

杨霖,杨程,朱同彬,等.岩溶区原始林土壤微量元素含量与有效特征[J].中国岩溶,2018,37(1):59-66.
DOI:10.11932/karst2017y01

岩溶区原始林土壤微量元素含量与有效特征

杨霖¹,杨程²,朱同彬³,谢银财³,秦兴华³,罗柳玲³,朱梓弘³,孟磊¹,何秋香¹

(1.海南大学热带农林学院,海口 570228; 2.江苏省地质调查研究院,南京 210018;

3.中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:以贵州茂兰、海南俄贤岭、云南西双版纳勐远仙境国家公园和绿石林自然保护区内具有典型岩溶地貌特征的原始林为研究对象,调查岩溶原始林地土壤 4 种微量元素(Cu、Fe、Mn、Zn)全量和有效态含量。结果表明,岩溶区原始林地土壤全铜、全铁、全锰和全锌含量分别为 $0.03\sim 0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $35.6\sim 57.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.74\sim 5.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.13\sim 1.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过国家背景值的平均值。研究区土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 有效态含量分别为 $1.09\sim 3.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $11.6\sim 62.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $48.3\sim 173\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.17\sim 37.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据土壤微量元素有效态评价标准,4 种微量元素有效态含量均处于较高水平。原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 的活化率均值分别为 5.48%、0.10%、6.44%、4.19%,表明岩溶区森林土壤 Cu、Mn 和 Zn 供素水平高,Fe 供素水平低。4 个原始林地土壤微量元素有效性综合指数(E_i)为茂兰(21.0)>绿石林(12.8)≈勐远(12.7)>俄贤岭(5.15),且 E_i 与全氮和有机碳含量呈显著的正相关。

关键词:岩溶区;原始林;微量元素;有效性

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)01-0059-08

0 引言

相对于大量元素而言,土壤中的微量元素含量较低,却是植物生长发育所不可缺少和替代的物质^[1]。它们不仅影响作物正常生长和发育,而且还会影响其品质与产量^[2]。基于微量元素的作用,目前已开展大量相关研究,如不同类型土壤对微量元素的专性吸附、微量元素在土壤中的化学行为与植物效应、长期施用有机肥对土壤微量元素形态的影响等,但这些研究多涉及红壤、黄壤、褐土、黑土、棕壤等^[3-5],关于岩溶区碳酸盐岩发育的石灰性土壤微量元素的研究相对较少^[6-7]。

作为我国关键生态脆弱区之一的西南岩溶区,按碳酸盐出露面积计算可达 54 万 km^2 ,广泛分布于贵州、云南、四川、广西、湖南、湖北、广东和重庆等省市

(区)^[8-9]。岩溶区石灰性土壤具有富钙、偏碱、有机质主要以稳定的腐殖质钙形式存在等特点^[10],使得土壤中微量元素含量、分布特征及影响因素可能有别于其他地带性土壤^[11]。除地形、气候等因素外,成土母质、土壤颗粒组成、黏土矿物组成、腐殖质含量和组成及酸碱和氧化还原状况也会显著影响土壤微量元素^[12]。因高钙镁和高 pH 值等因素影响,岩溶区石灰性土壤微量元素可能具有总量高但有效性低的特点。目前已有关于岩溶区土壤微量元素的研究主要集中于农田、草地和不同发生程度石漠化地土壤微量元素含量、分布与评价等方面^[13-14],但缺乏该地区土壤微量元素环境背景值方面的资料。研究土壤微量元素背景值,提供环境要素数据,是林木管理和保护、土地资源开发和环境质量评定的基础,而受耕作、施肥和灌溉等管理措施影响较大的土壤并不能提供此

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502503);中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助(YYWF201637, 201724)

