

北方土石山区土地利用方式对褐土团聚体稳定性的影响

安娟¹, 王富², 吴元芝¹, 吴希媛¹

(1.山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学 资源环境学院,
山东 临沂 276005; 2.河北环京工程咨询有限公司, 石家庄 050011)

摘要:土地利用方式是影响土壤团聚体稳定性的重要因素,但关于北方土石山区土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响仍不清晰。选取北方土石山区耕地、荒地、休闲地和金银花地的褐土为研究对象,基于 Le Bissonnais 法,分析了快速湿润(FW)、机械振荡(WS)和慢速湿润(SW)处理下团聚体粒径分布特征、稳定性和可蚀性。结果表明:(1)FW 处理后,耕地、荒地和休闲地团聚体集中分布于 <0.5 mm,而金银花地则为 >0.2 mm;WS 和 SW 处理后,均以 >0.2 mm 团聚体为主。3 种处理下,土地利用方式间 2~5 mm 团聚体差异最大。(2)土壤团聚体平均重量直径(MWD)表现为:SW $>$ WS $>$ FW,而土壤可蚀性 K 值则为 FW $>$ WS $>$ SW,且相对消散指数显著大于相对机械破碎指数。说明褐土团聚体主要破碎机制是消散作用,其次为机械破坏作用。(3)3 种处理下,土壤团聚体 MWD 均表现为金银花地 $>$ 休闲地 $>$ 荒地 $>$ 耕地。(4)相对消散指数和 K 值表现为:耕地 $>$ 荒地 $>$ 休闲地 $>$ 金银花地。说明金银花地利用方式可有效提高土壤稳定性,增强土壤抗侵蚀能力。

关键词:Le Bissonnais 法;团聚体粒径分布;平均重量直径;相对消散指数;可蚀性。

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0010-07

Effect of Land Use Types on Aggregate Stability for Cinnamon Soil in Earth-Rocky Mountainous Area of Northern China

AN Juan¹, WANG Fu², WU Yuanzhi¹, WU Xiuyan¹

(1.Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and

Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University,

Linyi, Shandong 276005, China; 2.Hebei Huanjing Engineering Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

Abstract:Land use type is one of the most important factors affecting soil aggregate stability. However, a less information is available for the effect of land use types on soil aggregate stability in the earth-rocky mountain areas of northern China. In this study, the distribution characteristics, stability, and erodibility of soil aggregate in four land use types of cultivated land, waste land, fallow land, and Flos *Lonicerae* land (*Lonicera japonica* Thunb) were analyzed with the Le Bissonnais method. This method included three treatments, namely fast-wetting treatment (FW), wetting-stirring treatment (WS), and slow-wetting treatment (SW). The results showed that under FW treatment, the size distribution of soil aggregate for cultivated land, waste land, and fallow land was mainly concentrated on <0.5 mm aggregate, >0.2 mm aggregate for Flos *Lonicerae* land; under WS and SW treatments, >0.2 mm aggregate occupied the largest percentage of soil aggregate for the four land use types; difference in 2~5 mm aggregate was the most pronounced among the four land use types; the mean weight diameters of soil aggregates decreased the order: SW $>$ WS $>$ FW, and soil erodibility values (K) decreased in the sequence: FW $>$ WS $>$ SW; in addition, the relative slaking index (RSI) was significantly greater than the relative mechanical breakdown index (RMI), indicating that slaking was the mainly breakdown mechanism for soil aggregate, followed by mechanical breakdown. Regardless of treatments, the MWD of soil aggregate decreases in the order: Flos *Lonicerae* land $>$ fallow land $>$ waste land $>$ cultivated land. RSI and K decrease in the order: cultivated land $>$ waste land $>$ fallow land $>$ Flos *Lonicerae* land. The above results indicate that planting Flos *Lonicerae* can greatly improve soil aggregate stability, and strengthen resistance to soil erosion.

收稿日期:2019-10-14

修回日期:2019-11-29

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41977067);国家自然科学基金青年项目(41601283)

第一作者:安娟(1982—),女,山东省泰安市人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail:anjuan0715@126.com

Keywords: Le Bissonnais method; distribution of soil aggregates; mean weight diameter; relative slaking index; soil erodibility values.

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是评价土壤质量和健康的重要指标^[1]。土壤团聚体稳定性决定了土壤分离和径流搬运能力^[2],而其稳定性的大小与土地利用方式密切相关。陈山等^[3]在红壤区的研究表明,水田和林地利用方式可显著提高土壤团聚体稳定性,而果园利用方式则大幅削弱了团聚体稳定性。罗晓虹等^[4]认为在紫色土区,林地、荒草地和果园利用方式对团聚体稳定性的影响无明显差异。豫西黄土丘陵和辽河干流中下游流域沙化地区的研究表明,耕地土壤团聚体稳定性高于林地和草地^[5-6]。同一土地利用方式下,团聚体稳定性还取决于外界破碎机制^[7]。Le Bissonnais^[8]认为侵蚀过程中团聚体的破碎机制主要包括:消散作用,即土壤快速润湿时,团聚体内的闭蓄空气压缩爆破所引起的团聚体崩解;团聚体内膨胀黏土不均匀膨胀收缩导致的微小裂隙作用;机械振荡引起的团聚体破碎(雨滴打击和径流)。一般认为消散作用是引起土壤团聚体破碎的主要机制^[9-10]。虽然关于不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性的研究已开展了多年,但主要集中于南方红壤区和紫色土区。

