

侵蚀条件下土壤有机碳流失研究进展

裴会敏¹, 许明祥^{1,2}, 李 强², 脱登峰¹

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中科院 水利部

水土保持研究所 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:全球土壤有机碳库储量丰富且活跃,而作为碳流失主要驱动力的土壤侵蚀对陆地碳循环影响巨大,揭示其影响将对气候变化背景下深刻理解碳收支过程和相关政策的制定具有重要意义。该文主要介绍了近年来国内外关于水蚀和风蚀影响土壤有机碳流失过程的研究进展,分析了侵蚀条件下土壤碳的源汇争议,简述了土壤有机碳流失的原位和异位环境效应,并提出了相关研究的主要现实问题和未来发展方向。在侵蚀进程中,土壤有机碳的固定与流失并存,流失部分主要包括在地表径流泥沙和土壤呼吸过程中,当前相关研究多集中于侵蚀有机碳的去向问题。在一定的景观范围内,定量刻画侵蚀过程中土壤碳输入输出关系是今后区域碳循环研究领域亟待解决的关键科学问题。

关键词:土壤侵蚀; 土壤有机碳; 碳流失; 碳收支

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0269-06

Advances in Soil Organic Carbon Losses under Erosion

PEI Hui-min¹, XU Ming-xiang^{1,2}, LI Qiang², TUO Deng-feng¹

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, 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: Soil carbon loss is a never-ending process, however, soil erosion, the most dominantly driving force, deeply influences carbon cycle in the terrestrial ecosystem, which will contribute to the understand of the carbon budget and make relative policy under global climate change. The recent advances of related researches about water erosion and wind erosion were reviewed, the mechanism of soil erosion process as well as a discussion of main problems of ‘source or sink’ existing in dynamic process of erosion were made, on-site and off-site environment effects were also summarized, and meanwhile, based on above analysis, the realistic questions and main research directions were brought forth for research in this field in the future. In the erosion process, carbon sequestration and loss existed simultaneously, carbon lost in the form of sediment transfer and soil respiration. Currently relative researches focused on the fate of eroded SOC. To reveal the relation of import and export of soil carbon and evaluate the influence of erosion on carbon loss and regional carbon cycles will be the urgent scientific issues in the future.

Key words: soil erosion; SOC; carbon loss; carbon budget

全球土壤有机碳库储量丰富(约为 1 550 亿 t)且活跃,它的生物地球化学循环被认为是调节生态系统功能的一个重要过程^[1],其微小改变会引起大气 CO₂ 浓度的很大变化^[2-3]。土壤有机碳(SOC)主要以粗有机质、细颗粒状有机质和与土壤矿物质的结合态存

在^[4]。当前人们常用表层土壤有机碳来表征土壤碳库的变化,其研究指标主要集中在总有机碳(TOC)、溶解性有机碳(DOC<0.45 μm)、颗粒有机碳(POC>0.45 μm)和土壤呼吸(Rs)等方面。土壤侵蚀是指表层土壤在外营力作用下发生破坏、剥蚀、迁

收稿日期:2012-03-07

修回日期:2012-06-26

资助项目:973 国家重点基础研究发展计划“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407207);中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-443);国家自然科学基金(40971174)

作者简介:裴会敏(1984—),男,山西运城人,在读硕士,主要研究方向:土壤侵蚀的环境效应。E-mail:huiminpei@163.com

通信作者:许明祥(1972—),男,陕西吴旗人,副研究员,主要研究方向:侵蚀环境土壤质量演变及土壤—植被互动效应研究。E-mail:xumx@nwsuaf.edu.cn

移/再分布以及沉积过程,是受多种因素影响的地质现象,其导致的碳流失量被广泛关注。究其原因可概括为:(1)它是全球头号生态环境问题,每年可带来数以亿计的经济损失;(2)它是陆地上唯一能使大量易矿化 SOC 迁移和再分布的驱动力,引起的碳排放是全世界都关心的政治问题;(3)气候变化将可能改变区域水文循环,以持续干旱和单次降雨强度增大为特征的极端事件增多^[5-6]将在一定程度上加剧土壤侵蚀。

