

DOI: 10.11766/trxb202001030003

孙斌, 魏志敏, 张力浩, 代子雯, 方成, 胡锋, 李辉信, 徐莉. 地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1246–1255.

SUN Bin, WEI Zhimin, ZHANG Lihao, DAI Ziwen, FANG Cheng, HU Feng, LI Huixin, XU Li. Distribution of Heavy Metals and Microbial Community Structure in Soils High in Geological Background Value[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1246–1255.

地质高背景土壤重金属赋存特征及微生物群落结构差异*

孙斌, 魏志敏, 张力浩, 代子雯, 方成, 胡锋, 李辉信, 徐莉[†]

(南京农业大学资源与环境科学学院/江苏省有机固体废物资源化协同创新中心, 南京 210095)

摘要: 以广西岩溶地区不同发育阶段和母质类型的地质高背景农田土壤(马岭、锣圩、苏圩、云表)为研究对象, 比较重金属赋存状态、土壤理化性质以及微生物群落功能多样性差异, 结合冗余分析(RDA)获得影响地质高背景土壤微生物群落结构的关键环境因子。结果表明:(1)发育阶段和母质类型显著影响土壤基本性质以及重金属浓度。发育阶段较早的马岭土壤有机质含量及重金属富集量更高。碳酸盐系石灰岩发育而来的马岭土壤镉(Cd)元素含量高于第四纪河流沉积物发育而来的其他土壤。(2)不同土壤微生物活性和群落结构差异显著。苏圩土壤微生物对碳源的利用能力及微生物多样性指数显著低于其他三个土样;云表、锣圩与马岭土壤利用胺类和氨基酸类碳源的微生物代谢活性较高,苏圩土壤利用糖类和多聚物类碳源的微生物代谢活性较高。(3)冗余分析(RDA)表明,土壤有机质、pH、全量砷(As)、Cd、铅(Pb)以及有效砷是引起土壤微生物碳源利用分异的主要环境因子。(4)相关性分析表明土壤微生物对胺类、氨基酸类、酚酸类的利用强度与土壤有机质、pH呈正相关,与As、有效铜、有效砷呈负相关。

关键词: 地质高背景土壤; 重金属; 微生物碳源利用; Biolog 分析; 土壤有机质; pH

中图分类号: S154.1; X53 **文献标志码:** A

Distribution of Heavy Metals and Microbial Community Structure in Soils High in Geological Background Value

SUN Bin, WEI Zhimin, ZHANG Lihao, DAI Ziwen, FANG Cheng, HU Feng, LI Huixin, XU Li[†]

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Organic Solid Waste Recycling, Nanjing 210095, China)

Abstract: [Objective] Farmland soils high in geological background value are widely distributed in China, complex in pedogenesis, and diverse in geological age and parent material. Consequently, by far little is known about mechanisms of their pollution of heavy metals and ecological risks of the pollutants. The purpose of this study was to explore distribution of the heavy metals in paddy soils typical of the karst area of Guangxi, and key factors that affect structures of the microbial communities in the soil, in an attempt to provide certain data support for establishment of a heavy metals risk assessment system for

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0800305)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFD0800305)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xuli602@njau.edu.cn

作者简介: 孙斌(1991—),男,河南周口人,硕士,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: 2017103084@njau.edu.cn

收稿日期: 2020-01-03; 收到修改稿日期: 2020-04-24; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-07-28

high-geological background-valued farmland soils of the secondary enrichment type. 【 Method 】 Samples of four types of paddy soils different in geological age and type of parent material were collected separately in Maling, Luoxu, Suxu, and Yunbiao of Guangxi for analysis of contents and distribution of heavy metals, physical and chemical properties, and the functional diversity of the microbial communities therein. And redundant analysis (RDA) was performed to obtain key environmental factors that impact structures of the soil microbial communities in those soils. 【 Result 】 Results show: (1) Development stage and type of parent material significantly affected basic physiochemical properties of the soils, and also concentrations of heavy metals in the soils. The soil in Maling started its development earlier and so was higher in organic matter content and heavy metals enrichment. Derived from carbonate limestone, the soil was also higher in soil Cd than all the other three types of soils derived from Quaternary fluvial sediments; (2) The four types of paddy soils were sharply different in soil microbial activity and microbial community structure. The soil in Suxu was significantly lower in soil microbial carbon source utilization capacity and microbial diversity index than the other three types of soils, where the amine and amino acid utilizing microbes were higher in metabolic activity; However, the soil in Suxu was higher in metabolic activity of the saccharides and polymeric carbon utilizing microbes; (3) RDA shows that soil organic matter, pH, total As, Cd, Pb, and available As were the main environmental factors that caused differentiation of the soil microbes in utilizing carbon sources; and(4)Correlation analysis shows that intensity of the soil microbes utilizing amines, amino acids, and phenolic acids was positively related to soil organic matter and pH, and negatively to As, available Cu, and available As. 【 Conclusion 】For the four types of soils high in geological background value, parent material and geological age are the two factors that determine physical and chemical properties of and distribution of heavy metals in the soil, which then in turn influence community structure and activity of the microorganisms in the soil.

