

桂西北喀斯特区不同退化程度石灰土有机碳与养分剖面分布特征

何铁光¹, 俞月凤¹, 蒙炎成¹, 苏天明¹, 胡钧铭¹,
杜虎², 王瑾¹, 李忠义¹, 张野¹, 韦彩会¹, 范适³

(1. 广西壮族自治区农业科学院 农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 2. 中国科学院
亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 3. 湖南环境生物职业技术学院 园林学院, 湖南 衡阳 421005)

摘要:利用空间分布代替时间序列的方法,通过建立无退化、潜在退化、轻度退化、中度退化和重度退化5种不同退化程度石灰土的样地,并采集土壤剖面,分析对比了不同退化程度石灰土剖面有机碳和养分含量分布特征。结果表明:不同退化程度石灰土有机碳(SOC)含量与有机碳密度(SOC_i)与土层深度存在极显著负相关关系,即随土层深度增加而降低;轻度退化程度石灰土平均有机碳含量和碳密度最高;不同退化程度石灰土全氮(TN)和碱解氮(AN)含量剖面变化趋势与SOC相似,与土层深度呈极显著负相关性;全磷(TP)和全钾(TK)含量随土层深度的增加而无明显变化,速效磷(AP)和速效钾(AK)含量均随土层深度增加而降低,但均与土层深度无显著相关性;不同退化程度石灰土的C:N均低于15,说明有机质的分解较容易;5种退化程度石灰土中,SOC和氮素均存在极显著相关关系,与其他养分之间相关性有所差异。

关键词:有机碳;剖面分布;石灰土;喀斯特

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0013-06

Profile Distribution Characteristics of Organic Carbon and Nutrients in Different Degraded Lime Soils in Karst Area, Northwest Guangxi Province

HE Tieguang¹, YU Yuefeng¹, MENG Yancheng¹, SU Tianming¹, HU Junming¹,
DU Hu², WANG Jin¹, LI Zhongyi¹, ZHANG Ye¹, WEI Caihui¹, FAN Shi³

(1. Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Landscape College, Hunan Polytechnic of Environment and Biology, Hengyang, Hunan 421005, China)

Abstract: By means of spatial distribution instead of time series, sample plots of lime soils with five different degrees of degradation, such as no degradation, potential degradation, light degradation, moderate degradation and severe degradation, were established. Soil profile samples were collected, and the distribution characteristics of organic carbon and nutrient contents in different degraded soil profiles were analyzed. The results showed that the content of organic carbon (SOC) and organic carbon density (SOC_i) were significantly negatively correlated with soil depth ($p < 0.01$), i. e. SOC and SOC_i decreased with the increase of soil depth; the average organic carbon content and carbon density of lime soil under light degradation degree were the highest; the change trend of total nitrogen and available nitrogen content of lime soil under different degradation degree were similar to that of SOC, and had a very significant negative correlation with soil depth ($p < 0.01$); the content of total phosphorus and total potassium did not change obviously with the increase of soil depth, and the content of available phosphorus and available potassium decreased with the increase of soil depth, but no significant correlation was found between those nutrient contents and soil depth, respectively; The C:N of lime soil under different degrees of degradation was less than 15, indicating that the organic matter is readily decomposed. There was a significant correlation between SOC and nitrogen in the five

degraded lime soils($p < 0.01$), and the correlation with other nutrients was different.

