

陈祖拥,刘 方,王世杰,等.喀斯特山区植被退化过程中的土壤质量变化及评价[J].中国岩溶,2016,35(6):639-648.
DOI:10.11932/karst20160605

喀斯特山区植被退化过程中的土壤质量变化及评价

陈祖拥¹,刘 方¹,王世杰²,刘元生³,卜通达³,朱 健¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院,贵阳 550025;
2. 中国科学院地球化学研究所/环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550002;
3. 贵州大学农学院,贵阳 550025)

摘 要:为构建喀斯特山区土壤质量评价体系,通过对喀斯特山区植被退化过程中的小生境土壤进行调查,选用土面和石沟 2 种代表性小生境的土壤作为评价单元,用典范对应分析从 29 个指标中选出 16 个,通过因子分析法对土壤质量进行定量综合评价。结果表明:在喀斯特森林植被退化过程中,用土面和石沟 2 种小生境面积加权计算土壤质量综合分值,能更准确地反映植被退化过程中土壤质量的阶段性变化,具体可分为 3 个阶段,不同阶段之间土壤活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效锰、有效硫和脲酶活性出现显著降低,有效铁、蔗糖酶活性和粘粒含量出现显著增加。第Ⅰ阶段内(原生林一次生林)各土壤指标在样地间没有明显的差异;第Ⅱ阶段(灌木林)土壤活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效硫、脲酶活性和有效锰含量相对第Ⅰ阶段平均分别下降了 33.73%、22.41%、57.66%、37.72%、44.59%、46.57%和 12.52%;蔗糖酶活性及土壤粘粒含量平均分别增加了 81.38%和 47.69%;第Ⅲ阶段(灌草丛)土壤速效磷、脲酶活性、碱性磷酸酶活性和有效锰含量相对第Ⅱ阶段平均分别下降了 42.82%、44.42%、28.45%和 20.55%,土壤有效铁、粘粒含量平均分别增加了 56.40%、57.49%,该阶段的土壤速效磷、速效钾含量已处于缺乏的水平,土壤质量明显下降。

关键词:喀斯特山区;植被退化;小生境;土壤质量退化;典范对应分析;因子分析;评价

中图分类号:X825 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2016)06-0639-10

0 引 言

南方喀斯特森林是一种特殊的森林生态系统,其顶级群落为常绿落叶阔叶混交林,系统组成和结构复杂,物种多样性和结构多样性较高^[1]。由石灰岩、白云岩和含有其他杂质的碳酸盐岩类岩石发育的喀斯特森林土壤呈中性至微碱性,土体不连续,土层浅薄,土壤的剖面形态、理化性质等都不同于地带性土壤。目前国内学者对喀斯特森林生态系统土壤特性^[2-3]、喀斯特森林退化中的土壤理化性质演变^[4-5]、土壤微生物区系、土壤酶活性和土壤生化作用强度^[6-7]等进行了较多的研究工作,取得了大量研究成果。对喀斯特土壤质量评价也开展了一些研究工作,但采用的评

价方法多是参考非喀斯特地区土壤质量评价方法^[4-5,8-10],这些评价方法用连续的土面土壤进行评价。然而,在喀斯特生态系统中,土被是由异质性较高的多种小生境类型镶嵌构成的复合体^[11],仅用土面土壤质量的变化难以反映喀斯特生态系统的演化,需要选取具有代表性的小生境土壤进行土壤质量评价,才能使喀斯特山区的土壤质量评价结果更具可比性和真实性。为此,本文通过对贵州南部喀斯特山区不同植被类型下的土壤进行调查,在分析不同小生境土壤理化性质的基础上,运用综合评价法对土壤质量进行评价,分析植物群落退化演替与土壤质量变化的关系,为喀斯特退化生态系统的恢复和重建提供理论依据。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502300);贵州省科技创新人才团队建设计划(黔科合人才团队[2013]4020)
第一作者简介:陈祖拥(1983-),男,博士研究生,主要从事土壤化学与环境方面的研究。E-mail: qingfeng340@126.com。
通信作者:刘方(1964-),男,博士,教授,主要从事土壤化学与环境方面的研究。E-mail: lfang6435@163.com。
收稿日期:2016-02-04

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州南部茂兰国家自然保护区内,该保护区地理位置为东经 107°52′10″~108°45′40″,北纬 25°09′20″~25°20′50″;该区多年平均温度 18.3℃,≥10℃积温为 5 767.9℃,无霜期为 283 d,年平均降雨量为 1 320.5 mm,降雨集中在 4—10 月,属典型中亚热带季风性湿润气候^[12]。研究区成土母质主要是白云质灰岩和泥质灰岩,其次是白云岩,基岩出露率约 65%~85%,土壤类型为石灰土。研究区内主要有四种植被群落^[13],其中“原生林”乔木层高度 5~12 m,灌木层高度一般在 0.5~1.5 m,草本层种类极少,覆盖度 0.65~0.80。“次生林”乔木层高度 3~8 m,灌木层高度一般在 0.5~2 m,草本层种类较少,但明显比原生林多,覆盖度 0.75~0.85。而“灌木林”没有高大乔木层,灌木高度一般为 1~2 m,草本层种类变多,覆盖度 0.45~0.75。“灌草丛”群落中有少量灌木零星分布,草本层高度一般 0.5~1.5

m,覆盖度 0.35~0.65。

研究区样地内主要有 6 种小生境^[13-14],其中石面为几乎全是裸岩的连片区域,土壤极少;土面是土壤均匀覆盖(占 70%以上),面积连片大于 4 m²的区域;石沟为深宽比小于 2 的侵蚀沟,覆盖的土壤(占 50%~70%)厚薄不一;石洞为水平突出的岩石构成的半开放洞穴,其土壤覆盖占 90%以上;石坑为形状不规则的侵蚀凹地,土壤覆盖占 40%~60%;石缝为自然形成的岩石裂隙或溶蚀裂隙,缝底有少量土壤,约占 10%~20%。