Key words: Soil high in geological background value; Heavy metal; Microbial utilization of carbon sources; Biolog analysis; Soil organic matter; pH

我国农田受重金属污染严重，其来源包括人为源，如采矿、肥料与农药施用、污水灌溉等，以及自然源，即自然成土过程中的地质内源影响^[1]。由地质背景因素造成的土壤重金属含量偏高，称为地质高背景（high geological background, HGB）土壤，如铬（Cr）与镍（Ni）在基性岩和超基性岩发育形成的土壤中含量偏高^[2]。我国地质高背景农田土壤重金属超标率高、成因复杂且面积广，主要分布于西南、华南、两湖、成渝、珠江三角洲（珠三角）及长江三角洲（长三角）等地区^[3]。不同地区土壤重金属的富集类型不同，包括残坡积型、运积型及次生富集型。成土母质的岩性、河流冲积类型以及风化侵蚀程度会影响土壤重金属的分布特征。唐豆豆等^[4]分析不同母质发育的地质高背景土壤，结果表明镉（Cd）与砷（As）以黑色岩系发育的土壤中含量超标，而在碳酸盐系石灰岩发育的土壤中铅（Pb）、Cd 和 As 含量超标。Liu 等^[5]发现由于水体动力学与风化侵蚀的改变，相比于以片麻岩、花岗岩为主的河流冲积物地区，高度风化的黑色页岩地区高背景土壤中 Cd 极易被富集。

广西是我国典型的重金属次生富集区域，地层

年代及母质成分主要为石炭纪碳酸盐岩及第四纪河流沉积物，经长期风化溶蚀作用，成土母质中 Pb、Cd、铜（Cu）、As 等重金属元素被黏土矿物吸附，进而大量富集于土壤中^[6-7]。目前关于人为源土壤中重金属的赋存状态研究较多^[8-9]，而对于地质背景来源的土壤重金属污染特征方面研究较少，仅有部分研究表明地质背景土壤重金属在生物有效性上有所降低，对生态系统的危害较轻^[10]。

土壤微生物是土壤的重要组成部分，它一方面驱动着土壤有机质的形成、转化以及土壤养分循环等；另一方面土壤微生物的活性和群落结构变化也是衡量土壤质量的重要指标^[11-12]。土壤重金属含量、赋存状态、土壤类型与植被等均会影响土壤微生物活性和群落结构^[13-15]，同时土壤微生物群落的变化对土壤重金属污染也有敏感的指示作用。赵立君等^[16]研究发现土壤微生物群落结构对不同 As 胁迫有明显的响应特征，这可作为 As 污染土壤质量评价的灵敏指标。而这些关于重金属污染条件下微生物群落的研究，多集中于人为源重金属污染土壤的研究^[17-19]，对于地质高背景重金属污染土壤中微生物活性和群落结构的研究较少。

此外,我国地质高背景农田土壤成因复杂,地质年代和母质类型多样,普遍存在着重金属污染机理不清,生态风险不明的现状。因此,本研究选择典型次生富集型地质高背景区广西不同地层年代及不同母质类型的四种农田土壤,比较研究不同土壤中重金属赋存状态以及微生物活性和群落结构变化,探究地质高背景条件下影响微生物群落结构的关键因子,为次生富集型地质高背景农田土壤重金属风险评估体系提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区分别位于广西省南宁江南区苏圩镇(108°1'49"E, 22°30'37"N)、武鸣县锣圩镇(107°58'60"E, 23°19'17"N)、横县马岭镇(109°18'55"E, 22°47'2"N)和云表镇(109°17'37"E, 22°55'10"N),研究区分布示意图如图1。四个地区均属于亚热带地区,地貌类型为典型的喀斯特地貌,是分处南宁市邕江不同流域的代表性样区。调查资料显示研究区均为典型地质高背景带,锣圩地区位于南宁市邕江北部,土壤呈弱碱性,地层及母质为第四系桂平组河流沉积物,区内富含铁矿;苏圩地区位于南宁市邕江南部,土壤呈酸性,地层及母质为第四系桂平组河流沉积物,区内富含铁锰矿;马岭地区位于邕江下游横县马岭镇,土壤呈弱碱性,地层及母质为中石炭统大埔组碳酸盐岩,区内富含铁铝矿;云表地区位于横县马岭镇,处于邕江下游,土壤呈酸性,地层及母质为第四系桂平组河流沉积物,区内富含铁铝矿。

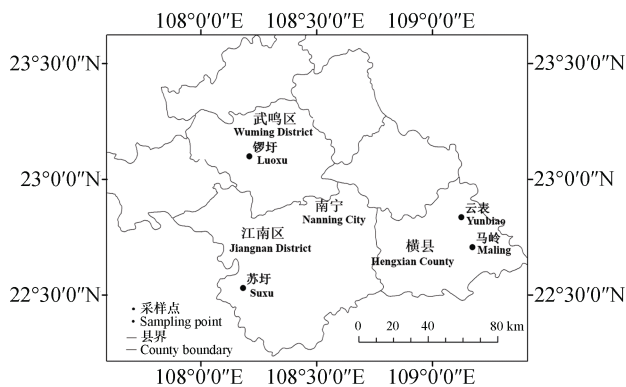


图1 研究区分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the study areas

1.2 供试土壤与样品采集

2018年1月底,在广西省南宁市的四个研究区选择常年种植水稻、无发达工业影响的地质高背景农田土壤进行采样。采集水稻土壤表层样品(0~20 cm),每个研究区内随机选取三处土壤样品装入自封袋,4℃冰盒低温保存运往实验室。仔细将肉眼可见的根系、石砾和动植物残体去除后,部分鲜样测试样品保存于4℃冰箱,部分土壤样品风干过10目或磨细至100目筛用于理化指标及重金属含量分析。

