

滇东喀斯特地区红裸土表层团聚体稳定性及其影响因素研究^①

张磊¹, 王嘉学^{1*}, 代云川¹, 肖梦景¹, 秦洪元²

(1 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650092; 2 富源县林业局, 云南富源 655500)

摘要:红裸土是古气候影响下残存于高原面的古红土。对 14 个典型样地表层样品的团聚体稳定性及其影响因素进行了研究和分析, 结果表明: 根据国际制的划分, 红裸土总体属于粉质黏土; > 0.25 mm 水稳性团聚体含量(WR_{0.25}) 在 28.77% ~ 52.87%, 团聚体结构破坏率(PAD)在 34.28% ~ 68.10%, 平均重量直径(MWD)在 0.53 ~ 1 mm, 几何平均直径(GMD)在 0.37 ~ 0.58 mm, 分形维数(FD)在 2.79 ~ 2.92, 与其他西南典型岩溶区土壤相比, 5 个指标均反映出红裸土结构稳定性差, 抗蚀性弱, 物理性质劣的特征。分析还表明, 红裸土团聚体的水稳性结构指标均与有机质含量呈现出显著或者极显著的相关关系, 与黏粒含量均呈现相关关系, 但不显著。红裸土缺乏有机质的供给, 长期裸露, 导致表层土壤结构稳定性劣化, 是造成红裸土发育区水土流失严重和难以生长植被的重要原因。

关键词:红裸土; 团聚体; 黏粒; 有机质; 植被

中图分类号: S152

地表岩石-土壤-生物-水-大气相互作用带被称之为地球关键带(the critical zone), 土壤作为地球关键带的核心要素, 是连接大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的重要纽带, 也为植物的生长和发育提供了必要的环境^[1]。团聚体作为土壤结构的基本单元, 是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程速度和幅度的关键指标, 影响着土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗蚀性^[2], 也起着土壤肥力中心调节器的作用^[3]。国内外对土壤团聚体的形成与影响因素进行了相关研究。其中, Tisdall^[4]及 Lades 和 Waters^[5]认为大团聚体是微团聚体形成后菌丝和根系的缠绕作用形成的, 而 Elliott 和 Coleman^[6]则认为大团聚体首先形成, 当有机质分解后, 大团聚体会破碎形成小团聚体。章明奎^[7]、李小刚^[8]、姚贤良等人^[9]对影响土壤团聚体稳定性的主要胶结物进行了研究, 发现主要影响因素包括有机质、黏粒、碳酸钙。杨长明和欧阳竹^[10]及李阳兵等人^[11]研究了不同耕作制度对土壤团聚体稳定性的影响, 发现耕作使得团聚体的稳定性降低。黄欠如等^[3]、叶丽雨等^[12]、赵红等^[13]、梁尧等^[14]研究了施肥方式对土壤团聚体稳定性的影响, 发现施肥对团聚体的稳定性具有促进作用。土壤团聚体结构特征评价一般分为形态描述性评价、团聚体数量和质量

评价^[15], 常用的评价指标包括 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量(WR_{0.25})、重量平均直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体结构破坏率(PAD)等。

近年来, 滇东喀斯特地区零星分布的“红裸土”, 呈现了一种与石漠化伴生的特殊景观, 其最明显的特征是多年裸露, 退化严重, 土壤在物理性质方面的退化首先表现为地表团粒结构的变化。这是由于表层土壤团聚体稳定性对于维持土壤养分和水分、土壤侵蚀和径流产生具有重要作用^[16]。尽管前人对红壤团聚体稳定性及其影响因素进行了大量研究, 但是针对这一特殊景观, 尚未报道。因此研究红裸土表层团聚体的特征及其影响因素对认识其多年难以生长植被的原因以及石漠化的效应和水土保持工作具有重要意义。

