

基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤-环境关系研究

岳跃民^{1,2,3}, 王克林^{1,2*}, 张伟^{1,2}, 陈洪松^{1,2}, 王敏^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特农业生态系统试验站, 广西 环江 547100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:喀斯特地区是典型的生态脆弱区, 环境容量小, 抗干扰能力低, 不同的土地利用方式、海拔、地貌地形特征等环境因子对土壤性质的空间变异有重要影响, 峰丛洼地地貌景观异常破碎, 石漠化严重, 土壤性质对其环境的变化更加敏感. 在野外调查取样、实验室分析的基础上, 采用典范对应分析(CCA)研究土壤-环境关系. 结果表明, 不同的环境条件下土壤性质的空间变异有很大差异, 全氮、碱解氮、有机碳、速效磷、速效钾、碳氮比的空间变异要比全磷、全钾和 pH 值的空间变异大, 其中全氮、碱解氮和有机碳的空间变异趋势相似; 不同的土壤性质与不同的环境因子之间的关联性不同, 土壤有机碳、全氮和碱解氮与裸岩率和坡度有很好的关联性, 速效钾主要受植被类型的影响, 碳氮比与土壤厚度有很好的相关性, 而全钾、全磷和 pH 值受环境的影响相对较小; 不同的环境因子对土壤性质的影响程度大小依次为: 土地利用方式 > 植被类型 > 裸岩率 > 坡向 > 土壤厚度 > 坡度 > 海拔高度. 除全钾和 pH 值以外, 不同的土地利用方式对土壤性质有显著影响.

关键词:喀斯特; 土壤性质; 土地利用; 典范对应分析

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)05-1400-06

Relationships Between Soil and Environment in Peak-Cluster Depression Areas of Karst Region Based on Canonical Correspondence Analysis

YUE Yue-min^{1,2,3}, WANG Ke-lin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Hong-song^{1,2}, WANG Min^{1,2}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Experimental Station of Karst Agro-ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang Guangxi 547100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Karst region is a typical ecological fragile zone, with small environmental and anti-interference capability. Many environment factors, such as different land use, elevation and topographic relief, have significant influence on spatial variability of soil properties, resulting in abnormal fragments of landscape and severe rocky desertification. The method of canonical correspondence analysis(CCA) was employed to reveal the relationships between soil and environment in peak-cluster depression areas of karst region, using the samples from field survey in Guzhou. Results show that spatial variability of TN, AN, SOC, AP, AK and C/N are greater than TP, TK, and pH, with the similar trend among TN, AN and SOC. Furthermore, CCA shows that SOC, TN and AN have high correlation with bare rock rate and grade, AK and vegetation type, together with the significant correlation between C/N and soil depth, while the environment has little effect on TK, TP and pH. Environmental factors that affect soil properties are listed as the following order: land use > vegetation type > bare rock rate > aspect > soil depth > elevation. Except TK and pH, soil properties are significantly affected by different land-use types.

Key words: Karst; soil property; land use; CCA

土壤性质空间变异及其分布特征和环境因子(气候、土地利用、海拔、地貌地形等)的关系, 对于了解生态系统的过程具有重要意义, 受到广泛关注^[1~4]. 当中小尺度上气候差异不显著时, 地形地貌和土地利用方式等对土壤养分空间变异的影响更为明显. 我国西南喀斯特地区与黄土高原地区同为我国贫困与环境退化问题最为突出的地区^[5], 常以石生、旱生及喜钙性植物和地下空间复杂性为特征, 是一种由地质条件决定的脆弱环境, 其环境容量小, 抗干扰能力低, 石漠化严重, 生态恢复与重建迫在眉睫^[6]. 研究喀斯特地区土壤-环境关系, 对了解喀斯

