

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.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.03.092

# 喀斯特地区不同等级石漠化土壤的理化性质

颜萍,熊康宁,王恒松,檀迪,郭杰,肖杰,李开萍

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵州贵阳 550001)

**摘要:**以中国南方典型喀斯特地区不同等级石漠化的土壤为研究对象,运用野外定点取样和实验室分析测定方法,研究不同等级石漠化环境土壤理化性质特征,探讨喀斯特地区不同等级石漠化土壤理化性质的变化规律,为喀斯特石漠化脆弱生态环境的综合治理提供理论依据。结果表明:土壤含水量和田间持水量呈现强度石漠化<中度石漠化<轻度石漠化<潜在石漠化;土壤容重在不同等级石漠化的差异性不显著;随着石漠化等级程度的增加,土壤有机质、氮素、磷素、钾素含量有降低的趋势;相关性分析表明,土壤含水量、有机质、全氮与其他土壤理化因子具有较强的相关性;主成分分析表明,土壤含水量、田间持水量、容重、孔隙度、有机质、氮素、磷素、钾素是喀斯特地区不同等级石漠化土壤理化性质的关键因子,在改善土壤理化性质和促进土壤养分循环方面起着重要作用。

**关键词:**喀斯特;石漠化;土壤物理性质;土壤化学性质

**中图分类号:** S153;S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)03-0322-06

20世纪30年代,前苏联土壤学家威廉斯根据近代科学知识给土壤下了一个科学的定义:“土壤是地球陆地上能够生长绿色植物收获物的疏松表层”<sup>[1]</sup>。土壤的本质属性是具

有肥力,它是存在于地表的自然体,有自己的发生、发展过程,环境因素以及环境变化对土壤都会产生较大的影响。因此研究土壤一定要把土壤与周围环境当作一个整体考虑<sup>[2]</sup>。

石漠化是在喀斯特脆弱生态环境下,人类不合理的社会经济活动,造成人地矛盾突出、植被破坏、水土流失、岩石逐渐裸露、土地生产力衰退丧失,地表在视觉上呈现类似于荒漠化景观的演变过程<sup>[3]</sup>。中国南方喀斯特地区,长期受强烈的碳酸盐岩化学溶蚀作用产生了地表-地下双层空间结构,土层浅薄,在强降雨作用下极易流失导致喀斯特地区的土质退化<sup>[4-6]</sup>,而人类不合理的土地利用加剧了该地区水土流失。水土流失使土壤肥力下降,养分流失,从而使得土壤退化、植被退化,最终使土地资源不能利用加重石漠化产生<sup>[7-9]</sup>。近

收稿日期:2015-09-13

基金项目:国家科技支撑计划重大课题(编号:2011BAC09B01);贵州省科技计划重大专项(编号:黔科合重大专项字[2014]6007号);贵州师范大学研究生创新基金[编号:研创2014(24)]。

作者简介:颜萍(1989—),女,四川乐山人,硕士研究生,主要从事喀斯特地貌与洞穴和石漠化治理研究。E-mail:yanping1989lm@163.com。

通信作者:熊康宁,教授,博士生导师,主要从事喀斯特地貌与洞穴、世界遗产和石漠化治理研究。E-mail:xiongkn@163.com。

[11] Okey T A, Agbayani S, Alidina H M. Mapping ecological vulnerability to recent climate change in Canada's Pacific Marine ecosystems [J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 106: 35-48.

[12] 王让会,樊自立. 塔里木河流域生态脆弱性评价研究[J]. 干旱环境监测, 1998, 12(4): 218-221, 223-253.

[13] 张鑫,杜朝阳,蔡焕杰. 黄河中游区佳芦河流域生态脆弱性评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(增刊1): 155-158.

[14] 沈彦,刘明亮,雷志刚. 洞庭湖区湿地生态脆弱性评价及其恢复与重建研究[J]. 国土资源科技管理, 2007, 24(3): 107-111.

[15] 叶正伟. 洪泽湖湿地生态脆弱性的驱动力系统与评价[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 245-249.

[16] 金鑫. 农牧交错生态脆弱区农村可持续发展制约因素分析[J]. 前沿, 2013(22): 77-79.

[17] 蒙古军,张彦儒,周平. 中国北方农牧交错带生态脆弱性评价——以鄂尔多斯市为例[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 850-856.

[18] 付博,姜琦刚,任春颖. 扎龙湿地生态脆弱性评价与分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 49-52.

[19] 万洪秀,孙占东,王润. 博斯腾湖湿地生态脆弱性评价研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 248-254.

[20] 乔青. 川滇农牧交错带景观格局与生态脆弱性评价[D]. 北

京:北京林业大学, 2007.