近年来影响陆地土壤碳动态的研究多集中在区域气候条件、植被状况、土地利用类型等方面,而基于侵蚀对陆地土壤有机碳流失的影响研究相对薄弱,特别是在国内相关研究少见报道^[7]。在气候变化的背景下,侵蚀引起的土壤有机碳迁移和分布强烈影响碳循环过程^[8-9],日益成为全球及区域碳循环研究的一个热点问题。为此,本文综合分析国内外土壤侵蚀与土壤有机碳流失相关研究进展,并对 SOC 的输入输出关系进行较合理的梳理与评述。

1 侵蚀条件下土壤有机碳的流失过程

水蚀和风蚀作为土壤侵蚀的两种主要形式,因其外营力不同,导致侵蚀泥沙的迁移和堆积方式也不相同,所以侵蚀条件下土壤有机碳的流失进程是复杂多变的。本文着重分析近年来关于水蚀和风蚀引起表层 SOC“有形的”迁移和再分布及“无形的”碳矿化过程的主要成果。

1.1 侵蚀与土壤有机碳的迁移及分布

水蚀条件下坡面 SOC 的迁移及分布是一个非常复杂的物理化学过程,受气候、土壤性质、地形、土地利用状况等众多因素的影响。(1)它加速土壤淋溶作用,使许多溶解性有机碳伴随下渗的水分向深层迁移,纵向沉积一部分碳;(2)在降雨侵蚀力作用下,侵蚀区土壤中大团聚体($>0.25\text{ mm}$)将被溶解破坏^[10],土壤微团聚体($<0.25\text{ mm}$)开始增加^[11]。当径流冲刷力大于土壤内聚力和渗透力时,表面汇流产生,首先是地表植物残体和凋落物被搬运,随后将优先迁移细颗粒物质(黏粒和粉粒),导致大量溶解性有机碳、少量颗粒有机碳发生横向迁移, SOC 含量降低^[12]。(3)大部分流失的 SOC 随着泥沙搬运被带到沉积地区深埋而非氧化和流失到大洋中^[13-14]。当前对于沉积区有机碳的动态及去向存在着分歧:一些学者认为侵蚀降低了 SOC 的分解速率^[15],这将有助于碳在化学和矿物学之间的转换而使其稳定下来^[16-17],引起一个长期的碳储存;相反的观点^[18-19]是因雨滴和搬运的影响,在颗粒分离过程中,进入沉积区的侵蚀

SOC 将大量分解,视沉积区的氧化环境而定。(4)其余部分有机碳随径流被冲刷至水生态系统^[20],部分可能被快速矿化^[21-22]。Smith 等^[13]认为全球陆地泥沙的沉积过程每年将产生约 10 Pg ($1\text{ Pg}=10^{15}\text{ g}$) 的碳汇。在我国黄土丘陵区,土壤侵蚀造成了有机碳在泥沙中的富集,且富集比大于 1,泥沙中有机碳含量与侵蚀强度呈递减的对数关系^[23]。

风蚀主要发生在降雨量低于 300 mm 或具有稳定盛行风的干旱地区,它极大地促进了 SOC 的裸露和矿化。目前关于风蚀与碳流失的研究报道较少,但风蚀的发生面积较水蚀更广,其对 SOC 的损减和在景观内重新分配作用不容忽视^[24-25]。在风蚀过程中大的土壤颗粒通过跳跃演化减少 SOC,而细颗粒则主要通过矿化释放 CO_2 。在加拿大的一些区域,草地开垦后耕作的最初几年, SOC 的损失以矿化为主,而耕作时间超过 20 a 后,风蚀引起 SOC 损失远大于矿化损失^[26]。苏永中等^[27]在科尔沁沙地的研究发现:沙化草地开垦 3 a 后,由于加速的土壤风蚀使表土层细颗粒被吹蚀, $0\text{—}15\text{ cm}$ 耕层 SOC 含量下降了 38% 。赵哈林等^[28]研究表明,农田出现风蚀和积沙后,在 25 m 的空间间距上,风蚀区的 SOC 含量仅是积沙区 SOC 含量的 55% ,引起农田土壤性状及生产力出现高度的空间变异。延昊等^[29]基于我国 20 世纪 90 年代土壤属性和风蚀强度的历史数据得出:每年表层 SOC 因风蚀流失约为 0.075 Pg , SOC 的流失量随着风蚀强度的增加而显著增加。现在的一些研究通常在计算土体中 SOC 的损失时忽略了侵蚀和沉积作用产生的 SOC 在景观中的再分布,因而高估了侵蚀对土壤碳流失的影响。