Keywords: soil organic carbon; profile distribution; lime soil; karst

我国西南喀斯特地区为中国四大生态环境脆弱区之一,桂西北喀斯特地区位于我国西南喀斯特南部斜坡地带^[1]。由于其形成的碳酸盐岩基质的特殊性而与常态地貌有着极大的差别,过度的人为干扰造成了喀斯特地区植被的减少或消失,水土流失加剧,土壤的生物地球化学过程改变或中断,成为土壤退化及石漠化发展的主要外驱动力^[2-3]。自 20 世纪 80 年代中期进入环境保护阶段之后,植被开始得到自然恢复,石漠化治理及退化生态系统的恢复重建已初见成效。土壤养分含量是衡量土壤肥沃程度的量化指标,是土壤最重要的生态功能之一,是退化生态系统的重要研究内容之一。张伟等^[4]研究了桂西北喀斯特区植被演替过程中表层土壤的养分积累和影响因素,发现坡度、坡向和裸岩率等地形因子对土壤的养分影响较小。欧阳资文等^[5]探索了喀斯特峰丛洼地表层土壤有机质的空间变异特征及其对干扰的响应,提出减少干扰是退化生态系统恢复的保障。俞月凤等^[6]研究了桂西北喀斯特区域内表层石灰土养分的空间变异特征,发现在区域大尺度下,地形因子(如海拔、坡度和岩石裸露率等)和植被类型是影响桂西北喀斯特石灰土空间变异特征的重要因素。何宁等^[7]分析了喀斯特区 3 种典型次生林土壤有机碳含量和密度的剖面分布。这些研究对桂西北喀斯特石灰土养分状况有初步的探索,多集中在表层土壤,或某一植被类型的有机碳分布。然而,由于喀斯特生态环境的特异性,目前对石灰土土壤退化机理还缺乏充分认知^[8],因此,针对石灰土退化过程中,土壤有机质、氮、磷和钾等养分含量的剖面分布特征有何响应有待进一步探索,对揭示石灰土退化现状及退化机理,促进喀斯特地区生态恢复有着重要的作用。

土壤退化是一个长期的动态过程,需要大范围、长时间的定位动态观测才能准确地认识土壤退化,这也使得时间序列的土壤性状纵向比较的可操作性差^[9]。土壤养分的退化与植被退化相互促进,是土壤退化的重要机制^[10]。本研究利用空间分布代替时间序列的方法^[11],根据土壤退化的概念,在直观性原则、简单性原则、可操作性原则、主导因素原则和综合代表性原则的基础上,以岩石裸露率和植被覆盖率作为土壤退化等级划分的基本依据,将石灰土划分为 5 个退化等级:无退化、潜在退化、轻度退化、中度退化和重度退化。本文通过建立不同退化程度石灰土的样地,并进行土壤和植被调查,分析对比石灰土不同

退化程度剖面养分含量特征,以期对桂西北喀斯特地区石灰土退化过程中养分剖面分布特征有较完整的认识,并为揭示石灰土退化机制及分布机理提供资料,为喀斯特地区植被恢复、土壤资源利用以及生态恢复提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选择在广西大化瑶族自治县($107^{\circ}18'45''$ — $108^{\circ}03'45''$ E, $23^{\circ}32'30''$ — $24^{\circ}22'30''$ N),位于云贵高原向广西丘陵过渡地带的斜坡上,属于广西最典型的“九山半水半分田”的石山区贫困县。全县总面积 2 804 km²,耕地总面积 162 km²,境内峰丛密布,喀斯特面积共 2 059 km²,占全县总面积的 73%,喀斯特地貌较为典型。成土母质以碳酸盐岩为主,地带性红壤只是分布在土山,石山、半石山普遍为石灰土。研究区气候温和,属亚热带季风气候,雨热同季。年平均气温 1 812~2 117℃,年降雨量为 1 249~1 673 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与采样 本研究依据岩石裸露率和植被覆盖率将石灰土分为 5 个退化程度^[12]:无退化(I)、潜在退化(II)、轻度退化(III)、中度退化(IV)、重度退化(V),样地基本概况见表 1。经过全面踏查,2016 年 7 月选择符合 5 个退化程度的典型植被群落设置样地,每个退化程度设置 9 个 20 m×20 m 样地,共获样地 45 个。每个退化程度选择 3 个标准样地挖取一个典型土壤剖面分层取样,由于土层较薄,每 10 cm 土层取 3 个环刀用于测定土壤容重,同时取 500 g 土样。在每个标准样地的 4 角和中间分 0—10,10—20,20—30,30—50,50—70 cm 分层用土钻取样,5 个点同层次的土样组成一个混合样。由此共获取剖面样品 74 个,用于测定土壤有机碳,混合样 207 个,用于测定土壤有机碳及养分含量。土样置于阴凉处自然风干后,用四分法取土样过 0.15 mm 筛,编号后供分析测定用。去除环刀内土样的植物根系和石砾,在 105℃烘干 24 h 后,称重并计算土壤容重。土壤样品室内分析指标为有机碳 SOC(重铬酸钾—外加热法)、全氮 TN(半微量开氏法)、全磷 TP(NaOH 熔融—钼锑抗显色—紫外分光光度法)、全钾 TK(NaOH 熔融—火焰光度计法)、碱解氮 AN(碱解—扩散法)、速效磷 AP(0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提法)、AK 速效钾(NH₄OAc 浸提法)。