第一作者简介:杨霖(1992-),女,硕士研究生,主要从事土壤 N 循环研究。E-mail:771226621@qq.com。

通信作者:何秋香(1973-),女,助理研究员,主要从事土壤 N、C 循环及环境效应研究。E-mail:43060398@qq.com。

收稿日期:2017-09-20

数据^[15]。基于土壤微量元素环境背景值的重要性，很有必要调查未受人为扰动和污染的原始自然岩溶生态系统土壤微量元素的环境背景值。

本研究分别在贵州茂兰、海南俄贤岭、云南西双版纳勐远仙境国家公园和绿石林自然保护区选择目前我国为数不多的具有岩溶地貌特征的原始林地土壤，调查 4 种微量元素(Cu、Fe、Mn 和 Zn)全量和有效态含量，探讨其空间分布特征和变化趋势，明确岩溶区土壤微量元素环境背景值，为区域林木保护和农业发展提供科学依据。

1 研究区概况

采样点分别位于贵州茂兰自然保护区、海南俄贤岭自然保护区、云南西双版纳地区的绿石林自然保护区和勐远仙境国家公园(图 1)，区内均有保存完好的典型岩溶地貌的原始森林生态系统，土壤以黑色石灰土为主，土层浅薄(0~20 cm)，地面岩石裸露率高达 80%，且土体不连续，土壤多存在于岩石缝隙中。



图 1 采样点位置

Fig. 1 Location of sampled region

茂兰自然保护区位于贵州省南部黔、桂交界地荔波县内，海拔高度 430~1 078 m，年平均气温 15.3℃，年降水量 1 752 mm，年相对湿度 83%，属典型的亚热带温湿气候区^[16]。区内森林覆盖率达 87.3%，主要乔木树种包括：圆果化香(*Platycarya longipes*)、云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*)、朴树(*Celtis tetrandra*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)等落叶树种及青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、樟叶槭(*Acer cinnamomifolium*)、腺叶山矾(*Symplocos adonopus*)等常绿种类^[17]。

俄贤岭自然保护区地处海南省西部昌江县和东方市交界，属雅加达岭山脉，山体东西长约 13 km，南

北宽约 9 km，海拔 100~1 238 m，受典型热带季风气候影响，年均气温 24.5℃，年降雨量为 1 647 mm，雨季 5—11 月，旱季 12 月—次年 4 月，干湿季节明显，是海南岛石灰岩分布面积最大、植被保存最好的地区^[18]。区内植被类型多样，从低海拔到高海拔有热带半落叶季雨林、热带常绿季雨林、热带山地雨林和石灰岩山顶矮林依次分布^[19]。主要植物有坝王栎(*Quercus barwanglingensis*)、海南大戟(*Euphorbia hainanensis*)、龙血树(*Dracaena angustifolia*)、海南鹅耳枥(*Carpinus londoniana*)、美丽梧桐(*Firmiana pulcherrima*)等^[20]。

绿石林自然保护区和勐远仙境国家公园位于西

双版纳勐腊国家级自然保护区内,属北热带季风气候,年平均气温 21.5℃,年降水量 1 557 mm,年相对湿度 86%,一年中干湿季分明,干热季(3—4 月)和雨季(湿热季,5—10 月),此时期集中了全年降水的 85%;11 月—次年 2 月为雾凉季,降雨量较少,但早晚有浓雾,空气湿度较大,可以弥补此时期降雨量的不足,以至该区虽然地处的纬度和海拔较高,但仍然

具备了热带湿热气候^[21]。区域分布石灰岩山热带季节性雨林、半常绿或落叶季节林、竹林等,森林覆盖率达 95%以上,主要树种有短棒柄花(*Cleidion brevipetiolatum*)、尖叶闭花木(*Cleistanthus sumatranus*)、缅甸桐(*Sumbaviopsis albicans*)、轮叶戟(*Lasio-cocca comberi*)、油朴(*Celtis wighetii*)等^[22]。

4 个采样点的具体信息见下表 1。

表 1 采样点基本信息
Table 1 Basic information of samples

采样点	地理位置	海拔/m	坡度/°
茂兰自然保护区	25°12′52.71″N,107°56′14.57″E	759.0	65
勐远仙境国家公园	21°43′58.39″N,101°39′01.39″E	790.0	60
绿石林保护区	21°54′43.39″N,101°16′53.54″E	634.5	55
俄贤岭自然保护区	19°00′17.18″N,109°03′11.60″E	330.0	45