1.3 土壤重金属含量及理化性质分析

土壤重金属全量采用盐酸-硝酸-高氯酸-氢氟酸消解,重金属有效态采用二乙烯三胺五乙酸(Diethylene triamine pentaacetic acid, DTPA)浸提^[20],后用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Thermo Fisher icap Q, 美国)测定Pb、Cd、Cu、锌(Zn)和As的含量。分析过程中设置3组平行,以国家标准物质GSS-4控制测定质量,样品回收率在95%以上。

采用pH计(雷磁PHS-3C型,上海)测定土壤pH,水土比2.5:1;重铬酸钾容量法(外加热法)测定土壤有机质含量;土壤全氮采用半微量凯氏法、全磷采用高氯酸-硫酸法参考《土壤农业化学分析方法》^[21];使用NH₄OAc浸提-火焰光度计(菲乐勒FL-6480,南京)测定速效钾含量;NO₃⁻-N和NH₄⁺-N采用KCl浸提,使用流动分析仪(Seal-AutoAnalyzer3,德国)测定。

1.4 土壤微生物功能多样性分析

采用Biolog-ECO微平板法进行微生物功能多样性分析^[22-23]。称取5g新鲜土样置于高压灭菌的锥形瓶中,加入0.85%的无菌生理盐水,封口振荡30min,将土壤菌悬液用无菌生理盐水进行2次10倍稀释。然后取150μL稀释液接种至ECO平板中,加盖置于37℃恒温培养箱中连续培养168h,每隔24h用美国GEN III MicroStation Biolog仪在590nm和750nm下对其吸光值进行测定。

每孔颜色平均变化率,AWCD(Average Well Color Development):Biolog-ECO微平板的每孔平均吸光值,表示土壤微生物群落碳源利用的整体能力,计算公式如下^[24]:

$$AWCD = \sum (C_i - R) / n \quad (1)$$

式中, C_i 为每个有培养基孔的光密度值, R 为对照孔的光密度值, n 为碳源的数目, Biolog 生态板的碳源数目为 31。

群落多样性可由土壤微生物群落利用碳源类型的差异来体现, 计算公式如下:

香农指数 H 反映土壤微生物群落物种变化度和差异度, 指数值越大, 表示微生物物种丰富度越高。

$$H = -\sum P_i (\ln P_i) \quad (2)$$

式中, P_i 为第 i 孔相对吸光值与整板平均相对吸光值总和的比, 即:

$$P_i = (C_i - R) / \sum (C_i - R) \quad (3)$$

优势度指数 D 常用于评估某些常见物种的优势度。

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

丰富度指数 S = 碳源代谢孔的总数目 (微孔的光密度值大于等于 0.25, 则认为该孔碳源被利用, 即为碳源代谢孔)。

均匀度指数 E 是基于物种数量反映群落种类多样性, 群落中生物种类增多代表群落的复杂程度增高。

$$E = H/H_{\max} = H/\ln S \quad (5)$$

式中, H (香农指数) 为实际观察的物种多样性指

数, H_{\max} 为最大的物种多样性指数, $H_{\max} = \ln S$ (S 为群落中的总物种数)

1.5 数据处理

实验所得数据均录入 Excel2016 并进行初步整理, 采用 Origin2017、Canoco5.0 进行图形处理, 采用 SPSS22.0 软件对数据进行初级分析, 采用单因素方差分析并用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性检验; 通过冗余分析 (RDA) 对不同地质高背景土壤微生物群落碳源代谢多样性进行分析。

2 结 果

2.1 不同地质高背景土壤的基本性质差异

四种土壤中, 苏圩与云表土壤呈弱酸性, 锣圩与马岭土壤呈弱碱性 (表 1)。马岭土壤有机质含量及全氮、全磷显著高于其他土壤, 而速效钾含量显著低于其他土壤。锣圩土壤铵态氮和硝态氮含量均显著高于其他土壤。苏圩、锣圩、云表土壤质地黏重, 而马岭土壤质地较疏松, 富含大量铁锰结核。

2.2 不同地质高背景土壤中重金属全量、有效态含量差异

不同地质高背景土壤重金属含量特征及有效性具有较大差异 (表 2)。苏圩与云表土壤 As 含量最高, 其次为 Zn。锣圩和马岭土壤 Zn 含量最高。苏圩土壤 Pb 含量为 $(18.53 \pm 3.17) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他土壤 ($P < 0.05$), 云表土壤 Pb 含量最低, 仅为 $(4.78 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 有效态 Pb 含量在苏圩土壤中

表 1 不同地质高背景土壤基本性状

Table 1 Basic properties of the soil high in geological background value relative to sampling site

采样点 Sampling point	pH	SOM/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	AK/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	AN/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	NN/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
苏圩 ^①	5.83±0.03c	28.81±1.38c	1.55±0.02c	0.88±0.05b	132.33±0.67a	1.65±0.05c	4.57±0.41b
锣圩 ^②	7.59±0.01b	22.29±1.67c	1.55±0.00c	0.57±0.24b	109.33±2.40b	2.47±0.24a	5.77±0.18a
马岭 ^③	7.77±0.04a	76.77±3.70a	3.78±0.00a	1.48±0.11a	57.00±3.00c	2.11±0.11b	3.79±0.14c
云表 ^④	5.87±0.01c	57.61±2.70b	1.61±0.01b	1.01±0.06b	126.00±1.15a	1.59±0.16c	4.59±0.06b

注: 同一列中不同字母表示结果差异显著 ($P < 0.05$)。SOM、TN、TP、AK、AN、NN 分别代表: 土壤有机质、全氮、全磷、速效钾、铵态氮、硝态氮含量。下同。Note: The different letters in the same column indicate significant difference between soils ($P < 0.05$). SOM, TN, TP, AK, AN and NN stands for soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available potassium, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen, respectively. ①Suxu, ②Luoxu, ③Maling, ④Yunbiao. The same blow.

