

## 滇中东部典型岩溶区农田土壤肥力评价<sup>①</sup>

范茂攀<sup>1</sup>, 周 锋<sup>2</sup>, 吴开贤<sup>2</sup>, 安瞳昕<sup>2</sup>, 吴伯志<sup>2\*</sup>

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2 云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

**摘 要:** 云南省岩溶面积分布广, 评价云南不同县域土壤肥力, 可为岩溶区土壤资源的利用、改良和农业生产布局提供基础。通过对滇中、滇东岩溶区宣威、石林和砚山农耕地土壤及其剖面调查, 采集土壤样品 248 份, 测定土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质和 pH, 采用主成分分析(PCA)法对研究区土壤肥力进行综合评价。结果表明: 宣威、石林、砚山土壤 5 项指标属中等变异程度, 土壤剖面 AB 层与 A 层(A1 和 A2)土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量差异显著, AB 层和 B 层土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量差异不显著。通过主成分分析法提取出 3 个主成分, 反映了原信息量的 82.954%, 第一主成分以有机质和全氮贡献最大, 第二主成分以有效磷贡献最大, 第三主成分以速效钾贡献最大, 土壤肥力综合得分为宣威(0.231)>石林(-0.289)>砚山(-0.335)。这一结果可为岩溶区土壤养分调控和发展高原特色农业提供参考依据。

**关键词:** 岩溶区; 土壤养分; 土壤剖面; 空间变异; 主成分分析

中图分类号: S158 文献标识码: A

大陆岩石的化学风化作用在碳酸盐岩地区称为岩溶作用<sup>[1]</sup>。云南岩溶地貌分布面积 110 875.7 km<sup>2</sup>, 占全省面积的 28.14%<sup>[2-3]</sup>。由于受自然因素和人为因素的影响, 土壤具有高度的空间异质性<sup>[4]</sup>, 在特定的研究区域内, 人类活动的干扰和小尺度生态环境变化将影响土壤养分含量<sup>[5]</sup>。岩溶区不同的土地利用对土壤基本特性产生显著影响, 其中常绿阔叶林土壤质量最优, 耕地土壤质量最低, 退耕地土壤质量得到部分恢复<sup>[6]</sup>。不同土地利用变化对土壤性质影响不同, 林地、未利用地转变为旱耕地后, 碳酸盐岩地层中土壤的有机质、全氮、全磷等指标降低的量和降低幅度明显大于砂页岩地层中土壤相应指标<sup>[7]</sup>。耕作和收获对土壤环境的长期作用, 降低了土壤有机质, 改变了土壤结构, 使土壤更易板结, 降低了养分有效性和抗旱能力<sup>[8]</sup>。合理的土地利用可以改善土壤结构, 提高土壤质量; 不合理的土地利用会增加土壤侵蚀, 导致土壤质量下降<sup>[9]</sup>。岩溶区农耕地长期耕种后土壤肥力显著下降, 粮食产量对化肥的依赖性增强<sup>[10]</sup>。很多学者基于主成分分析法选取土壤养分指标评价农田土壤肥力<sup>[11-15]</sup>, 而针对岩溶区不同区域农田土壤养分评价鲜见报道。因此, 开展岩溶区土壤养分综合评价对

岩溶区土壤养分调控和农业生产发展具有重要的理论意义和实用价值。

云南省 128 个县(市、区)中 117 个有岩溶地貌分布。岩溶区人口密度大, 耕地比重高, 土壤肥力低下, 广种薄收, >15° 的坡耕地面积占耕地总面积的 41.82%, 低产田占 64.67%, 人均耕地均低于全省平均水平<sup>[16]</sup>。滇东是云南岩溶地貌分布最集中的区域, 包括昆明、昭通、曲靖、玉溪、红河、文山等 6 个州市, 48 个县有岩溶地貌分布, 占全省岩溶县总数的 75% 以上<sup>[17]</sup>。本文选取滇东岩溶区 3 个县(市)代表滇东区: 宣威位于滇东北, 宣威岩溶面积占土地总面积的 56.8%, 选取宣威代表曲靖和昭通; 石林位于滇中, 岩溶面积占土地总面积的 47.1%, 选取石林代表昆明和玉溪; 砚山位于滇东南, 岩溶面积占土地总面积的 67.4%, 选取砚山代表红河和文山。3 个县均是有农业的岩溶县, 为滇中东部岩溶区典型代表区域。对 3 个县取样进行农耕地土壤及土壤剖面调查, 分析评价不同区域土壤养分状况, 以期针对不同区域采取不同的培肥措施, 提升地力, 增加农作物产量和品质, 改善生态环境, 加快岩溶区脱贫攻坚步伐。

