

罗美,周运超,唐风华.不同植被下碳酸盐岩石发育形成土壤属性研究[J].中国岩溶,2023,42(2):277-289.
DOI: 10.11932/karst2022y17

不同植被下碳酸盐岩石发育形成土壤属性研究

罗美^{1,2},周运超¹,唐风华¹

(1. 贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心/贵州省高原山地林木培育重点实验室/林学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州财经大学, 贵州 贵阳 550001)

摘要:为探究喀斯特地区不同植被条件下碳酸盐岩石发育土壤属性的分布特征及其影响因素,以贵阳市花溪区范围内的碳酸盐岩石(石灰岩、灰质白云岩和白云岩)发育土壤为研究对象,采集不同植被类型下0~40 cm土壤,分析不同植被类型、基岩类型、土层层次对土壤性质分布特征的影响。结果表明:基岩和植被类型是影响碳酸盐岩石发育成为土壤的主要影响因素,其次是土壤层次。在0~20 cm和20~40 cm土层中,石灰岩、灰质白云岩和白云岩发育土壤的肥力和颗粒均差异显著,而0~20 cm与20~40 cm土层间,除石灰岩发育土壤石砾含量(SLC)和细颗粒比(<0.002 mm),白云岩发育土壤速效磷(AP)和有机质(SOM)含量外,同类基岩发育土壤性质无显著差异;在0~40 cm土层,基岩类型显著影响土壤pH、AP、SLC、速效氮(AN)、全氮(TN)、SOM、0.2~0.25 mm和0.002~0.02 mm颗粒的分布;植被类型显著影响石灰岩发育土壤pH、AP、TN含量,白云岩形成土壤的pH、SLC、粗颗粒(0.25~2 mm)和细颗粒,灰质白云岩形成土壤的AN、SOM、粗颗粒和细颗粒;土壤层次显著影响石灰岩发育土壤的SLC、粗颗粒和细颗粒及白云岩发育土壤的AP的分布。研究区内荒草坡和草被下土壤,以及石灰岩发育的土壤可能正遭受侵蚀的破坏。因此,结合母岩岩性,改变植被种植结构,对提高土壤养分、改善土壤颗粒组成和增强土壤的抗侵蚀能力具有积极作用。

关键词:喀斯特;植被类型;碳酸盐岩石;土壤属性;花溪

中图分类号: S151.9; P931.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0277-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

贵州省地处云贵高原主体向广西丘陵过渡的大斜坡地带,由于受到构造运动影响,地表碳酸盐岩石自震旦纪到第三纪均有出露^[1],这造就了贵州地表碳酸盐岩出露面积达13万km²,占全省土地总面积的73%。按照碳酸盐含量和酸不溶物的多少大致可将碳酸盐岩分为:纯质碳酸盐岩类[含石灰岩组、白云岩组、云-灰岩组(互层或夹层)]、较纯碳酸盐岩类

型和不纯碳酸盐岩类型^[2]。贵州省内碳酸盐岩石产状多样、种类复杂,但是其成土速度极慢,碳酸盐岩区土壤与区域经济的关系紧密。由于人口数量剧增,土壤负载加重,土壤侵蚀严重,碳酸盐岩区石漠化加剧。石漠化引发的系列生态环境问题,严重影响当地的经济发展与居民生产生活。石漠化综合防治研究已成为当前多学科迫切需要解决的科学问题,但是目前对喀斯特土壤方面的研究仅侧重于石灰岩成土土壤学属性研究^[3-9]。碳酸盐岩石种类多,成土岩

资助项目:贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007);中国地质科学院岩溶地质研究所地质调查委托项目(YR-JJHT-2017-206);黔科合基础([2017]1018);贵州省“百层次”培养计划项目(QKHRC-2015-4022)

第一作者简介:罗美(1981—),女,副教授,博士,主要研究方向:土壤环境学。E-mail: luomei9999@126.com。

通信作者:周运超(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:森林土壤学。E-mail: yc409@163.com。

收稿日期:2021-12-23

石对土壤肥力性质的影响较深刻^[10], 石漠化速度与碳酸盐岩石种类密切相关, 石漠化的产生与土壤上生长的植被遭到破坏密不可分, 石漠化的治理更是离不开植被的作用, 然而, 当前缺乏从植被-土壤-岩石系统的角度探讨碳酸盐岩石的成土特征以及它们之间的相互作用对喀斯特区域土壤影响的研究。

基岩和植被在土壤的发育形成过程起着突出的作用, 在不同土壤发育阶段, 不同基岩和植被类型对于土壤的理化性质有重要影响, 一定厚度的土壤是植物生长的重要物质基础, 土壤厚度是表征土壤质量的重要指标^[11], 对植物扎根和生物量的积累影响巨大, 土层厚度也是评价喀斯特地区土壤退化及石漠化程度的重要度量指标^[12]。目前, 在喀斯特地区 0~40 cm 土壤层, 不同碳酸盐岩石类型、植被类型及其相互作用对土壤性质分布产生影响的研究仍鲜见报道。因此, 本文以贵阳市花溪区石灰岩、灰质白云岩、白云岩 3 种碳酸盐发育的 0~40 cm 土层土壤为研究对象, 分析不同植被类型、基岩类型及土壤层次对土壤性质的分布特征产生的影响, 探究喀斯特地区不同植被条件下主要碳酸盐岩石发育土壤的性质分布特征及其影响因素, 以期为提高碳酸盐岩石区土壤质量、增强土壤抗侵蚀性能、改善喀斯特地区的植被生长状况提供参考。

1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区中曹司向斜的西翼、贵州大学附近约 5 km² 的范围内。花溪区属于亚热带季风气候, 年均气温为 14.9 ℃, 年均降水量为 1 229 mm(夏季雨水充沛)^[12]。该区域在 20 世纪 80 年代前后进行封山育林, 但由于人为影响而造成植被类型存在差异。这里出露有三叠纪下部至三叠纪中部的薄层较纯质石灰岩、巨厚层白云岩、泥质灰岩及中厚层灰质白云岩等碳酸盐岩石类型, 为准确研究不同母岩对土壤属性的影响, 选择该区具有典型代表性的薄层纯质石灰岩、巨厚层白云岩、中厚层灰质白云岩 3 种碳酸盐岩石类型, 在此基础上, 选择 3~4 种植被类型差异极大的土壤进行对比研究。研究区内针叶林树种主要是柏木(*Cupressus funebris*), 枯落物层厚 0.5 cm; 针阔混交林以柏木、栎类(*Quercus*)为主, 枯落物层厚 2.0 cm; 灌木林地以铁仔(*Myrsine africana*)为主, 枯落物层厚 1.5 cm; 草类

以芒草(*Stipa bungeana*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)为主, 枯落物层厚 0.5 cm。

2 研究方法

2.1 样品采集

土壤样品于 2014 年 3 月 21 日采集, 在花溪水库同种基岩(石灰岩)发育土壤上分 3 种植被类型(常绿落叶阔叶林、灌木林、荒坡)采集 18 个样品, 土壤的质地有 3 种类型, 即黏壤土、砂质黏土和壤质黏土; 在花溪电视塔的同种基岩(灰质白云岩)发育土壤上分 3 种植被类型(常绿落叶阔叶林、草被、针阔混交林)共采集 18 个样品, 土壤的质地有黏壤土、砂壤土、壤质黏土和粉砂质黏壤土 4 种类型; 在贵州大学南区附近同种基岩(白云岩)发育土壤上分 4 种植被类型(针叶林、荒草坡、针阔混交林、阔叶小乔林)共采集 24 个样品, 土壤的质地类型为黏土、黏壤土、砂壤土、砂质黏土、壤质黏土和粉砂质黏壤土 6 类。各种植被类型下选择 3 个点(即重复三次), 土壤母质为残坡积物, 采样点地形地貌相对一致。在每个取样点按照土壤层次 0~20 cm 和 20~40 cm 分别取两个新鲜土壤(相同剖面下, 又三次重复混合, 各约重 1 kg)。将样品取好送回实验室, 风干。