[21] 李滨勇,陈海滨,唐海萍. 基于AHP和模糊综合评判法的北疆各地州生态脆弱性评价[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2010, 46(2): 197-201.

[22] 钟晓娟,孙保平,赵岩,等. 基于主成分分析的云南省生态脆弱性评价[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 109-113.

[23] 孙国军. BP神经网络在生态环境脆弱性评价方面的应用——以乌拉特前旗为例[J]. 西北师范大学学报:自然科学版, 2012, 48(5): 105-108, 114.

[24] 孙平军,修春亮,王忠芝. 基于PSE模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究——以辽宁阜新为例[J]. 经济地理, 2010, 30(8): 1354-1359.

[25] 张振东,潘妮,梁川. 基于改进TOPSIS的长江黄河源区生态脆弱性评价[J]. 人民长江, 2009, 40(16): 81-84.

[26] 王娟娟,何佳琛. 西部地区生态环境脆弱性评价[J]. 统计与决策, 2013(22): 49-52.

[27] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2004: 153-165.

[28] 陈南祥,杨淇翔. 基于博弈论组合赋权的流域水资源承载力集对分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 81-85.

年来,一些学者对喀斯特地区的土壤理化性质进行了大量研究,主要研究石漠化治理过程的土壤效应、植被退化对土壤有机质和养分的影响、土壤有机碳与容重的关系等等,这为喀斯特地区的石漠化治理工程提供了重要的科学依据和理论支撑。本研究试图在前人的研究基础上,通过对喀斯特地区不同等级石漠化土壤理化性质进行研究,认识喀斯特地区不同等级石漠化地区土壤理化性质变化规律,进而为实现喀斯特地区的石漠化治理提供量化指标。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毕节市撒拉溪镇朝营小流域,代表温凉春干夏湿喀斯特高原山地轻-中度石漠化区,位于乌江上游段六冲河流域,流域总面积 8 627.19 hm<sup>2</sup>,喀斯特面积占总面积的 73.94%,属喀斯特高原山地生态环境。朝营小流域属六冲河流域,地处毕节市西南部,总面积 5 633.30 hm<sup>2</sup>,平均海拔 1 600 m,主要是高中山地貌类型,主要出露石灰岩、灰岩、砂页岩,由于石灰岩地区基岩裸露面积大,土壤母质疏松,风化快,因而水土流

失严重。植被主要是针阔叶混交林,主要土壤为黄壤,部分地区有山地黄棕壤、石灰土和砂页岩。地貌类型多样,地形破碎,耕地多分布于坡面上、台地和山间谷地,常形成环山梯田和沟谷坝地。

1.2 土壤样品采集

对研究区详细踏查的基础上,根据熊康宁等 2002 年提出的喀斯特石漠化强度分级标准<sup>[11]</sup>,选取喀斯特地区 4 种等级石漠化(强度石漠化、中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化),每种等级选择具有代表性的 3 个 10 m×10 m 典型样地为研究对象(表 1),共计 12 个样地。于 2013 年 8 月,测定物理指标的土壤在每个样地中心按蛇形方式各选 3~5 个采样点用环刀取土,各点间距约 2.5 m,带回实验室分析土壤水分含量、田间持水量和土壤总孔隙度等物理性质指标。同时,在每一样地采集 3~5 个 0~20 cm 混合土样,用四分法取约 1 kg 土样带回实验室,共计 36 个土样。依据《土壤理化分析与剖面描述》中的要求对土样进行通风处自然风干,除去动植物残体、树叶等杂质,混合均匀后,用玛瑙研磨将其粉碎并过 100 目尼龙筛,装入塑封袋中用于土壤化学性质的测定。

表 1 研究区基础信息

石漠化等级	经纬度	土地利用方式	海拔(m)	坡度(°)	坡向	基岩裸露率(%)	植被覆盖率(%)
强度石漠化	27°14.400'N,105°05.009'E	旱地	1 860	25	SE	80	10
中度石漠化	27°13.890'N,105°05.230'E	疏林地	1 838	25	SW	72	25
轻度石漠化	27°14.165'N,105°05.255'E	灌木林地	1 748	15	SE	60	40
潜在石漠化	27°13.912'N,105°05.260'E	灌木林地	1 844	10	NW	45	50

1.3 分析项目与方法

土壤物理指标:土壤含水量、田间持水量、毛管持水量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度的测定主要采用环刀法<sup>[13-14]</sup>。化学指标:pH 值采用水浸提-电位法(GB 7859—1987《森林土壤 pH 值的测定》)测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热(GB 7857—1987《森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算》)测定;全氮采用半微量开氏法(GB 7173—1987《土壤全氮测定法(半微量开氏法)》)测定;全磷采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法(GB 7852—1987《森林土壤全磷的测定》)测定;全钾采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法(GB 7854—1987《森林土壤全钾的测定》)测定;碱解氮采用 FeSO<sub>4</sub>-Zn 还原碱解扩散法(GB 7849—1987《森林土壤水解性氮的测定》)测定;速效磷用 0.05 mol/L HCl-0.025 mol/L 1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提土壤样品测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法(GB 7856—1987《森林土壤速效钾的测定》)测定。具体操作方法参见《土壤理化分析与剖面描述》<sup>[12]</sup>。