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503119)和国家自然科学基金项目(41661063, 41461059)资助。

\* 通讯作者(bozhiwu@outlook.com)

作者简介: 范茂攀(1977—), 男, 云南宣威人, 博士, 副教授, 主要从事土壤培肥与水土保持方面的工作。E-mail: mpfan@126.com

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

调查区为云南省典型的岩溶区,石林位于云南省中东部,103°10′~103°40′E,24°30′~25°03′N,年平均气温 17.2℃,年平均降雨量为 1 069.4 mm;宣威位于云南省东北部,103°35′~104°40′E,25°53′~26°44′N,年平均气温 14.9℃,年平均降雨量为 997.2 mm;砚山位于云南省东南部,103°35′~104°45′E,23°18′~23°59′N,年平均气温 17.1℃,年平均降雨量为 1 255.0 mm<sup>[18]</sup>。

### 1.2 样品采集及分析方法

采集岩溶区农田土壤 根据主要农作物种植和分布地点的代表性进行采样,作物覆盖水稻、玉米、马铃薯、烤烟等主要农作物,分布地点覆盖各县(市)所有乡镇,采用“S”形采样法采集耕作层土壤样品,每份样品采集 5 个点进行混合。农作物播种面积,石林为 3.35×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,宣威为 19.06×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,砚山为 6.88×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup><sup>[18]</sup>。依据农作物播种面积,每份土样代表相应区域面积,宣威采集土壤样品 144 份,石林采集土壤样品 36 份,砚山采集土壤样品 68 份。土壤剖面观察选择在宣威、石林和砚山项目试验示范基地进行,沿坡向挖掘土壤剖面(长 2 m,宽 1 m,深 1.5 m),分别在上坡、中坡、下坡各挖掘 1 个土壤剖面,采用常规方法划分土壤层次,采集各层土壤(约 500 g)带回实验室进行分析测定。

土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法,全氮含量测定采用凯氏法,有效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提比色法,速效钾含量测定采用醋酸铵火焰光度法,pH 测定采用 pH 计法<sup>[19]</sup>。

数据处理与统计分析采用 SPSS19.0 和 Excel 2010 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 调查区土壤养分含量

由表 1 可知,土壤全氮含量为宣威>石林>砚山,差异显著( $P<0.05$ ),变异系数为 12.6%~13.9%;土壤有效磷含量为石林>宣威>砚山,差异显著( $P<0.05$ ),变异系数为 20.9%~48.7%;土壤速效钾含量为宣威>砚山>石林,宣威显著高于石林、砚山( $P<0.05$ ),变异系数为 14.1%~20.3%;土壤有机质含量为宣威>石林>砚山,宣威显著高于石林、砚山( $P<0.05$ ),变异系数为 8.8%~18.6%;土壤 pH 为砚山>宣威>石林,砚山显著高于石林( $P<0.05$ ),变异系数为 5.7%~6.1%。

土壤特征空间变异性的 大小通常用变异系数(CV)来表示,CV 10% 为小变异,10%<CV<100% 为中等变异,CV 100% 为大变异<sup>[20]</sup>。石林、宣威、砚山的土壤全氮、有效磷、速效钾含量均属中等变异程度,石林、宣威和砚山的土壤 pH、砚山土壤有机质含量的 CV<10%,变异性小,宣威、石林的土壤有机质含量属中等变异程度。

表 1 调查区土壤养分含量  
Table 1 Soil nutrient contents in investigation regions

调查区	样品数	全氮(g/kg)	有效磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , mg/kg)	速效钾(K <sub>2</sub> O, mg/kg)	有机质(g/kg)	pH
石林	36	1.83 ± 0.25 b	23.69 ± 4.95 a	118.67 ± 20.85 b	29.58 ± 5.51 b	6.08 ± 0.55 b
宣威	144	1.94 ± 0.27 a	16.89 ± 8.23 b	141.16 ± 28.69 a	35.14 ± 5.74 a	6.19 ± 0.44 ab
砚山	68	1.67 ± 0.21 c	10.26 ± 3.30 c	122.75 ± 17.33 b	27.54 ± 2.42 b	6.31 ± 0.36 a