1.2 侵蚀与土壤 CO_2 释放通量

水蚀条件下,由于 SOC 吸附在团聚体外部或被包裹在其内部,而雨滴通过快速润湿而剥离整个团聚体,使 SOC 暴露,这些过程提供有利的微生物活性条件,导致侵蚀泥沙中 SOC 快速矿化^[30],其矿化量决定于泥沙颗粒组成及固定周期^[31]。此后,侵蚀区因缺少植被覆盖而表土裸露,保水性降低,相比其他坡位,土壤碳通量在夏季时可能更高,而冬季表现得较低。在沉积区由于养分富集作用增加了 SOC 密度,其绝大多数与矿物质或微团聚体重新复合,通过深埋固定了一部分 SOC,并且随着沉积区阳离子交换量和含水量增加将弱化其矿化过程^[32-33]。Bajracharya 等^[18]通过对美国俄亥俄州中部多年农地侵蚀小区进行连续观测发现:在夏季严重侵蚀和中度侵蚀小区的 CO_2 浓度因温湿度不同显著高于微侵蚀和沉积区。Hemelryck 等^[34-35]在比利时的室内模拟试验表明,沉

积泥沙对土壤呼吸的影响程度决定于侵蚀等级及侵蚀发生地的土壤质量,沉积区出现一层厚厚的致密层覆盖表土,将降低深层 SOC 矿化;在农田试验中,随着侵蚀土壤底物的自我调节,5 个月的侵蚀与沉积效应对碳流失影响甚微,与无侵蚀区相比仅有 1.6% 的侵蚀有机碳通过土壤呼吸流失。

从全球碳平衡角度考虑,人们更关注风蚀迁移的 SOC 的矿化损失量。风蚀破坏陆地表层植被,使地表反照率增强,地表土温逐渐升高,湿度降低,这将加速有机碳的矿化速率。严重的风蚀还将含有无机碳酸盐岩的地层暴露到地表,在酸性环境下它们将更容易被氧化。另外当剧烈的侵蚀使次表土和土壤母质接近地面时,部分富含硅酸盐的土壤母质在水热环境下又将吸收 CO_2 ,加速风化为黏土。在沉积区,风蚀沉降物将覆盖表层富含有机质和碳酸盐岩的土层,使它们与空气相隔离,在短期内降低了这些土层被氧化的速率。但是,这些搬运过来的颗粒有机碳在重新结合成团聚体之前,自身又很容易被氧化或被微生物分解。限于追踪风蚀土壤颗粒矿化的技术难度,人们只能相对粗略地估算风蚀 SOC 的矿化速率。苏永中等^[27]在科尔沁沙地的研究表明:在风蚀引起草地沙化的最初阶段,表层土壤通透性增加,会加速 SOC 的矿化损失,但随着沙漠化程度的发展,土壤微生物赖以生存的土壤基质条件恶化,即使有外源碳的输入,其矿化作用也十分微弱。朱孟郡等^[36]估算在风蚀作用下,青海共和盆地沙沟河流域农田土壤碳每年损失约为 2.47 万 t,占 20 cm 深度内土壤碳库的 1.77%。风蚀作用成为沙沟河流域农田表层土壤碳损失不可忽视的动力之一。