1.4 数据处理与分析

应用 Excel 2003 软件对数据进行图表统计,以 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),多重比较分析(LSD 最小显著性差异法)、皮尔逊(Pearson)相关性分析和主成分分析等,用 Origin 8.5 软件进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 不同等级石漠化土壤的物理性质分析

2.1.1 土壤含水量与持水量 不同等级石漠化对土壤含水量、田间持水量和毛管持水量产生一定的影响,研究(图 1)表

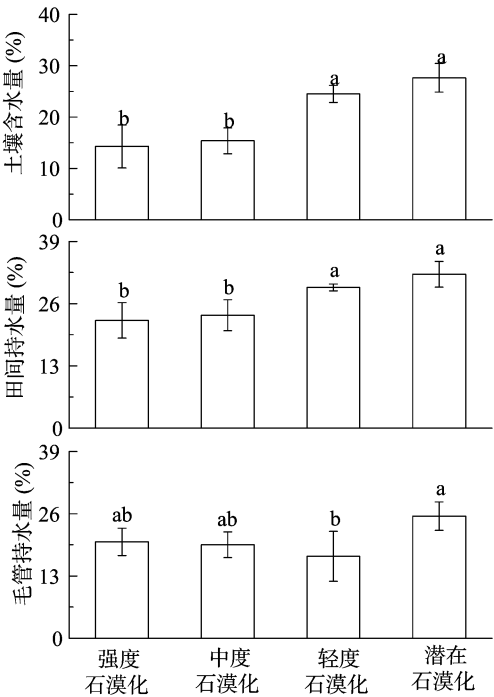


图1 不同等级石漠化土壤的含水量、田间持水量、毛管持水量变化

明,土壤含水量、田间持水量表现为强度石漠化<中度石漠化<轻度石漠化<潜在石漠化。潜在石漠化的土壤含水量均值为 27.65%,显著高于中度石漠化和强度石漠化(P<0.05),与潜在石漠化相比,轻度石漠化、中度石漠化和强度

石漠化的土壤含水量分别降低了 11.28%、44.34%、48.35%。潜在石漠化的田间持水量均值为 32.12%，显著高于中度石漠化和强度石漠化 ( $P < 0.05$ )，与轻度石漠化无显著性差异，相比潜在石漠化，轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化的土壤田间持水量分别降低了 8.44%、26.59%、29.98%。潜在石漠化的毛管持水量均值为 25.49%，与轻度石漠化有显著性差异 ( $P < 0.05$ )，与中度石漠化和强度石漠化无显著性差异 ( $P > 0.05$ )，相比潜在石漠化，轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化的毛管持水量分别降低了 32.88%、23.46%、21.11%。

**2.1.2 土壤容重** 土壤容重是土壤肥瘦和耕作质量的重要指标，研究(图 2)表明，研究区样地土壤容重在不同等级石漠化差异不显著 ( $P > 0.05$ )，均值 1.34 ~ 1.42 g/cm<sup>3</sup>，表现为轻度石漠化 > 潜在石漠化 > 中度石漠化 > 强度石漠化的分布规律。与强度石漠化相比，中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化的土壤容重分别增加了 1.49%、5.97%、2.24%，其中轻度石漠化的土壤容重增幅最大，其次是潜在石漠化和中度石漠化。

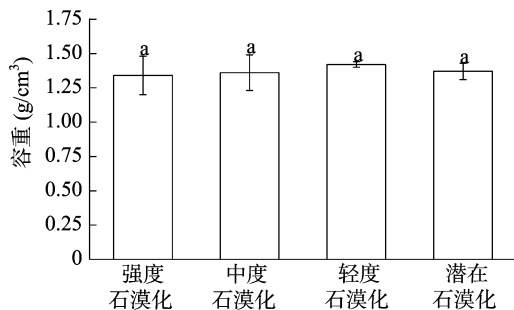


图2 不同等级石漠化土壤的容重变化

**2.1.3 土壤孔隙度** 研究(图 3)表明，不同等级石漠化土壤的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。强度石漠化土壤的总孔隙度均值为 49.73%，与强度石漠化相比，中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化分别降低了 1.49%、5.23%、1.71%，其中轻度石漠化降低的幅度最大。强度石漠化土壤的毛管孔隙度均值为 27.22%，与强度石漠化相比，中度石漠化降低了 1.80%，轻度石漠化降低了 10.8%，而潜在石漠化增加了 27.81%。强度石漠化土壤的非毛管孔隙度均值为 22.52%，与强度石漠化相比，中度石漠化降低了 1.15%，轻度石漠化增加了 1.42%，潜在石漠化降低了 37.43%。