注:表中 小写字母不同表示调查区间差异达到  $P<0.05$  显著水平。

### 2.2 调查区土壤养分分级评价

采用第二次全国土壤普查土壤养分分级指标进行评价(表 2),结合当前生产,六级指标中将三级定为中等<sup>[21]</sup>,分别对宣威、石林和砚山的土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾进行分级,结果见表 3。宣威土壤有机质含量主要分布为二、三级水平,分别占 33.3% 和 25.7%;石林主要分布为三级水平,占 61.1%;砚山主要分布为三级水平,占 86.6%。宣威土壤有机质含量整体属于中上水平,石林、砚山属于中等水平。宣威土壤全氮含量主要分布为一、二级水平,分别占 31.3% 和 47.9%;石林主要分布为一、

二级水平,分别占 22.2% 和 66.7%;砚山主要分布为二、三级水平,分别占 70.6% 和 20.6%。宣威、石林土壤全氮含量整体属于上等水平,砚山属于中上水平。宣威土壤有效磷含量主要分布为三级水平,占 89.6%;石林主要分布为二、三级水平,分别占 75.0% 和 25.0%;砚山主要分布为三、四级水平,分别占 39.7% 和 57.4%。宣威土壤速效磷含量整体属于中等水平,石林属于中上水平,砚山属于中下水平。宣威土壤速效钾含量主要分布为二、三级水平,分别占 27.1% 和 67.4%;石林主要分布为三、四级水平,分别占 75.0% 和 16.7%;砚山主要分布为三级水平,占 85.3%。宣

表 2 全国第二次土壤普查土壤养分分级标准  
Table 2 Classification standard of soil nutrients in 2<sup>nd</sup> national soil survey

分级	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	备注
	>40	>2	>40	>200	很高
	30~40	1.5~2	20~40	150~200	高
	20~30	1~1.5	10~20	100~150	中等
	10~20	0.75~1	5~10	50~100	低
	6~10	0.5~0.75	3~5	30~50	很低
	<6	<0.5	<3	<30	极低

威、石林、砚山土壤速效钾含量整体属于中等水平。

### 2.3 调查区土壤养分综合评价

为综合评价土壤养分，应用 SPSS19.0 统计软件

对 3 个调查区土壤的 5 个养分指标进行主成分分析，明确各养分指标的相对重要性。利用 Bartlett 进行球形度检验( $P=0.00$ )，其中 KMO 检验值为 0.707，可以对原始数据进行主成分分析。

**2.3.1 指标间相关性检验** 在进行主成分分析时，首先对土壤全氮( $X_1$ )、有效磷( $X_2$ )、速效钾( $X_3$ )、有机质( $X_4$ )和 pH( $X_5$ )5 个指标进行相关性检验(表 4)，结果显示，土壤 pH 与全氮、有机质之间相关性不显著；有效磷与速效钾、有机质，有效磷与 pH 之间均呈显著正相关( $P<0.05$ )；全氮与有效磷、速效钾、有机质，有效磷与 pH，速效钾与有机质之间均呈极显著正相关( $P<0.01$ )，符合因子分析的前提条件。其中，相关性最高的是全氮与有机质，其相关系数为 0.748。

表 3 调查区土壤养分等级划分状况  
Table 3 Classification of soil nutrient contents in investigation regions

调查区	分级	有机质		全氮		有效磷		速效钾	
		含量(g/kg)	占比总样本(%)	含量(g/kg)	占比总样本(%)	含量(mg/kg)	占比总样本(%)	含量(mg/kg)	占比总样本(%)
宣威 (n=144)		43.60	20.1	2.19	31.3	54.27	3.5	208.70	5.6
		36.03	33.3	1.78	47.9	27.80	6.9	169.95	27.1
		27.68	25.7	1.45	20.8	14.61	89.6	124.02	67.4
		18.63	20.8	-	-	-	-	-	-
石林 (n=36)		41.65	5.6	2.19	22.2	-	-	-	-
		34.02	33.3	1.78	66.7	25.56	75.0	156.36	8.3
		26.06	61.1	1.43	11.1	18.08	25.0	121.01	75.0
		-	-	-	-	-	-	89.31	16.7
砚山 (n=68)		-	-	2.17	8.8	-	-	-	-
		32.09	13.2	1.69	70.6	23.66	1.5	153.49	7.4
		26.85	86.8	1.43	20.6	13.00	39.7	122.66	85.3
		-	-	-	-	8.17	57.4	92.96	7.4

