

岩溶断陷盆地土壤肥力空间异质性及其影响因素

徐 烨¹, 邓 艳¹, 曹建华¹, 蒋忠诚¹, 岳祥飞¹, 朱梓弘^{1,2}

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所/自然资源部 岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室
广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘 要:土壤肥力是反映土壤各方面性质的综合指标,且与地貌、土壤母质等因子密切相关。为了解岩溶断陷盆地表层土壤养分状况,探索地貌和土壤母质对土壤肥力质量的影响,以典型岩溶断陷盆地——云南小江流域为研究对象,运用 ArcGIS 技术,综合统计学和地统计的方法研究了土壤肥力的空间分布状况,并且综合评价了土壤质量。结果表明:小江流域土壤养分较为丰富,土壤养分空间分布存在明显的异质性;不同地貌类型间土壤养分含量无显著差异,不同土壤类型间土壤养分差异较为显著。方差分析结果显示:土壤类型对土壤养分的影响强于地貌类型,二者的交互作用只对速效钾($p < 0.05$)和 pH 值($p < 0.01$)有显著影响。主成分分析表明,不同地貌类型间土壤综合肥力:台地槽谷区>平坝区>峰丛洼地>中山区>岩溶河谷,不同土壤类型间土壤综合肥力:石灰土>水稻土>红壤>紫色土,不同地貌类型和土壤类型间土壤综合肥力差异显著。不同地貌和土壤母质影响着土壤的肥力质量,必须结合土壤的性质和相应环境条件,采取合理、有效的措施,改善土壤结构,提高土壤质量,为提升作物产量打好基础。

关键词:岩溶断陷盆地;地貌;土壤类型;土壤肥力;空间分布

中图分类号:S158.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0355-08

Spatial Heterogeneity of Soil Fertility in Karst Faulted Basin and Its Influencing Factors

XU Ye¹, DENG Yan¹, CAO Jianhua¹, JIANG Zhongcheng¹, YUE Xiangfei¹, ZHU Zihong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Treatment / Karst Dynamics Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS/MNR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Soil fertility is recognized as a comprehensive indicator reflecting soil properties, and is closely related to landform and soil parent material. This article regarded Xiaojiang Basin, Yunnan Province, which is a typical karst faulted basin, as study area to explore the nutrient status of surface soil in karst faulted basin and the influence of landform and soil parent material on it. Distribution of surface soil nutrients of cultivated lands and comprehensive evaluation of soil quality were investigated by using ArcGIS technology, statistical and geostatistical methods. The soil nutrients were abundant, and spatial heterogeneity of those was obvious. The difference in soil nutrient among landform types was not significant, while it among different soil types was significant. Variance analysis showed that soil types had stronger effect on soil fertility than landforms, and the interaction between the soil type and landform had significant effects on AK ($p < 0.05$) and pH value ($p < 0.01$). The comprehensive soil fertility among different landforms decreased in the order: karst platform and valley region > deposition plain region > peak cluster-depression region > karst mountain region > karst canyon region, and it among soil types decreased in the order: lime soil > paddy soil > red soil > purple soil. Landforms and soil parent material affect the soil fertility seriously, which means that it is necessary to take reasonable and effective measures to improve soil structure and soil quality depending on soil properties and corresponding environmental conditions.

Keywords: karst faulted basin; landform; soil types; soil fertility; spatial distribution

岩溶断陷盆地是指高原隆升造成的断裂活动引发的断块差异沉陷,加之岩溶侵蚀作用而形成的山间

盆地^[1-2]。我国断陷盆地主要集中分布在滇东—攀西一带,位于珠江、长江中上游,隶属国家“两屏三带”生

态安全屏障区^[3-4]。断陷盆地是我国石漠化综合治理工程重要区,滇东是断陷盆地发育典型、生态脆弱、石漠化最为严重的地区^[4]。岩溶断陷盆地受“盆—山”共存的地质分异背景所控制,地质环境具有环状分带和梯级分区的特征^[2],叠加不同程度的人类活动强度,造成流域内不同区域水土流失、石漠化、生物多样性等生态环境问题在形式、空间尺度、性质和强度都明显不同。如盆底平坝区人口集中,人地矛盾突出,水土污染问题严重^[5];河谷区水土不配套,水土流失强烈,滑坡、泥石流多发^[2];高原到盆地的斜坡地带主要的环境问题是水土流失和石漠化严重^[6]。因此探索断陷盆地地质环境变化规律,开展流域范围内分区生态及经济功能评价,对解决断陷盆地石漠化治理和生态恢复具有重要的理论意义和实用价值。

目前,学者就岩溶断陷盆地进行了大量有意义的探索,主要集中于断陷盆地石漠化演变机制及治理措施^[4,7]、断陷盆地地下水分布和径流特征^[8-10]、断陷盆地环境地质问题及对策^[5,11],但在岩溶断陷盆地土壤肥力空间分布及其影响因子的研究较少。因此,为了解岩溶断陷盆地不同地貌和土壤类型对土壤肥力的影响,正确评价并且高效利用岩溶区稀少的土壤资源,本文选取典型断陷盆地——云南小江流域为研究对象,采集小江流域不同地貌区(岩溶中山区、岩溶台地槽谷区、峰丛洼地、沉积平坝、岩溶河谷区)和不同土壤类型(红壤、紫色土、石灰土、水稻土)下的耕地土壤样品,采用主成分分析法、ArcGIS 技术以及方差分析法等,研究土壤肥力空间异质性,并探究其影响因素,以便为小江流域耕地制定科学合理的分区施肥方案,并为选择适宜土壤质地的种植作物提供理论依据,对于实现区域全面协调可持续发展具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

