

DOI: 10.5846/stxb201301160103

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. 生态学报, 2013, 33(20): 6670–6680.

Liu L, An S S, Huang H W. Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetaion on the loess plateau. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6670–6680.

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

刘 雷¹, 安韶山^{1,2,3,*}, 黄华伟¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 植被类型直接影响土壤特性, 对土壤团聚体的形成和稳定性有重要影响, 水稳性团聚体是反映黄土高原土壤抗蚀性的最佳指标。选择黄土丘陵区延河流域作为研究区域, 应用 Le Bissonnais (LB) 法和 Yoder 法测定了森林、森林草原两种植被类型下土壤水稳性团聚体稳定性, 对比分析了 LB 法 3 种处理的结果, 并计算土壤团聚体平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) 和可蚀性因子 K 值。结果表明: 在 LB 法 3 种湿润处理下, 预湿后扰动处理 (wet stirring, WS) 对土壤团聚体结构的破坏程度最大, 处理后土壤水稳性团聚体以 < 0.2 mm 为主; 快速湿润处理 (fast wetting, FW) 对团聚体的破坏程度次之; 慢速湿润处理 (slow wetting, SW) 对团聚体的破坏程度最小, 处理后土壤水稳性团聚体主要以 > 2 mm 团聚体为主; 说明黄土丘陵区延河流域土壤团聚体破坏的主要机制是气爆作用 (消散作用) 和机械扰动。LB 法的 3 种处理结果中预湿后扰动的测定结果与传统的湿筛法 (Yoder 法) 更接近。LB 法包含 Yoder 法的基本原理, 能够全面、准确的测定土壤团聚体结构, 适宜作为黄土丘陵区土壤团聚体测定方法。森林植被类型的土壤团聚体平均重量直径大于森林草原植被类型, 且 $SW > FW > WS$, 但可蚀性因子 K 值却是森林植被类型小于森林草原植被类型。土壤水稳性团聚体由小颗粒向大颗粒转变, 土壤结构趋于稳定。不同植被类型下土壤有机质含量不同, 土壤团聚体形成过程及土壤团聚度也有差异, 因而造成土壤可蚀性和土壤抗蚀性能不同。

关键词: 土壤团聚体; LB 法; Yoder 法; 黄土丘陵区; 植被类型

Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetaion on the loess plateau

LIU Lei¹, AN Shaoshan^{1,2,3,*}, Huang Huawei¹

1 College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A& F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Northwest A& F University, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: The type of vegetation present in an area directly impacts soil characteristics and has a significant influence on the formation and stability of soil aggregates. Water-stable aggregates are the best indicator of soil stability and reflect the ability of a soil to resist erosion on the Loess Plateau of China. Soil samples were collected from both forest and forest steppe vegetation types in the Dong Zigou and Zhang Jiahe catchments, which are located in the Yanhe Catchment of the An Sai Hilly-Gully Region. This study investigated the characteristics of soil water-stable aggregate using the Le Bissonnais (LB) and Yoder methods; the results of three LB treatments (fast wetting (FW), slow wetting (SW), and wetting stirring (WS)) were then compared and the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates and erodibility factor (K) value were

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41030532); 国家自然科学基金面上项目(41171226); 西北农林科技大学计划(QN2011049); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0473) 资助

收稿日期: 2013-01-16; 修订日期: 2013-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

