

# 利用燃煤飞灰作为时间标记物评价坡耕地黑土 侵蚀物质和有机碳的再分配\*

方华军 杨学明 张晓平 梁爱珍

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

**摘要** 燃煤飞灰(以下简称飞灰)作为时间标记物克服了放射性同位素 $^{137}\text{Cs}$ 示踪方法不能鉴定大气核爆炸之前的土壤再分布过程这一缺陷。本文利用土体中的飞灰研究坡耕地黑土有机碳的时空再分布特征。尝试建立飞灰在土壤中分层的方法,根据飞灰和土壤有机碳(SOC)随土壤深度的分布特征鉴定土壤堆积厚度,以及堆积土壤的相对年代。结果表明:用飞灰示踪技术鉴定的埋藏土壤表层与SOC含量随深度变化确定的埋藏表层吻合较好,景观中低洼部位在飞灰出现前就有一定的土壤堆积。各地貌部位坡肩侵蚀最为严重,有机碳含量最低;坡顶坡度较小,侵蚀微弱;坡脚和坡足发生沉积。土壤沉积速率在 $1.01\sim 5.56\text{ mm a}^{-1}$ 之间。研究结果还表明堆积部位埋藏层的SOC含量较高,说明有相当数量的有机碳被隐遁在目前的耕作层之下。因此,在评价农田土壤作为大气 $\text{CO}_2$ “源”或“汇”时应该考虑景观中土壤物质迁移和埋藏作用的影响。

**关键词** 燃煤飞灰;土壤再分布;土壤有机碳;黑土;东北

中图分类号 S151

文献标识码 A

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)含量的增减与大气 $\text{CO}_2$ 水平直接相关,进而以温室效应的形式影响全球气候。土壤侵蚀作为一个自然过程一方面促进SOC迁移和矿化,同时迁移的部分SOC在低洼的景观部位发生堆积,因埋藏而隐遁(Sequestration)一定数量的有机碳。长期以来土壤侵蚀被认为是一个无益的过程。即土壤侵蚀使大量的营养元素和有机质流失,如果侵蚀超过一定的阈值,将导致土壤生产力下降。但是从缓解温室效应角度来看,最近的研究表明轻微的土壤侵蚀有利于提高低洼景观部位土壤的碳隐遁能力<sup>[1,2]</sup>。因此这种现象可减缓土壤对大气 $\text{CO}_2$ 浓度升高的贡献。但是,有关土壤再分布过程与景观中SOC关系的研究相对较少,土壤再分布引起的土壤碳隐遁也没有得到充分的认识<sup>[3,4]</sup>。

研究景观中土壤物质再分布的方法很多,核素示踪技术在该领域得到了充分的应用,尤以 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术研究较为深入<sup>[5,6]</sup>。但是, $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术在研究土壤侵蚀过程时存在许多不确定性<sup>[6,7]</sup>。VardenBygaard<sup>[4]</sup>利用 $^{137}\text{Cs}$ 研究了加拿大温带农田土壤再分布,鉴定沉积区埋藏层的埋藏时间。但 $^{137}\text{Cs}$ 是

大气热核爆炸的产物<sup>[8]</sup>,因此只能用来研究热核爆炸以后(1950s末1960s初)土壤物质的再分布,并不能用来研究大气热核爆炸之前发生的土壤再分布。利用飞灰和磁性矿物作为时间标记物可将沉积的时间跨度延伸到初始使用蒸汽机的年代。飞灰是煤中矿物在高温下发生玻璃化,形成由玻璃、石英和磁铁矿等组成的硅酸盐质球状颗粒物,一般由蒸汽机车和蒸汽动力工厂的燃煤锅炉中产生。飞灰颗粒沉积速度较低(大多数直径小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ ,普通风速下沉降速度为 $1\sim 20\text{ }\mu\text{m s}^{-1}$ <sup>[9]</sup>),在气流中能够迁移很长的一段距离。Rose<sup>[10]</sup>在苏格兰Glasgow距离灰源45 km远的地方也发现了飞灰颗粒小球。飞灰是一种比较稳定的物质,研究表明飞灰暴露在大气中30 a没有出现裂纹,不发生结晶和任何破损迹象<sup>[11]</sup>。飞灰尤其是粉粒和砂粒范围内的飞灰颗粒不易被淋溶,主要与土壤粘粒和粉粒一起从坡上向坡下迁移,它们在土壤中的再分布能够提供有关生物非生物混合以及人类活动引起的亚表层土壤扰动的信息。在美国Illinois州, Jones等<sup>[12]</sup>应用该方法将土壤沉积年代延伸到19世纪50年代左右,这恰好与欧洲殖民者定居并开始垦荒的年代吻合。Olson等<sup>[13]</sup>用该

