

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.034

岩溶山区土壤水的地球化学特征及其与土壤环境的关系

覃星铭^{1,2} 何丙辉¹ 吴华英²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘要: 对2015年所采集的0~20 cm、20~40 cm土壤水样品和对应的土壤样品进行了测试分析,运用灰度关联和典范对应分析的方法研究了岩溶峰丛山区土壤水的地球化学特征及其与土壤环境条件的关系。结果表明:岩溶峰丛山区土壤水地球化学性质及其对应的土壤环境指标均存在不同程度的空间异质性,其中土壤水和土壤中的pH值变异系数在2.48%~10.44%,变异最小;除了镁离子和氯离子,土壤水的其他地球化学指标的变异系数均表现为0~20 cm大于20~40 cm,20~40 cm土壤水地球化学性质更为稳定。土壤水的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度是影响土壤水地球化学特征的主要因子,且 HCO_3^- 起到主导作用。典范对应分析结果显示,不同的土壤水地球化学性质与土壤环境因子关联性差异明显,影响土壤水地球化学特征的主要土壤环境因子中的全钾含量、交换性镁含量、有效锌含量、0.2~2.0 mm粒径和0.002~0.020 mm粒径的土壤颗粒等因子对土壤水中的 Mg^{2+} 浓度、 HCO_3^- 浓度、pH值影响较大,有效铜含量、胡敏酸含量、胡敏素含量主要影响土壤水中 Na^+ 浓度、 K^+ 浓度,而速效钾含量、土壤含水率、小于0.002 mm粒径机械组成等土壤因子则主要是通过 Na^+ 浓度、 K^+ 浓度、 Cl^- 浓度、 SO_4^{2-} 浓度等指标影响土壤水的地球化学特征。

关键词: 岩溶峰丛山区; 土壤水; 地球化学性质; 土壤环境因子; 灰度关联; 典范对应分析

中图分类号: S153.5; X824 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)11-0280-09

Characteristics of Soil Water Geochemistry and Its Response to Soil Environmental Factors in Karst Peak-cluster Area

QIN Xingming^{1,2} HE Binghui¹ WU Huaying²

(1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: The objective was to clarify the characteristics of soil water geochemistry and the relationships between soil water and soil environmental factors in karst peak-cluster area. Soil water samples and soil samples were collected from the depths of 0~20 cm and 20~40 cm in each sampling site. And all samples were tested to meet groundwater testing standards and soil testing standards respectively. The methods of grey relational analysis (GRA) and canonical correspondence analysis (CCA) were employed to reveal the characteristics of soil water geochemistry and the relationships between soil water and soil environmental factors. The results revealed that geochemical properties of soil water and its corresponding geochemical indicators of soil were with different levels of spatial heterogeneity. And the variable coefficient of pH value was the smallest among the indicators, just ranging from 2.48% to 10.44%. Except Mg^{2+} and Cl^- , the variation coefficients of soil water geochemistry were decreased with the increase of depth. The properties of soil water geochemistry in the depth of 20~40 cm were more stable than that of 0~20 cm. HCO_3^- , Ca^{2+} and SO_4^{2-} were the main factors affecting the soil water geochemical characteristics, with HCO_3^- as a leading role. Furthermore, the CCA results showed that the correlations between geochemical properties of soil water and soil environmental factors were different. Among the main soil environment factors influencing soil water geochemistry, the total potassium (TK),

收稿日期: 2017-08-10 修回日期: 2017-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502402)、国家自然科学基金项目(41502257)、中国地质大调查项目(DD20160324)和中国地质科学院基本科研业务费项目(2017026)

作者简介: 覃星铭(1983—),男,博士生,中国地质科学院高级工程师,主要从事岩溶水土工程研究,E-mail: qxm212@karst.ac.cn

通信作者: 何丙辉(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

exchangeable magnesium (EMg), available zinc (AZn) and soil particles of 0.2 ~ 2 mm and 0.002 ~ 0.02 mm diameters influenced the Mg^{2+} , HCO_3^- and pH value of soil water; the available copper (ACu), humic acid (HA) and humin (HM) mainly impacted Na^+ and K^+ of soil water; rapidly available potassium (AK), soil water content and soil composed of particles of diameter less than 0.002 mm, and influenced soil water geochemistry by Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} and so on.

Key words: karst peak-cluster area; soil water; geochemistry; soil environmental factors; grey correlation; canonical correspondence analysis

引言

作为全球岩溶三大分布中心之一的中国西南地区,境内碳酸盐岩类岩层纵深横广,岩溶现象普遍、多样,类型繁杂、发育强烈,在相对脆弱的岩溶多重介质与不合理的人为活动的叠加影响下,引发植被破坏、土地质量衰退、水土流失、干旱缺水、群众生活贫困等一系列的问题^[1-2]。

土壤水是大降雨经岩溶表层带中的土壤向地下水转化的重要纽带,也是岩溶关键带植物、微生物生存发展的物质和水分来源,直接关系到岩溶关键带水资源的形成、转化与消耗。土壤作为土壤水的空间存储载体和物质能量来源,可认为土壤质量条件是响应土壤水的重要环境因子。目前,有部分专家学者对岩溶峰丛山区土壤异质性及其环境的影响进行了研究^[3-9],也取得了很多研究成果^[10-11],但对岩溶峰丛山区土壤水的地球化学性质方面的研究较少^[12-13],特别是利用灰度关联分析(Grey relational analysis, GRA)和典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)等方法讨论岩溶山区土壤水地球化学性质及其环境响应方面的研究鲜有报道^[14-15]。因此,本文选择岩溶峰丛山区土壤-土壤水为研究对象,研究土壤水