## 2.2 不同等级石漠化土壤的化学性质分析

**2.2.1 土壤 pH 值与有机质** 研究(图 4)表明，不同等级石漠化的土壤 pH 值差异不显著，均值 6.05 ~ 6.43，其中轻度石漠化环境的土壤 pH 值均值最高，为 6.43，与轻度石漠化相比，强度石漠化、中度石漠化和潜在石漠化分别降低了 0.47%、5.91%、4.66%。说明研究区的土壤属于微酸性土壤 (5.5 ~ 6.5) [1]，基本满足农业生产的需要。有机质的均值为 32.91 ~ 40.14 g/kg，强度石漠化土壤的有机质 (均值 32.91 g/kg)，与轻度石漠化、潜在石漠化差异显著，与中度石漠化差异不显著。与强度石漠化相比，中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化分别增加了 9.02%、21.97%、21.36%。

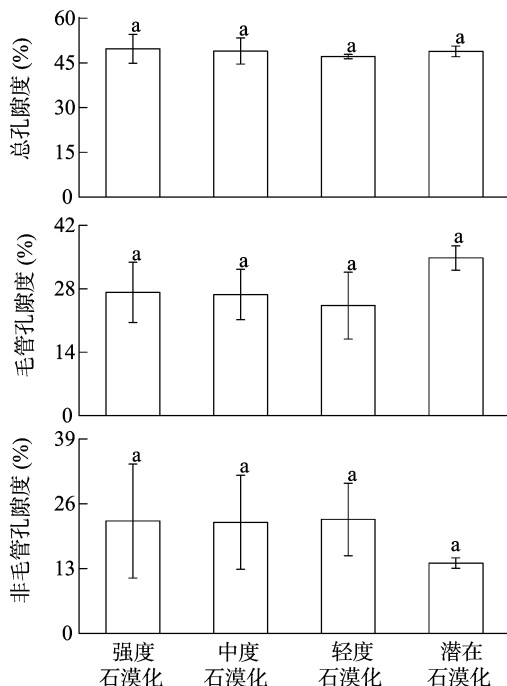


图3 不同等级石漠化土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度的变化

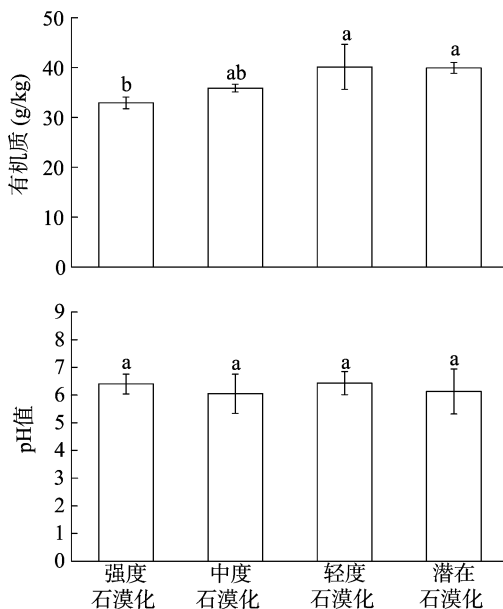


图4 不同等级石漠化土壤的pH值、有机质的变化

**2.2.2 土壤氮素** 研究(图 5)表明，强度石漠化土壤的全氮含量与中度石漠化差异不显著，与轻度石漠化和潜在石漠化差异显著，均值 1.14 ~ 2.01 g/kg，呈现强度石漠化 < 中度石漠化 < 轻度石漠化 < 潜在石漠化的趋势，与强度石漠化相比，中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化分别增加了 23.68%、57.89%、76.32%，轻度石漠化与潜在石漠化土壤显著升高 ( $P < 0.05$ )，说明随石漠化等级的加强，全氮含量逐渐减小。研究区土壤碱解氮均值为 104.97 ~ 154.45 mg/kg，强度石漠化土壤碱解氮含量最低，为 104.97 mg/kg，显著低于轻度和潜在石漠化土壤 ( $P < 0.05$ )。

