

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.022

翁倩, 袁大刚, 余兴星, 等. 植物多酚与低分子量有机酸联合作用对紫色土铁形态分布的影响. 土壤, 2020, 52(3): 575–580.

植物多酚与低分子量有机酸联合作用对紫色土铁形态分布的影响^①

翁倩, 袁大刚*, 余兴星, 蒙凤丹, 张俊思, 王昌全

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 植物多酚(PP)和低分子量有机酸(LMWOA)对土壤铁形态转化有重要影响。以酸性、中性和石灰性紫色土为研究对象, 采用不完全随机区组试验, 用2种PP(即表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)和芦丁)和2种LMWOA(即柠檬酸和草酸)溶液浸提供试土壤, 测定其可溶铁(Fe_s)、游离铁(Fe_d)、活性铁(Fe_o)、络合铁(Fe_p)含量, 探讨了PP与LMWOA对紫色土铁形态分布的影响。结果表明: PP与LMWOA各自单独作用均能使酸性紫色土 Fe_s 增加、中性紫色土 Fe_s 减少; 对于石灰性紫色土, PP会促进其 Fe_s 增加, 而LMWOA作用相反。EGCG与LMWOA联合作用, 在酸性和石灰性紫色土上均表现为LMWOA通过促使本应转化为 Fe_s 的转化为 Fe_p 而掩蔽EGCG对铁的溶解作用; 芦丁与LMWOA联合作用, 在酸性紫色土铁的溶解上表现为协同效应, 在石灰性紫色土上则表现为LMWOA会抑制芦丁对铁的溶解作用; 对于中性紫色土, PP与LMWOA联合作用可促进 Fe_d 向 Fe_s 转化而削弱PP对铁溶解的抑制作用。

关键词: 植物多酚; 低分子量有机酸; 联合作用; 紫色土; 铁形态

中图分类号: S153 文献标志码: A

Effects of Plant Polyphenols and Low Molecular Weight Organic Acids on Iron Speciation in Purplish Soil

WENG Qian, YUAN Dagang*, YU Xingxing, MENG Fengdan, ZHANG Jungsi, WANG Changquan
(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Plant polyphenol (PP) and low molecular weight organic acid (LMWOA) have important effects on the transformation of iron fraction in soil. In this study, acidic, neutral and calcareous purplish soils were used as research objects, incomplete randomized block experiments were performed by using two kinds of PPs (i.e., epigallocatechin gallate (EGCG) and rutin) and two LMWOAs (i.e., citric acid and oxalic acid). After the solution was leached, soluble iron (Fe_s), free Fe oxides (Fe_d), amorphous Fe oxides (Fe_o), and organic-bound Fe (Fe_p) were measured to investigate the effect of PPs and LMWOAs on iron transformation in purplish soil. The results showed that both PP and LMWOA could increase Fe_s content in acid purplish soil, decrease Fe_s content in neutral purplish soil. For calcareous purplish soil, PP promoted but LMWOA decreased Fe_s content. When EGCG and LMWOAs were combined, both acidic and calcareous purplish soils showed that LMWOAs weakened EGCG's promoting effect on Fe_s by promoting iron transformed into Fe_p instead of being transformed into Fe_s . When rutin was used in combination with LMWOAs, the synergistic effect was observed in acid purplish soil, LMWOAs inhibited rutin promotion effect on Fe_s . In neutral purplish soil, the combined action of PPs and LMWOAs reduced the inhibition of PPs on Fe_s by promoting Fe_d converted into Fe_s .

Key words: Plant polyphenols; Low molecular weight organic acids; Combined action; Purplish soil; Iron fraction

铁形态的复杂性赋予其具有吸附-解吸、氧化-还原、沉淀-溶解等多种功能^[1], 使其成为联结土壤重要物质循环过程的枢纽, 参与漂白、灰化、潜育化等成土过程^[2]。植物多酚(PP)与低分子量有机酸

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41372130)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: gyrq1234@163.com