\* 中国科学院国外杰出人才支持项目(K09Z3)、国家自然科学基金项目(40271108)和国家自然科学基金项目(40471125)资助

作者简介:方华军(1978~),男,安徽巢湖人,博士研究生,主要从事土壤有机碳和土壤侵蚀方面的研究。E-mail: huajunfang@yahoo.com

收稿日期:2004-02-06 收到修改稿日期:2004-07-20

方法研究俄罗斯 Moscow 附近流域的土壤侵蚀状况。土壤侵蚀是东北黑土退化的主要过程之一, 黑土的集约耕种大约是过去 100 多年前开始的, 这与东北铁路建立时间比较接近。利用飞灰和磁性矿物作为时间标记物可将景观中土壤物质的再分布过程上溯到 20 世纪初。

飞灰示踪技术最先用于河流及泛滥平原的土壤沉积, 用于农田 SOC 再分布的研究还未见报道。本文的研究目的: (1) 尝试用飞灰示踪技术结合 SOC 深度分布信息判断堆积区埋藏的 A 层, 以及堆积土壤的相对年代, 并对比现有土壤表层和埋藏土壤表层 SOC 含量; (2) 测定单一出口的盆地沉积区在过去一个世纪以来的沉积速率, 校正研究区 SOC 损失量。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

采样区位于吉林省德惠市松花江镇西南 5 km

的老少沟小流域(北纬  $44^{\circ} 43'$ , 东经  $125^{\circ} 52'$ )。属于中温带半湿润气候, 年均温  $4.4^{\circ}\text{C}$ , 年均降水  $520.3\text{ mm}$ , 降水主要集中在 6~8 月。研究区面积  $84855.6\text{ m}^2$ 。北坡坡长 253 m, 地貌部位的坡度在  $0\sim 7^{\circ}$  之间; 南坡坡长 214 m, 坡度  $0\sim 8^{\circ}$  之间。南坡相对高差  $4.39\sim 4.68\text{ m}$ , 北坡  $9.07\sim 9.33\text{ m}$ 。采样区为典型的漫岗台地, 人为干扰小并且包括各种典型的地貌类型: 坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡足。土壤属于典型黑土亚类中的中层黑土。采样区远离城镇, 长春至哈尔滨的铁路是早期飞灰的唯一来源。该铁路始建于 19 世纪末, 为帝俄修建东清铁路的一部分, 即哈尔滨至长春的京滨线。该铁路从 1898 年 5 月 28 日以哈尔滨为起点开始动工, 1903 年建成并开始全线营业, 里程  $242.1\text{ km}^{(1)}$ 。采样区离铁路约 1 km (图 1)。采样区为农田, 玉米连作一直是该区的主要种植方式, 玉米一大豆轮作也是该区常见的种植方式。农民常用的顺向打垄和耕翻加剧了土壤沿坡再分布。

