

赣南红壤丘陵区¹³⁷Cs 示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响

刘丹¹, 丁明军^{1,2}, 文超¹, 张华敏¹

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘要: 赣南红壤丘陵区是我国土壤侵蚀与土地退化比较严重的地区, 以南丰县为例, 应用¹³⁷Cs 示踪技术探讨不同土地利用方式下土壤侵蚀与养分元素的关系。结果表明: (1) 湿地松林、桔园、水田 3 种土地利用方式作用下土壤中¹³⁷Cs 与养分元素分布差异显著, 在垂直剖面上, 湿地松林¹³⁷Cs 含量呈指数递减分布, 水田与桔园¹³⁷Cs 含量因人为干扰在耕层内均匀分布; 有机质与¹³⁷Cs 有相似的分布特征; 全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量均呈现一定表聚性。(2) 位于坡地的 2 种土地利用方式中, 湿地松林¹³⁷Cs、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量均表现为下坡>上坡>中坡; 桔园¹³⁷Cs 活度表现为中坡>下坡>上坡, 全氮、碱解氮、速效磷表现为下坡>中坡>上坡, 而速效钾、有机质最大值均出现在上坡。(3) 相关性分析表明, 土壤¹³⁷Cs 与有机质、全氮、碱解氮显著正相关, 表明小流域有机质、氮元素可能与¹³⁷Cs 有相同的物理运移方式, pH 与¹³⁷Cs 显著负相关, 速效磷、速效钾则与¹³⁷Cs 不相关。(4) 3 种土地利用方式中位于小流域谷地的水田¹³⁷Cs、有机质、全氮、碱解氮含量最高, 坡地上桔园坡面¹³⁷Cs 与土壤养分元素含量均高于湿地松林地, 表明一定程度的坡改梯桔园种植模式能有效缓解土壤侵蚀与养分流失, 改善区域生态环境。

关键词: ¹³⁷Cs; 土壤侵蚀; 土壤养分; 相关性; 红壤丘陵区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0062-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.011

Effects of Soil Erosion on Soil Nutrient Elements Based on ¹³⁷Cs Tracer in the Red Soil Hilly Region of Southern Jiangxi Province

LIU Dan¹, DING Mingjun^{1,2}, WEN Chao¹, ZHANG Huamin¹

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022;

2. Key Lab of Poyang Lake Wetland Watershed Research of Ministry of Education, Nanchang 330022)

Abstract: The hilly region of red soil in southern Jiangxi is being faced with serious soil erosion and land degradation. In this study, we took the Nanfeng County as a case study to explore the relationships between soil erosion and nutrient elements under wetland pine forest, orange orchard and paddy field using the ¹³⁷Cs tracer approach. The results showed that: (1) There were significant differences in the distributions of ¹³⁷Cs and nutrient elements in soil with the three land use types. The contents of ¹³⁷Cs in soil of wetland pine forest decreased exponentially along with the vertical profile. While in the soils of orange orchard and paddy fields, the ¹³⁷Cs was evenly distributed in the plough layer due to human disturbance. The distribution of organic matter was similar with ¹³⁷Cs. The contents of total nitrogen, alkali nitrogen, available phosphorus and available potassium in the three land use types showed obvious accumulation in surface layer. (2) In the soil of hillside wetland pine forest, the contents of ¹³⁷Cs, total nitrogen, alkali nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter were characterized by: downhill > uphill > mid-slope. While in the orange orchard soil, the activities of ¹³⁷Cs were mid-slope > downhill > uphill. The contents of total nitrogen, alkali nitrogen and available phosphorus showed downhill > mid-slope > uphill. And the maximum contents of available potassium and organic matter were found on the uphill. (3) Correlation analysis showed that ¹³⁷Cs was positively correlated with organic matter, total nitrogen and alkali nitrogen, indicating that organic matter and nitrogen in small watershed might have the same physical migration mode as ¹³⁷Cs. The pH value was significantly negatively correlated with ¹³⁷Cs. While there were no significant correlations between the contents of available phosphorus and available potas-

收稿日期: 2018-08-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761020); 江西省自然科学基金项目(20151BAB203041)

第一作者: 刘丹(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用变化研究。E-mail: 994320030@qq.com

通信作者: 丁明军(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地利用/覆被变化研究。E-mail: dingmingjun1128@163.com

sium and ¹³⁷Cs. (4) Among the three land use types, the ¹³⁷Cs, organic matter, total nitrogen and alkali nitrogen contents in the paddy field of the small watershed valley were the highest. On the hillside, the contents of ¹³⁷Cs and soil nutrient elements in the orange orchard were higher than those in the wetland pine forest, indicating that the changing slopping-to-terraced orange planting patterns could effectively alleviate soil erosion and nutrient loss, and improve the regional ecological environment.