地球化学性质的空间变化特征及其对土壤环境条件的响应关系,以期完善土壤水与环境关系的方法研究、指导岩溶峰丛山区生态重建和农林水土工程调蓄。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于桂西南右江中游石漠化最为严重的中心地带之一的广西平果县果化镇布尧村一带,面积约 3 km²,由多组高低错落的锥状山峰联座组合形成岩溶峰丛洼地地貌,海拔 150 ~ 500 m,为典型的岩溶峰丛山区。区内出露的地层主要有二叠系下统栖霞组(P_{1q})、茅口组(P_{1m})和石炭系上统(C_3)^[16],成土母岩和主要含水层为中厚层状灰岩,地表水系不发育。受人为活动和岩溶地质结构的影响,研究区内石漠化现象严重,土层浅薄,坡地土壤厚度为 0 ~ 60 cm,土被不连续分布,土壤主要为棕褐色石灰土。植被类型单一,主要以稀疏林地、低矮灌草丛为主,耕种地主要以火龙果(*Hylocereus undulatus* Britt)为主,种植面积较大,间种黄豆(*Glycine max*)和花生(*Arachis hypogaea*)等农作物。研究区所设置的 7 个样地为旱耕地土被条件,均为二叠系下统栖霞组地层,地表为散流状表层岩溶带(图 1)。

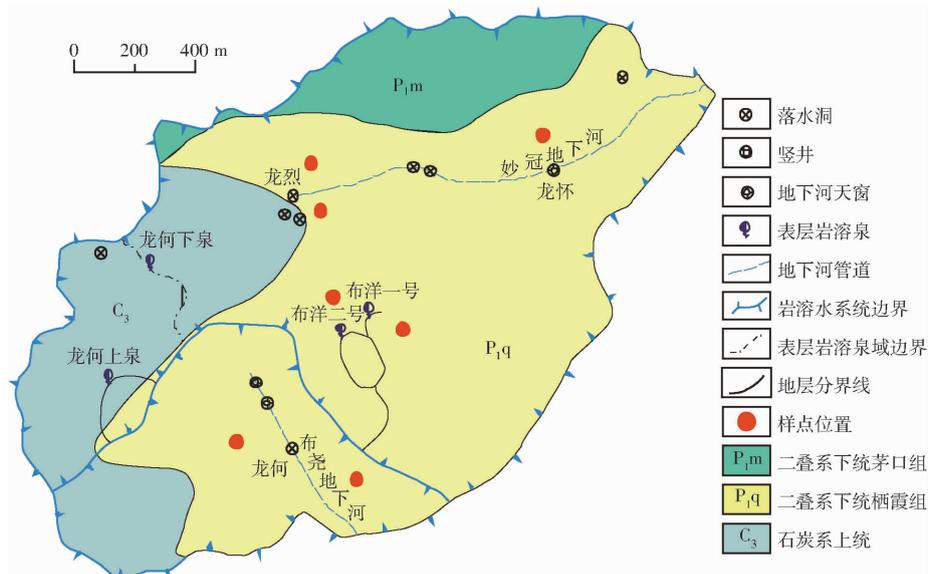


图 1 研究区采样点的环境地质简图

Fig. 1 Schematic environmental geology map of monitoring point in research area

1.2 样品采集与分析

于2015年4—8月在研究区内对7个样地进行野外观测和采样分析,挖开土壤剖面按0~20 cm、20~40 cm 分层采集土壤样品,样品的采集按剖面深度分别选取4~6个样点,分层采集样点土壤混合风干,经研磨过筛后备用。土壤样品测定由广西农业科学院土壤分析检测中心依据《土壤分析技术规范》及常规的方法测定^[17-18]。土壤水由自行研制的渗流土壤水收集器分层进行水样采集^[19],样品由国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心依据地下水标准检验方法进行水化学性质的测定。

1.3 数据处理方法与统计分析

运用Excel 2016、Matlab 7.0和Canoco 5.0等软件对试验数据结果进行统计、分析和作图。其中Excel 2016主要用于描述性统计分析,计算数据的平均值、标准差和变异系数等;Matlab 7.0用于灰色关联分析;Canoco 5.0用于降维对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)和典范对应分析^[20-21]。

2 结果与分析

2.1 岩溶峰丛山区土壤-土壤水地球化学性质的空间变化特征

表1为岩溶峰丛山区土壤性质的空间描述性统计分析,分析结果表明:土壤pH值的变异系数小于10.5%,远低于土壤的其他地球化学指标,说明其空间变化较小;相对而言,土壤速效磷含量和有效锌含

量的变异系数在0~20 cm和20~40 cm均较大,其空间变化较大;全磷含量、pH值、有效锌含量、有效铁含量、有效硼含量、交换性钙含量在0~20 cm的含量的变异系数比20~40 cm的大,而全氮含量、全钾含量、速效氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量、有效铜含量、有效锰含量、交换性镁含量的变异系数则表现相反。从岩溶峰丛山区土壤水的地球化学指标分析结果可知(表2),土壤水pH值的变异系数最小,属于弱变异,而钾离子含量、镁离子含量的变异系数均大于100%;除了镁离子含量和氯离子含量的变异系数表现出0~20 cm小于20~40 cm,土壤水的其他地球化学指标含量的变异系数均表现为0~20 cm大于20~40 cm。由此说明岩溶峰丛山区不同土地利用条件与不同深度土壤-土壤水地球化学性质均存在不同程度的异质性,各地球化学指标值对岩溶峰丛山区的环境条件和人为活动影响的响应程度不尽相同。