特生态系统的过程、指导喀斯特地区的石漠化治理及生态恢复重建有重要意义. 许多研究者已对喀斯特土壤的空间变异特征及其影响因子做了比较深入的分析^[7~10], 但大都是考虑单个环境因子如土地利用方式、地形因子或高程因子等对土壤性质的影响, 然而, 土壤特性往往受到多个环境因子的共同综合

收稿日期: 2007-05-11; 修订日期: 2007-06-18

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403208); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

作者简介: 岳跃民(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为景观格局变化与过程、土地利用, E-mail: hnyym829@163.com

* 通讯联系人, E-mail: kelin@isa.ac.cn

作用,目前同时综合考虑多个环境因子研究土壤-环境之间数量关系的研究还比较缺乏,特别是在不同环境因子对土壤性质的影响程度方面的研究更少^[11].研究方法方面,土壤-环境关系主要采用多元线性回归、相关分析、因子分析、协方差分析和地统计学分析方法等多种统计方法,但当变量数据较多时,直线相关等分析受到了限制,如土壤养分含量沿着环境梯度更多的是呈单峰型分布;而且对于喀斯特地区,由于地貌景观非常破碎,利用地统计学研究土壤的空间变异将产生较大的误差^[12].数量生态学中的典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)方法,要求变量的非直线分布很好地解决了这个问题^[1, 13~15].本研究以典型喀斯特峰丛洼地为例,基于典范对应分析方法,探讨了喀斯特峰丛洼地土壤养分特征与环境因子之间的数量关系.

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县古周村(107°55'E, 24°50'N),该区为典型喀斯特峰丛洼地景观,土地总面积为 186.7 hm²,其中耕地面积仅 17.3 hm².区域内最低点海拔为 376 m,与最高点海拔相差 440 m.该地区多年平均气温 16.5~20.5℃,平均降水量为 1 389.1 mm.区内自然植被以灌木和草丛群落为主,主要为喜钙、耐旱、耐瘠的先锋树种和草类.

区内土壤主要为碳酸盐岩发育的石灰土,土质粘重,土体与基岩面过渡清晰.坡地土层浅薄且不连续,一般厚 20~30 cm,局部地段仅有 5~10 cm.洼地土层较厚,平均可达 70~80 cm,但地下空间特别发育,有落水洞、地下河天窗等岩溶形态与地下空间系统连通,降水入渗系数很高,旱涝灾害频繁.由于坡耕地水土流失严重,开垦坡地都有不同程度的石漠化,严重地段岩石裸露率达 70% 以上.1996 年当地作为环境移民迁出示范区,大部分坡地退耕撂荒,2002 年起逐步种植板栗、木豆、牧草、柑橘等生态经济林.根据人类的干扰程度将研究区的土地利用类型分为 4 种:自然坡地、撂荒地、退耕地和耕地.自然坡地主要为次生灌木和藤本;撂荒地原来有过耕种历史,后来被撂荒的坡耕地,坡位也较高,撂荒时间多为 10 a 左右,主要植被为先锋树种和草本;退耕地为原来有过耕种历史,后来发展为生态经济林模式的坡耕地,多位于坡脚部位,尚未成林;耕地种植的主要作物为玉米、牧草和大豆,均有较长的耕作

历史.

1.2 土壤采样方法与样品分析

土壤采样时间为 2005-01-20~2005-01-25,在古周村及其附近区域采集样点 112 个,随机布点并兼顾地形和土地利用梯度差异.用 GPS 测定并记录每个样本点的位置,在每个点周围 2 m 范围内随机采取 5 个样本,混合后代表该样点土样.每个样本采取 0~15 cm 的表层土壤,并同时进行了养地调查并记录环境条件,选取的环境因子有:土地利用方式(LANDCODE)、植被类型(VEGECODE)、裸岩率(BAREROCK)、坡度(GRADE)、坡向(ASPECT)、海拔高度(ALTITUDE)和土壤厚度(SOILDEPTH).

