

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.027.

吕佼容, 徐小军, 李红, 等. 不同前处理方法对紫色土粒度测试的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 79-87.

Lyu Jiaorong, Xu Xiaojun, Li Hong, et al. Influence of Different Pretreatment Method on the Particle Size Distribution Measurement of Purple Soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 79-87.

# 不同前处理方法对紫色土粒度测试的影响

吕佼容<sup>1</sup>, 徐小军<sup>2</sup>, 李红<sup>1</sup>, 鲍玉海<sup>1</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>

(1.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610017)

**摘要:** [目的]厘清不同前处理方法对土壤颗粒组成(PSD)测定结果的影响,对土壤水分运移、养分迁移、土壤侵蚀和泥沙搬运过程研究有重要意义。[方法]选择典型紫色土人工林地剖面土壤(0—110 cm)为研究对象,采用浸泡、振荡的物理方式, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HCl 处理的化学方式等 9 种前处理方式,然后用 Mastersizer2000 激光粒度仪进行颗粒分析。[结果](1) 各物理前处理中值粒径较干测(对照)平均减小 33.79  $\mu\text{m}$ ,其中浸泡、振荡 2 h、振荡 10 h 中值粒径依次减小,但其对黏粒的释放作用较弱,不同振荡时间之间黏粒含量无显著差异( $p>0.05$ )。各化学处理中值粒径较对照平均减小 32.72  $\mu\text{m}$ ,其中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理总体比 HCl 处理分散作用更强,该处理下黏粒含量为所有处理中最大,平均>4%。(2) 各物理前处理方式下,不同土层间颗粒含量总体无显著差异。对不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量的敏感性中土层(30—70 cm)>下土层(70—110 cm)>上土层(0—30 cm),其中 20—90 cm 土层在足量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理下砂粒含量比 10 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理平均增多 9.5%,粉粒含量平均减少 9.7%;对不同 HCl 处理的敏感性上,中土层>下土层,其中 0—90 cm 土层在 10 ml HCl+洗酸处理下砂粒含量比 10 ml HCl 处理平均增多 6.2%,粉粒含量平均减少 5.4%,黏粒含量则无明显土层分异。(3) 足量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理下砂粒和粉粒含量与剖面有机质含量呈显著线性相关( $r>0.8$ ),而 HCl 处理下剖面碳酸钙含量则与各级颗粒含量无显著相关性。[结论]物理和化学前处理方法之间 PSD 差异显著,且化学处理中试剂用量不同对 PSD 有显著影响,研究可为不同研究目的下紫色土颗粒组成分析提供参考。

**关键词:** 紫色土; 颗粒分析; 前处理方法; 土壤剖面

中图分类号: S151.9<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0079-09

## Influence of Different Pretreatment Methods on the Particle Size Distribution Measurement of Purple Soil

Lyu Jiaorong<sup>1</sup>, Xu Xiaojun<sup>2</sup>, Li Hong<sup>1</sup>, Bao Yuhai<sup>1</sup>, He Xiubin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** [Objective] It is of great significance for clarifying the influence of different pretreatment methods on the measurement of soil particle composition (PSD), which is the basis of studies on water transport, nutrient transport, soil erosion and sediment transport processes. Soil particle composition (PSD) is the basis of soil physical properties and has important implications for [Methods] Typical purple soil natural woodland profile soil (0—110 cm) was selected, and 9 pretreatment methods were adopted, including physical methods of soaking and shaking, and chemical methods of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HCl treatment, and then particle analysis was carried out with a Mastersizer 2000 laser particle size analyzer. [Results] (1) The median particle size of each physical pretreatment decreased by 33.79  $\mu\text{m}$  on average compared with the direct measurement without any pretreatment (control). The median particle size under pretreatments of soaking, shaking for 2 h, and

收稿日期: 2022-12-07

修回日期: 2023-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2040207); 四川省科技计划项目(2022YFS0493)

第一作者: 吕佼容(1994—), 女, 四川乐山人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: lvjiaorong@imde.ac.cn

通信作者: 贺秀斌(1967—), 男, 陕西镇安人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xiubinh@imde.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

shaking for 10 h decreased sequentially, but their release effects on clay were weak. There was no significant difference in clay content between different shaking times ( $p>0.05$ ). The median particle size of each chemical treatment could be reduced by  $32.72\text{ }\mu\text{m}$  on average compared with control. Among them, the  $\text{H}_2\text{O}_2$  treatments had a stronger dispersing effect than the HCl treatments, and the clay contents of  $\text{H}_2\text{O}_2$  treatments were the highest among all treatments, which were greater than 4%. (2) Each physical pretreatment method had a uniform dispersion effect among soil layers. Sensitivity to different  $\text{H}_2\text{O}_2$  dosage of different layer of soil was middle (30—70 cm) > lower (70—110 cm) > upper (0—30 cm). Specifically, sand content in the 20—90 cm soil layer under sufficient  $\text{H}_2\text{O}_2$  pretreatment increased by 9.5% and silt content decreased by 9.7% compared with 10 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  pretreatment. Sensitivity to different HCl pretreatments of different layer of soil was upper and middle > lower, specifically the sand content of the upper and middle soil (0—90 cm) increased by 6.2% on average under the treatment of 10 ml HCl plus acid washing compared with the treatment without acid washing. The silt content reduced by an average of 5.4%. There was no significant difference in clay content among soil layers under these treatments. (3) There was a significant linear correlation ( $r>0.8$ ) between the content of sand and silt and the content of organic matter in the profile under the treatment of sufficient  $\text{H}_2\text{O}_2$ , but there was no significant correlation between the content of calcium carbonate and any particles under the treatment of HCl. [Conclusion] There are significant differences in PSD between different pretreatment methods, and the amount of reagent in chemical pretreatments affects the PSD obviously, too. This study can provide a reference for the analysis of purple soil particle composition under different research purposes.