2.2 岩溶峰丛山区土壤水地球化学特征的灰色关联分析

以pH值以及 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量等指标作为评价讨论土壤水地球化学特征的指标。按照灰色关联分析的方法,对数据进行标准化后求出各指标关联系数。由分析结果可知(表3),0~20 cm浅层土壤水各指标对土壤水地球化学特征的影响由大到小排序依次为 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、pH值、 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ ,20~40 cm土壤深度的影响排序与浅层土壤相似,

表1 岩溶峰丛山区土壤地球化学的空间描述性统计特征

Tab.1 Descriptive statistical analysis of soil geochemical indicators in karst peak-cluster area

参数	土壤深度 0~20 cm														
	全 N	全 P	全 K	速效 N	速效 P	速效 K	有机质	pH 值	有效 Cu	有效 Zn	有效 Fe	有效 Mn	有效 B	交换性 Ca	交换性 Mg
	质量/质量比/分数/%	质量/质量比/分数/%	质量/质量比/分数/%	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)		(mg·kg ⁻¹)	(cmol·kg ⁻¹)					
最小值	0.30	0.04	0.78	112.00	3.00	40.00	37.60	6.15	11.80	0.42	5.28	12.78	0.06	4.56	0.63
最大值	0.82	0.26	2.15	567.00	37.00	110.00	94.71	8.36	43.48	21.77	57.44	56.19	0.33	20.78	3.40
均值	0.51	0.11	1.49	245.00	9.00	68.43	55.51	7.28	27.00	5.48	19.17	27.72	0.14	11.02	1.86
标准差	0.24	0.08	0.55	152.62	12.48	23.73	21.00	0.76	14.75	8.18	18.29	14.56	0.09	7.01	1.10
变异系数/%	46.40	71.29	37.07	62.29	138.63	34.68	37.84	10.44	54.63	149.23	95.41	52.54	62.36	63.58	59.00
参数	土壤深度 20~40 cm														
	全 N	全 P	全 K	速效 N	速效 P	速效 K	有机质	pH 值	有效 Cu	有效 Zn	有效 Fe	有效 Mn	有效 B	交换性 Ca	交换性 Mg
	质量/质量比/分数/%	质量/质量比/分数/%	质量/质量比/分数/%	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)		(mg·kg ⁻¹)	(cmol·kg ⁻¹)					
最小值	0.08	0.03	0.71	70.00	2.00	17.00	18.91	7.02	6.97	0.30	3.58	5.84	0.06	3.48	0.08
最大值	0.68	0.23	2.26	406.00	40.00	94.00	64.41	8.40	38.68	7.92	13.59	23.02	0.18	19.30	2.87
均值	0.35	0.10	1.45	185.00	9.43	47.29	34.00	7.52	22.24	2.12	7.71	10.28	0.08	11.10	1.52
标准差	0.19	0.07	0.54	124.62	13.73	24.19	15.41	0.45	13.69	3.00	4.08	6.03	0.05	6.83	1.20
变异系数/%	53.37	68.81	37.56	67.36	145.66	51.16	45.33	6.03	61.54	141.58	52.92	58.63	62.21	61.53	78.91

表 2 岩溶峰丛山区土壤水地球化学的空间描述性统计特征

Tab. 2 Descriptive statistical analysis of soil water geochemical indicators in karst peak-cluster area

土壤水深度 0 ~ 20 cm								
参数	pH 值	K ⁺ 质量	Na ⁺ 质量	Ca ²⁺ 质量	Mg ²⁺ 质量	Cl ⁻ 质量	SO ₄ ²⁻ 质量	HCO ₃ ⁻ 质量
		浓度/ (mg·L ⁻¹)	浓度/ (mg·L ⁻¹)					
最大值	7.84	7.40	6.90	110.90	27.15	12.93	86.30	327.84
最小值	6.54	0.01	0.12	5.38	0.65	1.05	3.30	172.52
均值	7.39	0.58	1.28	48.05	7.67	3.57	23.39	134.88
标准差	0.32	1.26	1.37	22.67	8.44	3.20	19.66	94.96
变异系数/%	4.30	215.57	106.72	47.17	110.07	89.70	84.06	70.40
土壤水深度 20 ~ 40 cm								
参数	pH 值	K ⁺ 质量	Na ⁺ 质量	Ca ²⁺ 质量	Mg ²⁺ 质量	Cl ⁻ 质量	SO ₄ ²⁻ 质量	HCO ₃ ⁻ 质量
		浓度/ (mg·L ⁻¹)	浓度/ (mg·L ⁻¹)					
最大值	7.78	3.10	5.00	98.79	35.89	34.93	66.34	359.30
最小值	6.99	0.01	0.12	8.40	0.54	0.91	4.88	27.56
均值	7.46	0.44	1.09	48.94	8.28	5.60	23.26	142.06
标准差	0.19	0.63	1.00	21.00	9.88	7.37	17.35	89.43
变异系数/%	2.48	143.48	92.03	42.90	119.29	131.79	74.58	62.95

表 3 岩溶峰丛山区土壤水地球化学指标的灰色关联系数

Tab. 3 Grey correlation coefficient analysis of soil water geochemical indicators in karst peak-cluster area