未来大气 CO_2 浓度的变化在很大程度上取决于陆地生态系统的反馈,因此加强对典型流域土气界面 CO_2 交换过程的理解对国家和国际社会采取稳定大气 CO_2 浓度的行动至关重要^[37]。当前有关土壤侵蚀对陆地与大气之间碳的交换量的短期贡献存在以下两种观点^[38]:多数学者认为土壤侵蚀增加 CO_2 释放。侵蚀过程中土壤湿度显著增加,结构体破坏,使得受团聚体保护的碳处于氧化环境中而易被生物分解。而后径流流失使侵蚀区土壤变得更加干旱,降低土壤湿度的同时增加了土壤温度,最终使矿化率自然增长,这可能引起超过 20% 的 TOC 分解为 CO_2 释放^[19];另一种观点认为土壤侵蚀减少土壤 CO_2 释放。遭受侵蚀的土壤生物生成量下降,改变了底物供应机制,而且在沉积区土壤被深埋和重新团聚,土温明显滞后于气温,导致矿化速率降低^[39]。土壤侵蚀与土壤 CO_2 释放通量的增减关系可能视侵蚀区土壤类

型、表层植被净初级生产力、生物学进程和侵蚀等级等而定,明确这些因素的作用阈值是评价侵蚀对土壤碳流失影响的关键。

2 侵蚀条件下土壤碳的源汇关系

水蚀和风蚀因其作用方式不同,对土壤碳收支的影响也将存在较大差异。限于当前相关研究仅涉及水蚀影响,本文将仅对水蚀条件下土壤的碳收支研究展开重点评述。水蚀不仅造成富含有机碳的表层土壤迁移和沉积,而且在这个过程中土壤还将从地上部分的物质中吸收一部分碳^[40]。为此,只有对水蚀过程的 3 个阶段(颗粒分离、搬运和沉积)的碳平衡给出一个全面和详细的估算,并把土地利用类型和管理措施考虑在内^[41],才能从整体上正确理解侵蚀过程中土壤碳的“源汇”关系。关于侵蚀在碳平衡中的作用即它是否导致碳固定或土壤与大气之间碳交换的净释放,在土壤学界争论已久。近年来全球出现了两种截然相反的论点,一些学者认为它引起一个碳源,每年它导致土壤碳排向大气中的净释放量可达 0.37~1 Pg^[42-43],而其他一些学者发现它是一个每年可以产生 0.56~1 Pg 的碳汇^[44-46]。最近比利时学者 Van Oost 等^[39]通过用放射性同位素 ^{137}Cs 来追踪农业区域中土壤的运动,在全球尺度上整合研究了关于侵蚀同时导致的纵向碳流量和横向碳流量,结果表明:在土壤颗粒的分离和搬运过程中虽然增加了 SOC 的分解,但土壤可能从植物中吸收碳,使土壤从大气中固存的碳比它释放的碳多,每年在全球耕作农田土壤中侵蚀可引起一个 0.12 Pg 的碳汇。Berhe 等^[47]在 4 个不同坡位上通过对地表净初级生产力速率、侵蚀碳的置换量和有机质的沉积量的测定,得出由于在侵蚀区光合产物通过与侵蚀碳的部分置换,而沉积区因地表侵蚀泥沙的保护而降低了有机质的分解,最终土壤侵蚀在其研究地构成一个碳汇。在新西兰每年因土壤侵蚀而引起大量泥沙和颗粒有机碳流入海洋,Dymond^[48]通过侵蚀模型,假设输出到海洋中 80% 的碳被深埋固定,每年也给新西兰产生约 310 万 t 的碳汇。

总之,土壤侵蚀对碳源/汇的最终影响很大程度上取决于侵蚀和沉积过程中碳的吸收率和释放率的平衡。目前侵蚀所引起的碳的“源汇”分歧主要存在两方面信息的缺失:侵蚀过程中吸收植物体、凋落物中的碳,沉积区由泥沙搬运来的碳在不同时间尺度上的转换机制,所以未来应注重加强这两方面的研究。Schimel 等^[49]利用 20 世纪 90 年代数据,进行了全球碳平衡的计算,发现每年未知汇的量估计在 2~4