1 研究区概况

研究区地理位置 103°42'10"~104°29'52"E, 24°49'58"~26°22'00" N, 地处乌蒙山脉中段, 西与滇中高原湖盆地区相嵌, 东部向贵州高原倾斜过渡, 中部为长江、珠江两大水系分水岭地带, 高原面保存较好, 形态完整, 东南部具有典型的岩溶丘原景观, 地势西北高, 东南低(图 1)。该区属半湿润常绿阔叶林

基金项目: 国家自然科学基金项目(41061021)和云南省科技计划项目(2012CA024)资助。

* 通讯作者(wjxynsd@163.com)

作者简介: 张磊(1989—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事区域环境与土壤研究。E-mail: 646595296@qq.com

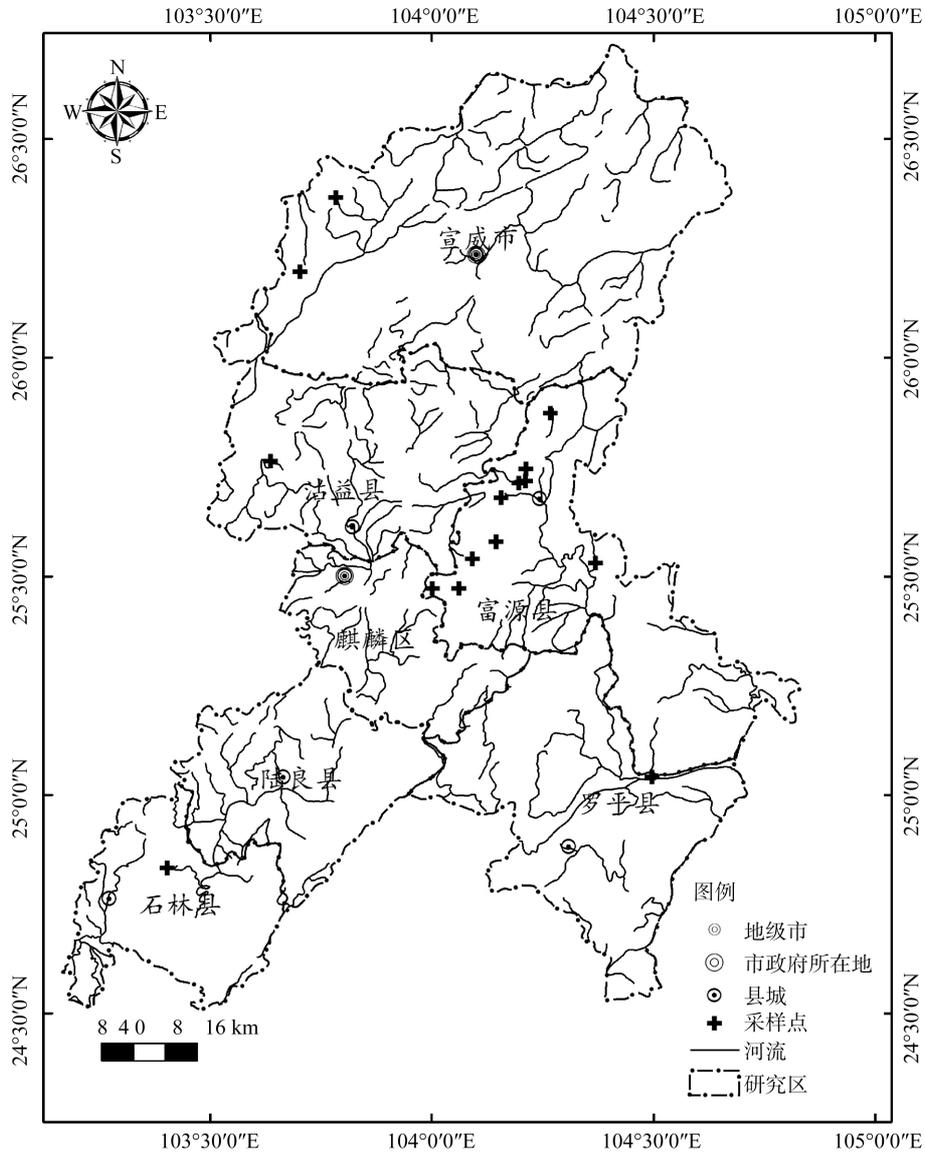


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of study area

带，低纬高原季风气候，年平均降水量 1 000 mm，平均气温 14.12℃，平均日照时数 1 998.12 h，夏半年受西南季风和东南季风控制，温暖湿润，冬半年受热带大陆气团控制，干燥少雨。区内广泛出露包括震旦、寒武、志留、泥盆、石炭、二叠、三叠等不同时代的碳酸盐岩，上覆红土分布广泛，植被主要为云南松林、常绿灌丛和草地。

2 研究方法

2.1 样品采集

通过室内遥感资料和野外考察分析，在红裸土主要分布的宣威拖克、富源清水塘、富源海田、富源多乐屯、富源凉水井、富源光山头、沾益海峰、石林月湖、罗平长底等地确定了典型发育地带的 14 个样地

(表 1)，使用 GPS 定位，每个样地设置 3 个(1 m × 1 m)样方，每个样方按对角线选取 5 个样点，用陶瓷工具(避免对测定微量元素的影响)采集 0 ~ 20 cm 土层土壤样品，将同一样方 5 个样点的土壤样品进行混合，重量控制在 2.0 kg 左右，以备实验室对土壤团聚体的测定(文中数据为重复 3 次平均值)。在采集和运输过程中尽量减少对土壤样品的扰动，以免破坏土壤团聚体。

2.2 测定方法

土壤颗粒的测定方法：取回的样品经过自然风干，过 2 mm 筛，除去植物以及动物的残体，称取土样约 1 g，加 30% 过氧化氢(H₂O₂)后浸泡 24 h 以去除有机质，加蒸馏水稀释、静置，除上层清液以除酸，超声波处理 5 min 后用激光粒度仪 Mastersizer

表 1 供试样品的基本特征
Table 1 Basic properties of tested soils

| 采样地点 | 样号 | 经纬度 | 海拔(m) | 砂粒(%) | 粉粒(%) | 黏粒(%) | 有机质含量(g/kg) |