(LMWOA)是植物重要的代谢产物,能以根系分泌物等方式进入土壤^[3-4],通过络合作用、质子作用和还原作用等方式影响铁的形态转化^[5]。已有研究表明,PP形态和含量可影响土壤酸化及铁形态转化^[6],如低浓度茶多酚可以增加紫色土活性铁含量^[7];不同茶多酚浓度和pH对土壤铁溶解量影响不同^[8],一定浓度和pH的EGCG(表没食子儿茶素没食子酸酯)溶液也可通过改变氧化物形态增加黄壤可溶铁含量^[9-10]。不同的PP或LMWOA对土壤铁形态转化会产生不同的效应,如土壤中活化量在漂洗水稻土和黄壤上为LMWOA>茶多酚,在酸性紫色土上则为茶多酚组分>苹果酸^[5]。根际有机化合物可以单独或联合起作用^[11],如土壤铁溶解量表现为儿茶酚与柠檬酸并用远高于柠檬酸单独处理^[12],芦丁与有机酸联合通过溶解部分无定形铁、促进土壤矿物转变形成伊利石而促进土壤中移动^[13]。鉴于此,本研究选用2种PP(EGCG、芦丁)和2种LMWOA(柠檬酸、草酸)单独和联合作用,通过对酸性、中性和石灰性紫色土的浸

提试验,测定可溶铁(Fe_s)、游离铁(Fe_d)、活性铁(Fe_o)和络合铁(Fe_p)含量,探讨PP与LMWOA对土壤铁分布的影响,以期深化PP与LMWOA转化不同酸碱反应土壤铁形态特征的认识。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试试剂:EGCG,湖州荣凯植物提取有限公司生产,纯度>98%;芦丁,购于国药集团化学试剂有限公司,分析纯;柠檬酸、草酸由成都市科龙化工试剂厂生产,分析纯。

供试土壤:酸性紫色土、中性紫色土和石灰性紫色土3种土壤类型,2017年4月采集于四川省雅安市雨城区老板山(102°59'E,29°58'N;海拔627~685m)。为了减少土壤中植物多酚与低分子量有机酸对研究的影响,样品采集时选择非茶园植被下,距地表20~40cm土层土壤作为供试土壤,其基本化学性质见表1。

表1 供试土壤的基本化学性质
Table 1 Basic chemical properties of tested soil

土壤类型	pH	碳酸钙相当物(g/kg)	有机质(g/kg)	全铁(g/kg)	Fe_d (g/kg)	Fe_o (g/kg)	Fe_p (g/kg)
酸性紫色土	4.88	-	15.02	50.32	23.01	5.45	0.76
中性紫色土	6.80	6.08	15.63	62.87	20.60	4.85	0.50
石灰性紫色土	8.28	221.53	16.16	63.17	15.70	1.05	0.15

1.2 试验设计

本试验为浸提试验,采用不完全随机区组设计,共设置27个处理,即3种土壤(酸性、中性和石灰性紫色土)各设置9个浸提处理,即①CK,即去离子水;②Te,即EGCG单独作用;③Tr,即芦丁单独作用;④Tc,即柠檬酸单独作用;⑤To,即草酸单独作用;⑥Tec,即EGCG与柠檬酸联合作用;⑦Trc,即芦丁与柠檬酸联合作用;⑧Teo,即EGCG与草酸联合作用;⑨Tro,即芦丁与草酸联合作用。参照刘志光与徐仁扣^[12]有关PP与LMWOA的浓度设置以及Terzano等^[14]测定的根际土壤溶液LMWOA和黄酮类的实际浓度及其在水中的溶解度,设置芦丁浓度为85 $\mu\text{mol/L}$,EGCG、柠檬酸和草酸均为1 mmol/L。每个处理均重复3次,同时做空白试验。

在试验过程中,首先准确称取若干份过10目筛的10g风干土样于250ml聚乙烯塑料瓶中,然后按土液比1:10加入100ml浸提液,使用恒温振荡机在25℃、220 r/min条件下振荡24h,过滤,最后用ICP-AES测定滤液中 Fe_s 含量;剩余土样在60℃烘箱

中烘烤48h后用玛瑙研钵研磨^[10],过60目尼龙筛,按照张甘霖与龚子同^[15]的方法,用DCB(连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠)法浸提-ICP测定 Fe_d 含量,用草酸-草酸铵缓冲液浸提-ICP测定 Fe_o 含量,用焦磷酸钠浸提-ICP测定 Fe_p 含量。