calculated. The comparison of the three LB treatments showed: 1) the WS treatment was the most destructive to the stability of soil aggregates and the soil water-stable aggregate particle size was mainly concentrated in the <0.2 mm size group; this illustrated that heavy rain and/or irrigation were the main factors destroying soil aggregates in the Loess hilly region; 2) the SW treatment was the least destructive to soil aggregate stability and soil water-stable aggregate particle size was mainly concentrated in the >2 mm size group; this shows that light rain or drip irrigation did not have strong damaging effects on soil aggregates; 3) the destructiveness of FW on soil aggregate structure was intermediate between that of the WS and SW treatments, indicating that the soil water-stable aggregate particle size was evenly distributed. The experiment shows that the primary destructive mechanism of soil aggregate structure in this region was dissipation and mechanical slaking. Aside from considering the impact of natural factors, one should use irrigation methods that cause minimal damage to soil aggregates as part of a larger effort to reduce soil erosion. The results of the LB method of treatment in general and the measurements resulting from the WS treatment specifically produced findings that were close to the results of traditional wet sieving (the Yoder method); the FW and WS treatments can simulate the effects of different amounts and intensities of rainfall and irrigation on the stability of soil aggregates. The basic principles of the Yoder method are reflected in the LB method. The LB method can not only simulate traditional wet sieving results, but can also explain the mechanisms involved in the disintegration of soil aggregates under different conditions in terms of the stability of soil structure; the LB method provides more comprehensive information than the Yoder method and can help determine the cause of the loss of soil structure. The soil aggregate structure can be accurately approximated using the LB method. The LB method can be appropriately applied to measure soil aggregate structure in the Loess Hilly-Gully Region. The MWD and the measure of the erodibility factor (K) are used to evaluate the water stability of soil aggregates. The results also showed that the MWD of soil water-stable aggregates in soils from the forest vegetation type was greater than that of soils from the forest steppe vegetation type, and $SW > FW > WS$; but the value of the erodibility factor (K) of soils from the forest vegetation type is lower than the value of K from soils of the forest steppe vegetation type. In areas of restored vegetation, soil water-stable aggregate varied from small particles into larger particles. Different vegetation types have diverse levels of soil organic matter content, diverse forms of soil aggregates and differences in the degree of soil aggregation present. These differences result in differences in soil erodibility and resistance to soil erosion.

Key Words: hilly-gully region; Le Bissonnais method; Yoder method; soil aggregate stability; vegetation types

延河流域地处黄土高原腹地,水土流失严重。经过多年的退耕还林还草措施,水土流失量减少,地表植被得到恢复,生态环境得到改善。一般说来,随恢复时间的增长,地上和地下生物量增加,继而使土壤有机物质输入增加,引起土壤物理、化学和生物性质发生变化,因此,恢复的植被类型将直接影响土壤特性^[1-3]。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,影响着土壤的孔隙性、保水性和抗侵蚀性,而水稳性团聚体是反映黄土高原土壤抗蚀性的最佳指标^[4-6]。只要能提高土壤团聚体的水稳性以及水稳性团聚体的数量和质量,就能提高土壤的抗侵蚀能力^[7-11]。Le Bissonnais(LB)法作为一种新的土壤团聚体稳定性测定方法,在国内应用不多,且主要集中在南方红壤区域^[12-15],在黄土丘陵区的应用较少^[16]。因此,本研究选取黄土丘陵区延河流域作为研究对象,应用LB法的3种处理方式测定不同植被类型下土壤水稳性团聚体含量,通过计算团聚体平均重量直径(MWD)和可蚀性因子 K 值,探讨黄土丘陵区植被类型与土壤团聚体含量之间的关系,揭示植被类型改善土壤生态环境的作用机制,旨在为正确评价黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区所在区域属典型的大陆性半干旱季风气候,夏秋多雨,冬季严寒干燥。年日照时数 2415.5 h,辐射

总量 480.1 kJ/cm², 无霜期 160—180 d, 平均气温 8.8 °C, ≥ 10 °C 活动积温 3177.4 °C, 多年平均降水量 505.3 mm, 年蒸发量 1645.4 mm。该区域属于典型的梁峁状丘陵沟壑区, 土壤侵蚀十分强烈。

洞子沟流域位于延河流域一级支流西川流域, 地处安塞县楼坪乡 (36°31'13"—36°35'26"N, 109°7'34"—109°10'34"E), 属森林植被类型, 海拔 1166—1490 m, 流域总面积 20.61 km²。土壤类型以黄绵土为主, 间有复钙红粘土、冲积土, 土地利用以林地为主。