**Keywords:** purple soil; particle size analysis; pretreatment method; soil profile

紫色土是在亚热带和热带气候条件下以三叠系、侏罗系、白垩系时代形成的紫色或紫红色砂岩、页岩经过长期的风化作用和侵蚀作用形成的岩性土<sup>[1-2]</sup>,其土层较薄,径流系数高,极易被水力侵蚀<sup>[2-3]</sup>。且因其砾石多的初育土壤特征导致紫色土地下径流与养分渗漏现象同样显著<sup>[4-5]</sup>。近几年,紫色土区壤中流现象,及其携带泥沙颗粒和养分流失的相关研究较多<sup>[4,6,7]</sup>,一些地表粗化严重的山地壤中流占总径流量的 70%~80%,有壤中流情况下侵蚀量可提高 30%以上<sup>[8]</sup>,壤中流携带养分流失量占养分总流失量的比例可达 70%<sup>[9]</sup>。

地表径流和壤中流引起土壤颗粒分离和输移<sup>[7]</sup>,侵蚀泥沙中细颗粒比表面积大,吸附作用强<sup>[10-11]</sup>,是肥料流失和污染物(重量金属、农药等)流失的重要载体<sup>[12-13]</sup>。现有侵蚀产沙过程中的土壤颗粒组成研究中大都将泥沙进行了彻底分散<sup>[14-16]</sup>。而研究表明,土壤团聚体能够抵抗降雨侵蚀和径流冲刷,侵蚀泥沙中包括了团聚体和单粒,因此泥沙在未分散与分散的情况下颗粒分布不同<sup>[17]</sup>。侵蚀土壤细颗粒特别是黏粒随径流迁移至水体中<sup>[18]</sup>,溶出的全氮和全磷是造成水体富营养化的重要原因,而土壤颗粒粒级的大小对母质溶出的全氮和全磷的含量有显著影响<sup>[19-21]</sup>。有研究表明在相同的振荡时间内,随着母质颗粒的逐级

增大养分溶出量先增加后减小<sup>[20]</sup>。因此不同研究目下对颗粒组成特性分析的需求不同,对应的不同前处理方法对颗粒分析结果有重要影响。

紫色土作为新成土,其中包含了团聚体、岩屑和单粒等复杂的粒度组成,不同的前处理方法和分析方法,都会对其颗粒组成测定结果造成影响,而目前紫色土剖面颗粒分析的相关研究还较少。同时,紫色土壤中流现象突出,泥沙颗粒和养分随壤中流迁移占比大<sup>[5,22]</sup>,有必要对土壤剖面颗粒组成,及前处理方法对颗粒分析结果的影响进行研究,为壤中流土壤侵蚀过程中不同测试分析目的土壤颗粒分析研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 土样采集

采样点位于中国科学院三峡库区水土保持与环境研究站,隶属重庆市忠县境内( $107^{\circ}32'—108^{\circ}14'E$ ,  $30^{\circ}03'—30^{\circ}35'N$ ),该区属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温  $19.2^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量  $1\,150\text{ mm}$ 。采样地为典型紫色土人工林地,土壤为紫色砂页岩风化后形成的紫色土,树种主要为樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) presl)。选取海拔相同、长势均一的 3 个样点挖土壤剖面,按每 10 cm 划分一层,分层采集原状剖面土样,采样深度为 0—110 cm。将 3 个样

点采集的各层土样分别均匀混合后用四分法收集每个土层各 1 kg 土样。然后将样品置于塑料盒中,带回实验室。及时将土样掰成小块,自然风干。将风干土样全部过 2 mm 的筛,然后取 1/8 过 0.25 mm 筛。过 2 mm 筛的样品用于测定粒径组成,过 0.25 mm 筛的样品用于测定有机质、碳酸盐含量及 pH 值。

1.2 前处理方法与样品分析

样品分析在中国科学院成都山地灾害与环境研究所分析测试中心进行。称取 5 g 过 2 mm 筛的土壤样品置于 100 ml 离心管中进行前处理。前处理中,试剂都沿容器壁缓缓加入。加水浸泡可以破坏土壤中的非水稳性团聚体,振荡是分散土壤颗粒的一种物理方法,加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>是为了去除样品中混杂的有机质颗粒,并去除有机质胶结,加入盐酸是为了去除碳酸盐胶结<sup>[23]</sup>。

前处理方法见表 1。T<sub>1</sub>为不进行任何前处理,直接加入进样器进行测量;T<sub>2</sub>为用纯水浸泡 24 h;T<sub>3</sub>为用纯水浸泡 24 h,并振荡 2 h(振幅 20 mm,转速 200 r/min);T<sub>4</sub>为用纯水浸泡 24 h,并振荡 10 h(振幅 20 mm,转速 200 r/min);T<sub>5</sub>为加入 10 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>进行反应;T<sub>6</sub>为反复多次加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,直到无气泡产生;T<sub>7</sub>为加入 10 ml 盐酸进行反应;T<sub>8</sub>为加入 10 ml 盐酸充分反应,后用纯水洗至中性;T<sub>9</sub>为反复多次加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,直到无气泡产生,再加入 10 ml 盐酸充分反应后用纯水洗至中性,再加入 10 ml (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>溶液浸泡 24 h。试验所用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>浓度为 10%,盐酸浓度为 10%。对于需要洗涤的样品,反应完毕后向离心管中加满纯水,静置 24 h 去除上清液,然后进行下一步操作;对于不需洗涤的样品,反应完成后静置去除上清液,直接进行下一步操作。每个处理 3 个重复。

表 1 前处理方法设计

Table 1 Pretreatment methods of soil samples before PSD measurement					
处理号	纯水/ml	振荡/h	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /ml	盐酸/ml	(NaPO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> /ml
T <sub>1</sub>	0	0	0	0	0
T <sub>2</sub>	10	0	0	0	0
T <sub>3</sub>	10	2	0	0	0
T <sub>4</sub>	10	10	0	0	0
T <sub>5</sub>	0	0	10	0	0
T <sub>6</sub>	0	0	10	0	0
T <sub>7</sub>	0	0	0	10	0
T <sub>8</sub>	0	0	0	10	0
T <sub>9</sub>	0	0	10	10	10

注:试剂用量均针对激光粒度仪测定的 5 g 样品,当样品用量减少或增加时,试剂用量相应减少或增加。

颗粒组成采用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 激光粒度仪(设置:泵速 3 000 r/min,激光强度 15)测定。用取样勺充分搅拌均匀泥浆样品,接着迅速取样并加入进样器,使遮光度在 10%~20%。测定完毕,根据美国农部粒级制分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(0.05~2 mm)。土壤有机质和碳酸盐采用元素分析仪进行测定,pH 值用酸度计测定。