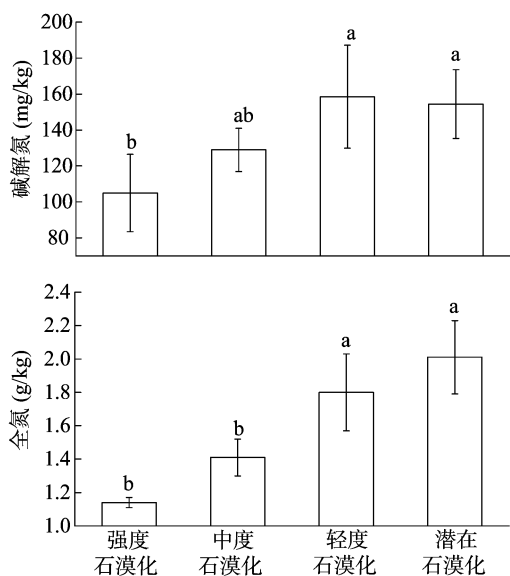


图5 不同等级石漠化土壤的全氮、碱解氮的变化

2.2.3 土壤磷素 研究(图6)表明,强度石漠化的全磷与中度石漠化差异不显著,与轻度石漠化和潜在石漠化差异显著,表现为强度石漠化<中度石漠化<轻度石漠化<潜在石漠化的趋势,均值 1.06~1.81 g/kg,与强度石漠化相比,中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化分别增加了 34.91%、50.94%、70.75%,其中轻度石漠化的增加幅度最大,潜在石漠化和轻度石漠化的土壤全钾含量显著高于中度石漠化和强度石漠化( $P<0.05$ )。潜在石漠化的速效磷与强度石漠化、中度石漠化、轻度石漠化差异显著( $P<0.05$ ),均值 23.09~33.50 g/kg,随着石漠化等级程度的增加,土壤速效磷有降低的趋势,与潜在石漠化相比,强度石漠化、中度石漠化和潜在石漠化分别降低了 28.66%、24.44%、31.07%。

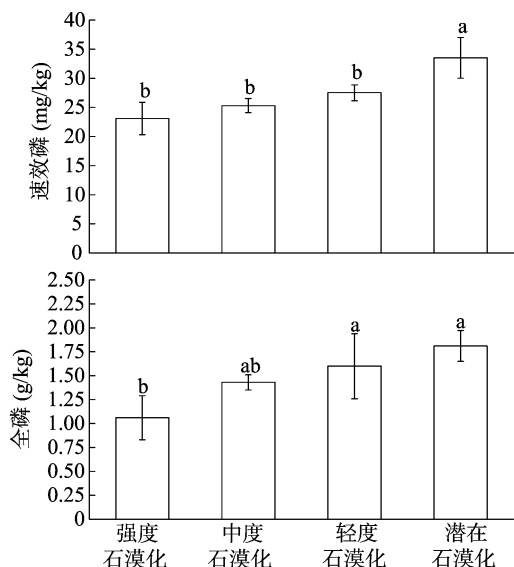


图6 不同等级石漠化土壤的全磷、速效磷的变化

2.2.4 土壤钾素 研究(图7)表明,不同等级石漠化土壤的全钾与速效钾均呈现强度石漠化<中度石漠化<轻度石漠化<潜在石漠化的趋势。强度石漠化的全钾含量显著低于中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化( $P<0.05$ ),与强度石漠

化相比,中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化分别增加了 26.59%、39.21%、73.54%。强度石漠化的速效钾含量显著低于中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化( $P<0.05$ ),与强度石漠化相比,中度石漠化、轻度石漠化和潜在石漠化分别增加了 23.59%、39.75%、43.27%,其中潜在石漠化增加幅度最大。

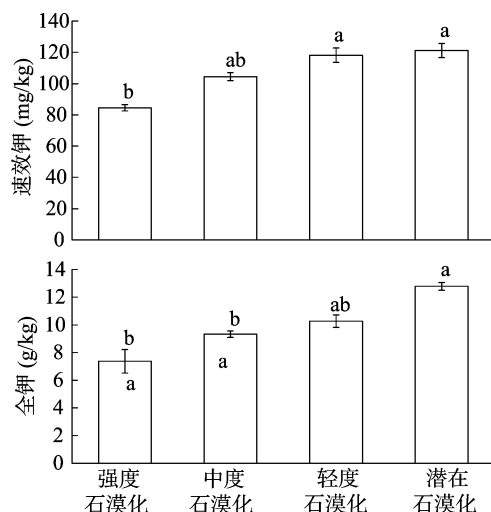


图7 不同等级石漠化土壤的全钾、速效钾的变化

## 2.3 喀斯特石漠化环境土壤理化性质的相关性分析

从表2分析可知,喀斯特地区不同等级石漠化的土壤理化性质之间具有较明显的相关性。土壤含水量与田间持水量、全氮、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与有机质呈显著正相关( $P<0.05$ )。有机质与田间持水量、全氮、全钾呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为 0.738、0.845、0.715,与毛管持水量、容重、毛管孔隙度呈负相关关系,与土壤含水量、速效钾呈显著正相关( $P<0.05$ ),相关系数分别为 0.680、0.624。全氮与有机质的相关系数为 0.845,达到极显著正相关,与土壤含水量、田间持水量、全磷、全钾、速效钾呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与碱解氮、速效磷呈显著正相关( $P<0.05$ ),相关系数分别为 0.622、0.670,而全氮与毛管持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度的相关性不大。由此可见,土壤含水量、有机质、全氮与土壤其他理化因子具有较强的相关性。

