

风蚀作用下的土壤碳库变化及在 中国的初步估算

胡云锋, 王绍强, 杨风亭

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 土壤有机碳库储量巨大且在表层富集, 而风力侵蚀具有巨大的卷挟起沙、搬移运输和空间再分配能力, 对土壤有机碳库的演变具有重要影响。在风力侵蚀作用下, 风蚀发生地、风蚀土壤运输途中以及风蚀土壤沉降地的土壤有机碳库有着不同的变化过程。基于质量平衡原理, 可以建立土壤有机碳流失及各路径碳输移量估算的模型。依据第二次全国遥感侵蚀调查以及第二次全国土壤普查数据, 在 GIS 支持下, 分析了中国土壤有机碳库以及风力侵蚀的空间格局, 并计算得到风力侵蚀作用下中国土壤有机碳库储量变化以及各路径碳输移量。研究表明, 我国因风力侵蚀造成的土壤有机碳流失量约为 $59.76 \times 10^6 \text{ t C/yr}$, 风蚀所致 CO_2 排放约为 $29.88 \times 10^6 \text{ t C/yr}$; 风蚀所致的土壤有机碳流失主要发生在中国西北部的干旱半干旱的农区和牧区。

关键词: 风力侵蚀; 土壤有机碳; 质量平衡; 估算模型; 中国

中图分类号: P512.2⁺1; P595 文章编号: 1000-0585(2004)06-0760-09

风力侵蚀是一种历史悠久而又普遍常见的地质过程。以《风沙与荒漠沙丘物理学》^[1]的发表为标志, 风蚀研究进入了现代科学研究阶段, 研究人员对风蚀作用的“源—运—降”过程进行了深入研究, 研究内容主要集中在风蚀作用本身的时空特征、物理机制以及风蚀作用所造成的生态环境与社会经济后效研究上^[1~9]。

另一方面, 在 CO_2 、 CH_4 以及 N_2O 等温室气体浓度不断升高、全球气候变化越来越为世界各国政府和公众所关注的背景下, 陆地生态系统碳循环研究成为正确回答全球碳循环“遗漏汇”疑问、探索土地管理以减少碳排放, 及公平实施国际碳贸易等重大科学与国家利益问题的关键。在陆地生态系统碳循环研究中, 基于生态系统及其过程的研究得到较多重视且成果丰富, 而基于自然物理过程(如土地覆被变化、土壤侵蚀、岩石风化等)的研究目前却相对薄弱^[10~15]。

IPCC 指出: 土壤侵蚀对土壤碳库有重要影响, 并进而影响到陆地生态系统碳库以及全球碳循环; 但目前的研究还不清楚土壤侵蚀对土壤碳库影响的净效应^[16]。已有的相关研究多集中在水力侵蚀对土壤碳库的影响上, 对于风力侵蚀所引起的土壤碳库变化及其动态过程的研究还没有深入开展^[17,18]。

收稿日期: 2004-01-10; 修订日期: 2004-05-20

基金项目: 国家 973 项目“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”(2002CB412500)、中国科学院知识创新重大方向性项目“中国资源环境数据库建设”(KZCX-2-308)、中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程“中国陆地生态系统土壤碳蓄积估算”(CXIOG-E01-02-02)。

作者简介: 胡云锋(1974-), 男, 江西赣州人, 博士研究生。主要从事地理信息技术、全球变化与陆地碳循环研究。E-mail: huyf@lreis.ac.cn

1 风力侵蚀对土壤碳库的影响

1.1 土壤碳库及其剖面分布

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库，全球大约有 1550Pg C (1Pg=10¹⁵ g) 以有机质形式存在于土壤中，另外还有 750Pg C 以无机物形式存在土壤中^[19]。由于土壤无机碳的更新周期为千年尺度，远长于土壤有机碳库 30 年的平均更新周期，因此土壤有机碳库 (SOC) 在短时间尺度的全球变化研究中更为重要^[20]。以全球而论，土壤有机碳蓄积量约是陆地植被碳库或大气碳库总和的 2~3 倍^[21]；中国土壤有机碳储量大约为 90~100Pg^[22]，方精云等的计算更是达到了 185Pg^[23]，它们是中国陆地森林碳储量（约 4.1~4.6Pg^[24]）的 20~40 倍。巨大的储量导致了土壤碳库的任何微小波动都比陆地生态系统其它碳库更容易影响陆地生态系统碳循环以及大气 CO₂ 浓度，并最终影响到全球气候变化。

