科学通报 2024 年 第 69 卷 第 11 期: 1401 ~ 1405
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
香山科学会议专栏 观 点
第722次学术讨论会·黑土地保护与利用

水土流失防控是黑土地保护的重点

张兴义, 胡伟, 李建业, 郭明明, 刘晓冰*

中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081

* 联系人, E-mail: liuxb@iga.ac.cn

黑土地耕地面积和年粮食总产量分别占全国的1/4, 而商品粮调出量却占全国的1/3, 是国家粮食安全的“压舱石”[1]. 然而, 由于高强度掠夺式经营, 种植结构的变化, 加之漫川漫岗地貌和春季多风、夏季集中降雨、冬春冻融等自然因素, 开垦只有百余年的黑土坡耕地侵蚀退化和水土流失严重, 致使富含有机质的黑土层变薄, 表层有机质含量显著降低, 容重增加, 严重者部分母质裸露, 形成沟道, 损毁耕地. 其最终的结果将是黑土面积减少、耕地粮食生产能力下降、农业现代化发展受到制约、国家粮食安全受到严重威胁[2].

为保护和利用好黑土地, 2022年国家颁布了以首个区域土地和土壤为对象的法律《中华人民共和国黑土地保护法》, 为有针对性地建立黑土地保护制度, 促进黑土地保护措施和保护工程的实施, 从根源上提供了法律保障. 科技部针对黑土地保护利用重大科技需求, 在“十四五”国家重点研发计划中设立了首个区域重点专项“黑土地保护与利用科技创新”; 中国科学院发挥组织农业重大科技示范工程经验和在黑土地研究方面积累的技术与人才优势, 启动了A类战略性先导科技专项“黑土地保护与利用科技创新工程(黑土粮仓)”. 此外, 基于黑土地资源保护和可持续发展的需求, 国家层面及其相关部委相继启动了保护性耕作国家行动计划、高标准农田建设、耕地整治、小流域综合治理、乡村振兴重点、有机肥还田等一系列重大工程. 这些举措各有侧重, 目标都是一致的, 那就是黑土地的永续利用. 那么, 基于科学判断的黑土地保护的重点在哪里, 亟须解决的是什么问题? 本文基于本团队黑土地侵蚀及其对黑土质量和粮食生产影响的长期研究结果, 总结提出黑土地保护亟须解决的首要任务是水土流失防治, 并提出了亟须解决的重点问题.

1 水土流失降低耕地质量, 损毁耕地

2021年, 水利部东北黑土区水土流失动态监测显示, 黑土地为108.75万km^2, 水土流失面积为21.41万km^2, 占区域国土面积的19.68%, 其中水力和风力侵蚀面积分别为13.64、7.77万km^2. 水土流失发生的严重程度以轻度和中度为主, 70%发生于耕地上, 70%发生于低山丘陵区. 从区域而言, 黑土地西部以风蚀为主, 漫川漫岗典型黑土区和低山丘陵区以水蚀为主[3].



张兴义 中国科学院东北地理与农业生态研究所研究员, 中国科学院特聘研究员, 博士生导师, 水土保持学科带头人和中国科学院海伦水保站站长, 世界黑土联合会和黑龙江省黑土保护利用学会秘书长, 中国水土保持学会常务理事, 国家外国专家局引智示范基地“黑土侵蚀治理技术”首席科学家, 水利部松辽水利委员会水土保持专家. 主要从事黑土侵蚀和水土保持研究.



刘晓冰 中国科学院东北地理与农业生态研究所研究员, 博士生导师. ANSO(Alliance of International Science Organizations)世界黑土联合会主席, 世界大豆研究会理事. 从事作物生理和土壤肥力管理研究.

