

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022042901

叶宏萌, 华伟平, 吴星怡, 等. 土地利用对红壤丘陵区小流域土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 环境化学, 2022, 41(12): 4154-4164.

YE Hongmeng, HUA Weiping, WU Xingyi, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrient loss in small watershed of red hilly soil[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (12): 4154-4164.

## 土地利用对红壤丘陵区小流域土壤侵蚀和养分流失的影响\*

叶宏萌<sup>1,2</sup> 华伟平<sup>1</sup> 吴星怡<sup>1</sup> 胡家朋<sup>1</sup> 苏丽鹄<sup>1</sup>  
杨浩<sup>2</sup> 赵志龙<sup>2</sup> 吴承祯<sup>1\*\*</sup>

(1. 武夷学院生态资源工程学院, 福建省生态产业绿色技术重点实验室, 武夷山, 354300;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京, 210023)

**摘要** 以南方红壤丘陵区两个邻近小流域为对象, 结合野外测试、数理模型及<sup>137</sup>Cs示踪技术, 系统分析了各流域土地利用对土壤侵蚀、养分含量及流失量的影响. 结果表明, 研究区土壤<sup>137</sup>Cs集中分布于0—40 cm土层, 背景值为1823.94 Bq·m<sup>-2</sup>. 土壤侵蚀以裸地最为突出(土壤侵蚀量范围为866.11—1809.52 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 旱地(137.25—796.43 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)和茶园(85.17—1616.38 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)次之, 其中, 人为干扰下茶园土壤侵蚀量空间差异显著, 草地和林地的土壤侵蚀量皆在允许侵蚀范围内(<500 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 水田基本不发生侵蚀. 土壤有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量具有不同程度的表聚现象, 前两者主要来源于植被凋落物, 后者受施肥影响为主. 人为干扰越强的茶园土壤养分流失量主要受土壤侵蚀影响呈现较大的流失潜力, 应予以重点关注. 因此, 聚焦红壤山区多个邻近小流域土壤侵蚀和养分流失对土地利用的响应研究, 可以为我国南方红壤丘陵山区小流域水土保持和面源污染防控提供理论参考.

**关键词** 土壤侵蚀, 养分流失, <sup>137</sup>Cs示踪法, 土地利用类型, 闽北山区.

## Effect of land use on soil erosion and nutrient loss in small watershed of red hilly soil

YE Hongmeng<sup>1,2</sup> HUA Weiping<sup>1</sup> WU Xingyi<sup>1</sup> HU Jiapeng<sup>1</sup> SU Liman<sup>1</sup>  
YANG Hao<sup>2</sup> ZHAO Zhilong<sup>2</sup> WU Chengzhen<sup>1\*\*</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Eco-Industrial Green Technology, College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan, 354300, China; 2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract** Taking two adjacent small watersheds in the red soil hilly area in the south as the object, and systematically analyzes the impact of land use on soil erosion, nutrient distribution and loss in each watershed using the method of the field test, mathematical model, and <sup>137</sup>Cs tracing technology. The results showed that the soil <sup>137</sup>Cs in the study area was concentrated in the 0—40 cm soil layer,

2020年7月1日收稿(Received: July 1, 2020).

\* 国家自然科学基金(41673108), 中国博士后科学基金(2019M661874), 中央引导地方科技发展专项(2020L3025), 福建省自然科学基金(2020J05218), 福建省本科高校教育教学改革研究项目(FBJG20210044)和南平市科技项目(2022ZXHZ002)资助.

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (41673108), China Postdoctoral Science Foundation Project (2019M661874), Central Special Project for Fujian Local Science and Technology Development (2020L3025), Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J05218), Research Project on Education and Teaching Reform of Undergraduate Colleges and Universities in Fujian Province (FBJG20210044) and Nanping Science and Technology Project (2022ZXHZ002).

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 13763852196, E-mail: fjwcz@126.com

and the background value was  $1823.94 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ . The soil erosion in bare land was the most prominent (the range of soil erosion was  $866.11 - 1809.52 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), followed by dry land ( $137.25 - 796.43 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) and tea garden ( $85.17 - 1616.38 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ). Among them, the spatial difference of soil erosion in tea garden was significant under human disturbance. The soil erosion of grassland and forest land was within the allowable erosion range ( $< 500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), and the paddy field was basically not eroded. The contents of soil organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) have different degrees of surface aggregation. The first two mainly come from vegetation litter, and the latter is mainly affected by fertilization. The soil nutrient loss in tea plantations with stronger human disturbance was mainly affected by soil erosion and showed great loss potential, which should be paid more attention. Therefore, focusing on the response of soil erosion and nutrient loss to land use in multiple adjacent small watersheds in red soil hilly areas can provide theoretical reference for soil and water conservation and non-point source pollution prevention and control in small watersheds in red soil hilly areas in southern China.

**Keywords** soil erosion, nutrient loss,  $^{137}\text{Cs}$  tracer method, land use type, mountain area of North Fujian.

土壤侵蚀被认为是全球重点关注的环境问题,威胁着土壤功能和可持续发展<sup>[1-2]</sup>。目前,有关土壤侵蚀的研究已从流失动力、过程和机理的剖析延伸至全球和区域性土壤侵蚀评价<sup>[3-4]</sup>、人类活动对土壤侵蚀的影响<sup>[5]</sup>,土壤侵蚀与面源污染、养分循环及全球变化等几个方面<sup>[6-7]</sup>。土壤侵蚀具有很强的空间变异性。对于地球系统的缩微——流域而言,大流域尺度上,土壤侵蚀主要受地理位置、地形地貌、土壤母质和气候条件等多因素的差异影响;而小流域尺度上,不合理的土地利用对土壤侵蚀和氮磷流失具有更为显著的放大效应<sup>[5-6]</sup>。一般认为,小流域是开展土壤侵蚀研究的基本单元,土地利用是其自然和人为活动的综合表征<sup>[3]</sup>。因此,小流域尺度范围的土壤侵蚀和养分流失及其对土地利用响应的有关研究已成为全球环境变化研究的前沿问题。

当前,我国土壤侵蚀和养分流失方面的研究聚焦于黄土高原区和东北黑土区等侵蚀严重区域<sup>[4,8]</sup>,而以轻、中度侵蚀为主的南方红壤丘陵区的有关研究相对不足<sup>[9-10]</sup>。事实上,我国南方红壤丘陵区约占全国土地面积的 21%,具有地形起伏大、降雨侵蚀力强,土地利用强度高等特点,加上土壤承载侵蚀的本底浅薄(土体及其岩石风化层厚度仅为黄土厚度的 2%—10%),土壤侵蚀和养分流失的“相对流失量”和潜在危害更大<sup>[6,11]</sup>。因此,结合多个南方红壤丘陵小流域,开展土壤侵蚀和养分流失对土地利用响应的进一步研究具有重要科学意义。