1.3 数据处理

利用 Excel 2019 版对数据进行分析处理,IBM SPSS Statistics 23 进行差异性检验和相关分析,并利用 Origin 9.0 制图。

2 结果与分析

从表 2 可以看出,各前处理均较对照处理颗粒变细,中值粒径和平均粒径减小,物理处理和化学处理之间粒度测试结果差异显著。物理处理中,浸泡分散了部分非水稳性团聚体,中值粒径相比对照减小了 17.18 μm;振荡(T<sub>3</sub>,T<sub>4</sub>)则对颗粒有显著分散作用,中值粒径较对照减小了 37.86~45.64 μm,较纯水浸泡中值粒径进一步减小了 41.2%~56.7%,其中振荡 10 h(T<sub>4</sub>)下得到全部处理中最小的中值粒径。各化学处理(T<sub>5</sub>—T<sub>9</sub>)相较于对照均能显著减小中值粒径,平均减小 51.4%,其中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>处理总体比 HCl 处理下中值粒径小,分散作用更强,且黏粒含量最多,均>4%。添加过量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(T<sub>6</sub>)和 10 ml HCl 处理后添加洗酸程序(T<sub>8</sub>)均会使中值粒径变大,颗粒整体变粗,而二者结合(T<sub>9</sub>)处理比单一处理颗粒更细。

表 2 各前处理下剖面土壤砂粒、粉粒、黏粒平均含量及平均中值粒径(按中值粒径从大到小排序)

Table 2 The average content and median particle size of sand, silt and clay in the soil profile under each pretreatment				
处理	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	中值粒径/μm
T <sub>1</sub>	59.22±2.37	39.80±2.01	0.97±0.03	67.35±3.01
T <sub>2</sub>	50.00±2.01	48.18±2.13	1.81±0.07	50.17±1.36
T <sub>8</sub>	41.31±1.92	56.61±3.64	2.06±0.07	37.24±2.00
T <sub>6</sub>	41.83±2.51	53.73±2.41	4.45±0.24	36.77±0.97
T <sub>9</sub>	36.45±1.02	59.84±1.68	3.70±0.11	31.02±1.08
T <sub>7</sub>	36.57±1.68	60.16±3.57	2.72±0.08	30.64±1.60
T <sub>3</sub>	36.01±0.89	61.17±2.16	2.81±0.03	29.49±1.32
T <sub>5</sub>	34.43±1.34	61.39±3.99	4.19±0.25	27.95±0.83
T <sub>4</sub>	29.44±0.67	67.59±3.04	2.97±0.12	21.71±0.73

2.1 浸泡与振荡对颗粒组成的影响

图 1 为物理处理下不同土层颗粒含量变化,可以

看出  $T_2$ — $T_4$  处理下,砂粒和粉粒含量随土层深度的变化曲线基本平行。对照处理下( $T_1$ )剖面砂粒和粉粒平均含量分别为 59.2%,39.8%,经过纯水浸泡( $T_2$ )各土层砂粒含量减少约 9.2%,粉粒含量增加约 8.4%。 $T_3$ 和  $T_4$  处理后,各土层砂粒含量依次减少约 23.2%,30.3%,粉粒含量依次增加约 21.4%,26.8%,表明振荡时间越长,对砂粒和粉粒的分散作用越强。不同处理间砂粒、粉粒和黏粒曲线大致平行,将土层按深度分为上(0—30 cm)、中(30—70 cm)、下土层(70—110 cm)三个层次,分别计算在  $T_2$ — $T_4$  处理下三个土层砂粒、粉粒和黏粒平均含量与  $T_1$  的差值,结果显示土层间差值的差异不显著( $p < 0.05$ ),表明不同土层土壤颗粒对各物理前处理的敏感程度相似,无明显分异性。

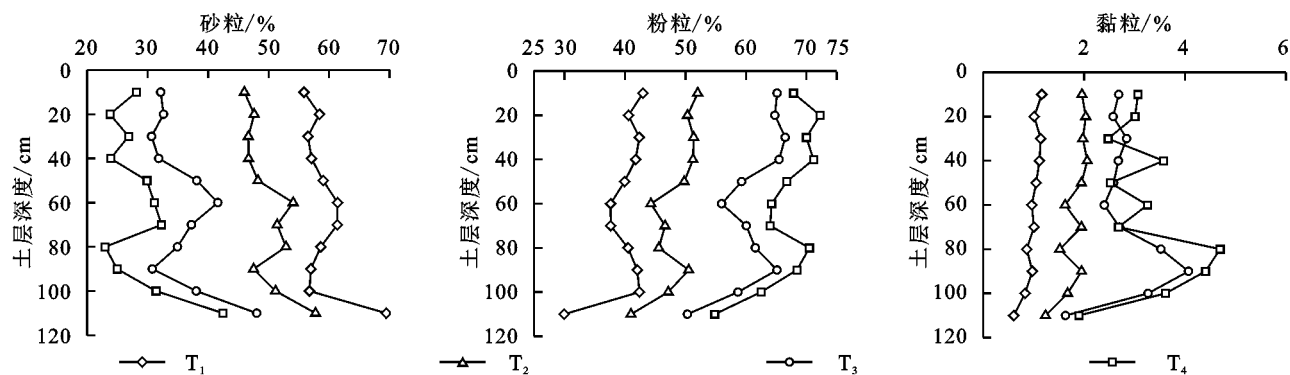


图 1 对照( $T_1$ )、纯水浸泡( $T_2$ )、振荡 2 h( $T_3$ )与振荡 10 h( $T_4$ )后各土层颗粒组成

Fig. 1 The content of sand, silt and clay of each layer under  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  and  $T_4$  pretreatments

## 2.2 双氧水( $H_2O_2$ )用量对颗粒组成的影响

颗粒分析前处理中双氧水处理是为了除去样品中的有机质,破坏土壤结构,分散土壤。表 2 显示,化学处理中单独加 10 ml  $H_2O_2$ 对紫色土样品分散作用最强,中值粒径为 27.95  $\mu m$ ,较对照中值粒径减小 58.5%。但  $H_2O_2$ 用量不同分散效果有显著差异,过量  $H_2O_2$ 会导致颗粒变粗,中值粒径增大 8.82  $\mu m$ 。另外,所有处理中  $H_2O_2$ 处理对黏粒的分散释放作用最显著,对照处理黏粒含量仅为 0.97%, $H_2O_2$ 处理后黏粒含量增加至 4.19%~4.22%。结果表明紫色土有机质胶结形成的团聚体占比大,仅加入  $H_2O_2$ 处理即可实现很好的颗粒分散效果,且有机质胶结是紫色土中黏粒的主要团聚形式,导致  $H_2O_2$ 处理下黏粒分散释放现象最显著。

