

引用格式:

江周, 何寻阳, 韦映雪, 胡乐宁, 冯书珍. 广西西北喀斯特不同植被不同土层的土壤颗粒有机质[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(2): 198–205.

JIANG Z, HE X Y, WEI Y X, HU L N, FENG S Z. Soil particulate organic matter of different soil horizons with different vegetation in karst areas of northwestern Guangxi [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(2): 198–205.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



广西西北喀斯特不同植被不同土层的土壤颗粒有机质

江周^{1,2,3,4}, 何寻阳^{2,3}, 韦映雪^{1,4}, 胡乐宁^{1,4*}, 冯书珍⁵

(1.广西师范大学环境与资源学院, 广西 桂林 541000; 2.中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 3.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; 4.珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西 桂林 541000; 5.广西科技大学医学院, 广西 柳州 545006)

摘 要:以广西西北喀斯特地区不同植被(草丛、灌丛、原生林)生态系统表层(0~10 cm)及深层(70~100 cm)土壤为研究对象,采用热裂解-气相-质谱(Pyr-TMAH-GC/MS)技术,研究不同植被表层与深层土壤颗粒有机质(POM)的变化特征。结果表明:表层土壤的 pH 值、有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均随植被的正向演替呈上升趋势;草丛表层土壤的有机碳、总磷和碱解氮含量均显著高于深层土壤的($P<0.05$);灌丛表层土壤的有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均显著高于深层土壤的($P<0.05$),灌丛表层土壤的 pH 值和总钾含量显著低于深层土壤的($P<0.05$);原生林表层土壤的总磷、速效磷和速效钾含量显著高于深层土壤的($P<0.05$);随着植被的正向演替,土壤 POM 总量呈增加趋势,表层土壤 POM 总量显著高于深层土壤的;土壤 POM 热裂解产物类型主要有木质素类、酚类、芳烃、多环芳烃及脂类化合物,木质素类化合物仅存在于表层土壤,稠环芳烃(此处指除萘和茚外的多环芳烃)占比则随植被的正向演替呈下降趋势;植被显著影响 POM 总量和 POM 热裂解产物中对羟基苯基、稠环芳烃、脂肪酸、正构烯烃、萘、甾的占比,土层深度显著影响 POM 总量和 POM 热裂解产物中对羟基苯基、愈创木基、丁香酚基、茚、脂肪酸、酮、苯、烷基苯、酚类和甾的占比,植被与土层的交互作用显著影响 POM 热裂解产物中对羟基苯基、萜烯和脂肪酸的占比;POM 总量与有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效钾和速效磷含量呈显著正相关,与容重和总钾含量呈显著负相关,稠环芳烃与有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量呈显著负相关,且碱解氮和 pH 值显著影响 POM 化合物组成。可见,在喀斯特地区,土壤 POM 含量能反映土壤中潜在活性养分含量,可作为喀斯特地区评价不同植被恢复对土壤有机质库及土壤质量动态变化影响的敏感指标。

关 键 词:土壤颗粒有机质;植被;土层深度;土壤理化性质;热裂解气相质谱;喀斯特;广西西北

中图分类号: S158.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2020)02-0198-08

Soil particulate organic matter of different soil horizons with different vegetation in karst areas of northwestern Guangxi

JIANG Zhou^{1,2,3,4}, HE Xunyang^{2,3}, WEI Yingxue^{1,4}, HU Lening^{1,4*}, FENG Shuzhen⁵

(1.School of Environment and Resource, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541000, China; 2.Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 3.Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 4.Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Guilin, Guangxi 541000, China;

收稿日期: 2019-05-06

修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502404); 国家自然科学基金项目(31870503、41671298)

作者简介: 江周(1993—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要从事农业生态研究, 1095806649@qq.com; *通信作者, 胡乐宁, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态研究, hulening@126.com

