

俞月凤, 曾成城, 宋同清, 等. 桂西北喀斯特区石灰土矿物质的空间变异特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 509-516, 527.

DOI: 10.11932/karst20230303

桂西北喀斯特区石灰土矿物质的空间变异特征

俞月凤^{1,3}, 曾成城^{1,3}, 宋同清², 彭晚霞², 何铁光^{1,3}

(1. 广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所, 广西南宁 530007;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125; 3. 广西耕地保育重点实验室, 广西南宁 530007)

摘要: 基于整个桂西北喀斯特地区石灰土的网格取样分析, 采用经典统计分析和地统计学方法, 研究桂西北喀斯特大尺度区域下表层(0~15 cm)石灰土矿物质(SiO₂、Fe₂O₃、CaO、MgO、Al₂O₃、MnO)的空间变异特征及影响因素。结果表明: SiO₂含量高达55.72%, 其次为Al₂O₃, 二者占了土壤矿物质含量的85.22%; 变异系数在37.50%~71.67%之间。SiO₂空间自相关中等, Al₂O₃和MnO空间自相关弱, 三者变程长, 空间连续性好; CaO、Fe₂O₃、MgO空间自相关显著, 变程短。Al₂O₃、Fe₂O₃的空间变异特征主要受海拔影响, 裸岩率是影响SiO₂、MnO和MgO空间变异性的主要地质因子, 坡度则是影响CaO空间分布的主要因素。主成分分析表明土壤矿物质是影响桂西北喀斯特区石灰土空间变异的重要因子, 特别是SiO₂。区域大尺度下, 各地质地形因子通过影响石灰土矿物质空间变异特征, 从而影响石灰土的空间分布。

关键词: 矿物质; 喀斯特; 空间变异; 石灰土

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)03-0509-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

土壤是十分复杂的自然综合体, 受气候、生物、母质、地形、成土时间等成土因素的影响, 具有复杂性和时空变异性^[1]。土壤矿物质是土壤极其重要的组成部分, 其构成土壤的骨骼, 占土壤固体部分质量的95%以上^[2-4], 直接参与土壤风化、成土和植物生长发育全过程, 对土壤的内部结构、交换能力和肥力状况等均有很大影响, 同时也受气候、植被和土壤母质、养分、微生物、风化程度和淋溶作用的影响^[5]。植物从土壤中吸收各种营养元素。植物矿质营养元素含量及其分布格局对其生理反应、生长发育有着

重要的作用。因此, 研究土壤矿质元素的空间分布特征, 对了解和掌握土壤发育程度、理化性状以及植物营养成分的供应状况有重要的意义^[6]。

桂西北喀斯特地区位于云南高原向广西盆地过渡的斜坡地带, 是西南代表性喀斯特区域, 是中国贫困与生态退化问题最为突出的地区之一。喀斯特地区石灰土由于其成土母岩为碳酸盐岩, 具有强淋溶性, 成土速度极为缓慢, 土壤浅薄, 风化强度低, 发育程度弱^[7]。正是这种特殊的形成基质和生态环境条件, 使得喀斯特地区土壤具有高度空间异质性^[8-9]。矿质养分短缺可能是西南碳酸盐岩石质山地植被生长和修复的重要限制性因子^[10], 因此研究喀斯特地

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160284); 广西自然科学基金面上项目(2020GXNSFAA297092, 2023GXNSFBA026336); 广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科 2023YM68)

第一作者简介: 俞月凤(1988—), 女, 助理研究员, 研究方向: 农业生态与环境。E-mail: yuyue339@qq.com。

通信作者: 何铁光(1976—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农业生态与环境。E-mail: tghc118@163.com。

收稿日期: 2021-02-16

区石灰土矿物质的空间分布特征具有重要意义。目前,有关喀斯特地区矿物质的研究多集中在不同系统或不同土地利用方式,喻阳华等^[11]研究了6种土地利用类型土壤Fe、Ca、Cu等23种矿质元素的变化特征及互作效应,指出黔中石漠化区可通过补充土壤铁、硫元素,改善通气性等措施调控矿质元素含量;韩美荣等^[12]探讨了喀斯特峰丛洼地四种典型生态系统土壤矿物质的组成特征、作用以及与植被、地形、其他土壤性状的耦合关系;对于矿物质的空间异质性也有报道,李莎莎等^[6]探明了西南峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质的空间分布特征;杜虎等^[13]研究了木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性,但是都是基于小尺度的研究,由于空间变异尺度效应的存在,大尺度区域的研究也必不可少,而目前对于桂西北喀斯特区域大尺度的土壤矿物质空间分布的研究有待进一步研究。因此,本研究从大尺度区域出发,将整个桂西北喀斯特地区作为研究区域,以大面积野外调查采样和室内分析测定为基础,采用经典统计学、地统计学等方法,研究喀斯特区域内石灰土矿物质的含量水平和空间变异特性,探明喀斯特石灰土矿物质与主要营养元素、环境因子等的关系,旨在揭示大尺度区域下,影响喀斯特石灰土各矿物质空间异质性的主要环境因子以及石灰土空间异质性的影响因素,以期为喀斯特区矿物质资源的有效利用和生态恢复重建提供参考依据。

