

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.05.028

翁倩, 袁大刚, 余星兴, 等. 稻田改为茶园后土壤铁形态与磁学性质演变特征. 土壤, 2020, 52(5): 1076–1082.

## 稻田改为茶园后土壤铁形态与磁学性质演变特征<sup>①</sup>

翁倩, 袁大刚\*, 余星兴, 蒙凤丹, 母媛, 王昌全

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 以四川省雅安市名山区稻田及由稻田改造的茶园土壤为研究对象, 采用铁形态连续分级提取与环境磁学技术相结合的方法, 分析铁氧化物与磁学特征随土壤利用方式及植茶时间变化而变化的特征。结果表明: 稻田及不同植茶年限(3、6、10 a)茶园土壤 110 cm 土体各形态铁含量均表现为可还原铁(Red-Fe)>可氧化态铁(Oxi-Fe)>酸溶态铁(Acid-Fe); 稻田改为茶园以及随着植茶年限延长, 表层(0~10 cm)及亚表层(10~20 cm)土壤 Acid-Fe、Oxi-Fe 含量明显增加, 而整个土体 Red-Fe 含量降低。稻田改为茶园 3 a 后, 0~30 cm 土壤表现出质量磁化率(MS)、饱和等温剩磁(SIRM)、软剩磁(IRMs)升高, 而硬剩磁(IRMh)降低; 随着植茶年限的延长, 土体总体表现出各磁性参数均降低的趋势, 亚铁磁性矿物主导土壤磁性特征变化。稻田改为茶园后土壤逐渐酸化且有机质积累, 使亚铁磁性矿物不稳定, 进一步导致 Red-Fe 溶解并向 Acid-Fe、Oxi-Fe 转化, 且随植茶年限的延长, 部分铁氧化物结晶度会增加。

**关键词:** 稻田; 茶园; 铁形态; 磁学特征; 连续提取

**中图分类号:** S153 **文献标志码:** A

## Evolution of Iron Morphology and Magnetism in Soil Converted from Paddy Field to Tea Garden

WENG Qian, YUAN Dagang\*, YU Xingxing, MENG Fengdan, MU Yuan, WANG Changquan

(College of Resource, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** Taking the paddy field converted to tea garden in Mingshan District of Yaan City in Sichuan Province as the study objects, and the continuous extraction and environmental magnetic techniques were used to analyze the changes of iron (Fe) forms and magnetic parameters with tea-planting year. The results showed that all soil pedons (0–110 cm) were in order of reducible iron (Red-Fe) > oxidizable iron (Oxi-Fe) > acid-soluble iron (Acid-Fe). Acid-Fe and Oxi-Fe in 0–10 cm and 10–20 cm layers increased significantly when paddy field converted to tea garden and with tea-planting year, while Red-Fe decreased in all soil pedons. Three years after paddy field converted to tea garden, soil magnetic susceptibility (MS), saturated isothermal remanence (SIRM) and soft remanence (IRMs) increased but hard remanence (IRMh) decreased. However, with the increase of tea-planting years, all soil magnetic parameters decreased, and ferromagnetic minerals dominated the change of soil magnetic characteristics. After paddy field was converted to tea garden, soil was gradually acidified and organic matter was accumulated, which made ferromagnetic minerals unstable, and further led to the transformation of Red-Fe into acid-Fe and Oxi-Fe, while the crystallinity of some iron oxides increased with the increase tea-planting year.

**Key words:** Paddy field; Tea garden; Iron species; Magnetic characteristics; Continuous extraction

铁元素在植物体内许多重要的代谢反应中发挥关键作用<sup>[1]</sup>, 也是联结土壤重要物质循环过程的枢纽。铁氧化物在土壤中的含量和活性较高, 其形态和性质易随环境条件的变化而转化<sup>[2-3]</sup>。川西地区稻田改造成茶园(稻改茶)改变了土壤水分状况<sup>[4]</sup>, 土壤腐

殖质总碳、腐殖酸碳和富里酸碳升高<sup>[5]</sup>, 而 pH 下降<sup>[6]</sup>。茶树在生长过程中其凋落物归还到土壤会使土壤酚类物质随植茶年限的增加而积累<sup>[7]</sup>, 并且茶树根系会向土壤中分泌大量的低分子量有机酸<sup>[8]</sup>。植物多酚与低分子量有机酸均能通过自身解离配体与土壤中的

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41372130)和国家科技基础性工作专项项目(2014FY110200A12)资助。

\* 通讯作者(690654034@qq.com)

作者简介: 翁倩(1993—), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源可持续利用研究。E-mail: gyqrq1234@163.com