表 4 各指标相关系数矩阵  
Table 4 Correlation coefficients matrix of soil indexes

	全氮( $X_1$ )	有效磷( $X_2$ )	速效钾( $X_3$ )	有机质( $X_4$ )	pH( $X_5$ )
全氮( $X_1$ )	1	0.187**	0.182**	0.748**	-0.042
有效磷( $X_2$ )		1	-0.156*	0.161*	0.212**
速效钾( $X_3$ )			1	0.265**	0.155*
有机质( $X_4$ )				1	0.046
pH( $X_5$ )					1

注：表中\*、\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  水平显著相关。

**2.3.2 土壤养分主成分提取** 标准化处理 5 项养分指标，利用主成分分析计算各主成分的特征值和贡

献率(表 5)。特征值表示主成分影响力度大小，特征值 $>1$  作为主成分个数的提取原则。由表 5 可知，本研究第 1 主成分(PC1)特征值为 1.884，第 2 主成分(PC2)特征值为 1.221，第 3 主成分(PC3)特征值为 1.043。3 个主成分的方差贡献率分别为 37.671%、24.426% 和 20.858%，累积贡献率达到 82.954%，表明 3 个主成分涵盖了原始数据信息总量的 82.954%，3 个主成分信息足以代表原始数据信息。因此，将 3 个主成分作为综合变量来评价 3 个区域的土壤养分状况。其中，第 1 主成分有机质和全氮主成分载荷相对较高，主成分载荷分别为 0.924 和 0.887，说明第 1 主成分是有有机质和全氮的综合反映；第 2 主成分是有

效磷主成分载荷最高,达到了 0.825,说明第 2 主成分反映了农耕区有效磷含量对土壤养分的供给状况;第 3 主成分中速效钾主成分载荷最高,为 0.695,说明第 3 主成分是对土壤速效钾供给的描述。从 3 个主成分的方差贡献率和特征值来看,评价土壤肥力的影响力为主成分 1(PC1)>主成分 2(PC2)>主成分 3(PC3)。

表 5 主成分特征向量及累积贡献  
Table 5 Eigenvectors and cumulative contribution rates of principal components

项目	主成分		
	PC1	PC2	PC3
全氮	0.887	-0.091	-0.243
有效磷	0.204	0.825	-0.234
速效钾	0.436	-0.356	0.695
有机质	0.924	0.000	-0.119
pH	0.107	0.637	0.657
特征值	1.884	1.221	1.043
贡献率(%)	37.671	24.426	20.858
累积贡献率(%)	37.671	62.097	82.954

2.3.3 主成分得分和综合得分 对选取的 3 个主成分进行载荷值旋转计算,分析所得的各变量在相应主成分上的因子负荷,可得主成分得分系数矩阵(表 6),可分别获得各主成分的函数表达式: $F_1 = 0.513X_1 + 0.149X_2 + 0.072X_3 + 0.504X_4 - 0.100X_5$ ,  $F_2 = -0.128X_1 + 0.371X_2 + 0.258X_3 + 0.008X_4 + 0.806X_5$ ,  $F_3 = -0.040X_1 - 0.599X_2 + 0.715X_3 - 0.001X_4 + 0.112X_5$ ,将标准化处理的 5 项养分指标数据代入上述 3 个公式,可得 3 个调查区土壤养分评价分别在 3 个主成分上的得分(表 7)。再根据  $F = \sum b_j F_j = b_1 F_1 + b_2 F_2 + b_3 F_3 + \dots + b_k F_k$  ( $b$  为贡献率),获得函数表达式: $F_{综} = 0.37671F_1 + 0.24426F_2 + 0.20858F_3$ ,从而求得综合得分  $F_{综}$ (表 7)。对各主成分进行排名,第 1 主成分(PC1)得分(F1)和第 2 主成分(PC2)得分(F2)为宣威>石林>砚山,第 3 主成分(PC3)得分(F3)为砚山>宣威>石林,由于第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2)的贡献率大于第 3 主成分(PC3),综合得分为宣威(0.231)>石林(-0.289)>砚山(-0.335)。因此对于选取评价的 5 项养分指标作为土壤肥力状况,3 个县的土壤肥力则为宣威>石林>砚山。