2.2 样品处理

从风干土样中仔细挑出石块、根茎及各种新生体和侵入体后, 将土样全部通过 2 mm 的筛, 将过筛的土样和挑出的石块等称重, 以供计算石砾含量。采用四分法多次分取直到分取到需要的样品量, 然后用研钵磨细, 全部通过 0.25 mm 的筛。将最终过筛的土样混合均匀后分别盛于广口瓶内, 以测定土壤理化性质测定之用。

2.3 土壤样品测定

采用电位法测定土壤 pH、凯氏定氮法测定土壤全氮(TN)、碱解扩散法土壤碱解氮(AN)、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷(AP)、重铬酸钾外加热法测定土壤有机质(SOM)。运用比重计法测定土壤机械组成, 包括 0.25~2(粗颗粒)、0.2~0.25、0.02~0.2、0.002~0.02 和<0.002 mm(细颗粒))^[13-14], 通过称量土样与石块质量计算石砾含量(SLC)。其中针阔叶林下白云岩发育的土壤机械组成测定为 2 次重复, 其他指标的测定均为 3 次, 重复间的差异达到

实验分析要求。

2.4 数据分析

在 SPSS24 软件中运用 Shapiro-Wilk 检验对按采样深度、植被类型、基岩类型分组的数据进行正态性检验,存在多组数据不同时服从正态分布分析要求,两组间比较采用 Mann-Whitney U 检验,多组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验(多重比较:Bonferroni 法)。在 R 语言软件(R version 4.0.3)中调用“rcompanion”包,使用 Scheirer-Ray-Hare 检验来实现分析植被类型、基岩类型、土壤层次以及它们的交互作用是否对土壤颗粒和土壤肥力产生显著影响。分析前根据白云岩土壤机械组成的 2 次重复数据,分别用均值代替 5 种粒径颗粒各缺失的 1 次重复(针阔叶林)数据,用均值代替 1 个异常负值(0.02~0.2 mm,针阔叶林)。基于 R 语言软件,调用“vegan”包,运用置换多元方差分析(PERMANOVA)检验两组或三组数据之间是否存在显著差异,置换检验次数为 999;调用“vegan”、“ggrepel”和“ggplot2”包,运用非度量多维度(NMDS)分析 0~20 cm 和 20~40 cm 土层不同基岩类型发育土壤的颗粒与肥力指标;调用“vegan”、“ggrepel”、“plyr”和“ggplot2”包,运用冗余分析(RDA)探讨植被类型、基岩类型和土壤层次对土壤性质变化的影响。分析前采用数字进行赋值处理,其中赋值常绿落叶阔叶林 1、灌木林 2、荒坡 3、草被 4、针阔混交林 5、灌

丛小乔木 6、针阔叶林 7、针叶林 8 和荒草坡 9;赋值石灰岩 1、灰质白云岩 2 和白云岩 3;赋值 0~20 cm 为 1,赋值 20~40 cm 为 2。

3 结果与分析

3.1 不同植被下石灰岩成土特点

在 0~20 cm 土壤层,常绿落叶阔叶林、灌木林和荒坡下石灰岩发育土壤的 AP 差异显著,其中荒坡土壤的 AP 含量明显高于灌木林土壤;在 20~40 cm 土壤层,常绿落叶阔叶林、灌木林和荒坡下石灰岩发育土壤的 pH 差异显著,荒坡下土壤的 pH 高于常绿落叶阔叶林土壤($P<0.05$)(表 1)。0~20 cm 土壤层中石砾含量明显高于 20~40 cm 层土壤,而 0~20 cm 土壤层中细颗粒百分比明显低于 20~40 cm 层土壤($P<0.05$)(表 1)。在 0~40 cm 土层,石灰岩发育土壤的 SLC($H=5.60, P=0.02$)、粗颗粒($H=4.03, P=0.04$)和细颗粒比($H=5.48, P=0.02$)显著受到土壤层次的影响;土壤的 pH($H=9.20, P=0.01$)、AP($H=9.34, P=0.01$)、TN($H=6.63, P=0.04$)含量显著受到植被类型的影响(Scheirer-Ray-Hare, $P<0.05$)。

3.2 不同植被下白云岩成土特点

在 0~20 cm 土壤层,阔叶小乔林、针阔混交林、针叶林和荒草坡下白云岩发育土壤 pH 存在显著差异,其中荒草坡土壤 pH 明显高于针叶林土壤

表 1 石灰岩发育土壤的颗粒及肥力特点
Table 1 Characteristics of particle and fertility of limestone-developed soil

土壤层次/cm	植被类型	pH	AP/mg·kg ⁻¹
0~20	常绿落叶阔叶林	6.75(6.44,6.92)	27.36(25.10,28.50) ab
	灌木林	6.78(6.48,7.02)	9.80(9.23,10.36) b
	荒坡	7.01(6.88,7.15)	33.60(28.50,44.36) a
<i>H</i> 值		2.76($P=0.25$)	6.88($P=0.03$)
20~40	常绿落叶阔叶林	6.51(5.76,6.73) A	17.73(14.33,38.70)
	灌木林	6.72(6.51,6.82) AB	21.70(14.33,33.60)
	荒坡	7.01(6.98,7.02) B	41.53(29.63,73.83)
<i>H</i> 值		6.31($P=0.04$)	3.29($P=0.19$)
土壤层次/cm		SLC/%	<0.002 mm/%
0~20		1.36(0.07,2.45)	28.54(17.29,36.73)
20~40		0.43(0.00,1.38)	35.47(25.83,51.65)
<i>U</i> 值		14.00($P=0.02$)	67.00($P=0.02$)

注:数据为中位数(最小值,最大值),仅列出Kruskal-Wallis H或者Mann-Whitney U检验存在显著差异各组,显著水平为 $P\leq 0.05$;同一深度不同植被类型的同种土壤性质用不同字母标记表示差异显著(表2和表3同理)。

($P<0.05$)(表 2)。在 20~40 cm 土壤层中,阔叶小乔林、针阔混交林、针叶林和荒草坡下白云岩发育土壤 pH 和粗颗粒差异显著,荒草坡土壤的 pH 和土壤粗颗粒均高于针叶林土壤($P\leq 0.05$)。0~20 cm 土壤层中 AP 含量低于 20~40 cm 层土壤,而 0~20 cm 土壤层中土壤 SOM 含量高于 20~40 cm 层土壤($P<0.05$)(表 2)。在 0~40 cm 土层,白云岩发育土壤的 AP 含量($H=8.46, P=0.04$)显著受到土壤层次的影响;土壤的 pH($H=16.03, P=0.001$)、SLC($H=10.81, P=0.01$)粗颗粒($H=14.58, P=0.002$)和细颗粒比($H=9.21, P=0.03$)显著受到植被类型的影响(Scheirer-Ray-Hare, $P<0.05$)。

3.3 不同植被下灰质白云岩成土特点

在 0~20 cm 土层,常绿落叶阔叶林、草被和针阔混交林下土壤的 AN、AP 和粗颗粒差异显著,针阔混交林下土壤的 AN 和 AP 含量明显高于草被下土壤,草被下土壤粗颗粒比高于常绿落叶阔叶林土壤($p<0.05$)(表 3)。在 20~40 cm 土壤层中,常绿落叶阔叶林、草被和针阔混交林下土壤的粗颗粒和细颗粒差异显著,草被下土壤粗颗粒比高于常绿落叶阔叶林土壤,而草被下土壤细颗粒比明显低于常绿落叶阔叶林土壤($P<0.05$)(表 3)。在不同土层间,土壤性质无显著的差异($P>0.05$)。在 0~40 cm 土壤层,灰质

表 2 白云岩发育土壤的颗粒及肥力特点

Table 2 Characteristics of particles and fertility of dolomite-developed soil

土壤层次/cm	植被类型	pH	0.25~2 mm/%
0~20	阔叶小乔林	6.88(6.87,7.05) ab	0.48(0.21,4.60)
	针阔混交林	6.93(6.86,7.50) ab	2.77(1.60,3.94)
	针叶林	5.08(4.03,6.60) a	0.95(0.37,1.55)
	荒草坡	7.46(7.15,7.60) b	29.30(2.82,33.75)
<i>H</i> 值		8.23($P=0.04$)	6.18($P=0.10$)
20~40	阔叶小乔林	6.54(6.41,7.01) AB	1.49(0.56,5.88) AB
	针阔混交林	7.17(6.35,7.25) AB	1.47(1.43,1.50) AB
	针叶林	5.14(4.25,6.75) A	0.13(0.11,0.67) A
	荒草坡	7.39(7.26,7.71) B	20.18(18.12,24.76) B
<i>H</i> 值		7.82($P=0.05$)	8.69($P=0.03$)
土壤层次/cm		AP/mg·kg ⁻¹	SOM/g·kg ⁻¹
0~20		4.98(1.30,9.80)	40.95(26.43,111.59)
20~40		7.53(3.53,193.40)	28.66(11.34,61.29)
<i>U</i> 值		110.50($P=0.03$)	33.00($P=0.02$)