从表 1 调查结果可以看出,石面小生境面积最大,占样地总面积的 67.50%~84.45%,而土面小生境占样地总面积的 11.84%~27.08%,石沟小生境占 2.93%~6.03%,其次为石洞(0.44%~1.42%)、石坑(0.12%~0.39%)和石缝(0.11%~0.30%)。土面和石沟小生境面积之和占了除石面以外的样地面积的 91.81%~96.32%,他们也是样地内主要分布土壤的小生境,因此,对研究区内土面和石沟小生境的土壤进行评价,能基本上反映了研究区的土壤质量状况。

表 1 样地内各类小生境面积及比例(n=3)

Table 1 Area and proportion of each type of microhabitat in the plot (n=3)

小生境类型	原生林		次生林		灌木林		灌草丛	
	小生境面积/m ²	比例/%	小生境面积/m ²	比例/%	小生境面积/m ²	比例/%	小生境面积/m ²	比例/%
石面	202.50	67.50	222.87	74.29	219.18	73.06	253.35	84.45
土面	81.23	27.08	53.24	17.75	59.77	19.92	35.53	11.84
石沟	12.65	4.22	17.58	5.86	18.08	6.03	8.78	2.93
石洞	1.97	0.66	4.25	1.42	2.15	0.72	1.33	0.44
石坑	1.14	0.38	1.18	0.39	0.35	0.12	0.70	0.23
石缝	0.51	0.17	0.89	0.30	0.47	0.16	0.33	0.11
样方总面积	300.00	100.00	300.00	100.00	300.00	100.00	300.00	100.00

1.2 调查与取样

喀斯特森林植被退化演替序列为:原生林(原始)→次生林→灌木林→灌草丛,在每种植物群落研究样区中,设置 3 个 15 m×20 m 的完整具备表 1 中 6 种小生境的岩溶地貌样地(分别选自山的上、中、下部),尽量保证 3 个样地地形、坡度、坡向的一致性;土样的采集借鉴非喀斯特地区的采样方法,根据土面和石沟

两种小生境类型,在每个固定样地内刨除表面覆盖的枯枝落叶层及基本分解的有机质层,随机采集 3 个表层(0~15 cm)土壤混合样品,每个混合样品按“梅花型”由样点附近多点土壤混合而成^[14]。采集的样品当天保存于冰箱中,尽快带回实验室,将该湿土样分成两个部分,一部分过 2 mm 筛,保存于 4℃冰柜中用于 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、土壤酶活性及土壤呼吸强

度的测定;另一部分在室温下风干,研磨过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于土壤理化性状的测定。

1.3 测定方法

土壤理化性质分析^[15]:土壤 pH 用水浸提—电位法;土壤有机质(OM)采用重铬酸钾外加热法,总腐殖酸(THA)用焦磷酸钠浸提—重铬酸钾法,活性有机碳(AOC)用高锰酸钾氧化法;全氮(TN)用凯氏定氮法,碱解氮(AvN)用 FeSO_4 —Zn 还原—碱解扩散法, NH_4^+ -N 采用靛酚蓝比色法, NO_3^- -N 采用酚二磺酸比色法测定;全磷(TP)用硫酸—高氯酸消煮—钼蓝比色法,速效磷(AvP)用碳酸氢钠浸提—钼蓝比色法,水溶性磷(SP)用水浸提—钼蓝比色法,缓效钾(SAvK)用热硝酸浸提—火焰光度计法,速效钾(AvK)用醋酸铵浸提—火焰光度计法;交换性钙/镁(ExCa/ExMg)用 EDTA 络合滴定法;土壤有效铁、锰、铜、锌(AvFe、Mn、Cu、Zn)用 DTPA 浸提—原子吸收分光光度法;土壤有效硫(AvS)用磷酸盐—氯化钙提取—硫酸钡比浊法;土壤颗粒组成用简易比重计速测法。土壤酶活性分析^[16]:脲酶活性(URE)用靛酚比色法测定;过氧化氢酶活性(CAT)用 KMnO_4 滴定法测定;碱性磷酸酶活性(ALP)用磷酸苯二钠比色法测定;蛋白酶活性(PRO)用茚三酮比色法测定^[17];蔗糖酶活性(SUC)采用 3,5—二硝基水杨酸比色法。土壤呼吸强度(SRR):采用密闭静置测 CO_2 法^[15]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22 软件对各指标进行基本统计、单因素方差分析、Duncan 差异显著性检验、因子分析(FA)及聚类分析(CA);用 Canoco 4.5 进行典范对应分析(CCA);用 Origin、Pro2015 等作图。

1.5 土壤质量综合评价

经 CCA 排序后确定的指标,数据在 SPSS 22 中经过 z-score 标准化后,进行 KMO 检验和 Bartlett 球体检验;数据经 FA 得到相关系数矩阵、特征值及贡献率、因子载荷矩阵和因子得分系数矩阵,由公式(1)计算各植被类型下土壤质量评价分值^[8]。

$$\text{SFQAV} = \sum a_i z_i \quad (1)$$

式中,SFQAV 为土壤肥力质量评价分值; a_i 为各因子的方差贡献率; z_i 为因子得分, $z_i = \sum w_{ij} x_{ij}$, w_{ij} 为第 i 个变量在第 j 个因子处的因子得分系数, x_{ij} 为第 i 个变量在第 j 个因子处的标准化值。

2 结果与分析

2.1 植被退化过程中土壤性质的变化

两种小生境土壤样品的测定结果表明(表 2),在原生林→灌草丛退化过程中,土壤速效磷、有效铁、有效锌、水溶性磷、有效铜、硝态氮和有效硫等下降较为明显,其次是速效钾、铵态氮、总腐殖酸、活性有机碳、有机质、全氮、有效锰和碱解氮等。与原生林相比,次生林、灌木林和灌草丛土面土壤中的有机质、总腐殖酸、活性有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、铵态氮等含量明显减少,且达了显著差异水平。另外,土壤脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶和土壤呼吸强度也出现不同程度的下降;但土壤过氧化氢酶、蔗糖酶活性均出现一定程度的增加;土壤粘粒含量也都出现了明显的增加,而砂粒含量则明显降低,土壤质地向粘质化方向推进,并由壤土向粘壤土、壤质黏土方向发展。可见,喀斯特山区原生阔叶林退化后,土壤肥力及生物学性状等质量明显下降^[5-7]。

