

土壤有机碳动态:风蚀效应

苏永中, 赵文智

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域综合研究站, 兰州 730000)

摘要:土壤风蚀是引起土壤退化最广泛的形式和原因之一。土壤风蚀对土壤碳动态的影响机制一方面是土壤风蚀引起土壤退化使土壤生产力下降,输入土壤的碳数量减少;另一方面是富含有机碳的细粒物质直接移出系统。风蚀土壤碳的去向包括:(1)就近沉积,(2)沉积于水渠和河流,输入水体;(3)以粉尘形式运移,在远离风蚀区的地域沉积;(4)氧化释放至大气。风蚀引起土壤碳的迁移和沉积不仅导致土壤有机碳在地域间的再分布,使土壤性状的空间异质性增加,也显著改变了土壤系统中碳矿化的生物学过程。土壤有机碳的保持可以促进团聚体的形成,使土壤物理稳定性增加,减缓风蚀。对易风蚀土地进行退耕还林还草、实行保护性耕作等措施可以有效增加土壤碳的固存。

关键词:风蚀;土壤有机碳;损失;动态;固碳对策

文章编号:1000-0933(2005)08-2049-06 **中图分类号:**S153.6 **文献标识码:**A

Soil organic carbon dynamics: wind erosion effect

SU Yong-Zhong, ZHAO Wen-Zhi (*Lize Inland River Basin Comprehensive Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 260 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2049~2054.

Abstract: Soil erosion by wind, transport, and deposition occur over more than one third of the land surface of the earth and it is the most widespread form of soil degradation. Land area globally affected by wind erosion is 549 million ha, of which 296 Mha is severely affected. In China, the desertified land area induced by wind erosion and deposition has 36 9000 ha. Whereas the adverse effects of wind erosion on soil productivity and environment are widely recognized, soil organic carbon dynamics in wind erosion process, wind erosion-induced carbon fate and attendant emission of CO₂ into the atmosphere remain misunderstood. Soil erosion is an important process controlling soil carbon levels and distribution patterns in some arid and semiarid regions. Therefore, a sound understanding of soil carbon dynamics in wind erosion process is critical for quantifying component of the global carbon budget and identifying the contribution of carbon loss from the desertified land to atmosphere CO₂. This article reviews the current studies on the dynamics of soil organic carbon in relation to wind erosion.

Soil erosion by wind depletes soil organic carbon (SOC) pool. First, wind erosion selectively removes the fine particles in the surface soil, leaving behind coarse sand. Secondly, it causes soil degradation, which in turn reduces soil productivity and the amount of C returning to the soil in plant residues. In addition, the physical processes of wind erosion and deposition drastically alter the biological process of C mineralization in soil landscape, and mineralization results in a net loss of C from the soil system to the atmosphere. Wind erosion and deposition redistribute considerable amounts of SOC, resulting in significant increase of spatial heterogeneity in SOC distribution at various scales, which indicates the extent of land desertification in some arid and semiarid regions. It is difficult to accurate estimate the fate of the eroded C in wind erosion process. There are four possibilities: (1) deposition onto nearby soil; (2) deposition in water bodies; (3) deposition in areas far from the erosion sites; (4) oxidation and release to the atmosphere. The redistribution of soil C in wind erosion process must be considered to assess

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40471083);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新资助项目(2004110)

收稿日期:2004-03-16; **修订日期:**2004-11-12

作者简介:苏永中(1966~),甘肃古浪人,博士,研究员,主要从事干旱区恢复生态学和土壤学研究. E-mail: suchengyang@yahoo.com.cn

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 40471083) and The knowledge Innovation Program from Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science (No. 2004110)

Received date: 2004-03-16; **Accepted date:** 2004-11-12

Biography: SU Yong-Zhong, Ph. D., Professor, mainly engaged in restoration ecology and soil science. E-mail: suchengyang@yahoo.com.cn

the eroded C on the contribution of atmosphere CO₂. SOC facilitates the formation of soil aggregates, increase soil physical stability and improves soil structure, which in turn decrease the risk of wind erosion. Rational soil and crop management can significantly increase soil C sequestration. Thus the use of management practices that prevent or reduce soil erosion by wind such as returning desertified cropland to forest or grassland, conservative tillage and residues cover may reduce the risk of C loss and sequester C in soil.