1 研究区概况

桂西北喀斯特区位于广西壮族自治区西北部,属云贵高原山前区,地处104°28′~109°09′E, 22°51′~25°37′N,包括河池和百色2地级市23县(市、区)。区域内以山地、丘陵为主,喀斯特地貌广泛发育,裸露石灰岩面积约3.38万km²,占全区域的48.5%(河池地区石山面积占本地区的65.7%,百色地区石山面积占本地的31.2%)。区域以典型的峰丛洼地喀斯特地貌为主,海拔85~2062m。地处亚热带季风气候区,光照充足,年均日照时数达1968.6h,无霜期315.3d;气候温和,年均气温20.3℃,≥10℃积温7130.4℃;降水集中于6—8月份,年均降雨量1178.8mm,年均暴雨日数4.6d,最大降雨强度67.8mm·h⁻¹;干湿季明显,年均蒸发量1298.7mm,干旱日数181.2d,干旱指数1.10。喀斯特地区土壤类型主要

以石灰土为主,有黑色石灰土、红色石灰土、黄色石灰土、棕色石灰土4个亚类。研究区域内主要植被类型有:草丛、灌丛、次生林、人工林。草丛主要有以斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、蔓生莠竹(*Microstegium fasciculatum*)、水竹叶(*Murdannia triquetra*)和鬼针草(*Bidens pilosa*)为主要建群种的群落类型;灌丛主要有以鞑叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆(*Vitex negundo*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)和火棘(*Pyracantha fortuneana*)为主要建群种的群落类型;次生林主要有以八角枫(*Alangium chinense*)、椴子皮(*Itoa orientalis*)、枫香(*Liquidambar formosana*)和毛桐(*Mallotus barbatus*)为主要建群种的群落类型;人工林主要以香椿(*Toona sinensis*)、任豆(*Zenia insignis*)为主要建群种的群落类型。

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

基于喀斯特峰丛洼地景观异质性强的特点,根据裸露石灰岩分布特征及面积,确定调查网格面积为100km²(约为0.1°经纬网格),网格数量为338个,参照《IPCC优良做法指南》对系统随机抽样的建议,调查网格数量为24个,占总网格的7%,按每个网格约布置7~8个样点计,整个桂西北喀斯特区域设置175个样点。在实际采样过程中,根据石灰土的分布图及道路系统,综合考虑植被类型及采样点的可达性和实际可操作性,采样点的选择原则是要具有随机性并且兼顾均匀分布的采样方法^[14]。研究区域样点分布情况团队已报道过^[15]。

土壤样品采集于2015年11月,用手持GPS记录采样中心点坐标,采用“之”字形取样法,在以该点为中心的20m×20m的范围内采集0~20cm深度的5个土壤副样本,四分法混合为1个土壤主样本保留1kg左右。同时记录海拔高度、植被种类、坡度等信息。将采集的土壤样品去除石头、杂草和植物根系等非土壤成分后置于通风处自然风干,磨碎过筛,保存于自封袋中待测。分析土壤硅(SiO₂)、铁(Fe₂O₃)、钙(CaO)、镁(MgO)、铝(Al₂O₃)、锰(MnO),具体分析方法见文献^[16],土有机质SOM(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($0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提法)、AK 速效钾 (NH_4OAc 浸提法) 和 pH (电极电位法)。

2.2 数据处理

文中数据采用域法识别特异值, 即样本均值加减 3 倍标准差识别特异值, 在此区间外的数据均定为特异值, 分别用正常的最大和最小值代替^[17]。土壤养分的描述性统计分析、K-S 检验 ($\alpha = 0.05$)、普通相关分析和主成分分析在 SPSS 18.0 软件中完成。地统计学分析在 GS+软件中完成, 用理论模型对各土壤养分指标的半方差函数进行拟合, 地统计学有关方法和原理见文献^[18]。

3 结果与分析

3.1 桂西北喀斯特区石灰土矿物质的描述性统计分析

石灰土矿物质的描述性统计特征如表 1 所示。桂西北喀斯特地区石灰土中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 的含量差异较大, 其中 SiO_2 占绝对优势, 高达 55.72%, 其次为 Al_2O_3 , 二者占了土壤矿物质含量的 85.22%, 其它矿质含量较小; 各矿物质含