表 1 不同退化程度样地基本情况

退化程度	样地数	平均海拔/m	平均坡度/(°)	坡位	植被覆盖率/%	平均高度/m	平均土深/cm	土壤类型
I 无退化	9	368.9±89.3	34.5±5.7	中下坡	82.36±9.82	10.4±4.0	62.8±10.5	棕色石灰土
II 潜在退化	9	422.1±95.6	33.9±6.1	中下坡	75.65±6.52	7.2±1.3	58.5±8.9	棕色石灰土
III 轻度退化	9	354.3±108.6	37.0±8.7	中下坡	60.86±6.45	2.9±0.7	49.7±9.3	棕色石灰土
IV 中度退化	9	349.58±79.3	30.2±4.3	中下坡	48.32±5.31	1.0±0.4	38.7±6.5	棕色石灰土
V 重度退化	9	482.9±68.3	42.2±8.3	中下坡	30.12±4.20	0.3±0.1	20.5±5.3	棕色石灰土

1.2.2 土壤容重推算 喀斯特地区土壤土层浅薄、石砾含量和岩石较多,导致一些剖面深层的土壤容重无法测定。有研究表明,土壤容重、土层、土壤有机质含量间存在相关关系^[13-14]。根据 5 个退化程度 15 个土壤剖面的数据建立的土壤有机碳含量和土壤容重关系散点图(图 1),发现二者存在良好的直线关系($p<0.01$),土壤有机碳含量随土壤容重的增加递减,从而依据测定的有机碳含量可以求得土壤容重。

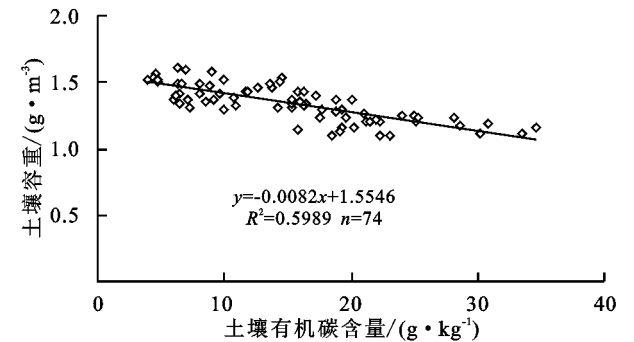


图 1 石灰土有机碳含量与容重的关系

1.2.3 有机碳密度的计算 土壤有机碳密度是指单位面积一定深度土层中的土壤有机碳(SOC)贮量,单位一般为 t/hm² 或 kg/m²。某一土层 i 的有机碳密度(SOC _{i} , kg/m²)的计算公式为: SOC _{i} = C _{i} × D _{i} × E _{i} × (1 - G _{i})/100; 式中: C _{i} 为土壤有机碳含量(g/kg); D _{i} 为容重(g/m³); E _{i} 为土层厚度(cm); G _{i} 为直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