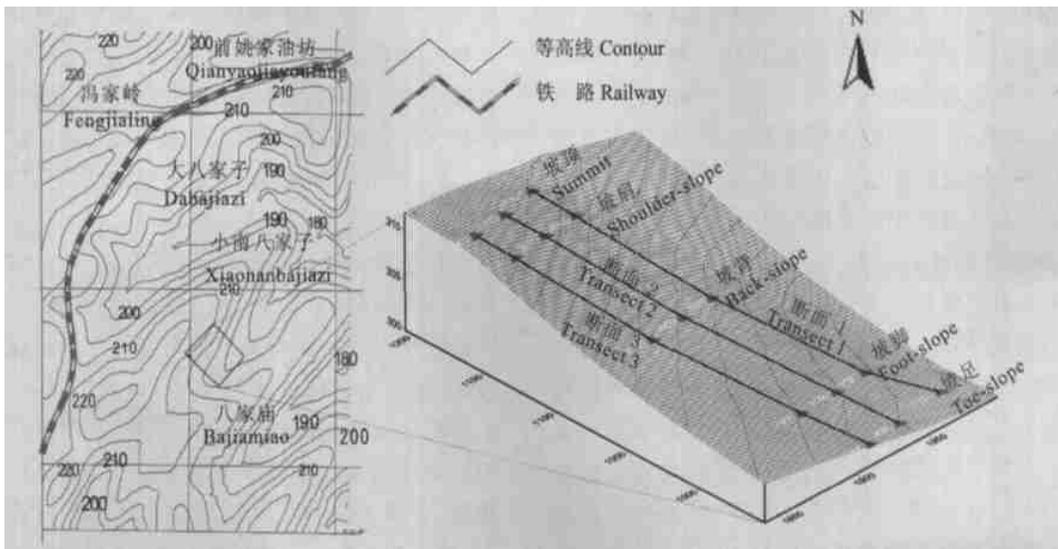


图 1 采样区位置及采样点分布图

Fig. 1 Location of the sampling sites and distribution of sampling points

### 1.2 土壤采样

利用日本 Topcon 公司生产的地球同步技术卫星自动聚焦水准仪 GTSAF 601 (Geostationary Technology Satellite Auto Focus 601) 进行采样区高程测量, 用 SUFER 软件绘制等高线和采样点布设图 (图 1)。土壤样品采集于 2002 年 10 月, 沿着北坡分别设计 3 个地形断面 (Transect), 作为重复。每个断面相距

25 m, 在每个断面上选择 5 个典型地貌类型分别代表坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡足。各地貌部位分别距离沟缘线 0 m、40 m、135 m、210 m 和 225 m。在每个地貌部位挖一个长约 100 cm, 宽为 75 cm 的土壤剖面。0~50 cm 深度以 5 cm 间隔采样, 50~100 cm 深度以 10 cm 间隔采样, 100 cm 以下以 20 cm 间隔采样。坡上部位土壤剖面采至母质层, 埋藏地貌部

(1) 〈日〉满史会 编著. 东北沦陷四十年史辽宁编写组译. 满洲开发四十年史 (内部资料). 1987. 189~210

位采至原始土壤发生 B 层。采样区表层(30 cm)土壤部分性质如表 1 所示。

表 1 采样区各地貌部位表层土壤性质<sup>1)</sup>

Table 1 Selected properties of the surface soil at different geomorphic positions

坡位 Slope position	坡度 Slope (°)	土壤容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	颗粒分级 Particle size distribution (g kg <sup>-1</sup> )			质地 Texture
			砂粒 Sand 2~ 0.02 mm	粉粒 Silt 0.02~ 0.002 mm	粘粒 Clay < 0.002 mm	
坡顶 Summit	5.32±1.08	1.24±0.08	410.6±40.5	349.7±45.4	239.6±44.2	壤粘土 Loamy clay
坡肩 Shoulder slope	6.82±0.58	1.27±0.07	396.8±19.7	416.4±22.2	186.8±32.3	壤粘土 Loamy clay
坡背 Back slope	4.00±0.61	1.28±0.07	357.6±9.6	428.9±40.8	213.5±43.1	壤粘土 Loamy clay
坡脚 Foot slope	1.36±0.66	1.29±0.08	455.7±12.0	349.9±27.7	194.4±30.8	壤粘土 Loamy clay
坡足 Toe slope	1.94±0.88	1.28±0.08	428.7±37.4	348.4±33.6	222.9±26.1	壤粘土 Loamy clay

1) 表中数据为平均值±标准差 Data in the table are mean±SD

### 1.3 测试分析

土样风干后,取一部分风干土样过 2 mm 筛,按照 Jones 和 Olson<sup>[11]</sup> 提供的方法进行土壤磁性矿物和飞灰的测定。称取 10 g 土样于 250 ml 烧杯中用 NaOCl 溶液氧化,用蒸馏水配成悬浊液,然后用薄塑料膜包裹磁铁在烧杯里来回搅动吸收磁性物质,用蒸馏水将吸附的磁性物质淋洗到蒸发皿中,重复提取,直到没有磁性物质为止,将磁性矿物烘干称重。滴少量甘油将磁性矿物混合均匀,吸取一滴(约为 0.2 ml)到载玻片上,盖上盖玻片。在显微镜下检测浑圆的球状物,仔细观察并记数,利用显微镜内部标尺计算飞灰的面积占总磁性矿物的面积的百分比来估计样品中飞灰的丰富度。2 次重复的变异系数在 5%~10%。土壤颗粒分析(国际制)根据吸管法测定<sup>[14]</sup>。另一部分风干土样磨碎过 100 目筛,用元素分析仪(ThermoFinnigen, Italy)分析土壤全碳和全氮(TN),因为本研究供试黑土不含碳酸盐,所以总碳为有机碳含量。

### 1.4 数据处理

数据分别用 Origin 7.0 和 SAS 8.1 统计软件进行绘图和统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SOC 和 TN 的深度分布特征