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集

2016 年 9 月在 4 个采样区采集土壤样品,在每个采样区选择 3 个地形和坡度相对一致的样地作为空间重复,每个样地间距超过 1 000 m。在每个样地里设置 20 m×10 m 的 5 个完整的岩溶地貌单元,按照石沟、石缝、石坑和土面 4 种类型分别多点采集 0~15 cm 的表层土壤,剔除石块和植物根系,将新鲜土壤混合均匀组成一个样品。土样在室温下风干,过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定土壤理化性质及铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)全量和有效态含量。

2.2 土壤理化指标和微量元素测定方法

土壤样品理化指标采用常规分析方法分析^[23-24]。土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 有效态含量采用 DTPA 浸提,原子吸收光谱法^[25];土壤微量元素全量采用湿法消解原子吸收法^[26]。

2.3 土壤微量元素有效性评价

微量元素有效性评价参考土壤重金属污染评价标准与方法^[27],采用单项指数(E_i)和综合指数(E_c)相结合,先计算各元素有效性指数,再采用均方根法计算综合有效性指数^[28]。计算公式为:

$$E_i = \frac{C_i}{S_i}, E_c = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2}$$

式中: C_i 为土壤微量元素 i 含量的实测值; S_i 为土壤微量元素 i 含量的临界值; n 为微量元素种类。

2.4 微量元素活化率

土壤有效态微量元素含量占总含量的百分比,称之为微量元素活化率,它可以反映出土壤当前的和潜在的供素水平^[29]。

2.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2007 程序进行数据整理,SAS 8.1 统计分析软件对实验数据进行分析。

3 结果与分析

3.1 不同岩溶地区原始林土壤理化性质

表 2 所示,4 个原始林地土壤理化性质差异较大。土壤有机碳和全氮含量分别达到 32.6~144 g·kg⁻¹和 2.37~16.5 g·kg⁻¹,均以茂兰地区最大,俄贤岭地区最低。土壤有机碳与全氮含量呈显著正相关($R^2 = 0.98, P < 0.01$)。土壤全磷和有效磷含量以勐远最高,分别达到 4.82 g·kg⁻¹和 69.2 mg·kg⁻¹,显著高于其他 3 个地区的原始林,以俄贤岭最小。土壤全钾含量以茂兰地区最低,仅为 3.44 g·kg⁻¹,显著低于其它 3 个地区的原始林,勐远(13.3 g·kg⁻¹)和俄贤岭(11.3 g·kg⁻¹)次之;而 4 个地区土壤有效钾含量(181~384 mg·kg⁻¹)无显著差异。4 个地区原始林土壤全钙含量处于 8.96 g·kg⁻¹(俄贤岭)~17.9 g·kg⁻¹(勐远),而全镁含量处于 4.34 g·kg⁻¹(绿石林)~9.00 g·kg⁻¹(俄贤岭)。4 个原始林之间土壤全钠含量差异显著,茂兰最高(9.49 g·kg⁻¹),约是勐远地区的 63.3 倍。4 个地区土壤 pH 无显著差异,处于 6.95~7.38 之间。

表 2 岩溶区 4 个不同原始林地土壤基本理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soil samples from four natural forests in karst region

成分	茂兰	勐远	绿石林	俄贤岭
有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	144±12.4A	68.3±21.3B	46.1±6.18BC	32.6±4.35C
全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	16.5±3.32A	7.19±2.42B	5.41±0.48BC	2.37±0.63C
全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.72±0.30B	4.82±3.15A	1.27±0.25B	0.56±0.50B
全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.44±3.01C	13.3±1.44A	8.63±1.38B	11.3±1.27AB
全钙/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	15.9±1.77AB	17.9±6.86A	10.0±1.99B	8.96±0.46B
全镁/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	6.30±0.87AB	5.84±1.06AB	4.34±1.15B	9.00±2.82A
全钠/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	9.49±0.62A	0.15±0.14D	3.24±0.08B	1.21±0.10C
有效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	13.0±3.13B	69.2±54.8A	5.37±1.56B	2.43±2.75B
速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	223±24.5A	384±199A	181±24.2A	206±70.6A
pH 值	7.13±0.55A	7.38±0.15A	7.29±0.20A	6.95±0.25A