土壤样品室内分析选取的指标分别为:有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、碳氮比(C/N)和 pH 值.其中有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,全氮使用碳氮仪测定,全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定,全钾采用 NaOH 熔融-原子吸收法测定,碱解氮采用速效-扩散法测定,速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定,速效钾采用 NH₄Ac 浸提-原子吸收法测定, pH 值采用电极电位法测定(水土比 2.5:1).具体测定步骤见文献[16, 17].

1.3 数据定量分析方法

典范对应分析方法(CCA): CCA 是由对应分析/相互平均(correspondence analysis/reciprocal averaging, CA/RA)修改而产生的新方法,它把 CA/RA 和多元回归结合起来,每一步计算结果都与环境因子进行回归,而详细地分析研究对象与环境之间的关系^[15]; CCA 可将研究对象排序和环境因子排序表示在一个图上,可以直观地看出它们之间的关系,环境因子用箭头表示,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度代表着某个环境因子与研究对象分布相关程度的大小,连线越长,代表这个环境因子对研究对象的分布影响越大; 2 个箭头之间的夹角大小代表着 2 个环境因子之间相关性的大小,夹角越小,相关性越大;箭头和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小^[13~15]. CCA 能够结合多个环境因子一起分析,从而能够更好地反映研究对象与环境之间的关系^[15, 18].

将定性指标在分析前进行编码^[19],坡向以北坡为基准,分为 8 个类型: 1 为北坡(67.5°~112.5°), 2 为东北坡(22.5°~67.5°), 3 为西北坡(292.5°~

337.5°),4 为东坡(337.5°~22.5°),5 为西坡(247.5°~292.5°),6 为东南坡(112.5°~157.5°),7 为西南坡(202.5°~247.5°),8 为南坡(157.5°~202.5°).土地利用方式分为 4 类:1 为耕地,2 为退耕地,3 为撂荒地,4 为自然坡地;植被类型分为 5 类:1 为农作物,2 为经济林,3 为草本,4 为灌木、藤本,5 为乔木.土壤养分的描述性统计分析特征由 SPSS 11.5 统计软件实现.利用 DPS 8.0 数据处理系统^[20]对采集的原始数据进行规格化处理,消除不同量纲之间的差异.CCA 分析利用国际通用标准软件 Canoco 4.5 进行.

2 结果与讨论

2.1 不同环境条件下土壤性质的空间分布格局

表 1 喀斯特峰丛洼地土壤性质的描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistical analysis of soil properties in peak-cluster depression areas of Karst region							
土壤性质	样本数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	中位数
SOC/g•kg ⁻¹	112	12.73	114.67	35.92	22.36	62.25	26.69
TN/g•kg ⁻¹	112	1.64	15.69	4.18	2.40	57.42	3.81
TP/g•kg ⁻¹	112	0.44	2.87	1.03	0.34	33.01	0.97
TK/g•kg ⁻¹	112	3.66	16.85	10.96	3.51	32.03	11.92
AN/mg•kg ⁻¹	112	103.96	778.12	276.93	145.71	52.62	242.08
AP/mg•kg ⁻¹	112	1.69	17.18	5.69	2.87	50.44	4.10
AK/mg•kg ⁻¹	112	47.14	188.88	99.74	33.68	33.77	98.34
pH	112	6.21	7.56	6.83	0.26	3.81	6.81
C/N	112	3.30	22.78	8.80	3.34	37.95	8.15

图 1 为 9 个土壤性质的变化格局与 CCA 第 1 和第 2 排序轴的关系,按比例 的圈点代表了每一样方中每个土壤性质的测定值,圈点越大代表的测定值越高.圈点大小的分布情况反映了土壤性质的空间分布变异性的 大小.结果表明:全氮、碱解氮、有机碳、速效磷、速效钾、碳氮比的空间分布格局变化比较大,说明这些土壤性质受环境的影响较大.其中全氮、碱解氮、有机碳的空间变异特征相似,说明土壤的有机质及 N、P、K 含量在空间分布上具有相似的变化规律.而全磷、pH 值和全钾的空间分布格局变化比较小,表明受环境因子的影响也小.这些分析结果与刘世梁等^[4]和张伟等^[7]的研究结果相似,说明不同的土地利用方式、地形地貌特征及不同的覆盖植被类型等环境因子不但导致土壤性质的空间变异,而且不同的环境因子对不同土壤性质的影响程度不同.