2.2 土壤质量评价指标的选取

如何系统合理地选择评价指标是土壤质量评价的关键,土壤的综合质量 CCA 分析结果,可以为科学合理地选取评价指标提供依据^[8]。本文同样采用 CCA 排序进行指标选取,结果如图 1,受植被退化影响的土壤指标中,pH、SUC、Clay、AvFe、 NH_4^+ -N、AvMn、AvP、SRR、AvCu、AvZn、Sand、PRO、URE、ALP 等 14 个指标受影响最明显,其次是 ExCa、ExMg、CAT、AvK、AvS、 NO_3^- -N、SP、THA、AOC、OM、TN、AvN 等 12 个指标,而 SAvK、TP、Silt 这 3 个指标受影响最小。其中,AvN、OM、TN 三者之间的箭头夹角很小,说明三者显著正相关,且前者箭头较长,表征了后两者的大部分变异信息;同理可知,Sand 表征了 PRO、SP、THA、 NO_3^- -N 的大部分变异信息,而 AvP 可以表征 SRR、AvCu 的大部分变异信息。此外,Sand 和 Clay 大致呈 180° 夹角,说明二者变化趋势完全相反,可二选其一。另外,SAvK、TP、Silt 这 3 个指标箭头短,说明各植被类型之间这几个指标的差异较小,从统计学角度上说其意义不大,同样可以在接下来的因子分析中去除这几个指标。

综上,根据具有代表性、易获取性等原则,筛选出 pH、ExCa、SUC、Clay、ExMg、AvFe、CAT、 NH_4^+ -N、AvMn、AvK、AvP、AvS、AOC、AvN、URE 和 ALP 16 个指标,对 4 种植被类型的土壤质量进行综合评价。

表 2 不同植被类型下土壤理化性状及土壤酶活性

Table 2 Soil physical and chemical properties and soil enzyme activity in different communities

指标	土面				石沟			
	原生林	次生林	灌木林	灌草丛	原生林	次生林	灌木林	灌草丛
OM/g/kg	113.30±23.99 a	79.33±5.86 b	67.79±5.93 b	62.17±14.79 b	124.13±5.91 a	111.15±1.94 a	93.31±12.10 b	88.28±10.31 b
THA/g/kg	31.69±5.07 a	23.60±0.48 b	22.31±2.13 b	18.86±3.89 b	46.53±22.47 a	28.62±0.67 a	27.77±2.83 a	24.82±2.04 a
AOC/g/kg	18.39±2.26 a	11.75±0.36 b	9.49±1.44 bc	8.09±1.02 c	21.36±1.42 a	16.02±1.78 b	14.61±1.68 b	13.79±1.28 b
TN/g/kg	5.77±0.42 a	3.88±0.13 b	3.86±0.58 b	3.61±0.75 b	7.05±0.87 a	5.15±0.57 b	5.07±0.76 b	4.95±0.51 b
TP/g/kg	0.69±0.11 a	0.45±0.17 a	0.55±0.18 a	0.58±0.14 a	0.76±0.04 a	0.68±0.29 a	0.63±0.15 a	0.62±0.05 a
SAvK/mg/kg	209.33±61.49 a	153.33±34.95 a	182.67±30.02 a	206.67±41.63 a	253.33±50.33 a	166.67±23.09 b	203.33±40.41 ab	198.67±37.17 ab
AvN/mg/kg	456.70±32.24 a	344.59±38.64 b	325.66±31.65 b	291.20±59.16 b	521.25±34.33 a	446.84±14.15 ab	402.83±79.08 b	392.13±36.14 b
AvP/mg/kg	8.37±1.36 a	3.41±1.29 b	2.81±0.41 b	2.33±0.44 b	11.53±1.93 a	5.57±1.30 b	3.68±0.49 bc	1.79±0.71 c
AvK/mg/kg	86.67±28.87 a	51.67±7.64 b	56.67±10.41 ab	43.33±5.77 b	105.00±30.41 a	70.83±11.27 ab	63.33±15.28 b	53.33±5.77 b
NH ₄ ⁺ - N/mg/Kg	27.21±0.89 a	22.17±1.01 b	22.67±2.75 b	18.25±2.60 c	17.42±1.61 a	13.75±2.41 b	11.75±1.52 b	7.46±1.37 c
NO ₃ ⁻ - N/mg/Kg	133.23±72.31 a	66.57±12.76 ab	46.71±22.60 b	52.07±10.96 b	146.80±47.63 a	113.80±23.59 ab	61.16±26.63 b	77.60±27.05 b
SP/mg/kg	0.81±0.41 a	0.24±0.15 a	0.17±0.10 a	0.38±0.49 a	1.82±0.55 a	0.46±0.33 b	0.44±0.15 b	0.26±0.09 b
ExCa/g/kg	3.14±0.46 a	2.87±0.23 a	2.95±0.76 a	2.97±0.70 a	3.09±0.21 a	3.36±0.42 a	3.82±0.48 a	3.79±0.83 a
Ex Mg/g/kg	0.90±0.14 a	0.80±0.30 a	1.43±0.88 a	1.16±0.98 a	1.16±0.12 a	1.04±0.40 a	1.12±0.58 a	1.42±0.88 a
AvFe/mg/kg	55.17±5.48 c	66.17±4.01 bc	91.33±18.76 ab	110.33±27.41 a	52.50±18.82 ab	43.50±13.44 b	70.13±22.18 ab	81.50±19.94 a
AvMn/mg/kg	196.17±4.73 a	179.00±11.30 a	172.50±13.08 a	128.33±34.89 b	220.33±25.81 a	181.83±18.25 ab	157.00±30.01 b	149.67±15.04 b
AvCu/mg/kg	13.50±3.50 b	7.67±1.61 b	5.00±1.00 bc	3.00±0.50 c	15.47±2.00 a	6.33±1.44 b	7.17±0.29 b	6.17±2.52 b
AvZn/mg/kg	16.33±6.43 a	15.33±6.01 a	12.83±2.84 a	3.00±1.32 b	22.67±11.12 a	14.67±3.75 b	13.53±3.27 ab	7.33±0.76 b
AvS/mg/kg	36.50±9.85 a	19.00±5.77 b	20.00±2.29 b	17.17±3.33 b	45.17±7.75 a	25.33±3.40 b	24.63±4.05 b	22.00±3.97 b
URE (NH ₄ -N mg/kg · 37℃ · 3h)	560.67±213.84 a	185.33±29.67 b	170.67±36.95 b	138.67±48.34 b	935.67±45.76 a	720.67±110.75 b	352.67±56.04 c	272.00±32.92 c
CAT (0.1mol/L KMnO ₄ mL/g · h)	1.35±0.20 a	1.25±0.16 a	1.42±0.21 a	1.53±0.06 a	1.20±0.14 a	1.32±0.21 a	1.27±0.26 a	1.26±0.14 a
ALP (ArOH g/kg · 37℃ · 24h)	1.51±0.05 a	1.46±0.18 a	0.83±0.36 b	0.77±0.37 b	1.79±0.23 a	1.81±0.07 a	1.49±0.22 ab	1.29±0.20 b
PRO (NH mg/kg · 50℃ · 2h)	102.86±11.57 a	58.04±4.82 b	50.12±7.16 bc	34.27±14.21 c	115.65±5.60 a	73.68±18.19 b	77.21±9.96 b	57.83±5.60 b
SUC (C ₆ H ₁₂ O ₆ g/kg · 37℃ · 24h)	7.00±0.72 c	13.47±2.20 b	16.40±2.80 ab	18.67±0.64 a	8.93±1.94 b	15.27±4.50 ab	13.90±3.48 ab	15.93±3.23 a
SRR (CO ₂ mg/kg · 28℃ · 24h)	822.82±55.02 a	486.46±30.53 b	440.50±95.87 b	468.59±52.20 b	844.82±115.70 a	710.86±148.71 ab	510.17±55.44 bc	402.36±106.74 c
0.002mm Clay/%	13.37±3.07 b	16.67±0.58 b	26.33±4.73 a	29.00±3.46 a	7.00±2.00 a	14.37±1.52 c	21.67±2.08 b	28.00±1.00 a
0.002~0.02mm Silt/%	40.30±3.24 a	37.00±5.57 a	38.00±1.00 a	40.87±0.23 a	35.67±3.21 a	38.30±3.46 a	37.33±2.08 a	35.17±2.02 a
0.02~2mm Sand/%	46.33±0.58 a	46.33±5.13 a	35.67±4.62 b	30.13±3.35 b	57.33±5.13 a	47.33±4.16 b	41.00±3.00 bc	36.83±1.04 c

