位置重复发育的侵蚀沟,而切沟是由间歇性股流冲刷形成、边壁陡峻、深度 $>50$  cm、断面呈“V”或“U”形、纵剖面 and 坡面基本一致、多呈跌水状、无法横跨耕作的永久性侵蚀沟<sup>[55]</sup>。浅沟和切沟是现代地理环境条件下黑土区发育非常活跃的侵蚀类型,是侵蚀泥沙输移的便捷通道,是影响流域水文和泥沙连通性的关键因素<sup>[20]</sup>,需要对其形成的动力条件、发育过程、影响因素进行系统研究,为沟蚀治理提供理论依据。黑土区浅沟强烈发育,多分布于坡面中下部,呈瓦背状<sup>[56]</sup>,多为线性景观,因而基于长度线性模型可解释 55% 的浅沟长度变化<sup>[57]</sup>。浅沟长度和体积与坡长、集水区面积呈显著正相关,浅沟发育需满足坡度和集水区面积的临界地形条件<sup>[58]</sup>。春季浅沟受融雪与冻融过程控制,夏季主要受降雨特性和植被覆盖影响,耕作措施和作物类型会影响浅沟形态特征与空间分布<sup>[59]</sup>。对于横坡耕作坡面,林带数量及其间距显著影响浅沟发育,随林带数量增大及其间距减小,浅沟侵蚀减弱<sup>[60]</sup>。黑土区切沟侵蚀非常发育,现有切沟(原文为侵蚀沟,笔者认为以切沟为主)高达 29.6 万条<sup>[61]</sup>,切沟发育受气候、地质、地貌、地形、土壤、植被以及人类活动等众多因素影响<sup>[55]</sup>,因而依据生态—地理环境条件和影响切沟主导因素的空间分布,可将黑土区划分为不同的子区域<sup>[62]</sup>。就区域尺度而言,切沟数量、长度和面积呈北大南小态势,不同区域的切沟形态特征存在一定差异,如漫川漫岗区切沟形态参数均大于山地丘陵

区<sup>[63]</sup>。与浅沟类似,切沟多呈线性景观<sup>[64]</sup>,地形条件是影响切沟发育的核心因素。随坡长增加,切沟侵蚀先增加后减小,存在临界坡长<sup>[65]</sup>。切沟发育随坡度增大也呈先增大后减小的变化趋势,当坡度为 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 时,典型黑土区的切沟最为发育<sup>[66]</sup>,而南部典型小流域切沟发育的临界坡度略大,介于 $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$ <sup>[67]</sup>。无论切沟侵蚀随坡度如何变化,切沟发育必须满足坡度和集水区面积的临界地形条件。受冻融作用影响,阳坡或半阳坡切沟发育更强烈<sup>[67]</sup>。切沟发育与土地利用方式密切相关,黑土区 80% 以上的切沟发育在坡耕地<sup>[62]</sup>。林带建设也影响切沟侵蚀,切沟密度随林带密度增大而减小,但林带对切沟侵蚀的影响,随距林带距离的增大呈稳定—下降—消失的变化趋势<sup>[68]</sup>。梯田是黑土区广泛采用的水土保持工程措施,但不合理的梯田设计以及邻近坡面向梯田内的径流汇聚,显著增大切沟发育风险<sup>[69]</sup>。黑土区开垦历史较短,大部分切沟处于发育活跃期,侵蚀强度具有明显的时空变异特征,体积增加率可能是表征切沟侵蚀强度时间变化的理想参数<sup>[70]</sup>。在年尺度上,受侵蚀动力季节变化的影响,春季切沟以宽度和面积扩大为主,夏季以沟头溯源为主<sup>[71]</sup>。

## 2.3 冻融侵蚀

冻融作用是发生在高寒地区,因温度变化引起土壤水分相态和体积变化,导致土体冻胀和融沉,造成土壤结构破坏和性质改变的过程。冻融侵蚀是冻融作用导致土壤侵蚀过程改变和强度增加的过程<sup>[13]</sup>。黑土区降雪量占年降水量的 7%~25%,受融雪期昼夜温度变化的影响,白天融水在夜间重新冻结,即昼夜冻融循环。影响冻融循环的主要因素是土壤含水量和气温,含水量越大冻结时冻胀率越大,融解时融沉率越高。温度变化,特别是 $0^{\circ}\text{C}$ 上下温度的变幅与频率,直接控制着冻融过程,变幅越大、频率越高,冻融作用对侵蚀的影响越显著<sup>[72]</sup>。冻融作用主要通过改变土壤性质和阻滞入渗影响侵蚀,冻融循环破坏土壤结构,降低土壤容重,增大土壤孔隙度和饱和导水率,改变团聚体数量及其稳定性,降低土壤黏结力<sup>[2,73-74]</sup>,导致土壤可蚀性增大。冻融循环对土壤性质的影响具有累积效应,与冻融循环次数相关,只有当冻融循环次数达到某一阈值后才显著改变土壤性质,但第 1 次冻融循环的影响最强烈<sup>[75]</sup>。冻融循环对土壤性质的影响与土壤质地密切相关,黑土、黑钙土和白浆土的响应较为明显<sup>[74]</sup>,而结构良好的土壤受冻融作用的影响相对较小<sup>[75]</sup>。冻融循环对土壤性质的影响由土壤水冻结膨胀引起,因而必然与土壤含水量有关<sup>[76]</sup>。前 1 年秋季降水量和冬春季降雪量控制着土壤含水量<sup>[77]</sup>,而黑土特殊的土体构型导致的“上层滞水”,也