土壤有机碳库在剖面分布上表现为富集在地表 0~20cm 地层。根据中国第二次土壤普查汇总资料显示（如表 1 所示），0~20cm 为有机碳的富积层，在该层以上累积的有机碳量占 1m 以内全部土壤有机碳的 40% 左右，对世界其它地区不同年龄土壤的调查也反映了同样的规律^[25]。土壤有机碳表层富集分布的特点使得土壤表层的微小变化将引起整个土壤碳库的重大变化。而风蚀过程与其他过程（如水力侵蚀过程）相比，恰恰就具有以面状方式剥蚀、运移表层土壤的巨大能力。

表 1. 中国土壤有机碳的垂直分布

Tab. 1 Vertical distribution of soil organic carbon in China

深度 (cm)	平均碳密度 (kg/m ²)	碳储量 (×10 ⁹ t)	占 1m 深总碳量的比重 (%)
0~10	2.05±0.37	18.51±3.35	22.44
0~20	3.74±0.66	33.74±5.93	40.91
0~30	4.93±0.87	44.48±7.80	53.93
0~50	6.80±1.26	61.30±11.39	74.32
0~100	9.15±2.16	82.48±19.46	100

1.2 风力侵蚀的规模与程度

在风蚀研究中，对风蚀过程的规模和程度进行定量估算一直是科学家的研究重点。为此，人们展开了基于现场观测、经验数学模型以及计算机数值过程模拟等多方面的研究^[26]。总的来说，目前小尺度的、基于现场观测的风蚀定量研究结果较为可靠；但对于大尺度、大区域研究，由于缺乏有效的监测统计技术、或者是技术和标准上的不统一、或者是缺乏实测资料的验证，目前所有的研究基本上都是定性研究或是较粗略的估算。

在全球尺度上，ISRIC（国际土壤咨询与信息中心）认为全球大约有 5.49×10⁸ ha 的土地遭受着风力侵蚀，其中 2.96×10⁸ ha 的土地为严重风力侵蚀^[27]。在中国，ISRIC 于 1993 年进行了“南亚与东南亚地区土壤退化状况评估 (ASSOD)”研究^[28]；国家水利部也进行了多次全国范围的土壤侵蚀遥感调查。其中，于上个世纪 90 年代进行的第二次土壤侵蚀遥感调查表明，我国土壤风力侵蚀面积大约为 1.9×10⁸ ha（从轻度侵蚀到剧烈侵蚀）（见表 2）^[29]。

表 2 中国土壤风蚀状况 (单位: 10^6 ha)
Tab. 2 Wind erosion in China (Unit: 10^6 ha)

微弱	轻度	中度	强度	极强	剧烈	合计	数据来源
1.8	75.1	14.5	58.15		0.05	149.55	ASSOD [28]
	78.82	25.12	24.80	27.01	34.92	190.67	第二次土壤侵蚀遥感调查[29]

1.3 风力侵蚀过程中土壤碳库的变化

一次土壤风蚀过程包含了土壤起沙、空间输移和沉降沉积 (即空间再分配) 三个阶段。在每个阶段, 土壤碳的变化都要受到温度、湿度、土壤成分、质地、结构、有机碳形态及其活性、微地形地貌、地表植被以及风场动力等众多因素的影响。

在风力侵蚀发生地, 风力侵蚀将使土壤碳库储量下降。造成土壤碳库储量下降的主要过程有: 首先, 风蚀将表层富含有机质的土壤吹走, 直接造成当地土壤有机碳库储量的减小; 其次, 风蚀将破坏地表植被, 使地表反照率增强, 进而促使表层土壤温度升高, 湿度降低, 这将加速表层裸露的土壤有机碳的氧化速率; 第三, 风力侵蚀导致土壤结构的破坏和肥力减弱, 地表植物对水分和肥分的利用效率降低, 土地生产力下降, 这进一步削弱植物的有机物残余对土壤的回馈。此外, 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, 这些碳酸盐岩将更容易被氧化并向大气释放 CO_2 。

在风蚀物输运途中, 原先较为密实的土壤团体被风的剪切力所切碎、或被内部的压缩气体所挤破、或被其他土壤颗粒撞击破碎, 从而将那些原先为土壤团体所保持的有机碳释放出来, 形成所谓的颗粒有机碳 (POC), 而颗粒有机碳在输运途中非常容易被氧化。对于土壤有机碳在输移途中的氧化率估计, 目前的研究结果差异很大, 氧化率值从 0% 到 100% 不等。Smith 等认为输运途中的氧化率非常小, 几乎可以忽略不计^[30], 而 Schlesinger 则认为输运的有机碳几乎被全部氧化^[31]。Lal 认为大约有 20% 被氧化^[32], Beyrer 等则认为在侵蚀物的输运和沉积过程中大约有 70% 的 POC 被氧化^[33]。氧化率变化范围如此之大, 主要是受到土壤性质 (如组分、结构、密实度)、有机碳性质 (如易氧化成分、中性成分、惰性成分的比例) 以及输运环境 (温度、湿度等) 的影响; 在某些极端情况下, 出现 0% 或者 100% 的氧化率也是有可能的, 就一般来说, 20%~70% 氧化率较为合理。