北方土石山区是我国主要水土流失类型区之一,该区地表土石混杂、石多土少、地面极易砂砾化或石化^[11]。褐土是该区的代表性土壤,土层浅薄,土壤涵养水源能力低。水土流失成为制约作为该区可持续发展最主要的生态环境问题。为应对此问题,该区大力实施水土保持措施,改变土地利用方式,如:种植金银花,撂荒等。然而,关于北方土石山区土地利用方式对团聚体稳定性影响的研究明显不足。因此,本文选取了北方土石山区耕地、荒地、休闲地和金银花地这 4 种典型土地利用方式为研究对象,基于 Le Bissonnais 法,分析不同破碎机制下团聚体的粒径分布,并基于团聚体平均重量直径、相对消散指数、相对机

械破碎指数和土壤可蚀性 K 值等指标,探讨土地利用方式对团聚体稳定性的影响,以期为北方土石山区土壤结构的改良及土地的合理利用提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省东南部的费县(117°36′—118°18′E, 35°01′—35°33′N)。该区属于暖温带大陆性季风气候,多年平均气温 13.6℃,年均降水量 860 mm,其中 6—9 月汛期降雨量占全年降雨量的 75%。成土母岩主要包括花岗岩、片麻岩等酸性岩石和石灰岩等碳酸类岩石,其中在石灰岩基础上发育的土壤为褐土。土地利用方式主要包括耕地、林地、荒地、休闲地等。

1.2 样品采集与分析

通过对研究区域岩石、土壤和土地利用方式的调查,选取褐土土壤类型下的耕地、荒地、休闲地和金银花地(*Lonicera japonica* Thunb)为采样地,样地基本情况见表 1。在保持坡向和坡度一致的情形下,各样地内选取 3 个 1 m×1 m 的采样单元,用铝饭盒分别采集 0—5,5—10,10—15,15—20 cm 原状土样。土样自然风干后,沿纹理轻轻地掰成小块,并去除植物根系和石块等杂物。干筛法获得 3~5 mm 团聚体,放于铺有棉花的塑料盒中保存。测定前,为保持土壤含水量一致,将团聚体放置于 40℃烘箱中烘 24 h。根据 Le Bissonnais 法的 3 种处理,即快速湿润(FW)、机械振荡(WS 和慢速湿润(SW),对粒径 3~5 mm 团聚体进行分析^[8]。其中,快速湿润处理主要模拟消散作用对团聚体的破碎及干燥土壤在快速湿润条件下由于“气爆”而产生的破碎;机械振荡处理主要模拟雨滴打击对土壤团聚体的破坏作用;慢速湿润处理模拟连阴雨情况下黏粒膨胀引起的团聚体崩解。Le Bissonnais 法试验中对每个样品每种处理均重复 3 次。

表 1 样地基本情况

样地类型	海拔/m	经度(E)	纬度(N)	坡向	坡度/(°)	坡位
耕地	178	117°54′56″	35°05′17″	南偏东	3	坡下
荒地	186	117°54′17″	35°06′04″	东	8	坡顶
休闲地	184	117°53′46″	35°05′50″	西	7	坡上
金银花地	182	117°54′06″	35°05′20″	南偏西	5	坡中

1.3 数据分析

土壤团聚体平均重量直径(MWD, mm)是评价团聚体稳定性的重要指标,其值越低表示团聚体稳定性越差^[12]。具体计算公式如下:

$$MWD=\sum_{i=1}^n x_i w_i \tag{1}$$

式中: $\overline{x_i}$ 为土壤各粒径的平均直径(mm); w_i 为土壤各粒径质量百分比。

相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)分别表征消散作用和机械破坏作用对团聚体的破坏程度,二者的值越大表明土壤团聚体对消散作用和机械振荡作用的敏感程度越高^[13]。计算如下:

$$RSI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{FW}}{MWD_{SW}} \quad (2)$$

$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \quad (3)$$

式中： MWD_{SW} 、 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 分别表示慢速湿润、快速湿润和机械振荡处理下团聚体平均重量直径。

土壤可蚀性因子 K 值是土壤抗蚀能力一个相对综合指标,是综合表征团聚体稳定性特征的重要参数。基于几何粒径模型估算 K 值^[14],计算方法如下:

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{\log GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

式中： $GMD = \exp(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i)$ ； \bar{x}_i 为土壤粒级的平均直径(mm)； w_i 为土壤各粒径质量百分含量。

利用 SPSS 18.0 软件下的方差分析(ANOVA)对 4 种土地利用方式下的 MWD、RSI、RMI 和 K 值进行显著性检验。基于最小显著性差异法(LSD)开展多重比较,并在 0.05 水平上达到显著。采用 Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体粒径分布特征