表 2 不同地质高背景土壤重金属全量及有效态含量

Table 2 Total and available contents of heavy metals in the soil high in geological background value relative to sampling point/ (mg·kg ⁻¹)					
采样点 Sampling point	全量 Total content				
	Pb	Cd	Cu	Zn	As
苏圩 ^①	18.53±3.17a	0.53±0.02b	16.5±0.94b	92.07±4.38b	148.36±5.13a
锣圩 ^②	7.54±0.60bc	0.36±0.02c	12.61±1.20c	72.71±5.91c	115.52±6.49ab
马岭 ^③	11.07±1.18b	1.35±0.07a	22.55±2.33a	177.92±6.93a	89.04±10.38b
云表 ^④	4.78±0.11c	0.19±0.01d	10.28±0.54c	20.66±5.96d	130.57±15.52a
采样点 Sampling point	有效态含量 Available content				
	Pb	Cd	Cu	Zn	As
苏圩 ^①	0.86±0.01a	0.24±0.00b	1.56±0.04a	1.70±0.02b	0.19±0.00a
锣圩 ^②	0.15±0.01d	0.05±0.00c	1.06±0.02b	0.71±0.01d	0.05±0.00d
马岭 ^③	0.74±0.02b	0.27±0.00a	0.78±0.01c	2.58±0.07a	0.10±0.01c
云表 ^④	0.20±0.03c	0.06±0.00c	1.64±0.09a	1.42±0.06c	0.16±0.02b

①Suxu, ②Luoxu, ③Maling, ④Yunbiao

最高,而在锣圩土壤中最低。马岭和苏圩土壤 Cd 含量超标,分别为(1.35±0.07)mg·kg⁻¹和(0.53±0.02)mg·kg⁻¹。马岭土壤 Cd 含量显著高于其他土壤 ($P<0.05$),云表土壤 Cd 含量最低,为(0.19±0.01)mg·kg⁻¹;有效态 Cd 含量在马岭土壤最高,而在锣圩土壤中最低。四种土壤的 Cu 元素含量均较低,未超过风险筛选值,马岭土壤含量最高,云表土壤含量最低。Zn 元素含量表现出与 Cu 相似的特征。与其他重金属元素不同,其他元素含量较高的马岭土壤的 As 含量显著低于其他土壤,苏圩土壤中全量及有效态 As 含量最高。

2.3 不同地质高背景土壤微生物碳源代谢活性及结构变化

如图 2 所示,在培养 0~24 h 内,四种土壤的 AWCD 值变化并不明显。培养 24~72 h 内,四种土壤 AWCD 值迅速增加,其中马岭和锣圩升高最快,而苏圩增加最慢。培养 96 h 时,云表、锣圩与马岭的 AWCD 值重合,苏圩最低。96 h 后,云表地区 AWCD 值持续升高,高于其他土壤,其次是锣圩土壤,马岭土壤 AWCD 值趋于平缓,苏圩土壤 AWCD 值依然显著低于其他土壤。

72 h AWCD 数据常被用来描述根际土壤微生物活性和功能的差异,量化微生物对碳源的利用特征^[25](图 3)。结果表明,在云表、锣圩与马岭土壤中,利用胺类和氨基酸类碳源的微生物代谢活性

高,利用糖类与多聚物类碳源的微生物代谢活性次之,利用酚酸类和羧酸类碳源的微生物代谢活性最低。而在苏圩土壤中,利用糖类和多聚物类碳源的微生物代谢活性最高。

此外,不同地区微生物数量对同一碳源的利用程度不同。在苏圩土壤中,利用 6 类碳源的微生物数量或种类显著低于其他土壤,尤其是酚酸类和胺类碳源的微生物数量或种类,在苏圩土壤中几乎检测不到。马岭和云表土壤对糖类利用的微生物数量或种类与锣圩地区相比并无显著性差异 ($P>0.05$)。

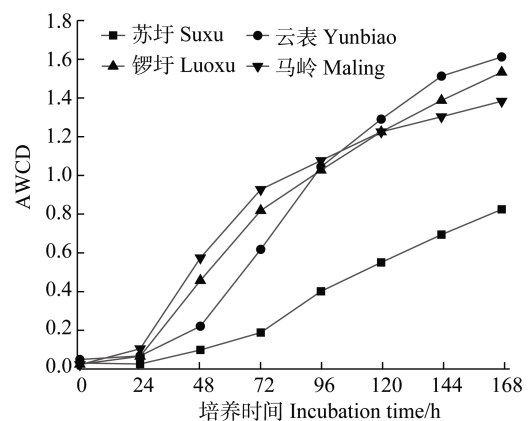
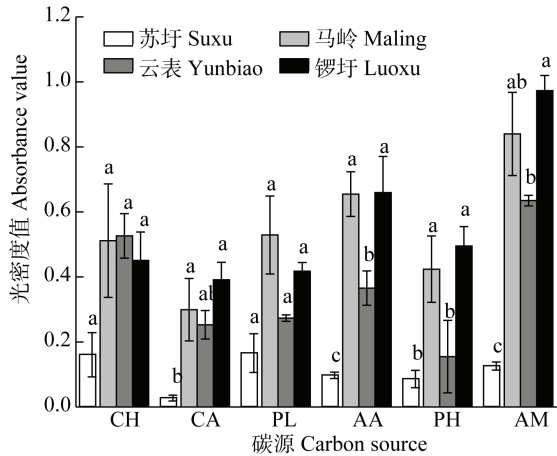


图 2 不同地质高背景土壤微生物群落每孔平均颜色变化率

Fig. 2 Average well color development (AWCD) of the soil microbial community in the soil high in geological background value relative to sampling point



注：同一碳源不同土壤间不同字母表示结果差异显著 ($P < 0.05$)。CH、CA、PL、AA、PH、AM 分别代表：糖类、羧酸类、多聚物类、氨基酸类、酚酸类、胺类。下同。Note: The different letters in the same carbon source indicate significant difference between soils ($P < 0.05$). CH, CA, PL, AA, PH and AM stands for saccharides, carboxylic acids, polymers, amino acids, phenols and amines/amides. The same below.