|---------|-----|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 宣威拖克山腰 | S1 | 103°47'01"E, 26°22'00"N | 2 090 | 4.3 | 66.81 | 28.89 | 13.12 |
| 宣威务德-西泽 | S2 | 104°12'41"E, 25°43'07"N | 1 969 | 5.3 | 54.78 | 39.92 | 12.91 |
| 富源海田后山 | S3 | 104°12'47"E, 25°44'47"N | 2 143 | 6.19 | 56.73 | 37.08 | 17.44 |
| 富源后所小海子 | S4 | 103°42'10"E, 25°11'51"N | 2 040 | 4.11 | 57.31 | 38.58 | 11.25 |
| 富源多乐屯 | S5 | 104°11'48"E, 25°42'50"N | 2 050 | 1.79 | 58.10 | 40.11 | 18.21 |
| 富源凉水井岩奢 | S6 | 104°13'60"E, 25°70'45"N | 2 011 | 10.28 | 83.28 | 6.44 | 11.26 |
| 富源海坪清水 | S7 | 104°08'42"E, 25°34'47"N | 2 106 | 4.82 | 59.76 | 35.42 | 15.56 |
| 富源清水塘 | S8 | 104°03'42"E, 25°28'22"N | 2 158 | 1.88 | 86.14 | 11.98 | 18.02 |
| 富源杨家坟 | S9 | 104°16'03"E, 25°52'25"N | 2 106 | 5.17 | 50.38 | 44.45 | 12.57 |
| 富源光山头 | S10 | 104°00'04"E, 25°28'21"N | 2 168 | 4.44 | 49.39 | 46.17 | 19.06 |
| 富源回隆 | S11 | 104°00'40"E, 25°31'07"N | 2 087 | 0.49 | 58.96 | 40.55 | 19.04 |
| 沾益海峰 | S12 | 103°38'10"E, 25°45'49"N | 1 990 | 6.02 | 66.27 | 27.71 | 9.62 |
| 石林月湖 | S13 | 103°24'05"E, 24°49'58"N | 1 901 | 6.56 | 61.29 | 32.15 | 8.86 |
| 罗平长底 | S14 | 104°29'52"E, 25°02'30"N | 1 343 | 4.58 | 56.43 | 38.99 | 14.70 |

