

黄晨元,刘建祥,张叶飞,等.典型石漠化地区旱雨季土壤理化性质与腐殖质结合态分布特征[J].江苏农业科学,2022,50(13):232-241.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.13.035

典型石漠化地区旱雨季土壤理化性质 与腐殖质结合态分布特征

黄晨元¹,刘建祥²,张叶飞²,秀 洁²

(1.西南林业大学地理与生态旅游学院,云南昆明 650224; 2.西南林业大学生态与环境学院/石漠化研究院,云南昆明 650224)

摘要:以云南省典型石漠化地区土壤为研究对象,分别测定和分析研究区旱季和雨季 4 个石漠化程度土壤的腐殖质结合态分布特征和理化指标之间的相互关系。结果表明,无论旱雨季,土壤的理化指标均按照石漠化程度的变化呈现规律变化。随石漠化程度的增加,黏粒、粉粒含量及饱和持水量、毛管持水量和田间持水量呈递减趋势,沙粒含量和容重变化规律相反;土壤氮素、磷素、钾素、有机碳及 4 种结合态有机碳含量减少,pH 值增加。土壤腐殖质以松、紧结合态为主。雨季除土壤黏粒外其余物理指标较旱季均有所增加,土壤养分含量较旱季均减少。相关性分析表明,全氮、总有机碳、全磷与 4 种腐殖质结合态相互之间存在极显著正相关,且均与石漠化程度有明显的相关性。上述研究表明,土壤理化指标、结合态腐殖质含量能较好地反映石漠化程度,研究结果为判断石漠化程度提供了以土壤理化性质及其变化规律作为参考依据的新途径,同时也为生态恢复提供数据参考。

关键词:石漠化;腐殖质结合态;土壤理化性质;相关性

中图分类号:S151.9;S181;X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)13-0232-10

石漠化是脆弱环境下自然因素和人为因素共同作用的结果^[1],是我国西南地区的灾祸之源、贫困之因、落后之根^[2],严重制约着区域经济社会发展^[3-4]。据 2018 年石漠化公报显示,我国岩溶地区石漠化土地总面积为 1 007 万 hm^2 ,而云南省石漠化土地面积约 235 万 hm^2 ,高居全国第 2 位,另有潜在石漠化土地面积约 204 万 hm^2 ^[5]。石漠化治理虽取得一定成效^[6],但“十四五”规划政策背景下^[7],防治形势依然严峻。云南省地处喀斯特高原,区域生态环境脆弱,加之人类不合理的土地利用,致省内石漠化问题加剧^[8]。此等背景条件下,对石漠化地区进行相关研究,深入了解石漠化发生机理,深度分析石漠化演变过程,对社会经济的发展及生态环境的建设十分重要。

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,更是石漠化问题发生的关键所在^[9]。土壤中腐殖质除少部分以游离态存在外,大部分与土壤矿质颗粒形成

有机无机复合体,呈结合态存在,由于结合的方式和松紧程度不一,可分为松结态、联结态、稳结态、紧结态腐殖质^[10]。土壤中的腐殖质能调节土壤肥力、改善土壤结构和性质,在土壤养分循环和农业生态系统稳定平衡方面发挥着显著作用^[11-12]。土壤腐殖质组成对于鉴别发生土类的性质及培肥具有重要参考价值^[13]。因此,研究土壤腐殖质结合态,对于提高石漠化地区土壤肥力及促进农业的发展具有积极作用。

目前石漠化地区土壤的理化性质受到业界学者的广泛关注^[9,14-15]。颜萍等发现随着石漠化程度的加强,土壤有机质、氮素、磷素、钾素含量有降低的趋势^[16]。盛茂银等通过对西南典型喀斯特石漠化生态系统土壤研究发现,土壤理化指标并不是严格按照石漠化等级呈规律变化,而是呈现先退化后改善的过程^[17]。吴丽芳等研究发现,结合碳氮磷生态化学计量和土壤酶活性特征,喀斯特高原石漠化区土壤质量的主要限制因子是全氮含量^[8]。金秋珠等研究发现,研究区内土壤有机质、土壤全磷含量和土壤有效钾含量无显著差异,土壤含水量、土壤有效磷含量和土壤 pH 值存在显著差异^[18]。迄今为止,针对石漠化地区旱雨季理化性质对比的研究较少,关于石漠化地区土壤腐殖质结合态的相关研究也很少报道。本研究以高原岩溶石漠化地

收稿日期:2021-08-27

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(编号:31901206);云南省科学技术厅农业联合专项(2018FG001-078,2018FG001-050)。

作者简介:黄晨元(1997—),男,湖北武汉人,硕士研究生,从事石漠化生态恢复研究。E-mail:1657852351@qq.com。

通信作者:刘建祥,博士,副教授,从事生态环境保护和恢复研究。
E-mail:liujxswfu@163.com。

区为研究对象,测定不同石漠化程度早雨季土壤腐殖质结合态分布特征、土壤养分和粒径分布特征及其相互之间的相关性,揭示石漠化地区腐殖质结合态、土壤养分及粒径之间的内在联系,旨在通过系统分析不同石漠化程度土壤理化性质差异反映此地区土壤状况并预测石漠化演变趋势,完善相关理论成果,为石漠化地区生态恢复和农业可持续发展提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于云南省昆明市石林圭山国家森林公园内(24°26'N,103°20'E),海拔 1 739 ~ 1 856 m,总面积为 3 206 hm²,属亚热带低纬高原山地气候,年降水量为 970 mm,年平均气温为 14 ℃,年平均无霜期为 210 d。样地以石灰岩为主,土壤类型主要为红壤、黄棕壤,土壤偏酸性。区内由于其受高原亚热带季风影响,形成了主要以云南松(*Pinus yunnanensis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、紫茎泽兰

(*Ageratina adenophora*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)等为主的植被类型。其中,重度石漠化区域植被覆盖率低,岩石间隙处覆盖有草本植被,土层中多含石块。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与样品采集 在前期调研的基础上,依据张信宝等的西南岩溶山地坡地石漠化分类标准^[19],选取研究区潜在、轻度、中度、重度石漠化等 4 种石漠化程度进行研究。分别于 2020 年 7 月(研究区为雨季)和 2021 年 4 月(研究区为旱季)进行采样,每种石漠化程度选择 3 个典型代表性样地,样地具体情况见表 1,为使后续表格内容显得精简,采用表 1 中石漠化程度对应英文前 2 个字母大写进行表述。每个样地按“S”形采样方式在其中心选择 3 个样点,除去表层枯枝落叶,环刀取土,带回实验室分析土壤物理指标,并采集 3 个 0 ~ 30 cm 的混合土壤,用四分法取 1 kg 土壤带回实验室分析其化学指标。