在风蚀物沉降地, 风蚀物在陆地沉积之后的变化相对比较复杂和难以预料, 但在短期内, 风力侵蚀物的沉降将导致土壤有机碳的增加。影响陆地沉积区土壤有机碳库储量的主要过程有: 第一, 风蚀带来富含有机质的土壤, 这将直接增加沉积区土壤碳库储量; 第二, 风蚀沉积物的沉降将覆盖表层富含有机质和碳酸盐岩的土层, 并将它们与空气相隔离, 从而降低了这些土层被氧化的速率。但是, 风力所搬运过来的土壤有机碳, 也即是颗粒有机碳, 在重新结合成团聚体之前, 自身很容易被空气氧化或被微生物分解。第三, 由于严重的沙尘沉降会掩盖植被, 土地沙化, 造成植被减产, 从而减少回馈到土壤中的有机物质。

1.4 基于质量平衡的土壤碳库变化估算模型

为了评价和估算风力侵蚀作用下土壤有机碳库的变化, 可以将各地域 (或过程中) 的土壤有机碳库看作是一个系统, 从而基于质量平衡原理, 根据系统与外界的物质输入与输出, 建立起用于估算土壤有机碳库储量变化的模型方程。

在风力侵蚀发生地，根据系统的输入输出质量平衡，可以建立以下公式（公式 1）：

$$C_0 + C_r = C_f + C_m + C_l + C_w + C_a \quad (1)$$

其中， C_0 为初始时土壤碳库， C_r 为地表凋落植被的腐殖质输入， C_f 为终了时土壤碳库， C_m 为土壤有机碳矿化损失（含自然氧化与微生物分解）， C_l 为 SOC 的渗透损失， C_w 为风力侵蚀所致碳流失， C_a 为水力侵蚀导致的碳流失。

经过移项变形后即得公式（2），该公式即可用于计算风力侵蚀所致的土壤碳库损失。

$$C_w = (C_0 - C_f) + C_r - (C_m + C_l) - C_a \quad (2)$$

在干旱少雨地区，土壤侵蚀主要表现为风力侵蚀，水力侵蚀非常微弱， C_a 非常小，可以忽略不计，公式（2）可以简化为公式（3）：

$$C_w = (C_0 - C_f) + C_r - (C_m + C_l) \quad (3)$$

由于侵蚀而造成的 SOC 碳库损失是正常情况下 SOC 矿化、渗透损失的好几倍，大约有 50~70% 的 SOC 损失是由侵蚀引起的^[34,35]。因此，在干旱少雨地区，在忽略矿化和渗透作用，也即在忽略 $(C_m + C_l)$ 的情况下，公式（3）继续简化为公式（4）。此时，可以运用净第一性生产力模型，如迈阿密模型、CENTURY 模型以及 BGC 模型等，来计算地表植被腐殖质的输入 C_r ：

$$C_w = (C_0 - C_f) + C_r \quad (4)$$

对于（3）式，在未扰动土地上，植被对土壤碳库的补充与碳库本身的呼吸、渗透损失存在动态平衡，即 $(C_m + C_l - C_r)$ 为 0^[36]，由此，公式（3）可以继续简化得到公式（5）：

$$C_w = (C_0 - C_f) \quad (5)$$

对于风力侵蚀物在输运途中的变化，可以建立质量平衡方程（公式 6）来描述风蚀土壤在输运途中各方向上的输运通量：

$$C_w = (S_a + S_d) + (E_l + E_a + E_d) \quad (6)$$

其中， C_w 为风力侵蚀所致碳流失， S_a 为风蚀物沉降后保存于水体中的碳， S_d 为风蚀物沉降后保存于陆地表层堆积物中的碳， E_l 为在陆地以及大气中输运途中矿化的碳， E_a 为水体中矿化的碳， E_d 为存于陆地沉积物中矿化的碳。