1.3 数据处理

用Excel 2010进行描述性统计与图表制作,利用SPSS 19.0进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 植物多酚与低分子量有机酸对紫色土可溶铁的影响

由图1可知,酸性紫色土 Fe_s 含量范围为6.41~179.40 mg/kg,各PP和LMWOA处理均比CK有不同程度的提高,具体为EGCG>EGCG+柠檬酸>EGCG+草酸>芦丁+柠檬酸>柠檬酸>芦丁+草酸>草酸>芦丁>CK。方差分析表明,除芦丁处理外,其他各处理均显著促进酸性紫色土 Fe_s 的增加。PP和LMWOA与铁元素的络合、还原作用使某些难溶

铁向 Fe_s 转化，其中可能因为 EGCG 分子量最大，邻位酚羟基多，发生络合反应的机会多，从而其提取的 Fe_s 含量最高^[16]。Fe_s 含量表现为 EGCG 与草酸或柠檬酸联合作用显著高于草酸或柠檬酸单独作用，而显著低于 EGCG 单独作用，说明两两联合作用后 LMWOA 对 EGCG 促进 Fe_s 增加的作用具有明显的拮抗效应，而且草酸比柠檬酸的拮抗效应更强。芦丁与柠檬酸或草酸联合作用均表现为较弱的协同效应，芦丁与柠檬酸联合作用 Fe_s 含量为 78.5 mg/kg，比芦丁和柠檬酸各自单独作用时的 Fe_s 总量大 8.5 mg/kg。芦丁与草酸联合作用的 Fe_s 含量比芦丁和草酸各自单独作用的 Fe_s 总量大 2.8 mg/kg。

中性紫色土 Fe_s 含量在 18.65 ~ 31.86 mg/kg，各处理 Fe_s 含量高低顺序为芦丁+草酸>CK>EGCG+草酸>EGCG+柠檬酸>草酸>芦丁+柠檬酸>EGCG>芦丁>柠檬酸，仅芦丁+草酸处理的 Fe_s 含量略高于 CK(P>0.05)，表明 PP 与 LMWOA 主要抑制中性紫色土铁的溶解，其中 EGCG、芦丁、柠檬酸单独作用会显著降低中性紫色土 Fe_s 含量；PP 与 LMWOA 联合作用总体上可略微减轻其单独作用对铁的沉淀效应，其中芦丁与草酸联合作用效果比 EGCG 与草酸联合作用效果更强。

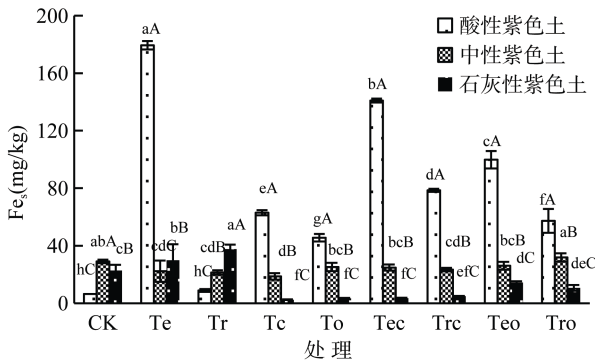


图 1 PP 与 LMWOA 对 3 种紫色土 Fe_s 的影响
Fig. 1 Effects of PPs and LMWOAs on Fe_s contents in three purple soils

石灰性紫色土 Fe_s 含量变化范围为 2.44 ~ 37.61 mg/kg，不同处理间差异较大，具体表现为芦丁>EGCG>CK>EGCG+草酸>芦丁+草酸>芦丁+柠檬酸>草酸>EGCG+柠檬酸>柠檬酸，其中柠檬酸或草酸单独作用会使 Fe_s 含量显著降低，而芦丁或 EGCG 单独作用可使 Fe_s 含量增加，且芦丁对铁的溶解能力更强。柠檬酸或草酸与芦丁联合作用 Fe_s 含量