在 5 个地貌部位中,除坡脚外其他地貌部位

SOC 和 TN 含量都呈现随剖面深度增加而逐渐降低的趋势(图 2)。坡脚部位土壤则表现出明显的堆积和埋藏特征,即 SOC 和 TN 含量先随土壤深度指数递减至 30 cm,后迅速增加,到 60 cm 处达到最大值,然后又随土层加深递减到剖面的最小值。坡脚部位 0~30 cm 土层 SOC 含量先减少,反映了草原土壤 SOC 的累积特点。30~60 cm 土层 SOC 迅速增加反映了侵蚀物质的累积过程,先累积的土壤 SOC 含量较高,随着侵蚀的进行,坡上部位的 SOC 含量逐渐降低。同时还说明研究区坡上部位土壤遭受严重的侵蚀,暴露出较深的土层。60 cm 以下 SOC 从峰值点指数递减到剖面的最低值,说明此峰值点可能是原始土壤的表面。研究区坡肩 SOC 低于其他的地貌部位(图 2)。原因是坡肩处于坡顶和坡背的转折点,坡度在 5.93°~7.67°之间,平均 6.82°,大于坡顶和坡背(表 1)。这一方面与土壤流失到低洼的景观部位有关,另一方面该位置土壤长期的相对不良的土壤条件也影响 SOC 含量。如土壤水分及土壤肥力状况低于低洼部位,导致归还到土壤的作物残体数量减少。SOC 含量减少进而影响土壤水分的保持,降低营养元素如 N 素的含量,使土壤结构变差。坡脚表层(0~30 cm)有机碳含量较低正说明了坡脚位置现有的土壤表层物质来源于坡上部位。坡顶平坦,侵蚀微弱,土壤有机碳含量高。

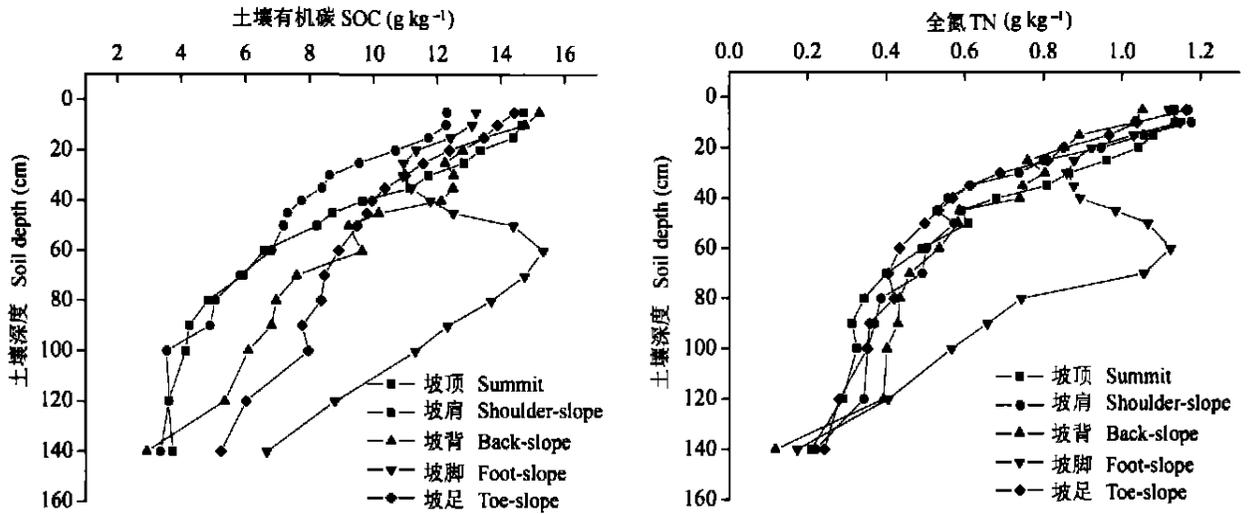
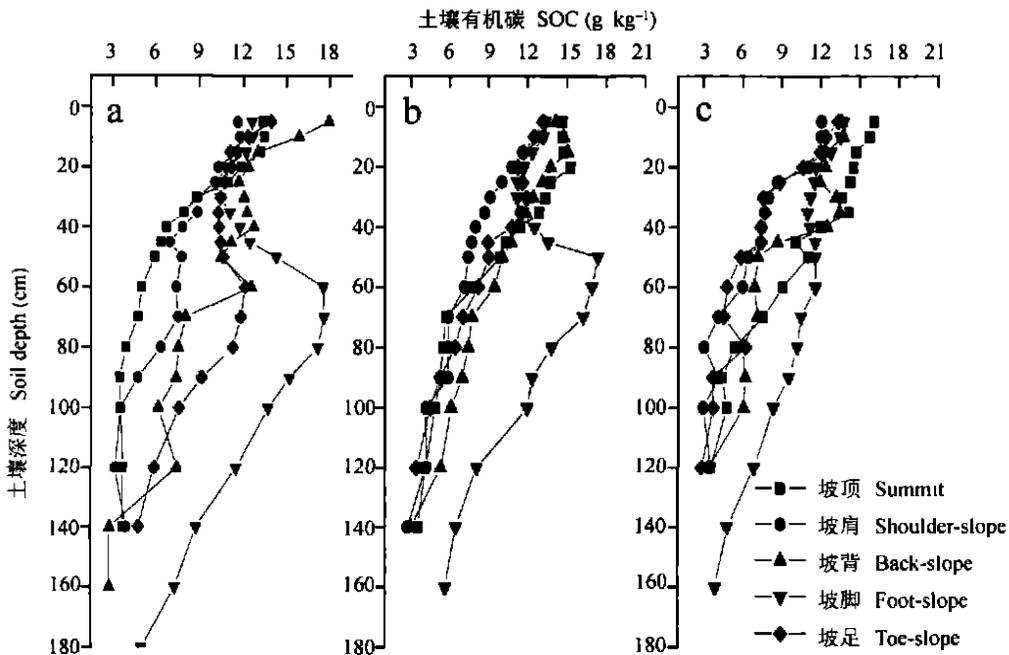