表 3 灰质白云岩发育土壤的颗粒及肥力特点

Table 3 Characteristics of particle and fertility of soil developed from limy dolomite

土壤层次/cm	植被类型	AN/mg·kg ⁻¹	AP/mg·kg ⁻¹	0.25~2 mm/%	<0.002 mm/%
0~20	常绿落叶阔叶林	23.03 (19.16,26.81) ab	15.46 (8.10,26.23) ab	1.59 (0.80,2.01) a	39.74 (34.76,39.96)
	草 被	16.53 (14.71,16.98) a	5.83 (5.83,5.83) a	13.52 (4.92,14.64) b	18.45 (14.45,20.63)
	针阔混交林	33.25 (25.39,37.76) b	26.80 (20.00,52.30) b	4.06 (2.94,4.70) ab	17.80 (15.54,20.66)
<i>H</i> 值		6.49($P=0.04$)	6.71($P=0.04$)	7.20($P=0.03$)	5.43($P=0.07$)
20~40	常绿落叶阔叶林	20.02 (18.38,32.54)	10.36 (9.23,20.56)	0.65 (0.54,1.27) A	39.22 (35.00,42.87) A
	草 被	15.17 (11.67,17.04)	14.90 (4.70,37.00)	16.48 (13.81,17.91) B	12.98 (4.22,16.51) B
	针阔混交林	26.42 (22.18,38.15)	10.36 (6.96,18.30)	3.76 (3.56,5.22) AB	21.85 (13.13,30.07) AB
<i>H</i> 值		5.96($P=0.051$)	0.16($P=0.93$)	7.20($P=0.03$)	6.49($P=0.04$)

白云岩发育土壤受到土壤层次的影响不大,但受到植被类型影响大,土壤的 AN($H=12.78$, $P=0.002$)、SOM($H=12.32$, $P=0.002$) 含量、粗颗粒($H=14.75$, $P=0.001$)和细颗粒比($H=12.32$, $P=0.002$)显著受到植被类型的影响(Scheirer-Ray-Hare, $P<0.05$)。

3.4 不同基岩发育土壤的特征

在 0~20、20~40 和 0~40 cm 土层中,灰质白云岩发育土壤 pH 和 SLC 均明显高于石灰岩发育土壤($P<0.05$)。0~20 cm 土层中石灰岩发育土壤 AN 含量明显高于白云岩土壤,而石灰岩发育土壤 0.2~0.25 mm 颗粒比明显低于白云岩土壤,石灰岩发育土壤 SOM 含量也明显低于灰质白云岩和白云岩土壤。白云岩发育土壤 AP 含量和 0.002~0.02 mm 颗粒比明显低于石灰岩和灰质白云岩土壤,白云岩发育土壤 TN 含量明显高于灰质白云岩($P<0.05$)。20~40 cm 土层中白云岩发育土壤 AN 含量明显低于石灰岩和灰质白云岩土壤,白云岩发育土壤 AP 含量和 0.002~0.02 mm 颗粒比明显低于石灰岩土壤,而白云岩发育土壤 TN 含量明显高于石灰岩土壤。灰质白云岩发育土壤 SOM 含量明显高于石灰岩和白云岩土壤,灰质白云岩土壤 0.2~0.25 mm 颗粒比明显高于石灰岩土壤($P<0.05$)(表 4)。

在 0~40 cm 土壤层,白云岩发育土壤 AN、AP 含量和 0.002~0.02 mm 颗粒比明显低于石灰岩和灰质白云岩土壤,而白云岩发育土壤 TN 含量明显高于石灰岩和灰质白云岩土壤($P<0.05$)。石灰岩发育土壤 SOM 含量和 0.2~0.25 mm 颗粒比明显低于白云岩和灰质白云岩发育土壤。土壤 0.02~0.2 mm 颗粒比($H=9.37$, $P=0.01$)显著受到土壤层次的影响;土壤的 pH($H=18.19$, $P=0.0001$)、SLC($H=18.14$, $P=0.0001$)、AP($H=22.60$, $P<0.000$)、AN($H=49.18$, $P<0.000$)、TN($H=23.58$, $P<0.000$)、SOM 含量($H=39.32$, $P<0.000$),以及 0.2~0.25 mm($H=14.77$, $P=0.001$)和 0.002~0.02 mm 颗粒比($H=22.93$, $P<0.000$)显著受到基岩类型的影响(Scheirer-Ray-Hare, $P<0.05$)。

3.5 土壤性质的非度量多维标度分析

通过应力函数值可判断 NMDS 分析排序模型的合理性,应力函数值 <0.2 被视为潜在有用,模型排序合理^[15]。0~20(图 1a)和 20~40 cm(图 1b)土层的应力函数值分别为 0.12 和 0.17,均低于 0.2 的临界值, NMDS 分析排序模型合理。NMDS 对土壤性质的分

析很好地展现出石灰岩、灰质白云岩和白云岩发育土壤肥力和颗粒的差异,大多数样地(植被类型)可根据基岩类型被区分开(图 1a, 图 1b)。置换多元方差分析显示:0~20 cm 土层的石灰岩与灰质白云岩($R^2=0.55$, $P=0.001$)、灰质白云岩与白云岩($R^2=0.21$, $P=0.001$)、石灰岩与白云岩($R^2=0.53$, $P=0.001$)两两发育土壤的肥力和颗粒存在显著差异($P\leq 0.001$)。在 20~40 cm 土层,石灰岩和灰质白云岩($R^2=0.49$, $P=0.001$)、石灰岩和白云岩($R^2=0.37$, $P=0.001$)($P\leq 0.001$)、灰质白云岩和白云岩($R^2=0.15$, $P=0.02$)($P\leq 0.05$)两两发育土壤的肥力和颗粒也差异显著。但 0~20 和 20~40 cm 土层之间,石灰岩($R^2=0.12$, $P=0.08$)、灰质白云岩($R^2=-0.01$, $P=0.998$)和白云岩($R^2=0.07$, $P=0.13$)发育的土壤无显著差异($P>0.05$),可见土壤层次对土壤性质整体影响不大。

3.6 植被、基岩和土壤层次对土壤性质的影响

RDA 排序图显示土壤性质的 33.8% 能够被植被类型、基岩类型和土壤层次变量所解释,第一、二轴分别解释了 30.39%、3.41% 的变量信息(图 2)。在 0~40 cm 土层,基岩类型、植被类型和土壤层次对土壤肥力和颗粒分布的解释量差异显著($F=7.73$, $P=0.001$)($P\leq 0.001$),可接受环境因子对土壤性质的解释量。结果显示:基岩类型($R^2=0.63$, $P=0.001$)和植被类型($R^2=0.50$, $P=0.001$)显著影响土壤层中土壤肥力和颗粒分布($P\leq 0.001$),但土壤层次对土壤的肥力和颗粒分布无显著影响($R^2=0.07$, $P=0.13$)($P>0.05$)。

RDA 排序图中两个箭头的夹角反映土壤性质与植被类型、基岩类型和土壤层次变量相关性大小,其中夹角为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 时,两个变量呈正相关;夹角为 $90^\circ\sim 180^\circ$ 时,二者呈负相关;夹角为 90° ,两者无相关关系^[17]。基岩类型的特征向量最长,其次是植被类型,它们是影响 0~40 cm 土壤养分和颗粒空间分布的主要因素,两者都与土壤 SOM、0.2~0.25 mm 颗粒、SLC 呈现正相关,与 AN、AP 呈现负相关,土壤层次与土壤 AP、0.25~2 mm 颗粒呈现正相关,与土壤 SOM 呈现负相关(图 2)。