小江流域地处滇东岩溶高原面边缘及河谷斜坡地带,是典型的岩溶断陷盆地。地理坐标为 $103^{\circ}30'—104^{\circ}05'E, 24^{\circ}10'—24^{\circ}45'N$,流域总面积 $1\,009.28\text{ km}^2$ ^[12]。流域呈北东向展布,总体地势东高西低,北高南低(图1)。流域所在区域属于典型的亚热带高原季风气候,气候温和、雨量适中,枯雨季分明。流域多年平均气温 15.2°C ,多年平均降雨量 966.8 mm 。受到地形因素的影响,山区、坝区气候差异显著,整体表现出垂向差异性。从中高山区到盆底平坝区,降雨量逐渐减少,气温逐渐升高^[13]。流域内主要分布的土壤类型有红壤、黄壤、紫色土、石灰土及水稻土,以红壤为主(图1)。

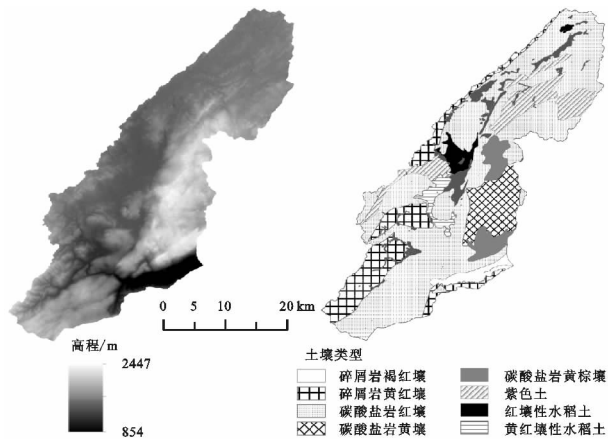


图1 小江流域高程及土壤类型

王宇等^[2]根据地貌形态—成因类型的区间差异,将岩溶断陷盆地划分为侵溶蚀山区、溶蚀丘峰谷地区、沉积平坝区和侵溶蚀河谷区。在此基础上,根据小江流域的地质环境特征,将其地貌分为盆底沉积平坝区、岩溶中山区、岩溶河谷区、岩溶台地槽谷区和岩溶峰丛洼地(图2)。

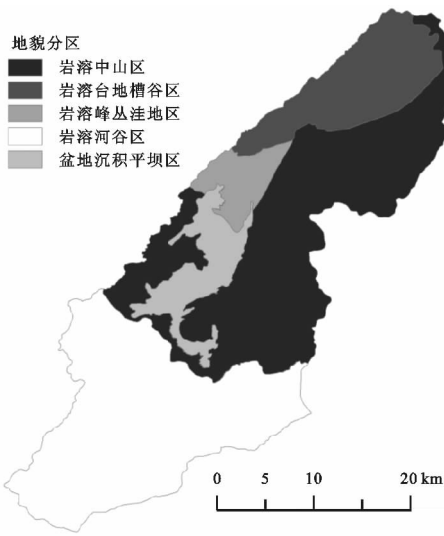


图2 小江流域地貌分区

1.2 样品采集

采用随机取样的方法,按照“以耕地为对象、覆盖主要土壤和地貌类型、空间分布相对均匀”的原则,在不同土壤类型中,取0—20 cm 表层土壤,选取样点 497 个(图3),包含主要土壤类型红壤、石灰土、水稻土和紫色土,覆盖研究区的 5 个主要地貌分区,包括盆底平坝区、岩溶河谷区、台地槽谷区、岩溶中山区和峰丛洼地区。

1.3 土壤理化性质测定

测定土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾 6 个指标。其中 pH 值采用电位法测定,有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定,全氮含量用凯氏法测定,碱解氮使用碱解扩散法测定,有效磷含量用碳酸氢钠提取—钼锑抗显色—紫外分光光度法测定,速效钾含

量使用 NH_4Ac 浸提—火焰光度法测定^[14-15]。

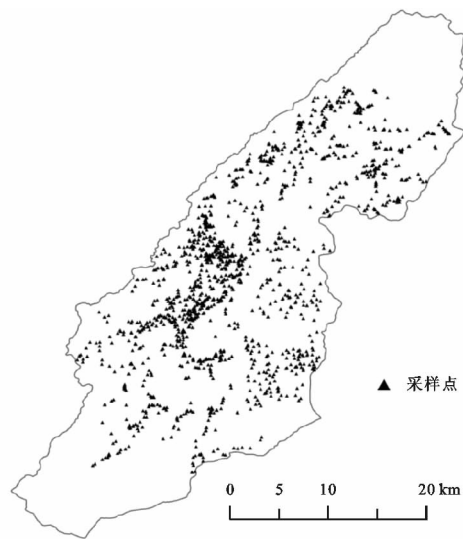


图 3 土壤采样点分布

1.4 统计分析

数据预处理在 Excel 2010 中进行,运用 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行描述性统计分析、方差分析以及主成分分析,利于 ArcGIS 10.3 对土壤养分进行克里金差值分析。