图 2 为各土层样品在不同  $H_2O_2$ 用量下颗粒组成,砂粒和粉粒含量在  $T_5$ 和  $T_6$ 处理下总体差异显著( $p < 0.05$ ),其中不同土层颗粒含量对  $H_2O_2$ 用量敏感性不同。 $T_5$ 和  $T_6$ 处理下三个土层砂粒、粉粒和黏粒平均含量与  $T_1$  的差值为中土层>下土层>上土层( $p < 0.05$ ),表明不同  $H_2O_2$ 用量可导致中土层砂粒和粉粒含

对于黏粒含量的变化, $T_2$ 处理使黏粒平均含量增加 0.8%。振荡处理下( $T_3$ , $T_4$ )曲线基本重合,不同振荡时间下各土层黏粒含量无显著差异( $p > 0.05$ )。与  $T_2$ 相比,振荡处理( $T_3$ , $T_4$ )平均使黏粒含量增加 1.2%,其中 70—100 cm 土层黏粒含量增加较明显。这可能是因为紫色土剖面土壤深层发育程度低,有机质和碳酸钙含量均较少,进而团聚体含量少,因此振荡则可使黏粒释放。

结果表明物理前处理中振荡的分散作用大于浸泡,且振荡时间越长,颗粒越细。振荡时间对砂粒和粉粒级的颗粒分散转化作用较明显,而对黏粒级颗粒的分散作用几乎无差异。虽然振荡分散效果显著(表 2),所得中值粒径最小,但其仍无法分散一些有机质和碳酸盐胶结的水稳性团聚体,对黏粒的释放作用较弱。

量显著不同,而上层土砂粒和粉粒则对  $H_2O_2$ 用量敏感性较弱。具体来看,0—10 cm 和 100—110 cm 土层在  $T_5$ 和  $T_6$ 处理下砂粒和粉粒含量相差不大,曲线相交,而 20—90 cm 土层砂粒和粉粒含量差异显著,表现为足量  $H_2O_2$ 处理下砂粒含量显著增多,平均增多 9.5%,粉粒含量显著减少,平均减少 9.7%(图 3)。各土层黏粒含量曲线在  $T_5$ 和  $T_6$ 处理之间基本重合,二者之间黏粒含量差值<1%,且无显著差异。表明不同  $H_2O_2$ 用量对黏粒的分散作用相差不大,且各土层黏粒对  $H_2O_2$ 用量的敏感性也无显著差异。

## 2.3 盐酸(HCl)处理洗酸与否对颗粒组成的影响

加入盐酸是为了去除碳酸盐胶结,分散土壤颗粒。预试验表明 10 ml 盐酸对样品是过量的,反应完毕后,溶液呈酸性。表 2 可以看出,化学处理中 HCl 处理( $T_7$ , $T_8$ )分散作用较  $H_2O_2$ 处理( $T_5$ , $T_6$ )整体稍弱。10 ml HCl 处理( $T_7$ )中值粒径为 30.64  $\mu m$ ,较对照中值粒径减小 54.5%。而将 10 ml HCl 处理后增加洗酸程序( $T_8$ )还会降低其分散效果,颗粒整体变粗,中值粒径增大 6.6  $\mu m$ 。

图 3 为  $T_7$ 与  $T_8$ 处理后各土层颗粒组成变化,



砂、粉、黏粒含量在  $T_7$  和  $T_8$  处理下总体差异显著 ( $p < 0.05$ ), 其中不同土层砂粒和粉粒含量对 HCl 用量敏感性不同。上、中、下土层砂粒和粉粒差值上、中土层  $>$  下土层 ( $p < 0.05$ ), 表明不同 HCl 处理可导致上、中土层砂粒和粉粒含量显著不同, 而下层土砂粒和粉粒则对 HCl 洗酸与否敏感性较弱。具体来看, 深层土 (100—110 cm) 在  $T_7$  和  $T_8$  处理下砂粒和粉粒

颗粒含量相差不大, 曲线相交, 而 0—90 cm 土层砂、粉粒含量差异显著, 表现为 10 ml HCl+洗酸处理下砂粒含量显著增多, 平均增多 6.2%, 粉粒含量显著减少, 平均减少 5.4%。两处理间黏粒含量曲线基本平行,  $T_8$  黏粒含量较  $T_7$  平均少 0.67%, 上、中、下土层差值为 0.45%~0.77%, 下土层黏粒对 HCl 洗酸与否敏感程度稍高, 但总体无较大差异。

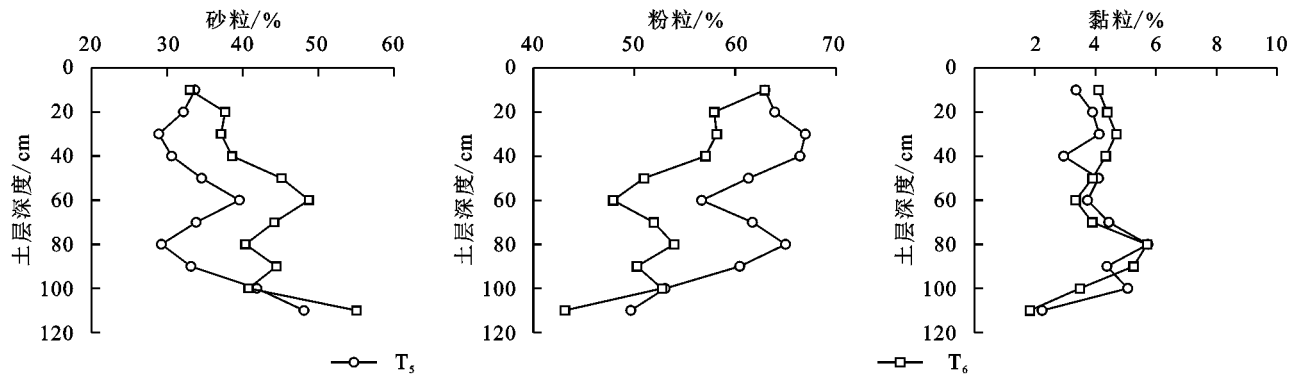


图2  $T_5$ 、 $T_6$  处理后各土层颗粒组成

Fig. 2 The content of sand, silt and clay of each layer under  $T_5$  and  $T_6$  pretreatments