4 讨 论

4.1 不同植被下石灰岩成土特点

在 0~20 cm 土层,荒坡土壤的 AP 含量明显高于

表 4 不同基岩发育土壤的颗粒及肥力特点
Table 4 Characteristics of soil particles and fertility developed from different bedrocks

土壤层次/ cm	基岩类型	pH	SLC/%	AN/mg·kg ⁻¹	AP/mg·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	SOM/g·kg ⁻¹	0.2~0.25 mm/%	0.002~0.02 mm/%
0~20	石灰岩	6.88 (6.62,7.02) a	1.36 (0.46,1.99) a	82.35 (55.75,141.41) a	27.36 (10.08,31.05) a	1.50 (0.82,4.37) ab	20.25 (13.11,25.63) a	13.23 (7.38,20.57) a	35.42 (31.47,37.62) a
	灰质白云岩	7.25 (7.03,7.33) b	8.73 (4.44,15.17) b	23.03 (16.76,30.03) ab	15.46 (5.83,26.52) a	1.55 (1.48,2.33) a	78.99 (53.23,104.98) b	21.50 (16.08,35.58) ab	31.07 (27.77,39.87) a
	白云岩	6.91 (6.67,7.38) ab	2.21 (0.31,11.35) ab	9.87 (7.10,15.65) b	4.98 (4.70,6.40) b	4.00 (2.58,5.70) b	40.95 (35.11,46.66) b	29.91 (23.51,38.65) b	22.42 (16.60,25.94) b
H值		7.21 (<i>P</i> =0.03)	9.88 (<i>P</i> =0.01)	23.35 (<i>P</i> =0.000)	17.29 (<i>P</i> =0.000)	8.55 (<i>P</i> =0.01)	21.92 (<i>P</i> =0.000)	9.42 (<i>P</i> =0.01)	17.12 (<i>P</i> =0.00)
	石灰岩	6.82 (6.51,7.00) A	0.00 (0.00,1.12) A	60.41 (46.34,86.56) A	29.63 (16.03,40.12) A	1.31 (0.34,1.74) A	14.21 (9.27,16.30) A	12.57 (3.76,23.68) A	33.78 (28.03,40.35) A
	灰质白云岩	7.28 (7.19,7.33) B	14.25 (2.83,23.41) B	20.02 (16.11,29.48) A	10.36 (8.10,19.43) AB	1.82 (1.65,2.30) AB	84.43 (45.28,95.18) B	28.43 (16.60,34.64) B	27.57 (24.72,37.58) AB
H值	白云岩	6.88 (6.37,7.26) AB	0.49 (0.23,13.03) AB	8.54 (6.74,11.02) B	7.53 (5.13,17.59) B	2.90 (2.18,4.91) B	28.66 (16.06,39.88) A	26.39 (16.42,29.94) AB	23.18 (18.11,28.53) B
		10.14 (<i>P</i> =0.01)	9.84 (<i>P</i> =0.01)	25.08 (<i>P</i> =0.000)	8.00 (<i>P</i> =0.02)	17.36 (<i>P</i> =0.000)	18.86 (<i>P</i> =0.000)	6.91 (<i>P</i> =0.03)	6.69 (<i>P</i> =0.04)
	石灰岩	6.82 (6.51,7.01) a	0.89 (0.00,1.45) a	70.42 (48.47,105.73) a	27.93 (14.33,34.88) a	1.49 (0.57,2.59) a	14.77 (11.33,23.26) a	12.57 (5.88,23.09) a	34.50 (30.81,39.59) a
0~40	灰质白云岩	7.26 (7.15,7.33) b	9.74 (3.62,17.76) b	21.10 (16.87,28.24) b	12.63 (6.68,21.98) a	1.81 (1.54,2.31) a	81.71 (50.44,98.96) b	24.35 (16.19,34.21) b	30.53 (25.82,37.36) a
	白云岩	6.91 (6.44,7.26) a	1.09 (0.31,11.58) ab	9.48 (6.74,12.23) c	6.40 (4.70,7.53) b	3.67 (2.31,4.91) b	35.28 (26.79,45.46) c	26.48 (19.83,35.84) b	23.18 (17.08,27.51) b
	H值	18.19 (<i>P</i> =0.000)	18.14 (<i>P</i> =0.000)	49.18 (<i>P</i> =0.000)	22.64 (<i>P</i> =0.000)	23.61 (<i>P</i> =0.00)	39.32 (<i>P</i> =0.000)	14.75 (<i>P</i> =0.001)	22.96 (<i>P</i> =0.000)

注: 数据为中位数和四分位数[P50(P25,P75)], 仅列出Kruskal-Wallis H检验存在显著差异各组, 显著水平为 $P \leq 0.05$; 同一土层、不同植被类型或者不同基岩类型的相同土壤性质用不同字母标记表示差异显著。

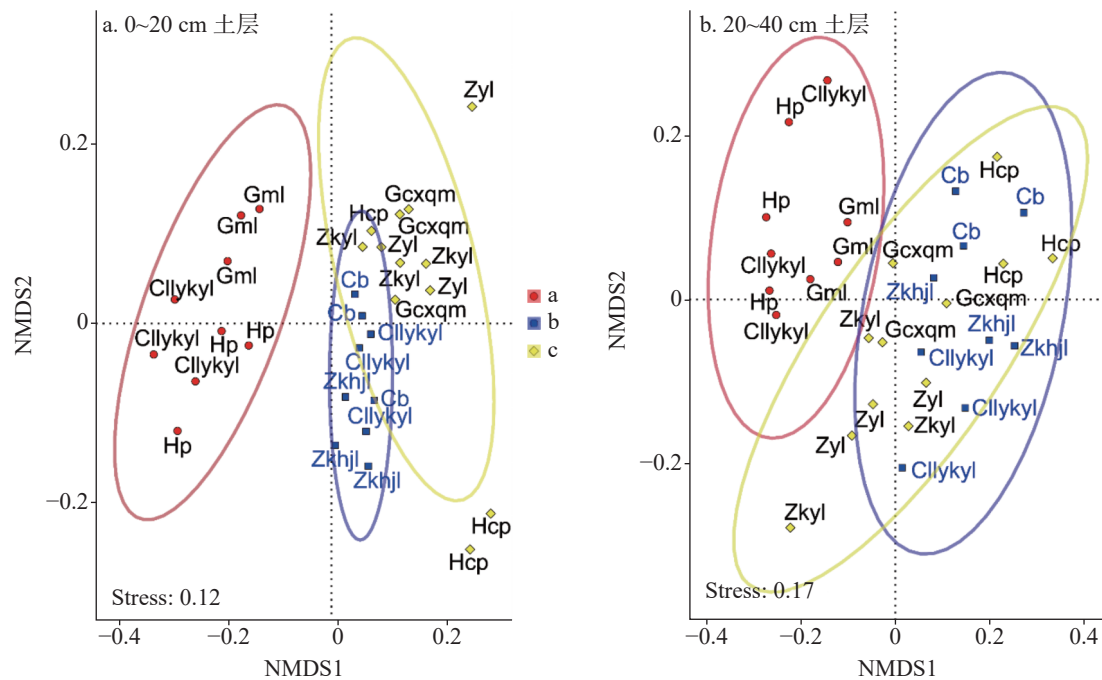


图 1 不同基岩类型发育土壤性质的非度量多维标度分析

注: 分析前对数据进行“Hellinger”转换, 距离为“bray”

a-石灰岩 b-灰质白云岩 c-白云岩 Cklykyl-常绿落叶阔叶林 Gml-灌木林 Hp-荒坡 Cb-草被 Zkhjl-针阔混交林

Gcxqm-灌丛小乔木 Zkyl-针阔叶林 Zyl-针叶林 Hcp-荒草坡。

Fig. 1 Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS) analysis of soil properties developed from different bedrock types