## 2.4 喀斯特石漠化环境土壤理化性质的主成分分析

通过主成分分析喀斯特石漠化环境土壤的含水量、田间持水量、毛管持水量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾,共 15 个理化性质指标(表3)。研究表明,主成分 1 的贡献率为 67.972%,主成分 2 的贡献率为 26.421%,累积贡献率达 94.393%,且特征值均大于 1。说明前 2 个主成分保留了喀斯特不同等级石漠化土壤理化性质的绝大部分信息。因此选取这 2 个主成分作为评价石漠化特征主成分分析的依据。从表3分析可知,主成分 1 中,土壤含水量、田间持水量、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾所占权重系数较大,说明主成分 1 反映了土壤含水量、田间持水量、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾来表征喀斯特石漠化环境的信息。主成分 2 中,容重、总孔隙度、毛管孔

表 2 土壤理化性质的 Pearson 相关系数

指标	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>
X <sub>1</sub>	1.000														
X <sub>2</sub>	0.758 **	1.000													
X <sub>3</sub>	0.454	0.259	1.000												
X <sub>4</sub>	-0.361	0.263	-0.060	1.000											
X <sub>5</sub>	0.503	0.149	0.960 **	-0.333	1.000										
X <sub>6</sub>	-0.543	-0.019	-0.796 **	0.651 *	-0.932 **	1.000									
X <sub>7</sub>	0.361	-0.263	0.060	-1.000 **	0.333	-0.651 *	1.000								
X <sub>8</sub>	-0.011	-0.257	0.024	-0.324	0.136	-0.234	0.324	1.000							
X <sub>9</sub>	0.680 *	0.738 **	-0.004	-0.149	0.014	-0.069	0.149	-0.253	1.000						
X <sub>10</sub>	0.849 **	0.822 **	0.415	-0.151	0.410	-0.387	0.151	-0.174	0.845 **	1.000					
X <sub>11</sub>	0.687 *	0.685 *	0.419	-0.144	0.433	-0.404	0.144	0.028	0.547	0.731 **	1.000				
X <sub>12</sub>	0.773 **	0.832 **	0.435	-0.013	0.395	-0.323	0.013	-0.137	0.715 **	0.899 **	0.804 **	1.000			
X <sub>13</sub>	0.723 **	0.558	0.278	-0.334	0.344	-0.405	0.334	0.252	0.395	0.622 *	0.774 **	0.633 *	1.000		
X <sub>14</sub>	0.750 **	0.564	0.423	-0.342	0.483	-0.519	0.342	0.085	0.507	0.670 *	0.768 **	0.812 **	0.699 *	1.000	
X <sub>15</sub>	0.837 **	0.514	0.330	-0.536	0.441	-0.561	0.536	0.077	0.624 *	0.749 **	0.749 **	0.684 *	0.837 **	0.793 **	1.000

注: X<sub>1</sub> 为土壤含水量; X<sub>2</sub> 为田间持水量; X<sub>3</sub> 为毛管持水量; X<sub>4</sub> 为容重; X<sub>5</sub> 为总孔隙度; X<sub>6</sub> 毛管孔隙度; X<sub>7</sub> 为非毛管孔隙度; X<sub>8</sub> 为 pH 值; X<sub>9</sub> 为有机质; X<sub>10</sub> 为全氮; X<sub>11</sub> 为全磷; X<sub>12</sub> 为全钾; X<sub>13</sub> 为碱解氮; X<sub>14</sub> 为速效磷; X<sub>15</sub> 为速效钾。\* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ ); \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

表 3 土壤理化性质的石漠化主成分分析

土壤理化性质	权重系数	
	主成分 1	主成分 2
土壤含水量	0.966	0.091
田间持水量	0.976	0.044
毛管持水量	0.468	-0.871
容重	0.595	0.803
总孔隙度	-0.543	-0.838
毛管孔隙度	0.554	-0.818
非毛管孔隙度	-0.735	0.661
pH 值	-0.257	0.603
有机质	0.951	0.307
全氮	0.997	0.068
全磷	0.982	0.008
全钾	0.979	-0.188
碱解氮	0.934	0.347
速效磷	0.957	-0.282
速效钾	0.959	0.207
特征值	10.196	3.963
贡献率 (%)	67.972	26.421
累积贡献率 (%)	67.972	94.393