铁络合<sup>[9]</sup>和通过解离质子与铁作用<sup>[10]</sup>,具有邻位羟基的多酚对高价铁还具有还原作用<sup>[11-12]</sup>。稻田改为茶园及随茶园植茶年限的延长,川西漂洗水稻土亚铁、有效铁含量发生变化<sup>[4,13]</sup>,茶树-土壤系统铁的生物地球化学循环受到影响<sup>[14]</sup>。以往对稻田、茶园土壤铁形态研究多基于化学选择溶解法<sup>[15-16]</sup>,而连续提取法蕴含更丰富的铁形态转化信息;系统的土壤磁学性质研究可以较好地解决时间序列水稻土中铁形态演变<sup>[15,17-18]</sup>,但茶园土壤局限于简单的质量磁化率研究<sup>[19]</sup>,无法提供土壤氧化铁矿物转化更丰富的信息<sup>[20]</sup>。因此,本研究选取四川省雅安市名山区稻田及由稻田改造的不同植茶年限茶园土壤,通过 BCR 连续提取法与环境磁学技术相结合,联合分析土壤各形态铁氧化物分布特征,以探讨茶树栽培条件下土壤铁氧化物转化途径以及磁学性质动态演变特征,以期深化对土地利用/覆被变化(稻田改为茶园)条件下土壤铁转化规律的认识,并为当地土壤管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

四川省雅安市名山区(103°02′~103°23′E,29°58′~30°16′N)位于成都平原西南边缘,属亚热带季风性湿润气候,年均气温 15.4℃,年均降水量 1 500 mm,年均无霜期 298 d,年均日照 1 018 h,年均相对湿度 82%;地形以丘陵、台地为主;土壤类型主要有漂洗水稻土、黄壤和酸性紫色土。由于农业结构调整,大部分漂洗水稻土因适于种植茶树而被改造为能获取更高经济效益的茶园。

### 1.2 样品采集与分析

在四川名山区稻田改茶园集中分布区地形(老冲积台地,即第三级阶地)、母质(第四纪更新统沉积物-冰碛物及冰水沉积物)、土壤类型(漂洗水稻土)一致的部位,于 2010 年 5 月,选择长期种稻(记为 IID-2010)的稻田和由种稻改为植茶 6 a(记为 IIC6-2010)的茶园(之前也为长期稻田),每个样地再选取 3 个代表性采样点作为 3 次重复,用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的不锈钢土钻按 10 cm 间距向下采集土样,至距土表 110 cm 处,即每个采样点 11 个样品,每个样地共 33 个样品;2014 年 5 月分别在同一地块再次在靠近 2010 年采样位置处按相同方式采集土样,原先未植茶的稻田已改种茶树,且植茶 3 a(记为 IID-2014);原先已植茶 6 a 的茶园一直保持种茶,即植茶 10 a(记为 IIC6-2014)。样品风干后磨细,分别过 10、60 和 100 目尼龙筛,装袋储存以测土壤各形态铁以及磁学参数。

土壤样品采用 BCR 法<sup>[21]</sup>进行酸溶态铁(Acid-Fe)、可氧化态铁(Oxi-Fe)和可还原态铁(Red-Fe)的连续分级提取。样品各形态铁含量均用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定。BCR 法连续分级提取的 Acid-Fe、Red-Fe 及 Oxi-Fe 的总和被认为是能被植物吸收利用的土壤有效铁( $Fe_a$ )<sup>[22]</sup>,即  $Fe_a = \text{Acid-Fe} + \text{Red-Fe} + \text{Oxi-Fe}$ 。

土壤低频磁化率(0.47 kHz)和低频磁化率(4.7 kHz)采用 Bartington MS-2B 型磁化率仪分别测定,连续测定 2 次取其平均值,并计算质量磁化率(MS)、频率磁化率( $\chi_{fd}$ ,  $\chi_{fd} = [\chi_{fd} - \chi_{hd}] / \chi_{fd} \times 100$ )。非滞后剩磁(ARM)应用 Molspin 交变退磁仪退磁,所用交变磁场峰值为 100 mT,直流磁场为 0.04 mT,以 Minispin 旋转磁力仪测定,并计算 ARM 磁化率( $\chi_{ARM}$ );等温剩磁(IRM)应用 Molspin 脉冲磁化仪在 1 000、-20、-100、-300 mT 磁场中先后磁化,再利用 Minispin 旋转磁力仪测定等温剩磁。1 000 mT 下的 IRM 称为饱和等温剩磁(SIRM),20 mT 条件下的 IRM 称为软剩磁( $IRM_s$ );硬剩磁( $IRM_h$ )、退磁参数( $S_{-100mT}$ ,%)分别由公式  $IRM_h = (SIRM + IRM_{-300mT}) \times 0.5$ 、 $S_{-100mT}(\%) = [(SIRM - IRM_{-100mT}) / (2 \times SIRM)] \times 100$  算得。上述磁性参数在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成,其意义可参阅文献[23]。