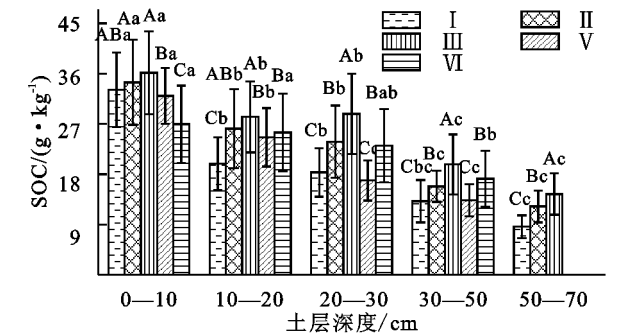
1.2.4 数据处理与分析 采用 SPSS 18.0 和 Origin 8.0 进行数据处理与制图。应用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析不同样地间各指标的差异显著性,应用最小显著差数法(LSD)进行多重比较,应用 Pearson 相关系数进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度石灰土有机碳含量与有机碳密度

由图 2 可以看出,不同退化程度石灰土 SOC 垂直分布特征基本一致,即石灰土 SOC 随着土层深度的增加逐渐降低,表层土壤 SOC 最高,上高下低的分布特征明显。土层深度越大, SOC 变化幅度越小,不同退化程度石灰土 SOC 随土层深度变化的幅度和范围不同。无退

化、潜在退化和轻度退化石灰土 SOC 含量在 0—10 cm 处显著高于 10—20 cm 处,其中无退化石灰土 SOC 变化迅速,其变化幅度高于其他退化程度石灰土; 20—30 cm 范围内几乎无变化, 30—50 cm 处变化幅度增大。中度退化石灰土 SOC 在各土层中变化较为缓慢,变化幅度较为一致,呈逐渐降低的趋势; 重度退化石灰土 SOC 在 0—30 cm 范围内变化不大,在 30—50 cm 处显著降低。同一土层中,不同退化程度石灰土 SOC 含量差异显著。0—10 cm 表层土中,无退化、潜在退化和轻度退化程度石灰土有机碳含量之间无显著性差异,分别为 33.12, 34.45, 36.17 g/kg,三者显著高于中度和重度退化石灰土有机碳含量。



注: I 为无退化, II 为潜在退化, III 为轻度退化, IV 为中度退化, V 为重度退化,下同。

图 2 不同退化程度石灰土各层有机碳含量垂直分布

不同退化程度石灰土有机碳密度变化趋势与有机碳含量一致(图 3),都随土层深度的增加而降低。就整个土层而言,5 个不同退化程度石灰土的有机碳密度为:轻度退化(16.38 kg/m²)>潜在退化(14.69 kg/m²)>无退化(13.08 kg/m²)>重度退化(11.84 kg/m²)、中度退化(11.58 kg/m²)。沿着石灰土退化程度增加的方向,0—10 cm 土层的土壤碳密度分别占整个土层的 31.63%, 28.68%, 26.80%, 35.10%, 29.19%; 10—30 cm 土层的占整个土层的 42.90%~53.38%。不同退化程度同一土层的有机碳密度不同,0—10 cm 土层表现为轻度退化>潜在退化>无退化>中度退化>重度退化,轻度、潜在和无退化在其他土层中的差异表现与 0—10 cm 土层中一致,中度和重度在其他各层则表现为重度退化高于中度退化石灰土有机碳密度。