PgC,许多学者认为土壤和植物是可能的“汇”^[50],因此土壤可作为未来寻找“全球遗失碳汇”和减缓气候暖化的首要考虑碳库。

3 侵蚀条件下有机碳流失的环境效应

侵蚀条件下有机碳流失的发生、发展会影响本地和异地生态系统,表现出来的环境问题主要包括土地生产力降低和间接的非点源污染两个方面。土壤侵蚀的原位效应表现为富含有机碳的表土随地表径流流失,土层变薄^[51],使侵蚀区土壤的肥力^[52]和保水性下降^[53],植物可利用的土壤养分缺失,从而威胁到粮食安全和生态环境的长期可持续性发展^[54]。另外,遭受侵蚀的土壤将可能被搬运相当长的距离,产生有机碳流失的异位效应:(1)由于侵蚀土壤有机质减少,出现了 N、P 等无机肥的过量使用,伴随着泥沙和农田污染物进入水生态系统,不仅造成水体富营养化和堤坝淤积,而且人畜用水受到污染;(2)侵蚀土壤的保水性降低,可能造成大范围洪涝灾害和沙尘暴,给社会造成重大经济损失,并恶化生态环境;(3)因土壤侵蚀而流失的有机碳部分矿化,以 CO₂ 等温室气体的形式释放到大气中,加剧温室效应。在我国东北黑土区的典型侵蚀坡面上,近 40 a 来侵蚀沟从 1 682 条增加到 2 561 条,平均每年侵蚀耕地最高可达 5.23 hm²,开垦 20 a 的黑土土壤有机质相对含量下降 30%~40%^[55],而水土保持措施对土壤质量的提高有积极的影响^[56]。在南方红壤丘陵区近 30 a 来耕地面积减少 232 万 hm²,每年因水土流失带走氮、磷、钾的总量约为 128 万 t^[57]。水土流失最严重的黄土高原上水蚀是占主导地位的侵蚀方式,但人为加速侵蚀也居重要地位^[58],土壤有机质的缺失深刻影响植被恢复^[59],进一步加大土壤可蚀性,造成恶性循环。

4 问题和展望

侵蚀条件下土壤有机碳流失研究对理解陆地生态系统碳循环具有重要意义。虽然近 10 a 来各国科学家在这方面已取得了较大进展,但现阶段对其过程和控制机理的认识还不够统一,对陆地生态系统有机碳流失量的估算值仍存在较大的不确定性。其原因主要包括:(1)目前侵蚀条件下碳流失的监测大多是建立在斑块和坡面尺度上,缺乏在流域内对土壤侵蚀及随后的沉积过程中土壤碳收支的长期定位研究;(2)测定对象较单一。土壤有机碳与地表植被、大气是完整的统一体,碳在土壤—植物—大气系统中循环流动,为了充分摸清侵蚀碳的去向问题,应当从生态

系统的角度开展多目标综合观测;(3)观测方法、研究尺度以及侵蚀下垫面的差异,使得不同研究之间的可比性降低,难以形成共识性结论。

我国土壤具有侵蚀类型多样、侵蚀过程复杂、人类活动强度大等特点,针对侵蚀条件下土壤有机碳流失研究中存在的不足,未来应加强以下几方面的研究:(1)在多个水蚀风蚀区内不同植被覆盖结构和密度、土壤水文条件下土壤有机碳流失的比较研究及水蚀和风蚀物在运移途中有机碳氧化的速率估算;(2)规范并完善土壤、植被相关数据库,采用相似的方法和合理的尺度转换标准来系统评价 SOC 流失的规律,并进一步加强¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、⁷Be、¹³C 等同位素示踪法及“3S”技术在侵蚀与有机碳流失研究中的综合应用,提高各种侵蚀与碳循环模型的预测能力。(3)加强侵蚀对 SOC 淋溶和迁移的影响研究及与 POC 迁移、吸附和分解的关系研究。有观点认为溶解性有机碳可能是深层土壤固碳的一个重要来源^[60],已在森林生态系统中得到证实^[61];(4)为适应全球气候变化而需做出更加灵活的区域土地利用政策,评估不同土地经营模式下侵蚀对 SOC 流失的影响及环境效应也是未来研究的重点。