### 1.3 数据分析

数据处理及相关分析在 Excel 2016、SPSS 20 平台下完成。

## 2 结果

### 2.1 稻田改为茶园土壤铁形态变化特征

由表 1 可知,稻田及不同植茶年限(3、6、10 a)土壤 110 cm 土体各形态铁含量平均值均表现为 Red-Fe>Oxi-Fe>Acid-Fe。稻田改为茶园植茶 3 a 后,整个土壤剖面各形态铁含量均有所降低,其中 Red-Fe 含量降低最为明显,减少 0.17 g/kg,三者变异系数均变大,表明对剖面各形态铁均有影响。植茶 6 a 茶园土壤继续植茶 4 a 后,Acid-Fe 含量显著增加 2.60 mg/kg,Red-Fe 含量降低 0.12 g/kg,Oxi-Fe 含量降低 0.01 g/kg,三者变异系数变化不大。

从图 1A~D 可知,各形态铁含量在 IID 地块 0~30 cm 土层剧烈下降,稻田改为茶园植茶 3 a 后,0~10 cm 土层 Acid-Fe 含量增加 4.37 mg/kg,而 10~30 cm 土层表现为下降趋势,其中 10~20 cm 土层下降达 7.27 mg/kg(图 1A);Red-Fe 含量曲线表现为整体向左平移,其中 10~20 cm 土层下降量最大,为 0.64 g/kg

表 1 不同植茶年限土壤剖面各形态铁描述性统计特征  
Table 1 Statistical characteristics of various Fe forms in soils of different tea-planting years

铁形态	统计值	稻田: IID-2010	植茶 3 a: IID-2014	植茶 6 a: IIC6-2010	植茶 10 a: IIC6-2010
Acid-Fe (mg/kg)	范围	1.20 ~ 21.28	1.18 ~ 24.73	3.48 ~ 47.65	4.61 ~ 54.20
	平均值	5.35 c	5.01 c	14.25 b	16.85 a
	变异系数(%)	142	150	105	98
Red-Fe (g/kg)	范围	0.07 ~ 1.91	0.04 ~ 1.81	0.22 ~ 1.51	0.25 ~ 1.39
	平均值	0.50 ab	0.33 b	0.70 a	0.58 a
	变异系数(%)	141	178	77	70
Oxi-Fe (g/kg)	范围	0.09 ~ 0.38	0.08 ~ 0.39	0.16 ~ 0.51	0.18 ~ 0.61
	平均值	0.17 b	0.14 b	0.31 a	0.30 a
	变异系数(%)	64	71	45	48