张家河流域位于延河上游干流, 地处安塞县谭家营乡 (36°59'33"—37°2'40"N, 109°11'58"—109°14'39"E), 属森林草原植被类型。海拔 1118—1505 m。流域总面积 10.77 km²。土壤类型以黄绵土为主, 间有冲积土。土地利用以草地和耕地为主, 兼有零星林地。

1.2 样品采集及测定

2010 年 7 月, 在延河流域黄土丘陵区选取两个典型小流域—洞子沟、张家河。洞子沟为森林植被类型, 选取 8 个样点, 张家河为森林草原植被类型, 选取 13 个样点, 每个样点内设置两个重复, 各样地信息见表 1, 表 2。采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土层原状土, 装入铝盒带回实验室, 风干。干筛法选取 3—5 mm 团聚体。根据 LB 的 3 种处理方法^[17-18]和 Yoder 法^[19]测定所有样地的土壤水稳性团聚体重量百分含量。

表 1 森林植被样地描述

Table 1 The description of forest sample sites

样点 Code	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	坡位 Slope situation	主要植物群落 Main vegetation community
1	1259	28	北偏东	沟谷 Lower gully	辽东栎、茶条槭、中华绣线菊、六道木、披针苔草、多花胡枝子
2	1301	30	南偏西	沟谷 Lower gully	侧柏+六道木、丁香、披针苔草
3	1284	35	西	梁峁坡 Middle hilly	三角槭+黄刺玫、丁香、披针苔草、和尚草
4	1334	21	北	梁峁坡 Middle hilly	三角槭、黄刺玫
5	1346	27	南偏西	梁峁坡 Middle hilly	狼牙刺、灌木铁线莲、白羊草、铁杆蒿、达乌里胡枝子、长芒草
6	1372	8		峁顶 Upper hilly	刺槐、杠柳、铁杆蒿、长芒草
7	1348	28	北偏东	梁峁坡 Middle hilly	铁杆蒿、茭蒿、达乌里胡枝子、披针苔草
8	1351	26		峁顶 Upper hilly	铁杆蒿、猪毛蒿

表 2 森林草原植被样地描述

Table 2 The description of forest-steppe sample sites

样点 Code	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	坡位 Slope situation	主要植物群落 Main vegetation community
1	1309	37	北	梁峁坡 Middle hilly	茭蒿、铁杆蒿
2	1356	9		峁顶 Upper hilly	铁杆蒿
3	1345	30	南	梁峁坡 Middle hilly	白羊草、铁杆蒿、茭蒿
4	1265	45	南	沟谷 Lower gully	铁杆蒿、白羊草、茭蒿
5	1307	31	南	沟谷 Lower gully	白羊草、茭蒿
6	1338	35	南	梁峁坡 Middle hilly	白羊草、铁杆蒿
7	1355	9		峁顶 Upper hilly	白羊草、铁杆蒿、达乌里胡枝子
8	1312		北	梁峁坡 Middle hilly	铁杆蒿、百里香
9	1315	38	北	沟谷 Lower gully	铁杆蒿、茭蒿
10	1315	27	北	梁峁坡 Middle hilly	铁杆蒿
11	1307	27	南偏西	沟谷 Lower gully	白羊草、达乌里胡枝子、茭蒿、铁杆蒿
12	1349	39	南偏西	梁峁坡 Middle hilly	白羊草、达乌里胡枝子、铁杆蒿
13	1380	1		峁顶 Upper hilly	铁杆蒿