5. Medical College of Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

Abstract: Taking the surface(0-10 cm) and deep(70-100 cm) soils from different vegetation ecosystem, i.e. tussock, shrub and primary forest as the research object in the karst area of northwestern Guangxi, China. Using pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry(Py-GC-MS/MS) technique, we investigated the changing characteristics of soil particulate organic matter(POM) with different vegetation. The results showed that the pH value and the contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-decomposed nitrogen, available phosphorus and available potassium of surface soil all increased with the positive succession of vegetation; the contents of organic carbon, total phosphorus and alkali-hydrolyzed nitrogen of surface soil in the tussock were significantly higher than those of deep soil($P<0.05$); the contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-decomposed nitrogen, available phosphorus and available potassium of surface soil in the shrub were significantly higher than those of deep soil($P<0.05$), and the pH value and content of total potassium of surface soil in the shrub were significantly lower than those of deep soil($P<0.05$); the contents of total phosphorus, available phosphorus and available potassium of surface soil in the primary forest were significantly higher than those of deep soil($P<0.05$); along with the positive succession of vegetation, the total soil POM content increased, and the total POM content of surface soil was significantly higher than that of deep soil; the types of soil POM thermal cracking compounds mainly included lignin compounds, phenols, aromatics, polyaromatics and soil lipids, lignin compounds only existed in surface soil, and the proportion of polyaromatics (except naphthalene and indene) was a downward trend along with the positive succession of vegetation; vegetation significantly affected the total POM content and the proportions of p-hydroxyphenyl, polyaromatics, fatty acids, n-alkenes, naphthalene and cyanogens in POM thermal cracking components, soil horizon significantly affected the total POM content and the proportion of p-hydroxyphenyl, guaiacyl, syringyl, indene, fatty acid, ketones, benzene, alkylbenzene, phenols and cyanogens in POM thermal cracking components, and the interaction between vegetation and soil horizon significantly affected the proportion of p-hydroxyphenyl, terpene and fatty acids in POM thermal cracking component; the content of soil POM was significantly positively correlated with the contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-decomposed nitrogen, available potassium and available phosphorus, and was significantly negatively correlated with soil bulk density and the content of total potassium; the proportion of polyaromatics was significantly negative correlated with the content soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkali-decomposed nitrogen, available phosphorus and available potassium; the content of alkali-decomposed nitrogen and pH value significant affected the proportion of POM thermal cracking compounds. Therefore, soil POM can reflect the contents of potential active nutrients in karst area soil, and can be used as a sensitive index to evaluate the impact of different vegetation restoration on soil organic matter pool and dynamic change of soil quality.

Keywords: soil particulate organic matter; vegetation; soil horizon; soil physical and chemical properties; pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry; karst; northwest Guangxi

恢复植被治理喀斯特石漠化现象^[1-2]是喀斯特地区生态环境建设的重要举措。在研究喀斯特植被恢复时,较多地考虑植被指标及土壤理化性质变化^[3-4],而对土壤颗粒有机质(particulate organic matter, POM)研究较少。土壤有机质是反映土壤质量的重要指标^[5-6],其中土壤 POM 是土壤有机质的易变组分,具有比重小、碳氮比高、易被微生物分解等特征^[3,5],主要受植被类型、土壤类型、质地等因素影响^[7-11]。研究显示,农田 POM 明显低于林地^[12-13];原生林改为人工林后,土壤 POM 的含量显著降低,且表层 POM 的敏感性高于底层土壤^[14];POM 与总有机质呈显著正相关,

可作为反映土壤有机质变化的敏感指标^[15-17]。可见,研究土壤 POM 对了解喀斯特土壤变化情况显得尤为重要。

本研究中,采用热裂解气相色谱质谱联用法,研究喀斯特不同植被类型(草丛、灌丛、原生林)生态系统表层(0~10 cm)与深层(70~100 cm)土壤颗粒有机质含量及其热裂解产物组成,探明土壤颗粒有机质对植被恢复的响应规律,揭示影响喀斯特土壤颗粒有机质变化的影响因子,以期深化对喀斯特土壤有机质库及土壤质量动态变化的认识,为区域的可持续发展和生态恢复措施的制订提供依据。

1 研究区概况与方法

1.1 自然概况

研究区域位于广西壮族自治区环江县下南乡西南部古周示范区(24°50'N、107°55'E)及木论国家自然保护区(25°06'N~25°12'N、107°53'E~108°05'E),同属于典型喀斯特峰丛洼地景观及亚热带季风气候区。