对于风力侵蚀土壤在降落沉积地点的变化过程，基本上可以参照公式（1）建立其模型，并作相应的简化估算。

显然，从系统论和质量平衡出发，可以建立较为准确的风力侵蚀所致土壤有机碳库变化的估算模型；并且，从公式（2）到公式（5），模型得到逐步简化，对数据的要求也逐渐降低。而公式（6）则可以用来平衡计算风蚀土壤在输运途中各方向上的输运通量。在目前阶段，基于公式（5）的研究很常见，基于公式（4）也已经有研究人员进行了初步的尝试^[37]。但是目前暂时还没有基于精确的公式（1）和公式（6）的实例研究。

2 中国风力侵蚀作用所致的土壤碳流失估算

2.1 数据与方法

2.1.1 数据来源 本次研究使用的关键数据有土壤风力侵蚀数据以及土壤有机质数据，中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据中心提供了数据支持。

风力侵蚀数据源于第二次全国土壤侵蚀遥感调查成果。该调查以 1995/1996 年 TM 影像为遥感信息源，结合地形图、土地利用图、野外调查及其治理现状、泥沙径流资料等

多源信息, 采用人机交互方式解译, 最终得到数字化的土壤侵蚀专题地图。土壤侵蚀的类型和强度分级遵照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190~96)^[38]。

土壤有机质数据源于第二次全国土壤普查成果。这次普查自 1979 年始, 80 年代末期结束, 最终成果为《1: 100 万中华人民共和国土壤图》和五卷本的《中国土种志》。通过构建数字化的全国土壤类型图以及土壤剖面属性数据库, 在 Arc/Info 环境下, 通过空间连接技术, 得到全国 0~20cm 土层 SOM 和 SOC 含量数据。

风力侵蚀数据以及土地有机质数据的原始存储格式为 Arc/Info 的 Coverage 文件, 研究中均转换为 Arc/Info 的 GRID 文件, cell 大小为 1km×1km。所有数据均采用 Albers 等积圆锥投影, 中央经线是 105°E, 双标准纬线分别是 25°N 和 47°N。

2.1.2 计算方法 通过叠加两个 GRID 数据层, 并通过地图代数方法, 通过公式 (7) 可以计算得到中国风力侵蚀所致的土壤有机碳流失。

$$W = \sum_{i=1}^n (M \cdot S_i \cdot SOM \cdot 0.58/1000) \quad (7)$$

式中, W 即是风蚀所致的土壤有机碳流失量 (t C/yr), M 是土壤风力侵蚀模数 (t/km²·yr) (见表 3), S_i 是栅格面积, 在本项研究中, 栅格大小为 1km×1km, SOM 是土壤有机质含量 (g/kg), 0.58 是将土壤有机质量换算成有机碳量的 Bemmelen 系数, 1000 是单位换算系数。

表 3 风力侵蚀模数^[39]

Tab. 3 Standard of wind erosion modes

侵蚀模数	微弱	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
年侵蚀厚度 (mm/a)	<2	2~10	10~25	25~50	50~100	>100
年侵蚀模数 (t/km ² ·a)	<200	200~2500	2500~5000	5000~8000	8000~15000	>15000

土壤有机碳在各路径上的通量比例值是通过风洞试验以及野外定量观测得到的。根据拜格诺^[1]、Chepil^[40]、吴正^[41]等人的研究结果, 蠕移质占总沙量的比例在 16%~31% 之间, 一般在 24% 左右, 该部分的有机碳只能在地表作短时间、短距离的移动, 一般保存于风蚀源地附近的负地形处; 跃移质的变化范围为 69~81%, 平均为 75%, 该部分有机质可以在地面上空跳跃式移动, 由于具有一定的高度, 因此部分跃移质仍然保存在负地形处, 其他跃移质则将形成风沙入河, 进一步为各种水体所搬运或在其中沉积; 对于悬浮质, 其含量不到 5%, 当风速大于 6m/s 时, 该值甚至不到 1%。由于搬运高度和搬运距离都比较大, 悬移质有机碳将被搬运到远洋和其他陆地地区并沉积。

对于在风蚀路径中的氧化率, Lal、Beyer 等人得到的 20%~70% 氧化率范围较为合理且被接受。在大尺度、大区域、综合环境研究中, 我们以 50% 作为平均氧化率来计算输运途中被氧化、释放到大气中的有机碳量, 同时以 20%~70% 的氧化率作为不同情景下的二氧化碳释放上下限。