2.1.1 快速湿润处理下土壤团聚体的粒径分布 快

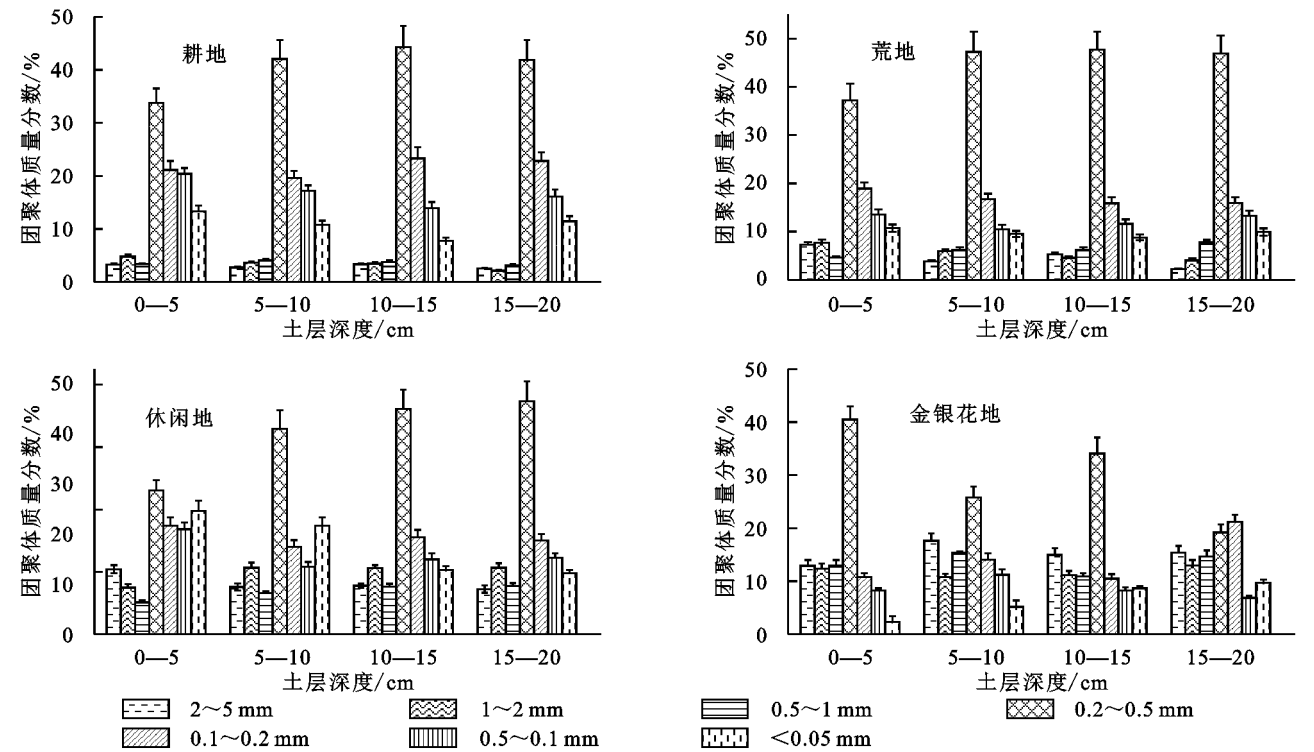


图 1 快速湿润处理下土壤团聚体粒径分布

2.1.2 机械振荡处理下土壤团聚体的粒径分布 机械振荡处理下,耕地、荒地、休闲地和金银花地利用方式下土壤团聚体破碎后的粒径主要集中于 >0.2 mm,其累计比例分别为 63.35%~70.44%,70.68%~75.02%,

速湿润处理下,4 种土地利用方式各土层深度的土壤团聚体均受到较强的破坏作用。耕地、荒地和休闲地利用方式下破碎团聚体集中分布于 <0.5 mm,其累计百分比分别为 88.56%~92.19%,80.41%~86.05%和 74.02%~76.97%(图 1)。这与汪三树等^[15]在石漠化区桑树地埂开展的土壤团聚体稳定性的研究结果一致。然而,金银花地方式下破碎后团聚体主要集中于 >0.2 mm,所占比例达 69.56%~78.67%。其中,0.2~0.5 mm 团聚体分布最多,耕地、荒地、休闲地和金银花地中其比例均大于 23%。但是,所占比例最小的团聚体,耕地和荒地为 2~5 mm (2.98%和 4.65%),休闲地为 0.5~1 mm (6.75%),而金银花地则为 <0.05 mm (6.46%)。此外,2~5,1~2,0.5~1 mm 团聚体的质量分数均表现为金银花地 $>$ 休闲地 $>$ 荒地 $>$ 耕地,且土地利用方式间 2~5 mm 团聚体的质量分数差异最明显。与耕地相比,荒地、休闲地和金银花地 2~5 mm 团聚体的质量分数分别增加 -13.72%~122.63%,132.03%~218.18%和 293.99%~543.88%。表明,快速湿润处理对土壤团聚体破碎的影响表现为耕地 $>$ 荒地 $>$ 休闲地 $>$ 金银花地。说明,消散作用下,耕地土壤团聚体的破碎程度最大,荒地次之,而金银花地团聚体的破碎程度最弱。

72.80%~81.04%和 74.14%~79.89%(图 2)。其中,1~2 mm 团聚体所占比例最高,4 种土地利用方式下均超过 21%。但是,曾全超等^[16]对黄土高原森林植被带土壤团聚体稳定性的研究,发现 WS 处理后土壤团聚体分布较