图 3 不同采样点土壤微生物对六类碳源的总体利用状况
Fig. 3 Overall utilization of the six kinds of carbon sources by soil microbes relative to sampling point (72 h)

锣圩土壤中利用酚酸类碳源的微生物数量或种类更多，而马岭和云表土壤对酚酸类碳源利用的微生物数量或种类较少。马岭利用多聚物类碳源的微生物数量或种类较多，而锣圩和云表利用此碳源的微生物数量或种类相对较少。马岭和锣圩利用氨基酸类、胺类和酚酸类碳源的微生物数量或种类较多，显著高于在云表土壤 ($P < 0.05$)。

分析不同土壤微生物功能多样性 (表 3) 发现，马岭、锣圩、云表土壤香农指数、均匀度指数、优势度指数、丰富度指数均显著高于苏圩土壤 ($P < 0.05$)。马岭土壤丰富度指数最高；锣圩与马岭

土壤均匀度指数最高。云表、锣圩与马岭这三种土壤香农指数及优势度指数相近。

2.4 影响土壤微生物群落结构的相关因子

利用冗余分析 (RDA) 对土壤性状、重金属全量及有效态含量与微生物碳源利用特征数据进行整合分析 (图 4) 发现，RDA1 和 RDA2 解释量分别为 50.95%、23.22%。其中 RDA1 解释了土壤微生物碳源利用种类的数据变化，RDA2 解释了重金属含量及有效态的数据变化。结果表明，苏圩、云表、锣圩土壤与马岭土壤显著分离，这主要受到重金属与土壤性状的影响。重金属指标全量镉与有效镉、有效锌含量，与土壤指标全氮、全磷和 pH，以及微生物碳源指标中氨基酸类、多聚物类的利用对马岭土壤具有较强的影响。重金属指标全量砷和土壤指标速效钾、铵态氮对锣圩土壤具有显著影响。所测指标对苏圩以及云表土壤均无显著影响。

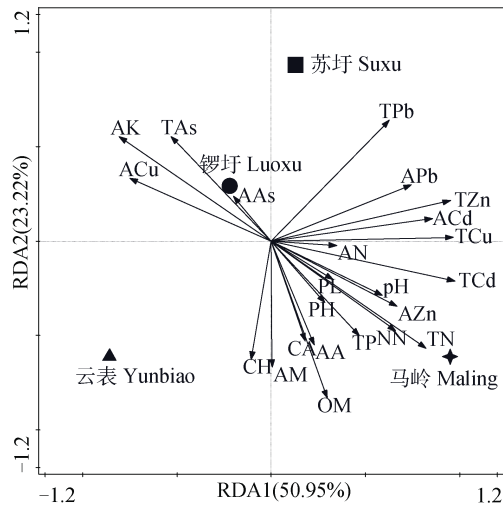
将重金属全量、土壤理化性质及有效态含量与不同碳代谢微生物进行相关性分析 (表 4)，结果显示微生物对羧酸类碳源的利用程度与 pH 呈显著正相关，而与土壤全磷和土壤有效态砷含量呈显著负相关。土壤对氨基酸类碳源的利用与土壤铵态氮呈显著正相关，与 pH 呈极显著正相关，与土壤速效钾、有效铜呈显著负相关，与全砷、有效砷呈极显著负相关。土壤对酚酸类碳源的利用与土壤铵态氮呈显著正相关，与 pH 呈极显著正相关，与有效铜呈显著负相关，与全砷、有效砷呈极显著负相关。土壤对胺类碳源的利用与土壤铵态氮呈显著正相关，与 pH 呈极显著正相关，与全铅、全砷、有效铜、有效铅呈显著负相关，与有效砷呈极显著负相关。土壤微生物对糖类和多聚物类碳源的利用与理化性质及重金属元素含量未发现显著相关性。

表 3 不同地质高背景土壤微生物群落功能多样性指数

Table 3 Functional diversity index of the soil microbial community in the soil high in geological background value relative to sampling point

采样点	香农指数	丰富度指数	均匀度指数	优势度指数
Sampling point	Shannon index (H)	Abundance index (S)	Evenness index (E)	Simpson index (D)
苏圩 ^①	2.46±0.12b	5.33±2.18b	2.00±0.72b	0.87±0.01b
锣圩 ^②	2.82±0.07a	16.67±1.33a	7.00±0.36a	0.93±0.01a
马岭 ^③	2.82±0.07a	20.33±3.18a	6.77±1.07a	0.93±0.00a
云表 ^④	2.80±0.08a	15.33±0.88a	5.36±0.08a	0.92±0.00a

①Suxu, ②Luoxu, ③Maling, ④Yunbiao.