2000 测量土壤粒径的体积百分比,所有的样品均测 2 次,取平均值。有机质分析采用室内水合热-光电比色法测定。

团聚体的测定方法:将采集的原状土带回实验室后,沿着土壤自然结构,掰成直径约 1 cm 的小土块,除去植物残体、小石块以及动物遗体,自然风干后,采用沙维诺夫干筛法和湿筛法^[17]测定 >5、5~2、2~1、1~0.5、0.5~0.25、<0.25 mm 土壤粒径体积百分比。据此计算 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(WR_{0.25})、重量平均直径(WMD)、几何平均直径(GMD)、团聚体结构破坏率(PAD)、分形维数(FD):

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n (W_i) \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \times W_i) \quad (2)$$

$$PAD = \frac{m_d - m_w}{m_d} \times 100\% \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right\} \quad (4)$$

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{X}_i)}{M_t} \right] = (3 - FD) \lg \left(\frac{\bar{X}_i}{X_{\max}} \right) \quad (5)$$

式中: w_i 表示土壤不同粒级团聚体的重量(g); $\ln x_i$ 表示土壤粒级平均直径的自然对数; \bar{X}_i 表示某级团聚体平均直径; m_d 为干筛获得的粒径 >0.25mm 风干团

聚体的体积百分数; m_w 为湿筛获得的粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体的体积百分数; $M(r < \bar{X}_i)$ 为粒径小于 \bar{X}_i 的团聚体的质量; M_t 为测定团聚体的总质量; X_{\max} 为团聚体的最大粒径。

3 结果与分析

3.1 土壤质地

由表 1 可知,研究区表层土壤粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)含量最高,在 49.39% ~ 86.14%,平均值 61.83%;黏粒(<0.002 mm)含量在 6.44% ~ 46.17%,平均值 33.46%;砂粒(0.05 ~ 2 mm)含量最少,在 0.49% ~ 10.28%,平均值为 4.71%。根据土壤质地国际制的划分(图 2),红裸土总体属于粉质黏土。

3.2 水稳性团聚体特征

>0.25 mm 的水稳性团聚体(WR_{0.25})是土壤中最好的结构体,其含量可以反映土壤的抗蚀性能^[18]。从表 2 可以看出,红裸土 WR_{0.25} 含量在 28.37% ~ 52.67%,平均值为 36.85%。桂西北岩溶区不同利用类型下土壤中 WR_{0.25} 含量在 37.80% ~ 86.14%,平均值为 70.25%,玉米-红薯轮作地 WR_{0.25} 含量最少,为 37.85%^[19];贵州毕节岩溶区不同利用类型下土壤中 WR_{0.25} 含量在 55.04% ~ 84.57%,平均值为 73.65%,烤烟地 WR_{0.25} 含量最少,为 55.04%^[20];重庆北碚岩溶区不同利用类型下土壤中 WR_{0.25} 含量在 75.90% ~ 84.40%,平均值为 80.53%,耕地 WR_{0.25} 含量最少,为 75.90%^[21]。红裸土 WR_{0.25} 平