2.2 中国 0~20cm 土壤有机碳库及风力侵蚀的空间格局

0~20cm 土壤有机碳含量 (参看图版 2, 图 1) 在我国东北以及西藏东部、四川西部以及青海、甘肃南部较高, 这些地方富含有机碳的主要土壤类型包括漂灰土、沼泽土、暗棕壤、灰色森林土、草甸土等。土壤碳含量较高的地域主要分布在以上地域的周边地区以及我国南方大部分地区, 这是由于该区地面植被较好, 植物对土壤有机碳的补充较为充分

所造成的。在我国北方的传统农区以及农牧交错带上，包括黄淮海平原，黄土高原、内蒙古中部以及西藏西北部，土壤有机碳含量相对较低。我国西部地区，包括新疆大部、内蒙古中西部、青海以及西藏部分地区，土壤有机碳含量最低，在这些地区，分布有我国主要的沙漠和荒漠。

在风力侵蚀方面，由于良好的植被可以有效地降低风速、湿润的土壤可以提高临界风速，因此，我国南方大部地区以及东北的林区基本上不存在风力侵蚀，风力侵蚀主要分布在我国西北部干旱、半干旱地区（参看图版 2，图 2）。这些地区年降雨量一般小于 400mm，土壤疏松干燥、多为细颗粒，地表缺乏植被覆盖、地形上为开阔平坦的原野，风场强劲有力且频繁，此外还存在不合理的农业耕作以及过度放牧等农耕活动。在新疆南部的塔克拉玛干沙漠以及内蒙古西部的巴丹吉林沙漠风蚀等级最高，为剧烈侵蚀；围绕这两个沙漠的周边地区多为强度和极强度侵蚀。我国西部的其他地区则大部分为轻度、中度和微弱侵蚀。

2.3 结果

计算表明，我国由于风力侵蚀造成的土壤有机碳流失大约为 $59.76 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ 。其中，包括蠕移质有机碳大约为 $14.34 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ ，跃移质有机碳大约为 $44.82 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ ，悬移质 $0.60 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ 。其空间分布如图 3 所示。以 50% 的风蚀有机碳被氧化计算，风力侵蚀所致 CO_2 排放为 $29.88 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ ；如果考虑到氧化率的变动范围，以 20~70% 计算，则风力侵蚀所致 CO_2 排放为 $11.95 \sim 41.83 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ 。中国土壤风力侵蚀所造成的土壤量以及土壤碳质损失及其流向流量详细如表 4。

表 4 中国土壤风力侵蚀所造成的土壤与碳质损失

Tab. 4 Loss of soil and soil carbon induced by wind erosion in China

	总侵蚀量	蠕移量	跃移量	悬移量	CO_2 释放量
比例 (%)	100	24 (16~31)	75 (69~81)	1 (0.5~5)	50 (20~70)
碳 (10^6 t C/yr)	59.76	14.34 (9.56~18.52)	44.82 (41.23~48.40)	0.60 (0.30~3.0)	29.88 (11.95~41.83)

注：括弧内为变化范围

对风力侵蚀所致的土壤有机碳流失（参看图版 2，图 3）的分析表明，风力侵蚀所致的土壤有机碳流失主要分布在我国西北部地区，但大部分地区都在 $10 \text{ t C/km}^2 \cdot \text{yr}$ 以下。最严重的土壤有机碳流失 ($200 \text{ t C/km}^2 \cdot \text{yr}$) 分布在内蒙古的中西部以及青海的中南部地区。这两处的风力侵蚀等级并不是最强，土壤有机碳含量也不是最高，但是风力侵蚀对土壤有机碳的综合影响效果最大。在塔克拉玛干沙漠以及巴丹吉林沙漠，尽管风力侵蚀强度很高，但是由于土壤有机碳含量较低，现代风蚀过程中的土壤有机碳流失并不严重。然而，在这些沙漠的周边地区，主要是农区、或牧区、或农牧交错区，由于存在含有机质较高的土壤，因此，风力侵蚀所致的有机质损失一般都比沙漠中心地区要高，为 $80 \sim 200 \text{ t/km}^2 \cdot \text{yr}$ 。

3 结论

根据上述研究，可以得到以下结论：

1、土壤有机碳库储量巨大且在表层(0~20cm)富集,而风力侵蚀又具有巨大的卷挟起沙、搬移输运和空间再分配能力,因此,风力侵蚀作用可以引起大规模的土壤有机碳的空间重分布和CO₂释放,对土壤有机碳库的演变具有重要影响。因此,研究风蚀过程引起的碳的空间重分布过程以及风蚀过程中物相转化规律就显得非常重要。