Keywords: ¹³⁷Cs; soil erosion; soil nutrient; correlation; red soil hilly area

我国南方红壤丘陵区约占全国土地面积的 21%, 是我国重要的农、林产地, 该区域热量充足, 雨量丰沛, 生产潜力大, 在我国社会经济发展中发挥着重要作用^[1-2]。然而, 特殊自然环境(地形破碎、坡度变化大、多暴雨等)和强烈人为干扰的共同影响致使该地区土壤侵蚀严重, 使之成为我国仅次于黄土高原地区的第二大土壤侵蚀区^[3]。严重的土壤侵蚀进一步引起土壤碳、氮、磷等养分的流失, 造成土地退化, 已严重影响到区域生态环境安全^[4]。赣南红壤丘陵区是我国主要柑橘种植区, 在经济效应的驱动下, 近些年该地柑橘种植面积不断上升, 越来越多的林地转为梯田模式的柑橘种植用地, 对区域内水土保持与生态环境恢复有着重要影响^[5]。

传统的土壤侵蚀研究方法主要有径流小区法、模型模拟法以及遥感和测量学方法等。这些方法均在土壤侵蚀研究中得到了广泛应用, 但随着技术的发展出现了诸如工程量大、难以实现、模型精度、计算复杂等问题^[6]。核素示踪法是假设核素原始均匀沉降在研究区域内且强烈吸附于土壤颗粒, 通过比较研究区域与背景值点核素的差异来反映土壤侵蚀的一种方法, 因该方法有简单、量化程度高、结果可靠等特点, 近年来得到广泛应用^[7]。¹³⁷Cs 是 20 世纪五六十年代人为核试验形成的一种人工放射性核素, 半衰期 30.17 年, 是核素示踪法中应用最为成熟的一种放射性核素^[8], 该示踪法能够很好地建立土壤侵蚀—养分间的关系, 为研究土壤养分侵蚀动态提供了方法上的支持^[9]。

本文选取南丰县作为研究区域, 利用¹³⁷Cs 示踪法研究桔园、湿地松林地、水稻田 3 种不同土地利用方式下土壤侵蚀与土壤养分的空间分布关系, 通过¹³⁷Cs 与土壤养分元素之间的关系, 研究赣南红壤丘陵区典型土地利用下土壤侵蚀与养分流失过程, 探讨土壤侵蚀对土壤养分的影响, 以为该区域土地利用管理和生态恢复提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

南丰县地处江西省东南部, 位于东经 116°09′—116°45′, 北纬 26°05′—26°27′, 是江西省抚州市下辖县之一, 面积约为 1 920 km², 地貌以丘陵山地为主, 东面是武夷山脉, 与福建省相邻, 西靠雩山山脉, 中部

地势较平坦, 盱江南北贯穿整个县域。区域气候属中亚热带季风气候, 水热条件好, 资源丰富, 无霜期长。全年平均气温 18.3 ℃, 最冷月平均气温 6.1 ℃。年均降水量 1 700 mm, 雨量充沛, 主要集中在 4—6 月, 约占年降水量的 51.4%。年日照时间 1 928.2 h, 占可照时间的 44%。区域内主要土壤类型有红壤、黄红壤、山地黄红壤、水稻土等, 其中红壤是该县典型地带性土壤, 面积约占全县总面积的 80%, 全县 90% 以上的南丰蜜桔园建立在红壤丘陵地(图 1)。该县土地利用类型多样, 植物多样性丰富, 但由于长期的人为破坏, 原生植被几乎破坏殆尽, 主要以次生植被为主, 包括湿地松 (*Pinus elliottii* Engelm)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) 以及林地开荒后种植的柑橘 (*Citrus reticulata* Blanco) 等, 此外在平原、丘陵谷地地区种植水稻、莲藕、蔬菜等作物。