1.5 主成分分析

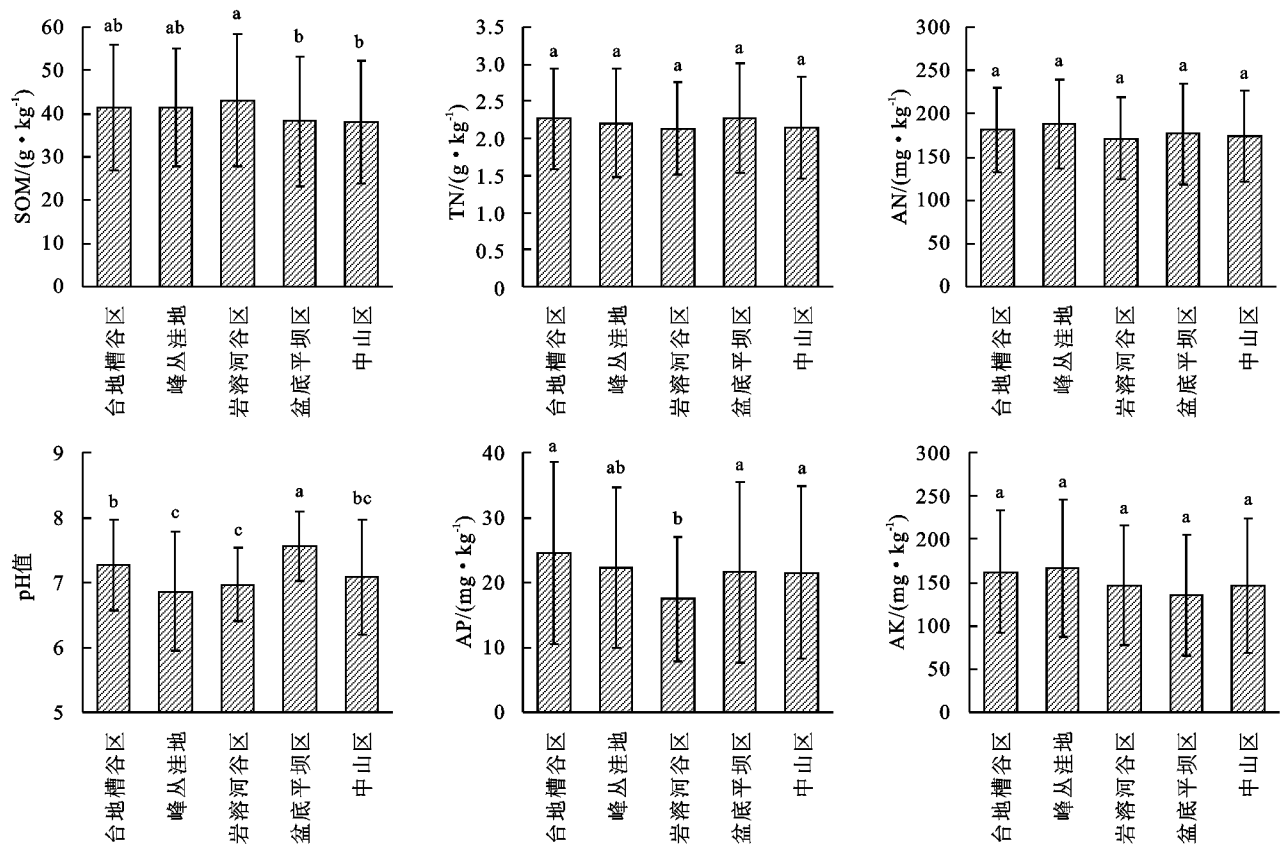
选取土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾 6 种指标作为土壤肥力质量指示因子,利用

SPSS 22.0 中的主成分分析从 6 个相关系数矩阵中提取初始因子,得到各指标的特征根、方差贡献率和累积方差贡献率。累积方差贡献率大于 80%,成分特征根(λ)都大于 1,基本可以反映土壤肥力指标的主要信息^[16],将其提取为主成分。将分析所得的载荷值(即成分矩阵)除以各主成分特征值的开方,从而得到 3 个主成分与原 6 项指标的线性组合的系数,即求得特征向量矩阵^[17],建立土壤肥力综合得分模型。

2 结果与分析

2.1 土壤养分在不同地貌类型间的比较

由图 4 可知,小江流域土壤 pH 值的变化范围在中性偏弱碱性之间,不同地貌类型间差异较为显著($p < 0.05$)。有机质平均含量为 38.00~43.07 g/kg,根据全国第二次土壤普查及养分分级标准,达到 1~2 级养分标准。全氮的平均含量在 2 g/kg 以上,碱解氮的平均含量在 170 mg/kg 以上,二者均达到一级土壤养分标准。有机质含量在不同地貌类型间略有差异,全氮和碱解氮无显著差异。有效磷的平均含量为 17.44~24.44 mg/kg,达到 3 级养分标准,不同地貌间略有差异;速效钾的平均含量达到 2~3 级养分标准,不同地貌间无显著差异。小江流域整体养分含量较高,不同地貌间差异不明显。