2、中国0~20cm土壤因风蚀造成的有机碳流失为 59.76×10^6 t C/yr,其中蠕移质碳大约为 14.34×10^6 t C/yr,跃移质碳为 44.82×10^6 t C/yr,悬移质碳为 0.60×10^6 t C/yr;风力侵蚀所致CO₂排放为 29.88×10^6 t C/yr。如果考虑到氧化率的变动范围,以20~70%风蚀物氧化率计算,则风力侵蚀所致CO₂排放为 $11.95 \sim 41.83 \times 10^6$ t C/yr。

研究中存在的不确定性主要是:第一,将土壤侵蚀调查国家标准所确定的定性的土壤侵蚀模数数据转化为定量数据,其有效性依赖于全国土壤侵蚀调查中技术规范制定的严谨性以及实施中技术尺度的统一性;第二,风蚀物的流向比例关系是通过小尺度野外观测和风洞试验得到的,它在大尺度、大规模的风蚀研究中是否有效?第三,对于风蚀物在运移途中有机碳的氧化速率的估算,目前不同学者的研究结果差异很大。

综合以上问题,我们认为今后的研究重点是:

1、基于遥感信息、GIS技术以及气候数据,构建大尺度风蚀评估模型(如使用IWEAMS模型系统),准确估算、并校验土壤风力侵蚀的程度、规模、空间分布以及风蚀总量。

2、对风蚀过程进一步开展野外观测以及网络监测研究,准确测量风蚀物的组成、风蚀物中有机碳的性质以及有机碳的氧化速率,以准确评价风蚀过程所释放的各路径上的C通量和所释放的CO₂量。

参考文献:

- [1] 拜格诺 R A. 风沙与荒漠沙丘物理学. 钱宁译. 北京:科学出版社,1958.
- [2] Saxton K E. Wind erosion and its impact on off-site air-quality in the columbine plateau:an intergraded research plan. Transactions of the ASAE, 1995, **38** (4): 1031~1038.
- [3] Larney F J, Bullock M S, Janzen HH. Wind erosion effects on nutrient redistribution and soil productivity. J Soil & Water Conservation, 1998, **53**(2): 133~140.
- [4] Dong Z B, Wang X M, Liu L Y. Wind erosion in arid and semiarid China: an overview. J Soil & Water Conservation, 2000, **55**(4): 439~444.
- [5] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. 地理学报,2000,**55**(5):513~521.
- [6] 张国平,张增祥,刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析. 地理学报,2001,**56**(2):146~158.
- [7] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学-D,2002,**32**(12): 1031~1040.
- [8] 刘纪远,张增祥,庄大方,等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. 地理研究,2003,**22** (1):1~12.
- [9] 胡云锋,刘纪远,庄大方,等. 土地利用动态与风力侵蚀动态对比研究——以内蒙古自治区为例. 地理科学进展,2003,**22**(6):541~550.
- [10] Goto N, Yanagisawa Y. Assessment of CO₂ reduction by technological usage of terrestrial ecosystems-reforestation and biomass energy. Energy Conversion and Management, 1996, **37**(6~8): 1199~1204.
- [11] 王绍强,周成虎,夏洁. USGCRP 碳循环研究的最新动向. 地球科学进展,2000,**15**(5): 592~597.
- [12] Guenther A. The contribution of reactive carbon emissions from vegetation to the carbon balance of terrestrial ecosystems. Chemosphere, 2002, **49**(8): 837~844.
- [13] Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget; non-

linearity begets surprises. *Ecological Modeling*, 2002, **153**(1~2): 131~142.