注：表中同一行不同大写字母表示不同地区土壤各项指标差异性显著($P<0.05$)。

3.2 不同岩溶区原始林地土壤微量元素含量、有效性及活化率

表 3 所示,研究区土壤全铜、全铁、全锰和全锌含量分别介于 $0.03 \sim 0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35.6 \sim 57.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.74 \sim 5.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.13 \sim 1.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

均超过全国土壤微量元素全量背景值的平均值。总体来看,岩溶区原始林地土壤 Mn 和 Zn 具有较大的空间异质性,变异系数分别为 80.9%和 82.2%,显著高于 Cu(40.0%)和 Fe(26.2%)。4 个地区土壤 Cu、Fe 和 Mn 全量以绿石林地区最高,Zn 以茂兰地区最高。

表 3 不同岩溶区原始林土壤微量元素全量值和全国土壤微量元素全量背景值

Table 3 Total content of trace elements in soils from four natural forests in karst region and the national background value of total trace elements

样地	Cu/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Fe/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Mn/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
茂兰	0.03±0.01B	46.0±15.7AB	0.98±0.35C	1.03±0.01A
勐远	0.05±0.01B	35.6±4.50B	3.25±1.44B	0.19±0.11C
绿石林	0.08±0.02A	57.4±4.45A	5.83±0.84A	0.45±0.01B
俄贤岭	0.04±0.01B	38.0±4.31B	0.74±0.11C	0.13±0.05C
平均值	0.05±0.02	44.3±11.6	2.57±2.08	0.45±0.37
变异系数	40.0%	26.2%	80.9%	82.2%
全国土壤	$0.33 \times 10^{-3} \sim 0.27$ (0.02a)	12.0~125 (29.4a)	$1.00 \times 10^{-3} \sim 5.89$ (0.58a)	$2.60 \times 10^{-3} \sim 0.59$ (0.07a)

注：表中同一列不同大写字母表示不同地区土壤差异性显著($P<0.05$)，下同；a,全国土壤微量元素全量均值。

表 4 所示,4 个研究区土壤 Cu 有效态含量介于 $1.09 \sim 3.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各研究区之间无显著差异;土壤 Fe 有效态含量以茂兰最高($62.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),绿石林最低($11.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),与勐远和俄贤岭均达到显著差异;土壤 Mn 有效态含量以绿石林最高($173 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),俄贤岭最低($48.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且都与茂兰和勐远达到显著差异;土壤 Zn 有效态含量以茂兰最大($37.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),显著高于勐远($13.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、

绿石林($14.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和俄贤岭($4.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。4 种微量元素有效态含量平均值由大到小排序为 Mn ($110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Fe ($37.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Zn ($17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cu($2.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),变异系数排序为 Zn (90.2%)> Cu(52.7%)> Fe(51.3%)>Mn(44.7%)。

综合分析表 4 和表 5 数据可知,岩溶区各原始林土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 有效态含量均高于临界值,且处于较高水平。

表 4 不同岩溶区原始林土壤微量元素有效值

Table 4 Available content of trace elements in soils from four natural forests in karst region

样地	Cu/mg · kg ⁻¹	Fe/mg · kg ⁻¹	Mn/mg · kg ⁻¹	Zn/mg · kg ⁻¹
茂兰	2.56±1.55A	62.9±1.18A	104±24.4B	37.6±16.8A
勐远	3.51±1.31A	35.1±4.30B	116±10.3B	13.3±7.62B
绿石林	2.49±1.14A	11.6±3.46C	173±29.6A	14.2±8.45B
俄贤岭	1.09±0.35A	41.7±5.32B	48.3±9.61C	4.17±2.36B
平均值	2.41±1.27	37.8±19.4	110±49.2	17.3±15.6
变异系数	52.7%	51.3%	44.7%	90.2%