Key words: wind erosion; soil organic carbon; loss; dynamics; wind erosion control; carbon sequestration

土壤风蚀是指松散的土壤物质被风吹起、搬运和堆积的过程以及地表物质受到风吹起的颗粒的磨蚀等,是风成过程的全部结果^[1]。土壤风蚀、风蚀物的运移和沉积发生在超过 1/3 的地球陆地表面^[2],是引起土壤退化最广泛的形式和原因之一^[3]。据估计,全球受风蚀影响的土地面积有 549Mhm²,其中 296 Mhm² 的面积遭受严重的土壤风蚀^[3]。土壤风蚀对环境的负面影响已有大量的研究报道,如风蚀引起土壤结构的退化和养分的衰减、生物量的衰退和农作物产量的下降^[4],风蚀引起的粉尘运移影响大气的组成和气候变化以及人类健康^[5],风蚀物的沉积影响水体的质量等^[5]。近十几年来,对陆地碳循环研究的深入,对土壤风蚀引起的碳损失、碳的沉积在景观中的再分布、土壤碳损失和迁移对大气 CO₂ 的汇源效应、以及侵蚀对全球碳平衡的影响方面也受到了一定的关注^[3,6]。在一些干旱半干旱生态脆弱的地区,土壤风蚀被认为是影响土壤碳水平和碳分配格局的一个重要过程^[6],因此对易风蚀土地进行退耕还林还草或实行保护性耕作以减缓风蚀、增加土壤碳吸存的固碳农业已被一些西方国家作为区域环境管理的导向,并已付诸于实施^[7]。但由于风蚀过程及其影响因素的复杂性,目前国内外有关风蚀与土壤碳动态的研究仍然十分薄弱^[3]。中国是土地沙漠化发展严重的国家之一,因风力侵蚀与堆积形成荒漠化的土地有 36.90 万 hm²^[4]。一些学者认为中国因森林破坏、水土流失已造成持续的、严重的碳汇损失^[8~10]。因此,了解土壤风蚀沙化过程中土壤有机碳的动态对正确认识土地沙漠化对全球碳平衡的影响和大气 CO₂ 的响应有重要的意义;对土壤损失机理的研究也是阐明沙漠化过程中土地退化机理、进而提出缓解土壤风蚀沙化增加土壤碳固存对策的一项基础性工作。

鉴此,本文对土壤风蚀引起的土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)损失及其机理,风蚀过程中 SOC 的去向及其在地域间的再分布,以及 SOC 保持对减缓风蚀的效应和固碳对策等方面的研究作一概述,以期对以后的研究提供一些借鉴。

1 风蚀过程中土壤有机碳的损失

土壤有机碳含量及其动态主要取决于土壤中有有机质输入与降解之间的平衡,对此已成共识^[11]。尽管认为土壤风蚀及风蚀物的运移和沉积是土壤有机碳在地域和景观中的再分布,但这种物理的过程显著改变了土壤系统中碳矿化的生物学过程,碳的矿化造成碳从土壤系统向大气的净释放^[6]。研究认为,在干旱半干旱易发生风蚀的区域,由于不合理土地利用和土壤管理等引起的加速土壤风蚀是 SOC 损失的主导因素^[12]。如加拿大草原土壤 50% 的 SOC 损失归因于土壤侵蚀(风蚀和水蚀)^[13];在一些区域,草地开垦后耕作的最初几年中,SOC 的损失以矿化为主,而耕作时间超过 20 年后,风蚀引起 SOC 的损失超过矿化的损失^[13]。早在 1938 年,Slater 和 Carleton 在美国 Missouri 的研究就表明:风蚀引起 SOC 的衰减是氧化损失的 18 倍^[14];Su 等人在科尔沁沙地的研究,沙化草地开垦 3a 后,由于加速的土壤风蚀使表土层细颗粒被吹蚀,0~15cm 耕层 SOC 含量下降了 38%^[15]。李克让研究指出:近年来,中国土壤碳库成为一个小小的碳源,其主要的原因之一是中国北方草地开垦、过度放牧、草场退化,风蚀沙化严重,导致 SOC 的释放^[16]。