闽北为我国典型亚热带红壤丘陵区,是我国 18 个重点生态脆弱区之一<sup>[12]</sup>,又位于闽江上游,其土壤侵蚀和养分流失影响着闽江流域的生态环境、洪涝安全和水体质量。研究表明,不合理的土地利用是造成闽北土壤侵蚀加剧的主要原因<sup>[9,11]</sup>,然而,有关该区域土壤侵蚀和养分流失对土地利用响应的同步报道较少,也缺乏两者数量关系的深层次剖析<sup>[9,13-14]</sup>。核素示踪法具有快速简便、量化程度高、结果可靠等优点,适于小尺度范围的土壤侵蚀的定量化表征,并以 $^{137}\text{Cs}$ 应用最为广泛和成熟,可以很好地建立对应土地利用类型土壤侵蚀和养分流失的关系<sup>[6,10,13,15]</sup>。因此,基于 $^{137}\text{Cs}$ 核素示踪,以闽北山区多个小流域为对象,开展土地利用对土壤侵蚀和养分流失影响的示踪,定量揭示不同土地利用类型下土壤侵蚀量和养分流失量,为我国南方红壤丘陵区小流域水土保持和非点源防治提供科学参考,有利于土地利用结构和农业结构的优化调整,对改善流域生态环境具有重要意义。

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 研究区概况

闽北为福建省北部的简称,素有“福建粮仓”和“南方林海”之称,一般指福建省南平市,包括延平区、建阳区、武夷山市、建瓯市、顺昌县、浦城县、光泽县、松溪县、政和县和邵武市,面积共占  $26280.54 \text{ km}^2$ 。该区域属于仙霞岭——武夷山生态脆弱区,降雨丰富且集中,多年平均降雨量为  $1500 -$

2500 mm, 降雨侵蚀力因子( $R$ )数值普遍较高. 其中, 武夷山市  $R$  值最高, 达到  $461.5 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})^{-1}$ ; 政和县  $R$  值最低, 为  $367.6 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})^{-1}$ [19,14]. 在亚热带湿润性气候影响下, 该地区形成了以石英砂和黏土为主要成分的风化壳, 结构松散, 抗蚀能力弱. 同时, 红壤为该区域土壤的主要类型, 占土地总面积的 75.32%, 其侵蚀面积为各类土壤总侵蚀面积的 88.34%[14].

闽北水库集中分布于武夷山市, 因此, 以武夷山两个主要小型水库: 楮树下水库(简称 CSX)和古亭水库(简称 GT)小流域为研究对象(图 1). CSX 流域位于兴田镇(2013 年福建省挑选的百个水土侵蚀重点乡镇之一, 山地资源开发力度大, 土壤侵蚀居全市之首)西郊村的楮树下自然村上方, 坝址以上集雨面积  $10.7 \text{ km}^2$ . 水库于 1978 年 6 月竣工, 水库水面  $0.175 \text{ km}^2$ . GT 流域位于武夷山市五夫镇(2020 年入选为省级乡村治理示范乡镇)古亭村, 坝址以上集雨面积  $35.29 \text{ km}^2$ , 1965 年 5 月竣工, 库面  $0.19 \text{ km}^2$ .