表 5 土壤微量有效态元素评价标准¹⁾

Table 5 Evaluation standard for available trace elements in soil

	极低	低	中	高	极高	临界值(S _i)
有效铜/mg · kg ⁻¹	<0.10	0.10~0.20	0.21~1.00	1.10~1.80	>1.80	0.20
有效铁/mg · kg ⁻¹	<5.00	5.00~7.00	7.10~10.0	10.1~15.0	>15.0	7.00
有效锰 ²⁾ /mg · kg ⁻¹	<5.00	5.00~10.0	10.0~20.0	20.0~30.0	>30.0	10.0
有效锌/mg · kg ⁻¹	<0.50	0.50~1.00	1.10~2.00	2.10~5.00	>5.00	1.00

注:1)引自 1989 年南京微量元素肥料工作会议资料,1989. Data from microelements fertilizer meeting in Nanjing, 1989.
2)引自 1985 年西安召开的微量元素肥料工作会议资料,1985. Data from microelements fertilizer meeting in Xi'an, 1985.

由表 6 可知,4 个地区原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 的有效性指数(E_i)范围依次为 5.46~17.6、1.66~8.98、4.83~17.2 和 4.17~37.6,平均值由小到大排序为 Fe(5.40)<Mn(11.0)<Cu(12.1)<Zn

(17.3)。4 个地区原始林地土壤微量元素有效性综合指数(E_i)为茂兰(21.0)>绿石林(12.8)≈勐远(12.7)>俄贤岭(5.15)。

表 6 不同岩溶区原始林土壤微量元素有效性指数(E_i)和综合性指数(E_i)

Table 6 Availability index (E_i) and integrated availability index of trace elements (E_i) in soils from four natural forests in karst region

样地	E _i (Cu)	E _i (Fe)	E _i (Mn)	E _i (Zn)	E _i
茂兰	12.8±5.74A	8.98±0.17A	10.4±2.43B	37.6±16.8A	21.0
勐远	17.6±6.53A	5.02±0.61B	11.6±1.03B	13.3±7.62B	12.7
绿石林	12.4±5.72A	1.66±0.49C	17.2±2.96A	14.2±8.45B	12.8
俄贤岭	5.46±1.77A	5.95±0.76B	4.83±0.96C	4.17±2.36B	5.15
平均值	12.1±6.37	5.40±2.77	11.0±4.92	17.3±15.6	12.9

表 7 所示,4 种微量元素的活化率具有较大差异,且受采样区的显著影响。4 个地区原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 的活化率依次为 2.73%~8.61%、0.02%~0.15%、3.26%~11.6% 和 3.11%~

6.87%,由此可见,土壤 Fe 活化率极低。4 个地区土壤 Cu、Fe 和 Mn 活化率以茂兰地区最大,Zn 活化率以勐远地区最大。

表 7 不同岩溶区原始林土壤微量元素活化率

Table 7 Average activation ratios of trace elements in soils from four natural forests in karst region

样地	Cu / %	Fe / %	Mn / %	Zn / %
茂兰	8.61±4.08A	0.15±0.07A	11.6±5.51A	3.66±1.67A
勐远	7.39±0.69AB	0.10±0.01A	4.10±1.77B	6.87±1.97A
绿石林	3.17±0.80B	0.02±0.01B	3.26±0.58B	3.11±1.74A
俄贤岭	2.73±0.70B	0.11±0.01A	6.54±0.33AB	3.11±1.12A
平均值	5.48±3.24	0.10±0.06	6.44±4.29	4.19±2.16

相关分析表明,研究区 Cu 和 Mn 的活化率均与有机碳和全氮呈显著正相关,Fe 活化率与 pH 呈显著负相关,Zn 活化率与速效钾和有效锌呈极显著正相关。表 9 所示,全锌、有效铁、有效锌和 E_r 均与全氮和有机碳呈极显著正相关。

表 8 土壤理化性质与微量元素活化率相关性分析

Table 8 Correlation analysis between the physical and chemical properties of soil and theaverage activation ratios of trace elements

	活化率			
	Cu	Fe	Mn	Zn
有机碳	0.68*	0.52	0.63*	0.08
全氮	0.68*	0.38	0.67*	0.10
速效钾	0.39	0.11	-0.24	0.78**
有效磷	0.41	0.03	-0.28	0.80**
pH 值	0.31	-0.58*	0.12	0.47