古周示范区海拔高度 376~816 m,多年平均气温 16.5~20.5 °C,多年平均降水量为 1 389.1 mm。木论国家自然保护区的地形、气候条件与古周研究区大致相同,海拔高度 400~1 000 m,年平均气温 15.0~18.7 °C,年均降水量 1 530~1 820 mm。林区土壤主要为石灰土和零星分布的硅质土,均属非地带性土壤。样地基本信息列于表 1。

表 1 样地基本信息及植物优势物种

Table 1 Site descriptions and dominant floral species in the studied communities

植被类型	干扰状态	海拔高度/m	样地优势物种
草丛	常割草	510	五节芒,类芦,蔓生莠竹等
灌丛	偶有砍伐	497	红背山麻杆,广西密花树,粉苹婆,肾蕨,五节芒,蔓生莠竹等
原生林	几无干扰	509	平阳厚壳桂,野独活,九里香,茜树,珠子木,棕竹等

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集

结合研究区植被现状,在古周移民迁出区选取草丛、灌丛 2 种植被类型的典型群落,于木论保护区选取原生林群落。在研究区内,从山顶到山脚共设置 3 条样带,并分别在每条样带设置 1 个 20 m×30 m 的样方,于 2008 年 12 月至 2009 年 1 月按土壤发生层采集表层(0~10 cm)和深层(70~100 cm)土壤样品,共 18 个样品。按四分法取约 500 g 新鲜土壤置于灭菌后的自封袋中,封口后放入随身携带的冰盒带回实验室,去除土壤中可见的动植物残体,自然风干,过孔径 2 mm 筛,保存,备用。

1.2.2 项目测定方法

1) 土壤理化性质测定。参照鲍士旦^[18]的方法测定土壤的 pH 值、容重、有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)含量。

2) POM 总量测定。根据 CAMBARDELL 等^[19]的方法,分别称取 10 g 风干样品,以土液比(W/V)为 1:2 的比例加入 5 g/L 六偏磷酸钠溶液后,以 90 r/min 振荡 18 h,土壤悬液过孔径 0.053 mm 筛,并反复用蒸馏水冲洗。所提取的颗粒物在 60 °C 下烘干 12 h。烘干后的样品用玛瑙研钵充分研磨至细粉末状,待用。

3) POM 热裂解产物测定。采用热裂解-气相-质谱法,称取研磨后的 POM 约 5 mg 放入热解进样器中。GC-MS 分析色谱条件:恒流模式;以氦气为载气;色谱柱为 HP-5(100 m×0.32 mm×0.25 μm)。升温程序:初始温度 50 °C,以 1 °C/min 速率升至 100 °C,再以 4 °C/min 升至 280 °C,保持 25 min;进样口温度为 300 °C。质谱条件:采用 EI,70 eV;离子源温度 230 °C,四极杆温度 150 °C;全扫描,扫描范围为 50~550 amu。

1.2.3 统计分析

运用 SPSS 20.0、Canoco 4.5 和 Excel 2013 进行统计分析和绘图。采用方差分析进行变量间的差异显著性分析,并用 LSD 法进行多重比较;采用 Pearson 相关统计方法进行变量间的相关关系分析;采用 Canoco 4.5 的冗余分析法(RDA)对影响土壤颗粒有机质组成的因子进行排序分析。

2 结果与分析

2.1 供试土壤的基本理化性质

如表 2 所示,表层土壤的 pH 值、有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均随植被的正向演替呈上升趋势;深层土壤的理化性质较表层土壤的有较大变化,深层土壤碱解氮含量随植被的正向演替显著上升,原生林的 pH 值显著高于灌丛的($P<0.05$),与草丛的 pH 值间差异无统计学意义,原生林的总钾含量显著低于灌丛和草丛的

($P<0.05$)，速效磷含量随植被的正向演替由上升趋于稳定；草丛表层土壤的有机碳、总磷和碱解氮含量均显著高于深层土壤的($P<0.05$)；灌丛表层土壤的有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均显著高于深层土壤的($P<0.05$)，表层土壤的 pH 值和总钾含量显著低于深层土壤的($P<0.05$)；原生林表层土壤的总磷、速效磷和速效钾含量显著高于深层土壤的($P<0.05$)。