样地深度/cm	pH 值	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
0 ~ 20	0.34	0.33	0.33	0.46	0.33	0.33	0.39	1.00
	0.36	0.33	0.34	0.59	0.34	0.35	0.54	0.91
	0.36	0.33	0.34	0.93	0.34	0.36	0.71	0.54
	0.35	0.33	0.34	0.46	0.34	0.34	0.39	1.00
	0.34	0.33	0.33	0.40	0.35	0.34	0.35	1.00
	0.37	0.33	0.34	0.51	0.38	0.35	0.38	0.90
	0.34	0.33	0.33	0.38	0.35	0.33	0.34	1.00
	平均值	0.35	0.33	0.34	0.53	0.35	0.34	0.44
20 ~ 40	0.35	0.33	0.33	0.45	0.33	0.34	0.38	1.00
	0.35	0.33	0.34	0.61	0.34	0.36	0.44	0.91
	0.35	0.33	0.34	0.69	0.34	0.36	0.61	0.81
	0.35	0.33	0.34	0.45	0.34	0.35	0.40	1.00
	0.34	0.33	0.33	0.40	0.35	0.35	0.35	1.00
	0.36	0.33	0.33	0.39	0.35	0.34	0.36	1.00
	0.34	0.33	0.33	0.38	0.35	0.33	0.34	1.00
	平均值	0.35	0.33	0.33	0.48	0.34	0.35	0.41

仅 Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻ 排序略有不同。总体而言,岩溶峰丛山区土壤水的 HCO₃⁻、Ca²⁺、SO₄²⁻ 含量对土壤水地球化学特征的影响程度较大,其他指标的影响程度较为接近且普遍较小,由此也说明了 HCO₃⁻、Ca²⁺ 含量等土壤水地球化学指标与表层岩溶动力系统的岩溶作用密切相关,碳、水、钙循环的物质和能量传输过程是推动表层岩溶土壤系统岩溶作用的重要动力。

2.3 岩溶峰丛山区土壤环境质量的灰度关联分析

以土壤全氮含量(TN)、全钾含量(TK)、全磷含量(TP)、速效氮含量(AN)、速效磷含量(AP)、速效

钾含量(AK)、有机质含量(OM)、pH 值和土壤腐殖质中的胡敏酸含量(HA)、富里酸含量(FA)、胡敏素含量(HM)等指标作为综合评价土壤环境质量的指标。由表 4 的灰度关联分析结果可知,峰丛山区土壤地球化学指标对土壤环境质量的影响各不相同;0 ~ 20 cm 浅层土壤各地球化学指标对土壤环境质量的影响能力由大到小依次为 TN、HA、AK、FA、TK、pH 值、OM、HM、TP、AN、AP,而 20 ~ 40 cm 深度指标影响由大到小排序为 pH 值、TK、TN、HA、TP、AK、FA、AP、HM、AN、OM;0 ~ 20 cm 浅层土壤各地球化学指标对土壤质量的影响程度相差较大,其中 TN、

HA、AK、FA、TK、pH 值对土壤质量的影响较大,相对而言,除了 pH 值和 TK 含量的影响较大外,20 ~ 40 cm 深度土壤其他各地球化学指标对土壤质量的

影响程度较为接近,说明随着土壤深度的增加,土壤环境质量受单一地球化学指标的影响不突出,而是趋向于受土壤地球化学指标的综合影响。

表 4 岩溶峰丛山区土壤环境质量的灰度关联系数

Tab. 4 Grey correlation coefficient of soil geochemical indicators in karst peak-cluster area

样地深度/cm	TN	TP	TK	AN	AP	AK	OM	pH 值	HA	FA	HM
0 ~ 20	0.91	0.35	0.34	1.00	0.34	0.41	0.58	0.33	0.33	0.33	0.33
	0.42	0.42	0.49	0.37	0.35	1.00	0.40	0.51	0.70	0.36	0.45
	0.43	1.00	0.49	0.35	0.86	0.59	0.41	0.41	0.57	0.52	0.45
	0.69	0.42	0.34	0.46	0.35	0.50	0.55	0.76	1.00	0.80	0.56
	0.44	0.51	0.87	0.39	0.37	0.50	0.41	0.53	0.62	0.44	0.45
	0.43	0.37	0.61	0.42	0.34	0.40	0.43	0.42	0.51	0.52	0.48
	1.00	0.35	0.79	0.42	0.34	0.61	1.00	0.97	0.53	1.00	1.00
平均值	0.62	0.49	0.56	0.49	0.42	0.57	0.54	0.56	0.61	0.57	0.53
20 ~ 40	0.41	0.33	0.33	0.35	0.34	0.33	0.37	0.56	0.33	0.33	0.33
	0.45	0.44	0.52	0.35	0.39	0.74	0.36	0.56	0.36	0.40	0.41
	0.40	0.76	0.51	0.38	1.00	0.44	0.35	0.45	0.42	0.42	0.40
	0.74	0.42	0.34	0.49	0.35	0.47	0.56	0.58	0.93	0.54	0.59
	0.33	0.48	1.00	0.33	0.35	0.41	0.33	0.58	0.38	0.38	0.38
	0.43	0.36	0.61	0.37	0.33	0.38	0.37	0.46	0.37	0.50	0.42
	0.51	0.35	0.53	0.61	0.34	0.39	0.43	1.00	0.46	0.56	0.47
平均值	0.47	0.45	0.55	0.41	0.44	0.45	0.39	0.60	0.47	0.45	0.43

2.4 土壤水地球化学特征对土壤环境因子响应程度的典范对应分析

2.4.1 排序模型的选择及其可靠性分析

先利用 Canoco 5.0 软件对岩溶峰丛山区土壤水地球化学指标进行降趋对应分析,DCA 分析结果显示 4 个排序轴中梯度最大值(即第一排序轴)大于 4,说明单峰模型比线性模型更适合用于分析岩溶峰丛山区土壤水地球化学特征与土壤环境的响应关系。分别将土壤养分(全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质的含量和 pH 值)、土壤中微量元素有效态和交换态含量(交换性钙 ECa、交换性镁 EMg、有效铜 ACu、有效铁 AFe、有效锌 AZn、有效锰 AMn、有效硼 AB)、土壤机械和腐殖质组成(0.2 ~ 2.0 mm 粒径、0.02 ~ 0.20 mm 粒径、0.002 ~ 0.020 mm 粒径、小于 0.002 mm 粒径、土壤含水率、胡敏酸含量、富里酸含量、胡敏素含量)作为 3 类土壤环境因子,分别与土壤水地球化学指标进行典范对应分析。由单峰模型中的约束性排序方法的排序图判图规则