乔木: 辽东栎 *Quercus liaotungensis*, 茶条槭 *Acer ginnala* Maxim., 三角槭 *Acer buergerianum* Miq., 侧柏 *Platycladus orientalis* (L.) Franc, 刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.; 灌木: 中华绣线菊 *Spiraea chinensis* Maxim., 六道木 *Abelia biflora* Turcz., 丁香 *Syringa pekinensis* Rupr., 黄刺玫 *Rosa xanthina*, 狼牙刺 *Sophora viciifolia* Hance, 灌木铁线莲 *Clematis fruticosa* Turcz., 杠柳 *Periploca sepium* Bunge; 草本: 披针苔草 *Carex lanceolata* Boott, 多花胡枝子 *Lespedeza floribunda* Bunge, 披针苔草 *Carex lanceolata* Boott, 和尚草 *Solanum cathayanum* C. Y. Wu et S. C. Huang, 白羊草 *Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng, 铁杆蒿 *Artemisia gmelinii* Web. ex Stechm., 达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl., 长芒草 *Stipa bungeana* Trin., 茭蒿 *Artemisia giraldii* Pamp., 百里香 *Thymus mongolicus*, 猪毛蒿 *Artemisia scoparia* Waldst. et Kit; LB 方法介绍: 取 3—5 mm 的待测土样置于烘箱中 40 °C 烘 24 h

快速湿润法(FW) (1) 取 5—10 g 过 3—5 mm 筛的土壤团聚体; (2) 将 50 mL 去离子水注入 250 mL 的

烧杯中,将已称的团聚体样品轻轻地浸没其中,静置 10 min; (3) 用吸管吸干水分,再用乙醇将团聚体洗入预先浸在乙醇中的 0.05 mm 铜筛; (4) 均匀用力将筛子在乙醇中螺旋形振荡 5 次; (5) 将筛上的团聚体洗入蒸发皿内; (6) 40 °C 烘干 48 h,过套筛(2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05 mm),称量,精确至 0.0001 g,获取各粒级团聚体的质量分数。

慢速湿润法(SW) (1) 取 5—10 g 过 3—5 mm 筛的土壤团聚体放在滤纸上,再放入垫有 3 cm 海绵的 250 mL 的烧杯中; (2) 将乙醇加入到 2.5 cm 海绵处,静置 60 min; (3) 然后用乙醇将团聚体洗入浸在乙醇中的 0.05 mm 铜筛; (4) 重复 FW 处理的步骤(5) —(6)。

预湿后扰动法(WS) (1) 取 5—10 g 过 3—5 mm 筛的土壤团聚体; (2) 在 250 mL 的烧杯中加入 50 mL 乙醇,将土样轻轻地浸没其中,静置 30 min; (3) 用吸管吸出多余的液体,往锥形烧瓶中加入 50 mL 去离子水; (4) 用去离子水洗瓶将土样冲入锥形瓶中,再沿着锥形瓶壁加入去离子水至 200 mL; (5) 将锥形瓶翻转摇动 10 次,静置 30 min; (6) 用吸管吸出多余的水,用乙醇将团聚体洗入浸在乙醇中的 0.05 mm 铜筛内; (7) 重复 FW 处理的步骤(5) —(6)。

1.3 数据处理

土壤团聚体平均重量直径(MWD, mm)和土壤可蚀性因子K值具体计算公式如下^[20-21]:

$$MWD = \frac{\sum_i \chi_i \omega_i}{\sum_i \omega_i}$$

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

其中, $GMD = \exp \left(\frac{\sum_i \omega_i \ln \chi_i}{\sum_i \omega_i} \right)$

式中 χ_i 为每个粒级下的团聚体平均直径(mm), ω_i 为每个粒级下的团聚体质量百分含量。

应用最小显著性差异(LSD)方法检验 LB 法 3 种处理与 Yoder 法之间的差异,利用回归分析研究土壤团聚体平均重量直径(MWD)及 > 0.2 mm 团聚体质量分数之间的关系,数据统计分析利用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 完成。