表 2 不同植被类型喀斯特土壤的理化性质

Table 2 Physical chemical characteristics of karst soil with different vegetation						
土层	植被	pH	容重/(g·cm ⁻³)	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)
表层	草丛	6.37±0.12	1.14±0.03	(14.68±0.79)Ab	(1.75±0.62)b	(0.56±0.03)Ab
	灌丛	(6.45±0.12)B	1.16±0.13	(27.96±1.59)Aab	(4.81±0.14)Aab	(1.02±0.10)Aa
	原生林	7.00±0.32	0.75±0.24	(45.12±13.5)a	(7.90±2.48)a	(1.14±0.11)Aa
深层	草丛	(6.67±0.38)ab	1.34±0.024	(5.23±0.39)B	1.10±0.50	(0.38±0.04)B
	灌丛	(6.62±0.11)Ab	1.01±0.11	(8.49±0.30)B	(1.71±0.17)B	(0.57±0.03)B
	原生林	(7.53±0.17)a	1.34±0.17	7.61±3.92	1.51±0.74	(0.41±0.11)B
土层	植被	TK/(g·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	AK/(mg·kg ⁻¹)	
表层	草丛	(1.38±0.08)a	(83.88±4.16)Ab	(1.88±0.36)b	(47.89±3.74)b	
	灌丛	(1.82±0.18)Ba	(168.68±19.21)Aab	(5.01±0.33)Ab	(93.05±11.21)Aa	
	原生林	(0.63±0.17)b	(247.28±55.82)a	(12.41±2.89)Aa	(99.15±14.42)Aa	
深层	草丛	(1.69±0.20)a	(28.61±4.99)Bc	0.67±0.03	38.67±1.85	
	灌丛	(1.99±0.23)Aa	(56.46±2.43)Bb	(1.32±0.41)B	(37.77±4.36)B	
	原生林	(0.66±0.10)b	(101.67±4.11)a	(1.29±0.23)B	(33.66±2.09)B	

不同小写字母示同一土层不同植被类型间差异显著($P<0.05$)；不同大写字母示同一植被类型不同土层间差异显著($P<0.05$)。

2.2 供试土壤颗粒有机质的总量及组成

2.2.1 土壤颗粒有机质总量

由表 3 可知，不同植被类型土壤 POM 总量变化明显，由草丛、灌丛、原生林依次上升，原生林

土壤 POM 含量最高；同一植被类型中，表层土壤 POM 含量显著高于深层土壤的($P<0.05$)。双因素方差分析表明，植被($P<0.05$)和土层($P<0.001$)对 POM 总量均有显著影响。

表 3 不同植被类型喀斯特土壤剖面 POM 总量和主要热裂解产物占比及方差分析

Table 3 Analysis of total POM content, main thermal cracking compounds proportions and variance of karst soil with different vegetation								
土层	植被	POM 含量/(g·kg ⁻¹)	POM 热裂解产物占比/%					
			对羟基苯基	愈创木基	丁香酚基	烷基苯	萘	蒽
表层	草丛	(67.16±12.73)Ab		7.89±1.62	1.19±0.29	(8.16±3.09)b	(3.62±0.51)B	3.62±0.31
	灌丛	(68.27±0.15)Ab	3.98±0.52	2.55±0.02	1.14±0.26	(22.3±2.66)a	4.53±0.79	(3.85±0.58)A
	原生林	(144.05±28.60)Aa	3.33±0.28	8.30±3.18	1.95±0.59	(28.59±1.22)a	2.35±0.53	3.71±0.97
深层	草丛	(13.50±2.88)Bb				34.73±11.94	(5.85±0.50)A	6.31±1.25
	灌丛	(26.05±4.65)Bab				49.44±12.28	5.14±1.72	(1.91±0.32)B
	原生林	(37.53±5.91)Ba				25.24±1.77	2.59±0.18	
植被		8.625*	38.282***				4.825*	18.884***
土层		39.289***	149.656***	27.447***	35.487***	6.443*		57.824***
植被×土层			38.282***					

表 3(续)