表 1 样地基本信息

石漠化程度	样地	经度 (E)	纬度 (N)	海拔 (m)	坡度 (°)	坡向	主要植被	裸岩面积 比例(%)
潜在石漠化(PO)	1	103°20'52.08"	24°46'34.68"	1 784	15.7	NW	云南松、白刺、紫茎泽兰、火棘	22
	2	103°20'51.72"	24°46'34.68"	1 791	15.5	NW	云南松、白刺、紫茎泽兰、火棘	24
	3	103°20'52.08"	24°46'34.32"	1 798	16.0	NW	云南松、白刺、紫茎泽兰、火棘	25
轻度(MI)	1	103°20'38.76"	24°46'5.52"	1 856	20.2	W	云南松	30
	2	103°20'38.4"	24°46'5.52"	1 850	20.0	W	云南松	32
	3	103°20'38.76"	24°46'5.52"	1 856	20.2	W	云南松	33
中度(MO)	1	103°20'49.56"	24°46'43.68"	1 798	23.0	SW	云南松、白刺、紫茎泽兰	50
	2	103°20'49.92"	24°46'44.04"	1 767	23.7	SW	云南松、白刺、紫茎泽兰	55
	3	103°20'49.56"	24°46'44.4"	1 739	23.9	W	云南松、白刺、紫茎泽兰	57
重度(SE)	1	103°20'27.6"	24°46'15.24"	1796	28.6	SW	云南松、白刺、紫茎泽兰	80
	2	103°20'27.96"	24°46'14.16"	1 789	28.9	NE	云南松、白刺、紫茎泽兰	82
	3	103°20'29.04"	24°46'13.8"	1 809	26.3	NW	云南松、白刺、紫茎泽兰	83

注:“坡向”一列中,N 表示北;W 表示西;S 表示南;E 表示东。

1.2.2 样品处理与分析 依据《土壤理化分析》^[20]中的要求,去除土壤样品中的枯枝落叶,放在室内阴凉通风处风干,一部分土壤过 1 mm 孔径筛用于土壤物理性质试验,另一部分土壤过 0.25 mm 孔径筛用于土壤化学性质试验。

采用环刀法测定土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、土壤容重;采用电位法测定土壤 pH 值;采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定全磷含

量;采用氢氧化钠碱熔-火焰光度计法测定全钾含量;采用 Bray I 法测定速效磷含量;采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量;采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量;采用重铬酸钾外加热法测定有机碳含量^[21];采用凯氏定氮法测定速效氮含量^[22];采用马尔文激光粒度仪测定土壤粒径^[23-25];采用安德森(Anderson)法测定土壤腐殖质结合态^[10]。为后续研究需要,依据 Heaton 等的方法将土壤有机质

含量换算成土壤有机碳含量,即除以 van bemmelen 因数(1.724)^[24]。

1.3 数据处理与分析

运用 Excel 2019 进行数据处理,用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析、多重比较、皮尔逊相关性等分析,采用 Origin 2019、Excel 2019 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同石漠化程度土壤物理性质分析

2.1.1 土壤粒径特征 土壤粒径特征是组成土壤的重要部分^[26],影响土壤的物理和化学性质^[25],间接作用于土壤的保肥保水能力和通透等性能^[27]。由表 2 可知,不同石漠化程度不论旱季还是雨季,粉粒含量均为最高,沙粒含量最低,且黏粒和粉粒含量均随石漠化程度加深呈递减趋势,沙粒含量变化趋势相反。旱季土壤黏粒含量表现为潜在石漠化极显著大于重度石漠化($P < 0.01$),雨季黏粒含量表现为潜在和轻度石漠化极显著大于重度石漠化($P < 0.01$);旱季不同石漠化程度的土壤粉粒含量存在极显著差异($P < 0.01$),潜在和轻度石漠化下的雨季粉粒含量极显著高于中度、重度石漠化($P < 0.01$);无论旱雨季,不同石漠化程度沙粒含量差异极显著($P < 0.01$)。

无论旱季还是雨季,土壤黏粒含量均随土层深度的增加而增加,沙粒和粉粒含量随土层深度的增加而减少。另外从旱季、雨季对比来看,潜在、轻度、中度、重度石漠化样地雨季黏粒含量分别比旱季低 19.70%、20.71%、18.62%、22.80%;潜在、轻度、中度、重度石漠化样地粉粒含量雨季分别比旱季高 1.76%、1.55%、1.25%、1.79%;潜在、轻度、中度、重度石漠化样地沙粒含量雨季均比旱季高 58.20%、42.53%、23.32%、17.05%。

土壤分形维数能表征土壤颗粒大小,反映土壤结构、肥力和土壤退化程度^[28-29]。土壤分形维数无论旱雨季均随石漠化程度的增加及土层深度的增加大体呈递减趋势。其中,旱季土壤分形维数表现为潜在石漠化极显著高于轻度、中度、重度石漠化($P < 0.01$),雨季土壤分形维数表现为潜在石漠化极显著高于重度石漠化($P < 0.01$),且潜在、轻度、中度、重度石漠化样地雨季土壤分形维数分别比旱季低 5.63%、4.68%、4.69%、1.15%。

2.1.2 土壤容重及持水状况 由表 3 可知,无论旱

季、雨季,土壤容重均随石漠化程度、土层深度的增加而增加,而土壤 3 种持水量(饱和持水量、毛管持水量、田间持水量)均随石漠化程度及土层深度增加呈递减趋势。其中无论旱雨季,潜在石漠化的土壤容重均极显著低于重度石漠化($P < 0.01$);土壤 3 种持水量均表现为潜在石漠化极显著高于重度石漠化($P < 0.01$)。潜在、轻度、中度、重度石漠化样地雨季的土壤容重较旱季分别增加了 6.25%、11.11%、8.94%、6.20%;饱和持水量雨季较旱季分别增加了 3.40%、9.40%、10.30% 和 15.82%;毛管持水量雨季较旱季分别增加了 14.73%、5.57%、5.32% 和 11.73%;田间持水量雨季较旱季分别增加了 79.21%、72.50%、59.65% 和 38.77%,雨季对土壤物理性质变化的规律性影响不明显。