1.1 水土流失致使黑土层变薄

水土流失的显著特征是剥离和迁移表土, 对黑土地农田直接作用的结果是黑土层变薄. 关于黑土层薄厚的问题, 张之一[4]基于全国第二次土壤普查结果, 给予了很好的诠释, 他提出, 在黑土地全区域内垦殖前就有厚薄之分, 总体黑土层平均厚度为50~60 cm. 长期监测和核素示踪能够定量土壤侵蚀平均强度, 进而可量化黑土层变薄速率. 基于黑土地水土流失监测站点的长期监测[2]和^{137}Cs示踪多坡面研究[5]结果, 得出黑土地水土流失区平均侵蚀强度在2000~3000 t/(km^2 a), 即黑土层变薄速率为2~3 mm/a. 黑土层变薄速率范围应为0~Max坡面侵蚀强度, 多年平均值更能反映黑土层变薄的速率, 有些学者认为是1~5 mm/a. 中国科学院海伦水土保持监测研究站在5°裸地小区监测到2021年土壤侵蚀强度为

© 2023《中国科学》杂志社

35000 t/km^{2}的极端值(个人交流), 故可将黑土层变薄速率范围界定为0~35 mm/a. 但通常描述的黑土层变薄速率应为水土流失导致的多年平均速率, 即平均值, 故界定黑土层变薄速率为2~3 mm/a, 较为客观. 需要指出的是, 国家给黑土地设定的土壤容许流失量为200 t/(km^2 a), 即每年容许黑土层变薄0.2 mm. 野外观测发现, 坡度大于0.5°的顺坡垄作耕地就有水土流失发生, 而在4.3亿亩(1亩=666.7 m^2)的黑土地旱作耕地中, 坡度大于0.5°的耕地占86%. 基于农业生产保障国家粮食安全的需要, 黑土地土壤容许流失量200 t/(km^2 a)是否合理? 需加以研究.

1.2 水土流失导致肥力下降

水土流失对黑土地农田间接作用的结果是黑土肥力下降, 可具体分为表土有机质(soil organic matter, SOM)含量降低、结构趋劣等, 即"变瘦"和"变硬". 黑土地随着土层加深, 土壤有机质及养分含量显著降低, 土壤侵蚀剥离表层土壤, 势必导致SOM和养分含量减少. 以典型黑土区表层0~20 cm的SOM含量40 g/kg(下层20 g/kg)和年变薄速率2 mm为例, 耕层SOM含量因侵蚀剥离年均下降速率为0.5%, 用养失调导致的SOM年均下降速率也约为0.5%, 加之可溶性SOM随径流流失, 表层SOM含量年均下降速率可高于1%, 区域调查结果验证了这一结果. 据本团队在黑龙江省典型黑土带上大样点取样测定, 1982~2002年间表层0~20 cm的SOM年平均含量下降速率为0.5%, 而水土流失严重的县市高达1.35%[6].

黑土地由于冷凉, 旱田均采取垄作, 且多为顺坡/斜坡垄作, 为典型的雨养农业. 降雨形成的径流汇集于垄沟, 如存在垄向比降, 产生地表径流, 携带泥沙, 发生水流失和土壤流失. 雨季前中耕扶垄作业后, 垄沟疏松表土下为导水能力弱的犁底层, 暴雨时将表土冲刷殆尽, 犁底层裸露, 土壤板结, 呈现"人夹脚、马夹蹄". 此外, 垄作导致水蚀区径流系数在0.1左右, 约有50 mm的降水流出田块, 占黑土地总降水量的10%. 而这部分正是土壤有效水部分, 故水土流失也加剧了坡耕地的水分胁迫, 降低了水分利用效率, 易发生干旱.

已有研究表明, 黑土层消失, 粮食产能降低30%以上, 20 cm的黑土层每变薄1 cm或SOM含量每下降一个百分点, 玉米每公顷减产约100 kg. 刘兴土和阎百兴[7]系统总结得出, 黑土地因水土流失导致年损失粮食产能1000万t, 即100亿kg.