注: 同行不同小写字母表示同一形态铁含量在不同植茶年限间差异显著( $P < 0.05$ )。

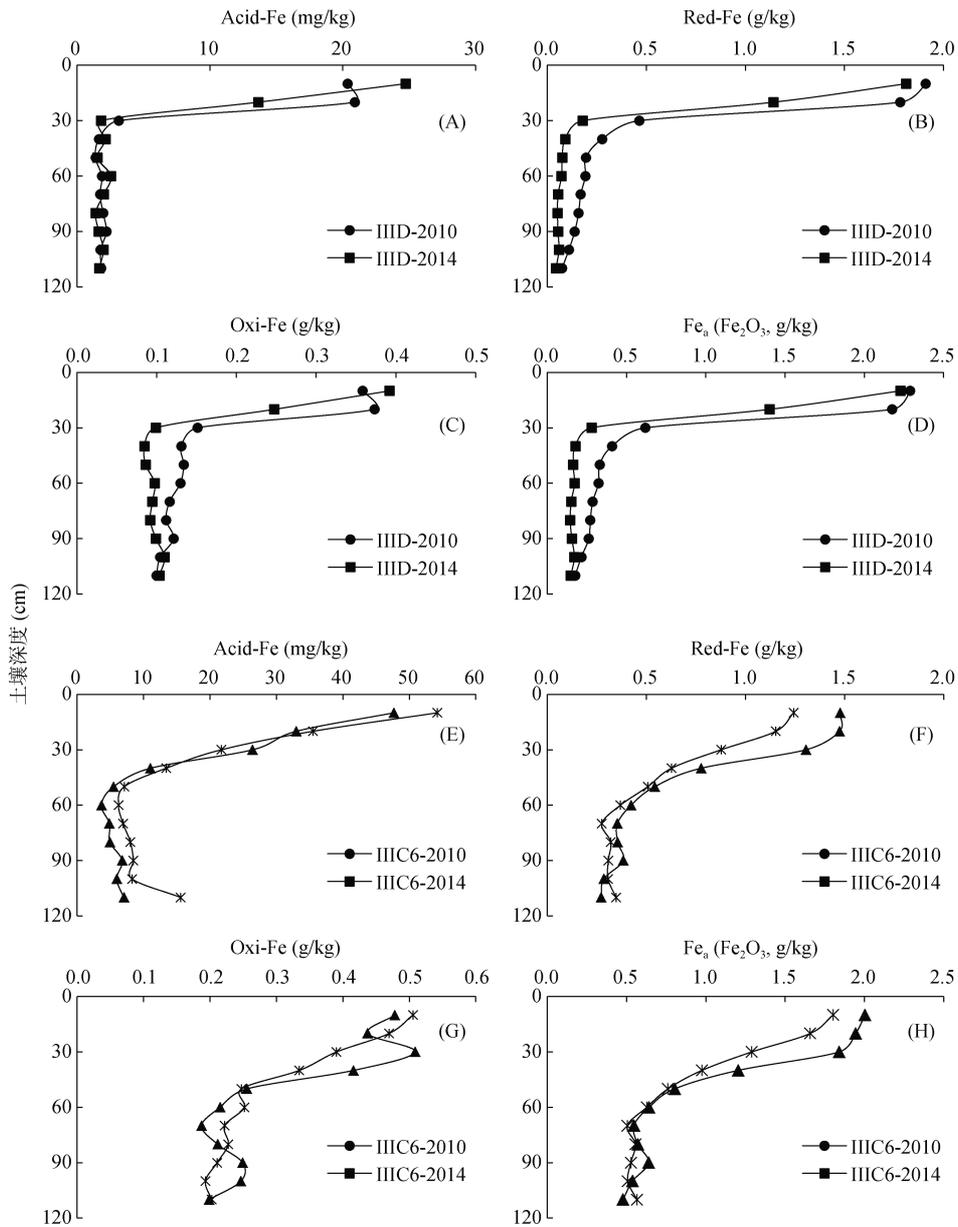


图 1 不同植茶年限土壤各形态铁含量特征

Fig.1 Profile distribution of various Fe forms in soils of different tea-planting years

(图 1B); Oxi-Fe 含量在 0~10 cm 土层升高, 而在 10~90 cm 土层表现为下降, 其中在 10~20 cm 土层降低最大, 为 0.12 g/kg, 此变化趋势与 Acid-Fe 含量变化情况相同(图 1C);  $Fe_a$  含量整体呈现降低的趋势, 10~20 cm 土层表现最突出, 下降 0.78 g/kg。综上, IID 地块各形态铁分布表现为稻田经过 3 a 植茶后, 有促进表层土壤 Red-Fe 向 Acid-Fe、Oxi-Fe 转化的趋势, 10 cm 以下土层则表现出 3 种形态铁含量均降低, 致使  $Fe_a$  含量表现出减少的趋势(图 1D)。

由图 1 E~H 可知, IIC6 地块土壤剖面各形态铁含量随土壤深度的增加表现为降低的趋势。IIC6 地块继续植茶 4 a 后, Acid-Fe 含量在 0~30 cm 土层先增后减, 与 IID 地块表现相似, 30 cm 以下土层整体表现为增加的趋势(图 1E); Red-Fe 含量在 0~90 cm 土层与 IID 地块表现相似(图 1F); Oxi-Fe 在 0~20 cm 土层含量增加, 其中 0~10 cm 土层与 IID 地块表现趋势相同, 20~50 cm 土层为下降趋势; Oxi-Fe 含量在 0~30 cm 土层表现规律与 Acid-Fe 含量表现相同(图 1G)。  $Fe_a$  含量在 0~40 cm 土层之间表现为下降, 其中 20~30 cm 土层下降值最大, 为 0.55 g/kg。综上, 植茶 6 a 茶园继续植茶 4 a 后, 土壤表层与亚表层表现为 Red-Fe 向 Acid-Fe、Oxi-Fe 转化的趋势, 但 20~30 cm 土层表现为 3 种形态铁含量均降低,  $Fe_a$  含量呈减少趋势。

稻田改为茶园以及随着植茶年限延长, IID 与 IIC6 地块 0~90 cm 土层 Red-Fe 含量均表现为下降, 两者 0~10 cm 土层 Acid-Fe 与 Oxi-Fe 含量的变化均表现为升高, IID 地块 Acid-Fe 与 Oxi-Fe 含量在 10~20 cm 土层变为下降趋势, IIC6 地块 Acid-Fe 与 Oxi-Fe 含量在 20~30 cm 土层出现下降趋势, 表明 IID 与 IIC6 地块随植茶年限增加出现相似规律, 植茶会使表层土壤 Red-Fe 向 Acid-Fe 与 Oxi-Fe 转化, 并且会随着年限的增加向下移动。Acid-Fe 含量表现为随植茶年限的增加而增加, 且在表层与亚表层尤为明显, 土壤 Red-Fe 含量表现为随植茶时间的延长, 其含量相对亏缺, 并且表层与亚表层变化更快, 向下移动。综合上述分析可知, 表层土壤 Red-Fe 含量呈现稻田(IID-2010)>植茶 3 a(IID-2014)>植茶 6 a(IIC6-2010)>植茶 10 a(IIC6-2014)的特征, 而表层土壤 Oxi-Fe 含量呈现稻田<植茶 3 a<植茶 6 a<植茶 10 a 的规律。同一地块  $Fe_a$  含量整体表现为稻田>植茶 3 a, 植茶 6 a>植茶 10 a, 表层土壤呈现稻田>植茶 3 a>植茶 6 a>植茶 10 a, 剖面规律与 Red-Fe 含量极为相似。由此可知, 稻田改为茶园后土壤中可利用铁会相对减