灌木林土壤, 由于灌木林土壤 pH 低于荒坡 (表 1), 灌木林土壤酸化提高了土壤磷的活性^[18], 在生长吸收和降雨淋溶淋失的共同作用下导致灌木林土壤 AP 含量降低。在 20~40 cm 土层, 荒坡土壤的 pH 明显高于常绿落叶阔叶林土壤, 欧芷阳等^[19]发现喀斯特山地土壤基本呈中性偏微碱性, 植被恢复过程中, 枯落物分解释放的大量酸性物质中和了土壤中岩石风化形成的碱性物质。常绿落叶阔叶林生长过程中, 地表有大量枯枝落叶分布, 枯落物分解释放有机酸的下渗输入和根系分泌酸性物质的共同作用可能增加了土壤酸性, 从而降低常绿落叶阔叶林土壤 pH。相比之下, 0~40 cm 土层的土壤 pH、AP、TN 含量显著受到植被类型的影响, 石灰土中磷以钙-磷为主, 土壤磷的有效性取决于土壤中钙含量和 pH 的变化^[20], 植物根系分泌的有机酸能使土壤酸化, 土壤 pH 降低, 导致难溶的磷灰石释放磷^[21-22], 同时也加速有机质的矿质化, 从而改变土壤的养分含量。0~20 cm 土层中 SLC 明显高于 20~40 cm 层土壤, 而 0~20 cm 土层中细颗粒比明显低于 20~40 cm 层土壤。表层土壤中石砾的富集可能是因为土壤受到了雨水的侵蚀作用^[23], 雨水侵蚀对表层土壤的淋溶搬运沉淀可能与 20~40 cm 土壤中细颗粒比高有关。另外,

土壤的石砾含量还受离开母岩距离的影响, 具有随着土壤深度而增加的趋势^[23], 这与石灰岩发育土壤的石砾含量、粗颗粒和细颗粒显著受到土壤层次的影响的结果保持一致。

4.2 不同植被下白云岩成土特点

在 0~20 和 20~40 cm 土层中, 荒草坡下土壤的 pH 高于针叶林土壤, 研究表明白云岩发育土壤的 pH 为中性至微碱性^[24], 但针叶林下土壤呈现较强的酸性, 针叶林的生长降低了土壤 pH, 这主要是由于针叶林树木凋落物分解时释放有机酸以及根分泌有机酸所致。例如, 杉木凋落物中, 草酸含量最大, 且凋落叶中有机酸含量最高, 草酸能降低土壤 pH, 可有效促进土壤磷的活化^[25], 白尚斌等^[21]认为落叶松下土壤的酸化现象是由根系分泌的有机酸和根分泌的 H^+ 导致的。另外, 柏木根系分泌物也能引发土壤酸化, 使土壤 pH 递减^[22]。0~20 cm 土层中荒草坡的土壤粗颗粒也高于针叶林土壤, 可能因为受到人为活动的干扰, 土壤上植被覆盖下降, 这使得荒草坡土壤受到的侵蚀作用强于林地, 导致荒草坡土层变薄, 土壤的大颗粒物在土表层出露, 细小颗粒则分布于下层土壤中。在 0~40 cm 土层, 土壤石砾含量、粗颗

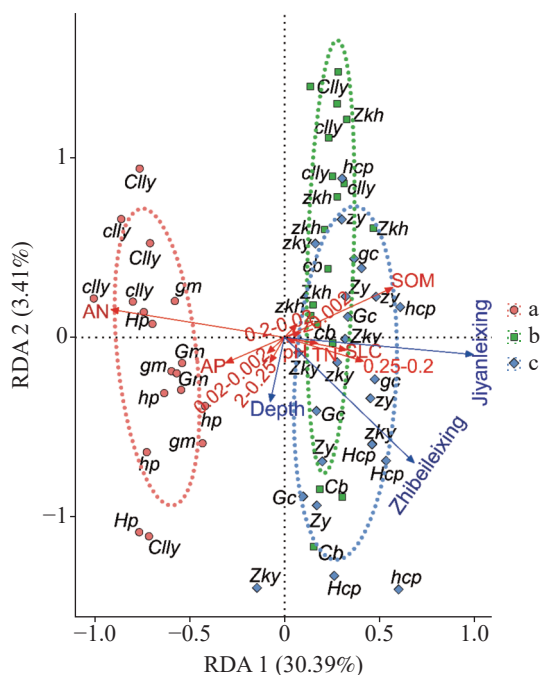


图2 植被、基岩及土壤层次与土壤性质的 RDA 排序图

注: 图中小写字母表示 0~20 cm 土层, 大写首字母表示 20~40 cm 土层。分析前对植被、基岩类型和土壤层次数据进行“log10”转化, 对土壤性质数据进行“hellinger”转化, 分析时采用了 envfit() 函数(置换模拟次数 999),

其决定系数 R^2 值越大, 解释变量对响应变量的分布影响越大^[16]。

a-石灰岩 b-灰质白云岩 c-白云岩 Depth-土壤层次 Jiyanleixing-基岩类型 Zhibeileixing-植被类型 Cly-常绿阔叶林 Gm-灌木林 Hp-荒坡 Cb-草被 Zkh-针阔混交林 Gc-灌丛小乔木 Zky-针阔叶林 Zy-针叶林 Hcp-荒草被

Fig. 2 Ordination diagram of redundancy analysis (RDA) of vegetation, bedrock, soil layers and soil properties

粒和细颗粒显著受到植被类型的影响, 不同植被分布影响土壤的抗侵蚀能力, 导致不同粒径的颗粒物在土层中的分布差异。0~20 cm 土层土壤 SOM 含量高于 20~40 cm 层土壤, 上层土壤被植被生长过程中产生的大量有机枯落物所覆盖, 特别是林地, 枯落物的分解增加了表层土壤 SOM 含量。然而, 0~20 cm 土层 AP 含量也低于 20~40 cm 层土壤, 彭韬等^[26]研究发现白云岩坡地岩土组构特别, 白云岩坡地土壤易漏水、漏肥, 速效磷容易受到降雨淋溶在深层富集。在 0~40 cm 土层, 白云岩发育土壤的 AP 含量显著受到土壤层次影响, 这与周玮等^[27]的研究结果中速效磷的含量随土层厚度变化的规律一致。

4.3 不同植被下灰质白云岩成土特点

在 0~20 cm 土层, 针阔混交林下土壤 AN 和 AP 含量明显高于草被下土壤, 前人研究表明混交林能改善森林的生态环境, 调节林内温度, 降低蒸发强度, 提高林内的相对湿度, 减小林内风速, 从而改善土壤

结构, 增加土壤 N、P 的含量^[28], 针阔混交林改善林分结构和土壤环境条件, 促进土壤养分的循环。另外, 草被在生长季节性对养分需求大, 但草被下土壤缺少大量枯枝落叶来源, 来自自然归还过程的养分补给不足, 土壤速效氮、磷等的养分含量低, 这不同于常绿落叶阔叶林与针阔混交林土壤获得了不同种类和数量凋落物分解释放的养分供给。在 20~40 cm 土层, 草被下土壤粗颗粒比高于常绿落叶阔叶林土壤, 而草被下土壤细颗粒明显低于常绿落叶阔叶林土壤。在密集分布的草被形成以前, 表层土壤容易遭受雨水的淋溶侵蚀搬运, 导致浅层土壤主要分布粒径较大的土壤颗粒, 而常绿落叶阔叶林与针阔混交林, 土表密集的凋落物层的截流降低了表层土被雨水侵蚀的程度, 导致表层土的细粒径颗粒含量高。在不同土壤层间, 灰质白云岩发育土壤的性质无显著差异, 土壤层次影响不大, 主要受植被类型影响。土壤 AN、SOM、粗颗粒和细颗粒显著受到植被类型的影响, 地上植被类型分布变化会影响土壤的发育进程, 植被类型与有机物质自然分解归还的过程和数量密切相关, 植被种类变化影响土壤 SOM 和 AN 等养分含量, 进一步改变土壤的抗侵蚀和保土保肥能力, 如本研究中针阔混交林比草被环境下土壤抗侵蚀能力强。

4.4 不同基岩发育土壤的特征

在 0~20、20~40 和 0~40 cm 土层中, 灰质白云岩发育土壤 pH 和 SLC 明显高于石灰岩形成土壤。灰质白云岩发育土壤 SLC 高, 主要受母岩岩性影响。在贵阳乌当区, 石灰岩形成土壤 pH 为中性至微碱性, 因为土壤中富含 CaCO_3 , 且盐基丰富, CaCO_3 延缓了风化过程中土壤盐基的淋失和土壤的酸化进程^[29]。但贵阳花溪区石灰岩发育土壤酸性增加, pH 降低, 这可能与该区域石灰岩发育土壤中 CaCO_3 和盐基成分淋失有关, 还有可能是由于植被生长过程分泌酸性物质长期作用, 共同作用于石灰岩土壤的酸化进程。另外, 灰质白云岩发育土壤可能处于不成熟阶段, 土壤 pH 和 SLC 较高。