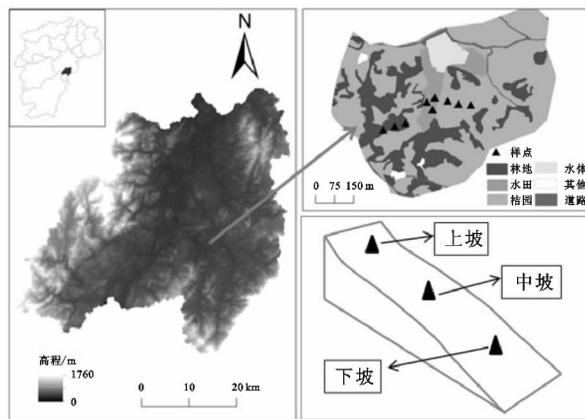


图 1 研究区概况

1.2 样品采集与分析

样品采集主要是在南丰县南部太和镇丹阳村的典型小流域进行, 此流域土地利用类型多样, 兼具湿地松林、桔园(坡面上)、水稻田(谷地)3 种典型土地利用方式, 概况见表 1。于 2017 年 10 月在湿地松林、桔园坡地按照上、中、下坡位分别取样, 每个坡位随机采取 3 个土壤剖面作为重复, 采样深度以每层 5 cm 采集至 30 cm, 共 6 层; 在水稻田上随机分布 3 个样点, 每个样点采集 3 个重复, 层样采集方法与桔园、林地一致。

所有样品采集带回实验室剔除草根和石块等杂物后风干、研磨分为两部分, 一部分过 150 μm 筛, 将

土样充分混合后装入聚氯乙烯管中,蜡封放置 3 周。于 2018 年 5—6 月在江西师范大学地理与环境学院实验室进行¹³⁷Cs 活度测试,使用美国 ORTEC 公司生产的 Ortec HPGe GWL 井式检测器测试样品的¹³⁷Cs 含量,计数时间为国际通用的 43 200 s(12 h),在检测谱 662 keV 处读取¹³⁷Cs 活度,计算样品的质量活度(Bq/kg)^[10]。另一部分过 2 mm 筛,于 2018 年 7 月送至中国科学

院农业资源研究中心测试土壤理化性质,土壤 pH 采用水浸提—电位法测定(水土比为 2.5:1),土壤有机质采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 油浴氧化—滴定法测定,土壤全氮采用凯氏定氮法测定,碱解氮采用碱解—扩散法测定,有效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定,土壤粒径采用激光粒度仪测定^[11]。

表 1 样地基本概况

土地利用方式	坡度/(°)	坡型	种植年限/a	覆盖度/%	植被覆盖情况	人为管理措施
桔园	2.45	梯型坡	15~20	65	柑橘、茅草	每年 2 次施肥,2~3 次除草
湿地松林	4.34	直型坡	约 50	90	湿地松、檫木、芒箕、芒草、苔藓	管理较少,偶有砍伐
水稻田	0	谷地	一年一季	随生长期变化	水稻	每年 2~3 次施肥

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式¹³⁷Cs 与土壤各养分元素的分布特征

2.1.1 不同土地利用下¹³⁷Cs 与土壤各养分元素的垂直分布 已有研究^[12]表明,¹³⁷Cs 质量活度在耕地和非耕地的垂直分布差异显著,耕地因人为耕作的影响在耕层内呈均匀分布,而非耕地则随土层深度的增加呈指数递减分布。本文对研究区域内水田、湿地松林、桔园 3 种土地利用方式土壤¹³⁷Cs 含量及有机质垂直分布进行了研究(图 2)。水田¹³⁷Cs 质量活度在 0—15 cm 范围呈现均匀分布的趋势,在 15 cm 以下逐渐递减,在 30 cm 处出现次高峰,这主要是水田耕层经过翻耕土质疏松,渗水性强,使得泥沙随水流在 30 cm 处的犁底层积淀,形成次高峰;湿地松林随着

土层深度的增加也呈现逐渐递减的趋势,且递减趋势显著,其¹³⁷Cs 主要分布在 25 cm 以上土层,25 cm 以下土层分布极少,其中 67% 的¹³⁷Cs 聚集在 5—15 cm 土层,与大多数非耕地剖面分布一致^[13],可能是由于坡地表层受到侵蚀导致表层¹³⁷Cs 含量较低;桔园由于每年春季施肥时会对土地进行翻耕,使得¹³⁷Cs 含量在不同土层深度下呈均匀分布,因受到坡面侵蚀的缘故其峰值出现在 5—10 cm 土层,最大值为 9.72 Bq/kg。水田、湿地松林的土壤有机质含量都随土层深度增加不断减少,最大值均出现在 0—5 cm 土层,分别为 37.18,27.52 g/kg,有明显的表聚性,这主要是由于表层土壤中植物的凋落物分解和根系分泌物增加了有机质输入;桔园因人为管理的影响,有机质在不同土层间均匀分布,在 25—30 cm 土层深度上出现最大值为 22.89 g/kg。