图2 各地貌部位 SOC 和 TN 随深度的变化趋势

Fig. 2 Variation of SOC and TN with soil depth in each geomorphic position

各断面坡脚和坡足埋藏土壤表层所处深度有很大的差异(图3)。断面1和断面2的坡脚部位SOC含量分别在70 cm和50 cm处出现峰值,飞灰的沉积深度也可以佐证该峰值点所处深度是原始土壤的表层。由表2可以看出断面1、断面2、断面3的坡脚部位土壤剖面飞灰到达的最大深度分别为60 cm、50 cm和45 cm。断面2剖面中飞灰与SOC最大值深度吻合较好,断面1剖面飞灰分布深度小于SOC最

大值深度。这恰好说明在蒸汽机车开始使用前,断面1坡脚部位已经有一定厚度的土壤沉积。即使该区被开垦为农田,耕作深度也未到达原始土层。因为国内外多数研究证明,自然土壤开垦为农田后,耕层SOC含量在40~50 a内将降低20%~50%<sup>[15~17]</sup>。一般认为吉林自然黑土有机质含量在20~30 g kg<sup>-1</sup><sup>[15]</sup>,折合有机碳为11.7~17.4 g kg<sup>-1</sup>。而断面1的坡脚埋藏A层SOC含量高于这个估计



a: 断面1 Transect 1; b: 断面2 Transect 2; c: 断面3 Transect 3

图3 各地形坡面各地貌部位 SOC 随深度的分布

Fig. 3 Distribution of SOC with depth at each geomorphic position of each transect

值的上界。由此可以判断该埋藏 A 层是没有被扰动的原始土壤表层。断面 2 坡脚部位在蒸汽机车使用初期耕作深度达到原始耕作层的下界。断面 3 剖面的高程明显高于其他两个剖面(图 1), 从飞灰沉积深度来看, 0~ 35 cm 土层含有飞灰, 说明接受的坡上部位的土壤侵蚀物质较少。

## 2.2 土壤沉积和 SOC 损失量的估算

### 2.2.1 飞灰分层

由 SOC 数据可以看出坡肩部位侵蚀最为严重。坡肩部位的飞灰分布深度介于 20~ 30 cm 之间(表 2), 因为飞灰颗粒可被土壤动物搬运向下迁移, 在土质疏松的土壤中一般不超过 45 cm<sup>[11]</sup>, 所以此处飞灰沉积的最低深度 20 cm 反映了目前的耕层深度。因为采样区远离城镇, 离最近的达家沟镇也有 5 km 远, 因而认为离采样点 1 km 处的铁路为飞灰的最主要来源。在铁路出现前, 该区几乎没有燃煤历史, 所以 1903 年铁路正式运行为飞灰开始沉积的第一年, 此时有明显的飞灰在土壤表面发生沉积。而在坡脚和坡足部位, 缓慢累积来自坡上部位的富含飞灰的侵蚀土壤, 飞灰到达的深度代表蒸汽机车开始运行时耕层的下界。由此可以得出, 沉积部位的飞灰到达深度与耕层深度之差为