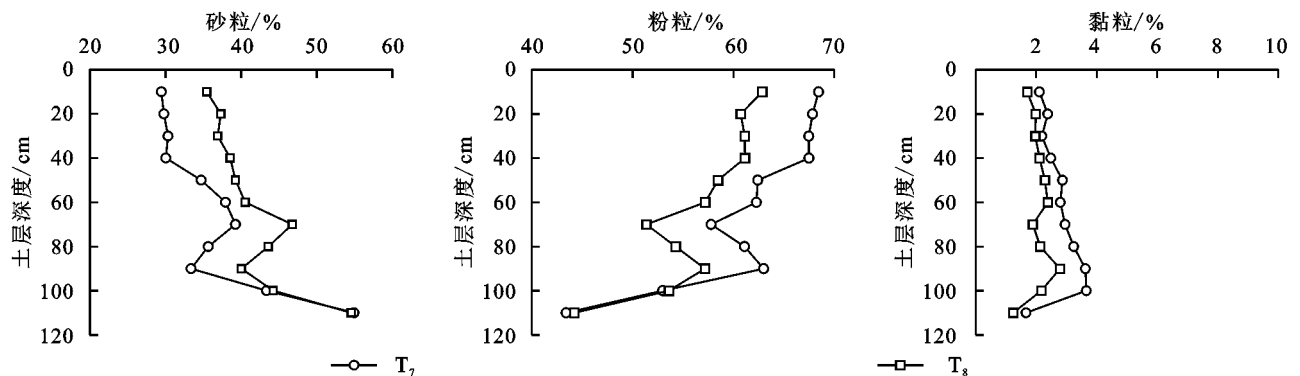


图3  $T_7$ 与 $T_8$ 处理后各土层颗粒组成

Fig. 3 The content of sand, silt and clay of each layer under  $T_7$  and  $T_8$  pretreatments

另外, 国内一些试验分析及行业标准中都采用双氧水和盐酸处理后, 再用六偏磷酸钠进行分散, 作为土壤终极颗粒组成 (ultimate particle size distribution) 测定的前处理方法<sup>[23-25]</sup>, 即本试验中  $T_9$  处理, 但结果表明其中值粒径并非最小, 原因可能与  $H_2O_2$ 、HCl 用量有关, 讨论中将进行详细分析。在经过  $H_2O_2$  和 HCl 处理后, 样品结构被破坏, 颗粒已得到了较好的分散, 再用六偏磷酸钠进行处理, 中值粒径相比单一处理  $T_6$  和  $T_8$  仅减少 5.75~6.22  $\mu m$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 $H_2O_2$ 用量对紫色土颗粒分散作用差异

本研究探讨了不同前处理方法对紫色土剖面颗粒分析结果的影响, 结果表明, 物理处理中振荡对泥沙颗粒的分散效果最好, 但仍无法分散部分水稳性团聚体, 对黏粒的释放效果较弱。化学处理中总体  $H_2O_2$  处理的

分散效果强于 HCl 处理, 但二者用量的不同均对处理结果有显著影响。 $H_2O_2$  处理主要作用为去除有机质胶结, HCl 则是为了去除碳酸盐胶结, 从而分散团聚体。

图 4 为剖面有机质分布, 可看出有机质在土壤表层含量最高, 为 10.33 g/kg, 随土层深度增加, 有机质含量逐渐降低。图 5 为各土层有机质含量与两种  $H_2O_2$  处理 ( $T_5$ 、 $T_6$ ) 下颗粒含量相关分析, 图中显示 10 ml  $H_2O_2$  处理下有机质含量与砂、粉、黏粒含量之间均无相关关系, 表明 10 ml  $H_2O_2$  不足以除尽样品中有机质。而  $T_6$  处理下有机质含量与砂粒、粉粒含量分别有显著的负相关和正相关关系, 相关系数  $r$  分别为 -0.802, 0.887, 与 Guo 等<sup>[26]</sup>、董莉丽<sup>[27]</sup> 研究中土壤有机质含量与团聚体含量呈显著正相关的结果相呼应, 可推知本研究中过量  $H_2O_2$  处理分散了全部由有机质胶结的团聚体, 因此处理后砂粒和粉粒含量与有机质含量呈显著线性相关关系。

对于过量  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理( $\text{T}_6$ )比单独加 10 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理( $\text{T}_5$ )的颗粒更粗的现象,可能是因为样品中的有机质一部分直接以粉粒级的颗粒形式存在,研究表明土壤中的有机质以溶解态和颗粒态形式存在,林业用地比农业用地土壤中颗粒态有机质含量多<sup>[28-29]</sup>。加入  $\text{H}_2\text{O}_2$  去除有机质后样品中粉粒级颗粒态有机质减少,相应的砂粒则含量增多, $\text{T}_6$  处理下有机质被彻底除净,因此呈现出颗粒比  $\text{T}_5$  处理下粗的结果。此外,对于中层土砂粒和粉粒对  $\text{H}_2\text{O}_2$  用量敏感性较上和下层土高,这是由于土壤表层(0—10 cm)有机质含量最大,不仅粉粒级的颗粒态有机质较多,有机质胶结形成的砂粒级团聚体也较多, $\text{T}_6$  处理虽除净粉粒颗粒态有机质,同时也分散砂粒级的有机质胶结团聚体,从而补充了粉粒含量,导致其颗粒粗化效应

未凸显。而土壤深层(100—110 cm)有机质含量极低,不同  $\text{H}_2\text{O}_2$  用量去除有机质效果相差不大,因此颗粒含量没有明显差异,总而导致中层土砂、粉粒在不同  $\text{H}_2\text{O}_2$  用量间含量差值最大。