注:表内数据为算术平均值±标准差(n=3),同行不同字母表示同一小生境不同植被类型间差异显著(Duncan,P<0.05)。

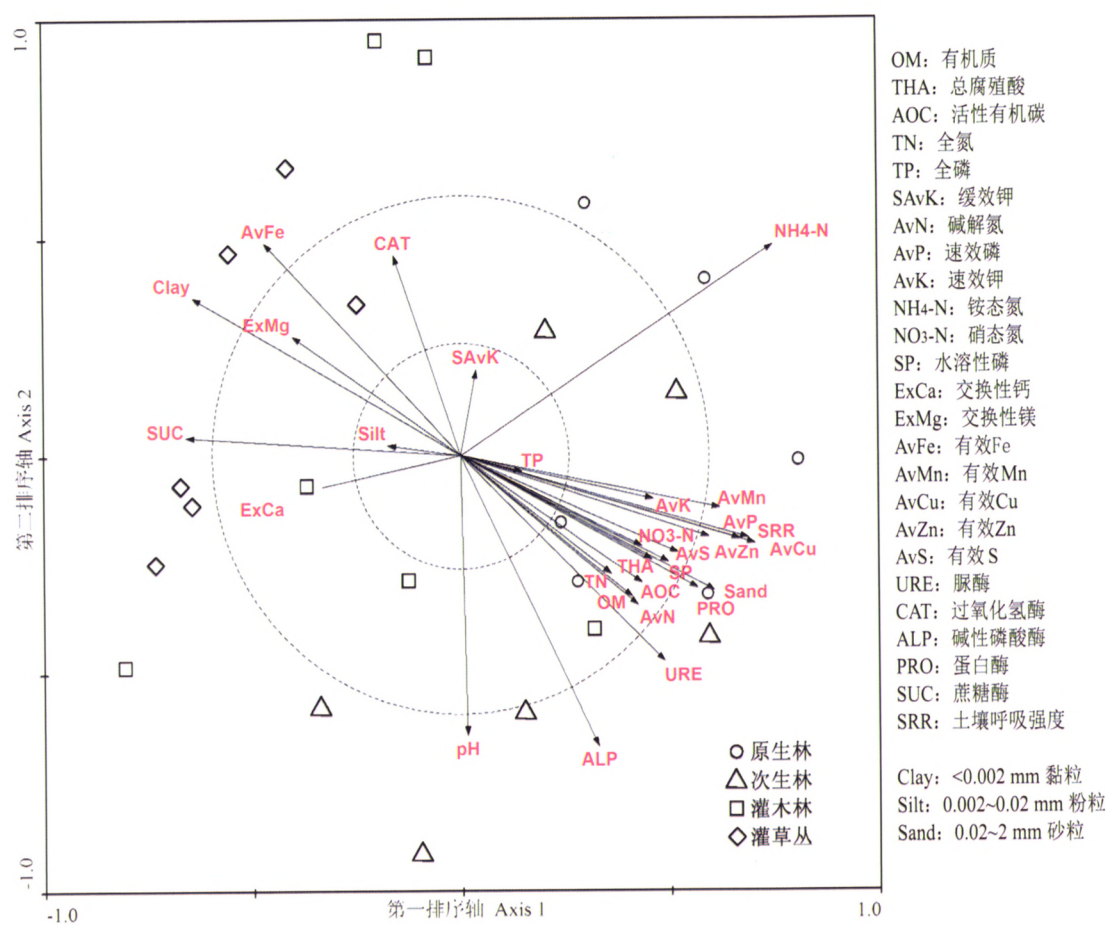


图 1 植被样地与土壤指标的典范对应分析

Fig. 1 Canonical correspondence analysis showing the effect of vegetation plots on soil factors