为冻融作用提供了便利条件。土壤含水量越高,冻融循环对土壤性质的影响越明显,但含水量的影响主要表现在融雪初期。在不同的土地利用条件下,地表枯落物或枯立物盖度明显不同,导致近地表气温、土壤反射率和表土温度存在差异,因而不同土地利用方式下土壤性质对冻融循环的响应也存在差异,坡耕地显著大于林地和草地<sup>[78]</sup>。阻滞入渗是冻融作用影响侵蚀的另一重要途径,解冻初期随着表土温度升高,冻结土壤从表层逐渐解冻,解冻深度随冻融循环波动。因表层解冻深度有限,下层为不透水的冻结土壤,土体构型完全满足蓄满产流条件,由于土体蓄水能力不足,解冻土壤极易饱和,产生大量地表径流<sup>[79]</sup>,因坡面阻力较小,径流流速较大,侵蚀动力较强。随着解冻的持续进行,解冻深度增大,土壤蓄水能力增强,加之地表积雪因不断消融而减少,融雪径流减小,冻融侵蚀减弱,直至消失。耕作措施显著影响冻融侵蚀强度及其空间分布,对于横坡垄作坡面,融雪侵蚀产生的细沟主要为顺垄型、断垄型和复合型,不同类型的细沟形态差异明显,同时随坡型的不同而有所差异<sup>[80]</sup>。切沟沟壁边缘土壤和沟坡同时受冻融作用影响,形成双向冻融区,导致冻融作用更加强烈,因而冻融作用对切沟侵蚀的影响显著大于其他侵蚀类型,且集中在融雪初期,受控于集水区坡耕地和沟坡的融水量<sup>[81]</sup>。冻融作用对切沟的影响以沟头溯源和沟壁扩张为主,表现为冻裂、融塌和融滑等形式。切沟沟壁边缘土壤冻裂宽度随气温降低而增大,最大冻裂宽度发生在 1—3 月,当冻裂宽度 $<7$  cm 时,3 月以后会逐步变窄直至完全恢复;当冻裂宽度 $>7$  cm 时,切沟沟壁逐渐融塌<sup>[82]</sup>。解冻期切沟沟坡土壤含水量迅速增大,当含水量大于液限时,沟坡土壤以泥流形式沿解冻面滑动,堆积于切沟底部,导致切沟快速扩大,并为雨季径流准备了大量可供输移的泥沙。当日均温度变化在  $0\sim 3.8$  °C 时,融雪侵蚀较为强烈,径流与含沙量先增加后减小。融雪初期径流急剧增加,融雪中期径流相对稳定并趋于减小,含沙量快速增加,侵蚀量达到最大;融雪末期径流逐渐消失,含沙量达到最大。当产流产沙峰值出现频次一致时,径流和泥沙呈“8”字形循环滞后关系,反之则呈复式循环滞后关系<sup>[83]</sup>。虽然与其他侵蚀类型相比,冻融侵蚀强度显著偏小,但它对土壤抗蚀性能的改变以及对切沟形态的影响非常显著,为夏季水力侵蚀创造了便利条件。

#### 2.4 复合侵蚀

复合侵蚀是在 2 种及 2 种以上外营力共同作用下发生的土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积过程,是多种侵蚀营力对同一对象的共同或交替作用,从而产生

有别于单一营力的侵蚀过程,可以是动力耦合,也可以是介质耦合<sup>[9]</sup>。黑土区季节性冻土广布,冻土层深度自南向北递增<sup>[2]</sup>。黑土区复合侵蚀包括风力—冻融、风力—水力、水力—冻融、风力—冻融—水力等多种形式<sup>[9]</sup>。鉴于前文所述原因,本文只分析冻融—水力复合侵蚀。冻融—水力复合侵蚀遍布整个黑土区,冻融过程与水力侵蚀耦合集中在 3 个方面:(1)改变土壤水文特性。冻融循环导致土壤孔隙度增大以及大孔隙和裂隙发育,提升土壤入渗性能,促进优先流发育,提高土壤含水量。随着上层解冻深度增大,土壤蓄水功能增强,当解冻达到一定深度后,坡面产流机制可能从蓄满产流转变为超渗产流。在土壤尚未完成融通或解冻深度较浅时发生降雨,因冻土层制约,极易产生地表径流和壤中流,促进水力侵蚀<sup>[2]</sup>。(2)降低土壤抗蚀性能。冻融作用导致的土壤性质变化,无论是土壤容重降低,还是团聚体及其稳定性下降,都会降低土壤抗蚀性能,加剧水力侵蚀。对于受农事活动强烈扰动的坡耕地,冻融作用对土壤抗蚀性能的影响,可能因耕作、播种等农事活动的强烈干扰而终结,但对其他非农地的影响,可能会持续一段时间,究竟持续多长时间,尚无定量结果,但可以推测冻融作用对土壤抗蚀性能的影响随时间延长而逐渐衰减。(3)为水力侵蚀提供泥沙储备。冻融作用显著影响切沟发育<sup>[82]</sup>,特别是融解过程中发生的泥流或融塌,导致大量泥沙在切沟底部堆积,为夏季暴雨条件下的泥沙输移提供了丰富的物质储备<sup>[84]</sup>。反过来,夏秋季节发生的水力侵蚀,也会影响春季的冻融过程。在年尺度上,细沟及其网络结构、切沟形态特征及其空间分布改变局地积雪厚度、土壤水热特性,增大冻融强度的空间异质性,影响甚至改变融雪径流流路、水文连通性和泥沙连通性<sup>[20]</sup>。在多年尺度上,水力侵蚀导致的黑土厚度下降、土壤质量退化以及土壤沿坡面的再分布<sup>[23]</sup>,都会改变土壤水文过程和热力学特性,进而对冻融侵蚀产生影响。尽管在黑土区普遍存在,但与其他侵蚀类型相比,冻融—水力复合侵蚀研究并不多,且相对滞后。利用 REE 示踪技术对土壤侵蚀季节变化的监测结果表明,尽管存在着明显的复合侵蚀,但坡面侵蚀以水力侵蚀为主,地表径流是坡面侵蚀的主导动力。不同侵蚀营力的叠加,对坡面侵蚀的影响与黑土退化程度密切相关<sup>[85]</sup>。