1.3 严重的水土流失形成沟道, 毁损耕地

黑土地耕地虽95%的坡度小于7°, 但由于坡缓坡长, 汇水区面积大, 暴雨时易形成股流, 发生沟道侵蚀. 最新的侵蚀沟普查、抽样调查、实测等均显示, 黑土地侵蚀沟总数量在60万条以上, 主要发育形成于20世纪60年代[8]. 而且水利部即将发布基于2 m分辨率遥感解译黑土地侵蚀沟普查结果. 该结果表明, 黑土地沟道侵蚀仅次于黄土高原, 70%以上的侵蚀沟发育于耕地中, 90%的为发展沟, 并呈加剧的发展态势. 黑土地侵蚀沟对粮食生产的危害主要表现在沟毁耕地、降低农机作业效率、加剧土壤流失3个方面. 侵蚀沟普查绘制了沟岸线, 并计算了沟道面积, 耕地中的侵蚀沟两侧需留出机具掉头的长度, 俗称抹牛地, 也属于沟毁耕地面积. 依此计算沟毁耕地面积在33.3万hm^{2}以上, 以亩均300 kg的粮食单产计算, 沟道侵蚀已导致年粮食产量损失15亿kg. 黑土地农业生产机械化水平在我国最高, 从整地到收获, 全程基本机械化. 侵蚀沟阻挡农机通过, 虽不直接对粮食产量造成影响, 但增加了机耕费用, 危害不容忽视. 基于野外侵蚀沟实测, Zhang等人[9]得出, 沟道侵蚀土壤流失量占调查区总土壤流失量的65%. 这说明当前基于土壤流失方程监测的区域黑土侵蚀强度被明显地低估, 而且依据动态监测结果推算的水土流失对粮食生产的影响也有可能偏低.

2 防止水土流失需要优先重视的几个问题

2.1 水土流失防治是遏止土壤有机质含量下降的关键

黑土地垦殖后发生了黑土退化, 土壤肥力下降, 水土流失加剧了这一过程, 亟须遏止. 土地开垦为农田后, 土壤SOM演变过程得到全世界的广泛关注并形成共识, 总体分为熟化、缓慢下降(也称土壤退化)、相对稳定(也称平衡)3个阶段[10,11]. 垦殖初期, 由自然植被转变为作物, 土壤被耕作扰动, 水热发生显著改变, 促进了SOM矿化和有机养分释放. 虽然SOM含量降低, 但土壤肥力却增加, 属垦殖后土壤必然的熟化过程[12]. 其后, 由于农作秸秆离田和传统耕作频繁机耕扰动土壤, 导致SOM进一步降低, 土壤结构和功能下降, 土壤基础生产力下降, 呈现土壤退化[13]. 在无水土流失的情况下, 如农田管理不变, 某一个气候带的SOM腐殖化速率与矿化速率最终趋同, SOM呈现小幅度波动相对平衡的状态, 即为农田碳趋于稳定, 达到新的平衡状态[13]. 东北黑土地每个阶段总体分别为40年左右, SOM含量较自然土壤分别降低30%、50%和60%, 黑土生产力降低20%以上. 若采用保护性措施, 将会缓慢提升黑土SOM含量, 并最终达到新的平衡.

而水土流失区, 旱作耕地在土壤侵蚀的作用下, 富含SOM的表土还存在不断被剥离、迁移, 加速了农耕导致的黑土退化过程, 且最后的平衡状态被打破, SOM含量不断减少, 土壤生产力严重下降, 称之为土壤退化恶化阶段[10](图1). 就全区域而言, 当前黑土地中北部农田SOM处于下降退化阶段, 哈尔滨以南农田SOM已达到平衡或缓慢上升阶段. 黑土地86%的旱作农田坡度>0.5°, 多顺坡/斜坡垄作, 存在不同程度的水土流失, 黑土层变薄, 土壤质量下降. 水土流失已成为当前黑土退化的最主要驱动因素. 当前广泛实施的有机肥还田、轮作等黑土地保育措施, 无论是水蚀区, 还是风蚀区, 由于水土流失导致表土碳的流失, 削弱或抵消了保护措施的增

碳和提升土壤肥力的作用，故防止水土流失是黑土农田保护的重要前提，也是黑土地保护亟须优先解决的问题.