2.2 不同石漠化程度土壤化学性质分析

由表 4 可知,不同石漠化程度土壤养分元素含量无论旱雨季均呈现随石漠化程度的增加而减少的趋势。其中旱季土壤全氮含量表现为潜在、轻度石漠化显著高于中度、重度石漠化($P < 0.05$),旱季速效氮含量表现为潜在、轻度石漠化显著高于重度石漠化($P < 0.05$);雨季全氮含量表现为潜在石漠化极显著高于重度石漠化($P < 0.01$),速效氮含量表现为潜在、轻度石漠化极显著高于中度、重度石漠化($P < 0.01$)。旱季土壤全钾含量表现为潜在、轻度石漠化极显著高于重度石漠化($P < 0.01$),速效钾含量表现为潜在石漠化极显著高于其他 3 种石漠化程度($P < 0.01$);雨季土壤全钾含量表现为潜在石漠化极显著高于轻度、中度和重度石漠化($P < 0.01$),速效钾含量无显著差异($P > 0.05$)。无论旱雨季,土壤全磷含量表现为潜在、轻度石漠化极显著高于中度、重度石漠化($P < 0.01$),旱季土壤速效磷含量表现为潜在、轻度石漠化极显著高于重度石漠化($P < 0.01$),雨季速效磷含量表现为潜在石漠化极显著高于其他 3 种石漠化程度($P < 0.01$)。旱季土壤 pH 值表现为重度石漠化极显著高于潜在、轻度石漠化($P < 0.01$),雨季 pH 值表现为潜在、轻度石漠化极显著低于中度、重度石漠化($P < 0.01$)。无论旱雨季,土壤有机碳含量表现为潜在、轻度石漠化极显著高于中度、重度石漠化($P < 0.01$)。

此外,潜在、轻度、中度、重度石漠化程度下全氮含量雨季较旱季分别减少 22.54%、31.14%、45.45%、50.41%,速效氮含量雨季较旱季分别减少 7.14%、7.69%、39.13%、39.06%,全钾含量雨季较

表 2 不同石漠化程度土壤颗粒的粒径分布与分形维数

石漠化程度	季节	土层深度 (cm)	颗粒组成(%)			分形维数 <i>D</i>
			黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~0.050 mm)	沙粒 (>0.050 mm)	
PO	旱季(DS)	0 ~ 10	15.89 ± 0.30b	80.85 ± 0.96a	3.26 ± 0.99a	2.87 ± 0.02a
		10 ~ 20	16.22 ± 0.41b	80.69 ± 0.71a	3.09 ± 1.10a	2.84 ± 0.01a
		20 ~ 30	17.09 ± 0.95a	79.94 ± 0.48a	2.97 ± 0.74a	2.82 ± 0.03a
		平均值	16.40A	80.49A	3.11D	2.84A
	雨季(RS)	0 ~ 10	12.14 ± 0.21b	82.48 ± 0.28a	5.38 ± 0.34a	2.70 ± 0.01a
		10 ~ 20	12.59 ± 0.42ab	82.19 ± 0.37a	5.22 ± 0.13a	2.68 ± 0.01a
		20 ~ 30	14.77 ± 0.37a	81.06 ± 0.42a	4.17 ± 0.19a	2.67 ± 0.01a
		平均值	13.17A	81.91A	4.92D	2.68A
MI	旱季(DS)	0 ~ 10	14.75 ± 0.25b	80.22 ± 1.77a	5.03 ± 0.85a	2.79 ± 0.05
		10 ~ 20	16.10 ± 0.19ab	79.08 ± 1.40a	4.82 ± 0.58a	2.78 ± 0.04a
		20 ~ 30	16.68 ± 0.93a	78.71 ± 1.24a	4.61 ± 0.89a	2.76 ± 0.02a
		平均值	15.84AB	79.34B	4.82C	2.78B
	雨季(RS)	0 ~ 10	11.24 ± 0.84b	81.05 ± 0.30a	7.71 ± 0.63a	2.71 ± 0.02a
		10 ~ 20	12.60 ± 1.23ab	80.67 ± 0.43a	6.73 ± 0.35a	2.70 ± 0.01a
		20 ~ 30	13.83 ± 1.30a	80.00 ± 1.03a	6.17 ± 0.37a	2.53 ± 0.01b
		平均值	12.56A	80.57B	6.87C	2.65A
MO	旱季(DS)	0 ~ 10	13.60 ± 0.40a	78.48 ± 0.51a	7.92 ± 0.56a	2.79 ± 0.02a
		10 ~ 20	14.63 ± 0.14a	77.50 ± 0.26a	7.87 ± 0.36a	2.78 ± 0.01a
		20 ~ 30	15.75 ± 0.53a	77.27 ± 1.43a	6.98 ± 1.12a	2.75 ± 0.01a
		平均值	14.66AB	77.75C	7.59B	2.77B
	雨季(RS)	0 ~ 10	10.92 ± 0.18b	79.42 ± 0.25a	9.66 ± 0.37a	2.70 ± 0.01a
		10 ~ 20	12.15 ± 0.25ab	78.43 ± 0.61a	9.42 ± 0.56a	2.69 ± 0.01a
		20 ~ 30	12.71 ± 0.35a	78.30 ± 0.41a	8.99 ± 0.14a	2.53 ± 0.02b
		平均值	11.93AB	78.72C	9.36B	2.64A
SE	旱季(DS)	0 ~ 10	12.88 ± 0.75a	76.85 ± 0.27a	10.27 ± 0.96a	2.64 ± 0.01a
		10 ~ 20	13.27 ± 0.65a	76.54 ± 0.42a	10.19 ± 1.17a	2.62 ± 0.01a
		20 ~ 30	14.10 ± 0.31a	76.44 ± 0.80a	9.46 ± 1.03a	2.61 ± 0.01a
		平均值	13.42B	76.61D	9.97A	2.62C
	雨季(RS)	0 ~ 10	9.84 ± 1.02b	78.29 ± 0.96a	11.87 ± 0.27a	2.64 ± 0.01a
		10 ~ 20	10.30 ± 0.95ab	77.99 ± 0.90a	11.71 ± 0.38a	2.57 ± 0.01b
		20 ~ 30	10.93 ± 1.09a	77.65 ± 1.44a	11.42 ± 0.85a	2.56 ± 0.01b
		平均值	10.36B	77.98C	11.67A	2.59B

注:同列数字后不同小写字母表示相同石漠化程度不同土层深度在 0.05 水平上差异显著,不同大写字母表示相同季节不同石漠化程度平均值在 0.01 水平上差异显著。表 3 同。

旱季分别减少 88.23%、89.61%、88.21%、88.65%,速效钾含量雨季较旱季分别减少 62.33%、35.29%、16.15%、10.00%,全磷含量雨季较旱季分别减少 77.05%、76.36%、68.42%、55.56%,速效磷含量雨季较旱季分别减少 98.30%、98.54%、98.46%、97.70%,土壤 pH 值雨季较旱季分别增加 4.66%、4.56%、1.95%、

0.48%,土壤有机碳含量雨季较旱季分别减少 40.80%、42.85%、40.61%、40.07%。

2.3 土壤腐殖质结合态分布特征

由表 5 可知,不论旱雨季,不同石漠化程度土壤 4 种结合态(松结合态、联结合态、稳结合态、紧结合态)有机碳含量均呈现出潜在 >轻度 >中度 >重度石漠化的趋势。不同石漠化程度下,土壤松结合态