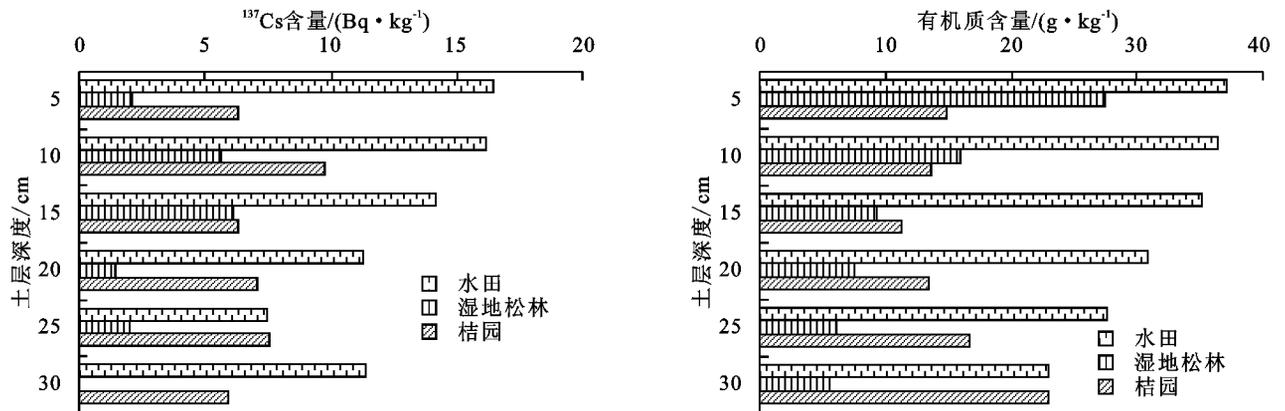


图 2 不同土地利用方式下土壤¹³⁷Cs 和有机质的垂直分布

土壤全氮、碱解氮含量在垂直剖面上分布趋势一致(图 3),最大值均出现在土壤表层。水田、湿地松林全氮与碱解氮随土层加深不断减少,桔园的全氮与碱解氮除表层出现峰值外,其余土层呈现均匀分布的趋势;水田、湿地松林、桔园的速效钾含量皆随土层深度增加呈现递减趋势(图 3),最大值皆出现在 0—5 cm 土层,分别为 54.53,41.21,79.93 mg/kg;3 种土地利用方式速效磷含量也呈现表聚性特征(图 3),0—5 cm 土层分别占整个剖面的 29%,24%,26.6%,

并且随土层深度增加而不断递减。

2.1.2 不同土地利用方式及不同坡位上土壤¹³⁷Cs 与养分元素的分布 通过分析小流域坡地(林地、桔园)以及小流域谷地的水稻田的¹³⁷Cs 含量以及土壤理化性质(表 2),结果表明,¹³⁷Cs 含量表现为水田>桔园>林地,全氮、碱解氮、有机质含量与其分布相一致。水稻田因位于小流域谷地的汇水区,一定程度上汇集了上游坡地的土壤及养分,加之人为施肥的影响,有机质、全氮、碱解氮含量远高于位于坡地的林

地、桔园。在小流域坡地上的桔园因人为的削坡开梯种植模式对于水土保持与养分截留起到了一定的积极作用。相对于桔园,湿地松林由于其坡度大,再加上偶有人为砍伐使得其水土流失及土壤退化更为严重。速效磷、速效钾含量则是桔园>水田>湿地松林,主要由于人为施加含氮、磷、钾的复合肥,使得水

田、桔园的速度磷、速效钾高于湿地松林,特别对于磷肥,易被土壤固定,肥料的残效大量累积于土壤中。土壤 pH 反映土壤酸碱性,研究区土壤 pH 为 4.29~4.65,都呈酸性,其中林地、水田的 pH 较高;桔园土壤 pH 较低,土壤酸性较强,可能由于人为对土壤施肥、培育等措施导致了桔园土壤酸化。