该剖面自 1903 年以来土壤总沉积厚度。如果一个地貌部位的飞灰沉积深度明显超过 20 cm 或 30 cm, 说明该地貌部位发生明显的土壤沉积。

利用飞灰的沉积深度还可以判断累积的土壤是 1903 年以前还是 1903 年以后沉积的。通过比较 A 层厚度、飞灰到达的最大深度, 如果飞灰到达的深度以下和下面埋藏土壤之上有很明显的不含飞灰的堆积土壤物质, 则说明飞灰沉积前(1903 年)已有土壤沉积发生, 由此判断埋藏土壤在 1903 年以前即已经发生。表 2 显示, 1903 年前后土壤发生明显的迁移。坡脚部位 1903 年前后均表现为沉积; 除了断面 1 外, 坡足部位 1903 年以后表现沉积; 坡背侵蚀和沉积同时发生, 某些部位可能还发生较弱的沉积。因坡顶侵蚀微弱, 沉积区累积的土壤物质大部分来源于坡肩。另外, 断面 1 的坡背、坡脚、坡足部位飞灰出现的深度依次增加, 而在断面 2 和断面 3 坡足部位飞灰分布深度并不符合这种趋势。其原因是研究区为宽展的“U”型谷, 坡足位于谷底, 相对高程为西高东低(图 1), 坡面径流汇集到坡足部位后由西向东流。所以, 断面 1 坡足部位沉积最为明显, 其次为断面 2, 断面 3 的坡足部位沉积最弱。

表 2 各地形断面各地貌部位的 A 层厚度、飞灰分布深度及 1903 年前后土壤沉积状况

Table 2 Thickness of A horizons, distribution of fly ash in depth and accumulation of soil before and after 1903 at each geomorphic position in each transect

断面 Transect	坡位 Slope position	A 层厚度 Thickness of A horizon (cm)	飞灰到达深度 <sup>1)</sup> Depth of fly ash attainment(cm)	1903 年后沉积的土壤 <sup>2)</sup> Soil deposition after 1903	1903 年前沉积的土壤 <sup>3)</sup> Soil deposition before 1903
断面 1 Transect 1	坡背 Back slope	50	40	Y <sup>4)</sup>	U <sup>6)</sup>
	坡脚 Foot slope	120	60	Y	Y
	坡足 Toe slope	103	80	Y	Y
断面 2 Transect 2	坡背 Back slope	48	35	Y	U
	坡脚 Foot slope	104	50	Y	Y
	坡足 Toe slope	50	35	Y	U
断面 3 Transect 3	坡背 Back slope	30	30	N <sup>5)</sup>	N
	坡脚 Foot slope	100	45	Y	Y
	坡足 Toe slope	35	35	Y	N

1) 飞灰到达深度, 此处飞灰含量为 0% Depth where fly ash reached 0%; 2) 30 cm 耕层以下有明显的飞灰出现 Significant presence of fly ash 30 cm below the plow layer; 3) A 层厚度明显大于飞灰到达的深度 A horizon extending beyond the depth fly ash could reach; 4) Y 表示有 Y means “Yes”; 5) N 表示没有 N means “No”; 6) U 为不确定 U means “Uncertain”

2.2.2 土壤沉积和碳源的估算 由表 3 可以看出, 断面 1 的坡脚和坡足沉积速率明显大于其他两个地形序列, 沉积速率分别为  $3.54 \text{ mm a}^{-1}$  和  $5.56 \text{ mm a}^{-1}$ 。断面 2 和断面 3 的坡脚和坡足部位接受上坡土壤的速率较为相近, 介于  $1.01 \sim 2.53 \text{ mm a}^{-1}$  之间。坡背也表现出微弱的沉积。

定量评价沉积部位深层埋藏的 SOC 数量有助于理解土壤侵蚀和再沉积过程对景观中 SOC 动态的影响<sup>[18]</sup>。断面 1 和断面 2 的坡脚部位, 耕层的 SOC 含量分别比对应埋藏层的 SOC 含量低 33.5% 和 28.1%。断面 1 和断面 2 的坡足部位, 根据 SOC 随深度的变化趋势推断出的埋藏层的 SOC 含量却略低于表层土壤 SOC 值, 但远大于亚表层的 SOC