进行相关关系的判断。

通过 CCA 排序分析讨论土壤环境特征和土壤水地球化学特征之间的关系,其响应关系研究结果如表 5 所示,典范对应分析排序轴第一轴和第二轴的特征值变化范围分别为 0.361 ~ 0.381、0.092 ~ 0.100,土壤水地球化学指标与土壤环境因子排序轴的相关系数均大于或等于 0.940,用蒙特卡拟合(Monte Carlo permutation test)对其关系的显著性进行检验的结果值范围为 0.002 ~ 0.008,且第一和第二排序轴对土壤水地球化学性质的解释量分别大于等于 51.50% 和 13.12%,对土壤与土壤水地球化学性质之间关系的累计百分比变化率大于 62.3%,第一轴和第二轴相关关系分别为趋近于零的 0.020、0.013 和 0.040 而表现出两轴几近于垂直的关系,以上分析结果说明典范对应分析能可靠地反映土壤水的地球化学指标值随土壤地球化学环境因子的变化趋势,可通过前 2 个排序轴的二维排序图来分析讨论土壤水地球化学特征对土壤环境因子的响应。

表 5 土壤水地球化学性质与土壤环境因子的 CCA 分析

Tab. 5 CCA results of soil water geochemical indicators and soil environmental factors

环境因子类别	排序轴	特征值	相关系数	排序轴对土壤水的解释量/%	累计百分比变化率/%
土壤养分	第一轴	0.381	0.987	54.35	62.3
	第二轴	0.100	0.974	14.27	78.6
土壤中微量元素含量	第一轴	0.361	0.955	51.50	68.5
	第二轴	0.094	0.942	13.41	86.3
土壤机械和腐殖质组成	第一轴	0.379	0.977	54.07	64.3
	第二轴	0.092	0.940	13.12	79.9

2.4.2 土壤养分环境因子对土壤水地球化学特征的影响

由图 2 中 CCA 排序分析的结果说明土壤养分的 8 个环境因子对土壤水地球化学性质的空间分布特征都表现出了不同程度的影响,由箭头连线长度可判断出土壤养分的速效钾对土壤水地球化学性质的影响最大,全氮的影响最小。由线段箭头所在的象限可知,土壤养分环境因子与土壤水地球化学特征的第一排序轴正相关的由大到小排序依次为全钾含量、pH 值、全氮含量、有机质含量、速效氮含量,对应的相关系数分别为 0.45、0.42、0.31、0.30、0.18;负相关的由大到小排序依次为速效钾含量、全磷含量、速效磷含量。由此可以得出土壤养分环境因子与土壤水地球化学性质第一排序轴的相关性由大到小依次为速效钾含量、全钾含量、pH 值、全磷含量、有机质含量、速效氮含量、速效磷含量、全氮含量。土壤养分环境因子与土壤水地球化学性质第二排序轴的相关性由大到小排序依次为速效钾含量、全钾含量、速效氮含量、速效磷含量、pH 值、全氮含量、全磷含量、有机质含量,由此说明速效钾含量、全钾含量、pH 值和速效氮含量是影响土壤水地球化学特征的主要土壤养分因子,结合研究区施肥情况的走访调查分析可知,受人工施用钾肥影响下的土壤速效钾和全钾的含量对土壤水地球化学特征的影响最大。

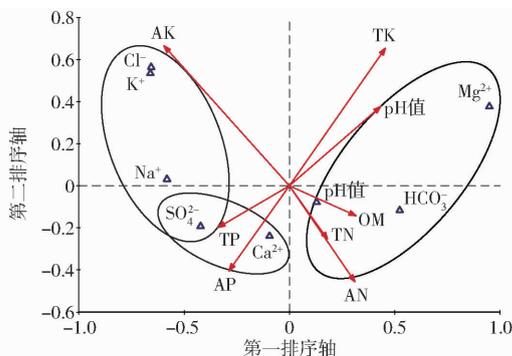


图 2 土壤水地球化学特征与土壤养分因子的 CCA 二维排序图

Fig. 2 Two-dimensional sorting diagram of CCA for soil water geochemical indicators and soil nutrients environmental factors

将土壤水地球化学性质指标值分别垂直投影到主要的土壤养分环境因子线段及其延长线上,则得出土壤水地球化学指标对速效钾的适应值由大到小依次为 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、pH 值、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} ,而对全钾的适应值由大到小依次为 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH 值、 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} ,对 pH 值的适应值大小与全钾相近,对速效氮的适应值由大

到小依次为 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、pH 值、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 。由此可知,土壤水中的 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、pH 值地球化学指标适应于含量较高的全钾、pH 值、有机质、总氮、速效氮和含量较低的全磷、速效磷、速效钾土壤养分环境中;土壤水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 更适应于含量较高的速效钾、全磷、速效磷土壤养分环境中,而土壤水中的 Ca^{2+} 则更适应含量较高的全磷、速效磷和含量较低的全钾、pH 值土壤养分环境中。总体而言,土壤中的速效钾主要通过影响 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 的质量浓度等指标进而影响土壤水地球化学特征,而全钾和 pH 值则对土壤水地球化学指标中的 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的质量浓度和 pH 值等影响较大。