注:误差线表示平均值±标准误差,不同标识的小写字母代表同一土壤肥力指标在不同地貌类型间有显著差异($p < 0.05$)。

图 4 土壤肥力指标在地貌类型间的比较

2.2 土壤养分在不同土壤类型间的比较

由图 5 可知,不同土壤类型的土壤 pH 值变化范围为 6.52~7.48,整体呈弱酸性—弱碱性。有机质和碱解氮平均含量的变化顺序在不同土壤类型中相同,即石灰土>水稻土>紫色土>红壤,全氮的平均含量在不同土壤类型中的变化顺序为石灰土>水稻

土>红壤>紫色土,与前者具有相似的规律。不同土壤类型之间土壤有机质、全氮和碱解氮的含量差异明显($p<0.05$),且主要体现在石灰土、水稻土与红壤、紫色土之间。有效磷和速效钾在水稻土中平均含量最低。不同土壤类型间土壤肥力较不同地貌间差异度显著。

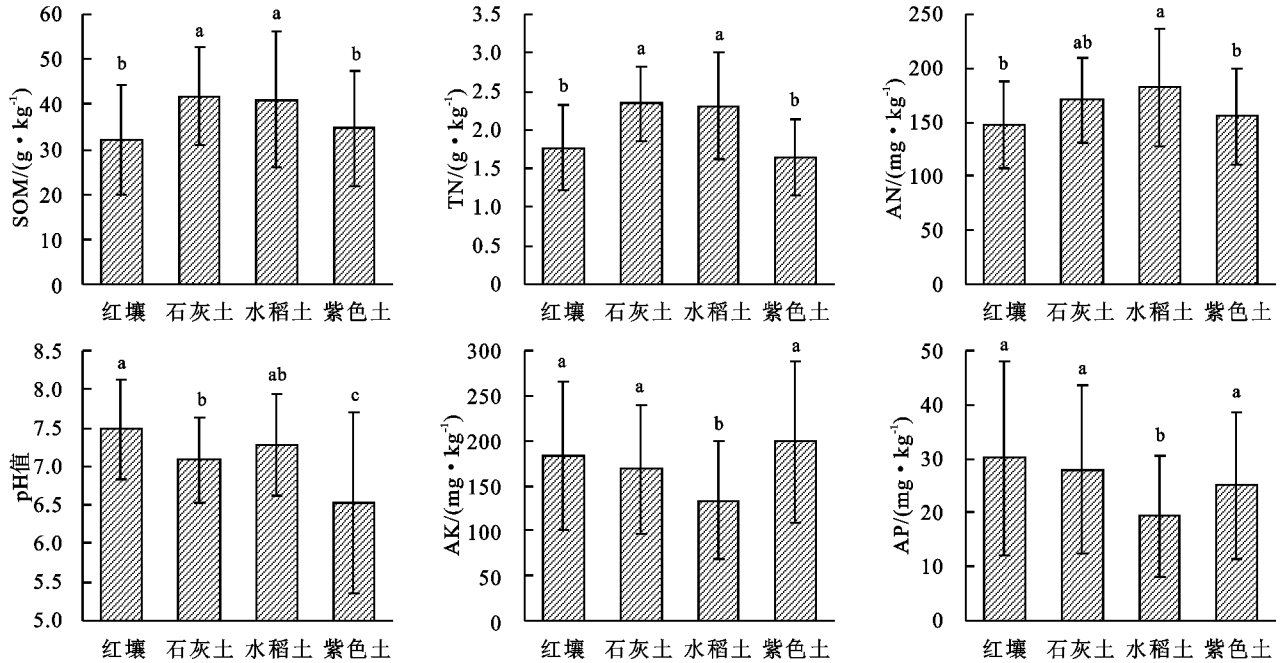


图 5 土壤肥力指标在土壤类型间的比较

2.3 土壤养分的分布

小江流域土壤肥力存在明显的空间异质性(图 6),且具有一定的规律性。土壤有机质、全氮和碱解氮含量分布极为相似。整体表现为,有机质、全氮和碱解氮的高值区主要分布在盆底平坝区和流域东南部的中山区和河谷区交界处;低值区主要分布在流域东北部和西南部的中山区。土壤速效钾的高值区主要分布在流域东北部中山区和台地槽谷区,低值区主要分布在流域东南部的中山区和河谷区,而土壤有效磷的高值区分布在流域北部的台地槽谷区和中部的盆底平坝区,低值区主要分布在流域南部的岩溶河谷区。

2.4 土壤养分的影响因子

由表 1 可知,地貌类型对 6 种土壤肥力指标的影响不显著,这可能是因为研究区频繁且有规律的人为活动,弱化了地貌因子对土壤养分的影响。土壤类型对 pH 值、全氮和碱解氮的影响极为显著($p<0.01$),影响作用大小(F)为 pH 值>全氮>碱解氮;对有机质、有效磷的影响显著($p<0.05$),影响作用大小(F)为有机质>有效磷;对速效钾的影响不显著。地貌类型和土壤类型的交互作用对速效钾的影响显著($p<0.05$),对 pH 值的影响极为显著($p<0.01$),对有机