表 3 不同石漠化程度土壤物理性质比较

石漠化程度	季节	土层深度 (cm)	土壤容重 (g/cm ³)	饱和持水量 (%)	毛管持水量 (%)	田间持水量 (%)
PO	DS	0 ~ 10	1.09 ± 0.03a	30.08 ± 0.28a	26.57 ± 0.30a	13.77 ± 0.93a
		10 ~ 20	1.10 ± 0.08a	29.83 ± 0.76ab	25.20 ± 0.63b	12.55 ± 0.69a
		20 ~ 30	1.16 ± 0.02a	28.31 ± 0.43b	24.81 ± 0.44b	12.51 ± 0.59a
		平均值	1.12C	29.41A	25.53A	12.94A
	RS	0 ~ 10	1.13 ± 0.01a	31.01 ± 0.84a	29.88 ± 2.56a	23.53 ± 0.27a
		10 ~ 20	1.21 ± 0.05a	30.86 ± 0.50a	29.44 ± 0.43a	23.21 ± 0.38a
		20 ~ 30	1.24 ± 0.08a	29.37 ± 1.12a	28.56 ± 1.02a	22.82 ± 0.79a
		平均值	1.19B	30.41A	29.29A	23.19A
MI	DS	0 ~ 10	1.16 ± 0.06a	28.51 ± 0.85a	25.47 ± 0.48a	12.56 ± 1.39a
		10 ~ 20	1.17 ± 0.02a	27.66 ± 0.79ab	24.07 ± 0.25a	11.98 ± 0.56a
		20 ~ 30	1.18 ± 0.03a	26.51 ± 0.62b	22.03 ± 0.12b	11.79 ± 0.95a
		平均值	1.17BC	27.56AB	23.86A	12.11AB
	RS	0 ~ 10	1.27 ± 0.02b	31.22 ± 0.80a	25.62 ± 0.62a	21.10 ± 0.63a
		10 ~ 20	1.28 ± 0.02b	30.36 ± 1.15a	25.29 ± 0.54a	20.93 ± 0.41a
		20 ~ 30	1.35 ± 0.03a	28.86 ± 1.13a	24.64 ± 1.03a	20.65 ± 0.58a
		平均值	1.30A	30.15A	25.19B	20.89A
MO	DS	0 ~ 10	1.21 ± 0.11a	26.80 ± 0.83a	24.83 ± 0.62a	12.70 ± 0.40a
		10 ~ 20	1.23 ± 0.04a	25.35 ± 0.91ab	23.69 ± 0.37b	11.63 ± 0.89a
		20 ~ 30	1.26 ± 0.02a	23.87 ± 0.50b	22.50 ± 0.28b	11.29 ± 0.85a
		平均值	1.23AB	25.34BC	23.67AB	11.87AB
	RS	0 ~ 10	1.27 ± 0.05b	28.86 ± 0.25a	26.25 ± 0.70a	19.58 ± 0.67a
		10 ~ 20	1.32 ± 0.04ab	28.45 ± 1.23a	24.59 ± 1.46a	19.03 ± 0.56a
		20 ~ 30	1.41 ± 0.07a	26.53 ± 1.66a	23.94 ± 1.89a	18.23 ± 0.50a
		平均值	1.34A	27.95AB	24.93B	18.95AB
SE	DS	0 ~ 10	1.23 ± 0.15a	24.29 ± 0.65a	22.54 ± 0.35a	11.21 ± 0.60a
		10 ~ 20	1.29 ± 0.17a	22.98 ± 0.44ab	20.90 ± 0.43ab	10.07 ± 0.30ab
		20 ~ 30	1.36 ± 0.13a	22.13 ± 0.45b	19.47 ± 0.54b	8.36 ± 0.92b
		平均值	1.29A	23.13C	20.97B	9.88B
	RS	0 ~ 10	1.34 ± 0.11a	28.77 ± 2.20a	23.86 ± 0.39a	19.02 ± 0.75a
		10 ~ 20	1.37 ± 0.02a	26.69 ± 1.51a	23.70 ± 1.70a	11.79 ± 0.90b
		20 ~ 30	1.39 ± 0.04a	24.91 ± 1.36a	22.74 ± 0.85a	10.33 ± 0.62b
		平均值	1.37A	26.79B	23.43B	13.71B

和紧结合态有机碳含量雨季较早季分别减少 35.86%、37.36%、45.45%、46.65% 和 52.54%、58.91%、42.83%、49.70%；联结合态和稳结合态有机碳含量潜在和轻度石漠化表现为雨季较早季分别减少 15.79%、7.38% 和 20.14%、22.83%，中度和重度石漠化含量雨季较早季分别增加 29.73%、81.25% 和 3.45%、25.00%。

松结合态腐殖质是土壤结合态腐殖质中最为活跃的有机质，其结构简单，易被微生物分解、转化，对土壤养分的释放有着积极的作用^[30]。由表 5

可知，不同石漠化程度对松结合态腐殖质的含量存在显著影响。不同石漠化程度无论早雨季土壤松结合态有机碳含量表现为潜在、轻度石漠化极显著大于中度、重度石漠化($P < 0.01$)。联结合态土壤腐殖质介于松结合态和稳结合态之间，其含量可以直接反映土壤腐殖质转化的进程^[31]。不同石漠化程度，无论早雨季土壤联结合态有机碳含量表现为潜在、轻度石漠化显著大于重度石漠化($P < 0.05$)，这表明潜在、轻度石漠化地区土壤腐殖质的腐殖化程度较高，这可能是由于潜在和轻度石漠化地区植