2.3 植被退化过程土壤质量综合评价

因子分析是主成分分析的推广,它把一些错综复杂的变量归结为少数几个综合因子^[8],并进行综合评价。本文对选取的 16 个土壤指标进行的 KMO 检验和 Bartlett 球体检验的显著系数 $P=0.000 < 0.05$,表明数据适合做因子分析。经 SPSS 因子分析选择主成分分析法(PCA),按照特征值大于 1 的原则,抽取了 4 个公因子(表 3),其特征值分别为 9.110、

2.145、1.426 和 1.009,累计方差贡献率达 85.562%,说明提取 4 个主成分用于评价土壤质量是可靠的。

由因子载荷矩阵可知(表 4),土壤公因子 1 主要支配 pH 值、活性有机碳、碱解氮、速效磷等 12 个指标(因子载荷值的绝对值 > 0.60),公因子 2 主要支配铵态氮、交换性钙 2 个指标,公因子 3 主要支配交换性钙、过氧化氢酶 2 个指标,公因子 4 主要支配交换性镁 1 个指标。

表 3 方差贡献表

Table 3 Total variance explained

因子	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	9.110	56.935	56.935	9.110	56.935	56.935
2	2.145	13.404	70.339	2.145	13.404	70.339
3	1.426	8.914	79.253	1.426	8.914	79.253
4	1.009	6.309	85.562	1.009	6.309	85.562
5	0.721	4.504	90.066			
6	0.407	2.545	92.611			

表 4 因子载荷矩阵和主成分得分系数矩阵

Table 4 The component matrix and the component score coefficient matrix

土壤因子	因子载荷矩阵				主成分得分系数矩阵			
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
pH	0.856 *	0.353	−0.052	−0.272	−0.020	0.247	0.136	−0.174
AOC	0.935 *	0.119	0.148	0.089	0.133	−0.052	0.101	0.039
AvN	0.897 *	0.198	0.235	0.061	0.130	−0.071	0.165	0.001
AvP	0.913 *	−0.279	0.030	0.105	0.146	−0.073	−0.101	0.034
AvK	0.786 *	−0.103	0.256	0.273	0.201	−0.235	0.044	0.134
NH ₄ ⁺ -N	0.066	−0.941 *	−0.009	0.086	0.102	−0.200	−0.383	−0.053
ExCa	0.088	0.641 *	0.648 *	0.101	0.092	−0.248	0.486	−0.021
Ex Mg	−0.094	0.412	−0.432	0.774 *	0.084	−0.061	−0.018	0.840
AvFe	−0.788 *	−0.206	0.291	0.143	0.022	−0.279	0.014	0.013
AvMn	0.784 *	−0.193	−0.257	0.233	0.112	0.021	−0.174	0.241
AvS	0.869 *	−0.083	0.084	0.192	0.158	−0.106	−0.007	0.118
URE	0.930 *	0.071	0.037	−0.005	0.093	0.035	0.046	−0.013
CAT	−0.397	−0.248	0.692 *	0.184	0.143	−0.488	0.140	−0.081
ALP	0.856 *	0.219	−0.104	−0.263	−0.016	0.244	0.063	−0.168
SUC	−0.819 *	0.427	−0.138	0.020	−0.135	0.102	0.117	0.123
Clay	−0.900 *	0.170	0.063	0.083	−0.072	−0.076	0.084	0.082

注：* 因子载荷绝对值 > 0.60。

根据 16 个因子得分系数矩阵(表 4)和原始变量标准化矩阵(z-score 标准化),计算得出各植被类型样地在每个公因子中的得分,并用对应的公因子方差贡献率进行加权求和,得到各植被样方的土面和石沟土壤质量综合评价分值(表 5);其中可以看出,土面土壤各样地综合评分值为−1.27~1.05,而石沟土壤综合评分值仅为−0.63~1.35,土面土壤各植被间综合分值差异较石沟土壤大。喀斯特原生林退化后,土

面土壤质量综合评分值由 0.35~1.05 迅速下降到 −1.27~−0.06,而石沟土壤综合评分值则由 1.06~1.35 缓慢下降到−0.63~0.49,说明处于负地形的石沟土壤受植被退化的影响相对较小。另外,根据这两种小生境土壤综合评价值,结合表 1 中土面和石沟两个小生境的面积权重值进行加权计算,可得到研究区内各植被类型总的综合评价值。

表 5 各植被类型的因子得分及综合评价值

Table 5 Factor scores of soil quality assessment in different communities

样地号	植被类型	土面因子得分				土面综合 评分值	石沟因子得分				石沟综合 评分值	总综合 评分值
		因子 1	因子 2	因子 3	因子 4		因子 1	因子 2	因子 3	因子 4		
1	原生林	1.93	−1.33	−0.26	−0.01	1.05	1.90	−0.32	0.04	0.41	1.25	1.08
2	原生林	0.92	−1.02	−0.79	−0.32	0.35	1.91	0.32	0.13	0.24	1.35	0.48
3	原生林	0.70	0.72	−1.37	−0.61	0.39	1.38	1.28	−0.66	0.13	1.06	0.48
4	次生林	−0.86	1.04	−1.05	−0.15	−0.53	0.28	1.76	0.09	0.31	0.49	−0.28
5	次生林	−0.39	0.04	−0.89	−0.69	−0.40	0.30	0.17	0.85	−1.24	0.23	−0.24
6	次生林	−0.45	0.65	−0.80	−1.10	−0.36	0.10	0.75	0.84	−0.31	0.25	−0.21
7	灌木林	0.11	−1.75	0.10	1.83	−0.06	−0.48	1.10	0.49	0.75	−0.04	−0.05
8	灌木林	−0.78	−0.72	−1.14	1.45	−0.64	0.28	−1.19	1.75	−1.26	0.09	−0.47
9	灌木林	−0.93	−0.12	−1.41	−0.93	−0.85	−0.61	1.15	0.93	−0.16	−0.14	−0.69
10	灌草丛	−0.90	−0.43	−0.70	1.92	−0.60	−0.87	0.92	0.75	1.37	−0.26	−0.53
11	灌草丛	−0.89	−1.35	0.77	−1.29	−0.82	−0.33	−0.07	2.29	1.24	0.10	−0.64
12	灌草丛	−1.38	−1.51	−0.87	−0.37	−1.27	−0.93	−0.10	0.93	−1.22	−0.63	−1.15