质、全氮、碱解氮和有效磷的影响不显著。

2.5 土壤综合肥力评价

主成分分析结果(表 2)表明:6 项土壤肥力指标对土壤肥力有不同程度的贡献。6 项指标被分成 3 个主成分。根据主成分计算公式以及表 3 的成分矩阵和特征向量,可以得到 3 个主成分与 6 项土壤肥力指标的线性组合,公式如下:

$$S_1 = 0.086X_1 + 0.565X_2 + 0.608X_3 + 0.541X_4 + 0.009X_5 - 0.109X_6$$

$$S_2 = -0.033X_1 + 0.137X_2 + 0.004X_3 - 0.013X_4 + 0.701X_5 + 0.699X_6$$

$$S_3 = 0.955X_1 - 0.099X_2 + 0.085X_3 - 0.170X_4 + 0.172X_5 - 0.112X_6$$

式中: S_1, S_2, S_3 表示 3 个主成分; $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 分别表示 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾的标准化变量。上述式中系数即特征向量,其绝对值越大,表明土壤肥力指标对主成分的影响越大。由表 3 可知,第一主成分受全氮、有机质和碱解氮的影响较大,第二主成分为速效钾和有效磷,第三主成分中 pH 值所占比重较大^[16-17],表明全氮、有机质和碱解氮是影响土壤肥力的主要因子。

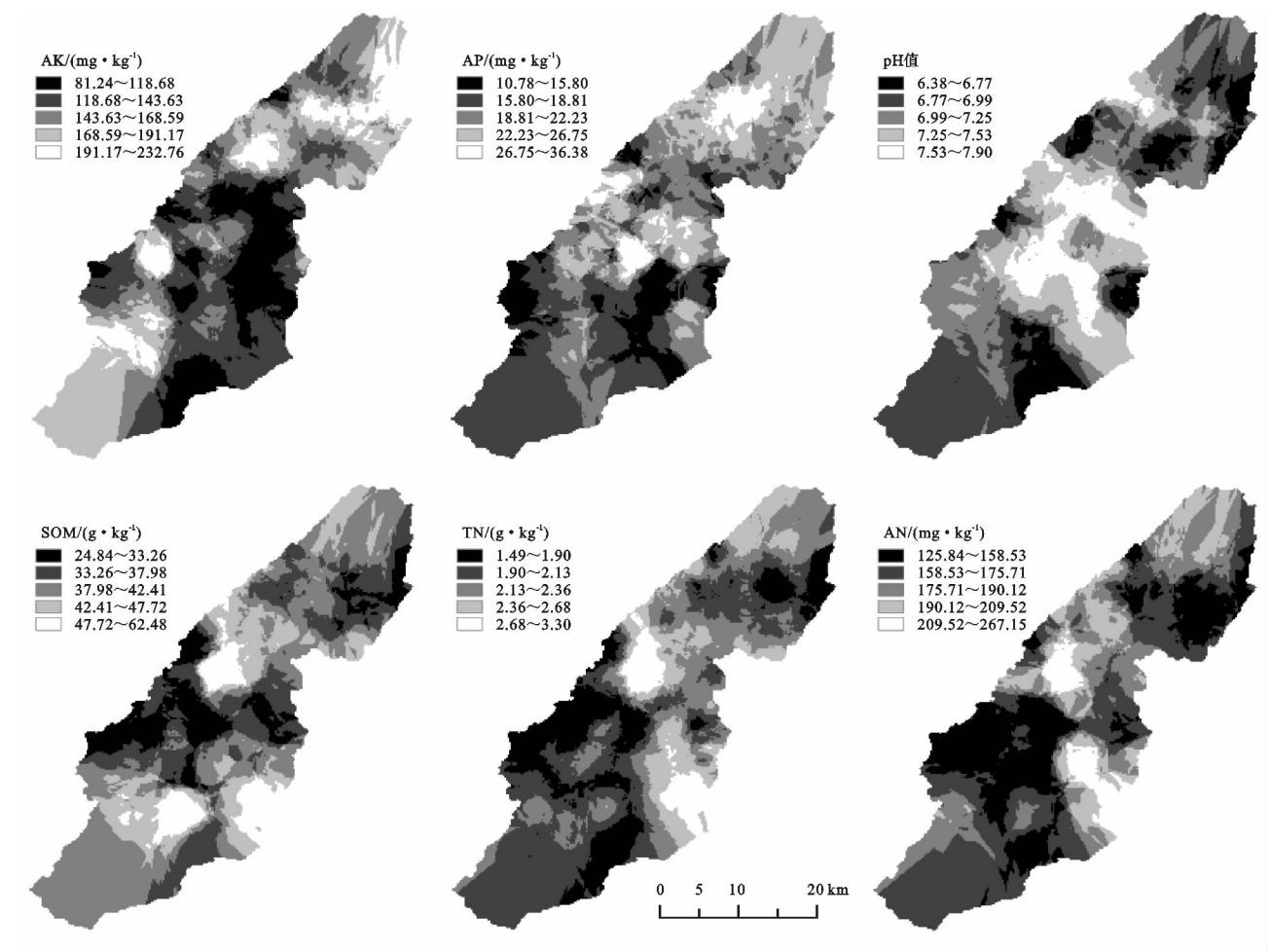


图 6 土壤养分空间插值

表 1 土壤养分影响因素方差分析

	项目	地貌类型	土壤类型	地貌类型×土壤类型
F	pH 值	2.892	10.135	2.626
	SOM	0.282	3.349	0.489
	TN	0.523	9.346	0.350
	AN	0.718	5.090	0.551
	AP	1.310	3.087	1.419
	AK	0.350	1.596	2.219
p	pH 值	0.022	0.000**	0.008**
	SOM	0.890	0.019*	0.864
	TN	0.719	0.000**	0.946
	AN	0.580	0.002**	0.818
	AP	0.265	0.027*	0.186
	AK	0.844	0.189	0.025*