### 3 土壤侵蚀时空变化

受众多因素的综合影响,黑土区土壤侵蚀具有明显的时空变化特征。

### 3.1 时间变化

土壤侵蚀时间变化具有尺度依赖性。就日尺度而言,消融期温度的日变化必然导致冻融侵蚀存在明显的日变化,但目前并未见相关研究成果,可能与融雪期径流与侵蚀监测极其困难有关。就年尺度而言,相关研究较少,以径流小区监测结果为主。不同土地利用方式下土壤侵蚀差异显著,玉米地显著大于草地,随生长期变化出现明显差异。随植被盖度增加,土壤侵蚀显著降低,8月中旬以前坡度是影响土壤侵蚀的主导因素,但随后其影响因植被盖度增大而逐渐降低<sup>[86]</sup>。就多年尺度来看,黑土区土壤侵蚀呈恶化—好转—波动的发展态势,与2000年相比,2015年的水力侵蚀减轻,但冻融侵蚀加重。从区域来看,与2000年相比,除长白山—完达山地区以外,其他地区的土壤侵蚀均呈加剧态势,土地利用变化是导致土壤侵蚀变化的主要原因<sup>[84]</sup>。从更长时间尺度而言,黑土区土壤侵蚀变化存在明显的阶段性。1653—2012年,土壤侵蚀主要发生在1950年以后,1950—1980年快速增大,1999年之后因大面积实施水土保持而逐渐降低<sup>[87]</sup>。近年来,利用遥感技术反演切沟侵蚀动态变化,是黑土区土壤侵蚀研究的重点,成果极为丰富。与1945年相比,2000年克山、拜泉一带切沟低密度区面积萎缩,高密度区面积增大,且趋于集中连片分布。切沟密度的变化与坡长密切相关,随坡长增大,切沟密度增加,当坡长为300~500 m时,切沟密度达到最大值<sup>[88]</sup>,说明坡长是控制黑土区切沟发育的关键因素。切沟密度变化也受地貌类型、海拔高程、坡度、坡向等因素的影响,低山丘陵区切沟密度和增幅最大,当海拔大于某一值时切沟密度增幅较大,随着坡度增大切沟密度增加,阳坡切沟密度大于阴坡。土地利用方式及其结构是影响切沟发育的重要因素,毁林开荒是促进黑土区切沟发育的关键原因。黑龙江引龙河农场遥感解译数据<sup>[89]</sup>表明,自1985年以来,该农场耕地面积增加27%,全部来自林地和草地开垦。随着耕地面积增大、植被覆盖率下降,切沟密度迅速增加<sup>[90]</sup>。核素示踪及坝库泥沙沉积信息是确定小流域土壤侵蚀时间变化及侵蚀泥沙来源的有效手段,黑龙江九三农场鹤北小流域的分析结果<sup>[91]</sup>表明,70年代末期到80年代初期,尽管因土地管理措施变化该流域产沙量显著减少,但切沟侵蚀呈上升态势。对拜泉25个坝控小流域分析<sup>[92]</sup>发现,高强度土地利用条件下坝库对泥沙输移的影响更加显著,流域产沙量下降主要由土地利用变化引起。

生态、水文及侵蚀过程对气候变化的响应是目前

的研究热点,基于历史与未来的气候变化,评价区域土壤侵蚀的响应,是黑土区土壤侵蚀研究的内容之一。对黑土区1961—2008年降水数据分析发现,降水季节分布发生了显著变化,夏季降水占全年的66%。降水呈下降趋势,年降水出现明显降低的站点占77%。降雨是水力侵蚀的原动力,而降雪是冻融侵蚀的驱动力,气候变化导致年降水量下降,具有抑制黑土区水力和冻融侵蚀的作用。温度升高是全球气候变化的基本特征,黑土区也不例外,年均气温呈波动性上升。受降水减少和气温升高的共同影响,黑土区土壤冻结时间延迟、冻土深度减小、解冻时间提前,整体降低冻融作用的影响,但春季温度的快速升高,可能会加剧冻融侵蚀<sup>[78]</sup>。受全球气候变化的影响,21世纪中叶黑土区降雨侵蚀力呈增大趋势,但年降水量和降雨侵蚀力增幅的空间分布并不一致,说明年内降水格局发生了一定变化,北部地区降雨侵蚀力增幅更大<sup>[93]</sup>。全球气候变化可能显著影响黑土区产流和侵蚀过程,在不同气候变化情景下,径流和产沙均呈增大趋势。在月尺度上,受晚春和秋季温度变化的影响,4—6月和8—9月的径流和泥沙显著增加<sup>[94]</sup>。评估气候变化影响区域径流和侵蚀的不确定性,主要来自大气环流模式和未来土地利用变化2个方面,将众多大气环流模式进行集成,可大幅降低大气环流模式产生的不确定性,但如何降低未来土地利用方式及其变化引起的不确定性目前尚无定论。受这些不确定性的影响,气候变化条件下未来流域径流泥沙的评估结果,与采用历史资料分析得到的流域径流泥沙时间变化之间存在明显差异。前者评估的径流和侵蚀呈增大态势,而后者结果以下降趋势为主。如1955—2004年,松花江径流量呈明显下降趋势,是降水和温度变化的直接结果,同时与人类社会活动密切相关。1955—1976年气候变化是关键因素,而1977—2004年人类社会活动占主导<sup>[95]</sup>。那么,历史下降趋势如何转变为未来增加态势,是确定性结果?还是源自全球气候变化评估的不确定性?尚需深入研究。