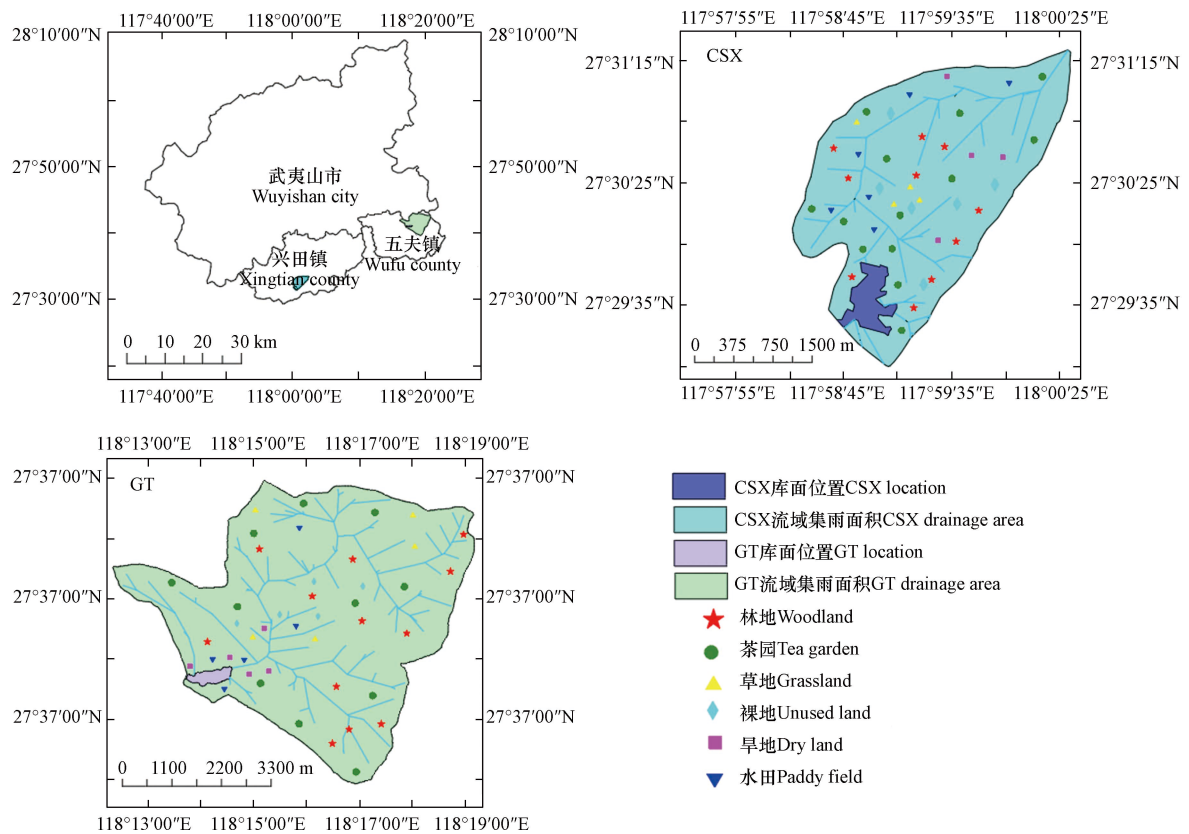


图 1 研究区位置与采样点分布

Fig.1 Location of the study area and the distribution of sampling points

## 1.2 样品采集

### 1.2.1 土壤 $^{137}\text{Cs}$ 背景值的确定

土壤 $^{137}\text{Cs}$ 背景值的确定是其示踪土壤侵蚀的关键性问题. 理想背景值参照样地应选择于近 40 年来未受到较大扰动, 且未受明显侵蚀或沉积的地势平坦区域[16-17]. 同时, 从背景值研究区域中, 随机采集 7 个或以上的土壤样点的 $^{137}\text{Cs}$ 平均比活度作为其背景值[17]. 因此, 于武夷山国家公园内的山顶平坦处、植被覆盖良好且地表枯落物层完整的地面, 随机采集 8 个土壤样点(采样深度为 0—60 cm), 测试 $^{137}\text{Cs}$ 比活度(验证了采样深度 40 cm 以下土层的 $^{137}\text{Cs}$ 比活度很低, 与上层相比可以忽略), 并取其平均值  $1823.94 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  为研究区土壤 $^{137}\text{Cs}$ 的背景值, 见表 1.

表 1 研究区 $^{137}\text{Cs}$ 背景值( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ )

Table 1 Background value of  $^{137}\text{Cs}$  in study area ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ )

深度/m Depth	变化范围 Variation range	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	CV/%
0—5	475.60—523.97	500.20	14.37	3.09

续表 1

深度/m Depth	变化范围 Variation range	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	CV/%
5—10	408.12—455.27	434.09	17.90	4.12
10—15	338.20—361.62	352.85	6.79	1.93
15—20	224.24—248.40	239.22	7.72	3.23
20—25	132.30—163.17	151.56	9.17	6.05
25—30	76.26—105.08	90.13	9.03	10.01
30—35	25.58—41.33	34.22	4.63	13.53
35—40	10.58—18.24	15.01	2.18	14.50
40—45	1.51—6.80	3.99	2.04	51.03
45—50	0—7.25	1.83	2.20	120.19
50—55	0—2.18	0.56	0.71	127.04
55—60	0—0.74	0.28	0.36	129.11

### 1.2.2 样品采集

根据研究区地形地貌及土地利用现状,将土地利用类型分为林地、茶园、草地、裸地、旱地和水田 6 种,涉及采样样地共计 74 个,其中 CSX 流域 36 个,GT 流域 38 个,详见图 1 和表 2。根据背景值采样情况及已有研究经验,土壤<sup>137</sup>Cs 集中于分布于土壤表层,深耕土壤一般为地表以下 30 cm 范围内,非耕地则一般为 15 cm 内<sup>[6,17-19]</sup>。因此,以柱状采样器采集地表以下 40 cm 范围内的土样。结合研究区的现场调研与 GPS 定位,以梅花形进行布点,兼顾每个样地的上、中、下坡位采集对应深度土样,按照 5 cm 分层测试<sup>137</sup>Cs 比活度,以展示其 0—40 cm 的剖面含量;同时,采集 0—20 cm、20—40 cm 的土样,测试土壤表层和底层<sup>137</sup>Cs 和养分含量,以计算对应的土壤侵蚀量和养分流失量。

表 2 研究区不同土地利用类型基本信息表

Table 2 Basic information of different land use types in the study area

土地利用类型 Land use type	研究区 Research area	基本信息 Essential information		
		样地数量 Number of sample plots	种植作物 Raise crops	管理措施 Management
林地 Woodland	CSX	10	竹林、马尾松	基本不施肥
	GT	7	杉木、樟树	基本不施肥
茶园 Tea garden	CSX	8	茶树	尿素为基肥、追施复合肥
	GT	11	茶树	少施或不施肥
草地 Grassland	CSX	4	狗牙根为主	基本不施肥
	GT	5	狗牙根为主	基本不施肥
裸地 Unused land	CSX	4	无	不施肥
	GT	5	无	不施肥
旱地 Dry land	CSX	4	蔬菜	尿素和复合肥为主
	GT	5	蔬菜	尿素和复合肥为主
水田 Paddy field	CSX	6	水稻	尿素和复合肥为主
	GT	5	水稻	尿素和复合肥为主

### 1.3 分析测试

土壤容重采用环刀法测定,总有机碳(TOC)采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法,总氮(TN)采用凯氏定氮法测定,总磷(TP)采用碱熔-抗钼锑分光光度法<sup>[20]</sup>。<sup>137</sup>Cs 测试分析以南京师范大学地理科学学院高纯锗探测器 $\gamma$ 谱仪(GWL-120-15, ORTEC, USA)测定,于 661.6 keV 处的 $\gamma$ 射线谱峰面积读取<sup>137</sup>Cs 比活度<sup>[6,19]</sup>。

运用相关公式将<sup>137</sup>Cs 测试比活度转换为面积活度<sup>[21]</sup>, 并采用土壤侵蚀<sup>[15]</sup> 和养分流失<sup>[13]</sup> 模型依次计算土壤侵蚀量和养分流失量. 具体如下:

首先, 将测试的土壤<sup>137</sup>Cs 比活度转化成面积活度<sup>[21]</sup>:

$$A = \sum_{i=1}^n 1000 \times B_i \times D_i \times C_i \quad (1)$$

式中,  $A$  为采样点<sup>137</sup>Cs 的面积活度,  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $n$  为采样层数;  $i$  为采样层序号.  $C_i$  为第  $i$  采样层的<sup>137</sup>Cs 比活度,  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $B_i$  为第  $i$  层的土壤容重,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $D_i$  为第  $i$  层的深度,  $\text{m}$ .

其次, 采用 Zhang 提出的耕地和非耕地土壤侵蚀模型计算对应地类的土壤年均流失厚度, 该模型在我国南方红壤丘陵区应用广泛<sup>[15]</sup>.

其中, 耕地土壤流失厚度计算公式如下:

$$\Delta H = H \left[ 1 - \left( \frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{(t-1963)}} \right] \quad (2)$$

式中,  $\Delta H$  为土壤流失厚度,  $\text{cm}$ ;  $H$  为犁耕层厚度,  $\text{cm}$ ; 通常取值为  $20 \text{ cm}$ ;  $A_0$  为<sup>137</sup>Cs 背景值,  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $t$  为采样年份, 研究区采样为 2019 年. 文中耕地主要包括旱地和水田.