注: TPb、TCd、TCu、TZn、TAs 和 APb、ACd、ACu、AZn、AAs 分别表示: 全量铅、全量镉、全量铜、全量锌、全量砷和有效铅、有效镉、有效铜、有效锌、有效砷。下同。Note: TPb, TCd, TCu, TZn, TA, APb, ACd, ACu, AZn and AAs stands for total Pb, total Cd, total Cu, total Zn, total As, available Pb, available Cd, available Cu, available Zn and available As. The same below.

图 4 不同地质高背景土壤微生物碳代谢功能多样性及环境因子的冗余分析

Fig. 4 Diversity of the carbon metabolism function of the soil microbes in the soil high in geological background value and redundant analysis (RDA) of the environmental factors relative to sampling point

3 讨论

3.1 不同地质高背景土壤的基本理化性质差异与母质和质地有关

马岭土壤有机质含量显著高于其他土壤(表 1), 这可能与马岭土壤成土母质组分主要为氧化钙含量较高的石灰岩有关, 研究发现, 胡敏酸易与钙结合形成不易分解的胡敏酸钙, 在同种生态系统下氧化钙含量高的石灰岩土壤有机碳更加容易积累^[26]。四个土壤 pH 差异很大: 母质同为河流沉积物的苏圩与云表土壤呈弱酸性, 母质为石灰岩的马岭土壤则呈弱碱性。研究表明, 土壤 pH 一般取决于成土母质, 碱性基岩上发育的土壤 pH 一般要高于酸性基岩形成的土壤 pH^[27]。马岭土壤全量氮、磷含量显著较高, 而速效钾含量显著低于其他地区, 这与土壤质地有关, 马岭土壤质地疏松, 质地疏松的土壤保肥能力较低^[28]。

3.2 不同地质高背景土壤的重金属含量与赋存形态差异

对比 2018 年新出台的土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (GB15618-2018)^[29], 四种土壤 As 元素总量均超过土壤风险筛选值 (苏圩土壤 (4.95 倍)、镏圩 (5.77 倍)、马岭 (4.45 倍)、云表 (4.35 倍)), 其中镏圩土壤超过风险管控值。Cd 元素全量在苏圩 (1.33 倍)、马岭 (2.25 倍) 土壤含量较高, 超过国家土壤风险筛选值。其他重金属元素未超标。

不同土壤重金属富集情况不同, 碳酸盐系石灰岩发育而来的马岭土壤 Cd 元素含量高于第四纪河流沉积物发育而来的苏圩、镏圩、云表土壤, 这与郑国东^[30]研究结果一致: 几种土壤重金属含量由高到低依次为碳酸盐岩形成的土壤 (灰岩、白云岩)、第四系沉积、碎屑岩形成的土壤 (砂岩、砾岩、页岩)、中酸性岩形成的土壤。这种重金属含量的差别可能与土壤成土母质及风化程度等有关, 首先马岭土壤成土母质本身重金属含量偏高, 其次, 与苏圩、镏圩、云表等土壤相比, 马岭土壤地层形成时间更早, 成土母质所受到的风化淋溶程度就更深, 次生富集作用也就越大, 进而土壤重金属富集含量越高。

不同土壤重金属有效态含量表现出与全量重金属不同的趋势 (表 2), 马岭地区土壤 Cd 全量 ((1.35±0.07) mg·kg⁻¹) 显著高于苏圩地区 Cd 含量 ((0.53±0.02) mg·kg⁻¹), 然而其有效镉含量差异却不显著, 这可能是与两地的土壤 pH 及有机质含量有关。马岭地区土壤 pH (7.77±0.04) 以及有机质含量 ((76.77±3.70) g·kg⁻¹) 较高, 而苏圩地区土壤 pH (5.83±0.03) 以及有机质含量 ((28.81±1.38) g·kg⁻¹) 较低。根据以往的研究, 土壤有机质、pH 是影响土壤重金属有效性的主要因素。一般地, 土壤 pH 越低土壤中重金属阳离子活性越强, 重金属元素的迁移性更强, 其有效性增加^[31]。土壤有机质等大分子固相有机物等会吸附重金属元素, 限制其在土壤中的迁移能力, 从而减弱重金属元素的有效性^[32]。此外, 土壤质地的不同也可能是其原因之一, 本研究发现马岭地区土壤质地疏松且富含大量铁锰结核, 土壤铁锰结核中锰氧化物对重金属离子有很强的吸附作用^[33], 这也将会导致土壤有效态重金属含量降低。

表 4 不同种类碳源利用能力与重金属元素及土壤理化性质之间的相关性

Table 4 Correlation of carbon source utilization capacity with soil physical and chemical properties and heavy metal elements relative to type of the carbon source

	TCd	TCu	TPb	TZn	TAs	ACd	ACu	AZn	APb	AAs
CH	0.127	-0.127	-0.401	-0.008	-0.492	-0.273	-0.206	0.07	-0.417	-0.318
CA	0.347	0.113	-0.392	0.291	-0.608*	-0.164	-0.614*	0.064	-0.331	-0.669*
PL	0.38	0.308	0.148	0.397	-0.459	0.161	-0.381	0.216	0.1	-0.298
AA	0.368	0.182	-0.381	0.334	-0.756**	-0.173	-0.688*	0.007	-0.389	-0.796**
PH	0.342	0.147	-0.347	0.332	-0.728**	-0.17	-0.659*	-0.064	-0.333	-0.781**
AM	0.183	-0.072	-0.686*	0.124	-0.650*	-0.415	-0.631*	-0.142	-0.615*	-0.857**
	SOM	pH	TN	TP	AK	AN	NN			
CH	0.408	0.337	0.265	0.284	-0.35	0.123	0.178			
CA	0.348	0.701*	0.45	0.095	-0.574	0.529	0.189			
PL	0.203	0.441	0.374	0.189	-0.396	0.221	0.231			
AA	0.276	0.827**	0.468	0.229	-0.669*	0.657*	0.109			
PH	0.136	0.826**	0.375	-0.099	-0.567	0.662*	-0.056			
AM	0.269	0.768**	0.346	0.071	-0.544	0.681*	-0.002			

注：* 表明在 0.05 水平（双侧检验）上显著相关；** 表明在 0.01 水平（双侧检验）上显著相关。Note: Single asterisk indicates significant correlation at 0.05 level (two-sided test); Double asterisk indicates significant correlation at 0.01 level (two-sided test).