### 3.2 空间变化

坡面侵蚀严重、河道输沙少是黑土区水土流失的典型特点,大部分侵蚀泥沙都在小流域内沉积,流域泥沙输移比较低。在小流域尺度上,受特殊地形条件的影响,侵蚀动力和侵蚀类型呈明显的垂直分带特征<sup>[10]</sup>。对于漫川漫岗区,从岗顶到坡脚,依次为岗顶溅蚀带、面蚀加强带、面蚀强烈带、面蚀减缓带和坡下沉积带,而强烈发育的切沟主要分布于坡耕地中下部<sup>[96]</sup>。坡面侵蚀垂直分带特征受降雨、地形、坡耕地

大小及其空间分布、土地利用方式等多种因素影响。随降雨强度和坡度增大,坡面强烈侵蚀带逐渐上移。当坡度变化在  $7^{\circ}\sim 12^{\circ}$  时,强烈侵蚀出现在坡中部和下部<sup>[97]</sup>。坡型显著影响坡面侵蚀过程,无论坡型如何,坡面均呈先侵蚀后沉积的整体格局,但强烈侵蚀发生的部位随坡型的不同而有所变化,凸型坡出现在坡中部,凹型坡发生在坡上部,而复合型坡面呈侵蚀—沉积交替分布<sup>[98]</sup>。对于面积较大的坡耕地,坡中部侵蚀最强,坡顶次之,且阳坡侵蚀显著大于阴坡。土地利用方式显著影响坡面侵蚀垂直分布特征,土壤磁化率监测结果表明,磁化率剖面分布受土地利用方式的显著影响,林地磁化率垂直分布相对均匀,而不同坡位坡耕地的磁化率差异显著,说明坡耕地发生过强烈的侵蚀和沉积过程,坡中部侵蚀最强烈,而坡脚泥沙沉积最明显<sup>[99-100]</sup>。在区域尺度上,黑土区侵蚀类型、强度及其主控因素具有明显的空间变化。北部以冻融侵蚀为主,东南部以水蚀为主,西部以风蚀为主,且均具有明显的季节、年际和多年变化。侵蚀类型空间分布格局是气候、地貌、土壤、植被及人类社会活动等多种因素综合作用的结果,具有明显的南北递变的纬度地带性和东西递变的经度地带性,中度、重度侵蚀集中于人类活动强度较大的松嫩平原及其周边台地、低山丘陵区、辽河平原和三江平原及周边台地<sup>[101]</sup>。水力侵蚀强度大致呈自东南向西北递减趋势,受地形空间分异的影响,其强度的空间变化比较复杂<sup>[102]</sup>。受全球气候变化及人类社会活动的双重影响,黑土区土壤侵蚀空间分布格局可能会发生转变,但目前相关研究非常少。乌裕尔河和讷谟尔河流域 1965—2005 年沟蚀遥感解译的结果<sup>[103]</sup>表明,在过去 40 年间,沟蚀分布重心出现向西北移动的态势,是耕地面积重心发生变化的结果。虽然相关研究甚少,但仍可根据全球气候变化及人类社会活动强度的潜在变化,推测未来黑土区土壤侵蚀空间格局变化。全球气候变化驱动的温度升高,势必导致黑土冻结晚、解冻早、冻土层厚度降低,同时加速积雪融化和冻土解冻速率,可能强化冻融作用对土壤侵蚀的影响。气候变化导致降水及其季节分布的变化,势必影响水蚀过程与强度,特别是极端暴雨频率增大,势必引起沟蚀的强烈响应,水蚀强度可能增大,且其影响范围可能向西扩大。