## 2.4 调查区土壤剖面养分特征

选取岩溶区典型的坡耕地红壤进行剖面观察,结果显示土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量随土壤剖面深度的增加而减少(表 8),土壤 pH 随着剖面深度的增加而降低。在土壤剖面的 A1 和 A2 层,宣

表 6 主成分得分系数矩阵  
Table 6 Matrix of principal component score coefficients

主成分	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
PC1	0.513	0.149	0.072	0.504	-0.100
PC2	-0.128	0.371	0.258	0.008	0.806
PC3	-0.040	-0.599	0.715	-0.001	0.112

表 7 不同区域土壤养分主成分得分及综合得分  
Table 7 Scores and comprehensive scores of soil nutrient principal components in different regions

调查区	F1		F2		F3		综合	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
石林	-0.224	2	-0.004	2	-0.978	3	-0.289	2
宣威	0.501	1	0.049	1	0.141	2	0.231	1
砚山	-0.943	3	-0.102	3	0.218	1	-0.335	3

威、石林和砚山的土壤有效磷、速效钾含量差异显著( $P < 0.05$ ),全氮含量差异不显著;有机质含量在宣威为差异显著,而在石林和砚山为差异不显著。在土壤剖面 A1、A2 与 AB、B 层,宣威、石林、砚山的土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量均为差异显著( $P < 0.05$ )。在土壤剖面 AB 和 B 层,宣威、石林、砚山的土壤全氮、有效磷、速效钾含量均为差异不显著,有机质含量在宣威为差异显著( $P < 0.05$ ),在石林和砚山为差异不显著。在土壤剖面 A1、A2、AB、B 层,宣威、石林和砚山土壤 pH 均为差异不显著。因此,在土壤剖面 AB 层与 A 层(A1 和 A2)土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量显著下降,而在土壤剖面 AB 层以下、AB 层和 B 层土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量变化较小,趋于稳定。

从土壤剖面土层深度来看(表 8),坡耕地 A1 层即耕作层,宣威和石林大于砚山,而 AB 层以上的深度,则为砚山大于宣威和石林,土层厚而耕层浅在砚山表现更突出。

## 3 讨论

农田土壤在被人们长期利用的过程中,由于耕作、施肥、种植不同农作物等因素的影响,农田土壤养分呈现出一定的空间变异性。测土配方施肥时,既要考虑农田的平均养分含量,也要考虑土壤养分的空间变异性<sup>[22]</sup>。调查分析农田土壤的空间变异性对土壤养分的管理和合理施肥起关键作用。本文通过对云南典型岩溶区 3 个县(市)农田土壤养分调查,发现石林、宣威、砚山的土壤全氮、有效磷、速效钾均属中等变异程度,宣威、石林的土壤有机质属中等变异程度。大比例尺下,土壤养分空间变异较小,中小比

表 8 调查区典型土壤剖面养分  
Table 8 Nutrients in different layers of farmland profiles in typical areas of investigation