研究表明,风蚀过程中从系统损失的主要是 SOC 的活性组分(Active Organic carbon)和与土壤细粒组分结合的有机碳组分。活性的有机碳组分主要分布在土壤表层由未分解和半分解与土壤矿质结合不紧的植物残体组成,具有相对小的密度(土粒密度<1.8 g cm⁻³组分的有机碳),因而易受风蚀而损失^[3]。土壤活性有机质组分是土壤微有机体的生境和生存基质,因此,风蚀引起 SOC 的损失会显著降低土壤生物学活性。土壤生物学活性的降低,以及风蚀造成土壤细颗粒物质的吹蚀使土壤结构改变、持水性能降低等会显著改变碳矿化的生物学过程。Su 等人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,由于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^[17]。

2 风蚀造成土壤有机碳损失的机理

风蚀沙化对 SOC 的影响首先是表层土壤细颗粒物质(粘粉粒和极细沙组分)被选择性地移出系统,土壤向粗粒化演变^[17,18],而土壤细颗粒组分中含有较高的稳定的 SOC^[18~21]。早期的研究表明,风蚀物质中 SOC 的含量是其表层土壤 SOC 的 1.3~5.0 倍^[22];在科尔沁沙地的研究表明,与粘粉粒结合的 SOC 含量分别是与中粗沙和极细沙结合的 SOC 含量的 6.7 倍和 4.1 倍,且随着沙漠化程度的增加,与沙粒结合的颗粒有机碳(POC)含量随之下降^[19]。土地沙化过程中细颗粒组分结合的稳定有机碳的下降,又会进一步加速 SOC 库的衰竭^[3]。由于风蚀影响土壤反射率进而改变了土壤湿度和温度条件,会增加残余 SOC 的就地矿化速率^[3];同时风蚀沙化降低了土壤持水性能、根系深度以及植物的水分和养分利用效率,土壤生产力下降,相应地归

还土壤的有机物质降低,POC 形成量减少^[3, 6-19];另外严重的风蚀导致表土层的移出,富含碳酸钙的亚表层裸露,碳的氧化会增加 CO₂ 向大气的释放^[3]。

3 风蚀土壤有机碳的去向

土壤风蚀并不是 SOC 的彻底损失,而是 SOC 的迁移过程,为非源非汇过程^[6, 23, 24]。风蚀过程中土壤碳的去向由一系列复杂的相互作用的过程所决定。作为一个动态的过程,很难对风蚀后 SOC 的最终去向作出准确的评价和估算。一般而言,风蚀过程中从源区损失的 SOC 一方面随土壤颗粒而迁移沉积,造成 SOC 在景观中的再分配;另一方面,部分 SOC 在迁移过程中和沉积后因矿化而损失。因此,在一个风蚀事件中损失的 SOC,其去向包括:(1)蠕移和跃移过程中的就近沉积,其尺度可以在几米至几十米的范围;(2)沉积于路边水渠和河流,进入水体;(3)以粉尘形式被运移至较远的系统;(4)氧化释放至大气。风蚀物质运移的距离主要取决于土壤颗粒质量与风能,粗颗粒通过蠕移和跃移从一个地块移出而就近沉积,而土壤中细颗粒物质(主要是粉粒、极细沙和粘粒)通过悬移方式远距离迁移;óskarsson 等人研究认为风蚀物中的矿质组分就近沉积而有机组分被运移至更远的地方^[24];在 Niger 西南部的研究表明,在距地表 2 m 高度收集的风蚀物质中,SOC 的含量是风蚀地表层土壤的 32 倍^[25];风蚀物质的垂直分布表现为细颗粒组分及有机碳和养分含量随高度而增加^[26]。这些研究的结果表明,含有更多有机 C 的风蚀细颗粒被运移至远离源区的区域沉积。从全球碳平衡角度考虑,人们更关注于风蚀迁移的 SOC 有多少通过矿化损失^[3],因为 SOC 库贮量的净变化反映土壤中碳增加和排放的强弱,风蚀过程中土壤碳的迁移只是改变了 SOC 库的贮量,和大气碳联系的只是其矿化的部分。SOC 的矿化速率取决于风蚀物中腐殖物质的含量,风蚀过程中迁移的 SOC 为部分密度较小的轻组有机碳和由 POC 组成的不稳定的有机碳组分,这部分有机碳组分在沉积后易矿化而损失,但目前对风蚀物迁移过程和沉积后碳的矿化损失比例尚未有定论^[3]。这就提出了一个如何估算风蚀碳损失对全球碳平衡或对大气 CO₂ 影响的科学问题。而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,因而过高地估计了侵蚀土壤碳损失对大气 CO₂ 的贡献。