土层	植被	POM 热裂解产物占比/%							
		正烷烃	正构烯烃	脂肪酸	酮	酚类	甾	吡咯类	萘
表层	草丛	9.82±1.24	9.36±2.00	(28.29±4.11)Aa	4.73±1.53	10.4±4.04	(2.62±0.34)b	(0.97±0.08)Bb	2.13±0.50
	灌丛	13.05±3.03	(9.81±1.08)A	(9.5±1.35)b	3.06±1.02	(13.88±2.32)A	(5.45±0.58)a	(2.22±0.07)b	1.38±0.22
	原生林	10.83±3.01	13.69±2.81	(7.34±4.57)b	2.48±1.43	5.03±2.45	(2.12±0.83)b	(6.05±1.27)a	0.61±0.083
深层	草丛	13.23±2.69	(6.3±1.58)b	(6.06±2.16)B		2.94±1.17	2.42±0.99	(5.60±2.00)A	3.87±0.35
	灌丛	11.27±4.15	(3.27±1.33)Bb	3.79±2.06		(5.88±1.31)B	2.54±1.78	4.16±2.93	2.42±1.00
	原生林	25.69±9.25	(19.45±5.62)a	5.77±2.17		6.83±1.64		5.36±1.73	3.52±1.46
植被			7.294*	8.375**			4.835*		
土层				16.28***	19.26***	5.558*	5.143*		11.104**
植被×土层				6.711*					7.729**

不同小写字母示同一土层不同植被类型间差异显著($P < 0.05$) ; 不同大写字母示同一植被类型不同土层间差异显著($P < 0.05$) ; “***”示 $P < 0.001$; “**”示 $P < 0.01$; “*”示 $P < 0.05$ 。

2.2.2 土壤颗粒有机质组成

不同植被类型喀斯特土壤 POM 热裂解产物类型主要有木质素类、酚类、芳烃与多环芳烃及脂类化合物等。不同植被类型和土层土壤 POM 各热裂解产物的占比间存在差异(表 3)。木质素类化合物中愈创木基、对羟基苯基及丁香酚基仅存在于表层土壤中, 其中愈创木基占比随着植被正向演替先降低后升高。酚类化合物在同一土层不同植被间的差异无统计学意义($P > 0.05$) ; 灌丛表层土壤的酚类化合物占比显著高于深层土壤的($P < 0.05$)。含氮化合物以吡咯类为主, 在表层土壤中, 吡咯类占比随着植被正向演替呈增加趋势, 原生林的吡咯类占比显著高于草丛、灌丛的($P < 0.05$)。芳烃类化合物主要以烷基苯、苯为主, 表层土壤的烷基苯占比随植被正向演替呈上升趋势; 草丛表层土壤的烷基苯占比显著低于灌丛和原生林的($P < 0.05$)。多环芳烃类化合物中, 灌丛表层土壤的茚占比显著高于深层土壤的($P < 0.05$) ; 草丛深层土壤的萘占比显著高于表层土壤的($P < 0.05$) ; 表层土壤的稠环芳烃(此处指除萘和茚外的多环芳烃)占比随植被正向演替呈下降趋势, 原生林表层土壤的稠环芳烃占比显著低于草丛的($P < 0.05$)。脂类化合物中, 主要产物有正烷烃、正构烯烃与脂肪酸, 原生林深层土壤的正构烯烃占比显著高于草丛和灌丛的($P < 0.05$) , 灌丛表层土壤的正构烯烃占比显著高于深层土壤的($P < 0.05$) ; 表层土壤的脂肪酸占比随植被正向演替呈下降趋势, 草

丛表层土壤的脂肪酸占比显著高于灌丛表层、原生林表层和草丛深层土壤的($P < 0.05$)。双因素方差分析表明, 植被显著影响对羟基苯基($P < 0.001$)、稠环芳烃($P < 0.001$)、脂肪酸($P < 0.01$)、正构烯烃($P < 0.05$)、萘($P < 0.05$)、甾($P < 0.05$)的占比; 土层深度显著影响对羟基苯基($P < 0.001$)、愈创木基($P < 0.001$)、丁香酚基($P < 0.001$)、茚($P < 0.001$)、脂肪酸($P < 0.001$)、酮($P < 0.001$)、苯($P < 0.01$)、烷基苯($P < 0.05$)、酚类($P < 0.05$)和甾($P < 0.05$)占比; 植被与土层的交互作用显著影响对羟基苯基($P < 0.001$)、萘($P < 0.01$)和脂肪酸($P < 0.05$)占比。