非耕地土壤的侵蚀计算则假设<sup>137</sup>Cs 在该地类土壤随深度的分布不受时间影响, 其土壤流失厚度为:

$$\Delta H = \frac{1}{(t-1963)\lambda} \ln \left( \frac{A_0}{A} \right) \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为<sup>137</sup>Cs 深度分布的剖面指数(无量纲), 通常取值为  $0.27$  至  $0.32$ , 本文取值  $0.3$ <sup>[6,10]</sup>.

在不同地类土壤流失厚度计算基础上, 计算对应的土壤侵蚀量, 具体公式如下:

$$E = 10000 \times \Delta H \times B \quad (4)$$

式中,  $E$  为采样点土壤侵蚀量,  $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $B$  为采样点土壤剖面的平均容重,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

最后, 采用张燕等<sup>[13]</sup> 建立的土壤养分流失模型计算土壤养分流失量:

$$L = N \times B \times \Delta H \times 10 \quad (5)$$

式中,  $L$  为采样点土壤养分流失量,  $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $N$  为采样点发生流失厚度范围内土壤的平均养分含量,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 其它指标同上.

#### 1.4 统计方法

利用 Excel 进行数据的统计分析, 并以 Origin9.0 软件作图.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 不同土地利用类型土壤<sup>137</sup>Cs 比活度的分布特征

从图 2 可以看出, 研究区 6 种土地利用类型的土壤<sup>137</sup>Cs 剖面活度变化趋势较大. 在 CSX 流域与 GT 流域中林地的<sup>137</sup>Cs 比活度剖面分布均呈指数变化趋势, 其中 0—5 cm 土壤<sup>137</sup>Cs 比活度最高, 说明未发生或发生微度侵蚀现象. 而裸地的<sup>137</sup>Cs 比活度随土壤深度的增加(0—15 cm)先上升, 而后(>15 cm)呈现出下降趋势, 且大于 25 cm 土壤深度的<sup>137</sup>Cs 比活度呈现出 0 的现象. 土壤<sup>137</sup>Cs 活度理论值应该大于 0. 但是研究区裸地土壤<sup>137</sup>Cs 比活度在大于 25 cm 土壤深度出现低于 0 的现象, 可能因为<sup>137</sup>Cs 常吸附在土壤细颗粒上, 不易被淋溶和植物吸收而损失, 只能随土壤颗粒发生机械迁移, 当土壤遭受较强侵蚀时会导致土壤细颗粒大量流失, 导致<sup>137</sup>Cs 比活度低于仪器的绝对探测效率<sup>[22]</sup>. 草地与裸地的<sup>137</sup>Cs 比活度剖面分布具有一定的相似度, 总体随深度的增加呈指数分布. 水田在表层 0—20 cm 内<sup>137</sup>Cs 分布较为均匀, 这种在耕层深度内出现的均匀状态主要与犁耕作用有关. 与其他土地利用类型不同, 茶园<sup>137</sup>Cs 比活度主要分布在 30 cm 以上, 但 CSX 流域中茶园<sup>137</sup>Cs 比活度远低于与 GT 流域中茶园<sup>137</sup>Cs 比活度, 这与茶园在两个小流域内的管理、种植模式有关.

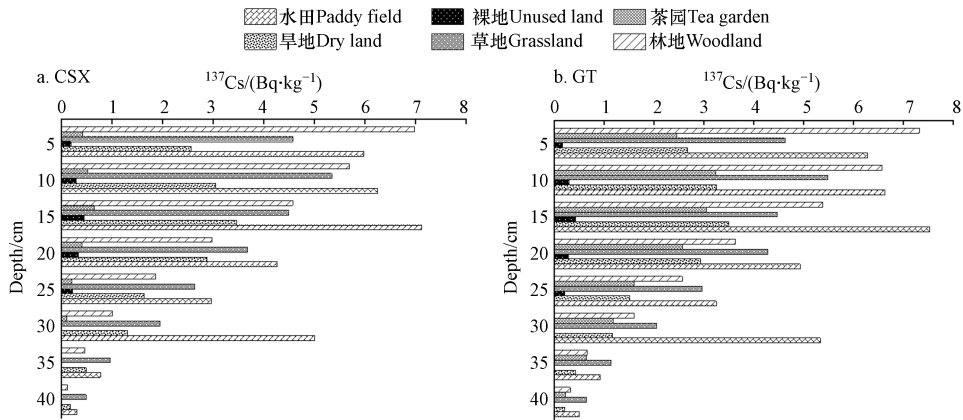


图2 研究区不同土地利用类型土壤 $^{137}\text{Cs}$ 比活度垂向分布

Fig.2 Vertical distribution of soil  $^{137}\text{Cs}$  specific activity of different land use types in the study area

## 2.2 不同土地利用类型土壤侵蚀量估算

### 2.2.1 土壤 $^{137}\text{Cs}$ 含量分布

研究区不同土地利用类型土壤 $^{137}\text{Cs}$ 含量分布见图3。研究区不同土地利用类型土壤0—40 cm范围的 $^{137}\text{Cs}$ 总量分布存在较大差异,随着深度的变化 $^{137}\text{Cs}$ 的含量呈现逐渐降低的趋势,与多数研究相一致<sup>[15-18,22]</sup>,但如果研究区域在山顶具有缓坡或山脚具有陡坡,规律则相反<sup>[23]</sup>。同时,研究区耕地 $^{137}\text{Cs}$ 垂向分布差异性较小,与其耕作的长期混匀作用有关;非耕地的垂向差异性大。这一现象较为普遍,包括黑土区<sup>[22]</sup>、黄土高原<sup>[24]</sup>和红壤丘陵区<sup>[10]</sup>等都有类似现象。因人为耕作常发生在0—15 cm耕作层,因此 $^{137}\text{Cs}$ 在该范围内呈均匀分布,在15 cm以下逐渐递减,并可能在30 cm处出现次高峰,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,形成次高峰有关;而非耕地则随土层深度的增加呈指数递减分布,且主要分布在25 cm以上土层,25 cm以下土层分布极少,并且67%的 $^{137}\text{Cs}$ 聚集在5—15 cm土层<sup>[10,13]</sup>。此外,土壤 $^{137}\text{Cs}$ 比活度分布还受多种因素影响,如气候条件、植被、地形等<sup>[22]</sup>。总体而言, $^{137}\text{Cs}$ 作为核爆炸试验的产物,来源受限,多年来土壤 $^{137}\text{Cs}$ 含量也在不断衰减,土壤水分和有机质的影响使其在土壤剖面的迁移受到限制,导致 $^{137}\text{Cs}$ 主要分布于土壤表层或耕作层<sup>[18]</sup>。