2.4.3 土壤中微量元素含量与土壤水地球化学特征的相关联分析

由土壤中微量元素有效态和交换态含量与土壤水地球化学特征的 CCA 排序分析结果可知(图 3),土壤交换性镁含量对土壤水地球化学特征的影响最大,有效铁、锰、硼含量的影响非常弱,与土壤水地球化学特征的第一排序轴相关关系由大到小排序依次为 EMg、AZn、ACu、ECa、AFe、AB、AMn,对应的相关系数分别为 0.83、0.54、-0.29、0.12、0.06、-0.04、-0.01。土壤中微量元素有效态与交换态含量与第二排序轴的相关系数整体比第一排序轴小,其由大到小排序依次为 ACu、AFe、AZn、EMg、AMn、AB、ECa,其中有效硼和交换性钙含量的影响非常小。根据以上分析可知土壤中微量元素中的交换性镁、有效锌、有效铜含量对土壤水地球化学特征的影响较大。

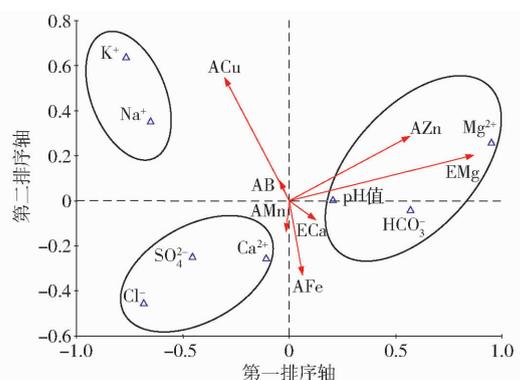


图 3 土壤水地球化学特征与土壤中微量元素因子的 CCA 二维排序图

Fig. 3 Two-dimensional sorting diagram of CCA for soil water geochemical indicators and soil medium and microelements environmental factors

进一步分析土壤水化学指标对交换性镁、有效锌、有效铜含量的适应值可知, Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH

值、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 对交换性镁含量的适应值依次降低,即响应相关关系依次减小;对有效锌含量的响应关系由大到小排序依次为 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH值、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ;对土壤有效铜因子的适应值则按从大到小排序表现为 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、pH值、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 。同时按土壤水地球化学指标的分布位置分析其对土壤中微量元素有效态和交换态含量的适应值可知,土壤水中的 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH值较适应于含量较高的交换性镁、有效锌、交换性钙、有效铁和含量较低的有效铜、硼、锰土壤中微量元素环境; K^+ 、 Na^+ 对含量较高的有效铜、硼和含量较低的交换性镁、有效锌土壤环境的适应性较好; Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 对含量较高的有效铁和含量较低的交换性镁、有效锌土壤环境的适应性较好。由此可知,土壤交换性镁、有效锌主要影响土壤水地球化学指标中的 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 含量和pH值,而土壤有效铜则主要对土壤水中的 K^+ 、 Na^+ 含量产生影响。

2.4.4 土壤水地球化学特征对土壤机械与腐殖质组成因子的响应分析

由于土壤腐殖质具有较好的黏结性,是团粒结构形成的良好胶结剂,对土壤的结构有一定的影响,因此将土壤腐殖质的3种重要组成成分与土壤机械组成、土壤含水率归类在一起讨论它们与土壤水地球化学性质的相关关系。分析结果显示(图4),土壤机械和腐殖质组成与土壤水地球化学特征第一排序轴的相关关系由大到小依次为土壤含水率、0.2~2.0 mm粒径、小于0.002 mm粒径、0.002~0.020 mm粒径、FA、0.02~0.20 mm粒径、HM、HA,对应的相关系数分别为-0.799、0.705、-0.568、0.441、0.419、0.364、0.244、-0.107,土壤含水率与第一排序轴的相关关系最大,呈显著负相关,这符合土壤水地球化学指标值浓度随土壤含水率增加而降低的客观现象;土壤机械和腐殖质组成与土壤水地球化学特征第二排序轴的相关关系由大到小依次为HA、HM、0.002~0.020 mm粒径、小于0.002 mm粒径、0.02~0.20 mm粒径、FA、土壤含水率、0.2~2.0 mm粒径,胡敏酸与第二排序轴呈显著正相关关系,相关系数为0.736。相关系数大小与第一轴的差别不大,但是大小排序的前后指标却呈相反的方向,由此说明土壤机械和腐殖质组成的各项指标对土壤水地球化学特征指标的影响比较复杂且具有多重影响性,因此需要对土壤含水率、0.2~2.0 mm粒径、HA、HM、0.002~0.020 mm粒径、小于0.002 mm粒径6个指标与土壤水地球化学性质进行适应值分析。

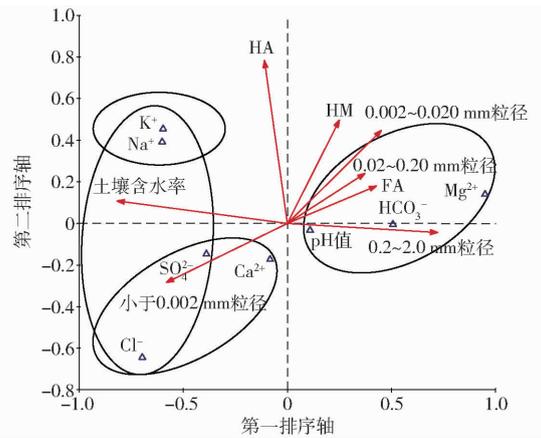


图4 土壤水地球化学特征与土壤腐殖质和机械组成因子的CCA二维排序图

Fig. 4 Two-dimensional sorting diagram of CCA for soil water geochemical indicators and soil humus and mechanical composition factors