4 风蚀引起土壤有机碳在地域间的异质性分布

风蚀造成 SOC 的迁移,由于沉积效应而在地域间重新分配,导致 SOC 在不同尺度上的异质性分布。在植物个体尺度上,干旱半干旱地区普遍存在的灌丛“肥岛”现象,就是 SOC 异质性分布的一个典型例证。研究表明,灌丛下 SOC 含量是灌丛间地的 1.3~1.8 倍,灌丛对 SOC 的富集效应因灌木种类、形态及灌丛形成的时间有关^[27, 28]。尽管许多研究认为灌丛下 SOC 及养分的富集是植物、土壤和生物之间复杂的相互作用的结果^[29],但灌丛下和灌丛间地由于遭受不同的风蚀、灌丛对周围风蚀物质的截获无疑对“肥岛”的形成起着重要的作用^[28-31]。在田间尺度上,由于受风向等自然因素的影响或采取不同的耕作等土壤管理措施,在同一田块中出现风蚀和积沙,造成 SOC 有规律或斑块状的异质性分布。赵哈林等人在科尔沁沙地的研究表明,农田出现风蚀和积沙后,在 25m 的空间间距上,风蚀区的 SOC 含量仅是积沙区 SOC 含量的 55%,农田土壤性状及生产力出现高度的空间变异^[32];苏永中等人以 10m 的取样间距对不同放牧强度的沙化草地土壤性状异质性的研究表明,由于重度放牧造成植被的斑块状分布和风蚀裸斑的出现,导致 SOC 在较小的空间尺度上发生较大的变异,在研究的尺度上 SOC 的空间自相关距离为 22.5m,显著小于适度放牧草地;这种土壤性状的高度异质性分布又影响着草地植被演替和恢复的方向和进程^[33]。Sterk 等人在西非 Sahel 的研究认为,富含养分的表土风蚀物在田间的再分布导致御谷(*Pennisetum glaucum*)的生长和产量在较小的空间距离(5~20 m)有较大的变异^[34]。因此,SOC 等土壤性状空间异质性的变化被认为是干旱、半干旱地区土地退化和荒漠化的一个重要指标^[35],其变异性的变化可以表征土地风蚀沙化的程度^[36]。在景观尺度上,由于不同的地貌背景,以及不同地貌单元可蚀性因子如土壤性状、地表粗糙度、地形、植被、土壤结皮和土地管理的差异等,风蚀物的运移和沉积存在高度的变异性^[37],风蚀物通量的变异导致不同景观 SOC 含量异质性的增加。

5 土壤有机碳保持对减缓风蚀的效应

在某种程度上,土壤风蚀的发生与 SOC 水平之间存在着互馈效应。SOC 的水平不仅是土壤肥力状况的反映,也影响土壤结构、根系深度、土层特性、水分保持能力、土壤生物多样性等相互作用的一系列土壤物理、化学和生物学特性和过程^[38]。在生态脆弱的沙质土壤环境中,土壤有机质对养分的保蓄和释供,以及土壤团聚体的形成和结构稳定性方面起着重要的作用^[27],因而也决定着土壤受风蚀风险的程度。早期的研究已表明,SOC 含量与土壤团聚体分布与稳定性有显著的线性相关,耕层土壤干团聚体有利于控制风蚀,>0.84mm 的团聚体为不可蚀性颗粒^[39],如果土壤表层干团聚体的数量保持在 60%~75%,可以有效地控制裸露未保护农田的土壤风蚀^[40]。Preri 提出的土壤物理稳定性指数(S_t) (S_t% = SOM, % / (Clay + Silt), %)很好地阐释了 SOC 含水量与土壤结构保持、土壤发生风蚀风险的关系^[41],随着 SOC 含量下降,土壤分散性颗粒增加,水稳性团聚体降低,土壤抗蚀能力下降;Lal 也认为,SOC 含量下降到某一水平时,土壤结构分散,物理稳定性丧失,风蚀敏感性增加,其阈限水平决定于土壤质地^[12]。在中国北方干旱半干旱地区,沙质土壤基质和极低的 SOC 含量导致土壤物理稳定性差是土地沙漠化发展的内因^[19]。李长生对中美农业生态系统碳循环的对比研究认为,中国目前日益恶化的土地沙化及沙尘暴即是大区域 SOC 减少的一