2.3 喀斯特土壤理化性质对土壤颗粒有机质的影响

2.3.1 土壤 POM 与理化性质的相关性

由表 4 可知, 土壤 POM 总量与有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效钾和速效磷含量呈显著正相关($P < 0.01$) , 与容重和总钾含量呈显著负相关($P < 0.05$) ; POM 热裂解产物与理化性质的相关性不一, 丁香酚基与 pH 呈显著正相关($P < 0.05$) , 与容重呈显著负相关($P < 0.01$) , 萘与总钾含量呈显著正相关($P < 0.05$) , 与碱解氮含量呈显著负相关($P < 0.05$) , 茚与有机碳、总氮和碱解氮含量呈显著正相关($P < 0.05$) , 稠环芳烃与有机碳、总氮、总磷、碱解氮、速效磷含量呈显著负相关($P < 0.01$) , 与速效钾含量呈显著负相关($P < 0.05$) , 正构烯烃与总钾呈显著负相关($P < 0.01$)。

表 4 喀斯特土壤 POM 及其热裂解产物占比与土壤理化性质的相关系数

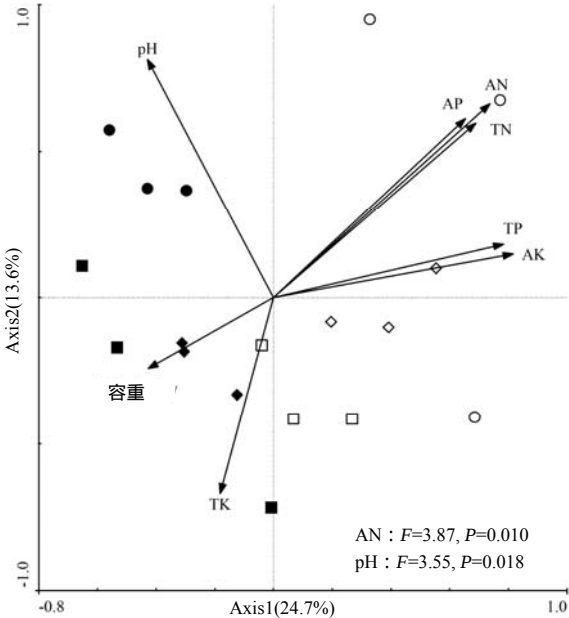
Table 4 Correlation between soil particulate organic carbon and the thermal cracking compounds proportion and soil physical and chemical properties of karst soil

土壤理化性质	相关系数					
	POM 总量	丁香酚基	萘	茚	稠环芳烃	正构烯烃
pH		0.780*				
容重	-0.585*	-0.829**				
SOC	0.730**			0.691*	-0.748**	
TN	0.703**			0.636*	-0.718**	
TP	0.724**				-0.662**	
TK	-0.474*		0.501*			-0.622**
AN	0.745**		-0.492*	0.609*	-0.793**	
AP	0.868**				-0.750**	
AK	0.610**				-0.592*	
POM 总量		0.850**	-0.513*		-0.703**	

“**”示 $P < 0.01$; “*”示 $P < 0.05$ 。

2.3.2 土壤理化性质对 POM 组成的影响

由图 1 可知,不同植被类型和土层深度的土壤 POM 热裂解产物可以较好区分,其化合物组成差异显著;蒙特卡罗检验结果进一步表明,碱解氮、pH 值显著影响 POM 化合物组成($P < 0.05$)。



箭头示土壤理化性质指标;“○”和“●”分别示原生林表层和深层土壤 POM 组成;“◇”和“◆”分别示灌丛表层和深层土壤 POM 组成;“□”和“■”分别示草丛表层和深层土壤 POM 组成。

图 1 不同植被类型喀斯特土壤 POM 组成与理化性质的 RDA 分析结果

Fig.1 The RDA analysis result of particulate organic carbon thermal cracking compounds and physical and chemical properties of karst soil with different vegetation

3 结论与讨论

本研究中,植被和土层深度显著影响喀斯特地区土壤颗粒有机质总量,说明土壤 POM 的深度分布与有机物质的输入和土壤所处植被密切相关;同一植被类型中,表层土壤 POM 含量显著高于深层土壤的,这主要是由于表层土壤中包含大量表面的植物残余物和动物粪便等,而深层的 POM 基本来源于植物根系积累;同一土层深度的 POM 在不同植被类型存在差异,不同植被类型的优势物种不同,直接决定进入土壤的有机碳质量^[20-22]。原生林的 POM 总量最高,可能是由于原生林 POM 来源丰富,其输入量大于分解损失量^[23]。