量的变异系数较大, 在 37.50%~71.67% 之间, 土壤中的硅绝大多数存在于硅酸盐结晶或沉淀中, 不易解离, 变异系数相对较小, 仅为 37.50%。钙镁含量与母质、土壤的形成过程、土壤中有机质的丰度及风化程度、淋溶作用等因素相关, 变异系数较高, 分别为 71.67% 和 58.72%, 而钙由于受植被和水分运动的影响较镁大, 其变异系数大于 MgO 。通过对偏度、峰度的观测以及采用 K-S 法进行非参数检验, 在 5% 的检验水平下, 除 CaO 需要进行对数转化外, 其他矿物质均服从正态分布。

3.2 桂西北喀斯特区石灰土矿物质的空间变异特征

由表 2 和图 1 可看出, 桂西北喀斯特区石灰土矿物质 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 变异函数值的最佳拟合模型为指数模型, Al_2O_3 和 MnO 的半变异函数符合线性模型, 决定系数 R^2 在 0.340~0.956 之间, 结合残差平方和值 (RSS), 说明理论模型较好地反映土壤矿物质含量的空间结构特征。

一般认为块金值与基台值的比值 $C_0/(C_0+C) < 25\%$ 时, 空间变量为强烈的空间自相关, 在 25%~75% 之间时, 为中等空间自相关, $> 75\%$ 为弱空间自相关。研究区 CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 块金值与基台值的比值 $C_0/(C_0+C)$ 在 5.9%~21.9% 之间, 空间自相关强

表 1 石灰土矿物质描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of limestone soil minerals

指标	最大值	最小值	均值	标准差 S.D.	变异系数 CV/%	偏度	峰度	K-S检验
SiO_2	98.14	21.50	55.72	20.90	37.50	0.45	-1.07	0.070
CaO	4.59	0.14	1.52	1.09	71.67	0.98	0.07	0.000
Fe_2O_3	23.09	0.63	8.89	4.89	55.20	0.62	-0.14	0.169
Al_2O_3	29.24	2.11	14.60	6.90	47.26	0.26	-0.95	0.134
MgO	2.75	0.08	1.04	0.61	58.72	0.67	-0.06	0.330
MnO	0.68	0.04	0.24	0.14	58.42	0.63	-0.14	0.145

表 2 石灰土矿物质的半方差函数模型参数

Table 2 Parameters of the semi-variogram models for limestone soil minerals

指标	模型 Model	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	变程A/km	R^2	RSS
SiO_2	指数模型	0.091	0.227	0.401	317.9	0.956	9.00E-05
CaO	指数模型	0.069	1.160	0.059	19.2	0.779	1.05E-02
Fe_2O_3	指数模型	0.012	0.054	0.219	20.7	0.608	3.94E-05
Al_2O_3	线性模型	0.332	0.332	1.000	216.2	0.502	6.81E-03
MgO	指数模型	0.038	0.380	0.100	12.9	0.340	1.62E-03
MnO	线性模型	0.019	0.019	1.000	216.2	0.467	1.779E-06