个必然结果^[9]。因此,在干旱、半干旱地区农田土壤管理中,一方面要采取改善农田环境(如防护林建设)、实行保护性耕作以降低土壤风蚀的措施;另一方面要加大有机肥的投入和秸秆还田以提高 SOC 含量,提倡“固碳农业”,增加土壤结持能力,提高土壤物理稳定性,是防治农田沙漠化演变的有效对策。

6 风蚀控制对增加土壤碳固存的效应

在干旱半干旱生态脆弱区实施控制土壤风蚀的措施,如土地利用方式的转变、撂荒进行自然恢复、植树种草、恢复和保护多年生植被、农田防护林建设、实行保护性耕作和合理的土壤管理措施等,可以显著增加土壤碳的固存。对风蚀严重、不适宜长期持续性农作的退化土地退耕还林还草后,对土壤碳的固存效应已有大量报道,如美国和加拿大实施的保护储存项目(Conservation Reserve Program, CRP),退化土地种植多年生牧草后, SOC 增加 $0.05 \sim 0.30 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[42];中国近几年来大面积实施的垦耕还林还草应该有显著的碳吸存效应,但相关的研究尚不多见。Su 等人的研究表明,在流动沙地种植多年生灌木后,土壤有机碳随种植年限的增加而增加,28a 后灌丛下 0~5cm 表层 SOC 含量较种植前增加 20.5 倍^[31]。在农田土壤管理措施中,保护性耕作和覆盖是减缓风蚀增加土壤碳固存的有效方式。免耕和覆盖管理会有有效的减缓土壤中 C、N 的矿化率和有机质分解速率,土壤汇集碳增加,损失到大气中的 CO₂ 减少。West 和 Post 分析了全球 67 个免耕和传统耕作处理对比试验结果表明,传统耕作向免耕的转变, SOC 的固存量为 $57 \pm 14 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,实行免耕后的 5~10 a,碳的固存量达到最大,15~20a 达到一个新的平衡^[43]。加拿大从 20 世纪 90 年代开始采用免耕和覆盖管理已使农业土壤由 CO₂ 的源转变为汇^[44]。

7 结语

土壤风蚀是土壤退化最广泛的形式和原因之一,因而也是影响土壤碳储量和碳分配格局的最主要因素之一。土壤风蚀及风蚀物的运移和沉积导致土壤有机碳的迁移和在地域或景观中的再分布,但这种物理的过程会显著改变土壤系统中碳矿化的生物学过程,碳的矿化造成土壤有机碳向大气的净释放。土壤风蚀引起土壤退化使土壤生产力下降,相应地归还土壤的有机物质降低,POC 形成量减少;与细颗粒结合的有机碳直接被吹蚀而移出系统是风蚀过程中有机碳损失的主要机制。风蚀造成土壤有机碳的迁移使其空间分布的异质性增加,是土地荒漠化的生物学反馈机制之一。目前对风蚀土壤有机碳的去向仍处于定性分析,定量的研究仅限于较小的时空尺度的观测,对这方面问题的深入研究和正确认识是准确估算风蚀对全球碳平衡影响的基础。土壤有机碳的保持有利于形成稳定的团聚体,增加土壤物理稳定性,减缓风蚀。对易风蚀土地进行退耕还林还草、实行保护性耕作等措施可以有效增加土壤碳的固存。目前国内对风蚀土地碳动态的研究严重不足,对因土地沙漠化引起的碳损失及其损失碳对大气 CO₂ 释放贡献的一些估算存在极大的不确定性。因此,应加强对风蚀沙化土地碳动态和过程、碳的损失机理、碳过程与土地荒漠化的生物学反馈机制、沙化土地碳固存潜力以及增加土壤碳固存对策等方面的研究,为中国陆地生态系统碳循环研究提供资料的积累,为土地沙漠化防治的技术途径选择提供决策参考依据。