## 4 研究展望

在过去几十年间,东北黑土区土壤侵蚀研究取得了长足进展,为该区水土保持提供了强有力的理论支持。然而,为有效阻控黑土区土壤侵蚀、维持土地生产力、保

障国家粮食安全,仍亟需加强多方面的研究工作。

### 4.1 土壤侵蚀环境效应

黑土区土壤侵蚀环境效应集中体现在黑土厚度下降、土壤质量退化及粮食产能降低等方面<sup>[4,9,29]</sup>,因此,需要加强黑土区土壤厚度调查与制图、土壤厚度空间分布与主控因素、土壤厚度下降速率及其与土壤侵蚀耦合关系等研究。只有明确了黑土厚度现状、空间分布及其主要影响因素,才能为科学制定黑土地保护战略提供基础数据支撑。侵蚀是导致土壤厚度下降的关键过程,但黑土区侵蚀类型多样、时空变化复杂,侵蚀与土壤厚度耦合关系可能因侵蚀类型与强度时空变化而有所不同,需分类型、分区域才能真正阐明侵蚀与土壤厚度间的耦合机制,为阻控土壤厚度下降奠定理论基础。侵蚀驱动的土壤变瘦,是黑土区土壤侵蚀的主要环境效应之一。为维持土地生产力,需明确土壤结构破坏、养分流失与侵蚀类型、强度及其时空变化间的定量关系,研究典型农作物、耕作方式和轮作制度条件下土壤质量退化过程与养分流失机理,揭示典型水土保持措施调控土壤质量的动力过程与物理机制,建立坡耕地 N、P 流失阻控技术体系。土壤厚度下降和土壤质量退化必然引起土地生产力降低,直接威胁作物产量和国家粮食安全,亟需研究不同作物产量对土壤厚度下降和质量退化的响应及其时空分异特征,研发维持土地生产力的农艺措施体系,建立协同粮食产量与生态服务功能的黑土区小流域水土保持综合治理模式。

### 4.2 土壤侵蚀过程与机理

黑土区细沟间侵蚀动力机制已非常明确<sup>[37]</sup>,但需深入研究细沟间侵蚀与细沟侵蚀耦合机制,特别是不同坡向垄作条件下细沟间产流产沙对细沟侵蚀的潜在影响,明确细沟间土壤可蚀性季节变化及其对作物生长和农事活动的响应与机制,阐明细沟间可蚀性随土壤质量退化的变化规律。细沟侵蚀是坡面径流冲刷土壤的结果<sup>[32]</sup>,因而需强化细沟侵蚀水动力学机理研究,明确黑土厚度下降、土壤质量退化对坡面产流机制与水文过程的影响,明晰坡面径流及其动力随作物生育期及农事活动的变化规律,建立细沟可蚀性和土壤临界剪切力与土壤理化性质之间的定量关系,监测典型土地利用方式下土壤侵蚀阻力时空变化并诊断其主控因素,明确不同坡向垄作条件下细沟形态特征沿坡长的变化规律,揭示黑土区长坡侵蚀强度强弱交替的动力机制,确定坡耕地细沟间与细沟侵蚀泥沙贡献率。切沟侵蚀是股流冲刷土壤的结果<sup>[55]</sup>,虽然黑土区已做了大量切沟侵蚀时空变化研

究<sup>[62,64,66]</sup>,但切沟形态特征空间分异、切沟演变过程及其动力机制、极端暴雨对切沟侵蚀的影响与动力机制、切沟侵蚀对冻融作用的响应与机理、切沟侵蚀预报模型、切沟对小流域侵蚀泥沙的贡献及其时空变化等方面的研究仍然薄弱,亟需进一步深入研究。黑土区冻融侵蚀研究也取得了丰富的研究成果<sup>[13,72,75]</sup>,但仍需加强冻融作用对细沟间可蚀性和土壤侵蚀阻力的影响及其时效性、土壤厚度下降及土壤质量退化导致的土壤水热特性变化、冻融作用对切沟侵蚀的影响及其动力机制、不同土地利用方式下冻融作用的差异与机理等方面的研究。黑土区发育有多种复合侵蚀<sup>[9]</sup>,影响因素多样、过程复杂多变,尽管已有部分研究成果<sup>[84]</sup>,但总体较少、相对滞后,亟需加强冻融作用及其强度对水力侵蚀,特别是土壤可蚀性及切沟侵蚀的影响与动力机制、水力侵蚀类型对积雪厚度空间异质性及冻融作用强度的影响、冻融与水力作用耦合空间分异特征及其主控因素等方面的研究。

#### 4.3 土壤侵蚀时空变化

在全球气候变化及人类社会活动共同影响下,黑土区土壤侵蚀时空变化可能更加强烈。就时间变化而言,需加强次降水事件(降雨、融雪)不同侵蚀类型产流产沙过程及其影响因素、侵蚀强度季节变化与主控因素、侵蚀强度对气候波动及轮作制度的响应与动力机制、侵蚀强度对全球气候变化和土地利用结构调整(城镇化、生态建设等)的响应与机理等方面的研究。就空间变化而言,坡面尺度需重点关注侵蚀类型及其强度影响土壤厚度与质量及生产力的空间分异、切沟形态特征演变及其动力机制;小流域尺度需加强土地利用结构及水土保持措施对流域产流产沙过程的影响、主要侵蚀类型侵蚀泥沙贡献率、坝库建设对流域水文与泥沙连通性及泥沙输移过程的影响等方面的研究;区域尺度需重点关注不同侵蚀类型对极端气候事件响应范围的波动及其环境效应、全球气候变化驱动的主要侵蚀类型空间分布格局的潜在变化等内容。

## 5 结论

受多种侵蚀营力时间交替或同步、空间交错或重叠的影响,黑土区水力、风力和冻融等多种侵蚀类型并存且相互影响。细沟间侵蚀广泛分布,冻融作用驱动的土壤性质变化显著促进细沟间侵蚀;而垄作、残茬覆盖、秸秆还田等农事活动以及林带建设,显著抑制细沟间侵蚀。黑土区坡面集水区面积大,顺坡垄沟内细沟强烈发育,受径流输沙耗能影响,细沟侵蚀沿坡长呈强弱交替分布。垄作方向及林带建设显著影响细沟发育,横坡垄作抑制细沟侵蚀的作用与降雨强