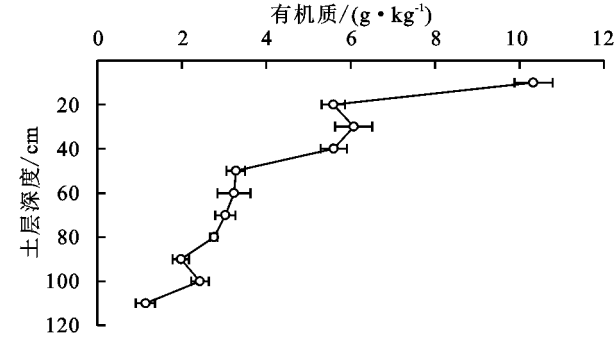


图 4 剖面有机质分布

Fig. 4 Distribution of organic matter on profile

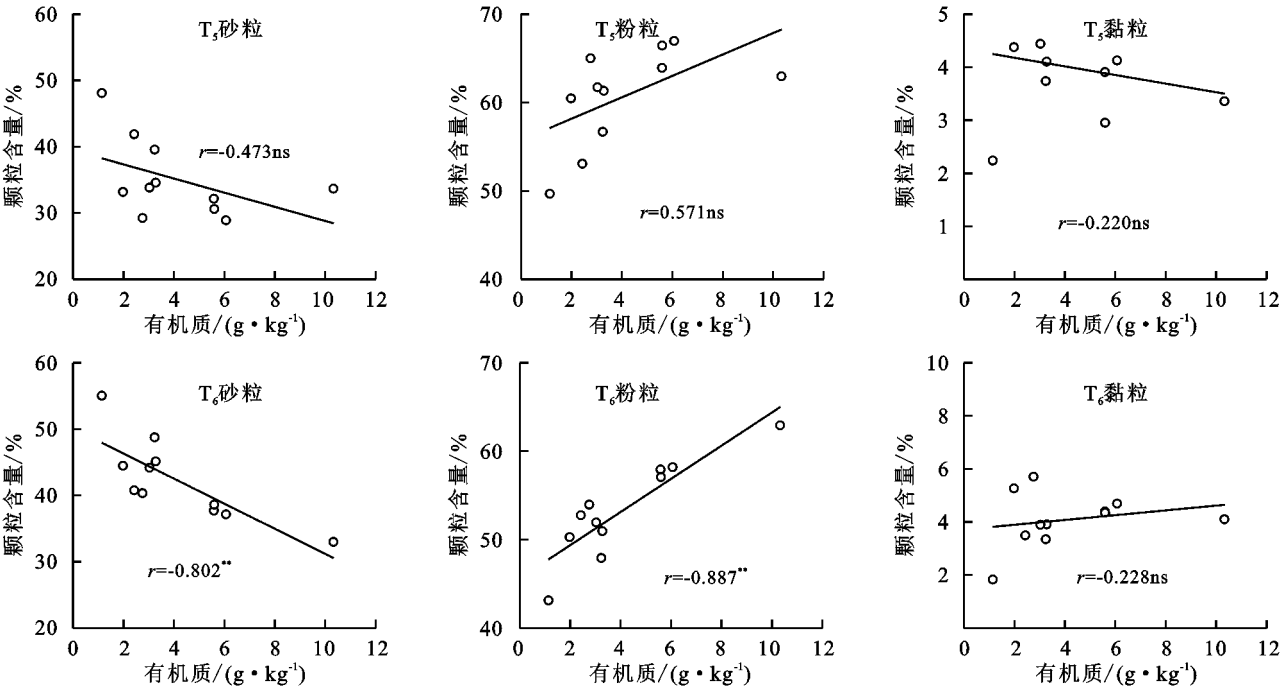


图 5  $\text{T}_5$  与  $\text{T}_6$  处理后各土层颗粒组成与有机质的关系

Fig. 5 Relationship between sand, silt and clay content and organic matter under  $\text{T}_5$  and  $\text{T}_6$  pretreatments

另外,本研究结果中  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理在全部处理中对黏粒的分散释放作用最显著,这是因为林地有机生物量大,且较少受人为活动干扰,更有利于土壤有机碳含量的积累和土壤微生物群落的发育<sup>[30]</sup>,而微生物代谢产物可增强有机质与黏粒之间的联系,促进稳定性团聚体的形成<sup>[31]</sup>。因此  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理下有机质胶结形成的团聚体分散,黏粒释放最多。

3.2 HCl 用量对紫色土颗粒分散作用差异

化学处理中 10 ml HCl 处理中值粒径比 10 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  处理中值粒径大  $2.69\ \mu\text{m}$ ,黏粒含量少 1.47%,而将 10 ml HCl 处理后增加洗酸程序还会降低其分散效果,颗粒整体变粗。本试验中 10 ml HCl 反应后

溶液仍呈酸性,表明其过量,洗酸程序相当于减少酸液用量。该结果与王君波等<sup>[32]</sup>、胡宗杰等<sup>[33]</sup>的研究中过量酸液引起颗粒再次絮凝,使颗粒变粗的结果相反。这可能是因为与其他研究中不同<sup>[32-33]</sup>,本试验未将盐酸加热进行反应,因此可能反应时间延长,且后期反应现象微弱,加水洗酸打断了反应进程,导致反应不完全。同时,有研究表明在蒙脱石含量较高的样品中,过量盐酸会造成硅胶体出溶,对矿物产生胶结作用,从而导致颗粒絮凝,矿物粒度变粗,但是其他黏土矿物没有这种现象<sup>[23]</sup>,因此可能是样品中蒙脱石含量少,所以洗酸与否对絮凝无影响。

图 6 中可以看出碳酸钙在剖面中上部分布较多

(0—80 cm 土层),到 90 cm 及以下则含量锐减,仅有 0.17~2.25 g/kg。T<sub>7</sub>和 T<sub>8</sub>颗粒含量之间的差异为上层和 中层土(0—7 cm) > 下层土,与碳酸钙含量的剖面分布规律基本一致。将碳酸钙含量与两种处理(T<sub>7</sub>, T<sub>8</sub>)砂粒、粉粒、黏粒含量做相关分析,结果表明,相关系数均  $r < 0.2$ ,表明盐酸过量情况下碳酸钙含量与颗粒分散结果仍无显著相关关系。研究表明,酸雨淋溶会对本就易风化的紫色土剖面成土速率产生显著影响<sup>[34]</sup>,淋溶液酸性越强,小粒径颗粒数量越多,且成土速率随淋溶量越大增加幅度越大<sup>[34]</sup>。因此可能 HCl 不仅与碳酸钙发生反应分散团聚体,还加速风化进程从而影响颗粒组成,遂颗粒组成与碳酸钙含量无直接显著相关性。同时,过量 HCl 处理下紫色土样品风化程度加深,土壤颗粒变细,也可导致其比洗酸处理下(T<sub>9</sub>)颗粒更细。