值。埋藏的 A 层 SOC 含量较高反映了有相当数量的有机碳被截存在黑土的农田生态系统中。假设坡脚和坡足部位截留坡上部位侵蚀下来的物质, 其他部位的土壤遭受侵蚀。土壤有机碳的损失量应该减去沉积区累积的 SOC 含量。由表 3 可以得出坡脚和坡足部位平均沉积深度为 25.8 cm; 累积土壤的平均 OC 含量以沉积部位耕层 SOC 含量平均值  $12.7 \text{ g kg}^{-1}$  代替, 土壤容重以  $1.2 \text{ g cm}^{-3}$  计算, 沉积面积为  $4000 \text{ m}^2$ 。结果得出埋藏部位沉积的土壤碳为  $15.73 \text{ Gg}$  ( $1 \text{ Gg} = 10^6 \text{ g}$ ), 平均含碳  $3.93 \text{ kg m}^{-2}$ 。这部分迁移的 SOC 并没有释放到大气中, 而是被隐遁在沉积部位。研究结果说明我们以往可能过高地估计了土壤侵蚀造成的土壤 SOC 的损失量。

表 3 1903 年后土壤沉积速率和坡脚、坡足部位耕层和埋藏层有机碳的含量

Table 3 Rate of deposition since 1903 and the contents of SOC in Ap and buried A at foot slope and toe slope

断面 Transect	坡位 Slope position	土壤沉积厚度 <sup>1)</sup> Thickness of soil deposited (cm)	土壤沉积速率 <sup>2)</sup> Deposition rate at position ( $\text{mm a}^{-1}$ )	耕层 SOC 含量 Content of SOC in Ap ( $\text{g kg}^{-1}$ )	埋藏 A 层 SOC 含量 <sup>3)</sup> Content of SOC in buried A ( $\text{g kg}^{-1}$ )
断面 1 Transect 1	坡背 Back slope	15	1.52	$14.2 \pm 0.26$	N <sup>4)</sup>
	坡脚 Foot slope	35	3.54	$11.7 \pm 0.11$	$17.6 \pm 0.005$
	坡足 Toe slope	55	5.56	$13.2 \pm 0.15$	$12.0 \pm 0.02$
断面 2 Transect 2	坡背 Back slope	10	1.01	$14.1 \pm 0.08$	N
	坡脚 Foot slope	25	2.53	$12.3 \pm 0.09$	$17.1 \pm 0.03$
	坡足 Toe slope	10	1.50	$13.0 \pm 0.11$	$11.7 \pm 0.02$
断面 3 Transect 3	坡背 Back slope	5	0.51	$12.8 \pm 0.08$	N
	坡脚 Foot slope	20	2.02	$12.6 \pm 0.104$	$11.6 \pm 0.004$
	坡足 Toe slope	10	1.01	$13.1 \pm 0.10$	N

1) 飞灰分布深度减去估计的最大耕层厚度 Depth of fly ash discharge minus estimated maximum depth of the plow layer; 2) 根据飞灰分层方法, 自飞灰沉积以来时间为 99 年 By the fly ash stratigraphic method, fly ash deposition started 99 years ago; 3) A 层厚度减去飞灰到达的最大深度 Thickness of A horizon minus the maximum depth fly ash could reach to; 4) N 表示不存在埋藏层 N means not present

### 3 结 论

土壤侵蚀导致黑土性质发生变化, 但关于土壤再分布对农田黑土 SOC 数量变化的研究极为少见。本文采用飞灰示踪技术在某些方面能够克服<sup>[137]</sup> Cs 技术本身固有的缺陷, 可以将黑土区土壤物质在景

观的再分布准确追溯到 20 世纪初。但飞灰示踪技术也有一定的适用范围, 它必须靠近灰源(一般不超过 45 km), 在灰源的盛行风向下选择研究区域。利用飞灰技术结合 SOC 随土壤深度的变化趋势, 判断了东北黑土区低洼沉积部位埋藏的 A 层, 鉴定累积的土壤的相应年代。沉积部位截留了一定数量的有机碳, 埋藏层较高的 SOC 含量说明有相当数量的有