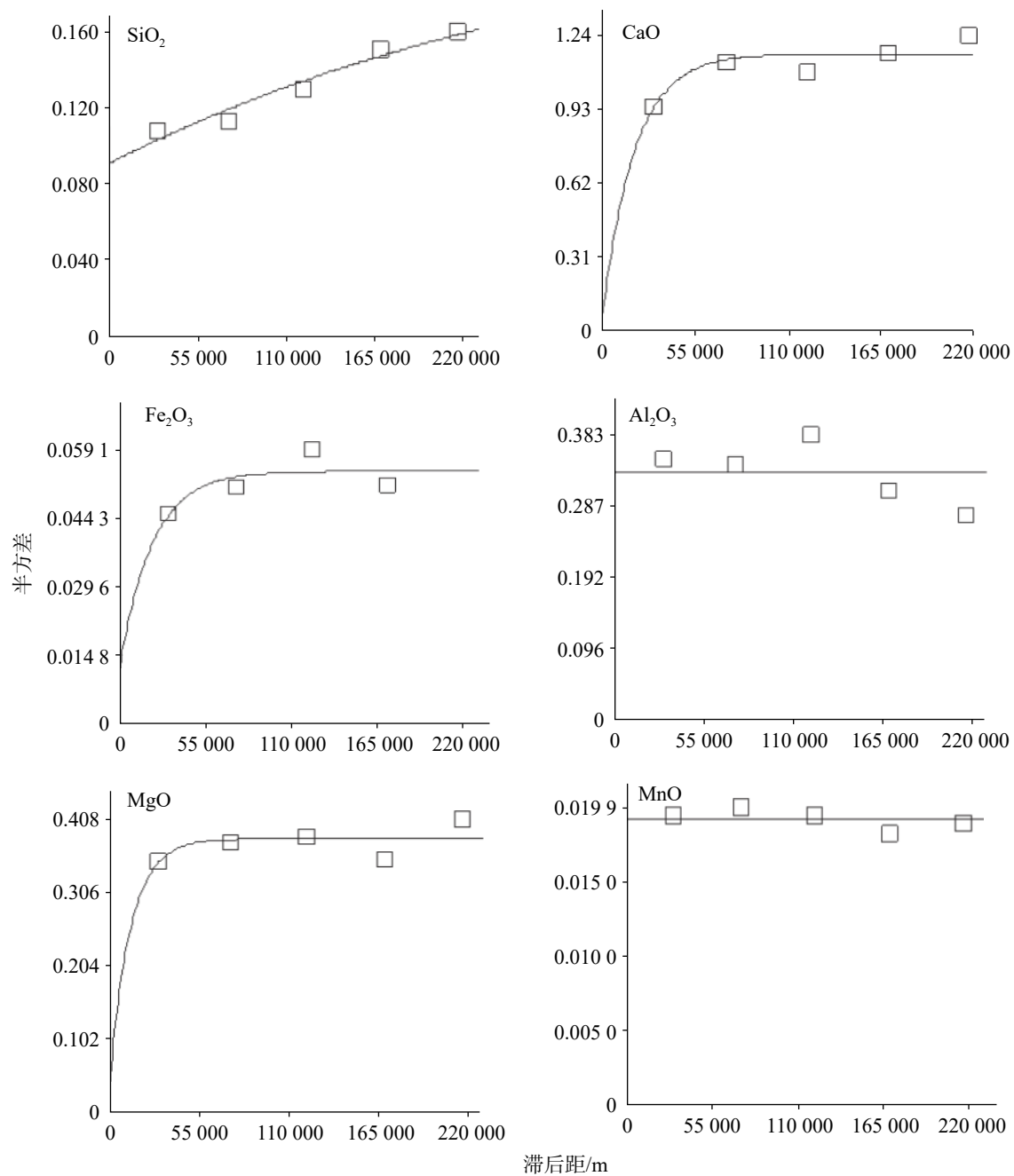


图1 石灰土矿质养分的半方差函数图

Fig. 1 Semi-variance grams of limestone soil minerals

烈, SiO_2 的块金值/基台值分别为 40.1%, 空间自相关中等; 而 Al_2O_3 和 MnO 空间自相关弱。变程反映土壤性状的有效空间自相关距离, 研究区 SiO_2 、 MnO 和 Al_2O_3 的变程较大, 分别为 317.9、216.2 和 216.2 km, 空间连续性较好, 其他 3 种矿物质的变程在 12.9~20.7 km 之间, 空间依赖性较强。

3.3 桂西北喀斯特区石灰土矿物质空间变异的的影响因素分析

为了探明桂西北喀斯特区石灰土矿物质空间变

异的影响因素, 选取了石灰土 pH 和主要养分以及海拔、坡度、岩石出露率等指标, 利用相关分析对矿物质与主要养分及地形因子之间的关系进行分析, 结果如图 2 所示。除了速效磷和海拔外, SiO_2 与各养分因子和裸岩率之间存在极显著负相关关系, 与坡度则为显著正相关; 除了全钾外, CaO 与其他养分之间显著或极显著正相关, 与坡度极显著负相关; Fe_2O_3 、 Al_2O_3 与 pH、速效钾、全磷、全钾显著或极显著正相关, 与海拔极显著负相关。MnO 与 pH、主要养分及

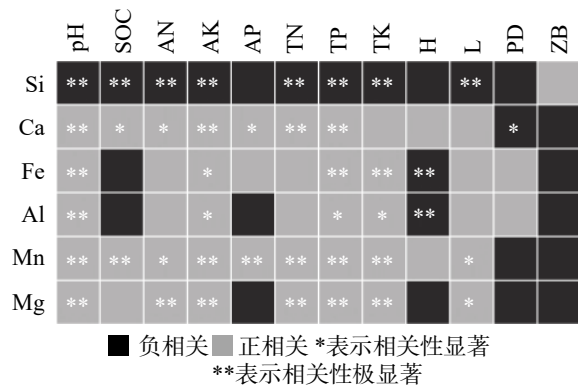


图 2 石灰土矿物质与主要养分、地形及植被类型的相关性分析

Si-二氧化硅 Ca-氧化钙 Fe-三氧化二铁 Al-三氧化二铝 Mn-氧化锰 Mg-氧化镁 SOC-土壤有机碳 AN-速效氮 AK-速效钾 AP-速效磷 TN-全氮 TP-全磷 TK-全钾 H-海拔 L-裸岩率 PD-坡度 ZB-植被类型