注: * 在 0.05 水平上相关性显著(n=4); ** 在 0.01 水平上相关性显著,下同。

表 9 全氮和有机碳与微量元素和综合性指数(E_r)相关性分析

Table 9 Correlation analysis of total nitrogen, organic carbon with trace elements and integrated availability index

	全锌	有效铁	有效锌	E_r
全氮	0.89**	0.64*	0.82**	0.74**
有机碳	0.89**	0.71**	0.79**	0.71**

4 讨 论

4 个岩溶区原始林地土壤全铜、全铁、全锰和全锌含量分别介于 0.03~0.08 mg·kg⁻¹、35.6~57.4 mg·kg⁻¹、0.74~5.83 mg·kg⁻¹和 0.13~1.03 mg·kg⁻¹,均高于全国土壤微量元素背景的平均值,

表明岩溶区原始林地土壤全铜、全铁、全锰和全锌处于较高水平。土壤微量元素主要来源于成土母质,其含量和分布与母岩密切相关,碳酸盐岩发育的石灰性土壤,其微量元素含量普遍高于砂岩、页岩等发育的土壤^[30]。土壤微量元素变异系数由大到小排序依次为全锌(82.2%)、全锰(80.9%)、全铜(40.0%)、全铁(26.2%),表明岩溶区原始林地土壤锰和锌具有较大的空间变异性。土壤微量元素的含量分布具有随机性和结构性的空间变异性^[31-34],是土壤成土母质和环境共同作用的结果^[35]。研究区虽然都是石灰性土壤,但 4 个地区降雨和温度等气候因素具有较大差异。研究发现,不同气候环境、生态环境和水环境等作用力下土壤微量元素的含量具有显著的差异性^[36]。

4 个岩溶区原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 有效态含量分别为 1.09~3.51 mg·kg⁻¹、11.6~62.9 mg·kg⁻¹、48.3~173 mg·kg⁻¹、4.17~37.6 mg·kg⁻¹。根据土壤微量元素有效态评价标准,岩溶区原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 有效态含量均处于较高水平,这与我们初始推测的岩溶区土壤微量元素有效态含量较低并不一致。土壤微量元素有效态含量主要受全量及其活化率控制。一般认为,pH 是影响微量元素活化的重要因素^[37]。有研究发现,土壤中的 Cu、Fe、Mn 和 Zn 有效含量随 pH 升高而显著降低^[38]。考虑到研究区土壤 pH 介于 6.95~7.38,较高的 pH 条件下,石灰性土壤中的钙易与微量元素形成沉淀而降低微量元素的活化率。但在本研究中,岩溶区原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 四种微量元素的活化率分别为 5.48%、0.10%、6.44%和 4.19%。与已有研究结果^[6,39]相比,除 Fe 外,其他 3 种微量元素的活化率并不低,Mn 和 Zn 甚至处于较高的水平。分析原因可能在于 4 个研究区降雨较大,温度较高,植被覆盖率高且凋落物输入量大,具有发育强烈的岩溶作用。周晓东等^[40]研究发现富钙的岩溶环境一定程度能够导致土壤中碱性元素的有效性

降低,但在南方岩溶区强烈的岩溶作用能够加快土壤元素的供应,进而提高土壤元素有效态含量。蒋忠诚^[41-42]研究进一步证实了这一结果。因此,在土壤微量元素具有高背景值条件下,强烈的岩溶作用可能会促使微量元素有效态含量处于较高水平。

除Fe有效性指数外,俄贤岭地区土壤Cu、Mn和Zn的有效性指数最低,并且微量元素有效性综合指数(E_i)也以俄贤岭最低。 E_i 排序茂兰(21.0)>绿石林(12.8)≈勐远(12.7)>俄贤岭(5.15)。相关分析表明, E_i 与土壤有机碳和全氮含量呈显著正相关,表明土壤有机碳和全氮含量是影响微量元素有效指数的重要因子。4个采样区以茂兰自然保护区土壤有机碳和全氮含量最高,而海南俄贤岭自然保护区最低。相较于茂兰(15.6℃)^[16],俄贤岭保护区温度较高,达到24.5℃^[18]。湿热条件下,土壤有机质的分解和转化能力显著提高,会降低土壤有机碳和全氮含量^[13]。土壤有机碳和全氮含量下降,降低了维持微量元素的能力,从而使得 E_i 指数也呈现下降趋势。