注：* 表示在 $p<0.05$ 水平显著，** 表示在 $p<0.01$ 水平显著；× 表示地貌和土壤类型的交互作用对土壤养分的影响。

各指标之间存在量纲的差异,因此在求得土壤肥力综合得分前,需对原始数据进行标准化处理^[18]。将提取出的前 3 个主成分特征值(表 2)进行归一化处理,作为上述 3 个组合式的权重,可以求得综合值 S。

$$S=0.506S_1+0.275S_2+0.219S_3$$

由表 4—5 可知,不同地貌类型和不同土壤类型

土壤肥力综合得分从大到小分别为:台地槽谷区>平坝区>峰丛洼地>中山区>岩溶河谷,石灰土>水稻土>红壤>紫色土,且不同地貌和不同土壤类型之间土壤肥力综合得分差异较为显著。

3 讨论

3.1 土壤肥力空间分析

受地质背景、地形地貌和区域气候的控制,加之人为活动的影响,小江流域土壤频繁交错^[19],土壤肥力表现出强烈的空间异质性。研究结果显示,小江流域土壤养分整体较为丰富。土壤肥沃的区域多集中在盆底平坝区和台地槽谷区,中山区和岩溶河谷区土壤肥力相对较差。盆底平坝区和台地槽谷区地势较为平坦,耕作方式多样且频繁,有机质含量较高,同时盆底平坝区第四系母质富钙的环境也有利于有机质的积累^[20]。土壤有机质和土壤中微生物的固定作用是土壤中 N 的主要来源,有机质的储存直接影响 N 的存储和转化^[21-22],这与研究区有机质、全氮及碱解氮相似的分布特征符合。土壤 pH 值总体由中部向东北、西南递减。盆底平坝区地势平坦,接受周围碳酸盐岩地区的土壤流失,土壤中 Ca,Mg 含量较高^[23-24],土壤 pH

值较高,而中山区和岩溶河谷区海拔较高,且地势起伏较大,土壤淋滤作用较强,因此土壤 pH 值较低。土壤中有有效态养分指可直接被作物吸收利用的元素含量。大量试验研究表明土壤中有有效磷的含量和土壤发育程度、母岩、人为施肥、有机质含量等具有极大的相关性^[25-26],速效钾受土壤所处区域的水热条件、土壤质地、土壤母岩风化程度等影响^[27]。研究表明,岩溶区土壤中有有效磷和速效钾的主要来源是植物残体的归还和农户施肥^[28]。

一方面,地貌因子影响了 P,K 元素的累积与迁移,台地槽谷区和盆底平坝区地形平坦,土壤易保持,而中山区与河谷区地形较为起伏,坡度较大,加之研究区湿润的气候,水土流失严重,元素易淋溶迁移。另一方面,研究区复杂的生态地质环境造成了高山寒、山区凉、坝区暖、河谷热的多样立体气候^[13],针对这一特征,不同地貌区制定了不同的耕作管理方式,极大程度影响了土壤有效养分的空间分布。

表 2 主成分特征值和贡献率

成分	初始特征值			主成分的特征值和贡献率		
	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	2.393	39.890	39.890	2.393	39.890	39.890
2	1.302	21.705	61.595	1.302	21.705	61.595
3	1.035	17.256	78.851	1.035	17.256	78.851
4	0.689	11.487	90.337			
5	0.416	6.928	97.265			
6	0.164	2.735	100			

表 3 各指标因子载荷量和特征向量

土壤肥力 指标	标准化 变量	成分矩阵			特征向量矩阵		
		C ₁	C ₂	C ₃	A ₁	A ₂	A ₃
pH 值	X ₁	0.133	-0.370	0.972	0.086	-0.033	0.955
SOM	X ₂	0.873	0.156	-0.100	0.565	0.137	-0.099
TN	X ₃	0.940	0.004	0.087	0.608	0.004	0.085
AN	X ₄	0.837	-0.014	-0.173	0.541	-0.012	-0.170
AP	X ₅	0.014	0.800	0.175	0.009	0.701	0.172
AK	X ₆	-0.168	0.789	-0.114	-0.109	0.699	-0.112

表 4 不同地貌类型主成分综合得分

地貌类型	S ₁	S ₂	S ₃	S	排名
盆底平坝区	0.043	-0.101	0.448	0.092	2
岩溶河谷区	-0.008	-0.138	-0.394	-0.128	5
台地槽谷区	0.102	0.292	0.048	0.142	1
岩溶中山区	-0.099	0.001	-0.171	-0.087	4
峰丛洼地	0.077	0.237	-0.519	-0.009	3

表 5 不同土壤类型主成分综合得分

土壤类型	S ₁	S ₂	S ₃	S	排名
红壤	-0.629	0.657	0.460	-0.036	3
石灰土	0.065	0.524	-0.114	0.152	1
水稻土	0.153	-0.185	0.052	0.038	2
紫色土	-0.679	0.598	-0.887	-0.373	4

3.2 土壤类型对土壤肥力的影响

土壤肥力的空间分布差异性一方面受耕作施肥、种植制度、地形地貌、气温、降雨、植被覆盖等人为活动 and 环境条件的影响^[24,29-30],另一方面与土壤本身的结构性质也存在紧密联系。蒋勇军等^[31]在研究小江流域土壤有机质空间变异时发现,不同母质发育的土壤中,有机质含量及其变异系数差异显著。本研究所选 4 种土壤分别属于 3 种土纲,红壤属于铁铝土纲,