调查区	土层	深度(cm)	全氮(g/kg)	有效磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , mg/kg)	速效钾(K <sub>2</sub> O, mg/kg)	有机质(g/kg)	pH
宣威	A1	0~19.5	1.67 ± 0.06 a	94.56 ± 8.05 a	112.00 ± 46.50 a	35.71 ± 0.14 a	6.26 ± 0.22 a
	A2	19.5~34	1.03 ± 0.15 a	12.47 ± 0.79 b	65.90 ± 8.40 b	24.46 ± 0.35 b	6.25 ± 0.01 a
	AB	34~55	0.60 ± 0.10 b	6.48 ± 1.86 c	41.90 ± 18.20 c	11.24 ± 2.48 c	6.09 ± 0.11 a
	B	>55	0.53 ± 0.06 b	5.65 ± 0.44 c	34.13 ± 10.87 c	6.99 ± 2.95 d	6.13 ± 0.29 a
石林	A1	0~20.5	0.73 ± 0.35 a	15.91 ± 13.85 a	58.23 ± 10.37 a	12.28 ± 8.27 a	5.57 ± 0.17 a
	A2	20.5~38	0.70 ± 0.20 a	8.84 ± 5.21 b	37.00 ± 0.40 b	12.07 ± 3.71 a	5.44 ± 0.01 a
	AB	38~57	0.30 ± 0.01 b	2.16 ± 0.10 c	31.35 ± 2.45 c	4.91 ± 0.13 b	5.27 ± 0.15 a
	B	>57	0.30 ± 0.01 b	2.11 ± 0.05 c	31.80 ± 4.70 c	3.88 ± 0.12 b	5.29 ± 0.38 a
砚山	A1	0~16	1.20 ± 0.10 a	14.63 ± 2.56 a	132.20 ± 10.10 a	26.26 ± 3.36 a	5.79 ± 0.23 a
	A2	16~32	1.10 ± 0.10 a	12.27 ± 4.13 b	64.35 ± 20.25 b	25.14 ± 1.69 a	5.77 ± 0.19 a
	AB	32~65	0.50 ± 0.01 b	2.06 ± 0.39 c	29.20 ± 0.90 c	6.94 ± 1.46 b	5.55 ± 0.06 a
	B	>65	0.40 ± 0.01 b	1.96 ± 0.09 c	26.45 ± 1.05 c	4.94 ± 0.38 b	4.98 ± 0.23 a

注：表中小写字母不同表示相同调查区不同土壤剖面层间差异达  $P < 0.05$  显著水平。

例尺下，空间变异增加<sup>[23]</sup>。齐雁冰等<sup>[24]</sup>及陶睿等<sup>[25]</sup>对县域农田土壤养分空间变异研究，发现各土壤养分均存在中等强度空间变异。而不同作物种植、不同生态区土壤也表现中等空间变异<sup>[11-14,26]</sup>。

人类对土壤资源的不合理利用，加剧了土壤的退化<sup>[27]</sup>。岩溶地区土层浅薄，土壤总量少，水土流失严重，人为活动将会加剧水土流失而使土壤肥力下降<sup>[28]</sup>。通过评价土壤肥力，可有效地指导不同区域农田的利用和施肥<sup>[29-30]</sup>。目前，我国常用综合评价法中的指数法对土壤质量进行评价，建立各个元素的评价标准，利用简单乘法运算计算出土壤质量的大小，其中主成分分析法可简化因子，具有较好的准确性<sup>[31]</sup>。很多学者采用主成分分析法，对土壤肥力进行综合评价<sup>[11-15,32-34]</sup>。黄婷等<sup>[12]</sup>通过比较两种不同的方法计算土壤综合质量指数，发现利用主成分分析法进行土壤质量综合评价是客观可行的。本文利用主成分分析法选取土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾和 pH 五个指标对石林、宣威和砚山的土壤进行评价，综合得分为宣威(0.231) > 石林(-0.289) > 砚山(-0.335)。因此，对于选取评价的 5 项养分指标作为土壤肥力状况，3 个县的土壤肥力则为宣威 > 石林 > 砚山。综合得分结果与 3 个区域的年平均降雨量(砚山 > 石林 > 宣威)相反，降雨量大的县区综合得分低，降雨量小的县区综合得分高，充分反映了评价结果的客观性。

调查区土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量等均随土壤剖面深度的增加而减少，这与前人研究结果相一致<sup>[35-37]</sup>。在土壤剖面的 A1 和 A2 层，宣威、石林和砚山的土壤有效磷、速效钾含量为差异显著 ( $P < 0.05$ )；在土壤剖面 A1、A2 与 AB、B 层，宣威、

石林、砚山的全氮、有效磷、速效钾、有机质含量均为差异显著 ( $P < 0.05$ )；在土壤剖面 AB 层与 A 层(A1 和 A2)，土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量显著下降，而土壤剖面 AB 层以下、AB 层和 B 层的土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质含量变化较小，趋于稳定。主要是 A(A1 和 A2)层受人为耕作和施肥等影响，而 AB 层受到作物根系的影响，AB 层以下受人为因素和作物根系影响很小，从而养分变化较小。