2 结果与分析

2.1 森林植被类型下土壤水稳性团聚体的粒径分布特征

森林植被类型中,干筛得到的 3—5 mm 土壤团聚体在不同处理下形成的水稳性团聚体各粒级质量分数分布结果见图 1 和图 2。由图 1 可以看出:在森林植被类型下,0—10 cm 土层,对于 SW 处理, >2 mm 团聚体占绝大部分比例,团聚体质量分数变化幅度为 74.47%—96.95%,其他粒级团聚体所占比例很小,变化范围仅在 0.24%—9.17%,说明该过程对土壤团聚体的破坏作用较小;对于 FW 处理,仍以 >2 mm 团聚体为主,在 6.20%—68.50% 之间变化,其他粒级团聚体变化范围在 2.72%—41.87% 之间。对于 WS 处理,各粒级分布比较均匀,各粒级质量分数变幅不大, >2 mm 变化范围为 4.57%—50.43%,其他粒级团聚体质量分数变化范围为 3.91%—42.45%,这是由于溶液由水换成了酒精,去除了消散及物理性粘粒湿润膨胀的影响。

由图 2 可以看出:在 10—20 cm 土层,3 种湿润处理的结果同 0—10 cm 土层类似。对于 SW 处理, >2 mm 团聚体质量分数变化处于 82.81%—97.3%,占主要部分。其他粒级变化仅在 0.19%—5.80% 之间。对于 FW 处理, >2 mm 团聚体变化处于 3.46%—48.58%,略低于 0—10 cm 土层。其他粒级质量分数范围为 2.89%—52.21%。对于 WS 处理, >2 mm 团聚体变化处于 0.73%—31.69%,同 0—10 cm 土层相比, >2 mm 团聚体所占比例略小。其他粒级质量分数范围为 4.22%—34.23%。

综上可以得出,在森林植被类型下,0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤团聚体各粒级分布规律相同, >0.2 mm 团聚体所占比例表现为 SW>FW>WS。由此可知,在 LB 法 3 种湿润处理下,预湿后扰动处理对土壤团聚体结构的破坏程度最大,其次为快速湿润处理,而慢速湿润处理对土壤团聚体的破坏程度最小。10—20 cm 土层土壤 >0.2 mm 的水稳性团聚体含量大于 0—10 cm 土层。

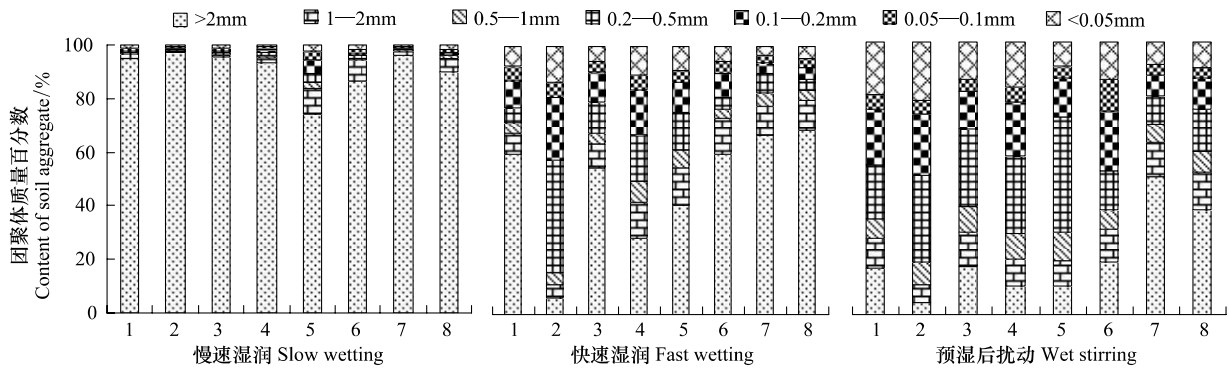


图1 Le Bissonnais 法3种处理下森林植被类型0—10 cm 土层土壤水稳性团聚体粒级分布

Fig.1 Size distribution of water-stable aggregates of forest soil in the 3 treatments by Le Bissonnais method in the 0—10 cm depth