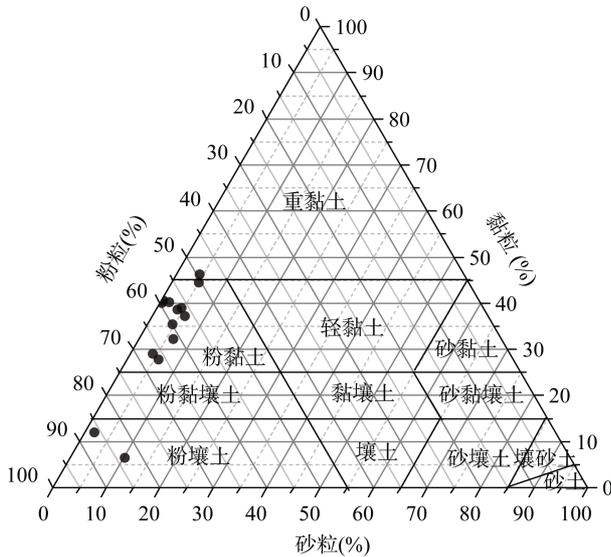


图 2 土壤质地
Fig. 2 Textures of soil samples

均含量与桂西北、贵州毕节、重庆北碚 3 个岩溶区不同利用类型下土壤中 $WR_{0.25}$ 平均含量相比，分别减少了 54.44%、49.96%、52.24%，与各区含量最少的玉米-红薯轮作地、烤烟地、耕地相比，分别减少了 2.64%、33.05%、51.45%。表明与其他喀斯特地区土壤相比，红裸土 $WR_{0.25}$ 含量最少，抗蚀能力最差。

土壤团聚体结构破坏率(PAD)越大，土壤结构越易崩解破碎，土壤越容易被侵蚀，其值越小，团聚体稳定性越高^[22]。桂西北、贵州毕节、重庆北碚不同利用类型下土壤 PAD 分别在 9.60% ~ 54.90%、9.84% ~ 42.84%、7.84% ~ 22.20%，平均值分别为 24.38%、21.30%、14.27%^[19-21]。红裸土 PAD 在 34.28% ~ 68.10%，平均值为 57.46%(表 2)，与 3 地平均含量相比，分别增加了 1.36、1.70、3.02 倍，与 3 地 PAD 最高的玉米-红薯轮作地、烤烟地、耕地相比，分别

表 2 不同样地表层(0~20 cm)各粒级团聚体分布
Table 2 Distributions of soil aggregates at surface layer (0-20cm) in different sampling sites

| 样号 | 团聚体组成 (%) | | | | | | $WR_{0.25}$ (%) | PAD (%) |
|-----|-----------|----------|----------|------------|---------------|-----------|-----------------|---------|
| | > 5 mm | 5 ~ 2 mm | 2 ~ 1 mm | 1 ~ 0.5 mm | 0.5 ~ 0.25 mm | < 0.25 mm | | |
| S1 | 1.03 | 4.23 | 7.69 | 15.82 | 1.94 | 69.29 | 30.71 | 64.22 |
| S2 | 1.55 | 7.85 | 9.87 | 18.42 | 3.77 | 58.54 | 41.46 | 52.96 |
| S3 | 0.63 | 2.11 | 7.99 | 15.59 | 1.91 | 71.77 | 28.23 | 68.10 |
| S4 | 1.30 | 6.91 | 9.46 | 18.08 | 3.29 | 60.96 | 39.05 | 54.37 |
| S5 | 1.52 | 8.36 | 10.35 | 18.86 | 3.96 | 56.95 | 43.03 | 48.89 |
| S6 | 1.09 | 5.46 | 8.58 | 17.31 | 2.63 | 64.93 | 35.07 | 59.64 |
| S7 | 0.49 | 5.09 | 9.63 | 18.58 | 2.41 | 63.80 | 36.19 | 59.01 |
| S8 | 0.49 | 5.71 | 10.90 | 18.74 | 1.91 | 62.25 | 37.74 | 58.21 |
| S9 | 0.63 | 3.76 | 9.08 | 15.56 | 1.49 | 69.48 | 30.52 | 66.03 |
| S10 | 0.97 | 6.46 | 10.58 | 19.31 | 3.31 | 59.37 | 40.63 | 53.03 |
| S11 | 1.99 | 11.5 | 11.67 | 21.50 | 6.16 | 47.18 | 52.82 | 34.28 |
| S12 | 1.22 | 3.43 | 6.75 | 15.50 | 1.87 | 71.23 | 28.77 | 67.30 |
| S13 | 0.05 | 3.71 | 8.63 | 17.84 | 1.51 | 68.26 | 31.74 | 64.78 |
| S14 | 0.23 | 7.20 | 10.38 | 20.70 | 1.38 | 60.11 | 39.89 | 56.17 |