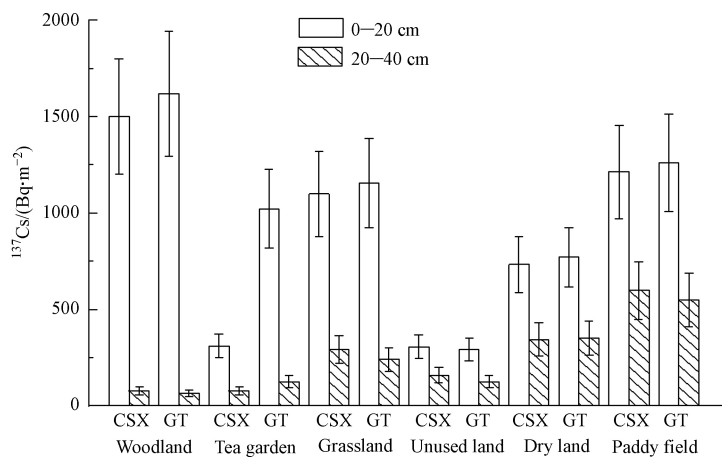


图3 研究区不同土地利用类型土壤 $^{137}\text{Cs}$ 含量分布

Fig.3 The distribution of  $^{137}\text{Cs}$  content in soil of different land use types in the study area

相比而言,CSX流域土壤 $^{137}\text{Cs}$ 总量均值分布规律为:水田最大,林地、草地和旱地次之,裸地和茶园最小。GT流域水田和林地 $^{137}\text{Cs}$ 总量均值最大,草地和茶园次之,且明显大于旱地和裸地。其中,两个流域的水田 $^{137}\text{Cs}$ 总量最大,且变异系数最小(不到1%),这与研究区水田所占的地势地貌较为一致,基本为相对低凹处,并与水田四周设有较高田垄的水土保持措施有关。两个流域相比,同种土地利用类型土壤 $^{137}\text{Cs}$ 总量在邻近山区小流域内也存在一定差别,尤其是CSX流域茶园土壤的 $^{137}\text{Cs}$ 总量均值远小于GT流域茶园土壤的 $^{137}\text{Cs}$ 总量均值,这与不同流域茶园种植方式多样有关。

### 2.2.2 土壤侵蚀量差异

表 3 汇总了研究区土壤侵蚀量分布数据. 研究区裸地的土壤侵蚀量最大, 且空间变异系数最小, 反映了在较小地理位置范围内, 裸地地质、地貌、地形等自然背景相近, 整体发生侵蚀情况也较为相近. 研究区水田土壤侵蚀量最低, 最大值范围控制在  $10 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  以内, 且有一处采样点出现了土壤沉积, 虽然其表层土壤  $^{137}\text{Cs}$  含量明显低于林地, 但是其深层土壤  $^{137}\text{Cs}$  含量较高, 且耕地和非耕地的土壤侵蚀原理及计算公式的不同, 所以水田呈现的整体土壤侵蚀量更低<sup>[17]</sup>, 也反映出水田侵蚀与其地形地貌及田垄保护有着重要关系. 茶园在研究区不同流域的土壤侵蚀量呈现明显差异, 其中, CSX 流域茶园土壤侵蚀量为  $789.48\text{—}1616.38 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 该流域对茶园开发力度大, 盲目追求产量, 茶园经营管理参差不齐, 茶园土壤侵蚀量仅次于裸地; 而 GT 流域茶园不是其主要经济作物, 茶园规模较小, 茶山开发和利用强度弱, 其土壤侵蚀量范围为  $85.17\text{—}754.56 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 次于旱地和裸地. 此外, 林地土壤侵蚀量数值差别也较大, 数值在 CSX 和 GT 流域分别为  $3.08\text{—}317.62 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $1.79\text{—}122.80 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 平均为  $99.41 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $52.19 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ . 这与研究范围内不同采样点的地形地貌、植被类型、植被覆盖度、年龄结构及群落结构等有关<sup>[19]</sup>. GT 流域的林地种植年龄更长久, 天然阔叶林保存的面积比例更大, 植被覆盖度和群落结构更好, 水土保持优势凸显. 整体而言, 研究区森林覆盖率约占 80%, 近地表植被对降雨侵蚀的削减作用强, 但“空中绿化”和“林下流”的特征却较为普通, 可能主要是植被结构差异诱导了降雨及水土流失过程, 多层次植被结构比单一层状植被的水土保持更具优势, 因此, 人工林的水土保持效果较原始天然林明显削减<sup>[9,24]</sup>. 因此, 土壤侵蚀受微地貌、土地利用类型及其人为管理强度等多方面的共同影响.

表 3 研究区不同土地利用类型土壤侵蚀量( $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

Table 3 Soil erosion amount of different land use types in the study area( $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )

土地利用类型 Land use type	研究区 Research area	范围 Range	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	CV/%
林地Woodland	CSX	3.08—317.62	99.41	112.95	113.62
	GT	1.79—122.80	52.19	45.26	86.72
茶园Tea garden	CSX	789.48—1616.38	1121.13	268.10	23.91
	GT	85.17—754.56	355.22	212.34	59.78
草地Grassland	CSX	89.94—250.37	167.33	56.81	33.95
	GT	59.14—214.76	155.07	55.93	36.07
裸地Unused land	CSX	1093.79—1809.52	1336.39	279.26	20.89
	GT	866.11—1527.00	1159.16	227.27	19.61
旱地Dry land	CSX	137.25—796.43	425.52	248.92	58.50
	GT	183.85—686.05	378.59	187.55	49.54
水田Paddy field	CSX	-0.70—9.00	5.13	3.31	64.65
	GT	0.02—9.00	5.68	3.33	58.69

注: “—”表示采样点发生土壤沉积.

Note: “—”indicates soil deposition at sampling points.