参考文献:

- [1] Santa R I, Tarazona T. Nutrient return to the soil through litterfall and throughfall under beech and pines stands of Sierra de la Demanda, Spain[J]. *Arid Land Research and Management*, 2000, 14(3): 239-252.
- [2] Amundson R. The carbon budget in soils[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29(1): 535-562.
- [3] Murty D, Kirschbaum M F, Mcmurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 105-123.
- [4] 潘根兴,曹建华,周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 325-334.
- [5] Meehl G A, Arblaster J M, Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18).
- [6] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [7] 方华军,杨学明,张晓平,等. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2):

- 59-63.
- [8] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [9] John N Quinton, Gerard Govers, Kristof Van Oost, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 311-314.
- [10] Chaplot V, Podwojewski P, Phachomphon K, et al. Soil erosion impact on soil organic carbon spatial variability on steep tropical slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3):769-779.
- [11] 赵世伟, 苏静, 吴金水, 等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3):114-117.
- [12] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion induced terrestrial carbon sink[J]. *BioScience*, 2007, 57(4):337-346.
- [13] Smith S V, Renwick W H, Buddemeier R W, et al. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States[J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 2001, 15(3):697-707.
- [14] Wang Z G, Gover G, Steegen A, et al. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area[J]. *Geomorphology*, 2010, 124(1/2):65-74.
- [15] Rosenbloom N A, Harden J W, Neff J C, et al. Geomorphic control of landscape carbon accumulation[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(G1):G01004.
- [16] 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 & Plant Nutrition*, 2010, 56(4): 521-529.
- [17] Liu S G, Bliss N, Sundquist E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 2003, 17(2):1074.
- [18] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Diurnal and seasonal CO₂-C Flux from soil as related to erosion phases in central Ohio[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1):286-293.
- [19] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29(4):437-450.
- [20] Cole J, Prairie Y T, Caraco N F, et al. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(1):172-185.
- [21] Raymond P A, Bauer J E. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean[J]. *Nature*, 2001, 409(6819):497-500.
- [22] Mayorga E, Aufdenkampe A K, Masiello C A, et al. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers[J]. *Nature*, 2005, 436(7050):538-541.
- [23] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4):88-90.
- [24] Li J, Okin G S, Alvarez L, et al. Quantitative effects of vegetation cover on wind erosion and soil nutrient loss in a desert grassland of southern New Mexico, USA[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3):317-332.
- [25] Li J, Okin G S, Alvarez L, et al. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(1):73-88.
- [26] Gregorich E G, Anderson D W. The effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in the Canadian prairies[J]. *Geoderma*, 1995, 36(3/4):343-354.
- [27] Su Y Z, Zhao H L, Li Y L, et al. Carbon mineralization potential in soils of different habitats in the semi-arid horqin sandy land: a laboratory experiment[J]. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18(1):39-50.
- [28] 赵哈林, 黄学文, 何宗颖. 科尔沁沙地农田土壤沙漠化演变的研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(3):242-248.
- [29] Yan H, Wang S Q, Wang C Y, et al. Losses of soil organic carbon under wind erosion in China[J]. *Global change biology*, 2005, 11(5):828-840.
- [30] Vanveen J A, Kuikman P J. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by microorganisms [J]. *Biogeochemistry*, 1990, 11(3):213-233.
- [31] Polyakov V O, Lal R. Soil organic matter and CO₂ emission as affected by water erosion on field runoff plots[J]. *Geoderma*, 2008, 143(6860):216-222.
- [32] Schimel D S, Coleman D C, Horton K A. Soil organic matter dynamics in paired rangeland and cropland toposequences in North Dakota[J]. *Geoderma*, 1985, 36(5):201-214.
- [33] De Gryze S, Bossuyt H, Six J, et al. Factors controlling aggregation in a minimum and a conventionally tilled undulating field[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(5):1017-1026.
- [34] Van Hemelryck H, Fiener P, Van Oost K, et al. The effect of soil redistribution on soil organic carbon: an experimental study[J]. *Biogeosciences Discuss*, 2010, 7(12): 3971-3986.