提高了 4.99%、34.55%、159.64%。表明与其他喀斯特地区土壤相比，红裸土 PAD 最高，稳定性差，抗蚀能力弱的特点。

重量平均直径(MWD)和几何平均直径(GMD)反映的是土壤团聚体粒级大小分布状况，其值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高，稳定性越强^[23]。测定结果表明(图 3)，红裸土 MWD 在 0.53 ~ 1 mm，平均值为 0.69 mm，GMD 为 0.37 ~ 0.58 mm，平均值为 0.44 mm。桂西北、贵州毕节、重庆北碚 3 地不同利用类型土壤的 MWD 分别在 0.54 ~ 3.83、1.02 ~ 3.14、0.97 ~ 2.39 mm，平均值分别为 2.47、2.18、1.80 mm；

GMD 分别在 0.37 ~ 2.74、0.55 ~ 1.99、0.69 ~ 1.52 mm，平均值分别为 1.62、1.28、1.15 mm^[19-21]。红裸土 MWD 平均值与 3 地土壤 MWD 平均值相比，分别减少了 252.86%、211.43%、157.14%，与 3 地土壤 GMD 平均值相比，分别减少了 141.43%、82.86%、64.29%，与 3 地土壤 MWD 和 GMD 最小的玉米-红薯轮作地、烤烟地、耕地相比，红裸土的 MWD 和 GMD 低于烤烟地和耕地，略高于玉米-红薯轮作地(图 3)。红裸土的 MWD 和 GMD 值总体低于其他岩溶区不同利用类型土壤，表明红裸土团聚体平均粒径的团聚度低，稳定性差的特点。

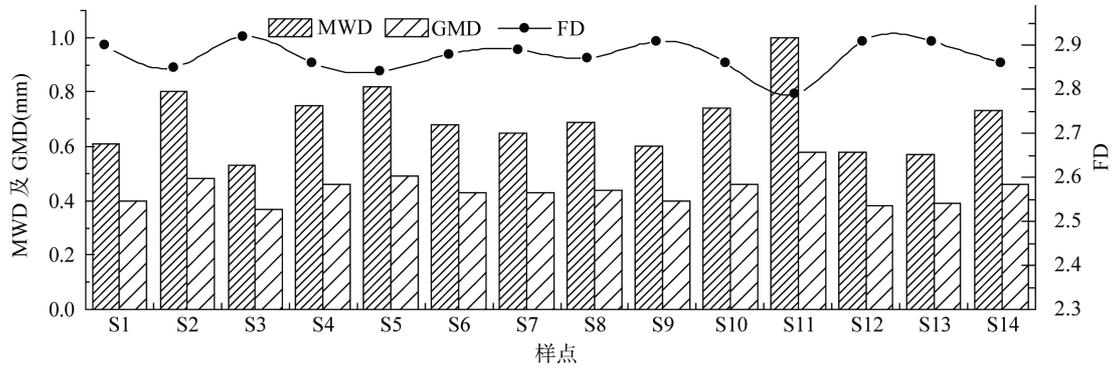


图 3 不同样点土壤团聚体稳定性参数

Fig. 3 Stability parameters of soil aggregates in different sample sites

土壤团聚体分形维数(FD)可用于表征团聚体的稳定性以及物理性质的优劣,其值越小,结构稳定性、物理性质越好,反之越差^[24]。如图 3 所示,红裸土团聚体 FD 在 2.79~2.92,平均值为 2.88。桂西北、贵州毕节、重庆北碚不同利用类型土壤团聚体 FD 分别在 2.10~2.91、2.20~2.73、2.26~2.74,平均值分别为 2.39、2.45、2.46^[19-21]。红裸土团聚体 FD 平均值与 3 地土壤团聚体 FD 平均值相比,分别增加了 20.50%、17.55%、17.07%,与 3 地土壤 FD 最大的玉米-红薯轮作地、烤烟地、耕地相比,红裸土团聚体 FD 平均值高于烤烟地、耕地,略低于玉米-红薯轮作地,总体上红裸土团聚体 FD 值高于其他岩溶区不同利用类型土壤,表明红裸土结构稳定性、物理性质较差的特点。