5 结 论

本研究调查的4个岩溶区原始林地土壤全铜、全铁、全锰和全锌含量,均高于全国土壤微量元素背景的平均值,总体处于较高水平;土壤Cu、Fe、Mn和Zn有效态含量根据土壤微量元素有效态评价标准,也处于较高水平;土壤Cu、Mn和Zn元素供给水平高,Fe元素供给水平低;土壤微量元素有效性综合指数(E_i)茂兰(21.0)>绿石林(12.8)≈勐远(12.7)>俄贤岭(5.15),且受土壤有机碳和全氮含量的影响显著。

参考文献

- [1] 董国涛,张爱,罗格平,等. 三工河流域绿洲土壤微量元素有效含量特征分析[J]. 土壤, 2009, 41(5): 726-732.
- [2] 魏明宝,魏丽芳,胡波,等. 长期施肥对土壤微量元素的影响进展研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11951-11953.
- [3] 虞锁富. 几种土壤对锌的专性吸附[J]. 土壤通报, 1987, 18: 265-266.
- [4] 蒋以超,马义兵,刘继芳. 锌在土壤中的化学行为与植物效应[J]. 土壤学报, 1993, 30(增刊): 51-55.
- [5] 高明,车福才,魏朝富,等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁、锰、铜、锌形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 11-17.
- [6] 安玉亭,薛建辉,吴永波,等. 喀斯特山地不同类型人工林土壤微量元素含量与有效性特征[J]. 南京林业大学学报, 2013, 37(3): 65-70.
- [7] 莫碧琴,杨慧,曹建华,等. 典型石漠化区不同种植年限桃树下土壤微量元素变化特征[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 81-87.
- [8] 王世杰,李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
- [9] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(3): 1-12.
- [10] 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.
- [11] 曹建华,袁道先,潘根兴,等. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [12] 李锐,高杰,张莉,等. 黔北白云岩红色风化壳元素地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 396-404.
- [13] 陈桂芬,黄玉溢,刘斌. 岩溶地区土壤微量元素分布的研究[J]. 广西农业科学, 2007, 38(6): 653-656.
- [14] 邓艳,蒋忠诚,罗为群,等. 典型岩溶区植被恢复对土壤养分的影响[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 31-35.
- [15] 曹雪琴,万军伟,陈雯,等. 土壤元素背景值的研究:以南方某区域为例[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(2): 27-32.
- [16] 俞国松,王世杰,容丽,等. 茂兰喀斯特森林主要演替群落的凋落物动态[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1019-1028.
- [17] 周凤娇,丁访军,杨成华,等. 茂兰自然保护区旅游景点植物群落结构及多样性[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(2): 8-12.
- [18] 张荣京,秦新生,陈红锋,等. 海南俄贤岭石灰岩山地海南大戟灌丛群落研究[J]. 广西植物, 2007, 27(5): 725-729.
- [19] 张荣京,卢刚. 海南俄贤岭当喀斯特遇上热带雨林[J]. 森林与人类, 2015(2): 46-49.
- [20] 袁茜,唐小兰,宋希强,等. 海南岛俄贤岭喀斯特地貌野生花卉资源及园林应用[J]. 热带生物学报, 2016, 7(2): 185-189.
- [21] 戚剑飞,唐建维. 西双版纳石灰山季雨林的生物量及其分配规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(2): 167-177.
- [22] 王洪,朱华,李保贵. 西双版纳石灰岩山森林植被[J]. 广西植物, 1997, 17(2): 101-117.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 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.
- [25] 盖荣银,孙友宝,马晓玲,等. 二乙烯三胺五乙酸提取结合火焰原子吸收光谱法测定土壤中的有效态元素[J]. 环境化学, 2016, 35(5): 1096-1097.
- [26] 陈武军,王珊,唐智,等. 湿法消解原子吸收光谱法连续测定土壤中铜、锌、铅、镉[J]. 内江师范学院学报, 2012, 27(8): 62-64.
- [27] 简敏菲,弓晓峰,游海,等. 鄱阳湖水土环境及其水生维管束植物重金属污染[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6): 589-593.
- [28] 张永娥,王瑞良,靳绍菊. 土壤微量元素含量及其影响因素的研究[J]. 土壤肥料, 2005(5): 35-37.
- [29] 洪松,郑厚泽,陈俊生. 湖北省黄棕壤若干微量元素环境地球化学特征[J]. 土壤通报, 2001, 2: 89-95.
- [30] 汪家育,于南子,刘增芝. 西双版纳自然保护区森林土壤的微量元素[J]. 云南林业调查规划, 1986(4): 6-12.
- [31] 赵良菊,肖洪浪,郭天文. 甘肃省河西荒漠土微量元素的空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 27-30.
- [32] Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, et al. Field scale