在 0~20 cm 土层, 白云岩形成土壤 SOM 含量也明显高于石灰岩发育土壤, 这与董玲玲等^[29]的研究结果一致, 主要由母岩性质决定。白云岩发育土壤 TN 含量明显高于灰质白云岩成土, 白云岩土壤中有有机质的矿化分解, 增加了土壤的氮含量, 此外, 白云岩形成的土壤可能有固氮能力。白云岩发育土壤的

0.2~0.25 mm 颗粒比明显高于石灰岩土壤,这也是受到母岩岩性影响,白云岩发育土壤质地偏砂性,物理性砂粒含量较高^[29],可能导致土壤颗粒粒径比较大。然而,在 20~40 cm 层,白云岩发育土壤 SOM 含量明显低于灰质白云岩土壤,白云岩土壤 pH 为 6.88(6.37, 7.26)低于灰质白云岩土壤 7.28(7.18, 7.33),土壤酸化可能加速白云岩土壤有机质分解和矿质化过程,降低土壤中有机质含量。白云岩发育土壤 TN 含量明显高于石灰岩土壤, pH 为 6.82(6.51, 7.00),有研究表明在酸性土壤上施用白云石,可减少土壤一氧化二氮气体的排放^[30],起着固氮作用,增加土壤的氮含量。另外,灰质白云岩发育土壤 0.2~0.25 mm 颗粒比明显也高于石灰岩土壤,可能是由岩石岩性差异造成的。

在 0~40 cm 土层,白云岩形成土壤 TN 含量明显高于石灰岩和灰质白云岩土壤,白云岩风化后形成矿物颗粒粗,且分布不均匀,硬度大容易破碎,孔隙并口裂隙发育,表面粗糙,有利于物理风化成土壤,保存土壤和植被生活^[31],促进土壤氮的积累。白云岩和灰质白云岩发育土壤 SOM 含量和 0.2~0.25 mm 颗粒比明显高于石灰岩土壤,岩石岩性可能会导致发育土壤有机质更新率有差异,同时可能因为土壤正在发生退化,土层厚度变薄,土壤颗粒变粗。白云岩发育土壤 AN、AP 含量和 0.002~0.02 mm 颗粒比明显低于石灰岩和灰质白云岩土壤,这可能是由于白云岩土壤受到淋溶影响比较大,导致土壤中速效养分的流失和土壤颗粒的粗化,在 0~20 和 20~40 cm 土层,白云岩发育土壤 AN、AP 含量和 0.002~0.02 mm 颗粒比均明显低于石灰岩土壤,由于白云岩发育土壤易漏水、漏肥,其抗侵蚀和蓄肥能力比较弱,故速效养分含量低。20~40 cm 土层白云岩发育土壤 AN、AP 含量和 0.002~0.02 mm 颗粒比也明显低于灰质白云岩土壤,可能与上层灰质白云岩土壤的养分和颗粒往下层土壤的迁移积累有关。

4.5 植被、基岩和土壤层次对土壤性质的影响

基岩是发育土壤的基础物质,基岩岩性不同可造成发育土壤的性质差异。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中,石灰岩、灰质白云岩和白云岩两两之间发育土壤的肥力和颗粒均存在显著差异。但 0~20 cm 与 20~40 cm 土层间,石灰岩、灰质白云岩和白云岩发育的土壤无显著差异,土壤层次整体影响比较小,可能受到采样深度不够的限制。在 0~40 cm 土层,基

岩类型对土壤的肥力和颗粒分布具有显著影响,土壤 pH、AP、SLC、AN、TN、SOM、0.2~0.25 mm 和 0.002~0.02 mm 颗粒显著受到基岩类型的影响,有研究表明在酸性土壤中施用白云岩可降低土壤酸性,提高土壤 pH,减少土壤中有机物分解释放 N_2O ,起着固氮作用,施用白云岩显著增加土壤微生物生物量碳、溶解性有机碳和硝酸盐,短期改变土壤的交换性铵(NH_4^+)浓度^[32],这能有效改善土壤肥力和颗粒结构。另外,白云岩和石灰岩之间的内生细菌丰度和群落结构存在差异,这些微生物的差异影响到喀斯特土壤属性^[33]。

基岩的差异是产生植被生境异质性的重要因素之一,不同基岩条件下植被物种组成与生物多样性具有明显差异^[34],植被类型不同显著影响土层中土壤肥力和颗粒分布,在废弃农田到高级群落的演替过程中,植物细根对土壤氮的储蓄有积极影响^[35]。在喀斯特地区,土壤有效性氮磷含量的变化明显受植被类型的影响。从草本等向森林群落的演替过程中,土壤的土壤有机质、速效磷和有效性氮含量明显增加^[20]。除土壤 0.02~0.2 mm 颗粒显著受到土壤层次影响外,总体上,土壤层次对土壤肥力和颗粒分布无显著影响。基岩类型和植被类型都与土壤 SOM、0.2~0.25 mm 颗粒、SLC 呈现正相关关系,与 AN、AP 呈现负相关关系,在不同基岩发育土壤上,从荒坡—草本—灌木—乔木的演替进程中,植被覆盖率提高,增加了土壤的有机质等养分来源,但是,在降雨、径流、重力等外力侵蚀作用下,表层土壤 AN、AP 等养分及土壤细颗粒流失,降低了土壤的保水保肥能力。尽管土壤层次与土壤 AP、0.25~2 mm 颗粒呈现正相关关系,与土壤 SOM 呈现负相关关系,但土壤层次整体上并不是主要影响因素。此外,喀斯特地区还受到人为作用的干扰,严重时可导致植被覆盖率下降,这加大了水土流失发生的风险,而土壤中具有维护和保持土壤肥力的细颗粒发生移动,使喀斯特土壤发生“粗化”现象,进而加速喀斯特土壤的侵蚀过程。因此,防治土壤的侵蚀应综合考虑基岩—植被—土壤系统和人为活动的相互作用,才能更好地解决喀斯特地区的土壤侵蚀问题。

5 结 论

(1) 植被不同造成不同基岩成土理化性质的空

间分布存在差异。荒坡和灌木林显著影响石灰岩发育上层(0~20 cm)土壤的 AP 含量变化,而下层(20~40 cm)土壤的 pH 高低显著受常绿落叶阔叶林和荒坡影响。荒草坡和针叶林显著影响白云岩发育的上层、下层土壤 pH 及下层土壤粗颗粒的空间分布。灰质白云岩土壤中,上层土壤 AN 和 AP 含量显著被草被和针阔混交林影响,草被和常绿落叶阔叶林显著影响上层、下层土壤粗颗粒以及下层土壤细颗粒的空间分布。石灰岩形成的上层土壤大粒径 SLC 高,下成土壤细颗粒比高,而白云岩形成的上层土壤 SOM 含量高,下层土壤 AP 含量高,灰质白云岩发育的上层、下层土壤性质无显著差异。荒草坡和草被下土壤以及石灰岩发育的土壤可能正遭受侵蚀的破坏;

(2)基岩类型和植被类型显著影响石灰岩、灰质白云岩和白云岩发育土壤的肥力和颗粒的空间分布,其次是土壤层次。基岩类型显著影响 0~20、20~40 和 0~40 cm 土层土壤的 pH、AP、SLC、AN、TN、SOM、0.2~0.25 mm 和 0.002~0.02 mm 颗粒。0~40 cm 土层中石灰岩发育土壤 pH、AP、TN 显著受到植被类型的影响,而 SLC、粗颗粒和细颗粒则显著受到土壤层次的影响。灰质白云岩发育土壤(包括土壤 AN、SOM、粗颗粒和细颗粒)主要受到植被类型影响。白云岩发育土壤的 AP 含量显著受到土壤层次的影响,土壤的 pH、SLC、粗颗粒和细颗粒显著受到植被类型的影响。