少, 并随着植茶年限延长而降低。

## 2.2 稻田改为茶园土壤磁学性质变化特征

由表 2 可知, 不同植茶年限土壤 110 cm 土体 MS 值(单位:  $\times 10^{-8} m^3/kg$ )变化不大, IID 与 IIC6 地块 SIRM 值均有所下降, IID 地块由 259 降为 233, IIC6 地块由 273 降为 244(单位:  $\times 10^{-6} Am^2/kg$ ,  $IRM_h$ 、 $IRM_s$  同)。IID 地块土体  $IRM_h$  降低 13, IIC6 地块  $IRM_h$  变化不大。IID 与 IIC6 地块土体  $IRM_s$  均有所降低, 分别下降 11、6。

由图 2 可知, 不同植茶年限土壤随土层深度增加, MS、SIRM、 $IRM_h$ 、 $IRM_s$  总体呈现降低的趋势; 同一地块 30~110 cm 土体的 MS、SIRM、 $IRM_h$ 、 $IRM_s$  在 2014 年都明显小于 2010 年, 磁学性质在 0~30 cm 土层产生较大差异。由图 2A 可知, IID 地块植茶 3 a 后 MS 在 0~20 cm 土层明显升高, 改变了该地块在两个采集时间土壤剖面 MS 的整体变化趋势, 20 cm 以下土层则表现为下降趋势。由图 2E 可知, IIC6 地块继续植茶 4 a 后, MS 在 0~60 cm 土层明显降低, 土壤剖面 MS 曲线整体向左平移。

随着植茶年限的延长, MS 在 0~20 cm 土层表现为 IIC6 地块明显小于 IID 地块。SIRM 在 IID 地块表层增加 212, 但表层以下土壤为明显的降低趋势; IIC6 地块 0~70 cm 土层 SIRM 均变小, 与 MS 表现类似的特征。 $IRM_h$  在 IID 地块的 0~30、50~70 cm 土层表现下降趋势, 而在 30~50 cm 土层呈增加特征; IIC6 地块  $IRM_h$  的变化与 IID 地块同步。 $IRM_s$  在 IID 地块的 0~20 cm 土层增大, 在 20 cm 以下土层则为减小; 而 IIC6 地块  $IRM_s$  在 0~70 cm 土层之间均表现为减小。同一时间采集的 0~20 cm 土壤  $IRM_s$  表现为植茶 6 a>稻田, 植茶 3 a>植茶 10 a。

由表 3 可以看出, 研究土壤 MS 与 SIRM 呈极显著正相关关系, 其次为  $IRM_s$ , 各形态铁中, MS 与 Red-Fe 含量相关系数最大(为 0.88), 即联系最紧密。SIRM 与 Red-Fe 含量也为极显著正相关, 相关系数达 0.94。

## 3 讨论

稻田改为茶园植茶 3 a 后土壤剖面 Red-Fe、Oxi-Fe、Acid-Fe 含量均有所降低, 主要是因为水田改造为茶园后季节性淹水条件消失, 土壤 Eh 升高, pH 下降, 致使铁的迁移转化过程受到影响。植茶 6 a 茶园继续植茶 4 a 后 Red-Fe 含量降低而 Acid-Fe 含量增加, 表明随着植茶年限增加, 茶树枯枝落叶还田促进土壤腐殖质积累<sup>[5]</sup>, 还原性物质总量增加, 随着 pH