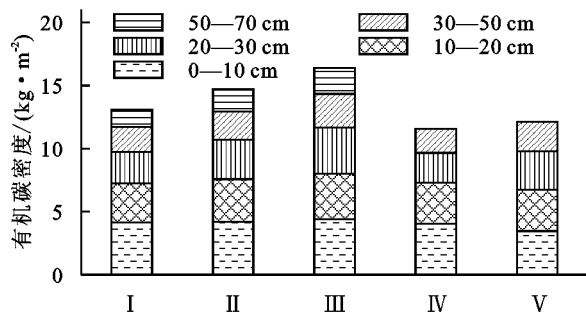


图 3 不同退化程度石灰土各层的有机碳密度

2.2 不同退化程度石灰土氮磷钾养分含量

桂西北喀斯特地区不同退化程度石灰土养分剖面分布特征如图 4 所示。不同退化程度石灰土 TN 含量剖面变化趋势与 SOC 相似,均随土层深度的增加

而降低,但在各层的变化范围与幅度有所差异。无退化石灰土 TN 含量 0—20 cm 土层之间变化迅速,20—70 cm 各土层之间无显著变化;潜在和重度退化石灰土 0—10 cm 土层 TN 含量显著高于其他土层,其他土层之间无显著变化;轻度和中度退化石灰土 TN 含量 0—20 cm 土层之间无变化,并显著高于其他土层。0—10 cm 土层中,无退化、潜在和重度退化石灰土 TN 含量无显著性差异,均高于轻度和重度退化石灰土;0—20 cm 土层中,重度退化石灰土 TN 最低;30—70 cm 土层中,无退化石灰土 TN 含量显著低于其他退化程度石灰土。不同退化程度石灰土 AN 含量也随土层深度增加而降低,但变化较为缓慢。