适应值分析结果表明,土壤含水率对土壤水地球化学性质指标的影响由大到小依次为 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、pH值、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} ;0.2~2.0 mm粒径的影响由大到小顺序为 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH值、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- ;HA的影响由大到小表现依次为 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、pH值、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- ;HM的影响由大到小顺序依次为 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、pH值、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ;0.002~0.020 mm粒径的影响由大到小排序则为 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH值、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- ;小于0.002 mm粒径的影响由大到小顺序依次为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、pH值、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 。pH值、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 较适应于0.2~2.0 mm粒径、HM、0.002~0.020 mm粒径含量较大和土壤含水率、HA、小于0.002 mm粒径含量较小的土壤环境中, Na^+ 、 K^+ 更适应于土壤含水率、小于0.002 mm粒径、HA含量高的土壤机械与腐殖质环境中, Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 则对小于0.002 mm粒径含量较大的土壤环境的适应性更强。总体而言,0.2~2.0 mm粒径、HM、0.002~0.020 mm粒径对土壤水地球化学指标中的 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 浓度和pH值具有较强的相关性影响,土壤含水率和小于0.002 mm粒径对土壤水地球化学指标中的 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的浓度具有较大影响,HA和HM对土壤水地球化学指标中的 Na^+ 、 K^+ 浓度具有较大影响。

3 讨论

岩溶峰丛山区土壤-土壤水地球化学性质存在空间变异特征,这与前人的研究相一致^[22-24]。灰度

关联分析的结果说明 HCO_3^- 在土壤水地球化学特征指标中处于主导地位,在岩溶动力系统的碳-水-钙迁移循环中发挥着重要作用^[25-26]。以土壤中的养分、微量元素、机械与腐殖质组成等作为 3 类土壤环境因子,通过典范对应分析研究土壤水地球化学性质对土壤环境因子的响应,不但获得了土壤与土壤水的性质指标之间的相关关系,还能深入探讨影响土壤水地球化学特征的主要土壤环境因子所对应的的影响指标及影响大小。分析的结果说明典范对应分析可较好地应用在土壤水地球化学性质与土壤环境因子的相关关系研究中。

CCA 分析的结果显示土壤水中 Ca^{2+} 与影响土壤水地球化学特征的主要土壤环境因子之间的响应程度较弱,这可能与富钙的岩溶地质背景条件有关^[27-28],此外本文只综合性的对土壤水与土壤环境因子进行典范对应分析,未细分样地的坡度、坡向、土地利用等条件,这些问题有待于进一步的研究。

4 结论

(1)岩溶峰丛山区土壤水地球化学性质与土壤环境指标均存在不同程度的空间异质性,其中土壤水和土壤中 pH 值变异系数最小,能较好地保持岩溶地球化学背景条件下中性偏弱碱的酸碱条件;土壤水地球化学和土壤的其他指标则受植被

条件、人为活动等因素的影响而表现出不同的异质性特征,而且除了镁离子和氯离子,土壤水其他地球化学指标的变异系数均表现为 0 ~ 20 cm 大于 20 ~ 40 cm,说明表层土壤水地球化学性质更易受环境条件的影响。

(2)灰度关联分析结果表明,全氮、胡敏酸、速效钾、富里酸、全钾的含量和 pH 值对土壤环境质量的影响较大,且随着土壤深度的增加,土壤环境质量趋向于受土壤地球化学指标的综合影响;而岩溶峰丛山区土壤水的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量对土壤水地球化学特征的影响程度较大,由此也说明了土壤水与表层岩溶动力系统的碳、水、钙的物质和能量传输作用密切相关。

(3)CCA 研究结果显示,土壤速效钾、全钾、交换性镁、有效锌、有效铜、胡敏酸的含量以及土壤含水率、0.2 ~ 2.0 mm 粒径和小于 0.002 mm 粒径的土壤机械组成是影响土壤水地球化学特征的主要土壤环境因子,土壤水中的 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 的含量和 pH 值对土壤全钾、交换性镁、有效锌的含量以及 0.2 ~ 2.0 mm 粒径和 0.002 ~ 0.020 mm 粒径的土壤颗粒等因子的响应程度较大,有效铜、胡敏酸、胡敏素的含量对土壤水中 Na^+ 、 K^+ 浓度的影响较大,而速效钾含量、土壤含水率、小于 0.002 mm 粒径机械组成则主要是通过 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度影响土壤水的地球化学特征。

参 考 文 献

- 蒋忠诚,罗为群,童立强,等. 21 世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461 - 468.
JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, TONG Liqiang, et al. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of southwest China in the 21st century[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 461 - 468. (in Chinese)
- JIANG Zhongcheng, LIAN Yanqing, QIN Xiaoqun. Rocky desertification in southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(3): 1 - 12.
- 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): 1400 - 1405.
YUE Yuemian, WANG Kelin, ZHANG Wei, et al. Relationships between soil and environment in peak-cluster depression areas of karst region based on canonical correspondence analysis[J]. Environmental Science, 2008, 29(5): 1400 - 1405. (in Chinese)
- 杨奇勇,张发旺. 西南岩溶盆地土壤干容重协同克里格分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 126 - 131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150219&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.019.
YANG Qiyong, ZHANG Fawang. Cokriging analysis on soil bulk density in karst basin of southwest China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 126 - 131. (in Chinese)
- 李文军,杨奇勇,彭保发,等. 西南岩溶区土壤全氮含量的空间变异分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 150 - 154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140925&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.025.
LI Wenjun, YANG Qiyong, PENG Baofa, et al. Spatial variability of total soil nitrogen content in karst area of southwest China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 150 - 154. (in Chinese)
- 刘月娇,张洋,倪九派,等. 基于地统计学烟区土壤养分及 pH 值空间异质性分析[J]. 中国岩溶, 2014, 33(3): 319 - 325.
LIU Yuejiao, ZHANG Yang, NI Jiupai, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and pH in tobacco area based on geostatistics: a case study in a karst area of Youyang county, Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(3): 319 - 325. (in Chinese)
- 吴敏,刘淑娟,叶莹莹,等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1619 - 1627.
WU Min, LIU Shujuan, YE Yingying, et al. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a karst peak-cluster depression area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 1619 - 1627. (in Chinese)