隙度、非毛管孔隙度所占权重系数较大,说明主成分 2 主要反映了容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度表征喀斯特石漠化环境的信息。综上分析可知,不同等级石漠化的土壤含水量、田间持水量、容重、孔隙度、有机质、氮素、磷素、钾素是土壤理化性质的关键因子,在改善土壤土壤养分循环、对土壤结构的形成和稳定中具有重要作用。

3 结论与讨论

喀斯特地区的土壤质量随石漠化等级的加强而降低,研究表明不同等级石漠化环境土壤物理性质存在显著差异。土壤含水量的多少,直接影响土壤的适耕性和植物的生长发育<sup>[13]</sup>。田间持水量是毛管水达到最大时的土壤含水

量<sup>[14-16]</sup>。本研究表明土壤含水量和田间持水量均有强度石漠化 < 中度石漠化 < 轻度石漠化 < 潜在石漠化的变化趋势。毛管持水量是土壤含水量超过最大分子持水量后,在毛管力的作用下,保持在毛管空隙里的水<sup>[17]</sup>。潜在石漠化的毛管持水量均值最高,是因为潜在石漠化进行坡改梯后地表径流对土壤冲刷能力降低,保水能力增加。

土壤容重是指单位容积干土壤体(包括土壤孔隙和土粒体积)的质量,它反映了土壤坚实度和孔隙度的大小<sup>[15,18]</sup>,本研究表明容重在不同意等级石漠化的差异性不显著,均值 1.34 ~ 1.42 g/cm<sup>3</sup>,轻度石漠化土壤的容重最大,这与前人的研究结果有显著区别,刘云等 2009 年的研究结果为强度石漠化 > 中度石漠化 > 轻度石漠化 > 潜在石漠化<sup>[19]</sup>。之所以会出现这种变化,是因为随着石漠化的治理,轻度石漠化和潜在石漠化的土地利用方式被改变,受人为干预较大,农用后人为踩踏频繁,导致土壤容重增大。强度石漠化属于原生环境,受人为干预较小,体现为土壤容重也较小。

总孔隙度均值为 47.13% ~ 49.73%,从农业生产需要来看,旱作土壤耕作层的土壤总孔隙度为 50% ~ 56%,本研究的结果说明研究区土壤总孔隙度偏低,表明以壤土为主,仍需对研究区土壤掺沙掺黏改良土壤质地使之达到植物生长适宜的空隙范围。非毛管孔隙度在不同等级石漠化环境无明显差异,这与盛茂银等在研究中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应时得到的结果<sup>[20]</sup>一致,说明非毛管孔隙度与石漠化的等级程度相关性不大。

土壤 pH 值是土壤形成过程综合因子作用的结果,是土壤很多化学性质特别是盐基状况的综合反映<sup>[21-24]</sup>。本研究表明研究区的土壤属于微酸性土壤(5.5 ~ 6.5),基本满足农业生产的需要。土壤有机质中含有作物生长所需的各种养分,可直接或间接地为作物生长提供 N、P、K、Ca、Mg、S 和各种微量元素,能够改善土壤理化性状和提高土壤保水、保肥性能等<sup>[25-26]</sup>。研究表明,轻度石漠化的土壤有机质含量最高,潜在石漠化次之,这是由于在石漠化治理过程中,施加了有机

肥,提高了农田的土壤肥力。土壤氮素是一种以生物来源为主的营养元素,全氮是土壤氮素养分的储备指标,在一定程度上说明土壤氮的供应水平<sup>[20-21]</sup>。研究表明全氮含量呈现潜在石漠化>轻度石漠化>中度石漠化>强度石漠化,碱解氮含量呈现轻度石漠化>潜在石漠化>中度石漠化>强度石漠化,说明轻度和潜在石漠化的土壤氮素供应能力高于强度和中度石漠化。土壤全磷和速效磷含量是衡量土壤养分容量和强度水平的重要指标<sup>[19-21]</sup>。陈洪云等<sup>[27]</sup>研究表明,全磷含量呈现潜在石漠化>轻度石漠化>中度石漠化>强度石漠化的趋势,本研究结果与之一致,可见石漠化等级越高,土壤的磷素含量越低。全钾和速效钾含量主要反映土壤供钾能力<sup>[21]</sup>。熊康宁等<sup>[28]</sup>和黄金国等<sup>[29]</sup>研究表明,随着石漠化等级程度的增加,土壤钾素含量有降低的趋势,本研究结果与之基本一致,主要原因是从潜在石漠化到强度石漠化,植被覆盖度降低,枯枝落叶减少,岩石裸露率增大,水土流失加强,导致土壤的营养元素流失。