综上所述,与其他岩溶区不同利用类型土壤相比,WR_{0.25}、PAD、MWD、GMD、FD 反映了红裸土结构稳定性差,抗蚀能力弱、物理性质劣的特征。

3.3 团聚体稳定性与其影响因素的关系

相关研究表明:水稳性团聚体的稳定性主要受有机质、黏粒、碳酸钙等的影响,本研究所采样区淋溶作用强,故本文仅分析团聚体稳定性与有机质和黏粒的关系。

章明奎^[7]认为水稳定性团聚体稳定性与有机质含量呈正相关,李阳兵等^[11]、严宁珍等^[25]对岩溶区不同利用方式下团聚体及胶结物的关系研究表明:有机质对土壤水稳性团聚体有较大影响,有机质含量下降是水稳性团聚体减少的主要原因。红裸土团聚体稳定性与有机质的关系表明(表 3):有机质与 WR_{0.25}、MWD、GMD 呈正相关,且均达到极显著或者显著水平,表明有机质含量的增加对团聚体的稳定性具有促进作用;有机质与 PAD、FD 呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.549**、-0.525**,表明有机质的减少使得团聚体的稳定性变差,物理性质变劣,这与上文研究结果基本一致。

表 3 土壤团聚体与主要胶结物相关分析结果(*r* 值)

Table 3 Correlation between parameters of soil aggregates and main cementing agents

| | WR _{0.25} | PAD | WMD | GMD | FD |
|-----|--------------------|------------|----------|-----------|------------|
| 有机质 | 0.669 2** | -0.549 1** | 0.488 0* | 0.519 9** | -0.524 9** |
| 黏粒 | 0.167 7 | -0.244 1 | 0.227 8 | 0.224 3 | -0.191 4 |

注:*表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关,**表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关。

水稳性团聚体结构指标与黏粒含量的相关分析表明(表 3):黏粒与 WR_{0.25}、MWD、GMD 呈正相关,与 PAD、FD 呈负相关,但相关性均不显著。因此,有机质含量的下降是红裸土团聚体水稳性下降的主要因素,这是由于有机质含量丰富时,砂粒、粉粒可以通过黏团和有机质结合并形成良好的团粒结构,团粒结构良好的土壤具有储水、透水、通气性能佳的优点,相反,缺乏有机质,团粒结构不稳定,分散的黏粒会堵塞土壤的孔隙,降低土壤的通气、透水功能,

造成雨量小时表土容易被冲刷,干时板结的现象^[26]。

4 结论

1) 根据土壤质地国际制划分,红裸土属于粉质黏土,具有质地黏重,耕性差,土粒之间缺少大孔隙,不易通气、储水、透水的特征。

2) 红裸土 WR_{0.25} 在 28.77%~52.87%,平均值为 36.85%; PAD_{0.25} 在 34.28%~68.10%,平均值为 57.46%; WMD 在 0.53~1 mm,平均值为 0.69 mm;

GMD 在 0.37 ~ 0.58 mm, 平均值为 0.44 mm; FD 在 2.79 ~ 2.92, 平均值为 2.85, 与其他西南典型岩溶区土壤相比, 5 个指标均反映出红裸土结构稳定性差, 抗蚀性弱, 物理性质劣的特征。

3) 有机质对红裸土水稳性团聚体形成有重要作用, 与水稳性团聚体结构指标均存在显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 相关关系, 黏粒对红裸土团聚体水稳性影响小。红裸土缺乏有机质的供给, 长期裸露, 导致表层土壤结构稳定性劣化, 是造成红裸土发育区水土流失严重和难以生长植被的重要原因。