References:

- [1] Zhu C Y, Ding G D, Yang M Y. *Blowing Sand Physics*. Beijing: China Forestry Press, 1992.
- [2] Chen W, Fryrear D W. Grain-size distributions of wind-eroded material above a flat bare soil. *Physical Geography*, 1996, **17**: 554~584.
- [3] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, **29**: 437~450.
- [4] Research Group of “Study on Combating Desertification/Land Degradation in China”. *Study on Combating Desertification/Land Degradation in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.
- [5] Nordstrom K F, Hotta S. Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. *Geoderma*, 2004.
- [6] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, *et al.* Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil & Tillage Research*, 1998, **47**: 291~302.
- [7] Lal R, Follett R F, Kimble J, *et al.* Management U. S. cropland to sequester carbon in soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, **54**(1): 374~381.
- [8] Duan Z H, Xiao H L, Don Z B, *et al.* Estimate of total CO₂ output from desertified sandy land in China. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 5915~5921.
- [9] Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese Agriculture: a comparison of agroecosystem carbon pool in China and the U. S. . *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(4): 346~349.
- [10] Lindert P H, Lu J, Wu W. Trends in the soil chemistry of South China since the 1930s. *Soil Science*, 1996, **161**(6): 329~342.
- [11] Yang J C, Han X G, Huang J H, *et al.* The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practice. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(4): 788~796.
- [12] Lal R. Carbon sequestration in drylands. *Annals of Arid Zone*, 2000, **39**(1): 1~10.
- [13] Gregorich E G, Anderson D W. The effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in the Canadian prairies. *Geoderma*,