2.2 环境因子与土壤性质之间的相关 联分析

图 2 为土壤性质与环境因子的 CCA 二维排序.由图 2 不同环境因子之间的夹角大小可知,裸岩率与坡度有很强的关联性,坡度越陡的地方,岩石的裸

表 1 为喀斯特峰丛洼地土壤性质的描述性统计分析,分别测量分析了每个采样点(共 112 个样点)土壤的 9 项指标:有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、碳氮比(C/N)和 pH 值.结果表明:除了土壤 pH 值变异很小外,其他土壤性质都呈现较大的变异.其中,土壤有机碳、全氮、碱解氮、速效磷均表现为中等以上程度变异^[7],特别是有机氮的变异系数很大;全磷、全钾、速效钾、碳氮比的变异较小,但也达 30% 以上.土壤有机碳和速效磷的中位数和平均值相差比较大,说明有特异值存在,这和耕地施肥不均、人类的干扰强度不同有关.以上结果表明土壤性质的变化和不同的环境因子有很大关系.

露率越高;土地利用类型、坡向均与植被类型相关 联;而土壤厚度和坡度呈负相关,坡度越高的地方土壤越薄,这些分析结果跟高华端^[21]的结论一致.从图 2 还可以看出,代表主要土壤理化性质的土壤有机碳、全氮、碱解氮在 CCA 二维排序图上与代表裸岩率和坡度的箭头连线之间的距离比较小,其空间分布的变异情况也相似(见图 1 中的 TN、AN、SOC),彼此之间的关联性比较好;与裸岩率和坡度的箭头连线靠近,说明土壤有机质、全氮和碱解氮含量主要受裸岩率和坡度等环境因子的制约.速效磷和全磷的分布与土地利用方式和土壤厚度的箭头连线距离相对较近,说明土壤磷元素主要受土地利用方式及土壤厚度的影响.速效钾与植被类型的箭头连线距离最近,主要受植被类型的影响,土地利用方式和坡向对其也有一定的影响.碳氮比的变异大小主要受土壤厚度影响.全钾、全磷和 pH 值与环境因子之间的距离都比较远,其空间分布大小比较均匀,受环境的影响相对比较小.