3.3 不同地质高背景土壤微生物群落变化的影响因素

土壤对微生物碳源利用能力及土壤微生物群落多样性受到土壤性质的显著影响（图 2、表 3）。本研究结果表明土壤重金属含量较高的马岭土壤，微生物对碳源的利用能力及微生物多样性指数高于重金属含量低的苏圩土壤，究其原因，可能与马岭土壤 pH 和有机质含量较高，土壤中重金属的生物有效性较低有关（表 2）；此外，马岭土壤养分含量较高（表 1），给土壤微生物生存提供有利条件，土壤微生物数量、活性和微生物群落多样性增加^[34-35]。

分析不同土壤对碳源的利用类型得到锱圩、马岭土壤微生物对胺类利用能力均较强，而苏圩土壤微生物利用能力最差。相关性分析发现 Cu、Pb、Zn、As 对土壤微生物利用胺类的能力呈负相关（表 4），因而重金属超标可能是苏圩土壤微生物对胺类利用能力低的主要原因。此外，苏圩土壤微生物对其他 5 种碳源的利用能力也显著低于其他土壤。这与赵立君等^[16]的研究一致，受 Pb、As 等重金属污染土壤的微生物多样性会呈下降趋势，群落结构趋于简单，而且 Pb、As 污染会显著

抑制氨基酸类、酯类、胺类的代谢活性。此外，有研究表明：增加土壤有机质可显著提高对糖类、羧酸类、胺类碳源的利用^[36]，表 4 有机质含量与微生物对糖类、羧酸类与胺类等利用能力的正相关也印证了这一点。

4 结 论

成土母质组分和地质年代会影响土壤有机质含量、pH、质地。地质高背景土壤重金属含量差异主要源于成土母质的不同，次生富集程度将随着土壤形成时间的增加而加强。养分含量低且重金属含量较高的苏圩土壤微生物对碳源的利用能力及多样性指数最低。土壤微生物对不同类型碳源利用强度在不同地质高背景土壤上差异显著，这主要体现在对胺类、糖类与氨基酸类的利用上，土壤有机质、pH、全量砷、镉、铅以及有效砷含量是引起土壤微生物碳源利用分异的主要环境因子。

致 谢 感谢广西壮族自治区地质矿产勘查开发局王磊工程师及南京大学季峻峰老师对于地质背景信息的提供。

参考文献 (References)

- [1] Liu P, Hu W Y, Huang B, et al. Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (5): 1048—1059. [刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (5): 1048—1059.]
- [2] Lü J, Liu Y, Zhang Z L, et al. Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: Spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 107: 140—147.
- [3] Kong X Y, Liu T, Yu Z H, et al. Heavy metal bioaccumulation in rice from a high geological background area in Guizhou Province, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (10): 2281.
- [4] Tang D D, Yuan X Y, Wang Y M, et al. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (1): 18—26. [唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (1): 18—26.]
- [5] Liu Y Z, Xiao T F, Perkins R B, et al. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 176: 42—49.
- [6] Cao J H, Yuan D X, Zhang C, et al. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China[J]. *Geology-geochemistry*, 2004, 32 (1): 1—8. [曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. *地球与环境*, 2004, 32 (1): 1—8.]
- [7] Hu S Y, Ran W Y, Fan H R. Geochemical behaviour of heavy metals in soil-crop system[J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39 (5): 84—87. [胡省英, 冉伟彦, 范宏瑞. 土壤—作物系统中重金属元素的地球化学行为[J]. *地质与勘探*, 2003, 39 (5): 84—87.]
- [8] Lu X Z, Gu A Q, Zhang Y W, et al. Sources and risk assessment of heavy metal in agricultural soils based on the environmental geochemical baselines[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 408—419. [卢新哲, 谷安庆, 张言午, 等. 基于环境地球化学基线的农用地重金属累积特征及其潜在生态危害风险研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 408—419.]
- [9] Wang M, Chen S B, Zheng H, et al. The responses of cadmium phytotoxicity in rice and the microbial community in contaminated paddy soils for the application of different long-term N fertilizers[J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 124700.
- [10] Wang K L, Miao F, Shi K, et al. Research advances in eco-toxicological diagnosis methods of soil pollution[J]. *Soils*, 2019, 51 (5): 854—863. [王开来, 苗峰, 史柯, 等. 土壤污染生态毒理诊断方法研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51 (5): 854—863.]
- [11] Frey B, Stemmer M, Widmer F, et al. Microbial activity and community structure of a soil after heavy metal contamination in a model forest ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (7): 1745—1756.
- [12] Yan H, Ouyang M, Zhang X H, et al. Effects of different gradients of heavy metal contamination on soil fungi community structure in paddy soils[J]. *Soils*, 2018, 50 (3): 513—521. [闫华, 欧阳明, 张旭辉, 等. 不同程度重金属污染对稻田土壤真菌群落结构的影响[J]. *土壤*, 2018, 50 (3): 513—521.]
- [13] Liu B R, Zhang X Z, Hu T H, et al. Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (22): 7211—7220. [刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. *生态学报*, 2013, 33 (22): 7211—7220.]
- [14] Xie W J, Zhou J M, Wang H Y. Influence of Cu^{2+} , Cd^{2+} and cypermethrin on microbial functional diversity in different fertilization soils[J]. *Environmental Science*, 2008, 29 (10): 2919—2924. [谢文军, 周健民, 王火焰. 重金属 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 及氯氰菊酯对不同施肥模式土壤微生物功能多样性的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29 (10): 2919—2924.]
- [15] Wu J J, Jiang Y M, Wu Y P, et al. Effects of complex heavy metal pollution on biomass and community structure of soil microbes in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1102—1109. [吴建军, 蒋艳梅, 吴愉萍, 等. 重金属复合污染对水稻土微生物生物量和群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1102—1109.]
- [16] Zhao L J, Ren W, Zheng Y, et al. Characteristics of soil microbial diversity and community structure in arsenic-polluted wetland habitats[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32 (1): 150—158. [赵立君, 任伟, 郑毅, 等. 砷污染湿地生境下土壤微生物多样性及群落结构特征[J]. *环境科学研究*, 2019, 32 (1): 150—158.]
- [17] Bian F Y, Zhong Z K, Zhang X P, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) intercropping with *Sedum plumbizincicola* and the impact on microbial community structure[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54 (8): 106—116. [卞方圆, 钟哲科, 张小平, 等. 毛竹和伴矿景天对重金属污染土壤的修复作用和对微生物群落的影响[J]. *林业科学*, 2018, 54 (8): 106—116.]
- [18] Chen L J, Feng Q, Li C S, et al. Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11193.
- [19] Wang X, Gao P, Li D P, et al. Risk assessment for and microbial community changes in Farmland soil