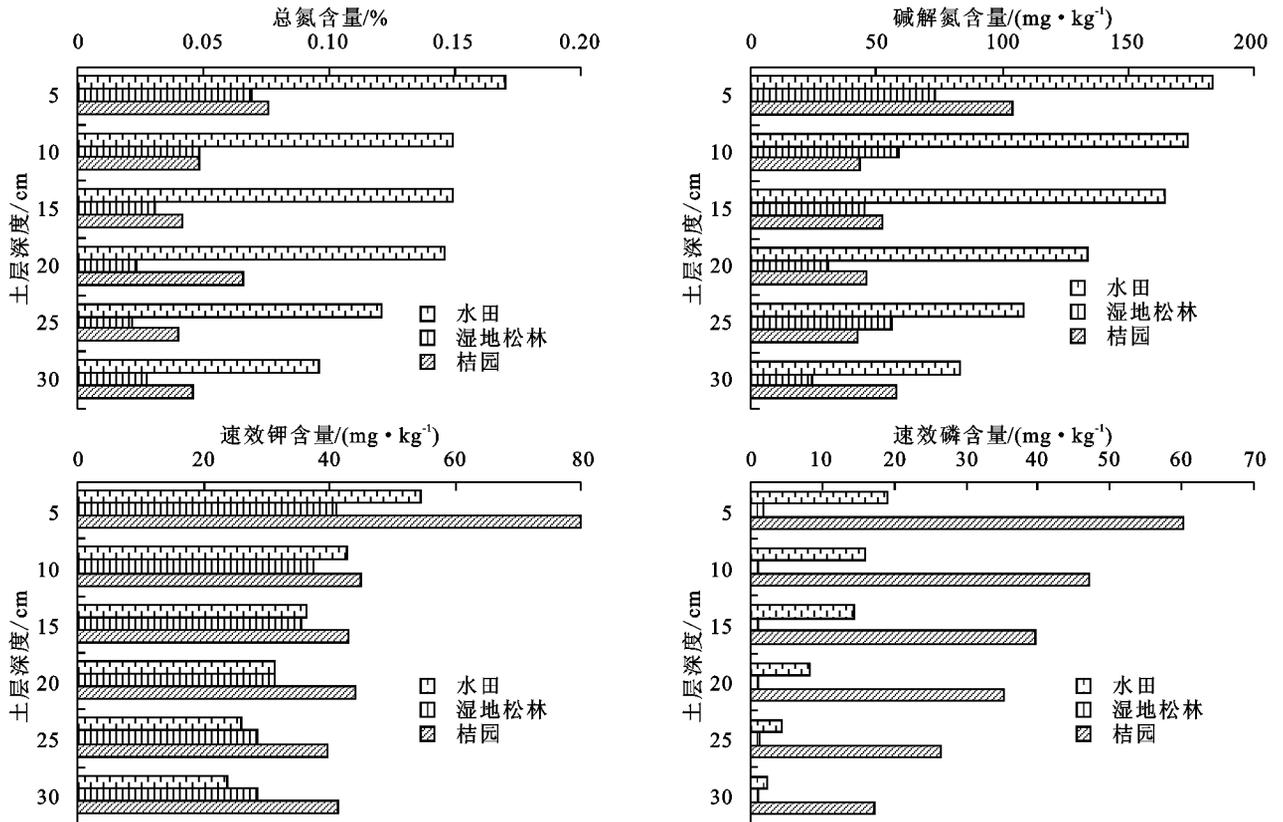


图 3 不同土地利用方式下土壤养分元素的垂直分布

此外,对于小流域坡地上湿地松林地、桔园的不同坡位土壤¹³⁷Cs 与土壤理化性质研究表明(表 2),林地的不同坡位上¹³⁷Cs、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量均表现为下坡>上坡>中坡,表明林地的¹³⁷Cs 与土壤养分元素受到水力搬运影响均有向下坡汇集的趋势;在桔园不同坡位上,¹³⁷Cs 活度表现为中坡>下坡>上坡,全氮、碱解氮、速效磷含量表现为下坡>中坡>上坡,一定程度上也呈现向下坡位汇

集的趋势,而速效钾和有机质含量最大值均出现在上坡,进一步说明了桔园因其梯级的种植模式和人为的施肥管理的影响,使其不同坡位上¹³⁷Cs 及养分元素的分布与湿地松林差异显著。3 种土地利用方式粒径分布均表现为黏粒含量少,粉砂次之,砂粒含量最多的趋势,其中水田黏粒、粉粒含量最大,林地土壤黏粒含量为下坡>中坡>上坡,桔园则是中坡最大,与¹³⁷Cs 含量分布趋势一致。