参考文献

- [1] 毛志中. 贵州几类岩石的生态特点及其与土壤的关系[J]. 贵州林业科技, 1991, 19(1): 53-57.
MAO Zhizhong. Ecological characteristics of several types of rocks in Guizhou and their relationship with soil[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 1991, 19(1): 53-57.
- [2] 韩至钧, 金占省. 贵州省水文地质志[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
HAN Zhijun, JIN Zhansheng. Hydrogeology of Guizhou Province[M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [3] 龙健, 黄昌勇, 李娟. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 76-79.
LONG Jian, HUANG Changyong, LI Juan. Effects of land use on soil quality in karst hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 76-79.
- [4] Collins M E, Puckett W E, Schellentrager G W, Yust N A. Using GPR for micro-analyses of soils and karst features on the Chiefland Limestone Plain in Florida[J]. *Geoderma*, 1990, 47: 159-170.
- [5] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 石漠化过程中土壤理化性质变化的初步研究[J]. *山地农业生物学报*, 2003, 22(3): 204-207, 213.
WANG Delu, ZHU Shouqian, HUANG Baolong. Primary study on soil physical and chemical properties in rocky desertification process[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2003, 22(3): 204-207, 213.
- [6] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 639-644.
LIU Fang, WANG Shijie, LIU Yuansheng, HE Tengbing, LUO Haibo, LONG Jian. Changes of soil quality in the process of karst rocky desertification and evaluation of impact on ecological environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 639-644.
- [7] Li W, Yu L J, He Q F, Wu Y, Yuan D X, Cao J H. Effects of microbes and their carbonic anhydrase on Ca^{2+} and Mg^{2+} migration in column-built leached soil-limestone karst systems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29(3): 274-281.
- [8] Zhang W, Liu C Q, Wang Z L, Zhang L L, Luo X Q. Speciation and isotopic composition of sulfur in limestone soil and yellow soil in karst areas of Southwest China: Implications of different responses to acid deposition[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(3): 809-819.
- [9] Nina Z, Rok T, Milo M, Helena G. Geochemical fingerprint of insoluble material in soil on different limestone formations[J]. *Catena*, 2018, 170: 10-24.
- [10] 周运超. 贵州龙里猴子沟森林土壤与地质地貌相关性的研究[J]. 贵州农学院学报, 1995, 14(2): 16-19.
ZHOU Yunchao. The correlation study between the forest soil with the geologic and geographic conditions of Monkey Valley in Longli county of Guizhou, China[J]. Journal of Guizhou Agricultural College, 1995, 14(2): 16-19.
- [11] Meyer M D, North M P, Gray A N, Zald H S J. Influence of soil thickness on stand characteristics in a Sierra Nevada mixed-conifer forest[J]. *Plant and Soil*, 2007, 294: 113-123.
- [12] 周玮, 严敏, 苏春花, 李玲, 雷章琴. 不同碳酸盐岩和土层厚度下土壤微生物数量及生物量的研究: 以贵阳市花溪区为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 168-174.
ZHOU Wei, YAN Min, SU Chunhua, LI Ling, LEI Zhangqin. Study on soil microbial quantity and biomass developed from different carbonate-rock and soil thickness: A case study of Huaxi district in Guiyang[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2): 168-174.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. Soil agrochemistry analysis. 3rd Edition[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] 邓廷飞, 刘彦, 颜秋晓, 何腾兵, 高安勤. 贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 209-214.

- DENG Tingfei, LIU Yan, YAN Qiuxiao, HE Tengbing, GAO Anqin. Mechanical composition and soil nutrient characteristics and their relationships in typical *Ionicera cinfusa* soil of Guizhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 209-214.
- [15] Clarke K R, Warwick R M. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation(second edition)[M]. PRIMER-E Ltd.: Plymouth, UK, 2001.
- [16] 赖江山, 米湘成. 基于Vegan软件包的生态学数据排序分析[C]. 全国生物多样性保护与持续利用研讨会, 2010: 332-343.
- LAI Jiangshan, MI Xiangcheng. Ordination analysis of ecological data based on Vegan software package[C]. National Symposium on Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization, 2010: 332-343.
- [17] 刘羽霞, 许嘉巍, 靳英华, 朱瑞帅, 牛莉平, 王媛林, 张英洁. 基于地形因子的长白山高山苔原土壤理化性质空间差异[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 640-648.
- LIU Yuxia, XU Jiawei, JIN Yinghua, ZHU Ruishuai, NIU Liping, WANG Yuanlin, ZHANG Yingjie. Spatial variability of soil physicochemical properties in the alpine tundra of Changbai Mountain in relation to topographic factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 640-648.
- [18] 潘复静, 张伟, 梁月明, 王克林, 靳振江. 喀斯特不同植被恢复阶段土壤有机酸季节变化与有效氮磷的关系[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1112-1120.
- PAN Fujing, ZHANG Wei, LIANG Yueming, WANG Kelin, JIN Zhenjiang. Seasonal changes of soil organic acid concentrations in relation to available N and P at different stages of vegetation restoration in a karst ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1112-1120.
- [19] 欧芷阳, 申文辉, 庞世龙, 彭玉华, 谭一波, 何琴飞. 平果喀斯特山地不同植物群落的土壤质量评价[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(10): 2771-2777.
- OU Zhiyang, SHEN Wenhui, PANG Shilong, PENG Yuhua, TAN Yibo, HE Qinfei. Assessment of soil quality of different plant communities in the karst mountains of Pingguo county, Guangxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2771-2777.
- [20] 刘方, 刘元生, 卜通达, 陈祖拥. 贵州喀斯特山区植被演替对土壤有效性氮磷含量及酶活性的影响[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(1): 31-35.
- LIU Fang, LIU Yuansheng, BU Tongda, CHEN Zuyong. Impact of vegetation community succession on available N, P and enzyme activity of the soil in karst hill of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(1): 31-35.
- [21] 白尚斌, 张彦东, 王政权. 落叶松根际pH值与供磷水平及土壤磷有效性的关系[J]. *林业科学*, 2001, 37(4): 129-133.
- BAI Shangbin, ZHANG Yandong, WANG Zhengquan. The relationship between pH changes and P-availability in rhizosphere of *Larix Gmelinii*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 129-133.
- [22] 易艳灵, 吴丽英, 杨倩, 任永胜, 刘海, 李贤伟, 范川. 柏木根系分泌物对盆栽香椿土壤养分和酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2080-2086.
- YI Yanling, WU Liying, YANG Qian, REN Yongsheng, LIU Hai, LI Xianwei, FAN Chuan. Effects of root exudates of *Cupressus funebris* on soil nutrients and enzyme activities of potted *Toona sinensis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2080-2086.
- [23] 杜阿朋, 王彦辉, 管伟, 何常清, 于澎涛, 刘建立. 六盘山叠叠沟小流域的土壤石砾含量坡面分布特征[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 76-80, 127.
- DU Apeng, WANG Yanhui, GUAN Wei, HE Changqing, YU Pengtao, LIU Jianli. Distribution of rock fragment content on slopes in the small watershed of Diediegou of Liupan Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 76-80, 127.
- [24] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 舒英格, 罗海波, 刘方. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 157-162.
- HE Tengbing, DONG Lingling, LIU Yuansheng, SHU Yingge, LUO Haibo, LIU Fang. Change of physical-chemical properties and heavy metal element in soil from different parent material/rock[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 157-162.
- [25] 邹显花, 刘露奇, 刘青青, 马祥庆, 吴鹏飞, 刘爱琴. 杉木凋落物源有机酸对土壤磷有效性的影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(5): 1154-1161.
- ZOU Xianhua, LIU Luqi, LIU Qingqing, MA Xiangqing, WU Pengfei, LIU Aiqin. Influence of organic acids derived from litter to the availability of soil phosphorus in Chinese fir plantations[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5): 1154-1161.
- [26] 彭韬, 邢学刚, 蔡先立, 王世杰, 张信宝, 孟凡德, 张林. 保水剂与活性炭改良白云岩石漠化坡地土壤促进植物生长的盆栽试验研究[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 525-532.
- PENG Tao, XING Xuegang, CAI Xianli, WANG Shijie, ZHANG Xinbao, MENG Fande, ZHANG Lin. Pot experiment research on the effects of water retaining agent and activated carbon as soil amendments for plant growing on dolomitic rocky desertification slopes[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 525-532.
- [27] 周玮, 王应飞, 李玲. 黔中岩溶区不同土层厚度土壤碳、氮、磷含量及其转化酶的活性[J]. *贵州农业科学*, 2017, 45(3): 76-79.
- ZHOU Wei, WANG Yingfei, LI Ling. Carbon, nitrogen and phosphorus content and invertase activity in soil with different soil thickness in karst area of central Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2017, 45(3): 76-79.
- [28] 吴振铎, 吴耀先, 吴江, 杨蔚峰, 焦晓明, 赵庆喜, 李健. 人工针阔混交林生态条件作用机理的研究[J]. *辽宁林业科技*, 2001(2): 4-6, 13.
- WU Zhenduo, WU Yaoxian, WU Jiang, YANG Weifeng, JIAO