有学者依据第二次全国土壤普查土壤养分分级指标进行土壤养分含量等级分类<sup>[21,35-36]</sup>，据此标准，本研究 3 个调查区的土壤有机质宣威为中上水平，石林、砚山为中等水平，主要是宣威在很多区域轮作绿肥，从而提高有机质含量。近年来，大量化学氮肥的使用，使调查区土壤全氮上升为中上水平以上，而有效磷在宣威、石林和砚山分别为中等、中上和中等下水平，有效钾含量均为中等水平。这是因为在当前生产中磷钾肥的增产作用不如氮肥明显<sup>[21,35,36]</sup>，从而导致农户过度注重氮肥施用，轻视磷钾肥施用。针对滇东典型岩溶区土壤养分调查情况，岩溶区要充分挖掘养分资源，促进养分资源循环利用，减少对化肥的依赖<sup>[39]</sup>，建议通过秸秆还田、畜禽粪便无害化和轮作制度等提高农田有机养分投入比例，稳步提升土壤肥力。近年来，由于农民为了获得高产，盲目过量施肥现象普遍，特别是氮肥的施用，从而导致肥料利用率低下。宣威、石林和砚山应根据土壤肥力调整养分比例，采取“控氮增磷补钾”的土壤养分管理措施，有针对性地开发与作物需求相匹配的专用肥、与农学措施结合的套餐肥等，简化施肥技术，多途径提高肥料利用率。

## 4 结论

1) 调查区石林、宣威、砚山的土壤全氮、有效磷、速效钾含量均属中等程度变异,石林、宣威和砚山的土壤 pH 及砚山土壤有机质的变异系数小于 10%, 变异性小, 宣威、石林的土壤有机质属中等程度变异。

2) 通过主成分分析法提取出 3 个主成分, 反映了原信息量的 82.954%, 第一主成分以有机质和全氮贡献最大, 第二主成分以有效磷贡献最大, 第三主成分以速效钾贡献最大, 土壤肥力综合得分为宣威(0.231)>石林(-0.289)>砚山(-0.335)。

3) 宣威和石林的耕作层大于砚山, 而 AB 层以上的深度, 则表现为砚山大于宣威和石林。土壤剖面 AB 层与 A 层(A1 和 A2)土壤全氮、有效磷、速效钾及有机质含量差异显著, AB 层和 B 层的土壤全氮、有效磷、速效钾及有机质含量差异不显著。

4) 滇中东部 3 个典型岩溶区土壤有机质含量中等, 要充分挖掘养分资源, 提高有机肥的施用比例。且应根据土壤肥力调整养分比例, 采取“控氮增磷补钾”的土壤养分管理措施。