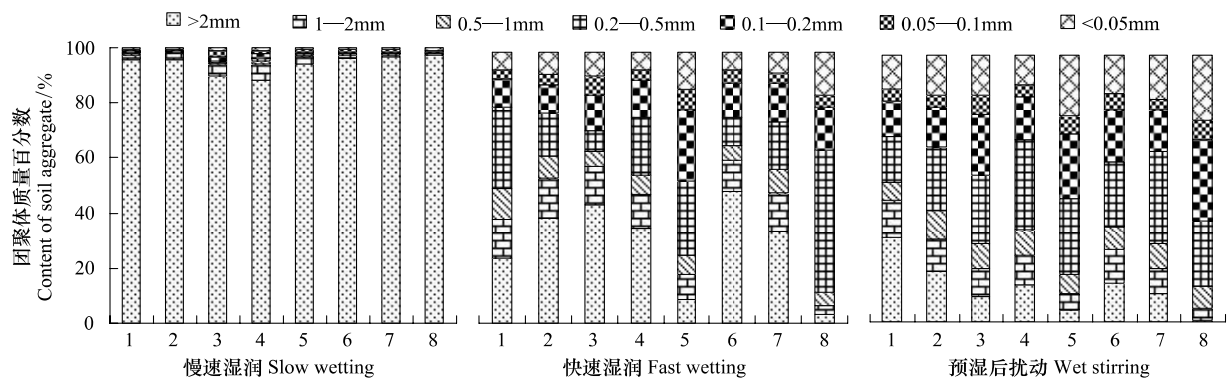


图2 Le Bissonnais 法3种处理下森林植被类型10—20 cm 土层土壤水稳性团聚体粒级分布

Fig.2 Size distribution of water-stable aggregates of forest soil in the 3 treatments by Le Bissonnais method in the 10—20 cm depth

2.2 森林草原植被类型土壤水稳性团聚体的粒径分布特征

森林草原植被类型中,干筛得到的3—5 mm 土壤团聚体应用 LB 法测定不同湿润处理下形成的水稳性团聚体各粒级质量分布结果见图3和图4。

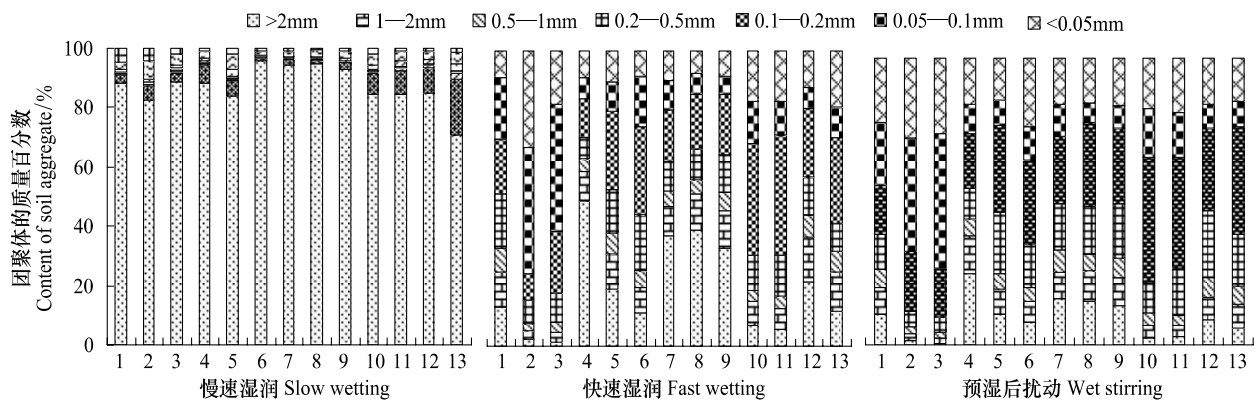


图3 Le Bissonnais 法3种处理下森林草原植被类型0—10 cm 土层土壤水稳性团聚体粒级分布

Fig.3 Size distribution of water-stable aggregates of forest steppe soil in the 3 treatments by Le Bissonnais method in 0—10 cm depth