显著下降并低于 CK，而且芦丁或 EGCG 与柠檬酸联合作用比与草酸联合作用使 Fe_s 含量降低更为显著，其中 PP 的邻位酚羟基在络合反应中起重要的作用。

2.2 植物多酚与低分子量有机酸对紫色土游离铁的影响

游离铁是硅酸盐矿物蚀变后游离出来的铁。由图 2 可见，酸性紫色土各处理 Fe_d 含量表现为 EGCG+草酸>EGCG+柠檬酸>芦丁+草酸>EGCG>>芦丁+柠檬酸>芦丁>柠檬酸>CK>草酸，其中草酸处理显著低于 CK，而 EGCG+草酸、EGCG+柠檬酸、芦丁+草酸和 EGCG 处理显著高于 CK，表明 EGCG 能通过还原与络合作用促进酸性紫色土中硅酸盐矿物的铁蚀变游离出来，从而使有 EGCG 的处理 Fe_d 含量均增加；芦丁与 LMWOA 联合作用也比其单独作用对酸性紫色土中 Fe_d 含量增加效果更显著。

中性紫色土各处理 Fe_d 含量表现为草酸>芦丁>EGCG+柠檬酸>柠檬酸>EGCG+草酸>芦丁+草酸>EGCG>CK>芦丁+柠檬酸，其中仅芦丁+柠檬酸处理稍小于 CK，其他处理均比 CK 高，草酸和芦丁处理均显著高于 CK。芦丁与柠檬酸或草酸联合作用 Fe_d 含量均显著低于它们单独作用。EGCG 与草酸联合作用 Fe_d 含量显著低于草酸单独作用。

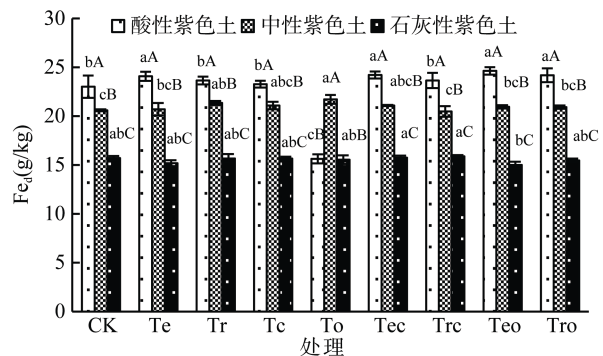


图 2 PP 与 LMWOA 对 3 种紫色土 Fe_d 的影响
Fig. 2 Effects of PPs and LMWOAs on Fe_d contents in three purple soils

石灰性紫色土各处理 Fe_d 含量比酸性和中性紫色土低，处理间表现为芦丁+柠檬酸>EGCG+柠檬酸>CK>芦丁>柠檬酸>草酸>芦丁+草酸>EGCG>EGCG+草酸，虽均与 CK 无显著差异，但表现出芦丁或 EGCG 与柠檬酸联合作用增加 Fe_d 含量、而与草酸联合作用降低 Fe_d 含量的趋势。

2.3 植物多酚与低分子量有机酸对紫色土活性铁的影响

从图 3 中可以看出，酸性紫色土各处理 Fe_o 含量

为芦丁+柠檬酸>芦丁>柠檬酸>草酸>CK>EGCG+草酸>EGCG>芦丁+草酸>EGCG+柠檬酸。EGCG 能显著降低酸性紫色土 Fe_o 含量,与 LMWOA 联合作用也有相同效果,且联合作用的 Fe_o 含量显著低于柠檬酸或草酸单独作用。芦丁与草酸联合作用的 Fe_o 含量也显著低于 CK 及芦丁或草酸单独作用,而芦丁与柠檬酸联合作用的 Fe_o 含量显著高于 CK 及柠檬酸单独作用。由此表明,EGCG 单独或与 LMWOA 联合作用均有阻止酸性紫色土中的铁向非晶质铁转化的趋势,且在与 LMWOA 联合作用中占据主导地位;芦丁与柠檬酸联合作用促进酸性紫色土中的铁向 Fe_o 的转化,与草酸联合作用却抑制 Fe_o 的形成。