机碳被长期固定在现有的耕作层下。研究结果表明我们过去可能过高地估计了土壤侵蚀引起的农田土壤SOC的损失量,也可能过高地估计了农田土壤作为大气CO<sub>2</sub>“源”的贡献。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] McCarty G W, Ritchie J C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 423~ 430
- [ 2 ] Ritchie J C, McCarty G W. <sup>137</sup>Cesium and soil carbon in a small agricultural watershed. *Soil & Tillage Research*, 2003, 69 : 45~ 51
- [ 3 ] Lal R, Kimble J, Follett R. Knowledge gaps and researchable priorities. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1998. 595~ 604
- [ 4 ] VandenBygaart A J. Erosion and deposition history derived by depth stratigraphy of <sup>137</sup>Cs and soil organic carbon. *Soil & Tillage Research*, 2001, 61: 187~ 192
- [ 5 ] Zhang Y, Peng B Z, Gao X, *et al.* Degradation of soil properties due to erosion on sloping land in southern Jiangsu Province, China. *Pedosphere*, 2004, 14(1): 17~ 26
- [ 6 ] VandenBygaart A J, King D J, Groenevelt P H, *et al.* Cautionary notes on the assumptions made in erosion studies using fallout <sup>137</sup>Cs as a marker. *Can. J. Soil Sci.*, 1999, 79: 395~ 397
- [ 7 ] Dalgleish H Y, Foster I D L. <sup>137</sup>Cs losses from a loamy surface water gleyed soil ( Inceptisol ): A laboratory experiment. *Catena*, 1996, 26: 227~ 245
- [ 8 ] 杨浩, 杜明远, 赵其国, 等. 利用<sup>137</sup>Cs 示踪农业耕作土壤侵蚀速率的定量模型. *土壤学报*, 2000, 37(3): 296~ 305. Yang H, Du M Y, Zhao Q G, *et al.* Quantative model to estimate soil erosion rates using cesium-137 for cultivated soil ( In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 296~ 305
- [ 9 ] Wark K, Warner C F. *Air Pollution: Origin and Control*. New York: I. E. P., 1976. 519
- [ 10 ] Rose N L. Inorganic fly ash spherules as pollution tracers. *Environmental Pollution*, 1996, 91: 245~ 252
- [ 11 ] Capp J P, Spencer J D. *Fly Ash Utilization: A Summary of Applications and Technology*. Information Circular 8483. U. S. Department of Interior Bureau of Mines. Washington DC, 1970
- [ 12 ] Jones R L, Olson K R. Fly ash use as a time marker in sedimentation studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, 54: 855~ 859
- [ 13 ] Olson K R, Gennadiyev A N, Jones R L, *et al.* Erosion patterns on cultivated and reforested hillslopes in Moscow region, Russia. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 193~ 201
- [ 14 ] 刘光崧编. *土壤理化分析与剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996. 36~ 41. Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles ( In Chinese )*. Beijing: Standards Press of China, 1996. 36~ 41
- [ 15 ] 吉林省土壤肥料总站. *吉林土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1998. 145~ 164, 329~ 336. Soil and Fertilizer Station of Jilin. *Soils of Jilin ( In Chinese )*. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1998. 145~ 164, 329~ 336
- [ 16 ] Somebroek W G, Nachtergaele F O, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestration of carbon in tropic and subtropical soils. *Ambio*, 1993, 22: 417~ 426
- [ 17 ] Burke I C, Laurenroth W K, Coffin D P. Recovery of soil organic matter and N mineralization in semiarid grasslands: Implications for the conservation reserve program. *Ecological Applications*, 1995, 5: 793~ 801
- [ 18 ] Gregorich E G, Greer K J, Anderson D W, *et al.* Carbon distribution and losses: Erosion and deposition effects. *Soil & Tillage Research*, 1998, 47: 299~ 310

## ASSESSMENT OF REDISTRIBUTION OF EROSION MATERIAL AND SOIL ORGANIC CARBON USING FLY ASH AS A TIME MARKER AT A SLOPING FIELD IN BLACK SOIL REGION

Fang Huajun Yang Xueming Zhang Xiaoping Liang Aizhen

(*Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China*)

**Abstract** Using fly ash as a tracer overcomes the limitation that the  $^{137}\text{Cs}$  tracer method has in explaining the processes of soil redistribution prior to a nuclear explosion in the atmosphere. In this study fly ash was used as a time marker to study spatial and temporal characteristics of the redistribution of soil organic carbon (SOC) in Black soil, Northeast China. Attempts were made to build up a methodology to determine thickness of accumulated layers and the soils underneath using fly ash. Results showed that the method was capable of estimating relative age of the accumulated materials. The surface of the buried soil determined by the fly ash technology was in consistency with that obtained with the method based on variation of SOC concentration with the depth in profiles. The results also indicated that redistribution of soils in the study area occurred prior to the use of steam locomotive. Among the studying geomorphic positions, at the shoulder slope erosion was the strongest and the content of SOC was the lowest. There was no obvious erosion at the summit because of small slope gradient. Redeposition also took place at back-slope, foot-slope and toe slope. The rate of soil deposition ranged between  $1.01\sim 5.56\text{ mm a}^{-1}$ . The study also found that the content of SOC in buried surface layers was higher than that in the plowed layer, which indicated that there was much organic carbon sequestered below the plowed layer. The effects of soil transport and burial need to be considered in assessing agricultural soils as carbon “resource” or “sink” of atmospheric  $\text{CO}_2$ .

**Key words** Fly ash; Soil redistribution; Soil organic carbon; Black soil; Northeast China