表 4 不同石漠化程度土壤养分含量和 pH 值

石漠化程度	季节	土壤养分含量							pH 值
		全氮含量 (g/kg)	速效氮含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	速效钾含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	有机碳含量 (g/kg)	
PO	DS	1.73 ± 0.18a	0.084 ± 0.009a	6.37 ± 0.41A	0.300 ± 0.030A	1.22 ± 0.03A	124.19 ± 7.19A	28.48 ± 2.27A	5.37 ± 0.19B
	RS	1.34 ± 0.49A	0.078 ± 0.007A	0.75 ± 0.02A	0.113 ± 0.022A	0.28 ± 0.02A	2.11 ± 0.13A	16.86 ± 1.21A	5.62 ± 0.29B
MI	DS	1.67 ± 0.17a	0.078 ± 0.007a	5.87 ± 0.24A	0.170 ± 0.020B	1.10 ± 0.13A	112.98 ± 1.55A	27.63 ± 1.38A	5.48 ± 0.04B
	RS	1.15 ± 0.06AB	0.072 ± 0.004A	0.61 ± 0.01B	0.110 ± 0.001A	0.26 ± 0.01A	1.65 ± 0.06B	15.79 ± 0.68A	5.73 ± 0.16B
MO	DS	1.32 ± 0.09b	0.069 ± 0.006ab	5.09 ± 1.03AB	0.130 ± 0.010B	0.57 ± 0.02B	81.74 ± 6.55AB	16.62 ± 0.65B	6.15 ± 0.23AB
	RS	0.72 ± 0.06AB	0.042 ± 0.007B	0.60 ± 0.01B	0.109 ± 0.001A	0.18 ± 0.01B	1.26 ± 0.13C	9.87 ± 0.75B	6.27 ± 0.34A
SE	DS	1.23 ± 0.04b	0.064 ± 0.005b	4.58 ± 0.31B	0.120 ± 0.010B	0.36 ± 0.05B	49.16 ± 3.71B	15.25 ± 0.30B	6.29 ± 0.19A
	RS	0.61 ± 0.15B	0.039 ± 0.005B	0.52 ± 0.01C	0.108 ± 0.001A	0.16 ± 0.01B	1.13 ± 0.05C	9.14 ± 0.70B	6.32 ± 0.16A

注:同列数字后不同大写字母、小写字母表示相同季节不同石漠化程度在 0.01、0.05 水平上差异显著。表 5、表 6 同。

表 5 不同程度石漠化土壤腐殖质结合态有机碳含量

石漠化程度	季节	土壤结合态有机碳含量(g/kg)				松紧比
		松结合态	联结合态	稳结合态	紧结合态	
PO	DS	13.19 ± 1.25A	1.90 ± 0.34a	1.39 ± 0.23A	11.99 ± 0.23A	1.10b
	RS	8.46 ± 0.82A	1.60 ± 0.32a	1.11 ± 0.18A	5.69 ± 0.02A	1.49b
MI	DS	13.09 ± 0.79A	1.49 ± 0.37a	1.27 ± 0.17A	11.78 ± 0.12A	1.11b
	RS	8.20 ± 0.44A	1.38 ± 0.15a	0.98 ± 0.04A	4.84 ± 0.60A	1.57b
MO	DS	9.77 ± 1.76B	0.74 ± 0.07b	0.58 ± 0.13B	5.23 ± 0.18B	1.77a
	RS	5.33 ± 0.38B	0.96 ± 0.13ab	0.60 ± 0.05B	2.99 ± 0.37B	1.81ab
SE	DS	9.41 ± 0.10B	0.48 ± 0.04b	0.40 ± 0.04B	4.95 ± 0.14B	1.90a
	RS	5.02 ± 0.23B	0.87 ± 0.11b	0.50 ± 0.04B	2.49 ± 0.44B	2.12a

被覆盖率高,土质疏松,植物凋落物长期积累所致。潜在和轻度土壤由于紧结态腐殖质的稳定性很强,其碳含量的多少对于保持土体构造、积累和贮存养分等方面有显著作用^[32]。松紧比则是衡量腐殖质活性和品质的重要指标之一,比值大说明腐殖质活性较高,相反则较低^[31]。无论旱雨季土壤稳结合态和紧结合态有机碳含量表现为潜在、轻度石漠化极显著大于中度、重度石漠化($P < 0.01$),松紧比呈相反趋势,表明潜在、轻度石漠化土壤贮存养分能力强,中度、重度石漠化土壤腐殖质活性高。由表 6 可知,松结合态、联结合态、稳结合态 3 种结合态有机碳富里酸、胡敏酸含量均表现为潜在石漠化显著高于中度、重度石漠化($P < 0.05$),呈现潜在 > 轻度 > 中度 > 重度石漠化趋势,与对应结合态有机碳含量变化相同。

胡富比(H/F)可以进一步说明土壤肥力状况,具有重要意义^[31]。由图 1、图 2 可知,不同石漠化程度土壤结合态有机碳 H/F 无论旱雨季均呈潜在 >

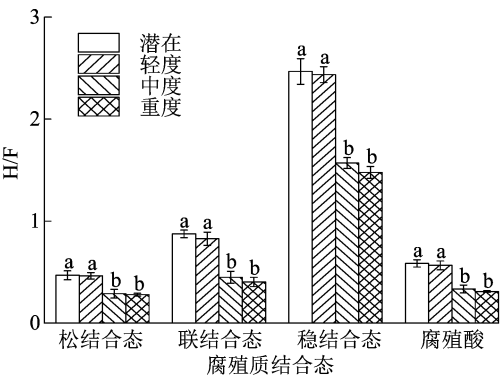
轻度 > 中度 > 重度石漠化趋势,潜在、轻度石漠化均显著高于中度、重度石漠化($P < 0.05$),潜在、轻度石漠化之间差异不显著($P > 0.05$),中度、重度石漠化之间差异不显著($P > 0.05$)。不同石漠化程度旱季土壤稳结合态有机碳胡富比大于 1,松结合态及联结合态有机碳胡富比均小于 1,但所有受试土壤中稳结合态有机碳仅占腐殖酸的 4.0% ~ 9.1%,对土壤腐殖酸整体胡富比影响较小。不同石漠化程度雨季土壤除联结合态、稳结合态有机碳重度石漠化胡富比小于 1 外,其他均大于 1,说明雨季 4 种石漠化程度土壤胡敏酸含量较高,腐殖质化程度相对旱季高。无论旱雨季重度石漠化程度土壤胡富比均最小,表明其腐殖质品质较差,腐殖质聚合度较低,土壤肥力较低^[33]。