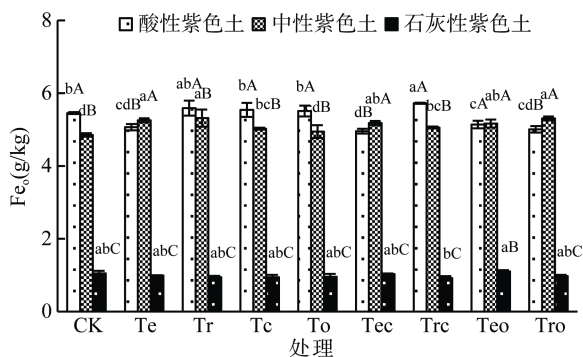


图 3 PP 与 LMWOA 对 3 种紫色土 Fe_o 的影响

Fig. 3 Effects of PPs and LMWOAs on amorphous Fe_o contents in three purple soils

中性紫色土各处理 Fe_o 含量表现为芦丁>芦丁+草酸>EGCG>EGCG+柠檬酸>EGCG+草酸>芦丁+柠檬酸>柠檬酸>草酸>CK,除草酸处理外,其他各处理均显著高于 CK;芦丁与柠檬酸联合作用显著低于芦丁单独作用。

石灰性紫色土 Fe_o 含量低于酸性和中性紫色土,各处理间具体表现为 EGCG+草酸>CK>EGCG+柠檬酸>EGCG>芦丁+草酸>草酸>柠檬酸>芦丁>芦丁+柠檬酸,其中仅 EGCG 与草酸联合作用略微大于 CK,其余各处理之间差异不显著。

2.4 植物多酚与低分子量有机酸对紫色土络合铁的影响

从图 4 可看出,酸性紫色土 Fe_p 含量在 0.55~3.33 mg/kg,各处理间表现为柠檬酸>EGCG+柠檬酸>EGCG+草酸>芦丁+柠檬酸>芦丁+草酸>EGCG>草酸>CK>芦丁。除芦丁处理外,其余处理土壤 Fe_p 含量均显著大于 CK。柠檬酸与芦丁或 EGCG 联合作用 Fe_p 含量比柠檬酸单独作用低,而草酸与芦丁联合作用在酸性紫色土 Fe_p 的形成上具有协同效应,草酸与芦丁联合作用 Fe_p 含量比草酸或芦丁单独作用的

Fe_p 总量还大 0.15 g/kg。

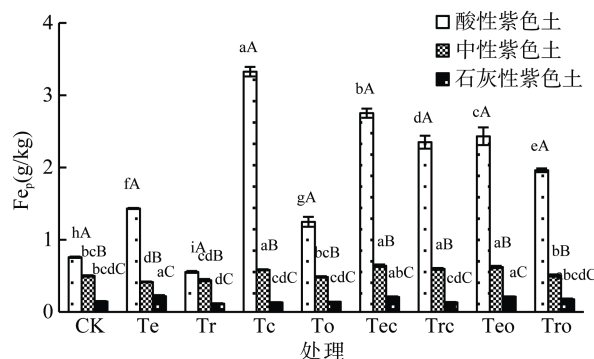


图 4 PP 与 LMWOA 对 3 种紫色土 Fe_p 的影响

Fig. 4 Effects of PPs and LMWOAs on Fe_p contents in three purple soils

中性紫色土各处理 Fe_p 含量表现为 EGCG+柠檬酸>EGCG+草酸>芦丁+柠檬酸>柠檬酸>芦丁+草酸>CK>草酸>芦丁>EGCG,PP 与 LMWOA 联合作用显著高于 PP 单独作用,具体表现为 EGCG 与草酸或柠檬酸联合作用显著高于 EGCG 单独作用,芦丁与草酸或柠檬酸联合作用也显著高于芦丁单独作用。

石灰性紫色土各处理 Fe_p 含量表现为 EGCG>EGCG+草酸>EGCG+柠檬酸>芦丁+草酸>CK>草酸>柠檬酸>芦丁+柠檬酸>芦丁,其中 EGCG、EGCG+草酸处理显著高于 CK,EGCG 与草酸或柠檬酸联合作用显著高于 LMWOA 单独作用且也高于 CK,说明 EGCG 与 LMWOA 的联合作用促进石灰性紫色土 Fe_p 的形成,且 EGCG 占主导地位,LMWOA 对 EGCG 的作用影响不大。