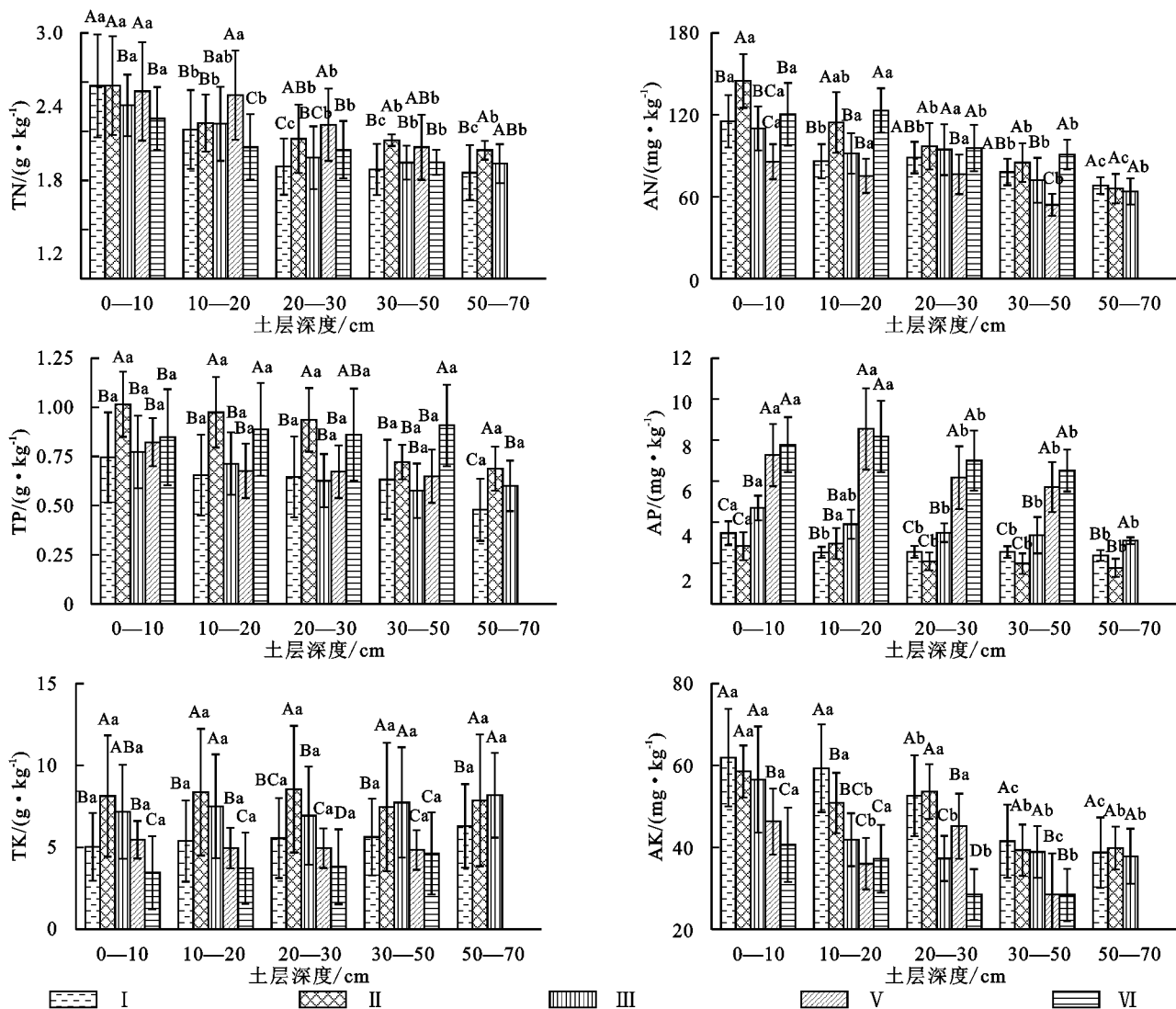


图 4 不同退化程度石灰土各层养分含量垂直分布

不同退化程度石灰土 TP 和 TK 含量随土层深度的增加而无明显变化,TP 随土层深度增加有略微降低的趋势,TK 随土层深度的增加则有略微升高的趋势,但在各土层间均无显著性差异。0—30 cm 各土层中,潜在退化石灰土 TP 和 TK 含量均高于其他退化程度石灰土含

量。AP 和 AK 含量均随土层深度增加而降低,表现为 0—20 cm 土层中含量高于其他土层。0—10 cm 土层中,中度和重度退化石灰土 AP 含量显著高于其他退化程度,表现为重度退化>中度退化>轻度退化>无退化>潜在退化,AK 含量变化则表现为:无退化>潜在退

化>轻度退化>中度退化>重度退化。

2.3 不同退化程度石灰土 C : N

由图 5 可以看出,桂西北喀斯特地区石灰土 C : N 为 7.03~13.14,除了潜在退化石灰土 C : N 外,其他退化程度均随土层深度增加而降低。中度退化石灰土各土层中 C : N 最低,沿土层以线性趋势降低,潜在退化和重度退化石灰土 C : N 在 20—30 cm 土层中有所升高。0—10 cm 土层中,C : N 表现为轻度退化>重度退化>无退化>潜在退化>中度退化。

2.4 石灰土有机碳、养分与土层深度的相关性分析

相关分析结果(表 2)表明,石灰土 SOC 与 TN, AN,SOC_i,C : N 存在极显著相关关系,TN 与 TP,AN,

AK,SOC_i极显著正相关,TK 与 TP,AK 极显著正相关,除 TP,TK 外,其他指标与土层深度均呈显著或极显著的负相关关系。

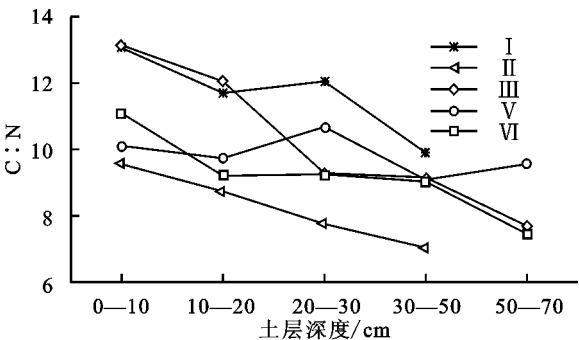


图 5 不同退化程度石灰土各层 C : N 垂直分布

表 2 石灰土中有机碳与养分的相关性分析

指标	SOC	TN	TK	TP	AN	AP	AK	SOC _i	C : N	H
SOC	1									
TN	0.671**	1								
TK	-0.051	0.048	1							
TP	0.130	0.369**	0.412**	1						
AN	0.599**	0.580**	-0.005	0.316**	1					
AP	0.034	-0.004	-0.189*	-0.009	-0.006	1				
AK	0.152*	0.426**	0.337**	0.388**	0.305**	-0.108	1			
SOC _i	0.993**	0.688**	-0.048	0.136	0.605**	0.043	0.168*	1		
C : N	0.473**	-0.226**	-0.186*	-0.294**	0.055	0.042	-0.311**	0.464**	1	
H	-0.548**	-0.386**	0.048	-0.155	-0.461**	-0.211**	-0.193*	-0.548**	-0.331**	1