度密切相关,暴雨条件下的断垄会显著加剧细沟侵蚀。浅沟和切沟主要分布在坡耕地,其发育均需满足坡度和集水区面积临界条件;切沟侵蚀随坡度增大而加剧,但当坡度增大到一定的阈值后趋于减弱。阳坡切沟发育更强烈,林带建设及其规格显著影响切沟发育。冻融作用主要通过改变土壤性质和阻滞入渗影响土壤侵蚀,冻融循环显著降低土壤抗蚀性能,但其效应随冻融循环次数逐渐降低;季节性冻土层改变了流域产流机制,降低土壤蓄水功能,促进坡面径流及壤中流发育,从而加剧土壤侵蚀。冻融作用对土壤侵蚀的影响,与降水特性、地形条件、土壤类型、地表覆盖及土地利用方式等密切相关,显著影响切沟形态特征。黑土区发育多种复合侵蚀,冻融对水力侵蚀的影响集中在改变土壤水文特性、降低土壤抗蚀性能和提供泥沙储备;而夏秋季强烈发育的水力侵蚀又会改变局地地形,影响积雪深度、土壤水热特性、融雪径流流路,进而影响冻融侵蚀过程与强度。黑土区土壤侵蚀具有强烈的时空变化特征,受温度与降水季节分布影响,植被或作物生长具有明显的季节变化,导致侵蚀强度也具有显著的季节变化特征。就多年尺度而言,黑土区土壤侵蚀整体呈下降态势,但切沟侵蚀呈加剧趋势,是林地开垦等人类活动的直接结果。在未来气候变化情景下,黑土区土壤侵蚀具有增大风险。受黑土区独特地形影响,侵蚀类型及强度呈明显的坡面垂直分带特征,坡中部侵蚀强烈,坡脚泥沙大量沉积,小流域泥沙连通性差,泥沙输移比小。在区域尺度上,黑土区侵蚀类型和强度具有南北递变的纬度地带性和东西递变的经度地带性,在气候变化条件下冻融侵蚀的影响可能降低,而水蚀强度可能增大,影响范围可能向西扩展。未来亟需加强作物产量对土壤厚度下降和土壤质量退化的响应及其时空分异、长坡侵蚀强度强弱交替动力机制、切沟演变过程及其对极端暴雨和冻融作用的响应与机理、复合侵蚀动力过程与耦合机制、次降水主要侵蚀类型的产流产沙过程、土地利用结构及水土保持对小流域产流产沙过程影响机理等方面的研究。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2020年)[R/OL].(2021-09-30)[2022-01-20].[http://mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202109/t20210930\\_1545971.html](http://mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202109/t20210930_1545971.html).
- [2] Yang Y H, Yan B X, Zhu H. Estimating soil erosion in northeast China using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6):706-711.
- [3] 张少良,张兴义,刘晓冰,等.典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J].*水土保持学报*, 2009, 23

- (3):11-15.
- [4] 王志强,刘宝元,王旭艳,等.东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J].中国科学(地球科学),2009,39(10):1397-1412.
- [5] 张晓平,梁爱珍,申艳,等.东北黑土水土流失特点[J].地理科学,2006,26(6):687-692.
- [6] 杨新,郭江峰,刘洪鹤,等.东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J].地理科学,2006,26(4):443-448.
- [7] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失与生态安全:东北黑土卷[M].北京:科学出版社,2010.
- [8] 阎百兴,杨育红,刘兴土,等.东北黑土区土壤侵蚀显著与演变趋势[J].中国水土保持,2008(12):26-30.
- [9] 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的研究重点[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.
- [10] 崔明,蔡强国,范昊明.东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):29-34.
- [11] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
- [12] 王计磊,李子忠.东北黑土区水力侵蚀研究进展[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.
- [13] 张科利,刘宏远.东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持科学,2018,16(1):17-24.
- [14] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 713-719.
- [15] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291-1297.
- [16] 徐国勇,杨继文,邓蜀江.东北典型漫川漫岗区的侵蚀沟空间特征分析[J].测绘与空间地理信息,2020,43(11):122-124.
- [17] 张天宇,郝艳芳.东北地区坡耕地空间分布及其对水土保持的启示[J].水土保持研究,2018,25(2):190-194.
- [18] 翟俊瑞,谢云,李晶,等.不同侵蚀强度黑土的土壤水分特征曲线模拟[J].水土保持学报,2016,30(4):116-122.
- [19] 蒋小娟,王岩松,范昊明,等.人类活动对东北黑土区侵蚀沟发育的影响[J].人民黄河,2016,38(11):89-93.
- [20] 张光辉.从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J].水科学进展,2021,32(2):141-154.
- [21] 闫百兴,汤洁.黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J].地理研究,2005,24(4):499-506.
- [22] Zhang S, Liu G, Chen S L, et al. Assessing soil thickness in a black soil watershed in northeast China using random forest and field observations [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9: 49-57.
- [23] 高晓飞,顾治家,李爽.不同侵蚀退化程度黑土持水特性研究[J].灌溉排水学报,2018,37(增刊1):61-64.
- [24] 张瑞,苟晓敏,赵玉珍,等.东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):62-65.
- [25] Li H Q, Yao Y F, Zhang X J, et al. Changes in soil physical and hydraulic properties following the conversion of forest to cropland in the black soil region of Northeast China [J]. Catena, 2021, 198: e04986.
- [26] Li H Q, Zhu H S, Qiu L P, et al. Response of soil OC, N and P to land-use change and erosion in the black soil region of the Northeast China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 302(3): e107081.
- [27] 谷思雨,王宁娟,陈渊,等.不同开垦年限农田黑土磷素形态及其数量变化[J].土壤,2014,46(4):662-668.
- [28] Cheng S L, Fang H J, Zhu T H, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in Black Soil region, Northeast China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56: 521-529.
- [29] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):182-185.
- [30] Wei S C, Zhang X P, McLaughlin N B, et al. Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC [J]. Geoderma, 2017, 294: 63-69.
- [31] Hu W, Zheng F L, Bian F. The directional components of splash erosion at different raindrop kinetic energy in the Chinese Mollisol Region [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80: 1329-1340.
- [32] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.
- [33] 黄彦,孟岩,郑文生,等.降雨强度和坡度对黑土区坡面径流侵蚀及入渗的影响研究[J].灌溉排水学报,2016,35(增刊1):73-76.
- [34] 牟延森,沈海鸥,李洪丽,等.不同坡度下渗沙对黑土坡面径流侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):43-47,55.
- [35] Liu F, Zhang G H, Wang H. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41: 875-883.
- [36] Zhang G H, Tang K M, Ren Z P, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes [J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(3): 927-934.
- [37] Lu J, Zheng F L, Li G F, 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 and Tillage Research, 2016, 161: 79-85.
- [38] Wen L L, Zheng F L, Shen H O, et al. Rainfall intensity and inflow rate effects on hillslope soil erosion in the Mollisol region of Northeast China [J]. Natural Hazards, 2015, 79: 381-395.