3 讨论

在酸性紫色土中,EGCG 与单宁酸一样能阻止 Fe_o 形成^[17-18],而促使其向 Fe_d 和 Fe_s 转化,这与张俊思等^[10]对 EGCG 在黄壤铁形态转化中的作用的研究结果一致。EGCG 对土壤铁氧化物的溶解主要由于多酚物质对铁离子具有极强的络合作用,能通过络合溶解来促进土壤中的铁转化,并且由于多酚的邻位羟基具有很高的还原性且还原电位较低,离子发生配合反应的同时,也会促使高价铁还原,表现为铁氧化物表面首先吸附多酚物质,然后在表面发生电子转移,促使高价铁还原溶解或形成铁配位化合物,最后解吸到溶液中^[17-18]。此外,酸性土壤对多酚的吸附也可增加土壤沉淀态 Fe_p 。EGCG 与柠檬酸或草酸联合作用显著抑制 EGCG 对铁的溶解,使 Fe_s 显著减少,这主要是因为 EGCG 与柠檬酸或草酸联合作用使土壤 Fe_p 含量较 EGCG 单独作用显著增加,促使本应向 Fe_s

转化的部分铁向 Fe_p 转化,表明酚与酸联合作用使其中的络合作用占据了主导地位。芦丁与柠檬酸联合作用对 Fe_s 的生成具有协同效应,使 Fe_s 含量大于各自单独作用的总和,即两者联合作用主要通过促进 Fe_p 向 Fe_s 转化;芦丁与草酸联合作用可同时促进土壤铁的溶解和络合,使土壤 Fe_s 和 Fe_p 含量均大于各自单独作用的总和,表明芦丁与草酸联合作用会促进 Fe_o 向 Fe_s 转化,与黄酮类可促进根际土壤铁的溶解结果一致^[19-20],上述协同效应可能与芦丁与 LMWOA 发生氢键缔合形成大而稳定的供氢体,从而增加其质子作用效果有关^[21]。

与酸性紫色土中不同,在中性紫色土中,PP 和 LMWOA 均表现为抑制 Fe_s 的形成,其中,PP 可能是由于其内部的多个邻位酚羟基,可作为多基配体与一个铁中心离子络合,形成环状的螯合物沉淀^[22],并进一步向 Fe_o 转化,从而抑制 Fe_s 的生成;LMWOA 与土壤中的铁离子发生络合反应,促进土壤中的铁向 Fe_p 转化^[23],使 Fe_p 与 Fe_o 含量均显著增加,由此抑制土壤铁的溶解。PP 与 LMWOA 联合作用会减弱 PP 或 LMWOA 单独作用对中性紫色土中 Fe_s 生成的抑制作用,他们可能是通过促进 Fe_d 向 Fe_s 转化而实现的。中性紫色土中 PP、LMWOA 对铁的单独作用及联合作用机制有待进一步研究。

在石灰性紫色土中,PP 能够使土壤 Fe_s 含量增加,LMWOA 则使其降低,LMWOA 的作用结果表明:一方面由于介质 pH 升高,铁离子溶解度很低,质子作用减弱^[24],抑制了表面络合物的形成;另一方面,草酸和柠檬酸易与土壤中大量的钙离子形成沉淀物^[25],使它们的作用难以发挥。PP 的作用结果表明土壤 pH 升高,铁氧化物溶解度降低,但多酚的酚羟基解离程度增加,促进了 PP 与铁络合反应的进行;同时,PP 还原能力增强^[8],产生的二价铁络合物增加,其溶解度增加,PP 对土壤铁络合作用和还原作用的增强程度大于质子作用的减弱程度,从而最终表现为 PP 在高 pH 条件下 Fe_s 含量仍然增加。PP 与 LMWOA 联合作用的 Fe_s 含量显著低于 PP 单独作用,而其 Fe_s 和 Fe_p 含量高于 LMWOA 单独作用,这是因为在联合作用时 LMWOA 会占据部分吸附位点,从而促使本应转化为 Fe_s 的部分铁转化为 Fe_p ,此情况与在酸性紫色土中相似。