根据各样地的综合评价分值,用 SPSS 系统聚类(Ward 方法,平方 Euclidean 距离)可以得到各样地土壤质量聚类结果(图 2),可以看出,全部按距离 5 为分割线,样地按土面小生境可分为 2 类(图 2 a,1、2、3、7 号样地为一类,其余样地为一类),按石沟小生

境可分为 3 类(图 2 b,1、2、3 号样地为一类,4、5、6、8、11 号样地为一类,其余样地为一类),按两种小生境面积加权综合分值可明显分为 3 类(图 2 c,1、2、3 号样地为一类,4、5、6、7 号样地为一类,其余样地为一类)。

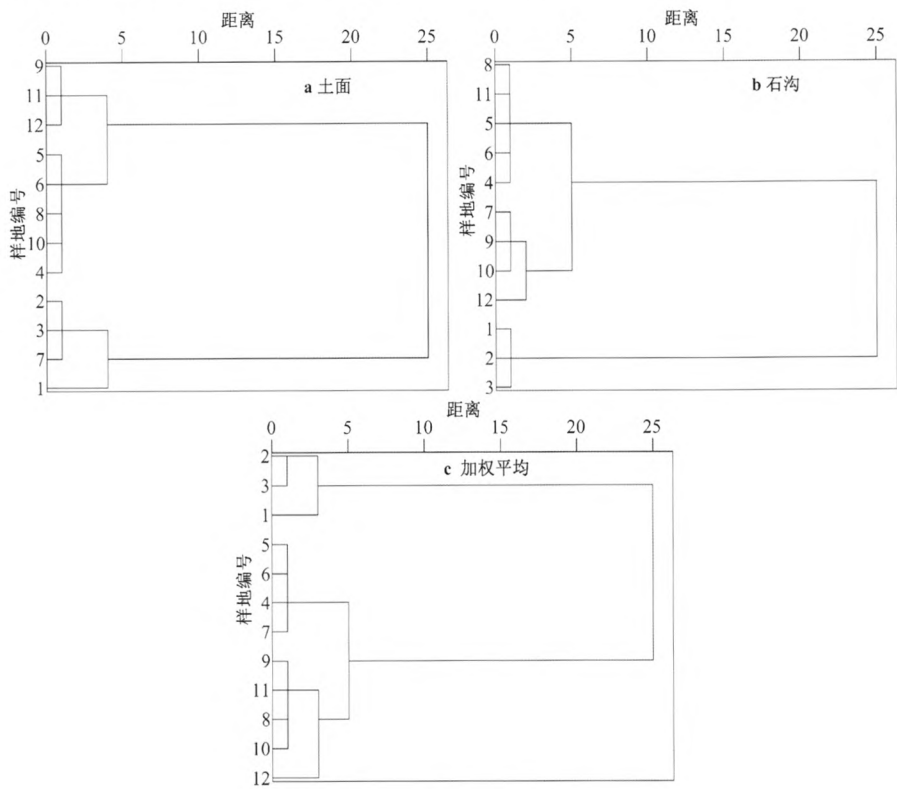


图 2 样地土壤质量水平系统聚类结果

Fig. 2 The result of cluster analysis of the soils quality in different sample plots

对按加权平均值分类的 3 组样地土壤指标进行统计,得出植被退化过程中土壤质量变化的 3 个阶段中,不同土壤指标的数值变化范围(表 6)。多重比较结果表明,与第 I 阶段相比,活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效铁、有效锰、有效硫、脲酶活性、蔗糖酶活性和粘粒含量,在第 II、III 阶段都出现了显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的变化。第 I 阶段内土壤各指标在各样地间没有明显的差异。第 II 阶段土壤活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效硫、脲酶活性和有效锰含量,相对第 I 阶段平均分别下降了 33.73%、22.41%、57.66%、37.72%、44.59%、46.57%和 12.52%;但蔗糖酶活性及土壤粘粒含量则平均分别增加了 81.38%和 47.69%。第 III 阶段土壤速效磷、脲酶活性、碱性磷酸酶活性和有效锰含量,相对第 II 阶段平均分别下降了 42.82%、44.42%、28.45%和 20.55%;而土壤有效铁、粘粒含量则平均分别增加了 56.40%、57.49%。因此,在喀斯特森林

退化过程中,土壤活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效锰、有效硫、脲酶活性等出现显著降低,而有效铁、蔗糖酶活性和粘粒含量则明显增加;参照“全国第二次土壤普查养分分级标准”,第 III 阶段的土壤速效磷(平均 2.57 mg/kg)、速效钾(平均 54.17 mg/kg)含量已分别处于“6 极缺乏(<3 mg/kg)”、“4 缺乏(50~100 mg/kg)”的水平,将对生态环境产生明显影响。

3 讨 论

(1) 植被退化中的土壤质量变化:在喀斯特植物群落退化过程中,随着退化度的提高、植被覆盖率下降,有机质等含量急剧下降,引起土壤质量明显退化^[5]。阔叶林退化主要是由于森林砍伐造成的,而原生林由于砍伐导致植物群落结构层次严重简化,植被覆盖度明显下降,地表温度变异显著增大,退化后期

表 6 不同退化阶段土壤主要指标的变化
Table 6 The ranges of the main soils indexes in different degradation stage