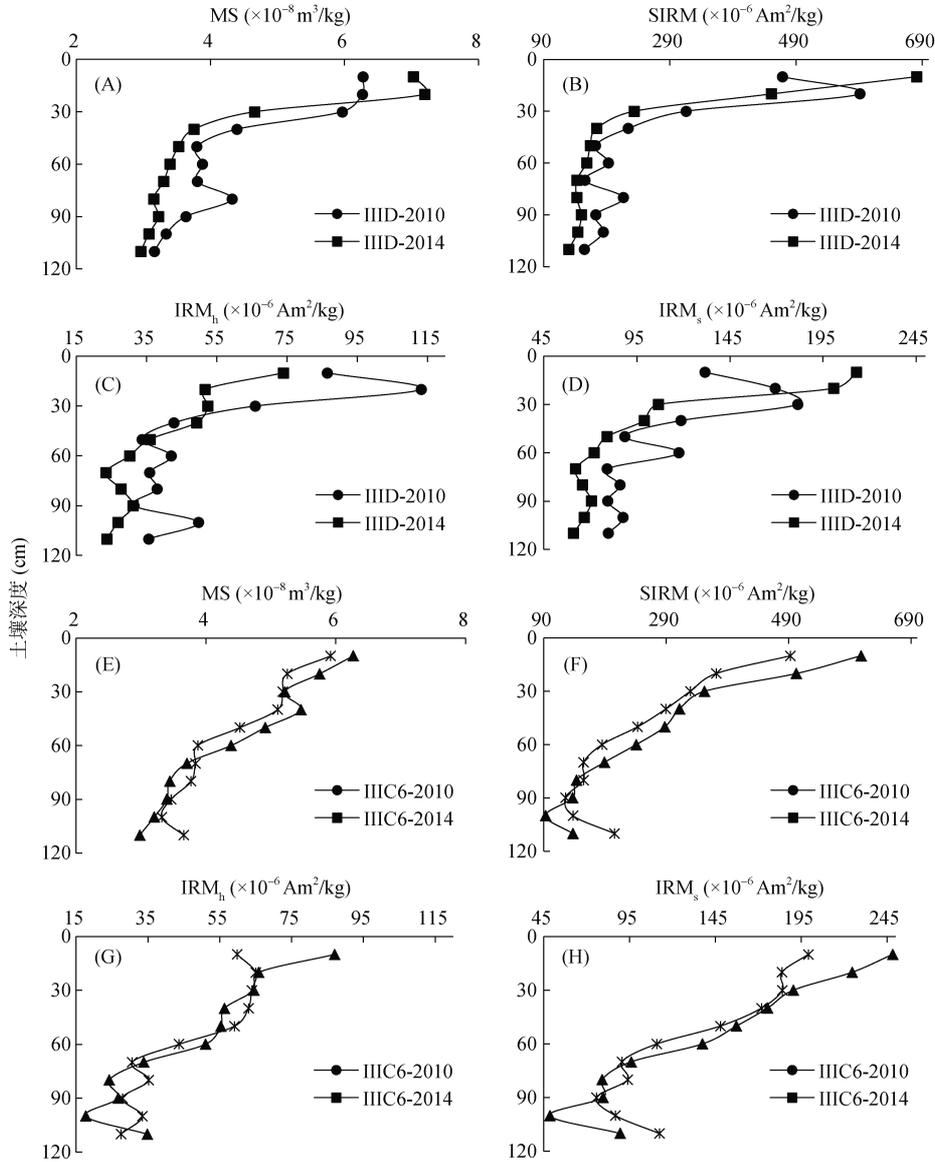


图 2 不同植茶年限土壤剖面磁性性质变化特征

Fig. 2 Profile distribution of magnetic parameters in soils of different tea-planting years

表 2 不同植茶年限土壤剖面各磁性参数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of magnetic parameters of soils of different tea-planting years

磁性参数	统计值	稻田: IID-2010	植茶 3 a: IID-2014	植茶 6 a: IIC6-2010	植茶 10 a: IIC6-2010
MS ( $\times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ )	范围	3 ~ 6	3 ~ 8	3 ~ 6	3 ~ 6
	平均值	4	4	4	4
	变异系数(%)	27	39	27	22
SIRM ( $\times 10^{-6} \text{Am}^2/\text{kg}$ )	范围	123 ~ 605	125 ~ 681	83 ~ 609	122 ~ 493
	平均值	259	233	273	244
	变异系数(%)	57	76	63	52
IRM <sub>h</sub> ( $\times 10^{-6} \text{Am}^2/\text{kg}$ )	范围	21 ~ 116	17 ~ 74	13 ~ 95	19 ~ 71
	平均值	52	39	47	46
	变异系数(%)	54	51	58	47
IRM <sub>s</sub> ( $\times 10^{-6} \text{Am}^2/\text{kg}$ )	范围	36 ~ 225	58 ~ 242	42 ~ 249	69 ~ 201
	平均值	111	100	139	132
	变异系数(%)	50	59	54	41

表 3 土壤剖面各形态铁与磁学性质的相关关系  
Table 3 Correlation between various Fe forms and magnetic parameters

	MS	SIRM	IRM <sub>h</sub>	IRM <sub>s</sub>	Acid-Fe	Red-Fe	Oxi-Fe	Fe <sub>a</sub>
MS	1							
SIRM	0.93**	1						
IRM <sub>h</sub>	0.85**	0.88**	1					
IRM <sub>s</sub>	0.91**	0.89**	0.82**	1				
Acid-Fe	0.67**	0.79**	0.63**	0.78**	1			
Red-Fe	0.88**	0.94**	0.84**	0.82**	0.81**	1		
Oxi-Fe	0.71**	0.76**	0.67**	0.81**	0.89**	0.86**	1	
Fe <sub>a</sub>	0.84**	0.91**	0.75**	0.72**	0.73**	0.87**	0.61**	1