2.2 破解耕地水土保持技术及其应用瓶颈

如前所述，水土流失主要发生于耕地上，故耕地水土保持技术及其大面积应用应成为黑土地侵蚀防控的重中之重. 目前已形成了一系列耕地水土保持技术. 如风蚀区秸秆高留茬保护性耕作技术，水蚀区等高垄作和地埂植物带坡面水土保持工程措施，垄向区田、苗期垄沟深松、大垄、秸秆覆盖等水土保持耕作措施，均能有效地防控耕地水土流失. 尤其是坡面水土保持工程措施——地埂植物带技术，为自2003年东北黑土区水土流失综合治理试点工程以及接续3期国家农业综合开发东北黑土区水土流失综合治理工程的主推技术，在黑土地得以一定面积的应用. 然而，受现行家庭联产承包责任制限制，实施难度大，受农户抵制，工程组织者无权实施. 尽管《中华人民共和国黑土地保护法》已经颁布，为耕地水土保持提供了法律保障，由于缺乏具体约束性条款，工程实施尚未从根本上破解. 实际调查发现，地埂植物带保存率略多于三分之一，东北黑土区水土流失治理在2017年转为侵蚀沟专项治理工程.

秸秆覆盖保护性耕作是实现耕地水土保持的根本途径. 秸秆覆盖免耕起源于北美黑土地，并在全世界广泛应用，是20世纪农艺的重大创新. 起初是为了解决耕地水土流失而研发的，同时具有培肥土壤的作用，成为耕地可持续利用的重要措施. 该措施在美国水土流失严重的黑土地上全面应用，南美黑土地应用最高，应用于90%以上的耕地[14]. 我国东北黑土地保护“梨树模式”的核心就是秸秆地表覆盖少免耕，能够有效防控耕地水土流失，吉林省已全面推广应用，其他省区正在跟进(图2). 综合研判黑土地水土保持技术，秸秆覆盖保护性耕作技术是最具应用性、能够有效防控土壤侵蚀、实现可持续利用的措施，尚需对不同区域采取具体措施并对实施效果及其适宜性进行深入研究，从实施效果和技术瓶颈方面破解黑土地秸秆覆盖保护性耕作应用的问题，将为该技术科学高效的应用提供科技支撑.

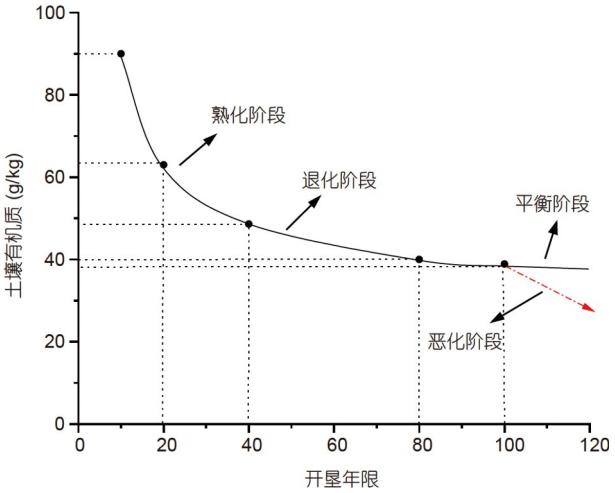


图 1 垦殖后黑土SOM的演变[6]
Figure 1 The change process of soil organic matter content after black soil reclamation[6]

2.3 侵蚀沟生态修复

坡耕地侵蚀沟广泛分布，损毁耕地、道路甚至村屯，防碍机械作业，危害直观可见，农户治理需求迫切，成为当前乃至未来现代农业发展必须解决的问题. 水流冲刷形成的侵蚀沟是在现有农耕为主要利用方式的下水通道，治理必须要采取工程稳固后植被恢复的生态修复治理模式. 当前黑土地保护的核心是保障粮食生产，故侵蚀沟治理也需围绕这一核心，应与以往的侵蚀沟生态修复有所区分. 首先，对于耕地中毁地的侵蚀沟，建议纳入高标准农田建设工程的耕地整治内容，采取已被水利部认定的成熟适用的侵蚀沟填埋复垦技术，能够填埋消除的均予以消除，实现沟毁耕地再造，恢复耕地地块的完整，为农业现代化提供保障. 其次，对于耕地中的大中型侵蚀沟和耕地或道路边的侵蚀沟，依托国家黑土地侵蚀沟治理专项工程，实施稳固措施，作为排水通道，同时种植林草，恢复黑土地生态. 此外，还要开展生态环境保护建设，实现“绿树青山”，使得水土流失综合防治成为黑土地保护的措施，又是美丽乡村建设不可或缺的举措.