- variability of soil properties in central low soil[J]. Soil Sci. Soc. Am, 1994, 58: 1501-1511.
- [33] 李艳,史周,徐建明,等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178-182.
- [34] 史利江,郑丽波,柳云龙. 农田土壤养分空间变异特征研究[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(1): 51-56.
- [35] 李亮亮,依艳丽,凌国鑫,等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268.
- [36] 刘永红,倪中应,谢国雄,等. 浙西北丘陵区农田土壤微量元素空间变异特征及影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1710-1718.
- [37] 万友红,周生路,赵其国,等. 苏南典型区土壤有效态铁、锰含量影响因素[C]// 中国土壤学会海峡两岸土壤肥料交流研讨会, 2008.
- [38] 李晓宁,高明,慈恩. 重庆市植烟土壤有效态微量元素含量评价[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 25-28.
- [39] 刘忠翰. 云南红壤铜、锌背景值在农业生产中的应用[J]. 环境科学导刊, 1990(2): 16-19.
- [40] 周晓东,邓艳. 岩溶区不同植被演替过程中土壤元素及其有效态的研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 40-45.
- [41] 蒋忠诚. 论南方岩溶区山区生态环境的元素有效态[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 123-128.
- [42] 蒋忠诚. 广西弄拉白云岩环境元素的岩溶地球化学迁移[J]. 中国岩溶, 1997, 15(4): 304-312.
- [43] 吕丽萍,王登峰,魏志远,等. 近 20 年海南岛土壤有机碳时空变异[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 338-344.

Contents and availability of trace elements in soils of natural forests in karst region

YANG Lin¹, YANG Cheng², ZHU Tongbin³, XIE Yincui³, QIN Xinghua³,
LUO Liuling³, ZHU Zihong³, MENG Lei¹, HE Qiuxiang¹

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University Haikou, Hainan 570228, China;

2. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210018, China;

3. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Soil under undisturbed natural forests were sampled to investigate total and available contents of four trace elements (Cu, Fe, Mn and Zn) from four nature reserves including Maolan in Guizhou, Mengyuan and Green Stone Forest in Yunnan, and Exianling in Hainan, all of which were characterized by typical karst landform. The results showed total content of Cu, Fe, Mn and Zn reached to $0.03 \sim 0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $35.6 \sim 57.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.74 \sim 5.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.13 \sim 1.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which were significantly higher the average national background values. The available content of Cu, Fe, Mn and Zn in study areas were $1.09 \sim 3.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $11.6 \sim 62.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $48.3 \sim 173 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $4.17 \sim 37.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. According to the evaluation standard for trace elements in soil, available contents of all four elements were at relatively high level. The average activation ratios of Cu, Fe, Mn and Zn in soils under the natural forest were 5.48%, 0.10%, 6.44% and 4.19%, respectively, indicating high supply level for Cu, Mn and Zn but low supply level for Fe. Total availability index of trace element (Et) in soil was ranked as Maolan (21.0) > Green Stone Forest (12.8) $\approx$ Mengyuan (12.7) > Exianling (5.15). In addition, Et was significantly positively correlated with total N and organic carbon contents.

Key words karst area, natural forest, trace elements, availability

(编辑 张玲)