Fig. 2 Correlation analysis of minerals, main nutrients, topographic factors and vegetation type in limestone soil

Si-SiO₂, Ca-CaO, Fe-Fe₂O₃, Al-Al₂O₃, Mn-MnO, Mg-MgO, SOC-soil organic carbon, AN-available nitrogen, AK-available potassium, AP-available phosphorus, TN-total nitrogen, TP-total phosphorus, TK-total potassium, H-height, L-bare rock ratio, PD-gradient, ZB-vegetation type

裸岩率存在显著或极显著正相关,与坡度显著负相关。除有机碳和速效磷,Mg 与其他养分及裸岩率均为显著或极显著正相关。

3.4 桂西北喀斯特区石灰土空间变异特性的主成分分析

主成分分析采取一种降维的方法,将多指标转化为较少几个综合指标,综合后的新指标彼此互不相关、并尽可能地反映原来变量的信息,从而达到简化、清晰的分析目的。桂西北喀斯特区 175 个样点的土壤、地形和植被类型 18 个指标的主成分分析表明(表 3),各主成分的贡献率都较低,特征值大于 1 的前五个主成分的方差贡献率为 66.52%,方差贡献率达到 85% 时为第 10 主成分。影响桂西北喀斯特地区石灰土空间变异特征的主导因子即第一主成分为全氮、全磷、SiO₂ 载荷量最大,第二主成分 Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 的载荷量最大,第三主成分以速效磷的载荷量最大,第四主成分以 CaO 的载荷量最大啊,第五主成分以全钾的载荷量最大。

表 3 桂西北喀斯特地区石灰土空间变异特征的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of spatial variation characteristics of limestone soil

项目	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
pH	0.664	0.169	-0.157	-0.308	0.179
有机碳	0.574	-0.581	0.042	-0.029	-0.067
速效氮	0.569	-0.403	-0.030	-0.235	-0.259
速效钾	0.536	0.129	0.395	-0.262	0.040
速效磷	0.133	0.182	0.780	0.103	-0.256
全氮	0.750	-0.403	0.073	0.074	-0.146
全磷	0.728	0.011	0.404	0.267	-0.232
全钾	0.341	0.221	0.057	0.383	0.577
海拔	0.229	-0.548	0.198	0.416	0.300
裸岩率	0.478	-0.388	-0.389	0.082	0.071
坡度	0.081	-0.243	-0.602	0.332	0.103
植被类型	-0.367	0.459	0.412	0.207	0.254
SiO ₂	-0.733	-0.268	0.092	0.042	-0.222
CaO	0.356	-0.038	0.336	-0.564	0.381
Fe ₂ O ₃	0.442	0.694	-0.324	0.108	-0.211
Al ₂ O ₃	0.431	0.622	-0.417	-0.041	-0.227
MnO	0.646	0.274	0.175	0.448	-0.144
MgO	0.522	0.274	-0.168	-0.139	0.248
特征值	4.766	2.601	2.144	1.339	1.124
累积贡献率/%	26.479	40.928	52.842	60.281	66.524

4 讨论与结论

4.1 桂西北喀斯特地区石灰土矿物质含量特征

桂西北喀斯特区属亚热带季风气候,温湿条件优越,利于生物的繁衍和生长,生物“自肥”作用强烈,同时加速了岩石的溶蚀风化和土壤的形成、发育进程,CaO和MgO的质量分数反而很低,仅为1.52%和1.04%,变异系数高。 SiO_2 的质量分数达55.72%,且变异系数较小,为37.50%, Al_2O_3 的质量分数为14.6%,变异系数为47.26%,没有出现相同气候带下的地带性红壤明显的脱硅富铝化现象,这是因为岩石溶蚀过程中产生的重碳酸钙/镁减缓了脱硅富铝作用和硅酸盐结晶不易流失^[13]。土壤矿物质的组成在一定程度上反映了土壤石漠化的类型和强度^[19-21]。一般来说,土壤 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 、 $\text{CaO} > 5.0\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 4.0\%$ 、 $\text{MgO} < 0.9\%$ 表明产生了石漠化现象,土壤 $\text{SiO}_2 < 65\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 7.0\%$ 、 $\text{MgO} > 1.0\%$ 尚未发生石漠化,且随着石漠化的加重,土壤中 SiO_2 明显升高, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO等成分不断降低^[22]。本研究中桂西北喀斯特区石灰土矿物质的平均值组成满足 $\text{SiO}_2 < 65\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 7.0\%$ 、 $\text{MgO} > 1.0\%$,说明在大区域尺度上,该区域土壤尚未发生石漠化,但不代表某些部分地区存在石漠化现象。为了扭转喀斯特地区石漠化的趋势,改善生态环境,桂西北喀斯特地区2002年启动了退耕还草还林的生态环境建设工程,经过十几年的恢复,土壤各种矿物质含量逐渐合理,石漠化治理初见成效,因此,需要减少人为干扰,加强退耕还林还草工程的实施与植被的快速恢复,保障石漠化治理成果。