- [35] Van Hemelryck H, Govers G, Van Oost K, et al. The fate of SOC during the processes of water erosion and subsequent deposition: a field study[J]. *Proceeding of Geophysical Research*, 2009, 1(1):12247.
- [36] 朱孟郡, 严平, 宋阳等. 风蚀作用下农田土壤碳损失的估算[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1):226-228, 231.
- [37] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems: recent progress and challenges [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2):141-153.
- [38] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(2):77-87.
- [39] Van Oost K, Quine T A, Gover G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J]. *Science*, 2007, 318(5850):626-629.
- [40] Boix-Fayos C, Vente J, Albaladejo J, et al. Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2009, 133(1/2):75-85.
- [41] Billings S A, Buddemeier R W, Richter D, et al. A simple method for estimating the influence of eroding soil profiles on atmospheric CO₂ [J]. *Global Biogeochemical cycles*, 2010, 24(2).
- [42] Jacinthe P A, Lal R. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosional events [J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(4):329-339.
- [43] Lal R, Griffin M, Apt J, et al. Ecology: managing soil carbon[J]. *Science*, 2004, 304(5669):393-393.
- [44] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 1998, 12(2):231-257.
- [45] Harden J W, Sharpe J M, Parton W J, et al. Dynamic replacement and loss of soil carbon on eroding cropland [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 1999, 13(4):885-901.
- [46] Smith S V, Bullock S H, Hinojosa-Corona A, et al. Soil erosion and significance for carbon fluxes in a mountainous Mediterranean-climate watershed [J]. *Ecol.*, 2007, 17(5):1379-1387.
- [47] Berhe A A, Harden J W, Torn M S, et al. Linking soil organic matter dynamics and erosion-induced terrestrial carbon sequestration at different landform positions [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113(G4):G04039, doi:10.1029/2008JG000751.
- [48] Dymond J K. Soil erosion in New Zealand is a net sink of CO₂ [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(13):1763-1772.
- [49] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 2001, 414(6860):169-172.
- [50] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land and atmosphere based U. S. Carbon sink estimates [J]. *Science*, 2002, 292(5525):2316-2323.
- [51] 阎百兴, 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.
- [52] Ragan K, Nataragan A, Kumar K S, et al. Soil organic carbon-the most reliable indicator for monitoring land degradation by soil erosion[J]. *Current Science*, 2010, 99(6):823-827.
- [53] 张燕, 杨浩, 张洪, 等. 侵蚀对苏南丘陵区非耕作土壤质量的影响[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4):175-178.
- [54] Fornes W L, Whiting P J, Wilson C G, et al. Caesium-137-derived erosion rates in an agricultural setting: the effects of model assumptions and management practices[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(9):1181-1189.
- [55] 闫业超, 张树文, 岳书平. 近 40 年黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2):109-115.
- [56] 张玉斌, 曹宁, 闫飞, 等. 黑土侵蚀区水土保持措施对土壤质量的影响[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3):27-29.
- [57] 梁音, 张斌, 潘贤章. 南方红壤丘陵区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):22-27.
- [58] 唐克丽. 黄土高原的水土流失与土壤退化的研究[J]. *水土保持通报*, 1987, 7(6):12-17.
- [59] Guerrero-Campo J, Palacio S, Montserrat-Marti G. Plant traits enabling survival in Mediterranean badlands in northeastern Spain suffering from soil erosion [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(4):457-464.
- [60] Jimenez J J, Lal R. Mechanisms of C Sequestration in Soils of Latin America[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, 25(4):337-365.
- [61] Karsten K, Klaus K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1):52-60.