- Xiaoming, ZHAO Qingxi, LI Jian. Study on functions of ecological factors in conifer-hardwood plantation[J]. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2001(2): 4-6,13.
- [29] 董玲玲, 何腾兵, 刘元生, 舒英格, 罗海波, 刘方. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要理化性质差异性分析[J]. *土壤通报*, 2008, 39(3): 471-474.
- DONG Lingling, HE Tengbing, LIU Yuansheng, SHU Yingge, LUO Haibo, LIU Fang. Changes of soil physical-chemical properties derived from different parent materials/rocks in karst mountain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 471-474.
- [30] Shaban M, Peng Q, Lin S, Wu Y, Zhao J, Hu R. Nitrous oxide emission from two acidic soils as affected by dolomite application[J]. *Soil Research*, 2014, 52: 841-848.
- [31] 王尚彦, 况顺达, 戴传固, 王明章, 刘家仁. 白云岩和石灰岩山区石漠化速度差异原因分析[J]. *贵州地质*, 2009, 26(1): 49-51.
- WANG Shangyan, KUANG Shunda, DAI Chuangu, WANG Mingzhang, LIU Jiaren. Analyses on the reason of rocky desertification speed difference of dolomite and limestone in mountain area[J]. *Guizhou Geology*, 2009, 26(1): 49-51.
- [32] Shaaban M, Wu Y, Peng Q, Wu L, Hu R. The interactive effects of dolomite application and straw incorporation on soil N₂O emissions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69: 502-511.
- [33] Tang Y, Lian B, Dong H L, Liu D, Hou W. Endolithic bacterial communities in dolomite and limestone rocks from the Nanjiang canyon in Guizhou karst area (China)[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, 29(3): 213-225.
- [34] 董茜, 尤勇刚, 罗为群, 刘绍华, 王根柱, 刘玉国, 周金星. 岩溶区不同母岩植物群落物种组成及优势种群生态位差异[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(5): 849-859.
- DONG Qian, YOU Yonggang, LUO Wei-quan, LIU Shaohua, WANG Genzhu, LIU Yuguo, ZHOU Jinxing. Species composition and niche differences of dominant populations of plant communities from different parent rocks in karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(5): 849-859.
- [35] Deng L, Wang K B, Shangguan Z P. Long-term natural succession improves nitrogen storage capacity of soil on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Research*, 2014, 52: 262-270.

Soil properties of carbonate rocks under different vegetation types

LUO Mei^{1,2}, ZHOU Yunchao¹, TANG Fenghua¹

(1. Research Center for Forest Resources and Environment of Guizhou Province, Guizhou University/Key Laboratory of Forest Cultivation in Plateau Mountain of Guizhou Province/College of Forestry, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract Guizhou Province is located in the largest continuous karst area in the world. The karst landform accounts for 73.8% of the province's land area where 88% of its rural population live. The exposed area of carbonate rocks developed in karst reaches 130,000 km², accounting for 73% of land area in this province. Soil erosion leads to the exposure of carbonate rocks on the surface, aggravates the process of karst rocky desertification, and causes a series of ecological and environmental problems, all of which seriously affect the development of local economy and people's life. The research on the comprehensive prevention and control of karst rocky desertification has become a scientific problem that needs to be solved urgently. In addition, bedrock and vegetation play a prominent role in soil development and formation. In different soil development stages, bedrock and vegetation types have an important impact on the soil physical and chemical properties. However, the current research on karst soils mainly focuses on the soil properties of limestone-formed soils. There is still a lack of research on the characteristics of soil developed by carbonate rock and the effects of their interactions on soil in karst areas from the perspective of vegetation-soil-bedrock system.

Taking the soil developed by carbonate rock (limestone, calcareous dolomite and dolomite) as the research object, this study aims to explore the distribution characteristics and influencing factors of the soil developed by carbonate rock under different vegetation conditions in karst areas, and analyze the effects of different vegetation types, bedrock types and soil layers on soil properties. The study area is located in Huaxi district, Guiyang City, Guizhou Province. It has a subtropical monsoon climate with an average annual temperature of 14.9 °C and an average annual precipitation of 1,229 mm. Three representative plots in Huaxi district were selected, including Huaxi Reservoir, Huaxi TV Tower, and the area near the southern Guizhou University, and a total of 60 soil samples were

collected from these three sample plots of different carbonate rock types. The main tree species in the study area are *Cupressus funebris*, *Quercus*, and *Myrsine Africana*, and grass species are *Stipa bungeana* and *Cynodon dactylon*. The soil physicochemical properties were determined by potentiometric method, Kjeldahl method, alkaline hydrolysis diffusion method, molybdenum antimony anti-colorimetric method (sodium bicarbonate extraction), and potassium dichromate oxidation with an external heating method. The particle size distribution of soil was determined by the hydrometer method. In SPSS24 software, Shapiro-Wilk test was used to test the normality of the data. Mann-Whitney U test and Kruskal-Wallis H test (multiple comparison, Bonferroni method) were used to test the difference of soil properties with different sampling depths, vegetation types and bedrock types. Scheirer-Ray-Hare test was used to determine whether vegetation type, bedrock type, soil layer, and their interactions had a significant effect on soil particles and fertility. Permutation multivariate analysis of variance (PERMANOVA) was used to analyze whether there were significant differences between two or three groups of data. Non-metric multi-dimensional (NMDS) was used to analyze the particle and fertility indexes of the soil developed by different bedrock types in the 0-20 and 20-40 cm soil layers. Redundancy analysis (RDA) was used to analyze the effects of vegetation type, bedrock type, and soil layer on changes in soil properties. These analyses were performed in the R version 4.0.3.

The bedrock and vegetation types are the main factors affecting the development of carbonate rocks into soil, followed by soil layers. In 0-20 and 20-40 cm soil layers, the fertility and particles of the soil developed by limestone, limy dolomite and dolomite are significantly different. However, between the 0-20 and 20-40 cm soil layers, there is no significant difference in the nature of the soil developed from the same bedrock except the differences between gravel content (SLC) and fine particle ratio (<0.002 mm) of limestone-developed soil and the differences between available phosphorus (AP) and organic matter (SOM) content of dolomite-developed soil. In the 0-40 cm soil layer, the bedrock type significantly affects the distribution of soil pH, AP, SLC, AN, total nitrogen (TN), SOM, and 0.2-0.25 mm and 0.002-0.02 mm particles. Vegetation type significantly affects the pH value, AP, TN content of limestone-developed soil, pH, SLC, coarse particles (0.25-2 mm) and fine particles of dolomite-developed soil, and available nitrogen (AN), SOM, coarse and fine particles of soil developed by limestone dolomite. The soil layer significantly affects the distribution of SLC, coarse and fine particles in limestone-developed soil and AP in dolomite-developed soil.

At present, the soil under the abandoned grassland slope and grass cover and the limestone-developed soil in the study area are likely being damaged by erosion. Therefore, according to the lithology of the parent rock, moderately changing the planting structure of vegetation on soil has a positive effect on improving soil nutrients and soil particle composition, and enhancing soil erosion resistance. Besides, the interaction of bedrock-vegetation-soil system and human activities should be comprehensively considered in the prevention and control of soil erosion in karst areas.

Key words karst, vegetation type, carbonate parent rock, soil properties, Huaxi district

(编辑 黄晨晖)