2.4 土壤理化指标之间的相关性

由表 7 可知,不论旱雨季,石漠化程度与土壤理化指标存在显著相关性($P < 0.05$),4 种结合态有机碳含量均与全氮、有机碳及全磷含量存在极显著

表 6 不同石漠化程度土壤腐殖质结合态组成

石漠化程度	季节	土壤结合态组成含量(g/kg)							
		松结合态		联结结合态		稳结合态		腐殖酸	
		胡敏酸	富里酸	胡敏酸	富里酸	胡敏酸	富里酸	胡敏酸	富里酸
PO	DS	4.21 ± 0.48a	8.99 ± 0.90a	0.88 ± 0.14a	1.02 ± 0.20a	0.99 ± 0.17a	0.40 ± 0.06a	6.08 ± 0.52a	10.41 ± 1.18a
	RS	5.41 ± 0.82a	3.05 ± 0.70a	0.90 ± 0.19a	0.70 ± 0.14a	0.61 ± 0.08a	0.49 ± 0.13a	6.92 ± 0.35a	4.25 ± 0.89a
MI	DS	4.16 ± 0.89a	8.93 ± 0.91a	0.68 ± 0.20a	0.81 ± 0.17ab	0.90 ± 0.13a	0.37 ± 0.04a	5.61 ± 0.24a	10.11 ± 1.10ab
	RS	5.26 ± 0.10a	2.95 ± 0.35a	0.75 ± 0.06ab	0.63 ± 0.07ab	0.52 ± 0.01a	0.45 ± 0.05ab	6.53 ± 0.17a	4.02 ± 0.37a
MO	DS	2.23 ± 0.61b	7.55 ± 1.15b	0.23 ± 0.04b	0.51 ± 0.03b	0.35 ± 0.10b	0.22 ± 0.04b	2.81 ± 0.68b	8.28 ± 1.20ab
	RS	3.34 ± 0.25b	1.98 ± 0.13b	0.49 ± 0.12b	0.47 ± 0.02b	0.30 ± 0.02b	0.29 ± 0.05b	4.14 ± 0.29b	2.75 ± 0.19b
SE	DS	2.05 ± 0.06b	7.36 ± 0.16b	0.14 ± 0.02b	0.34 ± 0.02b	0.24 ± 0.03b	0.16 ± 0.01b	2.43 ± 0.01b	7.86 ± 0.18b
	RS	3.30 ± 0.47b	1.97 ± 0.12b	0.41 ± 0.06b	0.46 ± 0.06b	0.24 ± 0.02b	0.27 ± 0.03b	3.95 ± 0.42b	2.69 ± 0.20b



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。图 2 同
图1 不同石漠化程度旱季土壤腐殖质结合态的胡富比

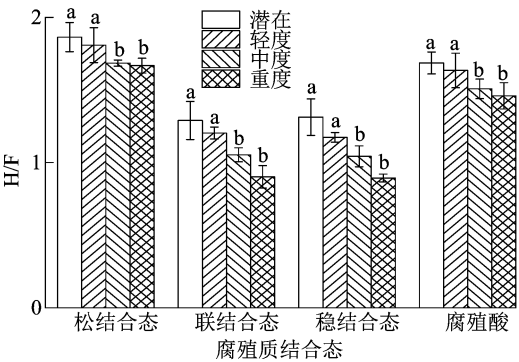


图2 不同石漠化程度雨季土壤腐殖质结合态的胡富比

正相关($P < 0.01$),各营养元素之间存在显著相关性($P < 0.05$)。无论旱雨季 4 种结合态有机碳含量之间均呈极显著正相关($P < 0.01$)。旱季速效氮含量与联结结合态有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$),与松、稳、紧结合态有机碳含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。旱季全钾含量与松和稳结合态有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$),与联和紧结合态有机碳含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。旱季速效钾含量与松和紧结合态有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$),与联和稳结合态有机碳含量呈极显

著正相关($P < 0.01$)。旱季速效磷含量与紧结合态有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$),与松、联和稳结合态有机碳含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。雨季 4 种结合态有机碳含量与氮素含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与速效钾含量无显著相关性($P > 0.05$);全钾含量与松、联结结合态有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$),与稳、紧结合态有机碳含量呈极显著正相关($P < 0.01$);速效磷含量与松、紧结合态有机碳含量呈极显著正相关,与联、稳结合态有机碳含量呈显著正相关($P < 0.05$)。由此可见土壤结合态有机碳、全氮、总有机碳、全磷含量是表征石林地区不同石漠化程度土壤性质的重要因子。

3 结论与讨论

本研究中,无论旱雨季土壤黏粒和粉粒含量均随石漠化程度的加深而递减,沙粒含量变化趋势相反,这与龙健等的研究结果^[34]一致,并且沙粒含量明显大于正常土壤,表现出粗骨化特征^[28]。无论旱雨季,土壤粉粒含量均为最高,黏粉粒含量随石漠化程度增加而递减,颗粒较小物质的含量越多,其颗粒的表面积就越大,黏性就越强,水分的吸附和固定能力也就越强^[35],从而使得研究区内不同石漠化程度土壤的水分状况呈现随石漠化程度的增加而递减趋势。土壤分形维数随石漠化程度的增加呈递减趋势,这与许多学者的研究结果相似,都认为土壤分形维数的大小主要由粒级较细的颗粒含量所决定^[28]。土壤容重呈现随石漠化程度的增加而递增趋势,原因在于随着石漠化程度的加强,植被覆盖度降低,土壤易被侵蚀,土壤细粒颗粒含量越来越低,粗粒含量越来越高,外在表现在土壤容重的增加^[36-37]。本研究结果表明,土壤养分元素含

表 7 不同石漠化程度土壤理化性质相关性分析

参数	季节	相关系数													
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_2	旱季	-0.789 **													
	雨季	-0.855 **													
X_3	旱季	-0.898 **	0.829 **												
	雨季	-0.821 **	0.893 **												
X_4	旱季	-0.897 **	0.895 **	0.950 **											
	雨季	-0.907 **	0.923 **	0.935 **											
X_5	旱季	-0.873 **	0.740 **	0.833 **	0.916 **										
	雨季	-0.948 **	0.930 **	0.859 **	0.926 **										
X_6	旱季	-0.844 **	0.834 **	0.838 **	0.896 **	0.784 **									
	雨季	-0.736 **	0.684 *	0.767 **	0.831 **	0.691 *									
X_7	旱季	-0.952 **	0.681 *	0.818 **	0.804 **	0.838 **	0.659 *								
	雨季	-0.946 **	0.814 **	0.706 *	0.801 **	0.915 **	0.487								
X_8	旱季	0.990 **	-0.825 **	-0.907 **	-0.929 **	-0.892 **	-0.896 **	-0.924 **							
	雨季	0.984 **	-0.874 **	-0.851 **	-0.944 **	-0.941 **	-0.838 **	-0.885 **							
X_9	旱季	-0.818 **	0.883 **	0.971 **	0.950 **	0.791 **	0.839 **	0.724 **	-0.853 **						
	雨季	-0.733 **	0.877 **	0.910 **	0.895 **	0.753 **	0.806 **	0.583 *	-0.794 **						
X_{10}	旱季	-0.748 **	0.790 **	0.612 *	0.742 **	0.724 **	0.845 **	0.590 *	-0.777 **	0.598 *					
	雨季	-0.893 **	0.883 **	0.838 **	0.931 **	0.938 **	0.729 **	0.833 **	-0.909 **	0.726 **					
X_{11}	旱季	-0.759 **	0.638 *	0.715 **	0.651 *	0.773 **	0.468	0.829 **	-0.726 **	0.577 *	0.322				
	雨季	-0.921 **	0.689 *	0.669 *	0.765 **	0.803 **	0.724 **	0.835 **	-0.908 **	0.618 *	0.753 **				
X_{12}	旱季	-0.870 **	0.690 *	0.810 **	0.744 **	0.652 *	0.635 *	0.857 **	-0.828 **	0.717 **	0.607 *	0.649 *			
	雨季	-0.162	0.378	0.539	0.423	0.149	0.485	-0.004	-0.256	0.727 **	0.115	0.085			
X_{13}	旱季	-0.955 **	0.822 **	0.911 **	0.944 **	0.945 **	0.888 **	0.880 **	-0.970 **	0.855 **	0.775 **	0.753 **	0.749 **		
	雨季	-0.919 **	0.852 **	0.813 **	0.935 **	0.954 **	0.717 **	0.872 **	-0.928 **	0.715 **	0.963 **	0.783 **	0.131		
X_{14}	旱季	-0.778 **	0.855 **	0.750 **	0.795 **	0.615 *	0.899 **	0.644 *	-0.836 **	0.788 **	0.740 **	0.290	0.653 *	0.766 **	
	雨季	-0.612 *	0.841 **	0.631 *	0.697 *	0.801 **	0.393	0.651 *	-0.617 *	0.583 *	0.773 **	0.341	0.068	0.731 **	
X_{15}	旱季	-0.878 **	0.859 **	0.888 **	0.958 **	0.965 **	0.867 **	0.802 **	-0.913 **	0.877 **	0.766 **	0.667 *	0.646 *	0.969 **	0.746 **
	雨季	-0.917 **	0.985 **	0.916 **	0.957 **	0.975 **	0.721 **	0.869 **	-0.928 **	0.856 **	0.927 **	0.756 **	0.318	0.916 **	0.817 **