根据中国水利部颁发的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-96)<sup>[25]</sup>可以判断出, 研究区土壤侵蚀以裸地最为突出(土壤侵蚀量范围为  $866.11\text{—}1809.52 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 皆为轻度侵蚀程度( $500\text{—}2500 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ); 旱地( $137.25\text{—}796.43 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )和茶园( $85.17\text{—}1616.38 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )次之. 其中, 人为干扰下茶园土壤侵蚀量空间差异显著, 其在 CSX 流域内均属于轻度侵蚀程度, 在 GT 流域内大多数属于微度侵蚀程度范围内( $<500 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 少数茶园也出现轻度侵蚀. 其余用地类型中, 草地和林地发生了微度侵蚀, 属于研究区土壤侵蚀允许范围( $<500 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>; 水田基本不发生侵蚀. 通常认为, 除了土地利用类型的差异, 微地貌是影响小流域内部土壤侵蚀的主要因素<sup>[17]</sup>. 红壤丘陵区以坡耕地为主. 研究区样地未出现中度或以上级别的侵蚀, 主要是因为采集时进行了不同坡位(坡上、坡中和坡下)的混合, 避免了不同坡位的侵蚀差异性, 突出不同土地利用类型样地间的整体差异性和代表性. 因此, 研究区土壤侵蚀

以微度为主。除茶园外,水田、林地、草地的水土保持效果较好,旱地和裸地水土流失较严重情况符合红壤丘陵区的水土流失特征<sup>[26]</sup>。

## 2.3 不同土地利用类型土壤养分流失量估算

### 2.3.1 土壤养分含量分布

由图 4 可知,不同土地利用类型土壤 TOC 通常具有表面富集现象。研究区林地、茶园和草地 TOC 含量垂向下降趋势明显,而在耕作土壤中旱地和水田分布相对均匀。因为前者对应的植被覆盖和群落结构通常更加稳定,植物凋落物与其繁杂的根系能够为土壤提供丰富的 TOC,作为非耕作土壤上下层土壤性质差别大,进一步降低了 TOC 的向下迁移。耕作土壤(旱地和水田)由于深耕、翻耕等行为促进土壤上下层混合,导致耕地土壤 TOC 含量垂向有分布较为均匀<sup>[19]</sup>。此外,耕地上层土壤 TOC 含量低于非耕地,可能是因为深耕、翻耕、施肥等农作活动,疏松了土层结构,一方面促进土壤微生物的生长繁殖和有机质的分解逸散,另一方面可能导致土壤侵蚀加重并携带 TOC 流失;而底层土壤 TOC 含量均值大小比较则表现为:林地、水田和草地高于茶园和裸地,旱地土壤最为贫瘠。

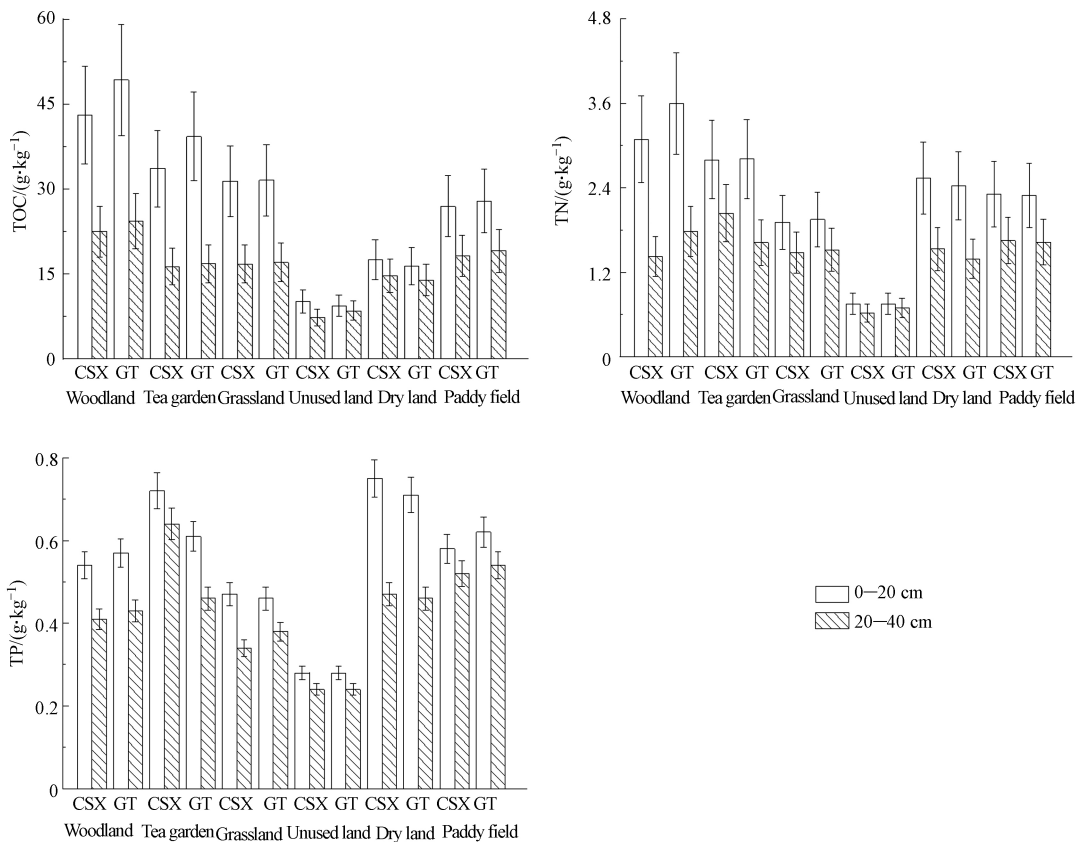


图 4 研究区不同土地利用类型土壤 TOC、TN 和 TP 含量

Fig.4 Soil TOC, TN and TP content of different land use types in the study area

流域对比而言,CSX 流域林地和茶园表层土壤 TOC 含量(均值分别为  $43.06$ 、 $33.60$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )明显低于 GT 流域对应用地类型的表层土壤 TOC 含量( $49.23$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $39.28$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),但其对应的底层土壤 TOC 含量则较为接近( $22.48$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $16.31$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $24.37$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $16.78$   $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。由此可见,较小地理空间范围内,研究区林地和茶园土壤 TOC 含量的差异主要存在于表层土壤。

研究区土壤 TN 含量的垂向分布类似 TOC 呈下降趋势,且表层土壤 TN 含量均值大小排序基本同表层土壤 TOC(图 4),由于红壤丘陵区表层土壤 TN 约有 95% 的 N 存在于有机质中,因此研究区表层土壤 TN 和 TOC 具有很好的同步性和显著相关性一致<sup>[10,27-28]</sup>。然而,底层土壤 TN 含量均值大小在两个流域出现差别,其中 CSX 流域表现为:耕作地高于非耕作地(草地、林地、裸地);但是 GT 流域林地底层土壤的氮素含量高于其他用地类型土壤。其中,非耕地土壤表层 TN 累积更多归结于土壤动植物残体的分解,对于水土保持功能较好的林、草地因其拥有丰富的植被凋落物,随着土壤深度的增加,枯



落物及动植物残体很少进入底层,且土壤底层的营养物被根系吸收用于光合作用而消耗,因此 TN 累积更倾向于土壤表层<sup>[13,19]</sup>;耕地土壤氮素的输入主要依赖于人工氮肥的施用,受翻耕行为影响,容易造成表层土氮肥的转化挥发而损失<sup>[19,25]</sup>;同时受翻耕和氮肥施加强度等差异影响,底层土壤 TN 的渗透和迁移行为容易产生变化.因此,受土壤动植物残体累积、耕作措施以及翻耕和氮肥施加强度等差异影响,底层土壤 TN 的渗透和迁移产生了变化,因此,土壤底层 TN 与 TOC 含量分布规律不相一致.