指标	I 阶段(n=6) (最小~最大)平均值	II 阶段(n=6) (最小~最大)平均值	III 阶段(n=12) (最小~最大)平均值
pH	(6.63~7.29)7.03 aA	(6.16~7.24)6.84 abA	(5.91~7.54)6.53 bA
AOC/g/kg	(17.09~22.78)19.88 aA	(11.04~17.80)13.17 bB	(7.41~16.38)11.49 bB
AvN/mg/kg	(433.89~559.10)488.97 aA	(307.22~458.18)379.41 bB	(224.22~451.36)357.44 bB
AvP/mg/kg	(7.06~13.66)9.95 aA	(2.01~6.98)4.21 bB	(0.71~3.98)2.41 cB
AvK/mg/kg	(70.00~140.00)95.83 aA	(45.00~82.50)59.69 bB	(40.00~80.00)54.00 bB
NH ₄ ⁺ -N/mg/Kg	(16.25~28.00)22.31 aA	(11.00~23.25)17.28 abA	(6.38~24.50)14.99 bA
ExCa/g/kg	(2.66~3.57)3.11 aA	(2.64~3.83)3.27 aA	(2.35~4.75)3.31 aA
Ex Mg/g/kg	(0.82~1.24)1.03 aA	(0.54~2.16)1.17 aA	(0.38~2.26)1.16 aA
AvFe/mg/kg	(39.00~74.00)53.83 bB	(28.00~80.50)58.75 bB	(54.38~141.50)91.89 aA
AvMn/mg/kg	(192.50~250.00)208.25 aA	(163.50~200.00)182.19 bA	(105.50~168.50)144.75 cB
AvS/mg/kg	(28.50~54.00)40.83 aA	(13.50~28.00)22.63 bB	(15.00~26.38)20.34 bB
URE (NH ₄ -N mg/kg · 37℃ · 3h)	(315.00~984.00)748.17 aA	(163.00~842.00)399.78 bB	(83.00~387.00)222.20 bB
CAT (0.1mol/L KMnO ₄ mL/g · h)	(1.05~1.55)1.27 aA	(1.07~1.63)1.32 aA	(1.07~1.60)1.37 aA
ALP (ArOH g/kg · 37℃ · 24h)	(1.46~2.02)1.65 aA	(0.77~1.87)1.51 aAB	(0.36~1.68)1.08 bB
SUC (C ₆ H ₁₂ O ₆ g/kg · 37℃ · 24h)	(6.40~10.60)7.97 bB	(12.00~20.40)14.45 aA	(10.00~19.60)16.53 aA
<0.002 mm Clay/%	(5.00~16.00)11.35 cC	(13.00~21.00)16.76 bB	(19.00~31.00)26.40 aA

注：同行不同小写字母表示同一指标不同阶段间差异显著(Duncan,P<0.05),同行不同大写字母表示同一指标不同阶段间差异极显著(Duncan,P<0.01)。

群落的土壤温度显著高于退化初期阶段,由于高温的作用,提高了土壤的呼吸速率,从而也加速了有机物质的分解^[18]。因而最终使得土壤质量退化,并且相对于植物群落退化出现明显滞后。

在覆盖度较好的原生林区,土壤及枯落物等在重力和水的作用下向下迁移,积聚在低洼的地形中。在石沟小生境中,光、热、湿度等环境因子相对较好,植物生物量和微生物活性都较高,大量枯落物在微生物的作用下转化为腐殖质,并可以与钙结合凝聚形成腐殖质钙等有机无机复合体,形成大量结构稳定的腐殖质。与以物质堆积为主的石沟相比,土面以物质迁移为主,淋溶作用较大,有机质和有效养分含量低于石沟土壤^[19]。因此,本研究各植被群落中,石沟小生境土壤有机质、碱解氮、速效磷等,都比土面小生境土壤含量高,且土面土壤质量下降要比负地形的石沟土壤更加明显。例如,原生林受到人为破坏变为次生林后,土面土壤质量综合分值明显下降(176.08%),而石沟土壤质量综合分值下降幅度要明显较小(61.10%)。

(2)喀斯特山区土壤质量评价指标的选取:土壤质量是根据已知的土壤外部性质进行推测或综合量化表达,作为土壤质量评价关键的土壤质量指标的确

定是件难事,而且在不同的土壤系统之间变化很大^[20]。Larson 和 Pierce 提出了最小数据集(MDS)的概念,并建议将所有的土壤质量指标整合成一个综合的质量指标^[21]。在土壤质量评价初期主要集中在土壤的物理和化学性质,近来生物学指标越来越受到重视,多数研究认为,土壤微生物是土壤质量变化最敏感的指标。而土壤酶的活性在有机物分解和矿化过程中起着重要作用而且对土壤管理措施变化反应敏感,它们在养分循环中起着很重要的作用而且已被用作微生物活性指标^[22],在国内的土壤质量评价中这些指标得到了广泛的采用^[8-10],但各个研究中所选用的指标及数量都各有差异。

本文中,原生林土面土壤 OM(113.30 g/kg)、TN(5.77 g/kg)等含量都较高,分别是“全国第二次土壤普查养分分级标准”中 I 级标准(有机质> 40 g/kg,全氮> 2 g/kg)的 2.83 和 2.89 倍,且各样地间差异不明显。同时可以看到,TP、SAvK、Silt 等这些因子在群落中没有明显差异,含量相差不大,其量和质的不足或过多在群落间具有相同的表现形式和作用^[8],而典范对应分析表明,AvN、OM、TN 三者显著正相关(P<0.05),且前者表征了后两者的大部分

变异信息；同理，PRO、SP、THA、NO₃⁻-N、SRR、AvCu 等的大部分变异信息可以由 Sand 和 AvP 等表征，所以在对植被土壤质量的评价中可以排除这些指标，使评价指标更加合理，使过程更加简单。作为对喀斯特森林土壤质量评价的一次尝试，本研究兼顾了大量因素，如物理化学指标、微量元素、土壤酶和生物因素等，并运用数量生态学方法，探求森林生态系统中土壤质量的影响因子，最终确定土壤质量评价的最小数据集^[8]，将会使森林土壤质量的综合评价方法更具普适性。通过前面的分析可见，本文从 29 个指标里选出的 16 个指标，可以体现整个研究区土壤质量的变化，其中的活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效铁、有效锰、有效硫、粘粒（或砂粒）8 个指标，都是反映喀斯特植被退化过程中土壤质量变化的敏感指标之一，可以成为喀斯特山区土壤质量评价指标体系的重点关注对象。

（3）植被退化中的土壤质量评价：喀斯特森林生境复杂多样，为促进岩溶山区土壤退化研究中数据间的可比性，土壤采样方法以土壤面积权重确定的小生境土样组成样地代表性土样是值得推荐的方法^[11]，并在后来的研究中得到了应用^[7,13]。从本研究结果看来，由于土面、石沟小生境占样地面积比例较大，覆盖土壤面积比例也较大，而石洞、石坑和石缝等小生境所占样地面积比例较小；单用土面小生境进行土壤质量评价，可以表征研究区样地土壤质量变化 70%~80% 的信息，增加石沟小生境土壤这一评价单元后，可以使评价结果表征信息提高到 90% 以上，并使得土壤质量分级由 2 级分成 3 级，能更精确地反映喀斯特森林植被退化所对应的土壤质量变化阶段。因此，用土面和石沟两种不同退化程度的小生境土壤作为评价单元，对喀斯特山区土壤质量进行评价，可以使评价的结果更具合理性和可比性。