不同等级石漠化环境土壤理化性质相关性分析表明,土壤含水量、有机质、全氮与土壤其他绝大多数理化因子具有明显的相关性。土壤含水量与田间持水量、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾相关性呈极显著正相关。总孔隙与毛管孔隙度呈极显著相关关系,与 Wang 等<sup>[30]</sup>2013 年的研究结果一致,说明土壤的总孔隙度与毛管孔隙度有紧密的联系。土壤有机质与田间持水量、全氮、全钾呈极显著正相关,与含水量、速效钾呈显著正相关,与容重呈负相关,这与魏强等 2012 年得到的结论相似<sup>[31]</sup>,这是因为土壤一经开垦,并连续耕作之后,有机质含量发生变化,导致土壤的养分循环也发生变化,说明有机质是研究土壤理化性质的重要指标,在促进养分循环方面具有重要作用。通过主成分分析喀斯特石漠化环境土壤的 15 个理化性质指标可知,不同等级石漠化的土壤含水量、田间持水量、容重、孔隙度、有机质、氮素、磷素、钾素是土壤理化性质的关键因子,在改善土壤养分循环方面,对土壤结构的形成和稳定具有重要作用。主成分 1 和主成分 2 能反映所有指标信息量的 94.39%,评价结果具有很高的代表性并且与实际情况相符,表明主成分分析方法能准确、客观反映喀斯特地区的土壤理化性质表征的石漠化信息,为石漠化生态治理提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1]赵义涛,姜佰文,梁运江. 土壤肥料学[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [2]关连珠. 普通土壤学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2007.
- [3]熊康宁,陈永毕,陈起伟. 点石成金——贵州石漠化防治技术与模式[M]. 贵阳:贵州科学技术出版社,2011.
- [4]Drew D P. Accelerated soil erosion in a karst area: the Burren, Western Ireland[J]. Journal of Hydrology,1983,61(1/2/3): 113-124.
- [5]Legrand H E. Hydrological and ecological problems of karst regions[J]. Science,1973,179(4076):859-864.
- [6]Sweeting M M. Limestone landscape of South China[J]. Geology Today,1986,2:11-15.
- [7]Wu X Q, Liu H M, Huang X L, et al. Human driving forces: Analysis of Rocky desertification in karst region in Guanling County, Guizhou Province[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(5): 600-

608.

- [8]袁春,周常萍,童立强,等. 贵州土地石漠化的形成原因及其治理对策[J]. 现代地质,2003,17(2):181-185.
- [9]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.
- [10]熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [11]熊康宁,黎平,周忠发. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究——以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社,2002.
- [12]刘光松. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [13]曹志洪,周健民. 中国土壤质量[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [14]马雪华. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1999.
- [15]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [16]张韫. 土壤·水·植物——理化分析教程[M]. 北京:中国林业出版社,2011.
- [17]吴钦孝,韩冰,李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学,2004(2):1-5.
- [18]黄馨,刘君昂,周国英,等. 降香黄檀不同混交模式土壤肥力的比较研究[J]. 土壤通报,2014(5):1130-1136.
- [19]刘云,熊康宁. 不同等级喀斯特石漠化治理的土壤效应研究——以毕节石桥小流域为例[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2009,27(1):14-18.
- [20]盛茂根,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.
- [21]李志洪,赵兰坡,窦森. 土壤学[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [22]周文龙,熊康宁,龚进宏,等. 石漠化综合治理对喀斯特高原山地土壤生态系统的影响[J]. 土壤通报,2011(4):801-807.
- [23]闫俊华,周传艳,王安邦,等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. 热带亚热带植物学报,2011,19(3):273-278.
- [24]姚家平,李彪,熊智,等. 云南石漠化地区土壤性质分析[J]. 中国农学通报,2012,28(10):43-46.
- [25]林德喜,樊后保,苏兵强,等. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究[J]. 土壤学报,2004,41(4):655-659.
- [26]傅伯杰,郭旭东,陈利顶,等. 土地利用变化与土壤养分的变化——以河北省遵化县为例[J]. 生态学报,2001,21(6):926-931.
- [27]陈洪云,熊康宁,兰安军,等. 喀斯特峡谷地区不同等级石漠化治理的生态效应——以贵州省花江石漠化生态综合治理示范区为例[J]. 中国水土保持科学,2007,5(6):31-37.
- [28]熊康宁,王恒松,刘云. 毕节石桥小流域水土保持综合治理生态监测与效益评价[J]. 水土保持研究,2012,19(4):10-15.
- [29]黄金国,魏兴晓,王今之,等. 粤北典型岩溶区石漠化过程中植被退化对土壤有机质和养分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2014(1):15-18.
- [30]Wang H, Zhao W Z, Shan L S. Soil physical properties change in the process of oasisization[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2010,2(4): 0345-0353.
- [31]魏强,凌雷,柴春山,等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报,2012,32(15):4700-4713.