图 2 黑土地保护性耕作
Figure 2 The soil conservation tillage in the black soil

2.4 侵蚀防控与地力提升协同

国家赋予黑土地保障国家粮食安全的重任. 今后, 粮食生产在一定阶段势必面临高压态势, 面向国家新时代高质量发展的战略需求, “十四五”黑土地保护已进入全面实施阶段, 需建立水土保持与农业生产协调发展的机制. 针对以往坡耕地与侵蚀治理、侵蚀治理与土壤培育脱节, 水利和农业等管理部门各自为战, 治理工程项目区措施单一, 不系统, 未能实现全面保护. 基于国家提出的山水林田路湖草生命共同体综合系统治理的理念, 建议在水蚀区, 集成高标准农田建设、保护性耕作国家行动计划、侵蚀沟治理等工程, 开展以小流域为单元蓄导排水系建设为核心的侵蚀防控与保护性利用协同发展黑土地保护工程, 实现全面系统治理, 达到水土流失得以有效遏制、生态环境得以有效改善、黑土退化得以阻控、粮食可持续生产能力得以保证的目标, 探索并建立适用于未来30年甚至50年黑土农业可持续发展的道路.

致谢 感谢国家重点研发计划(2021YFD1500700/800)、国家自然科学基金(42177312)和国际伙伴计划(131323KYSB20210004)资助

推荐阅读文献

1 Chinese Academy of Sciences. White Paper of Chinese Black Soil in 2020 (in Chinese). 2021, https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4797913.shtml [中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020). 2021, https://www.cas.cn/cm/202107/t20210712_4797913.shtml]

2 Zhang X Y, Liu X B, Zhao J. Utilization and Conservation of Black Soil (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [张兴义, 刘晓冰, 赵军. 黑土利用与保护. 北京: 科学出版社, 2018]

3 Ministry of Water Resources, People’s Rupublic of China. China Soil and Water Conservation Announcement of 2021 (in Chinese). Ecological Construction of Soil and Water Conservation in China (2021). 2022, http://www.swcc.org.cn/qgstbcgg [中华人民共和国水利部. 中国水土保持公告(2021). 2022, http://www.swcc.org.cn/qgstbcgg]

4 Zhang Z Y. The depth changes of black soil after reclamation (in Chinese). J Heilongjiang Bayi Agric Reclamat Univ, 2010, (5): 1–3 [张之一. 黑土开垦后黑土层厚度的变化. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, (5): 1–3]

5 Yan B X, Yang J. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion (in Chinese). Geogr Res, 2005, 24: 499–506 [阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响. 地理研究, 2005, 24: 499–506]

6 Zhang X Y, Sui Y Y, Song C Y. The degradation process of arable black soil (in Chinese). Soil Crop, 2013, 2: 1–6 [张兴义, 隋跃宇, 宋春雨. 农田黑土退化过程. 土壤与作物, 2013, 2: 1–6]

7 Liu X T, Yan B X. Black soil erosion and food security in Northeast China (in Chinese). Soil Water Conserv China, 2009, (1): 17–19 [刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全. 中国水土保持, 2009, (1): 17–19]

8 Zhang S, Li F, Li T, et al. Remote sensing monitoring of gullies on a regional scale: A case study of Kebai region in Heilongjiang Province, China. Chin Geogr Sci, 2015, 25: 602–611

9 Zhang S, Han X, Cruse R M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of permanent gully and its contribution to regional soil loss based on a field investigation of 393 km^2 in Mollisols region of Northeast China. Catena, 2022, 217: 106467