- [14] 王绍强, 刘纪远. 土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状. *地球科学进展*, 2002, **17**(04): 528~534.
- [15] 刘纪远, 于贵瑞, 王绍强, 等. 陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探. *地理研究*, 2003, **22**(4): 397~405.
- [16] IPCC. Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories; reference manual. Vol. 3, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996.
- [17] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environ. Int.*, 2003, **29**(4): 437~450.
- [18] Starr G C, Lal R, Malone R. Modeling soil carbon transported by water erosion processes. *Land Degradation & Development*, 2000, **11**(1): 83~91.
- [19] Batjes N H. The total C and N in soils of the world. *European J Soil Society*, 1996, **47**: 151~63.
- [20] Lal R. World soils and greenhouse effect. *IGBP Global Change News Letter*, 1999, **37**: 4~5.
- [21] Schimel D, House J, Hibbard K. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, **414**: 169~172.
- [22] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, **18**(4): 349~356.
- [23] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109~128.
- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, **16**(5): 497~508.
- [25] Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, 1997, **389**: 170.
- [26] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方. 土壤风力侵蚀研究现状与进展. *地理科学进展*, 2003, **22**(3): 288~295.
- [27] Oldeman L R. The global extent of soil degradation. In: Greenland D J, Szabolcs I, eds. *Soil resilience and sustainable land use*. Wallingford: CAB International, 1994. 99~118.
- [28] Van Lynden GWJ, Oldeman L R. The assessment of the status of human-induced soil degradation in south and south-east Asia. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1997.
- [29] 许峰, 郭索彦, 张增祥. 20 世纪末中国土壤侵蚀的空间分布特征. *地理学报*, 2003, **58**(1): 139~146.
- [30] Smith S V, Renwick W H, Buddemeier R W. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biogeochem Cycles*, 2001, **15**: 697~707.
- [31] Schlesinger W H. Soil respiration and changes in soil carbon stocks. In: Woodwell G M, Mackenzie G M. *Biotic feedbacks in the global climatic system: will the warming feed the warming?* New York: Oxford Univ. Press, 1995. 159~227.
- [32] Lal R. Global soil erosion by water and carbon dynamics. In: *Soil and Global Change*. Lal R, Kimble J M, Levine E, *et al.* (eds.). CRC/Lewis; Boca Ration, FL, 1995. 131~142.
- [33] Beyer L, Frund R, Schleuss U, *et al.* Colluviosols under cultivation in Schleswig-Holstein; 2. carbon distribution and soil organic matter composition. *J. Plant Nutrition & Soil Sci.*, 1993, **156**: 213~217.
- [34] de Jong E, Kachanoski R G. The importance of erosion in the carbon balance of prairie soils. *Can. J Soil Sci.*, 1988, **68**: 111~120.
- [35] Anderson D W, de Jong E, Verity G E, *et al.* The effects of cultivation on the organic matter of soils of the Canadian prairies. *Trans XIII Cong. Int. Soc Soil Sci. Hamburg*, vol. 7. Hamburg: International Society of Soil Science, 1986. 1344~1349.
- [36] Jacinthe P A, Lal R. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosion events. *Land Degradation & Development*, 2001, **12**: 329~339.
- [37] 延昊. 中国土地覆被变化与环境影响研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所博士论文, 2002. 118~123.
- [38] 水利部水土保持监测中心. 全国土壤侵蚀遥感调查工作报告. 2001 年 4 月. <http://www.swcc.org.cn/>.
- [39] 中华人民共和国行业标准 SL 190—96: 土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [40] Chepil W S. Dynamics of wind erosion-3: the transport capacity of wind. *Soil Sci*, 1945, **60**: 475~480.
- [41] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学. 北京: 科学出版社, 2003.

The influence of wind erosion on soil organic carbon pool and an assessment in China

HU Yun-feng, WANG Shao-qiang, YANG Feng-ting

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Due to the tremendous soil organic carbon pool and the high carbon content on surface soil, even a trivial disturbance in surface soil can easily induce great changes of the whole soil organic carbon pool. On the other hand, as a universal geological process on earth, wind erosion has strong capacities to entrap, transport and redistribute the surface soil. Naturally, wind erosion then has important influences on the evolution of soil organic carbon pool. In eroded area, surface soil is eroded and the soil organic carbon pool decreases; in transportation process, soil organic carbon is further transformed and carbon dioxide (CO_2) is emitted; in deposition area, the changes of soil organic carbon pool are more complicated and the carbon pool increases at least in a short term. The redistribution of soil organic carbon over landscape and the emission of CO_2 react on the terrestrial ecosystem and finally affect the carbon budget. Such processes can be modeled by a series of equations based on the mass balance principle. Using the Arc/Info GRID data derived from the 2nd Chinese national remote sensing based soil erosion investigation and the 2nd Chinese national soil investigation, the spatial patterns of the top 20cm soil organic carbon content and wind erosion intensity are described in detail firstly. Soil organic loss and corresponding carbon flux are then estimated supported by GIS techniques. The total soil organic carbon loss induced by wind erosion is about $59.76 \times 10^6 \text{ t C/yr}$, including creeping materials of $14.34 \times 10^6 \text{ t C/yr}$, saltating materials of $44.82 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ and suspending materials of $0.60 \times 10^6 \text{ t C/yr}$. The emitted carbon dioxide (CO_2) is about $29.88 \times 10^6 \text{ t C/yr}$, ranging from $11.95 \times 10^6 \text{ t C/yr}$ to $41.83 \times 10^6 \text{ t C/yr}$. The affected areas mainly lie in the Northwest China. The uncertainties in our research depend on the estimation of the eroded soil mass, the ratio of different erosion fluxes and the oxidizing ratio of SOC during transportation.