为分散,以 0.2~0.1, 0.1~0.05 和 <0.05 mm 为主。团聚体中分布最少的粒级,耕地、荒地、休闲地和金银花地分别是 2~5, 0.1~0.2, 0.1~0.2, 0.05~0.1 mm, 其比例均小于 8.5%。此外, 2~5, 1~2 mm 团聚体的质量分数均表现为金银花地>休闲地>荒地>耕地, 而 0.05~1 和 <0.05 mm 团聚体的比例均表现为耕地>荒地>休闲

地>金银花地。其中,不同土地利用方式下 2~5 mm 团聚体比例差异最明显。金银花地、休闲地和荒地 2~5 mm 团聚体比例较耕地分别增加 1.26~5.07, 1.69~4.89, 1.22~1.85 倍。表明机械振荡处理对耕地土壤团聚体的影响最大,荒地次之。即,机械破坏作用下,耕地土壤团聚体的破碎程度最强,其次为荒地。

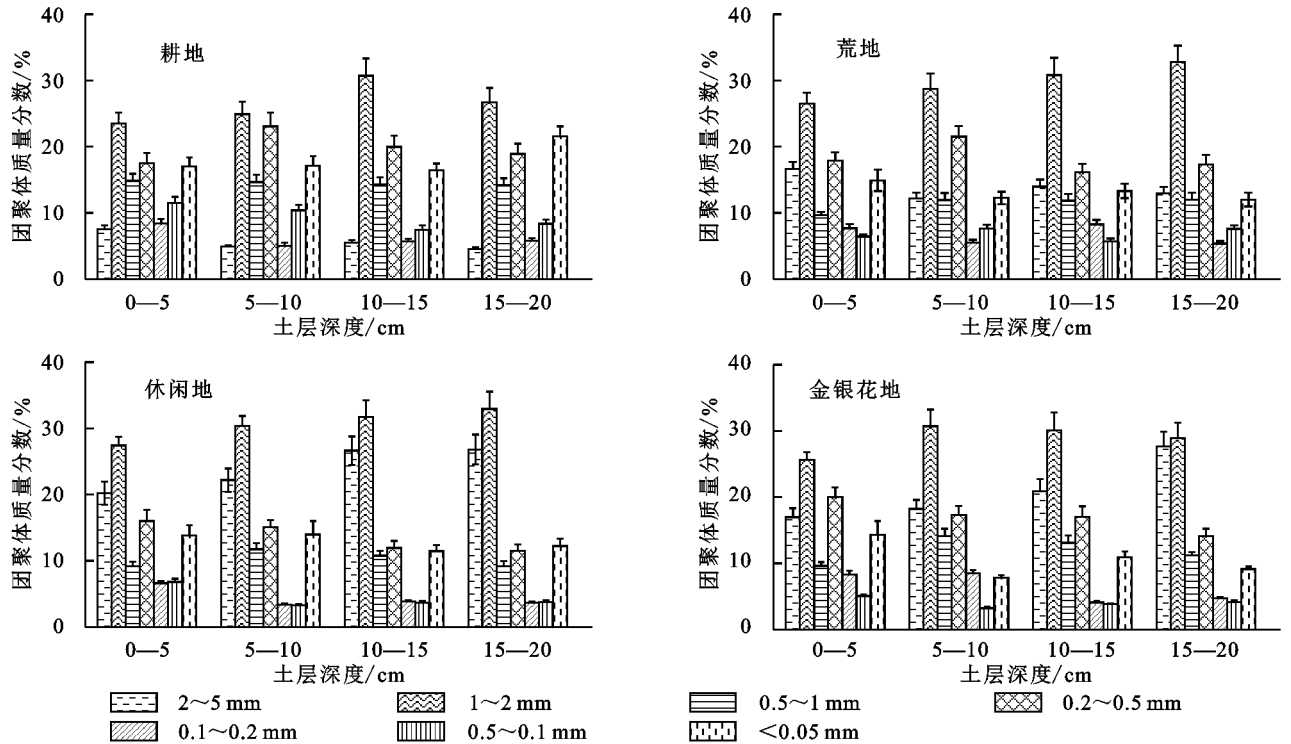


图2 机械振荡处理下土壤团聚体粒径分布

2.1.3 慢速湿润处理下土壤团聚体的粒径分布 由图3看出,慢速湿润处理下,耕地、荒地、休闲地和金银花地利用方式下土壤团聚体破碎后主要集中于粒径>0.2 mm, 累计比例分别为 79.00%~86.53%, 84.36%~88.00%, 84.92%~92.92%和 86.43%~93.86%。以往研究,将>0.2 mm 团聚体含量作为土壤可蚀性指标之一,其值越大表明土壤结构稳定性越好^[17]。说明,金银花地土壤团聚体的结构最稳定。同时,3种破碎机制下,SW处理>0.2 mm 团聚体含量均高于FW和WS处理,说明慢速湿润处理对土壤的团聚体的破坏最弱。