4 结论

1)PP 与 LMWOA 各自单独作用能增加酸性紫色土 Fe_s 含量,降低中性紫色土 Fe_s 含量;对于石灰性

紫色土,PP 促进其 Fe_s 含量增加,而 LMWOA 降低其 Fe_s 含量。

2)在酸性和石灰性紫色土中,PP 与 LMWOA 联合作用总体表现为 LMWOA 削弱 EGCG 对土壤铁的溶解;仅芦丁与 LMWOA 联合作用在酸性紫色土铁的溶解上表现为协同效应。在中性紫色土中,PP 与 LMWOA 联合作用可减轻其单独作用对铁溶解的抑制作用。

参考文献:

- [1] 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): 99-109.
- [2] Borch T, Kretzschmar R, Kappler A, et al. Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(1): 15-23.
- [3] Kraus T E C, Dahlgren R A, Zasoski R J. Tannins in nutrient dynamics of forest ecosystems - A review[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(1): 41-66.
- [4] Erktan A, Balmot J, Merino-Martín L, et al. Immediate and long-term effect of tannins on the stabilization of soil aggregates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 197-205.
- [5] 何刚,袁大刚,赵燕,等. 茶多酚与低分子量有机酸活化土壤矿质元素的差异研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(6): 1378-1387.
- [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] 母媛,袁大刚,兰永生,等. 茶多酚浓度对土壤 pH、酚酸及铁铝形态转化的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 954-958.
- [8] 何刚,袁大刚,张东坡,等. 不同浓度和 pH 对茶多酚活化土壤硅、铝、铁的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1): 111-116.
- [9] 张俊思,袁大刚,翁倩,等. 浓度与 pH 互作下表没食子儿茶素没食子酸脂(EGCG)对黄壤 Al、Fe、Mn 迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 338-344.
- [10] 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.
- [11] Mimmo T, del Buono D, Terzano R, et al. Rhizospheric organic compounds in the soil-microorganism-plant system: their role in iron availability[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(5): 629-642.

- [12] 刘志光, 徐仁扣. 几种有机化合物对土壤中铁与锰的氧化物还原和溶解作用[J]. 环境化学, 1991, 10(5): 43–50.
- [13] Gattullo C E, Pii Y, Allegretta I, et al. Iron mobilization and mineralogical alterations induced by iron-deficient cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) in a calcareous soil[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(1): 59–69.
- [14] Terzano R, Cuccovillo G, Gattullo C E, et al. Combined effect of organic acids and flavonoids on the mobilization of major and trace elements from soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(6): 685–695.
- [15] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] Schmidt M A, Gonzalez J M, Halvorson J J, et al. Metal mobilization in soil by two structurally defined polyphenols[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(6): 1870–1877.
- [17] Kaal J, Nierop K G J, Verstraten J M. Retention of tannic acid and condensed tannin by Fe-oxide-coated quartz sand[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 287(1): 72–79.
- [18] Kaal J, Nierop K G J, Verstraten J M. Interactions between tannins and goethite-or ferrihydrite-coated quartz sand: Influence of pH and evaporation[J]. *Geoderma*, 2007, 139(3): 379–387.
- [19] Cesco S, Neumann G, Tomasi N, et al. Release of plant-borne flavonoids into the rhizosphere and their role in plant nutrition[J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1): 1–25.
- [20] Tomasi N, Weiskopf L, Renella G, et al. Flavonoids of white lupin roots participate in phosphorus mobilization from soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7): 1971–1974.
- [21] 谢笔钧, 胡慰望. 食品天然抗氧化剂—茶多酚的抗氧化活性及机理研究[J]. *精细化工*, 1990, 7(2): 33–39.
- [22] 狄莹, 石碧. 植物单宁化学研究进展[J]. *化学通报*, 1999, 62(3): 1–5.
- [23] 王孝镛. 柠檬酸铁(III)络合物的光致变色现象与柠檬酸的测定[J]. *分析化学*, 1997, 25(2): 165–167.
- [24] 马云龙, 曾清如, 胡浩, 等. 低分子量有机酸对土壤中重金属的解吸及影响因素[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1419–1423.
- [25] 栗杰, 张大庚, 刘慧, 等. 低分子量有机酸对褐土盐基离子淋失的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1354–1359.