4.2 桂西北喀斯特地区石灰土矿物质空间变异特征

土壤特性空间异质性的经典统计分析中将土壤特性看作随机的、彼此相互独立的。然而实际中,在一定的空间范围内,土壤性状存在一定的空间依赖性。土壤性状的空间异质性是结构因子和随机因子共同作用的结果。结构因子是指自然程中的成土母质、地形、土壤类型等,是土壤特性空间变异的内在驱动力,其通常促使土壤属性空间变异具有较强的空间相关性,尤其是在较大的尺度水平上表现更为明显;随机因子是指土壤管理过程的施肥、种植制度、耕作栽培措施等,是土壤特性变异的外在影响因素,

使土壤特性的空间分布朝均一方向发展,从而空间相关性减弱,尤其是在小尺度水平上更为强烈。本研究中,在桂北喀斯特区域尺度上,石灰土CaO、 Fe_2O_3 、MgO空间自相关显著,说明这3种矿物质的空间变异主要由母质、地形等结构性因子引起; SiO_2 空间自相关中等,表明随机因素对其空间变异有一定的贡献,因此同样是不能忽视的; Al_2O_3 和MnO空间自相关弱,说明这两种矿物质的空间变异主要由施肥、栽培措施等随机因子引起的,而结构因素对变异的贡献很小,同时也说明对这些指标进行研究应适当减小采样距离。

4.3 桂西北喀斯特地区石灰土矿物质空间变异的影响因素

土壤矿物质-土壤养分-地形之间具有相互作用关系。喀斯特地区碳酸盐岩风化过程中产生各种矿物质,从而形成了土壤的物质基础,并逐步增强了土壤肥力。地形是重要的土壤成土因子之一,它能调控着太阳辐射和降水的空间分配,影响局部生境的小气候与土壤厚度和养分的空间差异^[23-24]。喀斯特地区地形地貌复杂,生境异质性高,地形的变化导致了环境因子的空间变异,使得区域内土壤具有明显的空间变异性。本研究中相关分析结果表明,桂西北喀斯特地区石灰土矿物质的空间分布与主要养分及地形特征有密切的关系。其中, SiO_2 与pH及主要养分之间均负相关,且除速效磷外,与其他养分之间均为极显著负相关;其他矿物质与主要养分之间主要为正相关关系,尤其是CaO和MnO;表明石漠化程度越高,土壤中 SiO_2 含量越高, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO等成分降低,而主要养分含量也降低。海拔主要影响石灰土 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的空间变异特征,裸岩率是影响 SiO_2 、MnO和MgO空间变异性的主要地质因子,坡度则是主要影响CaO空间分布的因素。 SiO_2 与海拔、裸岩率和坡度均为负相关,其中与裸岩率关系为极显著,表明裸岩率越高 SiO_2 反而降低;原因可能与在区域大尺度下,石灰土养分含量随着海拔高度、坡度和裸岩率的增加而增加相似^[15]。

桂西北喀斯特区175个样点18个指标(土壤、地形、植被类型)主成分分析的降维效果较差,前3个主成分的方差累积率为52.84%,此后各主成分的方差贡献率均较低,表明喀斯特地区生态系统的复杂性和异质性很高,生态系统的运行受多个因子的

共同制约,应全面考虑植被、土壤理化环境、土壤矿物质养分、地形因子群及其相互作用。石灰土全氮、全磷在第一主成分的载荷量较大,而 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 、 CaO 分别在第一、二和四主成分中的载荷量较大;表明土壤矿物质是影响桂西北喀斯特区石灰土空间变异的重要因子,特别是 SiO_2 。在区域大尺度下,地形和地质因子(海拔、坡度、裸岩率)是石灰土矿物质的空间变异特征的主要影响因素,而矿物质是桂西北喀斯特地区石灰土空间变异的重要影响因素,因此,地质地形因子是影响桂西北喀斯特石灰土空间变异的重要因素。