4种土地利用方式下 0.1~0.2, 0.05~0.1 和 <0.05 mm 团聚体的比例均不小于 8%。所占比例最高的团聚体,耕地为 0.2~0.5 mm (29.08%~40.14%), 荒地为 1~2 mm (25.11%~27.50%), 而休闲地和金银花地则为 2~5 mm (30.85%~42.94%和 29.58%~43.11%)。2~5, 1~2 mm 团聚体的比例均表现为金银花地>休闲地>荒地>耕地。另外,土地利用方式间破碎团聚体分布差异最明显的是 2~5 mm 团聚体。金银花地、休闲地和荒地 2~5 mm 团聚体的质量含量较耕地分别增加 58.58%~269.37%, 87.82%~188.89%和 4.65%~63.19%。表明慢速湿润处

理对耕地团聚体的影响最大,荒地次之。即黏粒膨胀作用下,耕地团聚体的破碎程度最严重,荒地次之。

2.2 土壤团聚体的稳定性

2.2.1 土壤团聚体平均重量直径 土壤团聚体平均重量直径值越大,表明土壤团聚体稳定性越强。FW处理下,各土层深度的 MWD 均表现为:金银花地>休闲地>荒地>耕地(图4)。与耕地相比,金银花地、休闲地和荒地土壤团聚体的 MWD_{FW} 分别显著增加 134.41%~182.11%, 62.34%~85.85%和 16.08%~51.09%。WS处理下,土壤团聚体的 MWD 大小顺序为休闲地>金银花地>荒地>耕地。休闲地、金银花地和荒地土壤团聚体 MWD_{WS} 较耕地分别显著增加 54.72%~105.18%, 40.00%~104.65%和 31.30%~47.16%。SW处理下,土层深度 0~10 cm 内,土壤团聚体 MWD 表现为休闲地>金银花地>荒地>耕地,而 10~20 cm 内则为金银花地>休闲地>荒地>耕地。与耕地相比,金银花地、休闲地和荒地土壤团聚体的 MWD_{SW} 分别显著增加 43.39%~122.56%, 47.44%~89.46%和 5.18%~39.32%。表明,3种破碎机制下金银花地土壤团聚体的结构最稳定,而耕地团聚体稳定性最差。

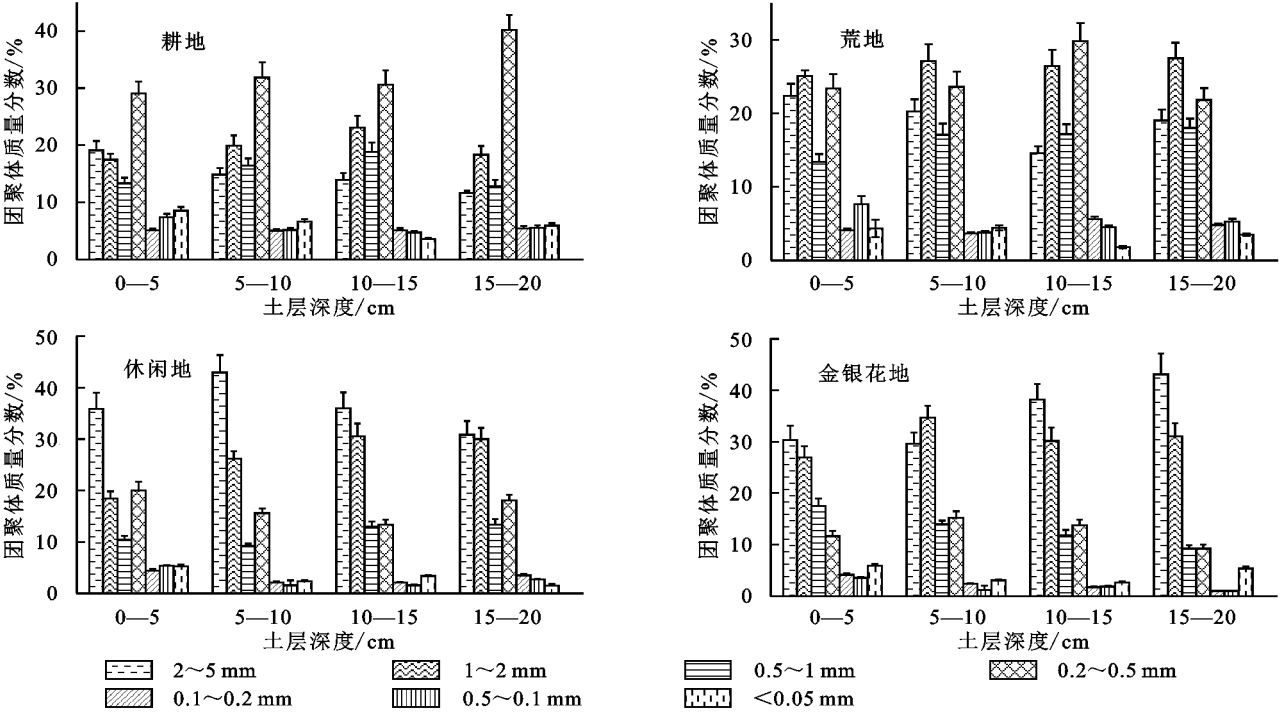
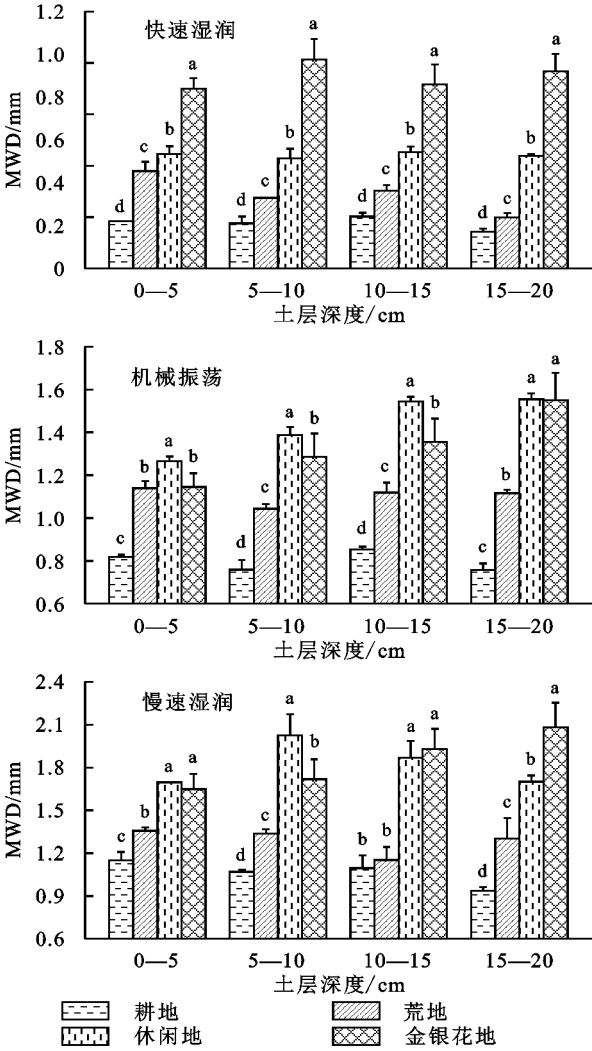