4 结 论

（1）在喀斯特山区土面和石沟两种小生境可作为土壤质量评价的主体，土面小生境土壤质量基本表征了样地土壤质量变化，增加石沟小生境土壤作为评价单元，并用小生境面积加权计算土壤质量综合分值，能更准确地反映喀斯特森林植被退化所对应的土壤质量变化阶段。

（2）通过对 29 个指标进行典范对应分析表明，pH、碱解氮等 16 个理化及生物性状指标，可作为土壤质量评价的最小数据集。其中的活性有机碳、碱解

氮、速效磷、速效钾、有效铁、有效锰、有效硫、粘粒 8 个指标，是反映喀斯特植被退化过程中土壤质量变化的敏感指标。

（3）通过因子分析及聚类分析等可将植被退化过程中的土壤质量变化分为 3 个阶段，不同阶段之间土壤活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效锰、有效硫和脲酶活性出现显著降低，有效铁、蔗糖酶活性和粘粒含量出现显著增加。第Ⅰ阶段内土壤各指标在样地间没有明显的差异。第Ⅱ阶段土壤活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、有效硫、脲酶活性和有效锰含量，相对第Ⅰ阶段平均分别下降了 33.73%、22.41%、57.66%、37.72%、44.59%、46.57% 和 12.52%；蔗糖酶活性及土壤粘粒含量平均分别增加了 81.38% 和 47.69%。第Ⅲ阶段土壤速效磷、脲酶活性、碱性磷酸酶活性和有效锰含量，相对第Ⅱ阶段平均分别下降了 42.82%、44.42%、28.45% 和 20.55%；土壤有效铁、粘粒含量平均分别增加了 56.40%、57.49%，土壤质量明显下降。

参考文献

[1] 周政贤主编. 茂兰喀斯特森林科学考察集[M]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1987, 37-41.

[2] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富. 岩溶生态系统土壤及表生植被某些特性变异与石漠化的相关性[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 196-173.

[3] 李阳兵, 王世杰, 王济. 岩溶生态系统的土壤特性及其今后研究方向[J]. 中国岩溶, 2006, 25(4): 283-288.

[4] 龙健, 李娟, 汪境仁, 等. 典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 77-82.

[5] 刘方, 王世杰, 刘元生, 等. 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): 640-646.

[6] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 597-602.

[7] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 等. 茂兰保护区小生境土壤微生物活性研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 285-291.

[8] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2014(9): 1-17.

[9] 朱新玉, 胡云川, 芦杰. 豫东黄河故道湿地土壤生物学性状及土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2014(02): 27-32.

[10] 赵娜, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 351-358.

[11] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 475-483.

[12] 朱守谦主编. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ) [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2003, 38-42.

[13] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 等. 茂兰喀斯特植被演替中土壤微生物量碳氮研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 188-195.

[14] 刘方,王世杰,罗海波,等.喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J].土壤学报,2008,45(6):1055-1062.

[15] 鲁如坤.土壤农业化学分析法[M].北京:中国农业科技出版社,1998:12-108.

[16] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:228-254.

[17] 蔡红,沈仁芳.改良茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性的研究[J].土壤学报,2005,42(2):307-313.

[18] 郭明,康蒙,仲强,等.浙江天童森林退化和受损对土壤呼吸的影响[J].华东师范大学学报(自然科学版),2011,(4):53-60.

[19] 罗海波,蒲通达,陈祖拥,等.贵州南部喀斯特植被群落变化对小生境土壤养分的影响[J].贵州农业科学,2010,38(6):112-115.

[20] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(03):901-913.

[21] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality[C]//Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management, Chiang Rai, Thailand, September 15—21 1991. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management Press, 1991.

[22] Frankenberger W T, Dick W A. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(5): 945-951.

The evaluation of soil quality evolution in the process of vegetation degradation in karst mountain area

CHEN Zuyong¹, LIU Fang¹, WANG Shijie², LIU Yuansheng³, BU Tongda³, ZHU Jian¹

(1. College of Resource and Environmental Engineering of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China; 3. Collage of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract To evaluate karst mountain soil quality due to the degradation of vegetation, this paper selected two representative microhabitat soils, i. e. the surface and rocky gully soils, as evaluation units for the construction of karst mountain soil quality evaluation system. 16 indexes were selected from 29 indexes using the canonical correspondence analysis, and the soil quality was discussed by using the comprehensive evaluation method of factor analysis. The results showed that, in the process of vegetation degradation in karst forest, using weighting calculation with the areas of the said two microhabitats to obtain the soil quality synthesis score can more accurately reflect the changes of soil quality due to the vegetation degradation at various phases; and these changes can be specifically divided into 3 phases. During these phases, the concentrations of soil active organic carbon, available N, available P, available K, available Mn, available S and urease all significantly decreased, while the available Fe, sucrase and clay contents significantly increased. In Phase I with vegetation represented by original-secondary forest, no significant difference was found in soil indicators between the sample plots. In Phase II (as represented by shrub wood), the contents of soil active organic carbon, available N, available P, available K, available S and urease and the content of available Mn respectively decreased by 33.73%, 22.41%, 57.66%, 37.72%, 44.59%, 46.57% and 12.52% in average, compared to those of Phase I; and the sucrase activity and soil clay content respectively increased by 81.38% and 47.69% in average. In Phase III (as scrub-grassland soil), the concentrations of soil available P, urease and alkaline phosphatase and available Mn decreased by 42.82%, 44.42%, 28.45% and 20.55%, respectively, compared to Phase II; the content of soil available Fe and clay content respectively increased by 56.40% and 57.49% in average. In this phase, the contents of soil available P and available K become very scarce, which leads to significant decrease of the soil quality.

Key words karst mountain area, vegetation degradation, microhabitat, soil quality deterioration, canonical correspondence analysis, factor analysis, evaluation

(编辑 吴华英)