由图 4 可知,磷素作为沉积性元素,在研究区土壤剖面的降幅较 TOC 和 TN 明显减少,一方面,可能是磷素为沉积性元素,自然来源主要由母质类型和成土条件控制,磷的总量和形态具有一定稳定性;另一方面,磷易吸附于土壤颗粒且停留时间较长,迁移性较弱<sup>[22]</sup>.不同剖面土壤 TP 含量均值整体表现为耕地土壤高于非耕地.其中,林地、草地、裸地的 TP 含量分布较为稳定,而不同茶园受人为干扰波动影响差异较大,水田的深耕和旱地的相对浅耕也导致了土壤剖面 TP 含量的垂向变动.由此可见,不同生源要素性质、土壤母质、植被覆盖、植被类型、群落结构、耕作方式、化肥施用等多方面因素都可能造成土壤 TOC、TN 和 TP 含量的空间差异.

### 2.3.2 土壤养分流失量差异

研究区土壤侵蚀程度以微度为主,采样地土壤年均流失厚度最大值为 0.14 cm.考虑土壤侵蚀的厚度较少,以表层土壤(0—20 cm)养分流失量来表征其年均养分流失量,更能体现研究区近期土壤养分流失的实际情况.由表 4 可以看出,不同土地利用类型土壤年均养分流失量存在几倍甚至几十倍的数量差距<sup>[13,19]</sup>.事实上,土壤养分流失量一方面与土壤侵蚀量紧密相关,另一方面还取决于土壤养分含量的高低<sup>[6,22]</sup>.只有同时满足土壤侵蚀量高(低)且对应地类土壤养分丰富(贫乏)的前提,与之对应的土壤养分流失量才高(低),否则视具体的自然和人为因素影响而异.

表 4 研究区不同土地利用类型土壤养分流失量

Table 4 Soil nutrient loss of different land use types in the study area

土地利用类型 Land use type	研究区 Research area	TOC/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		TN/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		TP/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	
		范围 Range	平均值 Mean value	范围 Range	平均值 Mean value	范围 Range	平均值 Mean value
林地 Woodland	CSX	0.14—16.16	3.71	0.01—1.19	0.26	0—0.18	0.05
	GT	0.09—5.78	2.52	0.01—0.43	0.18	0—0.06	0.03
茶园 Tea garden	CSX	20.61—66.63	38.16	1.72—5.55	3.18	0.53—1.33	0.81
	GT	3.21—35.76	14.29	0.25—2.55	1.02	0.05—0.49	0.22
草地 Grassland	CSX	2.83—9.27	5.37	0.20—0.46	0.30	0.04—0.12	0.08
	GT	2.02—6.69	4.82	0.13—0.38	0.30	0.03—0.10	0.07
裸地 Unused land	CSX	11.36—14.75	13.28	0.91—1.01	0.97	0.31—0.43	0.37
	GT	7.47—14.09	10.82	0.67—0.91	0.87	0.21—0.40	0.33
旱地 Dry land	CSX	2.58—9.38	6.70	0.33—1.70	1.07	0.10—0.48	0.30
	GT	3.48—9.45	5.98	0.44—1.57	0.91	0.12—0.56	0.28
水田 Paddy field	CSX	-0.02—0.23	0.13	0—0.02	0.01	0—0.01	0.01
	GT	0—0.25	0.16	0—0.02	0.01	0—0.01	0.01

具体而言,茶园土壤 TOC 和 TN 流失最为突出,裸地和旱地较严重,草地和林地次之,水田最低. CSX 流域茶园土壤 TP 年均流失量(范围为 0.53—1.33 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)也远高于其他用地(最大值 0.48 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>);而 GT 流域 TP 流失量均值与土壤侵蚀量均值排序一致.相比而言,茶园土壤养分流失与侵蚀是研究区重点关注的土地利用类型.其中,CSX 流域茶园土壤 TOC、TN、TP 流失量均值分别为 38.16、3.18、0.81 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,而 GT 流域茶园土壤对应为 14.29、1.02、0.22 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>.虽然 CSX 流域茶园表层土壤 TOC 和 TN 含量均值要略低于 GT 流域的茶园对应养分均值,但是前者土壤侵蚀量均值为 GT 流域的 3.2 倍,所以,茶园在两个流域内的土壤养分流失量均值存在着几倍的数量关系(CSX 流域茶园土壤 TOC、TN 和 TP 流失量均值分别为 GT 流域茶园的 2.67、3.12、3.64 倍).这与茶园选址、种植规模和密

度、茶农管理等多方面差异化引起的土壤侵蚀和养分累积差异有关<sup>[9]</sup>。由此可见,人为干扰越强的CSX流域茶园土壤碳氮磷随其土壤侵蚀输出潜力大。因此,红壤丘陵区茶园的土壤侵蚀和养分流域受人为活动影响大,应加强敏感区域茶园的生态管理。

### 3 结论(Conclusion)

(1)研究区耕地和非耕地土壤剖面中<sup>137</sup>Cs比活度分布呈现明显的差异。在非耕地中<sup>137</sup>Cs比活度随深度的增加呈指数递减分布。在耕地中,由于受到人类耕作活动的影响,<sup>137</sup>Cs比活度在土壤剖面中呈现相对均一分布的特征。

(2)研究区土壤<sup>137</sup>Cs含量和侵蚀量分布受到土地利用类型及其流域间土地利用强度差异的共同影响。其中,裸地的土壤侵蚀量大,水田的土壤侵蚀量最低;林地和茶园的土壤侵蚀量空间变异大。整体而言,研究区土壤侵蚀以微度为主。

(3)土壤TOC、TN、TP含量具有不同程度的表聚现象,前两者主要来源于植被凋落物,非耕地更为丰富、耕地次之,裸地最为贫瘠;后者因人为的补偿作用,耕地含量高于非耕地(除茶园外)。受翻耕和施肥等人为干扰的差异影响,底层土壤养分含量变异性更大。

(4)茶园土壤的TOC和TN流失最为突出,裸地和旱地较严重,草地和林地次之,水田最低(CSX流域TP流失规律相同);但GT流域茶园TP流失量要次于裸地和旱地。其中,人为干扰越强的茶园土壤侵蚀和养分输出潜力大,是研究区重点关注的土地利用类型。