图 3 慢速湿润处理下土壤团聚体粒径分布



注:图中不同字母表示在 $p<0.05$ 水平差异显著,下同。

图 4 不同处理下土壤团聚体平均重量直径(MWD)

通过 3 种破碎机制下团聚体的 MWD 对比发现,4 种土地利用方式下各土壤层次土壤团聚体稳定性均呈现出 $MWD_{SW} > MWD_{WS} > MWD_{FW}$ 的趋势(图 4)。即团聚体破坏作用按照作用程度表现为:消散作用>机械破坏作用>黏粒膨胀作用。根据 Le Bissonnais^[8] 的团聚体稳定性分级水平,不同处理导致破碎团聚体处于不同的稳定状态。FW 处理下,除金银花地外,耕地、荒地和休闲地各土层深度团聚体稳定性大多处于不稳定性级别 ($0.4 < MWD_{FW} < 0.8$); WS 和 SW 处理下,各土层深度团聚体稳定性均处于中度稳定级别以上 (MWD_{SW} 和 $MWD_{WS} > 0.8$)。表明,引起褐土土壤团聚体破碎的主要机制为消散作用,其次为机械破坏作用,这与郭伟等^[18] 在红壤区的研究结果一致。

2.2.2 相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI) RSI 表征快速湿润情况下土壤孔隙中空气受压而造成团聚体的分散程度,而 RMI 则体现了雨滴打击、径流剪切等外应力作用下土壤团聚体的稳定性^[19]。耕地、荒地、休闲地和金银花地利用方式下的 RSI 显著大于 RMI,RSI 较 RMI 分别增加 1.24~2.33,1.93~3.81,1.19~4.12,0.49~1.10 倍(图 5)。表明,4 种土地利用方式各土层深度下的土壤团聚体对消散作用的敏感程度高于机械破坏作用。进一步分析发现,不同土地利用方式下的 RSI 表现为耕地>荒地>休闲地>金银花地。与耕地相比,金银花地、休闲地和荒地的 RSI 分别减少 15.50%~36.74%, -6.36%~7.01%和 -9.67%~14.03%。说明,耕地土壤团聚体对消散作用最为敏感,荒地次之。