- 8 徐慧芳,宋同清,黄国勤,等.喀斯特峰丛洼地区坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征[J].生态学报,2014,34(18):5311-5319.
XU Huifang, SONG Tongqing, HUANG Guoqin, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture under different land use types in a typical karst hill region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(18): 5311-5319. (in Chinese)
- 9 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
ZHANG Chuan, CHEN Hongsong, ZHANG Wei, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on karst slopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1585-1591. (in Chinese)
- 10 邓艳,曹建华,蒋忠诚,等.西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被关键技术进展与建议[J].中国岩溶,2016,35(5):476-485.
DENG Yan, CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, et al. Advancement in key technologies for comprehensive treatment of water, soil and vegetation resources in karst rocky desertification areas[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 476-485. (in Chinese)
- 11 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J].地球学报,2014,35(5):535-542.
JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, DENG Yan, et al. The leakage of water and soil in the karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(5): 535-542. (in Chinese)
- 12 覃星铭,蒋忠诚,马祖陆,等.岩溶峰丛坡面土壤养分与水化学特征研究[J].中国水土保持,2012(3):26-30.
QIN Xingming, JIANG Zhongcheng, MA Zulu, et al. Research on the slope soil nutrient and water chemical characteristics of karst peak-cluster[J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(3): 26-30. (in Chinese)
- 13 吴华英,覃星铭,蒋忠诚,等.桂林会仙岩溶作用对石灰土壤水锌离子浓度的影响[J].农业现代化研究,2009,30(6):761-765.
WU Huaying, QIN Xingming, JIANG Zhongcheng, et al. Effect of karstification on concentration of Zn^{2+} in lime soil water at Huixian Guilin[J]. Research of Agricultural Modernization, 2009, 30(6):761-765. (in Chinese)
- 14 王宇飞,赵秀兰,何丙辉,等.汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J].环境科学,2015,36(3):922-927.
WANG Yufei, ZHAO Xiulan, HE Binghui, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake[J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 922-927. (in Chinese)
- 15 张莹,刘畅,宋昂,等.基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究[J].中国岩溶,2016,35(1):11-18.
ZHANG Ying, LIU Chang, SONG Ang, et al. Relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities in Huixian karst wetland system based on canonical correspondence analysis[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(1): 11-18. (in Chinese)
- 16 劳文科,祁晓凡,刘慧敏,等.广西果化龙何地区表层带岩溶水系统及其水资源特征[J].中国岩溶,2008,27(2):122-128.
LAO Wenke, QI Xiaofan, LIU Huimin, et al. Characters of epikarst water system and water resources in Longhe, Guohua, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2008,27(2):122-128. (in Chinese)
- 17 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:263-282.
- 18 鲁如坤.土壤化学分析[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- 19 中国地质科学院岩溶地质研究所.渗流土壤水收集器:中国,201120118981[P].2011-04-21.
- 20 BRAAK T, CAJO J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5):1167-1179.
- 21 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2004:157-164.
- 22 张伟,刘淑娟,叶莹莹,等.典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J].农业工程学报,2013,29(1):93-101.
ZHANG Wei, LIU Shujuan, YE Yingying, et al. Spatial variability of soil nutrients and its influencing factors in typical karst virgin forest[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1):93-101. (in Chinese)
- 23 胡忠良,潘根兴,李恋卿,等.贵州喀斯特山区不同植被下土壤C、N、P含量和空间异质性[J].生态学报,2009,29(8):4187-4195.
HU Zhongliang, PAN Genxing, LI Lianqing, et al. Changes in pools and heterogeneity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation types in karst mountainous area of central Guizhou Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8):4187-4195. (in Chinese)
- 24 朱晓锋,陈洪松,付智勇.喀斯特灌丛坡地土壤-表层岩溶带产流及氮素流失特征[J].应用生态学报,2017,28(7):2197-2206.
ZHU Xiaofeng, CHEN Hongsong, FU Zhiyong, et al. Runoff and nitrogen loss characteristics in soil-epikarst system on a karst shrub hillslope[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2197-2206. (in Chinese)
- 25 袁道先.我国岩溶资源环境领域的创新问题[J].中国岩溶,2015,34(2):98-100.
YUAN Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2):98-100. (in Chinese)
- 26 袁道先,章程.岩溶动力学的理论探索与实践[J].地球学报,2008,29(3):355-365.
YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. Karst dynamics theory in China and its practice[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3): 355-365. (in Chinese)
- 27 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.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing. Some soil features in karst ecosystem[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(1): 37-44. (in Chinese)
- 28 李忠云,魏兴琥,李保生,等.粤北岩溶峰丛自然坡面土壤钙元素的空间分布[J].水土保持通报,2016,36(3):62-68.
LI Zhongyun, WEI Xinghu, LI Baosheng, et al. Spatial distribution of soil calcium on natural slope of karst peak-cluster in northern Guangdong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 62-68. (in Chinese)