### 参考文献(References)

- [ 1 ] FERREIRA C S S, SEIFOLLAHI-AGHMIUNI S, DESTOUNI G, et al. Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150106.
- [ 2 ] TAN Z L, LEUNG L R, LI H Y, et al. A substantial role of soil erosion in the land carbon sink and its future changes [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2642-2655.
- [ 3 ] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 2013.
- [ 4 ] LIN H L, ZHAO Y T. Soil erosion assessment of alpine grassland in the source park of the Yellow River on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 9: 771439.
- [ 5 ] CHEN J, XIAO H B, LI Z W, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 132: 109-114.
- [ 6 ] NIU X Y, WANG Y H, YANG H, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrients in Dianchi Lake watershed, China [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(1): 103-111.
- [ 7 ] WANG Y X, RAN L S, FANG N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2018, 167: 257-265.
- [ 8 ] WEN X, ZHEN L. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review [J]. *Environmental Development*, 2020, 34: 100493.
- [ 9 ] YE H M, HUA W P, HUANG C C, et al. Quantitative evaluation of soil erosion in the upper Minjiang River Basin of China based on integration of geospatial technologies using RUSLE [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(5): 3419-3429.
- [ 10 ] 刘丹, 丁明军, 文超, 等. 赣南红壤丘陵区<sup>137</sup>Cs示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 62-67.  
LIU D, DING M J, WEN C, et al. Effects of soil erosion on soil nutrient elements based on <sup>137</sup>Cs tracer in the red soil hilly region of southern Jiangxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 62-67(in Chinese).
- [ 11 ] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 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.  
LIANG Y, ZHANG B, PAN X Z, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for hilly region in the Southern China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 22-27(in Chinese).
- [ 12 ] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 等. 中国生态环境脆弱区范围界定 [J]. *生物多样性*, 2015, 23(6): 725-732.  
LIU J H, ZOU C X, GAO J X, et al. Location determination of ecologically vulnerable regions in China [J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(6): 725-732(in Chinese).
- [ 13 ] 张燕, 张洪, 彭补拙, 等. 不同土地利用方式下农地土壤侵蚀与养分流失 [J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 23-26,31.  
ZHANG Y, ZHANG H, PENG B Z, et al. Soil erosion and nutrient loss of various land use patterns [J]. *Bulletin of Soil and Water*

- Conservation*, 2003, 23(1): 23-26,31 (in Chinese).
- [14] 朱秀端. 闽北地区水土流失动态变化及其驱动机制研究 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(5): 164-170.  
ZHU X D. Dynamic changes and driving mechanisms of soil and water loss in north Fujian [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(5): 164-170 (in Chinese).
- [15] ZHANG X B, HIGGITT D L, WALLING D E. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1990, 35(3): 243-252.
- [16] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰, 等.  $^{137}\text{Cs}$ 示踪法土壤侵蚀量估算的本底值问题 [J]. *地理研究*, 2010, 29(7): 1171-1181.  
LIU Y, LV Y H, FU B J, et al. Reference value of  $^{137}\text{Cs}$  tracing technique in soil loss estimation: A spatial variation analysis [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(7): 1171-1181 (in Chinese).
- [17] 高明, 刘磊, 杨九东, 等. 应用 $^{137}\text{Cs}$ 技术研究江西余江县小流域不同耕地上的土壤侵蚀 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 929-933.  
GAO M, LIU L, YANG J D, et al. Estimation of soil erosion rates on different cultivated land use using  $^{137}\text{Cs}$  technique in the catchment, Yujiang County, Jiangxi Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 929-933 (in Chinese).
- [18] 王俊杰, 苏正安, 周涛, 等.  $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 双核素示踪“三北”防护林区退耕前后坡地土壤侵蚀变化 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(24): 64-72.  
WANG J J, SU Z G, ZHOU T, et al.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  tracing of soil erosions on cultivated and reforested slope lands in Three North-Shelter Forest Region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24): 64-72 (in Chinese).
- [19] 王永平, 周子柯, 滕昊蔚, 等. 滇南小流域3种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 11-18.  
WANG Y P, ZHOU Z K, TENG H W, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient losses in three land use patterns in the small watershed of southern Dianchi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 11-18 (in Chinese).
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.  
LU R K. Methods for chemical analysis of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese).
- [21] 张相, 李肖, 林杰, 等. 南方红壤丘陵区侵蚀沟道内土壤团聚体及有机碳特征 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 115-123.  
ZHANG X, LI X, LIN J, et al. Characteristics of soil aggregates and organic carbon in eroded gully in red soil region of Southern China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 115-123 (in Chinese).
- [22] 方海燕, 盛美玲, 孙莉英, 等.  $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 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.  
FANG H Y, SHENG M L, SUN L Y, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  to trace the impact of soil erosion on soil organic carbon at a slope farmland in the black soil region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1856-1862 (in Chinese).
- [23] 华璐, 张志刚, 李俊波, 等. 基于土壤 $^{137}\text{Cs}$ 监测的土壤侵蚀与有机质流失: 以密云水库为例 [J]. *核农学报*, 2005, 19(3): 208-213.  
HUA L, ZHANG Z G, LI J B, et al. Soil erosion and organic matter loss by using fallout  $^{137}\text{Cs}$  as tracer in Miyun reservoir valley [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005, 19(3): 208-213 (in Chinese).
- [24] 陈洋, 张海东, 于东升, 等. 南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 150-157.  
CHEN Y, ZHANG H D, YU D S, et al. Effects of vegetation structure types and rainfall patterns on soil and water loss of understory vegetation in red soil areas of South China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 150-157 (in Chinese).
- [25] 牛晓音, 王延华, 杨浩, 等. 滇池双龙流域不同土地利用方式下土壤侵蚀与土壤养分分异 [J]. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 1043-1050.  
NIU X Y, WANG Y H, YANG H, et al. Effects of different land uses on soil erosion and soil nutrient variability in the shuanglong catchment of Dianchi watershed [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(9): 1043-1050 (in Chinese).
- [26] 王库, 史学正, 于东升. 红壤丘陵区不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征 [J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(5): 697-701.  
WANG K, SHI X Z, YU D S. Soil erosion characteristics under different land use types in hilly red soil regions [J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2006, 28(5): 697-701 (in Chinese).
- [27] BOUJILA A, OMAR Z, MAGHERBI G. Soil aggregation, aggregate-associated organic carbon, and total nitrogen under different land use in Regosols of coastal arid lands in Gabes, Tunisia [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(18): 1-12.
- [28] GELAW A M, SINGH B R, LAL R. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188: 256-263.