Key words: wind erosion; soil organic carbon; mass balance; assessment model; China

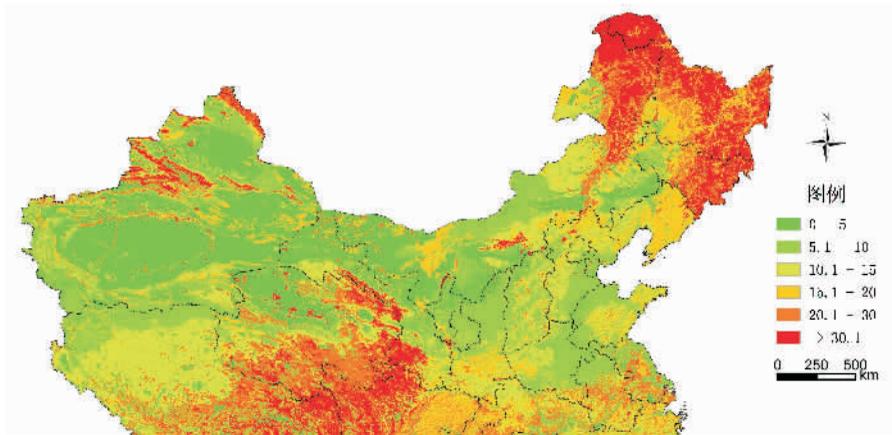


图 1 中国北方土壤有机碳(0-20cm)含量的空间分布(单位:g/kg)

Fig. 1 Spatial distribution of SOC content in 0-20cm layer in northern China (g/kg)

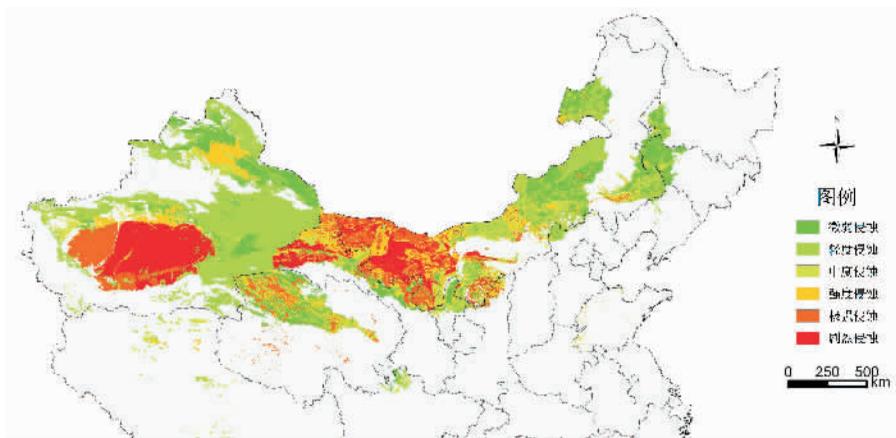


图 2 中国北方风力侵蚀强度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of wind erosion intensity in northern China

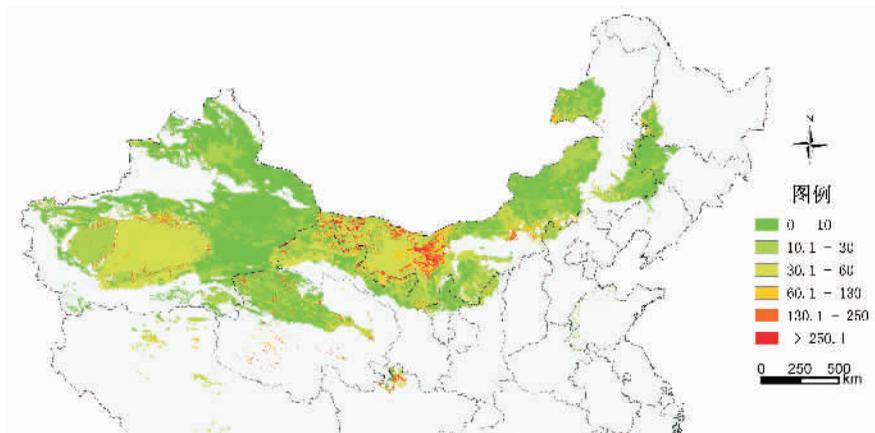


图 3 中国北方风力侵蚀所致的土壤有机碳流失分布(单位:t/km²)

Fig. 3 Spatial distribution of SOC loss induced by wind erosion in northern China (t/km²)