- [39] 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.
- [40] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
- [41] Zhang G H, Shen R C, Luo R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010,35:1811-1819.
- [42] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009,73(4):1298-1304.
- [43] 王禹,杨明义,刘普灵.典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J].核农学报,2010,24(1):98-103.
- [44] 范昊明,王铁良,周丽丽,等.不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J].水土保持学报,2007,21(6):35-38.
- [45] Fan R Q, Zhang X P, Yang X M, et al. Effects of tillage management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2013,23(3):312-320.
- [46] 何超,王磊,郑粉莉,等.垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):24-28.
- [47] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.
- [48] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,177:1-11.
- [49] 王磊,师宏强,刘刚,等.黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J].农业工程学报,2019,35(19):176-182.
- [50] Xin Y, Xie Y, Liu Y X, et al. Residue cover effects on soil erosion and the infiltration in black soil under simulated rainfall experiments [J]. *Journal of Hydrology*, 2016,543:651-658.
- [51] 富涵,郑粉莉,覃超,等.东北薄层黑土区作物轮作防治坡面侵蚀的效果与C值研究[J].水土保持学报,2019,33(1):14-19.
- [52] 方海燕,吴丹瑞.黑土区农田防护林带对小流域土壤侵蚀和泥沙沉积的影响[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2018,4(1):104-110.
- [53] 魏建兵,肖笃宁,李秀珍,等.东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J].生态学报,2006,26(8):2608-2615.
- [54] 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 [J]. *Geomorphology*, 2008,101:683-691.
- [55] 张光辉.切沟侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2020,34(5):1-13.
- [56] 张永光,刘宝元,伍永秋.东北漫岗黑土区春季冻融期浅沟侵蚀[J].山地学报,2006,24(3):306-311.
- [57] Zhang Y G, Wu Y Q, Liu B Y, et al. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region, Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,96:28-41.
- [58] 张永光,伍永秋,刘洪鹤,等.东北漫岗黑土区地形因子对浅沟侵蚀的影响分析[J].水土保持学报,2007,21(1):35-38,49.
- [59] 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[J].地理研究,2008,27(1):145-154.
- [60] 苏子龙,崔明,范昊明.东北漫岗黑土区防护林带分布对浅沟侵蚀的影响[J].水土保持研究,2012,19(3):20-23,29.
- [61] 姜芸,王军,张莉.东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征[J].农业工程学报,2020,36(7):157-165.
- [62] Yang J C, Zhang S W, Chang L P, et al. Gully erosion regionalization of black soil area in northeastern China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017,27(1):78-87.
- [63] 张旭,顾广贺,范昊明,等.东北黑土区降雨侵蚀力与侵蚀沟发育关系研究[J].沈阳农业大学学报,2014,45(2):249-252.
- [64] 李镇,秦伟,齐志国,等.东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析[J].农业工程学报,2019,35(14):133-140.
- [65] 顾广贺,王岩松,钟云飞,等.东北漫川漫岗区侵蚀沟发育特征研究[J].水土保持研究,2015,22(2):47-51,57.
- [66] Wang B W, Fan H M. Distribution characteristics of gullies with slope gradient in Northeast China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019,191:e379.
- [67] Wang D C, Fan H M, Fan X G. Distributions of recent gullies on hillslopes with different slopes and aspects in the Black Soil Region of Northeast China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017,189:e508.
- [68] Deng R X, Wang W J, Fang H Y, et al. Effect of farmland shelterbelts on gully erosion in the black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Forest Research*, 2015,26(4):941-948.
- [69] Wen Y R, Kasielke T, Li H, et al. May agricultural terraces induce gully erosion? A case study from the Black Soil Region of Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,750:e141715.
- [70] Dong Y F, Wu Y Q, Qin W, et al. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes [J]. *Catena*, 2019,182:e104146.
- [71] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J].地理学报,2007,62(11):1165-1173.