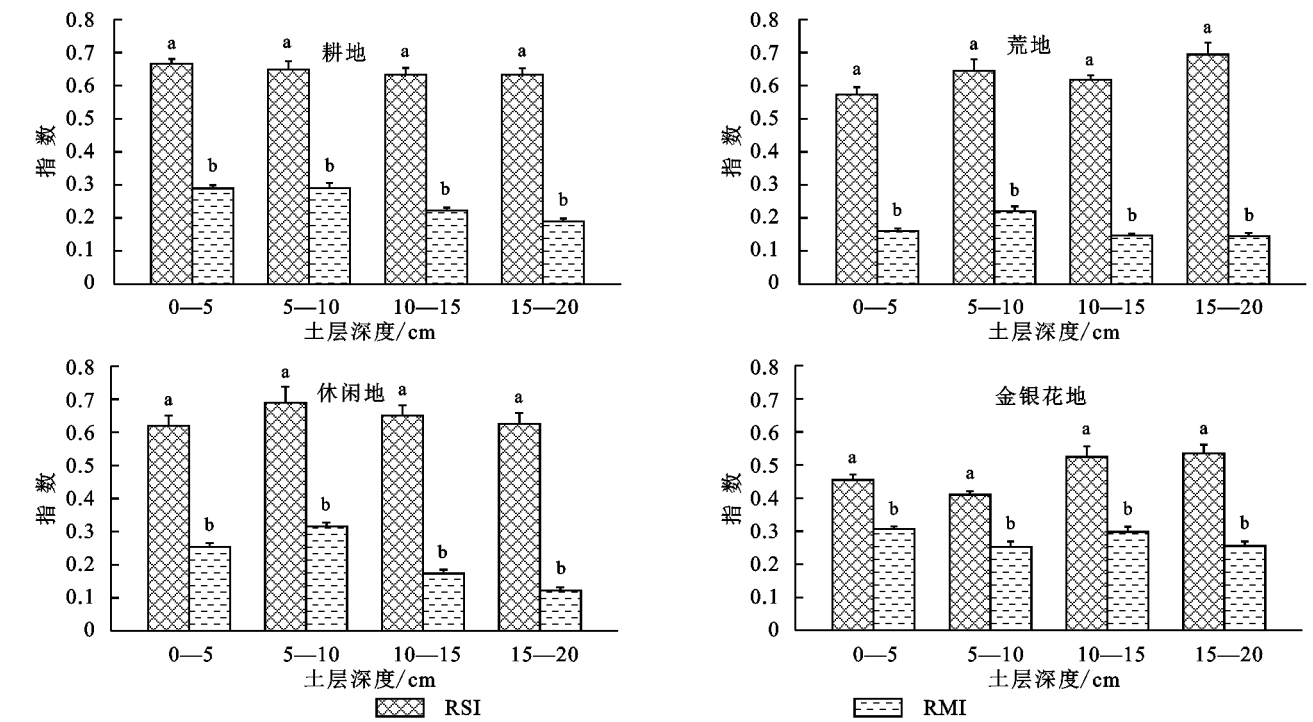


图 5 不同土地利用方式下的相对消散指数 (RSI) 和相对机械破碎指数 (RMI)

2.2.3 土壤可蚀性因子 K 值 为进一步表征不同破碎机制下土壤团聚体的稳定性,采用土壤可蚀性因子 K 值进行量化。FW,WS 和 SW 处理下, K 值均表现为耕地>荒地>休闲地>金银花地(图 6)。FW 处理下,与耕地相比,金银花地、休闲地和荒地的 K 值分别减少 49.00%~59.21%,4.93%~22.63%和 6.86%~13.45%;WS 处理下相应的减少率分别为 69.43%~85.89%,65.04%~82.15%和 19.92%~55.35%,而 SW 处理下相应的减少率分别为 45.18%~80.40%,54.24%~79.24%和 35.01%~53.71%。另外,4 种土地利用方式下各土壤层次土壤可蚀性 K 值均呈现 FW>WS>SW。说明,3 种破坏机制下,金银花地的抗侵蚀能力最强,而耕地最差;FW 处理下土壤的抗侵蚀能力最弱。

3 讨论

土地利用是人类最直接管理土壤的活动,土地利用方式的变化将改变土壤理化性质,进而影响土壤团聚体结构的稳定性^[20]。北方土石山区作为我国的四大水土流失区之一,丰水年月降雨量达 800~1 000 mm,日降雨量高达 300~500 mm,经常发生大雨或暴雨,易导致土壤团聚体结构的破坏。择选合理的土地利用方式,改良土壤结构,成为北方土石山区土壤侵蚀防治需解决的重点问题。