注: \*\*表示在  $P < 0.01$  水平(双侧)上显著相关。

降低<sup>[6]</sup>, 各种沉淀态亚铁的溶解度增大<sup>[24]</sup>, 可溶态铁含量升高。

稻田改为茶园以及植茶年限的不同使各形态铁在 0 ~ 30 cm 土层之间重新分配。有研究表明, 随植茶年限的延长, 各土层土壤的 pH 会呈现不同程度的下降, 表层酸化较为明显, 并且土壤有机质、总酚和水溶性酚含量均会增加, 但随着土层的加深而减少<sup>[6]</sup>。稻田改为茶园土壤表层 Acid-Fe 含量的增加, 主要因为土壤酚类物质的质子作用与土壤 pH 降低促进了羟基表面络合作用使更多的铁溶解, 表明茶树种植有利于耕层土壤 Acid-Fe 的积累, 且随植茶年限的延长, Acid-Fe 还可以向下迁移。Oxi-Fe 主要为与有机质结合形态的铁, 随着植茶年限的延长, 土壤有机质不断积累, 且茶树根系与茶叶凋落物中的酚类具有酚羟基, 具有络合作用, 使表层土壤 Oxi-Fe 含量随植茶年限的延长而增加。但随着植茶年限的延长, 20 cm 以下土壤会出现 Oxi-Fe 含量下降的趋势, 与 Acid-Fe 含量表现相同, 表明茶树种植初期 Acid-Fe 与 Oxi-Fe 有表聚现象。Red-Fe 包括无定形和弱晶质的铁氧化物, 在还原条件下稳定性较差, 稻田改为茶园后随着植茶年限的增加, 土壤板结加重, 还原性增强, 酸化加剧, 且酚类和有机酸增加, 络合、还原作用使 Red-Fe 不稳定, 易于向其他形态转化。稻田改为茶园以及植茶年限的延长均使土壤 Fe<sub>a</sub> 含量降低, 可能与大量氮磷肥不合理施用能显著降低 Fe<sub>a</sub> 含量<sup>[25]</sup>且促进土体内铁的淋溶<sup>[26]</sup>有关, 也与铁元素在茶叶富集<sup>[27]</sup>有关。

茶树种植使土壤剖面磁学性质分异变大, 该区植茶土壤由于漂洗作用而使亚铁磁性矿物含量总体较少<sup>[15]</sup>, MS 整体较低。稻田改茶园植茶 3 a 后 0 ~ 30 cm 土层磁性矿物数量会有所增加, 但随着植茶年限的延长土壤剖面磁性矿物会减少。该区土壤  $\chi_{fd}$  多在 2% ~

10%, 表明超顺磁颗粒与粗颗粒同时存在<sup>[28]</sup>。稻田改茶园植茶 3 a 后表层土壤亚铁磁性矿物与不完整磁性矿物总和显著增加, 但随着植茶年限的增加, 两者总和会减少, 并且该趋势会下移。稻田改茶园植茶 3 a 后土壤表层与亚表层土壤 IRM<sub>h</sub> 降低, 而 IRM<sub>s</sub> 明显升高, 表明茶树种植会使表层土壤磁铁矿、磁赤铁矿增加, 从而使其 MS 升高; 但随植茶年限的延长, 30 ~ 60 cm 土层土壤则表现相反。植茶年限延长, 表层土壤不完整反铁与亚铁磁性矿物都会减少, 并且亚铁磁性矿物的减少向下迁移的趋势更快, MS 与 IRM<sub>s</sub> 和 SIRM 的高度相关关系(表 2)也表明亚铁磁性矿物主导土壤磁性特征, 但同时有不完整反铁磁性矿物的贡献。稻田进行茶树种植后, 因耕作方式以及植物类型的改变使亚铁磁性矿物增加, 但随着植茶年限的延长, 土壤板结并酸化, 茶多酚/有机酸等物质逐渐积累, 使亚铁磁性矿物不稳定, 进一步导致以弱晶质铁形式存在的 Red-Fe 在还原、质子、络合作用下向 Acid-Fe 和 Oxi-Fe 转化的同时部分铁被稳定硅酸盐矿物晶格固定。这与前人“稻田变为旱地后铁氧化物结晶度逐渐增加, 而活化度降低<sup>[29]</sup>, 土壤铁锰斑数量显著增加, 氧化铁晶胶比显著提高”<sup>[30]</sup>研究结果一致。

## 4 结论

稻田改为茶园植茶 3 a 地块与植茶 6 a 继续植茶 4 a 地块各形态铁与磁学性质变化特征不尽相同, 表层及亚表层与其他土层也具有不同表现。稻田改为茶园后土壤剖面 Acid-Fe、Res-Fe、Red-Fe 含量总体均表现降低趋势, 随植茶年限的延长, Acid-Fe 含量有所增加。稻田改为茶园及随植茶年限的延长, 亚表层以上土壤 Red-Fe 向 Acid-Fe、Oxi-Fe 转化, 表层土壤磁化率升高, 但随植茶时间延长土体磁化率降低, 土