### 参考文献:

- [1] 袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应[J]. 第四纪研究, 2001, 21(3): 223-232
- [2] 王宇, 杨世瑜, 袁道先. 云南岩溶石漠化状况及治理规划要点[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 206-211
- [3] 王明伟, 许浒. 云南岩溶山区生态环境地质问题与可持续发展研究综述[J]. 生态经济, 2014, 30(9): 185-187
- [4] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review[J]. Catena, 1998, 32(3): 155-172
- [5] Lin H S, Wheeler D, Bell J, et al. Assessment of soil spatial variability at multiple scales[J]. Ecological Modelling, 2005, 182: 271-290
- [6] 张文晖, 傅瓦利, 张洪, 等. 岩溶山区不同土地利用方式对石灰土基本特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(3): 16-21
- [7] 蒋勇军, 袁道先, 章程, 等. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响——以云南小江流域为例[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 751-760
- [8] Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, et al. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development[J]. Nature, 1999, 397(6719): 491-497
- [9] Warkentin B P. The change concept of soil quality[J]. Soil Water Conservation, 1995, 50: 226-228
- [10] 周游游. 农业活动与岩溶山区土地利用的可持续性探讨[J]. 地理科学, 2000, 20(5): 431-436
- [11] 黄安, 杨联安, 杜挺, 等. 基于主成分分析的土壤养分综合评价[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 819-825
- [12] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141-147, 187
- [13] 赵月玲, 林玉玲, 曹丽英, 等. 基于主成分分析和聚类分析的土壤养分特性研究[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(4): 484-488
- [14] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180
- [15] 姚荣江, 杨劲松, 曲长凤, 等. 海涂围垦区土壤质量综合评价的指标体系研究[J]. 土壤, 2013, 45(1): 159-165
- [16] 吴永常, 等著. 生存·生态·草畜·致富——云南省岩溶地区发展战略[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 1-14, 136-137
- [17] 董恒秋. 岩溶贫困地区生态保护与重建的成功探索[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2005: 3-10
- [18] 李赅. 云南统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社, 2016
- [19] 鲍士旦主编. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [20] 宋莎, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. 土壤, 2011, 43(1): 44-49
- [21] 熊艳, 王平华, 何晓滨, 等. 云南省水稻土壤养分丰缺指标及肥料利用率研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 930-934
- [22] 白由路, 金继运, 杨俐苹, 等. 农田土壤养分变异与施肥推荐[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 129-133
- [23] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 等. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J]. 土壤, 2004, 36(4): 376-381
- [24] 齐雁冰, 常庆瑞, 刘梦云, 等. 县域农田土壤养分空间变异及合理样点数确定[J]. 土壤通报, 2014(3): 556-561
- [25] 陶睿, 王子芳, 高明, 等. 重庆市丰都县紫色土养分空间变异及土壤肥力评价[J]. 土壤, 2017, 49(1): 155-161.
- [26] 常乃杰, 张云贵, 李志宏, 等. 云南玉溪植烟土壤速效养分空间变异特征及应用[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 7-13
- [27] Parr J F, Papendick R I, Hornick S B, et al. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture[J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7(1/2): 5-11
- [28] 邓菊芬, 崔阁英, 王跃东, 等. 云南岩溶区的石漠化与综合治理[J]. 草业科学, 2009, 26(2): 33-38
- [29] 戴士祥, 任文杰, 滕应, 等. 安徽省主要水稻土基本理化性质及肥力综合评价[J]. 土壤, 2018, 50(1): 66-72
- [30] 梁斌, 齐实. 北京山区土壤养分空间变化特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 769-777
- [31] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137-143
- [32] 王政, 张晓龙, 敖金成, 等. 文山市不同生态区土壤养分的时空异质性及适宜性[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(6): 37-42
- [33] 樊亚男, 姚利鹏, 瞿明凯, 等. 基于产量的稻田肥力质量评价及障碍因子区划——以进贤县为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1157-1169

- [34] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 247–257
- [35] 刘威, 黄丽, 鲁剑巍, 等. 两种保护性耕作对土壤养分、结构和产量的影响[J]. 土壤通报, 2015 (2): 420–427
- [36] 陆安祥, 赵云龙, 王纪华, 等. 不同土地利用类型下氮、磷在土壤剖面中的分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3923–3929
- [37] 郑杰炳, 王子芳, 谭显龙, 等. 丘陵紫色土区土地利用方式对土壤剖面理化性质影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(3): 101–106
- [38] 徐志强, 代继光, 于向华, 等. 长期定位施肥对作物产量及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 766–769
- [39] 张福锁, 等著. 我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 1–11

## Evaluation of Farmland Fertility of Typical Karst Area in Central and Eastern Yunnan

FAN Maopan<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>2</sup>, WU Kaixian<sup>2</sup>, AN Tongxin<sup>2</sup>, WU Bozhi<sup>2\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;  
2 College of Agriculture and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The karst area is widely distributed in Yunnan Province, the evaluation of farmland fertility in different counties in karst areas can provide scientific bases for the utilization, improvement and agricultural production layout of soil resources. In this study, 248 soil samples were collected from farmland profiles in Xuanwei, Shilin and Yanshan in the karst areas of central and eastern Yunnan, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter and pH of the samples were determined, and then soil fertilities of farmlands were assessed by the principal component analysis (PCA) method. The results showed that the determined five soil indexes were moderately variable in tillage layers in the three regions. Total nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter were significantly different between AB layers and A (A1 and A2) layers, but weren't significantly different between AB layers and B layers. Three principal components were extracted by PCA which reflected 82.954% of the original information. The first principal component was organic matter and total nitrogen, the second one was available phosphorus, the third one was available potassium, the comprehensive scores of soil fertility was in order of Xuanwei (0.231) > Shilin (–0.289) > Yanshan (–0.335). The above results can provide reference for soil nutrient regulation and developing plateau characteristic agriculture in karst areas.

**Key words:** Karst areas; Soil nutrient; Soil profile; Spatial variation; Principal component analysis(PCA)