10 Lal R. Carbon sequestration. Philos Trans R Soc B, 2008, 363: 815–830

11 Ramírez P B, Calderón F J, Fonte S J, et al. Environmental controls and long-term changes on carbon stocks under agricultural lands. Soil Tillage Res, 2019, 186: 310–321

12 Davidson D W, McKey D. Ant-plant symbioses: Stalking the chuyachaqui. Trends Ecol Evol, 1993, 8: 326–332

13 Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. RothC-26.3 model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of corn in Northeast China (in Chinese). Sci Agric Sin, 2003, 36: 1318–1324 [杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 用RothC-26.3模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响. 中国农业科学, 2003, 36: 1318–1324]

14 Zech W, Guggenberger G, Zalba P, et al. Soil organic matter transformation in Argentinian Hapludolls. Z Pflanzenernaehr Bodenk, 1997, 160: 563–571

15 Li B G, Wang G M. Soil Conservation Tillage in Northeast China—Lishu Model (in Chinese). Beijing: Science and Technology Literature Press, 2019 [李保国, 王贵满. 东北地区的保护性耕作技术——梨树模式. 北京: 科学技术文献出版社, 2019]

Summary for “水土流失防控是黑土地保护的重点”

Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation

Xingyi Zhang, Wei Hu, Jianye Li, Mingming Guo & Xiaobing Liu*

Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China
* Corresponding author, E-mail: liuxb@iga.ac.cn

The cultivated area of black earth and its annual grain production respectively account for 1/4 of the national total, while commodity grain accounts for 1/3 of the national total, which is of paramount importance to the national food security. Though this area has been relatively recently developed over a 100-year period since the large-scale agricultural reclamation, it went through highly intensive cultivation and rapid succession processes. The cropping changes and poor management choices, the regional sloping topography coupled with a continental climate have led to soil degradation and water runoff. These processes have caused excessive hillslope and gully erosion, which seriously threatens agricultural production and environmental quality in the region. To effectively conserve and utilize the black earth soils, the national government decreed the First National Black Earth Protection Legislation, and has implemented a series of soil and water conserving projects. However, from the scientific point of view, the key points and critical issues that urgently need to be resolved are not clear. Based on our research group’s the long-term scientific research and monitoring of black earth erosion and its impacts on soil quality and grain production, we propose that control of soil and water losses is the priority issue, and several urgent problems needing attention are identified.

Water runoff and soil erosion reduce topsoil depth, while decreasing soil fertility and degrading soil structure. From 1982–2002, the annual soil organic matter (SOM) content decline in the typical black earth belt was 0.5%, and was 1.35% in most severely affected areas. Approximate 50 mm rainfall flows out of farmland annually, which is equal to 10% of the average annual precipitation. These soil and water losses simply reduce soil and water resources available for crops aggravating crop water stress frequently observed during the growing season. The loss of each 1 cm topsoil or reduction of 1% SOM lowers the corn yield by 100 kg/ha. If topsoil layer disappears, grain production will be reduced by 30%. Ten million t of grain production is lost annually due to soil and water losses. In addition, over 600000 gullies have been identified in this region; 90% of these gullies is active gullies with 70% developed in farmland. Not only do gully processes result in lost soil, gully expansion encroaches on arable land at an annual gully expansion rate of 7.39 km^2. The estimated loss of farmland from gully erosion is around 333000 ha with an annual grain loss of at least 1.5 million t, while the soil loss by gully erosion accounts for 65% of the total soil loss in the region. Because most soil loss estimates do not include gully erosion, the soil erosion intensity normally reported and grain loss associated with soil and water loss is underestimated. Additionally, gully erosion interferes with operations of agricultural machinery increasing fuel input costs and reducing machinery operation efficiency.

Four priority problems are urgently needed to be resolved for the control of soil and water losses. The very first one is to contain sustain or improve of SOM contents. The second is to identify appropriate soil conservation practices and identify implementation bottlenecks. The third is to ecologically rehabilitate existing gullies. The last but not least, is to synergistically control erosion with improved soil fertility.

soil and water loss, control, black earth conservation, critical issue

doi: 10.1360/TB-2023-0215