2.3 不同环境因子对土壤性质的影响程度分析

表 2 中,土壤养分与环境因子前 2 个排序轴的

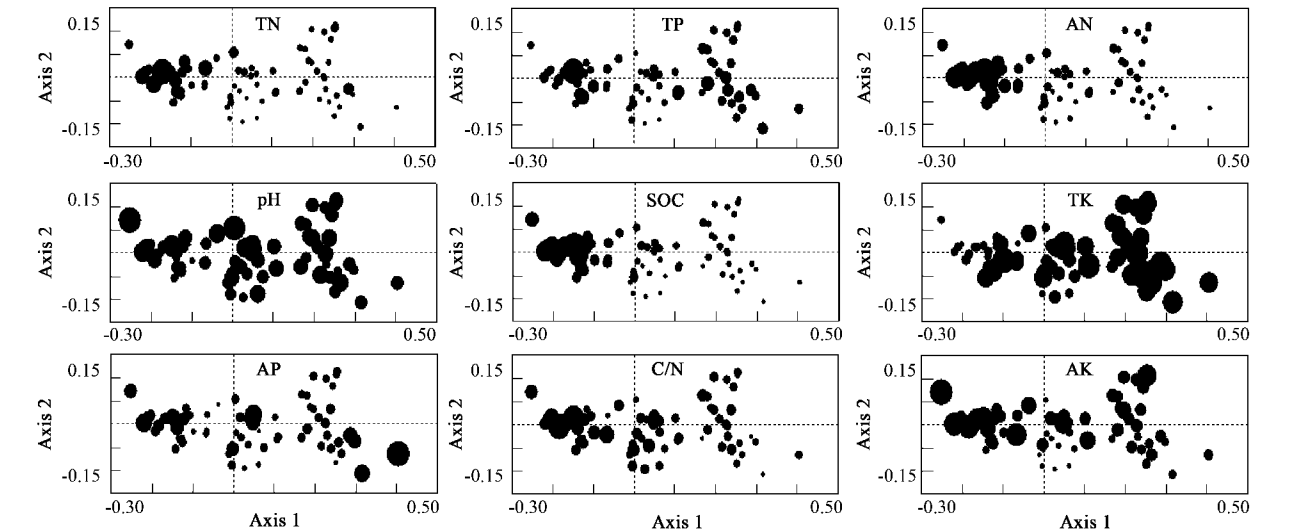


图 1 土壤性质的变化格局与环境因子前 2 个 CCA 排序轴的关系

Fig.1 Relationships between variation patterns of soil properties and the first two axes of environment factors generated by canonical correspondence analysis (Axis1: The first environmental factors axis, Axis2: The secondary environmental factors axis)

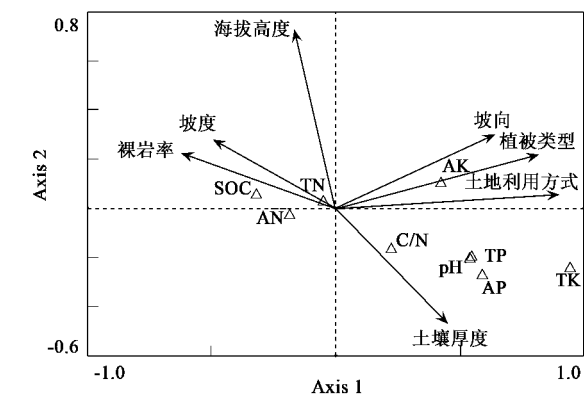


图 2 土壤性质与环境因子的 CCA 二维排序图

Fig.2 Ordination diagram of the first two axes of canonical correspondence analysis of soil properties and environmental factors

相关系数比较高,分别为 0.91 和 0.53;对于土壤性质来说,第 1、第 2 排序轴之间的相关系数仅为 0.02,表明这 2 个排序轴几乎相互垂直;对于环境因子来说,前 2 个排序轴的相关性为 0. 结合前 2 个排序轴的贡献率分析,前 2 个排序轴的贡献率分别为 84.3%和 90.0% .这些说明 CCA 分析的排序结果是可信的^[13,14] .

根据图 2,从箭头的连线长度可以明显地看出,选取的 7 个环境因子对土壤性质的空间分布状况都有一定程度的影响,其中,土地利用类型对土壤的养分影响最大,坡度的影响较弱.从箭头与土壤性质第 1 排序轴的夹角分析,环境因子与土壤养分的第 1 排序轴相关性大小为:土地利用方式 > 上覆植被类

表 2 土壤性质、环境因子前 2 个 CCA 排序轴与环境因子间的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients for soil properties axis 1 and axis 2, environment factors axis 1 and axis 2, and environmental factors										
	SPX1	SPX2	ENX1	ENX2	土地利用方式	植被类型	裸岩率	坡向	坡度	土壤厚度
SPX2	0.02									
ENX1	0.91 **	0.00								
ENX2	0.00	0.53 *	0.00							
土地利用方式	0.79 **	0.13	0.87 **	0.25						
植被类型	0.69 **	0.22	0.76 **	0.42	0.88 **					
裸岩率	-0.58 *	-0.04	-0.64 *	-0.07	-0.52 *	-0.43				
坡向	0.54 *	0.21	0.59 *	0.40	0.37	0.41	-0.24			
坡度	-0.49	0.09	-0.54 *	0.16	-0.39	-0.32	0.48	-0.12		
土壤厚度	0.52 *	-0.10	0.58 *	-0.19	0.48	0.46	-0.55 *	0.23	-0.29	
海拔高度	-0.31	0.42	-0.34	0.79 **	-0.15	-0.02	0.14	0.25	0.25	-0.07