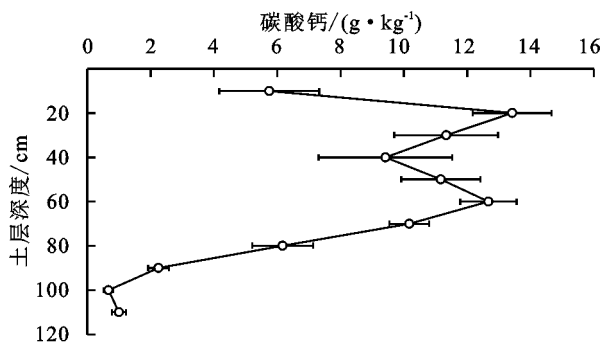


图 6 剖面碳酸钙分布

Fig. 6 Distribution of calcium carbonate on profile

### 3.3 不同前处理方法适用性

紫色土坡地壤中流现象突出<sup>[5]</sup>,壤中流是泥沙颗粒和养分地下漏失的途径。侵蚀产生的泥沙中存在水稳性团聚结构,这些水稳性团聚结构在随水流迁移和扰动过程中未被分散破坏,是土壤抗蚀性的体现,因此要反映土壤侵蚀及其河流动力过程可采用振荡等物理方法处理测定其颗粒组成。而泥沙颗粒的流失也携带着其吸附的养分、重金属等污染物进入水体,这些物质出溶造成水体污染。而吸附污染物的主要是土壤中的黏粒、有机质、微团聚体<sup>[18,20-21]</sup>,这些结构对化学处理较敏感,因此要反映面源污染过程需采用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 HCl 处理等化学方法将颗粒彻底分散,本研究结果显示过量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 HCl 处理后增加洗酸过程均会导致紫色土颗粒变粗,其作用机理不同,运用中需注意用量对结果的影响。

## 4 结论

(1) 物理前处理中值粒径较对照减小 17.18~45.64 μm,其中振荡的分散作用大于浸泡,且振荡时

间越长,颗粒越细,但其对黏粒的释放作用较弱,不同振荡时间下黏粒含量无显著差异( $p > 0.05$ )。化学处理能去除团聚体胶结,中值粒径较对照平均减小 32.72 μm,其中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理总体比 HCl 处理分散作用更强,该处理下黏粒含量最大,平均 > 4%。

(2) 紫色土剖面从上至下发育程度逐渐降低,不同土层对各处理的敏感性不同。各物理前处理之间,剖面土壤颗粒差值变化较均匀,土层间未呈现显著的分异性。相较对照处理,经过浸泡后各土层砂粒含量减少约 9.2%,粉粒含量增加约 8.4%,黏粒平均含量增加 0.8%。振荡处理后各土层砂粒含量减少 23.2%~30.3%,粉粒含量增加 21.4%~26.8%,黏粒含量平均增加 1.2%。

(3) 对不同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量敏感性中土层(30—70 cm) > 下土层(70—110 cm) > 上土层(0—30 cm),其中 20—90 cm 土层砂粒含量在足量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理下比 10 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理平均增多 9.5%,粉粒含量平均减少 9.7%。对不同 HCl 处理敏感性上、中土层 > 下土层,其中 0—90 cm 土层砂粒含量在 10 ml HCl+洗酸处理下比 10 ml HCl 处理平均增多 6.2%,粉粒含量平均减少 5.4%。不同处理下黏粒含量则在土层之间没有明显分异性。足量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理下砂粒和粉粒含量与剖面有机质含量呈显著线性相关( $r > 0.8$ ),而 HCl 处理下剖面碳酸钙含量则与各级颗粒含量无显著相关性。

(4) 在紫色土侵蚀产沙相关研究中,反映土壤侵蚀及其河流动力过程是需保留水稳性团聚体特征,可采用振荡等物理方法处理测定其颗粒组成。而反映面源污染等过程时则需采用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 HCl 处理等化学方法将颗粒彻底分散,但运用中需注意用量对结果影响。

### 参考文献:

- [1] 苏正安,熊东红,张建辉,等.紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):42-47.  
Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2):42-47.
- [2] 付智勇,李朝霞,蔡崇法,等.不同起始条件下坡面薄层紫色土水分和壤中流响应[J].水利学报,2011,42(8):899-907. DOI:10.13243/j. cnki. slxb. 2011.08.011.  
Fu Z Y, Li Z X, Cai C F, et al. Impact of boundary conditions on soil water and subsurface flow in shallow purple soil slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(8):899-907. DOI:10.13243/j. cnki. slxb.2011.08.011.