- contaminated with heavy metals and metalloids[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 185: 109685.
- [20] Yang J. Study on different acid digestion methods in the analysis of heavy metals in soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41 (S2): 184—188. [杨进. 土壤中金属元素分析的不同消解方法比较[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41 (S2): 184—188.]
- [21] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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.]
- [22] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, 57(8): 2351—2359.
- [23] Zheng H L, Weiner L M, Bar-Am O, et al. Design, synthesis, and evaluation of novel bifunctional iron-chelators as potential agents for neuroprotection in Alzheimer's, Parkinson's, and other neurodegenerative diseases[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2005, 13 (3): 773—783.
- [24] Garland J L. Analytical approaches to the characterization of samples of microbial communities using patterns of potential C source utilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28 (2): 213—221.
- [25] Classen A T, Boyle S I, Haskins K E, et al. Community-level physiological profiles of bacteria and fungi: Plate type and incubation temperature influences on contrasting soils[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, 44 (3): 319—328.
- [26] Yuan H, Xie H X, Luo L F, et al. Genetic characteristics and classification of limestone soil in South China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32 (21): 124—128. [袁红, 谢红霞, 罗兰芳, 等. 南方石灰岩土壤发生特性和系统分类研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32 (21): 124—128.]
- [27] Zhang Y P, Wu Y, Zheng X W. Trend analysis and influencing factors of soil acidity and alkalinity in Hubei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, 32 (S1): 30—34. [张元培, 吴颖, 郑雄伟. 湖北省土壤酸碱度趋势分析及影响因素[J]. *资源环境与工程*, 2018, 32 (S1): 30—34.]
- [28] Yan Y D, Jiang Z B, Xu F L, et al. Analysis of the soil texture and fertility status of hillside close-planting jujube field on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 174—178. [闫亚丹, 蒋中波, 徐福利, 等. 黄土高原坡地密植枣园土壤质地与肥力状况分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27 (3): 174—178.]
- [29] Ministry of Ecological Environment. Soil environmental quality, Risk control standard for soil contamination of agricultural land(trial implementation): GB 15618-2018. Beijing: China Standards Press, 2018[生态环境部. 土壤环境质量. 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.]
- [30] Zheng G D. Factors influencing the distribution and accumulation of heavy metals in topsoil across Beibu Gulf of Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. [郑国东. 广西北部湾地区表层土壤重金属分布特征及其影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.]
- [31] Ramos-Miras J J, Roca-Perez L, Guzmán-Palomino M, et al. Background levels and baseline values of available heavy metals in Mediterranean greenhouse soils (Spain) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(2): 186—192.
- [32] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185 (2/3): 549—574.
- [33] Liu F, Tan W F, Liu G Q, et al. Adsorption of heavy metal ions on Fe-Mn nodules in several soils and types of Mn oxide minerals[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (5): 699—706. [刘凡, 谭文峰, 刘桂秋, 等. 几种土壤中铁锰结核的重金属离子吸附与锰矿物类型[J]. *土壤学报*, 2002, 39 (5): 699—706.]
- [34] Li M, Zhang E P, Zhang S H, et al. Comparison of soil enzyme activities and microbial C metabolism in installed vegetable fields under long-term different fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (1): 44—53. [李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (1): 44—53.]
- [35] Chen X F, Li Z P, Liu M, et al. Effect of long-term fertilizations on microbial community structure and functional diversity in paddy soil of subtropical China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (7): 1815—1822. [陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 长期施肥处理对红壤水稻土微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34 (7): 1815—1822.]
- [36] Mitchell R J, Keith A M, Potts J M, et al. Overstorey and understorey vegetation interact to alter soil community composition and activity[J]. *Plant and Soil*, 2012, 352 (1/2): 65—84.

(责任编辑: 陈荣府)