壤亚铁磁性矿物不稳定,并由弱晶质铁向其他形态铁转化,使土壤铁的分异变大,且随着植茶年限的延长,铁可利用性降低。

### 参考文献:

- [1] Vigani G, Zocchi G, Bashir K, et al. Cellular iron homeostasis and metabolism in plant[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 490.
- [2] 陈家坊, 何群, 邵宗臣. 土壤中氧化铁的活化过程的探讨[J]. *土壤学报*, 1983, 20(4): 387-393.
- [3] Ding Z L, Yang S L, Sun J M, et al. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1-2):99-109.
- [4] 袁大刚, 谭海燕, 程伟丽, 等. 川西漂洗水稻土亚铁时空分布对土地利用/覆被变化的响应[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 128-135.
- [5] 袁大刚, 蒲光兰, 程伟丽, 等. 川西稻田改为茶园后土壤 pH 和腐殖质组成剖面分布变化特征[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(1): 104-109.
- [6] 母媛, 袁大刚, 兰永生, 等. 植茶年限对土壤 pH 值、有机质与酚酸含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(4): 44-48.
- [7] 俞慎, 何振立, 陈国潮, 等. 不同树龄茶树根层土壤化学特性及其对微生物区系和数量的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 433-439.
- [8] 王晓萍. 茶根分泌有机酸的分析研究初报[J]. *茶叶科学*, 1994, 14(1): 17-22.
- [9] Ryan P, Hynes M J. The kinetics and mechanisms of the complex formation and antioxidant behaviour of the polyphenols EGCg and ECG with iron(III)[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2007, 101(4):585-593.
- [10] 杨杰文, 钟来元, 郭荣发, 等. 有机酸对砖红壤的溶解及固定态磷素的活化[J]. *环境化学*, 2010, 29(6): 1063-1067.
- [11] Hynes M J, Ó Coinceanainn M. The kinetics and mechanisms of the reaction of iron(III) with Gallic acid, Gallic acid methyl ester and catechin[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2001, 85(2-3):131-142.
- [12] Shindo H. Relative effectiveness of short-range ordered Mn(IV), Fe(III), Al, and Si oxides in the synthesis of humic acids from phenolic compounds[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(3): 459-465.
- [13] 杨婷, 袁大刚, 吴金权. 川西漂洗土壤有效铁的时空分布特征[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(29): 38-40.
- [14] 程伟丽, 肖千文, 袁大刚, 等. 川西漂洗水稻土茶园茶树铁含量动态特征及影响因素[J]. *四川农业大学学报*, 2012, 30(1): 67-72.
- [15] 黄来明, 邵明安, 陈留美, 等. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 1-13.
- [16] 张俊思, 袁大刚, 付宏阳, 等. EGCG 溶液浓度与酸碱度对黄壤 Al、Fe 和 Mn 形态的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 905-916.
- [17] Han G Z, Zhang G L. Changes in magnetic properties and their pedogenetic implications for paddy soil chronosequences from different parent materials in South China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 435-444.
- [18] 韩光中, 黄来明, 李山泉, 等. 水耕人为土磁性矿物的生成转化机制研究回顾与展望[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 309-318.
- [19] 丁迈, 李海侠, 李世玉, 等. 西双版纳大渡岗茶园土壤磁化率垂直分布特征[J]. *中国锰业*, 2017, 35(1): 12-14.
- [20] 卢升高, 张卫国. 土壤氧化铁的磁性参数及其应用[J]. *土壤通报*, 1999, 30(4): 160-162.
- [21] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, et al. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(1): 57-61.
- [22] 弓晓峰, 杨菊云, 刘春英, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤铁形态分布特征[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2015, 37(1): 1-6.
- [23] 卢升高. 中国土壤磁性与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 32-38.
- [24] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 305-406.
- [25] 张淑香, 王小彬, 金柯, 等. 干旱条件下氮、磷水平对土壤锌、铜、锰、铁有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(4): 391-396.
- [26] 赵秀芬, 刘学军, 吕世华, 等. 水肥状况对土壤中铁的移动及水稻吸铁的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(5): 74-78.
- [27] 彭补拙, 濮励杰, 李春华, 等. 江苏宜兴茶园若干元素的生物循环[J]. *地理科学*, 1995, 15(3): 259-265, 298.
- [28] Dearing J A. Environmental magnetic susceptibility, using the Bartington MS2 system (second edition) [M]. England, Chi Publishing, 1999.
- [29] Takahashi T, Park C Y, Nakajima H, et al. Ferric iron transformation in soils with rotation of irrigated rice-upland crops and effect on soil tillage properties[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 45(1): 163-173.
- [30] 方利平, 章明奎. 利用方式改变对水稻土发生学特性的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 815-816.