- [3] 江娜,史东梅,曾小英,等.土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层障碍因素的影响[J].土壤学报,2022,59(1):105-117. DOI:10.11766/trxb202011090401.  
Jiang N, Shi D M, Zeng X Y, et al. Influence of soil erosion on the obstacle factors of cultivated layer in purple sloping farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 105-117.
- [4] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811. DOI: 10.5846/stxb201301220126.  
Gao Z X, Xue X X, Zhao J N, et al. Review on macro-pore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11):2801-2811.
- [5] 徐勤学,王天巍,李朝霞,等.紫色土坡地壤中流特征[J].水科学进展,2010,21(2):229-234.  
Xu Q X, Wang T W, Li Z X, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2):229-234.
- [6] Tian L L, Akiyama H, Zhu B, et al. Indirect  $N_2O$  emissions with seasonal variations from an agricultural drainage ditch mainly receiving interflow water[J]. Environmental Pollution, 2018, 242:480-491.
- [7] 张洋,樊芳玲,周川,等.三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J].土壤学报,2016,53(1):189-201.  
Zhang Y, Fan F L, Zhou C, et al. Effects of crop/mulberry intercropping on surface nitrogen and phosphorus losses in Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1):189-201.
- [8] 王伦,郑粉莉,师宏强,等.壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(12):4177-4185.  
Wang L, Zheng F L, Shi H Q, et al. Impacts of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt erosion in Chinese Mollisol region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12):4177-4185.
- [9] 花可可,朱波,王小国.紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J].农业工程学报,2013,29(5):81-88.  
Hua K K, Zhu B, Wang X G. Characteristics of dissolved organic carbon transport via overland flow and interflow on sloping cropland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5):81-88.
- [10] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 47(1):107-111.
- [11] 张兴昌,邵明安.侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J].应用生态学报,2001,12(4):541-544.  
Zhang X C, Shao M A. Enrichment of organic matter and nitrogen in eroded bedloads[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4):541-544.
- [12] 马琨,王兆骞,陈欣,等.不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J].水土保持学报,2002,16(3):16-19.  
Ma K, Wang Z Q, Chen X, et al. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3):16-19.
- [13] Lehtoranta J, Ekholm P, Wahlstrom S, et al. Labile organic carbon regulates phosphorus release from eroded soil transported into anaerobic coastal systems[J]. Ambio, 2015, 44:263-273.
- [14] 朱方方,程金花,王书韬,等.湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系[J].水土保持学报,2021,35(4):27-33.  
Zhu F F, Cheng J H, Wang S T, et al. Characteristics of eroded sediment particles and their relationship with topographical factors in the low mountain and hilly area of Hubei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4):27-33.
- [15] 冯志倩,娄永才,齐星圆,等.汇流强度、坡度及侵蚀泥沙颗粒分形对工程堆积体坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):127-134.  
Feng Z Q, Lou Y C, Qi X Q, et al. Influence of flow intensity, slope and soil particle fractal dimension on slope erosion of engineering accumulation body[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 127-134.
- [16] 杨青松,倪世民,王军光,等.粗颗粒土壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J].水土保持学报,2022,36(4):30-36.  
Yang Q S, Ni S M, Wang J G, et al. Characteristics of erosion and sediment particles on coarse texture soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):30-36.
- [17] 黄丽,张光远,丁树文,等.侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):35-39,85.  
Huang L, Zhang G Y, Ding S W, et al. Study on soil particle losses of eroded purple field[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(1): 35-39, 85.
- [18] Novotny V, Chesters G. Delivery of sediment and pollutants from nonpoint sources-a water-quality perspective[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(6):568-576.
- [19] 刘强,穆兴民,高鹏,等.土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J].水土保持研究,2020,27(6):



- 386-392.
- Liu Q, Mu X M, Gao P, et al. Review of studies on the effects of soil water erosion on physical and chemical properties of soil quality[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6):386-392.
- [20] 骆东奇, 魏朝富, 谢德体, 等. 长江上游紫色母质养分溶出及环境效应预测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2):179-183.
- Luo D Q, Wei Z F, Xie D T, et al. The forecast of released nutrient from purple parent material in the upper reaches of the Yangtze River and its environmental effects [J]. Bulletin of mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(2):179-183.
- [21] 崔双超, 丁爱中, 潘成忠, 等. 不同粒径泥沙理化特性对磷吸附过程的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3):863-868.
- Cui S C, Ding A Z, Pan C Z, et al. Effect of sediment physicochemical properties on phosphorus sorption for different size particles[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(3):863-868.
- [22] Wang T, Zhu B. Nitrate loss via overland flow and interflow from a sloped farmland in the hilly area of purple soil, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(3):309-319.
- [23] 冯志刚, 王世杰, 罗维均, 等. 不同前处理方法对红色风化壳粒度测试结果的影响[J]. 矿物学报, 2006, 26(1):1-7.
- Feng Z G, Wang D J, Luo W J, et al. The influence of different pretreatment methods on grain size distribution of red weathering crusts[J]. Acta mineralogica Sinica, 2006, 26(1):1-7.
- [24] Zhu Y C, Ali A, Dang A, et al. Re-examining the flocculating power of sodium, potassium, magnesium and calcium for a broad range of soils[J]. Geoderma, 2019, 352:422-428.
- [25] 兰叶青, 胡琼英, 薛家骅. 交换性阳离子和胡敏酸对黏土絮凝—分散的作用[J]. 南京农业大学学报, 1997, 20(1):100-104.
- Lan Y Q, Hu Q Y, Xue J H. The role of exchange cation( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and humic acid in the flocculation and dispersion of clays[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1997, 20(1):100-104.
- [26] Guo Z C, Zhang J B, Fan J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660:1029-1037.
- [27] 董莉丽. 渭北旱塬植被恢复对土壤有机质和水稳性团聚体含量的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4):709-714.
- Dong L L. Effects of vegetation regeneration on soil organic matter content and water Stable aggregates in the Weiwei Dryland[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4):709-714.
- [28] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4):345-360.
- [29] 吴建国, 张小全, 王彦辉, 等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. 林业科学, 2002, 38(4):19-29.
- Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, et al. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(4):19-29.
- [30] Feng Z, Fan Z, Song H, et al. Biochar induced changes of soil dissolved organic matter: The release and adsorption of dissolved organic matter by biochar and soil[J]. Science of the Total Environment, 2021, 783(1):147091.
- [31] 程丽娟, 来航线, 李素俭, 等. 微生物对土壤团聚体形成的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1994, 22(4):93-97.
- Cheng L J, Lai H X, Li S J, et al. Effect of microorganism upon the formation of soil aggregates[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 1994, 22(4):93-97.
- [32] 王君波, 鞠建廷, 朱立平. 两种激光粒度仪测量湖泊沉积物粒度结果的对比[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5):509-515.
- Wang J B, Ju J T, Zhu L P. Comparison of lake sediment grain size results measured by two laser diffraction particle size analyzers [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5):509-515.
- [33] 胡宗杰, 颜佳新, 韩鸿印. 湖泊沉积物粒度分析前处理过程中絮凝现象的消除方法研究[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2):243-249.
- Hu Z J, Yan J X, Han H Y. Eliminating flocculation in the pretreatment of lacustrine deposits for particle size analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(2):243-249.
- [34] 赵吉霞, 邓利梅, 陆传豪, 等. 模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化成土特征的影响研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2021, 43(11):151-161.
- Zhao J X, Deng J X, Deng L M, et al. Effects of simulated acid rain leaching on weathering and soil forming characteristics of purple parent rock [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021, 43(11):151-161.