参考文献

- [1] 王炜明. 基于GIS的地统计学方法在土壤科学中的应用[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 404-408.
WANG Weiming. Utilization of geo-statistic with GIS in soil sciences[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5): 404-408.
- [2] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in Northeastern Costa Rica[J]. Ecosystems, 2004, 7(2): 134-146.
- [3] Dunjo G, Pardini G, Gispert M. Land use change effects on abandoned terraced soils in a Mediterranean catchment, NE Spain[J]. Catena, 2003, 52(16): 23-37.
- [4] Descroix L, Viramontes D, Vauclin M, Gonzalez Barrios J L, Esteves M. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico)[J]. Catena, 2001, 43(2): 115-135.
- [5] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [6] 李莎莎, 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎. 西南峡谷喀斯特区坡地土壤矿物质的空间分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5320-5327.
LI Shasha, FAN Fujing, SONG Tongqing, HUANG Guoqin, ZENG Fuping, PENG Wanxia, DU Hu. Spatial variation of soil minerals in the gorge karst region, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5320-5327.
- [7] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [8] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 谢丽萍, 肖德安. 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.
WANG Shijie, LU Hongmei, ZHOU Yunchao, XIE Liping, XIAO De'an. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 475-483.
- [9] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
ZHANG Wei, CHEN Hongsong, WANG Kelin, ZHANG Jiguang, HOU Ya. Spatial variability of soil nutrients on hills-lope in typical karst peak-cluster depression areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 68-73.
- [10] 张信宝, 王克林. 西南碳酸盐岩石质山地土壤-植被系统中矿物质养分不足问题的思考[J]. 地球与环境, 2009, 37(4): 337-341.
ZHANG Xinbao, WANG Kelin. Ponderation on the shortage of mineral nutrients in the soil-vegetation ecosystem in carbonate rock-distributed mountain regions in Southwest China[J]. Earth and Environment, 2009, 37(4): 337-341.
- [11] 喻阳华, 杨丹丽, 钟欣平. 黔中喀斯特区典型土地利用类型的土壤亲合性元素特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(4): 429-435.
YU Yanghua, YANG Danli, ZHONG Xinping. Characteristics of soil affinity elements of typical land use types in the rocky desertification area of central Guizhou[J]. Earth and Environment, 2019, 47(4): 429-435.
- [12] 韩美荣, 宋同清, 彭晚霞, 黄国勤, 杜虎, 鹿士杨, 时伟伟. 喀斯特峰丛洼地土壤矿物质的组成特征与作用[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 685-693.
HAN Meirong, SONG Tongqing, PENG Wanxia, HUANG Guoqin, DU Hu, LU Shiyang, SHI Weiwei. Compositional characteristics and roles of soil mineral substances in depressions between hills in karst region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 685-693.
- [13] 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 曾馥平. 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 79-84, 400.
DU Hu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, WANG Kelin, LIU Lu, LU Shiyang, ZENG Fuping. Spatial heterogeneity of mineral compositions in surface soil in Mulun National Natural Reserve karst areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 79-84, 400.
- [14] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 高玉寒, 张美丽. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1306-1312.
LI Long, YAO Yunfeng, QIN Fucang, GAO Yuhan, ZHANG Meili. Spatial distribution pattern of soil nitrogen in Huanghuadianzi watershed and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1306-1312.
- [15] 俞月凤, 何铁光, 宋同清, 李丽娟, 韦彩会, 蒙炎成, 唐红琴, 李忠义, 李婷婷, 胡芳. 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.
YU Yuefeng, HE Tiegua, SONG Tongqing, LI Lijuan, WEI Caihui, MENG Yancheng, TANG Hongqin, LI Zhongyi, LI Tingting, HU Fang. Spatial variability of limestone soil nutrients in a karst area of northwestern Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2906-2914.
- [16] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
LIU Guangsong. Soil physical and chemical analysis and description of soil profile[M]. Beijing: China Standards Press, 1996.

- ess, 1996.
- [17] 王强, 戴九兰, 付合才, 申天琳, 吴大千, 王仁卿. 空间分析方法在微生物生态学研究中的应用[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 439-446.
WANG Qiang, DAI Jiulan, FU Hecai, SHEN Tianlin, WU Daqian, WANG Renqing. The application of spatial analysis methods to microbial ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 439-446.
- [18] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak J M, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [19] 王改改, 傅瓦利, 魏朝富, 袁红. 消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 66-70.
WANG Gaigai, FU Wali, WEI Chaofu, YUAN Hong. Iron transformation and phosphorus availability in a drawdown area of Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 66-70.
- [20] 金发会, 李世清, 卢红玲, 李生秀. 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2739-2746.
- JIN Fahui, LI Shiqing, LU Hongling, LI Shengxiu. Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2739-2746.
- [21] 郭杏妹, 吴宏海, 罗媚, 何广平. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 515-521.
GUO Xingmei, WU Honghai, LUO Mei, HE Guangping. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2007, 26(6): 515-521.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤系统分类土壤物理和化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [23] Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G. Topographic variations of soil properties and stand structure in a *Pinus thunbergii* plantation[J]. *Ecological Research*, 1996, 11(3): 299-309.
- [24] Tateno R, Takeda H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor[J]. *Ecological Research*, 2003, 18(5): 559-571.