参考文献:

- [1] 张磊, 王嘉学, 刘保强, 肖梦景, 程燕芳, 许路艳. 喀斯特山原红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 8-15
- [2] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85
- [3] 黄欠如, 胡锋, 袁颖红, 刘满强, 李辉信. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响[J]. 土壤, 2007, 39(4): 608-613
- [4] Tisdall JM. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils[J]. Plant Soil, 1994, 117: 145-153
- [5] Lades JM, Waters AG. Aggregate hierarchy in soils[J]. Australia Journal of soil science, 1991, 29: 815-828
- [6] Elliott ET, Coleman DC. Let the soil work for us[M]. Ecological Bulletins, 1988, 39: 23-32
- [7] 章明奎. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 359-366
- [8] 李小刚. 甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 263-270
- [9] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 25-33
- [10] 杨长明, 欧阳竹. 华北平原农业土地利用方式对土壤水稳性团聚体分布特征及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2008, 40(1): 100-105
- [11] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 周宝同. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 451-455
- [12] 叶丽丽, 王翠红, 周虎, 彭新华. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 62-66
- [13] 赵红, 袁培民, 吕贻忠, 李季. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306-311
- [14] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽. 东北黑土有机质组分与结构的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(6): 888-897
- [15] 张保华, 何毓蓉, 苗国增, 丁存才. 贡嘎山东坡亚高山林区土壤结构综合评价[J]. 山地学报, 2006, 24(4): 504-509
- [16] 赵勇钢, 赵世伟, 华娟, 张扬. 半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究[J]. 草地学报, 2009, 17(1): 106-112
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-106
- [18] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 魏朝富, 倪九派. 植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 122-128
- [19] 魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 何寻阳. 桂西北喀斯特土壤对生态系统退化的响应[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1308-1314
- [20] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 程富东. 喀斯特植被恢复过程中的土壤分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 178-182
- [21] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富, 周宝同. 利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 5(11): 451-455
- [22] 马帅, 赵世伟, 李婷, 李晓晓, 曾宪芳. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 157-161
- [23] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 李保国. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979
- [24] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 冉华, 张世熔, 廖尔华. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤团粒结构的分形特征[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 56-65
- [25] 严宁珍, 白仲才, 徐卫红, 李阳兵. 喀斯特山地土地利用方式对土壤团粒的影响——以重庆黔江为例[J]. 中国岩溶, 2011, 30(1): 72-77
- [26] 杨慧, 张连凯, 于爽, 曹建华. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. 中国岩溶, 2012, 31(3): 265-271

Study on Stability and Influential Factors on Surface-layer Aggregates of Red Bare Soil in Karst Area of East Yunnan, China

ZHANG Lei¹, WANG Jia-xue^{1*}, DAI Yun-chuan¹, XIAO Meng-jing¹, QIN Hong-yuan²

(1 *School of Tourism and Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;*

2 Fuyuan Forestry Bureau, Fuyuan, Yunnan 655500, China)

Abstract: Red bare soil is a kind of the paleosol remained in the plateau surface influenced by the ancient climate. The study analyzed the stability and influential factors of the surface-layer soil aggregates in 14 typical samples of paleosol. The results showed that: 1) on the basis of international standard partition, the red bare soil generally belonged to silty clay in texture; 2) the indices of $WR_{0.25}$ ranged from 28.77% to 52.87%, PAD from 34.28% to 68.10%, MWD from 0.51 to 1 mm, GMD 0.37 to 0.58 mm, and FD from 2.79 to 2.92, respectively, all the above parameters reflected red bare soil are poor in structural stability, anti-erodibility and physical property when compared with other typical soils in southwest karst area of China; 3) soil organic matter played a more important role in deciding water stability of red bare soil aggregates than clays. Long-term bareness and soil organic matter shortage deteriorate soil structure stability, led to severe soil erosion and hinder vegetation restoration in red bare soil area.

Key words: Red bare soil; Aggregate; Clay; Organic matter; Vegetation