注:SOC 为有机碳,TN 为全氮,TK 为全钾,TP 为全磷,AN 为碱解氮,AP 为速效磷,AK 为速效钾,SOC_i 为有机碳密度,H 为土层深度。

3 讨论与结论

3.1 桂西北喀斯特地区不同退化程度石灰土碳和氮剖面分布特征

土壤有机碳和氮素是土壤肥力的重要物质基础,是衡量土壤肥力水平的重要指标,对于土壤生产力和土地可持续利用有着重要的作用^[15]。土壤有机碳含量主要取决于输入土壤的有机物质与土壤输出的有机碳之间的动态平衡^[16]。天然土壤有机质的输入量主要依赖于有机残体归还量及有机残体的腐殖化系数^[17],有机质的输出量则主要包括分解和侵蚀损失,易受到各种生物和非生物条件的控制^[18]。在下渗水作用下,土壤有机物质和腐殖质在土体中淋溶、迁移、淀积以及其在土壤微生物作用下与矿物质土土体扰动、混合,该过程决定了有机碳在土壤剖面中的分布特征。本研究中,桂西北喀斯特地区不同退化程度石灰土有机碳含量和有机碳密度随土层加深均呈下降的趋势,表层土壤含量最高,原因是自然条件下,表层土壤是植被枯枝落叶的主要接受层,因此碳含量高;石灰土有机碳和碳密度均与土层深度有极显著负相关关系,即随土层深度增加而显著降低,结果与喀斯特峰丛洼地次生林 3 种群落土壤有机碳分布特征基本一致^[7]。不同退化程度石灰土 SOC 随土层深度变

化的幅度和范围不同,其中中度和重度退化石灰土随土深变化较小,原因可能是植被覆盖率较低,土壤容易发生淋溶。有关研究表明在钙质丰富的石灰土环境中,细菌及放线菌等微生物活动异常活跃^[19],使有机质不断分解形成腐殖质,腐殖化后的胡敏酸易于与 Ca²⁺ 形成不易分解的胡敏酸钙,该化合物降低有机质的分解程度,有利于土壤有机质的累积^[20]。因此,退化程度高的地区,碳酸盐岩出露率高,石灰土中钙质越丰富,有机碳含量较高。本研究发现轻度退化石灰土有机碳含量和碳密度高于其他退化程度,原因是无退化和潜在退化石灰土同时有着丰富的植被归还量和高的分解速率,中度和重度退化石灰土植被覆盖率低和裸岩率高,而轻度退化石灰土有一定的植被归还量同时有利于有机质的积累。

土壤中的氮素主要来源于动植物残体的归还量及生物固氮过程,也有少部分来自于大气沉降^[21],其输出主要靠土壤有机质的分解。土壤有机质分解后大部分被植物吸收利用,部分经过矿化、硝化、反硝化作用以及氨挥发等生物过程而重返大气中^[22]。因此,有机质的积累与分解作用的相对强度决定了土壤全氮含量。因此,本研究中不同退化程度石灰土全氮和有效氮含量的剖面分布特征与有机质含量的变化相一致。

土壤 C : N 通过影响土壤微生物的代谢活动,从而

影响有机质的分解速率。一般来说,当土壤的 C:N 约为 25:1 时,最有利于微生物通过同化作用形成自身的细胞及提供其生命活动的能源。而比值为 15~25 时,土壤的有机质供肥条件优越。本研究结果表明,桂西北喀斯特地区不同退化程度石灰土的 C:N 均低于 15,说明有机质的分解较容易,尤其是氮素的矿质化作用明显,可以释放更多的有效态氮,但也容易造成氮素的大量流失^[23]。