- [72] 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.
- [73] 牛浩,罗万清,王晋峰,等.冻融对东北黑土风干团聚体与水稳性团聚体组成及稳定性的影响[J].土壤通报,2020,51(4):841-847.
- [74] Liu B, Ma R M, Fan H M. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206: e104810
- [75] Ma Q H, Zhang K L, Jabeo J D, et al. Freeze-thaw cycles effects on soil physical properties under different degraded conditions in Northeast China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: e321.
- [76] Wang L, Zuo X F, Zheng F L, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region [J]. Catena, 2020, 193: e104615.
- [77] 赵显波,刘铁军,许士国,等.季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J].冰川冻土,2015,37(1):233-240.
- [78] 贾燕锋,吴锰,刘明波.东北低山丘陵区解冻期不同土地利用土壤侵蚀特征分析[J].沈阳农业大学学报,2019,50(6):747-752.
- [79] 华文杏,范昊明,许秀泉,等.东北坡耕地春季融雪侵蚀观测研究[J].水土保持学报,2017,31(2):92-110.
- [80] 刘雨佳,许秀泉,范昊明,等.东北黑土区横垄坡面融雪期细沟侵蚀特征研究[J].土壤通报,2017,48(3):701-706.
- [81] Zhang S L, Wang X R, Xiao Z L, et al. Quantitative studies of gully slope erosion and soil physiochemical properties during freeze-thaw cycling in a Mollisol region [J]. Science of the Total Environment, 2020, 707: e136191.
- [82] 杨亚娟,景国臣,刘绪军,等.冻融作用对黑土区侵蚀沟发育的影响[J].水土保持通报,2015,35(3):1-5.
- [83] 胡伟,樊华,李浩,等.黑土区治理后侵蚀沟道融雪侵蚀观测研究[J].水土保持学报,2018,32(5):84-90.
- [84] 何煦,桑琦明,郑粉莉,等.东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2021,35(1):103-109,115.
- [85] Wang L, Zheng F L, Liu G, et al. Seasonal changes of soil erosion and its spatial distribution on a long gentle hillslope in the Chinese Mollisol region [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3): 394-404.
- [86] Shen H O, He Y F, Hu W, et al. The temporal evolution of soil erosion for corn and fallow hillslopes in the typical Mollisol region of Northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 200-205.
- [87] Xie Y, Lin H H, Ye Y, et al. Changes in soil erosion in cropland in northeastern China over the past 300 years [J]. Catena, 2019, 176: 410-418.
- [88] 闫业超,张树文,李晓燕,等.黑龙江克拜黑土区 50 多年来侵蚀沟时空变化[J].地理学报,2005,60(6):1015-1020.
- [89] 杜树立,李浩,陈强,等.典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析:以黑龙江省引龙河农场为例[J].土壤与作物,2013,2(4):177-182.
- [90] 丁超,胡伟,严月,等.中国东北漫川漫岗典型黑土区沟道侵蚀特征[J].水土保持通报,2020,40(5):72-78.
- [91] Huang D H, Du P F, Walling D E, et al. Using reservoir deposits to reconstruct the impact of recent changes in land management on sediment yield and sediment sources for a small catchment in the Black Soil region of Northeast China [J]. Geoderma, 2019, 343: 139-154.
- [92] Fang H Y. Impact of land use change and dam construction on soil erosion and sediment yield in the black soil region, Northeastern China [J]. Land Degradation and Development, 2017, 28: 1482-1492.
- [93] Zhang Y G, Nearing M A, Zhang X C, et al. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China [J]. Journal of Hydrology, 2010, 384: 97-106.
- [94] Li Z Y, Fang H Y. Modeling the impact of climate change on watershed discharge and sediment yield in the black soil region, northeastern China [J]. Geomorphology, 2017, 293: 255-271.
- [95] Miao C Y, Yang L, Liu B Y. Streamflow changes and its influencing factors in the mainstream of the Songhua River basin, Northeast China over the past 50 years [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63: 489-499.
- [96] 范昊明,蔡强国,崔明.东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J].农业工程学报,2005,21(6):8-11.
- [97] 王宁,杨春雨,张刚,等.黑土区土壤侵蚀的 REE 示踪法研究[J].地理科学,2008,28(4):565-570.
- [98] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等.地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J].土壤学报,2016,53(3):572-581.
- [99] Liu L, Zhang K L, Zhang Z D, et al. Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in Northeast China [J]. Catena, 2015, 129: 103-111.
- [100] Yu Y, Zhang K L, Liu L, et al. Estimating long-term erosion and sedimentation rate on farmland using magnetic susceptibility in northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 41-49.
- [101] 范昊明,王铁良,蔡强国,等.东北地区土壤侵蚀分异特征与分区治理模式研究[J].水土保持研究,2008,15(2):69-72.
- [102] 焦剑,谢云,林燕,等.东北地区降雨—径流侵蚀力研究[J].中国水土保持科学,2009,7(3):6-11.
- [103] 王文娟,邓荣鑫,张树文,等.东北典型黑土区侵蚀沟发育演化特征分析[J].地理与地理信息科学,2019,35(4):105-110.