表 2 不同土地利用方式及不同坡位土壤¹³⁷Cs 及理化性质特征

土地利用方式	坡位	全氮/%	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH	¹³⁷ Cs/(Bq·kg ⁻¹)	黏粒-粉粒-砂粒/%
湿地松林	上坡	0.03±0.01	0.90±0.15	28.73±1.72	49.40±11.2	8.85±3.62	4.48±0.05	1.39±0.80	1-40-59
	中坡	0.02±0.003	0.79±0.07	27.34±2.09	23.20±3.63	7.30±2.10	4.65±0.03	1.03±0.81	2-45-53
	下坡	0.06±0.01	1.85±0.33	45.19±3.11	71.70±11.7	19.95±4.87	4.55±0.01	6.28±3.36	3-43-54
	平均值	0.04±0.01	1.18±0.16	33.75±2.35	48.10±7.08	12.04±2.43	4.56±0.02	2.90±1.25	2-43-55
桔园	上坡	0.05±0.01	2.62±1.31	56.82±5.01	46.22±18.3	18.16±1.92	4.57±0.04	2.13±0.70	2-29-69
	中坡	0.05±0.03	26.46±10.36	36.51±2.65	56.28±7.06	15.38±1.72	4.45±0.02	12.31±2.35	3-34-63
	下坡	0.06±0.05	83.71±8.36	53.38±13.8	71.16±4.95	12.91±2.18	4.29±0.03	7.06±1.40	2-38-60
	平均值	0.05±0.01	37.60±9.26	48.90±5.14	57.89±6.80	15.48±1.18	4.44±0.03	7.17±1.34	2-34-64
水田	平均值	0.14±0.01	10.74±1.89	35.76±3.40	141.40±9.31	31.68±1.41	4.56±0.06	14.18±2.29	2-45-53

注:表中数据为平均值±标准差。

2.2 土壤养分因子间相关性分析

由表 3 可知,土壤全氮与碱解氮、全氮与有机质、碱解氮与有机质相关系数分别为 0.882,0.868,0.835,呈显著正相关($P < 0.01$),可能是由于红壤本身固定铵的能力比较差,约有 95% 的氮素存在于有机质中,所以有机质的含量可大体反映出氮素的丰缺状况^[14];此外,速效钾与速效磷显著正相关($P < 0.01$),但相关系数较小,表明两者可能受到相同因素的影响,如人为施肥、有机质分解等;pH 与速效磷、速效钾、碱解氮呈显著负相关。

表 3 土壤养分因子间相关关系

指标	全氮	速效磷	速效钾	碱解氮	有机质	pH
全氮	1					
速效磷	0.067	1				
速效钾	0.178	0.372**	1			
碱解氮	0.882**	0.090	0.199	1		
有机质	0.868**	-0.107	0.184	0.835**	1	
pH	-0.148	-0.528**	-0.329*	-0.292*	-0.178	1

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关; * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关。

2.3 土壤¹³⁷Cs 与各养分因子间的相关关系

为研究水土流失对土壤养分流失的影响,分析了¹³⁷Cs 与土壤养分因子间的相关性。由表 4 可知,¹³⁷Cs 含量与有机质、全氮、碱解氮相关系数分别为 0.59,0.63,0.61,显著相关($P < 0.01$),这表明¹³⁷Cs 与有机质、全氮、碱解氮可能有相似的物理运移途径;而速效磷、速效钾与¹³⁷Cs 无显著相关性,表明这些因素可能受到土壤侵蚀之外的因素(如土壤有机质分解、土壤矿化速率、土壤微生物、人为施肥等)的影响^[15];此外,pH 则与土壤¹³⁷Cs 呈显著负相关($P < 0.01$)。

表 4 ¹³⁷Cs 与土壤养分因子间相关性

分组	回归方程	R
¹³⁷ Cs 与有机质	$Y = 0.44x_1 - 0.57$	0.59
¹³⁷ Cs 与 pH	$Y = -15.61x_2 + 78.64$	-0.35
¹³⁷ Cs 与全氮	$Y = 102.08x_3 + 0.31$	0.63
¹³⁷ Cs 与碱解氮	$Y = 0.1x_4 + 0.12$	0.61
¹³⁷ Cs 与速效钾	$Y = 0.07x_5 + 5.22$	0.15
¹³⁷ Cs 与速效磷	$Y = 0.05x_6 + 7.23$	0.17