3.2 桂西北喀斯特地区不同退化程度石灰土磷和钾素剖面分布特征

自然条件下,土壤磷素主要依赖于成土母质风化和动植物残体归还,其含量受土壤类型和气候因素的影响,成土母质的磷素含量直接影响土壤对磷的吸附能力以及成土母质全磷的含量,也是形成磷素垂直分布特征的直接原因^[24]。因此,各退化程度石灰土 TP 含量剖面特征不明显,缺乏规律性。土壤中 P 除了来源于母质,还来源于植物归还,由于植被类型和土壤差异,导致全 P 具有较大的变异性^[25]。土壤钾素基本全部由成土母质风化而来,其剖面分布特征可能与土壤的淋溶特征有关。本研究中,桂西北喀斯特地区不同退化程度石灰土 TP 和 TK 含量随土层深度的增加没有显著性变化,相关分析结果表明,各退化程度石灰土 TP 和 TK 与土层深度之间基本无显著性相关关系,该分布特征与其含量主要来源与土母质有关。此外,中度和重度退化石灰土 AP 含量显著高于其他退化程度,原因是退化程度高的群落受到的人为干扰较大。AK 在无退化石灰土中的含量高于退化石灰土,原因是土壤中的 AK 含量是受植被根系吸收量和植被枯枝落叶归还量共同影响的。然而,认识土壤有机碳及养分剖面分布特征对石灰土不同退化程度的响应,有利于进一步认识石灰土的退化现状及退化过程中石灰土养分的地球化学循环过程,其影响因素有待进一步探究,从而真正揭示喀斯特区石灰土退化机理。

参考文献:

- [1] 杨明德,梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44-51.
- [2] 王克林,苏以荣,曾馥平,等. 西南喀斯特典型生态系统土壤特征与植被适应性恢复研究[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 641-645.
- [3] 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.
- [4] 张伟,王克林,刘淑娟,等. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1801-1808.
- [5] 欧阳资文,彭晚霞,宋同清,等. 喀斯特峰丛洼地土壤有机质的空间变化及对干扰的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1329-1336.
- [6] 俞月凤,何铁光,宋同清,等. 桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2906-2914.
- [7] 何宁,宋同清,彭晚霞,等. 喀斯特峰丛洼地次生林土壤有机碳的剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 374-381.
- [8] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.
- [9] 许路艳,王嘉学,余洁芳,等. 滇东山原红壤退化过程中的土壤剖面有机质与养分变异[J]. 土壤, 2015, 47(5): 947-952.
- [10] 吕贻忠,李保国,崔燕. 不同植被群落下土壤有机质和速效磷的小尺度空间变异[J]. 中国农业科学, 2006, 39(8): 1581-1588.
- [11] Barbour M, Burk G, Pitts J H. Terrestrial Plant Ecology [M]. London: the Benjamin Publishing Company, 1980.
- [12] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [13] 方运霆,莫江明, Sandra B, 等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 135-142.
- [14] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of world[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 2-3.
- [15] Shaffer M J, Mal W, Hansen S. Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management [M]. Boca Raton, USA: Lewis Publishers, 2001.
- [16] Munson S A, Carey A E. Organic matter sources and transport in an agriculturally dominated temperate watershed [J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(7): 1111-1121.
- [17] 李忠佩,王效举. 小区域水平土壤有机质动态变化的评价与分析[J]. 地理科学, 2000, 20(2): 182-187.
- [18] 邵学新,杨文英,吴明,等. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1425-1431.
- [19] Bollag J M, Strotzky G. Soil Biochemistry [M]. New York: Marcel Dekker, 1990.
- [20] 邸欣月,安显金,董慧,等. 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布和演化特征[J]. 地球与环境, 2015, 43(6): 697-708.
- [21] 李金芬,程积民,刘伟,等. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征[J]. 草地学报, 2010, 18(5): 661-668.
- [22] 张全军,于秀波,钱建鑫,等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3656-3669.
- [23] 耿增超,姜林,李珊珊,等. 祁连山中段土壤有机碳和氮素的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 665-672.
- [24] 程杰,高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征[J]. 草地学报, 2007, 15(3): 274-278.
- [25] 邹丽娜,周志宇,颜淑云,等. 玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应[J]. 中国草地学报, 2009, 31(6): 80-87.