本研究中,不同植被类型喀斯特土壤 POM 热裂解产物种类与陈秋宇等^[24]和周萍等^[25]的研究结果相似;喀斯特表层土壤 POM 热裂解产物中,木质素类化合物,如愈创木基、对羟苯基等均随土层的加深没有累积,说明其随着土壤层次的加深有较多降解,且木质素类化合物通过植物残体进入土壤,并经微生物的分解和转化形成新的腐殖质,部分物质被完全矿化而难以累积^[26];草丛中没有对羟基苯基存在,这可能是由于草丛受到人类干扰较多,造成土壤微生物生存环境变化,从而加速对某些物质的消耗;酚类化合物在灌丛表层土壤中占比最高,可能是灌丛表层分解木质素功能的微生物较

多,而深层土壤中随着植被正向演替酚类化合物占比逐渐增多,可能是由于酚类化合物最主要的来源是木质素分解^[27],说明酚类物质能在喀斯特地区土壤中积累;稠环芳烃占比随植被正向演替呈减少趋势,可能是随着植被正向演替,喀斯特土壤中对稠环芳烃具有降解能力的微生物区系增多,最终导致稠环芳烃在植被正向演替过程中消减。

POM 作为土壤活性有机质的组分,土壤理化性质对其影响很大。POM 含量与土壤养分、微生物数量及种类密切相关。本研究中,喀斯特土壤 POM 含量与总氮、碱解氮呈显著正相关关系,这与李淑芬等^[28]得出的土壤活性有机质含量与土壤全氮、碱解氮存在明显的正相关关系的研究结果类似;RDA 分析结果显示,碱解氮是影响喀斯特 POM 化合物组成的重要因子,可能是碱解氮主要是来源于土壤中的易碱解部分的有机氮和无机氮,通过土壤微生物分解代谢活动来影响 POM 的积累与消耗;喀斯特土壤 POM 总量还与有机碳、全磷、速效钾和速效磷含量呈显著正相关。可见,在喀斯特地区,土壤 POM 含量可反映土壤中潜在活性养分含量,可作为喀斯特地区评价植被对土壤有机质库及土壤质量动态变化影响的敏感指标。

关于土壤 POM 含量与土壤 pH 之间的关系尚不明确^[29-31]。本研究中,相关性分析结果显示,喀斯特土壤 POM 含量与 pH 无显著相关性,这与李秋言等^[32]的 pH 与 POM 含量呈显著正相关的研究结果不一致。RDA 分析结果显示 pH 是影响 POM 化合物组成的显著因子,可能是 pH 与土壤微生物活动、有机质合成和分解、各种营养元素转化与释放均有关系,而参与有机质分解的微生物大多数在接近中性的环境下生长发育,因此 pH 对喀斯特土壤 POM 化合物组成的影响作用不容忽视。

参考文献:

- [1] 王昆. 典型喀斯特地区石漠化演变关键因子阈值研究与预警分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
WANG K. Research on the threshold of the key factors for the evolution of rocky desertification in typical Karst area and early warning analysis[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [2] 邓艳, 曹建华, 蒋忠诚, 等. 西南岩溶石漠化综合治

理水-土-植被关键技术进展与建议[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 476-485.

- DENG Y, CAO J H, JIANG Z C, et al. Advancement in key technologies for comprehensive treatment of water, soil and vegetation resources in karst rocky desertification areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 476-485.
- [3] 胡乐宁. 西南喀斯特典型土壤有机碳矿化特征及相关因子研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
HU L N. Study on mineralization characteristics and related factors of typical soil organic carbon in southwest Karst[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [4] 冯书珍, 陈香碧, 何寻阳, 等. 长期施肥下亚热带典型农田(旱地)土壤木质素的积累特性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 93-100.
FENG S Z, CHEN X B, HE X Y, et al. Effect of long-term fertilization on lignin accumulation in typical subtropical upland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 93-100.
- [5] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素[J]. 山地学报, 2010, 28(1): 56-62.
LI X L, CHEN X M, ZHOU L C, et al. Study on soil organic carbon fractions and their influential factors in rocky desertification process in south west of China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(1): 56-62.
- [6] 赵龙华, 刘小粉, 王雅婧, 等. 基于热分析技术的土壤有机质含量和稳定性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 105-114.
ZHAO L H, LIU X F, WANG Y J, et al. Thermal analysis determining soil organic matter content and thermal stability[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 105-114.
- [7] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[M]//STEWART B A. *Advances in Soil Science*. New York: Springer, 1992, 20: 1-90.
- [8] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.
HAN X H, TONG X G, YANG G H, et al. Difference analysis of soil organic carbon pool in returning farmland to forest in loess hilly area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 223-229.
- [9] SHARMA V, HUSSAIN S, SHARMA K R, et al. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems[J]. *Geoderma*, 2014, 232/234: 81-87.
- [10] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏

- 感性评价指标[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 500–504.
ZHANG J B, SONG C C. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool[J]. Ecology and Environmental, 2003, 12(4): 500–504.
- [11] WANG Q Y, WANG Y, WANG Q C, et al. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 143: 1–6.
- [12] 贺红早, 张珍明, 刘盈盈. 贵州云台山喀斯特森林土壤有机碳及黑碳分布特征[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(5): 90–92.
HE H Z, ZHANG Z M, LIU Y Y, et al. Distribution characteristics of organic carbon and black carbon in karst forest soil of Yuntai mountain of Guizhou province[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(5): 90–92.
- [13] 徐梦, 李晓亮, 蔡晓布, 等. 藏东南地区不同土地利用方式下土壤有机碳组分及周转变化特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19): 3714–3725.
XU M, LI X L, CAI X B, et al. Impact of land use type on soil organic carbon fractionation and turnover in southeastern Tibet[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(19): 3714–3725.
- [14] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 226–231, 252.
ZHANG S, WANG L C, HUANG Z C, et al. Effects of conservation tillage on active soil organic carbon composition[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 226–231, 252.
- [15] 王迪, 吴新亮, 蔡崇法, 等. 长期培肥下红壤有机碳组成与团聚体稳定性的关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 61–70.
WANG D, WU X L, CAI C F, et al. Composition of organic carbon and their relationship with aggregate stability in red soil under different fertilizer application[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(1): 61–70.
- [16] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 1–8.
YANG Y S, LIU Y L, CHEN G S, et al. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 1–8.
- [17] MAYER S, KÖLBL A, VÖLKEL J, et al. Organic matter in temperate cultivated floodplain soils: light fractions highly contribute to subsoil organic carbon[J]. Geoderma, 2019, 337: 679–690.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2008.
- [19] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777–783.
- [20] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 105–111.
XIAO X, WANG X T, OUYANG X Z. The characteristic of soil organic carbon and relationship with litter quality in *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2015, 39(6): 105–111.
- [21] 尤孟阳, 韩晓增, 梁尧. 不同植被覆盖下土壤微生物量碳动态变化[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1401–1404.
YOU M Y, HAN X Z, LIANG Y. The dynamics of microbial biomass carbon under different vegetations cover[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1401–1404.
- [22] JOBBÁGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423–436.
- [23] 杨君琰, 张学丽, 曹兵, 等. 宁夏罗山典型植被类型的土壤活性有机碳组分研究[J]. 西部林业科学, 2017, 46(4): 61–66.
YANG J L, ZHANG X L, CAO B, et al. Active organic carbon in soil of typical vegetation in Luoshan of Ningxia[J]. Journal of West China Forestry Science, 2017, 46(4): 61–66.
- [24] 陈秋宇, 吴应琴, 雷天柱, 等. 基于 Py-GC-MS/MS 技术的高寒草原土壤有机质不同组分指纹特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2864–2873.
CHEN Q Y, WU Y Q, LEI T Z, et al. Study on the fingerprints of soil organic components in alpine grassland based on Py-GC-MS/MS Technology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2864–2873.
- [25] 周萍, 潘根兴, PICCOLO A, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 IV. 颗粒有机质热裂解-气相-质谱法分子结构初步表征[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 112–124.
ZHOU P, PAN G X, PICCOLO A, et al. SOC enhancement in major types of paddy soil under long-term agro-ecosystem experiments from South China IV. Molecular characterization of particulate organic carbon by TMAH thermochemolysis-GS/MS[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 112–124.