注: Y 为¹³⁷Cs 含量(Bq/kg); x_1 为有机质含量(g/kg); x_2 为 pH; x_3 为总氮含量(%); x_4 为碱解氮含量(mg/kg); x_5 为速效钾含量(mg/kg); x_6 为速效磷含量(mg/kg)。

3 讨论

近年来借助¹³⁷Cs 示踪技术研究不同土地利用方式下土壤再分配机制取得了较大的成功,大部分研究^[16]认为,在人为干扰较严重的坡耕地土壤侵蚀量大于非耕地,即¹³⁷Cs 含量小于无人为干扰土地。而在本研究中,人为干扰强度较大的桔园¹³⁷Cs 与养分元素的含量大于人为干扰较少的湿地松林地区,究其原因可能有两点:其一,桔园坡地是以梯田的模式种植,相较于

直型坡地的湿地松林,该模式能够对水土及养分起到有效的拦截作用;其二,桔园坡地因每年都会进行人为施肥,使其养分含量相较于无人为管理的湿地松林较高。由此可知,赣南地区梯田模式下的经济林发展对该地区水土保持具有一定积极意义。

以往研究^[17-18]表明,¹³⁷Cs 与土壤有机质含量呈显著相关,本研究对 3 种土地利用方式所有样点研究发现有机质与¹³⁷Cs 有显著的正相关关系(表 4),但对不同土地利用方式¹³⁷Cs 与有机质关系研究发现,未开垦的山坡(湿地松林地)有机质与¹³⁷Cs 不相关($y = 0.22x + 0.22$, $R = 0.43$),这与 Martinez 等^[15]指出在澳大利亚非耕地上¹³⁷Cs 与 SOC 没有关系的结论是一致的,相较于土壤侵蚀的影响,有机质的分布模式可能更多受生物因素(如呼吸、生物氧化、矿化等)的影响。此外,桔园的¹³⁷Cs 与有机质也不相关($y = -0.27x + 11.3$, $R = 0.24$),这可能由于桔园受到人为干扰(除草、施肥等)的影响,使其有机质的分布与¹³⁷Cs 不一致。而在小流域谷地的水稻田中,¹³⁷Cs 含量与有机质呈显著正相关($y = 0.97x - 16.69$, $R = 0.6$, $P < 0.01$),这表明水稻田中的有机质的分布可能更多的是受到物理过程(即侵蚀或者人为扰动)的影响^[19]。

由于土壤养分含量分布并非完全受到土壤侵蚀或沉积的影响,人为的干扰和生物因素也会对其造成一定的影响^[20],因此今后在开展类似研究中,需加强一些控制性试验,以便更深入地探讨¹³⁷Cs 示踪土壤侵蚀对养分流失的影响。

4 结论

(1)不同土地利用方式下土壤¹³⁷Cs、有机质、全氮、碱解氮含量均表现为水田 > 桔园 > 湿地松林地,土壤速效磷、速效钾含量为桔园 > 水田 > 湿地松林。3 种土地利用方式¹³⁷Cs 含量在垂直剖面上分布差异显著,湿地松林随土层加深呈指数递减,水田与桔园在耕层内主要呈均匀分布特征;有机质与¹³⁷Cs 有相似的分布特征;全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量均呈现一定表聚性。

(2)不同坡位上湿地松林¹³⁷Cs、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量均表现为下坡 > 上坡 > 中坡;桔园¹³⁷Cs 活度表现为中坡 > 下坡 > 上坡,全氮、碱解氮、速效磷含量表现为下坡 > 中坡 > 上坡,而速效钾和有机质最大值均出现在上坡。

(3)相关分析表明,¹³⁷Cs 含量与有机质、全氮、碱解氮含量显著正相关,与土壤 pH 呈负相关,与速效磷、速效钾含量不相关。对于不同土地利用方式¹³⁷Cs 与有机质关系研究表明,湿地松林、桔园有机质含量与¹³⁷Cs 没有相关性,而水田¹³⁷Cs 与有机质显著正相关。

参考文献:

- [1] 史志华,杨洁,李忠武,等.南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理[J].水土保持学报,2018,32(1):6-9.
- [2] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [3] 陈志强,陈志彪.南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变:以福建省省长汀县为例[J].生态学报,2013,33(10):3002-3010.
- [4] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,等.南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J].中国水土保持科学,2011,9(6):65-70.
- [5] 孙永明,叶川,王学雄,等.赣南脐橙果园水土流失现状调查分析[J].水土保持研究,2014,21(2):67-71.
- [6] 刘娜,王克林,张伟,等.土壤侵蚀及其评价、校验方法研究进展[J].中国农学通报,2011,27(18):1-6.
- [7] 俱战省,文安邦,严冬春,等.基于¹³⁷Cs、²¹⁰Pb和CSLE的三峡库区小流域土壤侵蚀评估[J].水土保持学报,2015,29(3):75-80.
- [8] Teramage M T, Onda Y, Kato H, et al. The relationship of soil organic carbon to Pb-210(ex) and Cs-137 during surface soil erosion in a hillslope forested environment [J]. Geoderma, 2013, 192(1): 59-67.
- [9] 张合兵,聂小军,程静霞.¹³⁷Cs示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):137-143.
- [10] 冷雪,吴霜,王昕梅,等.赣北黄茅潭近代湖泊¹³⁷Cs蓄积特点、SCP计数和事件性沉积及其对²¹⁰Pb计年的矫正[J].海洋与湖沼,2017,48(5):944-951.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 梁家伟,戴全厚,张曦,等.¹³⁷Cs技术研究岩溶高原湿地小流域土壤侵蚀特征[J].核农学报,2014,28(1):116-122.
- [13] 张云奇,张信宝,龙翼,等.农耕地土壤¹³⁷Cs与²¹⁰Pb_{ex}深度分布过程对比研究[J].核农学报,2012,26(4):692-698.
- [14] 张璐,文石林,蔡泽江,等.湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征[J].生态学报,2014,34(14):3996-4005.
- [15] Martinez C, Hancock G R, Kalma J D. Relationships between ¹³⁷Cs and soil organic carbon (SOC) in cultivated and never-cultivated soils: An Australian example [J]. Geoderma, 2010, 158(3):137-147.
- [16] 张明礼,杨浩,徐从安,等.沂蒙山区土壤侵蚀的¹³⁷Cs示踪法初步研究[J].土壤学报,2010,47(3):408-414.
- [17] Nosrati K H, addadchi A, Zare M R, et al. An evaluation of the role of hillslope components and land use in soil erosion using ¹³⁷Cs inventory and soil organic carbon stock[J]. Geoderma, 2015, 243/244(24):29-40.
- [18] 方海燕,盛美玲,孙莉英,等.¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}示踪黑土区坡耕地土壤侵蚀对有机碳的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1856-1862.
- [19] Wakiyama Y, Onda Y, Mizugaki S, et al. Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex}[J]. Geoderma, 2010, 159(1):39-52.
- [20] 魏兴萍,袁道先,谢世友.运用¹³⁷Cs与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失[J].水土保持学报,2010,24(6):16-19.
- [11] Dong Z B, Man D Q, Luo W Y, et al. Horizontal aeolian sediment flux in the Minqin area, a major source of Chinese dust storms [J]. Geomorphology, 2010, 116(1/2): 58-66.
- [12] Bo T L, Zheng X J. A field observational study of electrification within a dust storm in Minqin, China [J]. Aeolian Research, 2013, 8: 39-47.
- [13] Sun D F. Detection of dryland degradation using Landsat spectral unmixing remote sensing with syndrome concept in Minqin County, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 41: 34-45.
- [14] Prishchepov A V, Radeloff V C, Baumann M, et al. Effects of institutional changes on land use: Agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(2): 1-13.
- [15] Huo Z L, Feng S Y, Kang S Z, et al. The response of water-land environment to human activities in arid Minqin oasis, northwest China [J]. Arid Land Research and Management, 2007, 21(1): 21-36.
- [16] 刘目兴,王静爱,严平,等.垄作对旱作农田土壤风蚀影响的风洞实验研究[J].水土保持学报,2005,19(3):54-57.
- [17] 张文颖,张恩和,景锐,等.河西绿洲灌区春小麦留茬免耕的防风蚀效应研究[J].中国生态农业学报,2009,17(2):244-249.
- [18] 张超,刘国彬,薛莲,等.黄土丘陵区撂荒农耕地土壤有效态微量元素演变特征[J].中国农业科学,2013,46(18):3809-3817.
- [19] 王军强,刘立超,杨义荣,等.民勤绿洲区撂荒农耕地土壤有机碳变化特征及影响因素[J].土壤,2015,47(5):932-939.
- [20] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.

(上接第61页)