注: X₁ 表示石漠化程度; X₂ 表示松结合态有机碳含量; X₃ 表示稳结合态有机碳含量; X₄ 表示稳结合态有机碳含量; X₅ 表示紧结合态有机碳含量; X₆ 表示黏粒含量; X₇ 表示粉粒含量; X₈ 表示沙粒含量; X₉ 表示全氮含量; X₁₀ 表示速效氮含量; X₁₁ 表示全钾含量; X₁₂ 表示速效钾含量; X₁₃ 表示全磷含量; X₁₄ 表示速效磷含量; X₁₅ 表示有机碳含量。*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

量随石漠化程度的加深呈递减趋势,这与李开萍等的研究结果^[9,16,34]一致,由此可见,土壤养分元素含量和不同石漠化程度土壤之间关系密切,随着石漠化程度的加强,植被覆盖度的降低,土壤结构偏紧实,土壤持水量下降,使得土壤中的水分和空气通透性降低,土壤中微生物的活动减弱、有机质分解的速度减缓以及影响到矿物质的矿化作用,最终使得土壤有机质、氮素、磷素和钾素的含量降低^[38]。雨季由于土壤中较高的水分含量,使得反硝化作用强烈,土壤中大量氮以气态氮的形式释放,从而使得雨季土壤氮素含量较旱季低^[39-40]。在含水量较高的情况下,土壤中的电解质会被稀释,阳离子解离进入溶液的量会增多,从而导致雨季土壤 pH 值较旱季升高^[41]。研究表明,石灰性土壤的主要固磷基质是物理性黏粒和碳酸钙含量^[42],本研究中,随石漠化程度的增加,土壤黏粒含量下降,这就解释了本研究中土壤磷素含量随石漠化程度的增加而降低的趋势。雨季,由于土壤受到侵蚀,细小颗粒随流水搬运到他处,使得黏粒含量减少,从而也使得雨季磷素的含量较旱季低。雨季土壤钾素的含量比旱季低,这是因为土壤含水量较多时,土壤溶液中的钾离子浓度遭到稀释,从而释放黏土矿物固定的钾,转化为水溶性钾^[43]。有研究表明,土壤含水量会改变土壤碳排放中源于土壤有机质和外源有机质的比例^[44],雨季由于土壤含水量高,微生物的活动受到抑制,使得其更多利用外源添加碳作为能量,则会较少分解土壤有机质^[45],导致雨季土壤有机碳含量较旱季低。另外从旱雨季土壤养分指标数据对比来看,部分指标存在较大差异,这是因为喀斯特石漠化地区缺乏成片连续的土壤,土壤的异质性很高,给取样造成一定困难,从而造成了不同石漠化阶段土壤理化性质的起伏,但其变化趋势是明确的。

本研究中,不同石漠化程度土壤结合态有机碳含量均呈现潜在 > 轻度 > 中度 > 重度石漠化的趋势,这是因为随石漠化程度加强,在水力和重力的影响下,土壤地上、地下二元流失加剧,岩石裸露率提高,形成土壤肥力下降与地上生物量减少的恶性循环,最终导致土壤有机碳含量显著减少^[46]。有研究表明,腐殖质的 4 种结合形态含量及对应的胡敏酸和富里酸含量变化对土体肥力、结构及保持生物群落的稳定性有直接影响,能较为全面地反映土壤质量^[32],本研究结果与之相互印证。本研究表明,

潜在和轻度土壤腐殖质贮存养分的能力较高但相对活性较弱,而中度和重度地区土壤腐殖质养分储存能力较弱但活性强,使得潜在和轻度地区能生长较大的乔木和灌木,而中度和重度地区宜于生物量较小的草本植物生长。无论旱雨季 4 种腐殖质结合态含量与全磷呈极显著正相关,这是因为磷的供应会限制土壤微生物对有机质的利用与转化,从而对腐殖质的形成和积累产生一定影响^[47]。4 种石漠化程度旱季土壤腐殖酸胡富比均小于 1,说明该石漠化地区土壤腐殖酸均以富里酸为主,皆为富里酸型土壤,腐殖化程度整体相对较低,养分易流失^[12,48]。雨季土壤腐殖酸胡富比与旱季相反,说明含水量充足的土壤利于胡敏酸的积累,这与江春玉等的研究结果^[49]相符。无论旱雨季重度石漠化程度土壤胡富比均最小,表明其腐殖质品质较差,腐殖质聚合度较低,土壤肥力较低^[33]。随石漠化程度的加深,不同结合态腐殖质胡富比均逐渐减小,这是由腐殖质和矿物质结合的难易程度所决定的^[50]。

参考文献:

- [1] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 76-84.
- [2] 储小院, 朱仕荣, 林 琼, 等. 我国石漠化防治立法的必要性与可行性探讨[J]. 中国水土保持, 2020(6): 18-22, 30.
- [3] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development [J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.
- [4] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [5] 中国岩溶地区石漠化状况公报[EB/OL]. (2018-12-17)[2021-08-01]. www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201812/t20181217_2379630.html.
- [6] 我国石漠化、沙化、石漠化面积持续缩减[J]. 中国环境监察, 2021(6): 8.
- [7] 高吉喜, 李广宇, 张 怡, 等. “十四五”生态环境保护目标、任务与实现路径分析[J]. 环境保护, 2021, 49(2): 45-51.
- [8] 吴丽芳, 王紫泉, 王 妍, 等. 喀斯特高原不同石漠化程度土壤 C、N、P 化学计量特征和酶活性的关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2332-2340.
- [9] 李开萍, 刘子琦, 李 渊, 等. 贵州毕节地区不同石漠化程度土壤理化性质特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 205-210.
- [10] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组测定[J]. 土壤通报, 1983, 14(2): 36-37.
- [11] 赵欣宇, 吴景贵, 李建明, 等. 玉米秸秆及相关废弃物对黑土腐殖质结合形态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 193-198.
- [12] 刘炳清, 许自成, 黄化刚, 等. 贵州乌蒙烟区清甜香烤烟风格形

- 成的土壤腐殖质组成特征[J]. 土壤通报,2015,46(2):382-385.
- [13]熊毅. 土壤胶体[M]. 北京:科学出版社,1983:329-332.
- [14]盛茂银,熊康宁,崔高仰,等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报,2015,35(2):434-448.
- [15]杨贺. 湘西不同程度石漠化地区植物多样性与土壤理化性质相关性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
- [16]颜萍,熊康宁,王恒松,等. 喀斯特地区不同等级石漠化土壤的理化性质[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):322-327.
- [17]盛茂银,刘洋,熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报,2013,33(19):6303-6313.
- [18]金秋珠,殷紫嫣,罗雪铭,等. 桂林岩溶石山青冈栎群落土壤相关性研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(13):59-62.
- [19]张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议[J]. 地球与环境,2007,35(2):188-192.
- [20]中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:2-3.
- [21]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:25-103.
- [22]栾慧,刘红,高一娜,等. 土壤速效氮测定方法的改进[J]. 湖南农业科学,2017(3):88-89,93.
- [23]牛宋芳,刘秉儒,王利娟. 土壤粒径及有机碳特征对灌丛沙堆发育阶段的影响研究[J]. 土壤通报,2017,48(5):1032-1038.
- [24]Heaton L, Fullen M A, Bhattacharya R. Análise crítica do fator de conversão van bemmelen usado para converter dados de matéria orgânica de solo em dados de carbono orgânico: análises comparativas em um solo franco-arenoso do reino unido[J]. Espaço Aberto,2016,6(1):103-108.
- [25]张军红,徐义萍,王文鑫,等. 毛乌素沙地油蒿植冠下表层土壤粒径特征分析[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(6):36-40,55.
- [26]袁颖丹,郭晓敏,陈煦,等. 武功山山地草甸不同海拔高度土壤机械组成与养分特性关系[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(7):118-122.
- [27]杨婷,景航,姚旭,等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究,2016,23(3):1-5,24.
- [28]李翠莲,戴全厚,姚云. 草海不同石漠化程度土壤分形特征研究[J]. 水土保持研究,2015,22(1):158-162,167.
- [29]李德成,张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J]. 土壤与环境,2000,9(4):263-265.
- [30]李晓航,吴景贵,孟庆龙,等. 连续施用不同种类畜禽粪肥对土壤结合态腐殖质组成的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报[2021-10-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20200902.1556.011.html>.
- [31]陈晓东,吴景贵,范围,等. 不同有机物料对原生盐碱地土壤腐殖质结合形态及组成的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(1):200-205.
- [32]岳红丽,吴景贵,王蒙. 不同玉米秸秆还田方式对土壤腐殖质结合形态影响[J]. 安徽农业科学,2019,47(18):56-59.
- [33]邢世和,吴金奖,林景亮. 水稻土发生分类的研究 II. 两种水型水稻土中有机质淋溶累积的特点及其与铁锰淋淀的关系[J]. 福建农学院学报,1989,18(2):212-217.
- [34]龙健,李娟,邓启琼,等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[J]. 土壤通报,2006,37(4):635-639.
- [35]马生花,谢应忠,胡海英,等. 荒漠草原2种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J]. 中国水土保持,2019(7):61-65.
- [36]Hajabbasi M, Jalalian A, Karimzadeh H. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran[J]. Plant and Soil,2004,190:301-308.
- [37]景宜然,邓湘雯,邓东华,等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J]. 水土保持学报,2016,30(1):189-195.
- [38]颜萍,熊康宁,王恒松,等. 喀斯特地区不同等级石漠化对土壤性质的响应[J]. 南方农业学报,2016,47(4):557-563.
- [39]Haddad S A, Tabatabai M A, Loynachan T E. Biochemical processes controlling soil nitrogen mineralization under waterlogged conditions[J]. Soil Science Society of America Journal,2013,77(3):809-816.
- [40]于淑华,张丽霞,谢雪迎,等. 不同水分模式对山东茶园土壤氮素动态的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(4):289-298.
- [41]黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:57-58.
- [42]任文畅,王沛芳,钱进,等. 干湿交替对土壤磷素迁移转化影响的研究综述[J]. 长江科学院院报,2015,32(5):41-47.
- [43]霍娜,王宏庭. 水分对土壤钾素植物有效性的影响研究进展[J]. 山西农业科学,2014,42(12):1330-1334.
- [44]Wang Q K, Zeng Z Q, Zhong M C. Soil moisture alters the response of soil organic carbon mineralization to litter addition[J]. Ecosystems,2016,19(3):450-460.
- [45]Zhang Z Y, Wang W F, Qi J X, et al. Priming effects of soil organic matter decomposition with addition of different carbon substrates[J]. Journal of Soils and Sediments,2019,19(3):1171-1178.
- [46]赵楚,盛茂银,李雨萱,等. 喀斯特生态系统土壤表面电化学特征及其影响因子[J/OL]. 土壤学报:1-13[2021-10-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210207.1104.004.html>.
- [47]张晓曦,刘增文,朱博超,等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. 生态学报,2015,35(6):1779-1787.
- [48]侯淑艳,马丽娜,窦森. 长期有机肥配施化肥对寒区土壤表层及亚表层团聚体中腐殖质的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报[2021-10-02]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JLNY20200924001&uniplatform=NZKPT&v=0H5IQ1NwjQ9_MxbJc_xRJ4EPLkRkWY89fpq9Gyyle9iXI_kTtx1qok5IYH_l_e.
- [49]江春玉,李忠佩,崔萌,等. 水分状况对红壤水稻土中有机物料碳分解和分布的影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):325-334.
- [50]魏世勇,谭文峰,刘凡. 土壤腐殖质-矿物质交互作用的机制及研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2009(1):1-6.