Spatial variation of limestone soil minerals in a karst area of northwestern Guangxi

YU Yuefeng^{1,3}, ZENG Chengcheng^{1,3}, SONG Tongqing², PENG Wanxia², HE Tiegua^{1,3}

(1. *Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China;*

2. *Institute of Subtropical Agriculture Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;*

3. *Guangxi Key Laboratory of Arable Land Conservation, Nanning, Guangxi 530007, China*)

Abstract As extremely important components of soil and constitutors of soil skeleton, soil minerals account for over 95% of the solid mass of soil. They directly participate in the entire process of soil weathering, soil formation, and plant growth and development, impacting significantly on the internal structure, exchange capacity, and fertility status of soil. Studying the spatial distribution of soil mineral elements is of great significance for understanding and mastering soil development, physical and chemical properties, and the supply status of plant nutrients. Because of the special formation matrix and ecological environment conditions of carbonate rock—the parent material of limestone soil in karst areas, soil in karst areas presents a high degree of spatial heterogeneity. At the same time, the shortage of mineral nutrients may be an important limiting factor for the growth and restoration of vegetation in mountainous areas of carbonate rock in southwestern China. However, the spatial distribution characteristics of soil minerals on a large scale in the karst area of northwestern Guangxi are currently unclear. Clarifying the spatial variation characteristics of limestone minerals in the karst area of northwestern Guangxi can provide reference for the effective utilization of mineral resources and ecological restoration and reconstruction. In order to explore the distribution pattern of the main soil mineral components in the karst area of northwestern Guangxi and to guide vegetation restoration and ecological reconstruction in the relevant area, the spatial heterogeneity of mineral components (SiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO, Al₂O₃, and MnO) in surface soil (0-15 cm) and its influencing factors were studied by the methods of classical statistics and geostatistics. The soil samples were collected by the grid method based on the whole karst regional scale in

(下转第 527 页)

pumping, foundation piling, tunneling, drainage in mines, and train vibration and in the studies on karst collapse mechanisms induced by extreme climate. At present, there are about eight karst collapse mechanisms according to previous studies, such as subduction, vacuum negative pressure, pressure difference, hydraulic fracturing, gas explosion, chemical dissolution, resonance, liquefaction, etc. These processes are closely associated with changing underground hydrodynamic conditions.

With a profound analysis of definitions and theoretical basis of karst collapse mechanism, this study proposes that most of the above mechanisms can be attributed to seepage deformation of soil. This means, under the action of groundwater seepage force or dynamic water pressure, some particles of the whole soil mass will move, causing deformation and destruction of soil or rock mass. During the formation of karst collapse, the action mode and direction of groundwater seepage force on karst cavities roof soil will be different because of the change of groundwater dynamic conditions. The limit equilibrium theory of soil mechanics considers the roof stability of karst cavities, which is the last stage in the development of karst collapse; the effect of surface load is only to shorten the time of ground collapse.

Finally, it is pointed out that due to the practicability of water-air pressure with high-frequency sampling, accelerometer and acoustic wave sensors, the research direction on collapse mechanisms will be changed from hydrostatic pressure to hydrodynamic pressure, a challenge that should be faced with. The cavitation damage and resonance damage caused by pressure pulsation will also be the future research focus, and the corresponding critical seepage deformation or damage indicators need to be further studied the prevention and control of geological disasters of karst collapse.

Key words karst collapse, formation mechanism, seepage deformation, hydrodynamic pressure, cavitation damage, resonance damage

(编辑 张玲)

(上接第 516 页)

northwestern Guangxi. The results show that the content differences and variance coefficients of six mineral components in limestone soil of karst area in northwestern Guangxi are large. The average content of SiO_2 is up to 55.72%, while the variance coefficient is the smallest (37.50%). The sum of SiO_2 and Al_2O_3 accounts for 85.22% of the total six mineral components. The spatial patterns of the six mineral components are quite different from each other, and fit different models of mineral components. The spatial autocorrelation of SiO_2 is medium, but the autocorrelations of Al_2O_3 and MnO are weak, and their ranges are long in good spatial continuum. CaO , Fe_2O_3 and MgO are characterized by strong spatial autocorrelations with short ranges. The spatial distribution of minerals is closely related to the main nutrients and topographic characteristics. The spatial variation of Al_2O_3 and Fe_2O_3 is mainly affected by the altitude. The bare rock rate is the main topographic factor affecting the spatial variation of SiO_2 , MnO and MgO , and the gradient is the main factor affecting the spatial distribution of CaO . A principal component analysis show that the soil mineral is an important factor affecting the spatial variation of limestone soil, especially SiO_2 . On a large regional scale, various topographic factors affect the spatial variation limestone soil minerals, and hence impacting the spatial distribution of limestone soil.

Key words minerals, karst, spatial variation, limestone soil

(编辑 张玲)