紫色土和石灰土属于初育土纲,水稻土属于人为土纲^[32]。石灰土通过石灰岩直接风化形成,母岩中含丰富的钙质,钙离子易与腐殖质结合形成较为稳定的腐殖质酸钙,有利于有机质积累,石灰土具有稳定的有机质结构和良好的团粒结构,使其土壤肥力持久^[20]。水稻土在长期的人为耕作管理下熟化而成,重复交替氧化还原过程^[32],其人为影响已超过自然成土作用。水稻土长年湿润,土壤多处于还原状态,有利于微生物的活动与积累,有机质含量相对较高^[33],此外,人为的耕作方式与施肥管理也是积累有机质的一大原因。铁铝土在高温湿润条件下,经历脱硅富铝化的过程,土壤中原生矿物被强烈分解,硅酸和盐基被强烈淋失,导致土壤中的阳离子交换量低,盐基极不饱和,有机质被迅速分解^[32],这与研究中红壤肥力低的特征相符。紫色土成土母岩中含有一定的有机质以及 N,P,K,Ca,Mg 等元素,自然肥力较高。但是紫色土母岩节理发育、结构差,成土过程中经历强烈的物理风化,且成土时间短^[32],不利于养分的存储,总体肥力偏低。

3.3 地貌类型对土壤质量的影响

地貌是土壤发育及分布的重要基础,是影响土壤

质量的重要因素之一。不同的地貌位置,其水热条件、植被状况、地表径流的侵蚀速率等都存在差异,这些差异影响了土壤的形成及其物理、化学等性质的差异。峰丛洼地和中山区地形起伏,坡度较为陡峭,冲沟、落水洞、漏斗等发育,由于重力作用和地表径流的侵蚀,水土流失严重,土层较薄,土壤养分流失,土壤肥力因子的含量处于较低水平,不利于作物生长;台地槽谷区和平坝区地形较为平坦缓和,土层发育深厚,养分不易流失,且耕地多以水稻田为主,土壤湿度大,土壤微生物较为活跃,一般表层土壤养分含量丰富,土壤质量等级较高,是作物栽种的适宜区域。研究区的峰丛洼地是台地槽谷区向平坝区的过渡地带,水土流失导致一部分土壤养分被带到平坝区,这是峰丛洼地土壤肥力质量高于中山区的一个原因。岩溶河谷区地形高差大且谷坡较大,土壤侵蚀强烈,河谷区地下水以垂直入渗为主,漏渗严重^[12],表层土壤养分被带到深层流失。

3.4 地貌和土壤类型的交互作用对土壤养分的影响

方差分析的结果显示,地貌因子对土壤养分影响不显著,母质对土壤养分的影响较为显著,但母质和地貌的交互作用只对 pH 值有极显著影响。统计结果显示,不同地貌类型下土壤养分差异度不显著,不同土壤类型下土壤养分差异度较为显著。土壤质量综合得分的结果显示,不同地貌和土壤类型的土壤综合质量差异较为显著。小江流域根据不同的地貌分区的特征,因地制宜,制定了相应的农业发展规划。平坝区以发展优质稻米、优良种子和高效经济作物(高原蔬菜)为主;台地槽谷区以发展稻米和特色经济作物(鲜花)为主;河谷区主要发展优质稻米;中山区着重发展林草农牧业;峰丛洼地发展林果业^[34]。本研究所采集样品均来自耕地,受到统一的规划管理和耕作模式,人为活动对土壤的影响作用模糊了地貌的影响作用,不同地貌分区的土壤肥力差异可能与种植的作物种类有关。

改善土壤结构是提升土壤质量的重要措施。结合土壤母质性质和地貌类型的环境特征,综合生物、工程等多项措施,改善作物生长环境以此提高产量。

4 结论

(1) 岩溶断陷盆地不同地貌分区环境特征差异显著,土壤类型多样且频繁交错,加之不同地貌分区人类活动方式的差异性,土壤养分空间分布差异性显著。

(2) 小江流域土壤养分整体含量较为丰富,有机质、全氮和碱解氮是决定土壤肥力质量的关键因子。

不同土壤类型土壤肥力综合质量表现为石灰土>水稻土>红壤>紫色土;不同地貌类型土壤肥力综合质量表现为台地槽谷区>平坝区>峰丛洼地>中山区>岩溶河谷区。

(3) 统计结果显示,不同土壤类型间土壤养分含量差异性略强于不同地貌类型,主成分分析结果表明,不同土壤类型和地貌类型的土壤综合肥力差异显著,方差分析结果显示,土壤类型对土壤肥力的影响作用强于地貌类型。表明土壤肥力质量受地貌类型和土壤母质的共同影响,但人为活动弱化了地貌对土壤肥力的影响。

参考文献:

- [1] 姚六三. 云南断陷岩溶盆地形成机理及模型的建立[J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 48-55.
- [2] 王宇, 张华, 张贵, 等. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.
- [3] 杨慧, 朱同彬, 王修华, 等. 云南断陷盆地高原面典型小流域土壤元素含量特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 859-865.
- [4] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 等. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7103-7108.
- [5] 彭淑惠, 王宇, 张世涛. 昆明岩溶断陷盆地的环境地质问题及治理对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2): 98-103.
- [6] 王金乐, 林昌虎, 何腾兵. 贵州喀斯特山区石漠化生态环境背景与生态重建[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 148-150.
- [7] 吴协保, 孙继霖, 林琼, 等. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨[J]. 中国岩溶, 2009, 28(4): 391-396.
- [8] 王宇. 西南岩溶石山区断陷盆地岩溶水系统分类及供水意义[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 220-224.
- [9] 张果, 许模. 南盘江上游草海断陷盆地岩溶水系统研究[J]. 地下水, 2011, 33(1): 25-26.
- [10] 刘大刚, 吕玉香, 郭传道. 西南典型断陷盆地岩溶地下水径流特征研究[J]. 地下水, 2018, 40(1): 15-17.
- [11] 李强, 蒲俊兵, 黄妮, 等. 断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理的研究途径[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 899-907.
- [12] 周晓东. 基于 GIS 的云南小江流域植被生态需水量时空分布规律[D]. 北京: 中国地质科学院, 2017.
- [13] 蒋勇军. 典型岩溶流域土地利用变化及其对土壤质量的影响[D]. 重庆: 西南师范大学, 2005.
- [14] 龙健, 邓启琼, 江新荣, 等. 贵州喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤质量恢复能力的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3188-3195.
- [15] 岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特

- 峰丛洼地土壤—环境关系研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 250-255.
- [16] 黄婕, 于爽, 梁权. 多元统计法在河水主要离子含量变化特征及来源分析中的运用: 以梧州水文站控制断面为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 412-418.
- [17] 李果. 贵州喀斯特地区不同土地利用方式下土壤理化性质与土壤肥力评价[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [18] 夏建国, 李廷轩. 主成分分析法在耕地质量评价中的应用[J]. 西南农业学报, 2000, 13(2): 51-55.
- [19] 涂成龙, 张玉彪, 刘丛强, 等. 典型岩溶区域主要土壤类型分布特征与表层土壤保有量估算[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 620-625.
- [20] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [21] 刘克锋, 韩劲, 刘健斌, 等. 土壤肥科学[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [22] 朱菊兰, 刘森, 张阳, 等. 浑河太子河流域地形和土地利用对表层土壤养分空间变异的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 621-629.
- [23] Jiang Y, Li L, Wu Y, et al. Temporal-spatial variability of soil fertility in karst region: a case study of Xiaojiang watershed Yunnan[J]. Environmental Geology, 2008, 55(4): 875-887.
- [24] 蒋勇军. 流域尺度的岩溶区土壤 pH 值空间变异研究: 以云南小江流域为例[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 80-86.
- [25] 陈金林, 潘根兴. 杉林土壤中磷的固定作用及其抑制因素[J]. 生态学杂志, 2002, 21(5): 22-25.
- [26] 丁绍兰, 杨宁贵, 赵串串, 等. 青海省东部黄土丘陵区主要林型土壤理化性质[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 1-6.
- [27] 李东, 王子芳, 郑杰炳, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式下土壤有机质和全量氮磷钾含量状况[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 310-314.
- [28] 彭琴. 贵州喀斯特山区不同石漠化等级土壤中钾素变异特征[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
- [29] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究: 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557-563.
- [30] 史利江. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2006.
- [31] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异: 以云南小江流域为例[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2040-2047.
- [32] 王果. 土壤学[M]北京: 高等教育出版社, 2009.
- [33] 张春. 四川盆地中丘陵区成土母质和地形对土壤肥力质量的影响研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2006.
- [34] 泸西县地方志编纂委员会办公室. 泸西年鉴[J]. 云南芒市: 德宏民族出版社, 2017.

(上接第 354 页)

- [14] 赵文娟, 杨世龙, 王潇. 基于 Logistic 回归模型的生计资本与生计策略研究: 以云南新平县干热河谷傣族地区为例[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 136-143.
- [15] 邝佛缘, 陈美球, 鲁燕飞, 等. 生计资本对农户耕地保护意愿的影响分析: 以江西省 587 份问卷为例[J]. 中国土地科学, 2017, 31(2): 58-66.
- [16] 袁东波, 陈美球, 李志朋, 等. 基于农药化肥使用视角分析不同兼业类型农户耕地质量保护行为[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(2): 310-314.
- [17] 陆学艺. “三农”新论: 当前中国农业农村农民问题研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2005.
- [18] 李广东, 邱道持, 王利平, 等. 生计资产差异对农户耕地保护补偿模式选择的影响: 渝西方山丘陵不同地带样点村的实证分析[J]. 地理学报, 2012, 67(4): 504-515.
- [19] 张银银, 马志雄, 丁士军. 失地农户生计转型的影响因素及其效应分析[J]. 农业技术经济, 2017(6): 42-51.
- [20] 熊传麟, 叶长盛. 赣南等原中央苏区县域多维贫困测度及空间格局[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 225-232.
- [21] 任凯丽, 杨美玲, 朱志玲. 限制开发生态区农户参与生态补偿的适应性研究: 以宁夏盐池县为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 313-320.
- [22] 李磊, 贾磊, 赵晓雪, 等. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 456-460.
- [23] 孟樱, 王静. 农户信贷需求和融资选择偏好的影响因素分析: 基于陕西省 324 户农户的调查[J]. 农村经济, 2017(3): 80-85.