- 1995, **36**: 343~354.
- [14] Slater C S, Carleton E A. The effect of erosion on losses of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1938, **3**: 123~128.
- [15] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, *et al.* Soil properties following cultivation and non-grazing of a semi-arid sandy grassland in northern China. *Soil & Tillage Research*, 2004, **75**: 27~36.
- [16] Li K R. *Land Use Change, Greenhouse Emission and Carbon Cycle in Terrestrial Ecosystem*. Beijing, Weather Press, 2000.
- [17] Su Y Z, Zhao H L, Li Y L, *et al.* Carbon mineralization potential in soils of different habitats in the semiarid Horqin sandy land: a laboratory experiment. *Arid Land Research and Management*, 2004, **18**: 39~50.
- [18] Lobe I, Amelung W, Du Preez C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soil of the South Africa Highveld. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**: 93~101.
- [19] Su Y Z, Zhao H L. Losses of Soil Organic Carbon and Nitrogen and Their Mechanisms in the Desertification Process of Sandy Farmlands in Horqin Sandy Land. *Agricultural Science in China*, 2003, **2**: 890~897.
- [20] Rosell R A, Galantini J A, Suñer L G. Long-term crop rotation effect on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in Haplustoll soil fractions. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, **14**: 309~315.
- [21] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The effects of land use change on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(4): 19~29.
- [22] Pimental D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1998, **1**: 416~426.
- [23] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The assessment of the impact of land use change on the ecosystem carbon sink. *Engineering Science in China*, 2003, **5**(9): 65~77.
- [24] óskarsson H, Arnalds ó, Gudmundsson J, *et al.* Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion. *Catena*, 2004, **56**: 225~238.
- [25] Sterk G, Herrmann L, Bation A. Wind blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation Development*, 1996, **7**: 325~335.
- [26] Hasi. Preliminary study on physical and chemical characteristics of wind-blown sediment in Bashang region of Hebei Province. *Bulletin of Soil and Water Conversation*, 1997, **17**(1): 1~6.
- [27] Wezel A, Rajot J, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semiarid Niger. *Journal of Arid Environments*, **44**: 383~398.
- [28] Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H. Influencing mechanisms of several shrubs on soil chemical properties in semiarid Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(7): 802~806.
- [29] Whitford W G, Anderson J, Rice P M. Stemflow contribution to the "fertile island" effect in creosotebush, *Lawwea tridentada*. *Journal of Arid Environments*, 1997, **35**: 451~457.
- [30] Virginia R A, Jarrell W M. Soil properties in a mesquite-dominated Sonoran desert ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, **15**: 65~67.
- [31] Su Y Z, Zhao H L. Characteristics of plant community and soil properties in the plantation chronosequence of *Caragana micriphylla* in Horqin Sandy Land, north China. *Ecological Engineering*, 2003, **20**: 223~235.
- [32] Zhao H L, Huang X W, He Z Y. Study on desertification of farmland soil in Korqin region, Inner Mongolia. *Acta Pedological Sinica*, 1996, **33**(3): 242~248.
- [33] Su Y Z, Zhao H L, Li Y L. Spatial pattern of soil chemical properties in a degraded sandy grassland under post-grazing restoration in the semiarid Horqin steppe. *Acta Pedological Sinica*, 2004, **41**(3): 41~46.
- [34] Sterk G, Stein A, Stroosnijder L. Wind effects on spatial variability in pearl millet yields in the Sahel. *Soil & Tillage Research*, 2004, **76**: 25~37.
- [35] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, **77**(2): 364~374.
- [36] Su Y Z, Zhao H L, Cui J Y. Characteristics in soil properties and spatial variability in the desertification process of farmland. *Acta Pedological Sinica*, 2004, **41**(2): 28~35.
- [37] Visser S M, Sterk G, Snepvangers J J J C. Spatial variation in wind-blown sediment transport in geomorphic units in northern Burkina Faso using geostatistical mapping. *Gerderma*, 2003.
- [38] Lal R. Soil quality and sustainability. In: Lal R. *et al.*, eds. *Methods for Assessment of soil Degradation*. CRC Press, 1997. 17~30.
- [39] Chepil W S. Relation of wind-erosion to the water stable and dry clod structure of soil. *Soil Science*, 1943, **55**: 275~287.
- [40] Fryear D W. Soil ridges-clods and wind erosion. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1984, **18**: 445~448.

[41] Pieri C J M G. *Fertility of Soils: A Future of Farming in the West African Savannah*. Berlin;Springer Verlag, 1992. 348.

[42] Burke I C, Lauenroth W K, Coffin D P. Recovery of soil organic matter and N mineralization in semiarid grasslands: implications for the Conservation Reserve Program. *Ecological Application*, 1995, **5**: 793~801.

[43] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a globe data analysis. *Soil Sci. Sco. Am. J.* , 2002,1930~1946.

[44] Smith W N, Dejadins R L, Pattey E. The net flux of carbon from agricultural soils in Canada 1970~2010. *Global Change Biology*, 2000, **6**(5): 557~568.

参考文献:

[1] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学. 北京: 中国林业出版社,1992.

[4] 中国荒漠化(土地退化)防治研究课题组. 中国荒漠化(土地退化)防治. 北京: 中国环境科学出版社,1998.

[9] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究. 第四纪研究, 2000, **20**(4): 345~350.

[11] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应. 生态学报, 2003, **23**(4): 788~796.

[16] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社, 2000.

[21] 吴建国, 张小金, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响. 林业科学, 2002, **38**(4): 19~29.

[23] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价. 中国工程科学, 2003, **5**(9): 65~77.

[26] 哈斯. 河北坝上地区土壤风蚀物理化性质初步研究. 水土保持通报, 1997, **17**(1): 1~6.

[28] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 802~806.

[32] 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. 土壤学报, 1996, **33**(3): 242~248.

[33] 苏永中, 赵哈林, 李玉霖. 放牧干扰自然恢复的退化沙质草地土壤性状的空间分布. 土壤学报, 2004, **41**(3): 41~46.

[36] 苏永中, 赵哈林, 崔建垣. 农田沙漠化演变中土壤性状特征及其空间变异性分析. 土壤学报, 2004, **41**(2): 28~35.