1) SPX1: The first soil properties axis, SPX2: The secondary soil properties axis; ENX1: The first environmental factors axis, ENX2: The secondary environmental factors axis; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

型>坡向>土壤厚度,这些环境因子与第1排序轴正相关;裸岩率>坡度>海拔高度,均与第1排序轴负相关.结合表2,可以得出环境因子与土壤性质第1排序轴的相关性大小依次为:土地利用方式>植被类型>裸岩率>坡向>土壤厚度>坡度>海拔高度.与第2排序轴相比,环境因子与土壤性质第1排序轴的相关性明显地高,说明土壤养分排序轴的第1排序轴更好地说明了土壤养分与环境因子的相互关系,而且土壤养分第1排序轴的贡献率也达84.3%,也进一步说明了这一点.从以上这些分析可以得出选取的环境因子对土壤性质的影响程度大小依次为:土地利用方式>植被类型>裸岩率>坡向>土壤厚度>坡度>海拔高度.土地利用方式是土壤性质空间变异的最主要环境制约因子.

2.4 不同土地利用方式对土壤性质的影响分析

单因素方差分析表明,不同的土地利用方式对土壤性质有显著的影响(表3).自然坡地的有机碳、全氮、碱解氮和速效钾含量明显高于其他土地利用类型;撂荒地的有机碳、全氮、碱解氮和速效钾显著

高于退耕地和耕地,这表明经过较长时间的撂荒后,土壤养分状况在向良性方向发展,喀斯特生态系统功能逐渐恢复.退耕地的各种土壤养分含量普遍偏低,但与耕地相比大多不显著,这可能主要是因为退耕地主要是种植木豆、板栗等经济林,与耕地相比,化肥或有机肥的投入很少;而且由于处于退耕生态恢复的初期,生态系统中土壤的恢复常滞后于地上植被的恢复^[22],大量的土壤养分元素转移到植物中,使土壤养分含量未能恢复提高^[23].耕地的有机碳、碱解氮、速效钾和 C/N 在各土地利用类型中是最低的,而全磷和速效磷由于施肥的影响显著高于其他土地利用类型.全钾和 pH 值在各土地利用方式中差异不显著.不同土地利用类型的 pH 值普遍呈弱酸性,对自然坡地和撂荒地,这可能是由于较高的土壤有机质积累造成的;对于耕地和退耕地而言,可能与耕作及施用化肥有关,强烈耕作会加速腐殖质的矿化,促进 H⁺ 的释放,而使用尿素等含氨基的化肥会造成硝化作用的增强,引起 H⁺ 的释放,降低土壤 pH 值^[7].

表3 不同土地利用方式对土壤性质的影响

土地利用方式	SOC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	C/N
	/g·kg ⁻¹	/g·kg ⁻¹	/g·kg ⁻¹	/g·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹		
自然坡地	58.30a	6.03a	1.08a	9.11a	424.13a	5.52ab	112.61a	6.80a	10.67a
撂荒地	36.38b	4.59ab	0.82b	10.17a	260.58b	5.32ab	105.42a	6.84a	8.40ab
耕地	20.25c	3.35c	1.15a	11.38a	177.21c	7.17a	75.05b	6.85a	7.17b
退耕地	22.19c	2.47bc	0.87b	11.12a	193.20bc	4.40b	76.04b	6.83a	8.33b
F 值	30.81*	13.70*	5.54*	2.36	29.92*	5.26*	7.20*	0.21	6.26*