本文研究结果表明对于不同土地利用方式,LB 法 3 种处理下 MWD 均表现为:金银花地>休闲地>荒地>耕地,而 K 值则表现为耕地>荒地>休闲地>金银花地。

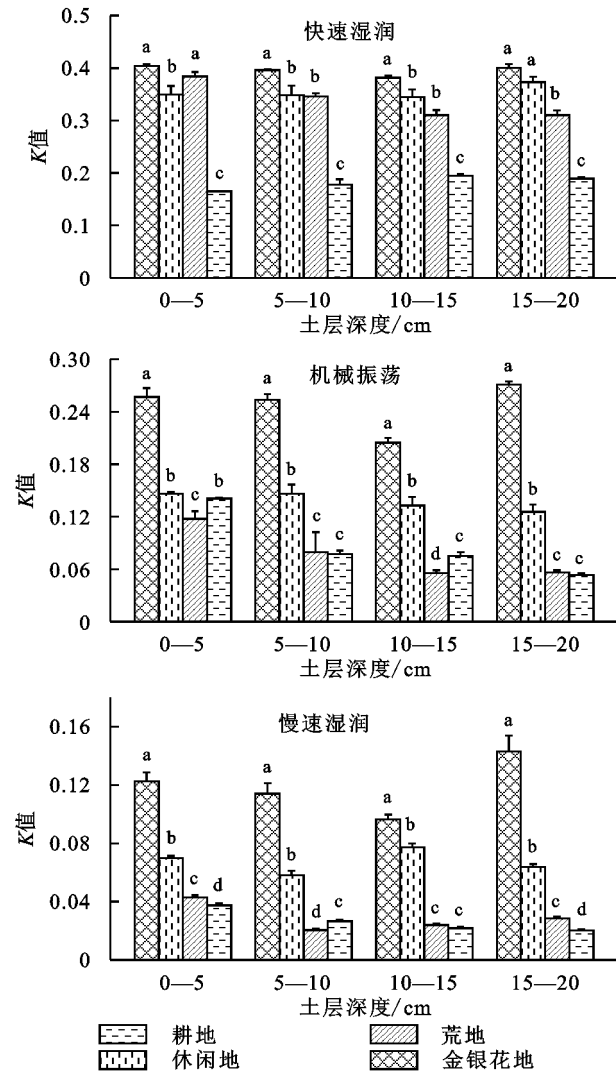


图 6 不同处理下土壤可蚀性因子 K 值

说明,金银花地土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力在 4 种土地利用方式下最高,休闲地次之,耕地最低。这是因为金银花的死根和落叶在分解过程中促进了有机质的累积,增加了水稳性大团聚体形成所需的胶结物质,进而促进团聚体数量和稳定性的增加。其次,金银花地表覆盖物的增加,可增强土壤入渗能力,并能有效防止雨滴打击对土壤团聚体的破碎作用,进而有利于土壤团聚体结构的保持,使得土壤团聚体稳定性得以提高,土壤抗侵蚀能力有所增强。荒地和休闲地因枯枝落叶物较少,有机质积累程度较低,导致土壤团聚体稳定性略低。然而,耕地利用方式下主要是通过种植作物玉米或者小麦根部的生长与土壤微生物作用而形成团粒结构^[1],且频繁的翻耕破坏了土壤结构,加之有机质暴露于空气中,加剧了其矿化速率。因此,对于土层浅薄的北方土石山区,提高金银花的种植面积可增强团聚体的稳定性,进而提高抗侵蚀能力。耕地可通过秸秆还田、添加生物炭等措施进行土壤结构的改良。

4 结论

(1) FW 处理下,耕地、荒地和休闲地利用方式下破碎团聚体集中分布于 $<0.5\text{ mm}$,金银花地则为 $>0.2\text{ mm}$;WS 和 SW 处理下,4 种土地利用方式均以 $>0.2\text{ mm}$ 团聚体为主。3 种处理下,土地利用方式间粒径分布差异最明显的是 $2\sim 5\text{ mm}$ 团聚体。

(2) 4 种土地利用方式下土壤团聚体的 MWD 均表现为: $\text{MWD}_{\text{SW}} > \text{MWD}_{\text{WS}} > \text{MWD}_{\text{FW}}$,而土壤可蚀性 K 值则为 $\text{FW} > \text{WS} > \text{SW}$,且 RSI 较 RMI 显著增加 $0.49\sim 4.12$ 倍。

(3) 3 种处理下,土壤团聚体 MWD 均表现为:金银花地 $>$ 休闲地 $>$ 荒地 $>$ 耕地,且 FW 处理下差异尤为明显。与耕地相比,金银花地、休闲地和荒地土壤团聚体 MWD_{FW} 分别显著增加 $134.41\%\sim 182.11\%$, $62.34\%\sim 85.85\%$ 和 $16.08\%\sim 51.09\%$ 。

(4) RSI 和 K 值的大小顺序为:耕地 $>$ 荒地 $>$ 休闲地 $>$ 金银花地。与耕地相比,金银花地、休闲地和荒地的 RSI 分别减少 $15.50\%\sim 36.74\%$, $-6.36\%\sim 7.01\%$ 和 $-9.67\%\sim 14.03\%$,而相应的 K 值减少率分别为 $45.18\%\sim 85.89\%$, $4.93\%\sim 82.15\%$ 和 $6.86\%\sim 55.35\%$ 。

参考文献:

[1] 李娟,韩霖昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):248-253,259.

[2] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach to predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and

Landforms, 1998,23(6):527-544.

[3] 陈山,杨峰,林杉,等.土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):211-216.

[4] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.

[5] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):971-978.

[6] 苏芳莉,赵光辉,王铁良,等.不同土地利用方式下表层土壤大团聚体特征[J].草业科学,2017,34(5):924-931.

[7] Yan F L, Shi Zh H, Li Zh X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of ultisols in subtropical China[J]. Soil & Tillage Research, 2008,100(1/2):34-41.

[8] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crust ability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(4):425-437.

[9] 郭曼,郑粉莉,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区土壤团聚体稳定性[J].中国水土保持科学,2010,8(2):68-73.

[10] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(20):6670-6680.

[11] 和继军,蔡强国,王学强.北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J].地理研究,2010,29(6):1017-1026.

[12] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society America Proceedings, 1950,14:20-23.

[13] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001,99(1/2):123-145.

[14] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[15] 汪三树,黄先智,史东梅,等.基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地壤土土壤团聚体稳定性研究[J].生态学报,2013,33(18):5589-5598.

[16] 曾全超,董扬红,李鑫,等.基于 Le Bissonnais 法对黄土高原森林植被带土壤团聚体及土壤可蚀性特征研究[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1093-1101.

[17] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].自然资源学报,2016,31(2):287-298.

[18] 郭伟,史志华,陈利顶,等.不同湿润速率对 3 种红壤坡面侵蚀过程的影响[J].土壤学报,2008,45(1):26-31.

[19] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].农业工程学报,2009,25(3):37-41.

[20] 李朝霞,蔡崇法,史志华,等.鄂南第四纪黏土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探[J].水土保持学报,2004,18(4):69-72.