* $p < 0.05$; 每列数据后有相同字母表示各土地利用类型差异不显著

以往对喀斯特地区土壤性质的研究表明,土地利用方式对土壤性质有重要影响^[7,24,25];植被类型主要是通过提高土壤有机质,改善土壤结构,降低土壤容重和增加土壤毛管孔隙度等对土壤的性质产生重要影响,在喀斯特地区具有一定的喀斯特效应^[26],不同的植被类型培肥能力不同,防止土地退化的作用不同^[27].裸岩率高是导致喀斯特环境脆弱的重要原因之一,随着岩石裸露率的增加,环境的脆弱性增强,同时裸岩率也反映了剩余的土壤空间容量的大小^[28].坡向影响土壤的温度,这样直接影响到土壤有机质的分解速率和土壤水分含量^[4].土壤厚度表示了可供植物生长发育环境容量的大小、水肥的供应能力和抗侵蚀年限的长短,土层越薄环境容量减小,抗侵蚀年限时间缩短,脆弱度增强^[24].坡度主要影响土壤侵蚀和土壤水分、养分的流失,对地表径流的形成、流速和冲刷力起到直接的放大作用,和土壤

肥力呈负相关^[4].本研究与上述研究的结果相似,说明不同的土地利用方式、植被类型、裸岩率、坡向、土壤厚度、坡度和海拔均对土壤性质产生一定影响;所不同的是,当在综合考虑多种环境因子对土壤性质的共同作用时,不同的环境因子对土壤性质的影响程度不同.本研究认为,土地利用方式、植被类型、裸岩率、坡向和土壤厚度的影响比较大,而坡度和海拔高度的影响相对要弱一些.在西南喀斯特地区,喀斯特生态系统特定的地质背景决定了其生态环境的脆弱性,主要表现在碳酸盐岩致密、坚硬,生态敏感度高,环境容量低,抗干扰能力低,稳定性差,一旦受到人类的干扰破坏就很难恢复,导致不同的土地利用方式对土壤性质的影响最大^[29].由于喀斯特成土方式的影响,在退化地区的较大岩石裂隙中仍旧保留着部分碳酸盐岩风化残余土,形成所谓的“石碗土”,这种土具备一定的生产能力,农民常在这样的山坡

或山顶上种植玉米等农作物或木豆、板栗等经济林,会施用一定数量的农家肥或化肥;而本研究中不同海拔采取的土样主要是来自于此,农用施肥对土壤养分产生很大的影响,致使坡度和海拔高度对土壤性质的影响比较小^[7,30].因此,在喀斯特地区生态恢复与重建及指导农业生产实践过程中,要把人类不同的土地利用方式作为导致土壤性质空间变异的最主要环境制约因子,合理开发利用喀斯特地区宝贵的土地资源.

3 结论

(1)典范对应分析(CCA)同时综合了土壤因子和环境因子,不但能够分析土壤性质的空间分布格局差异,而且能够区分出不同的环境因子对土壤性质的影响程度.CCA 分析结果表明,全氮、碱解氮、有机碳、速效磷、速效钾、碳氮比的空间分布格局差异要比全磷、全钾和 pH 值的空间分布格局差异大,其中全氮、碱解氮和有机碳的空间分布格局相似.土壤有机碳、全氮和碱解氮相互有很好的关联性,裸岩率和坡度对它们的影响较大.而速效钾主要受植被类型的影响.碳氮比与土壤厚度有很好的相关性.全钾、全磷和 pH 值受环境的影响相对较小.不同的环境因子对土壤性质的影响程度不同,其中土地利用方式对土壤性质的影响最大,其次依次为植被类型、裸岩率、坡向和土壤厚度,坡度和海拔高度对土壤性质的影响较弱,这主要是由于喀斯特地区脆弱的生态环境造成的.

(2)本研究利用典范对应分析(CCA)综合研究喀斯特地区土壤性质和环境因子之间的关系,但研究区域只局限于小尺度,大尺度的综合喀斯特地区土壤性质和环境因子之间的关系有待于进一步的研究.典范对应分析(CCA)能够对不同环境因子对土壤性质的影响程度进行排序,提供了一种量化环境因素和土壤性质之间关系的方法,但每个环境因子导致土壤性质变化的具体权重大小有待于进一步地探讨.

参考文献:

[1] Odeh I O A, Chittleborough D J, McBratney A B. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis[J]. Geoderma, 1991, **49**: 1-32.

[2] Benning T L, Seastedt T R. Landscape-level interactions between topocedaphic features and nitrogen limitation in tallgrass prairie[J]. Landscape Ecology, 1995, **10**: 337-348.

[3] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空异与环境关系的数量分析[J]. 生态学报, 2000, **20**(5): 741-747.

[4] 刘世梁,郭旭东,连钢,等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(5): 105-108.

[5] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J]. 地球科学进展, 1996, **11**(6): 602-604.

[6] 张惠远,蔡运龙. 喀斯特贫困山地的生态重建: 区域范型[J]. 资源科学, 2000, **22**(5): 21-26.

[7] 张伟,陈洪松,王克林,等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(9): 1828-1835.

[8] 张伟,陈洪松,王克林,等. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J]. 土壤学报, 2006, **43**(4): 554-562.

[9] 陈洪松,傅伟,王克林,等. 桂西北岩溶山区峰丛洼地土壤水分动态变化初探[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 136-139.

[10] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样研究[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(2): 114-118.

[11] 吴秀芹,蔡运龙. 我国亚热带喀斯特生态环境演变研究进展[J]. 自然科学进展, 2006, **16**(3): 267-272.

[12] Zhang J, Oxley R R B. A comparison of three methods of multivariate analysis of upland grasslands in North Wales[J]. Journal of Vegetation Science, 1994, **5**: 71-76.

[13] ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient Analysis[J]. Ecology, 1986, **67**: 1167-1179.

[14] ter Braak C J F. Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods[J]. Ecoscience, 1994, **1**: 127-140.

[15] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 157-164.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 263-282.

[17] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[18] 曹彤,江源,宋阳,等. 陕北种植业土地利用与农业投入关系的典范对应分析[J]. 资源科学, 2005, **27**(4): 56-72.

[19] 沈泽昊,张新时. 三峡大老岭森林物种多样性的空间割据分析及其地形解释[J]. 植物学报, 2000, **42**(6): 620-627.

[20] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[21] 高华端. 乌江流域碳酸盐岩区土壤某些物理特性研究[J]. 贵州农学丛刊, 1994, **1**: 98-105.

[22] 刘美珍,蒋高明,于顺利,等. 浑善达克退化沙地恢复演替 18 年中植物群落动态变化[J]. 生态学报, 2004, **24**(8): 1731-1737.

[23] 盛才余,刘伦辉,刘文耀. 云南南涧干热退化山地人工植被恢复初期生物量及土壤环境动态[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(5): 575-580.

[24] 袁菊,刘元生,何腾兵. 贵州喀斯特生态脆弱区土壤质量退化分析[J]. 山地农业生物学报, 2004, **23**(3): 230-233.

[25] 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[J]. 地理学报, 2005, **60**: 751-760.

[26] 姚长宏,蒋忠诚,袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 2001, **22**(2): 159-164.

[27] 常庆瑞,安韶山,刘京,等. 黄土高原恢复植被防止土地退化效益研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, **5**(4): 7-11.

[28] 王德炉,喻理飞. 喀斯特环境生态脆弱性数量评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, **29**(6): 23-26.

[29] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, **21**(2): 101-105.

[30] 王世杰,李阳兵,李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(6): 657-666.