由图3可以看出:在0—10 cm 土层,对于SW处理,以>2 mm 团聚体为主,变化范围在70.82%—95.68%之间,1—2 mm 团聚体质量分数0.95%—18.79%,其他粒级均在5.16%以下。对于WS处理,在0—10 cm 土层,>2 mm、<0.05 mm 团聚体质量百分数分别为0.58%—25.06%,14.5%—26.56%。对于FW处理,在0—

10 cm 土层 >2 、 <0.05 mm 团聚体质量百分数分别为 1.02%—49.15%、0.71%—7.94%。

由图 4 可以看出: 10—20 cm 土层, 在 SW、WS、FW 处理下, >2 mm 团聚体分别处于 75.36%—95.49%、1.64%—13.45% 和 1.88%—24.55%。在森林草原植被类型, LB 法 3 种处理下, 2—5 mm 粒径土壤团聚体所占比例表现为 $SW>FW>WS$; 1—2 mm 团聚体所占比例 $FW>WS>SW$; 0.5—1 mm 团聚体所占比例 $FW\approx WS>SW$; 0.2—0.5 mm 团聚体所占比例表现为 $FW\approx WS>SW$; <0.2 mm 团聚体所占比例表现为 $WS>FW>SW$ 。因此在森林草原植被类型, 对土壤团聚体破坏作用最大的是预湿后扰动处理。在 >0.2 mm 团聚体的平均百分含量上, 0—10 cm 土层, SW、WS 和 FW 3 种处理分别为 94.66%、39.00% 和 49.00%; 10—20 cm 土层, SW、WS 和 FW 依次为 93.72%、33.06% 和 39.55%。可以看出, 在相同的处理条件下, 该地区 0—10 cm 土壤要比 10—20 cm 土壤更稳定。

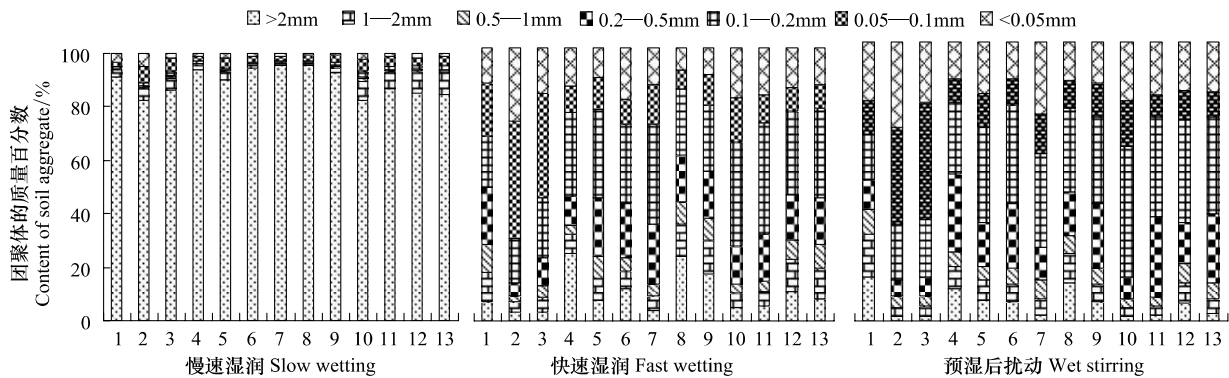


图 4 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林草原植被类型 10—20 cm 土层土壤水稳性团聚体粒级分布

Fig.4 Size distribution of water-stable aggregates of forest steppe soil in the 3 treatments by Le Bissonnais method in 10—20 cm depth

2.3 不同方法对两个植被类型土壤团聚体稳定性的评价

森林植被类型土壤采用 Yoder 法和 LB 法 3 种处理后, 计算出的土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 值如表 3 所示。土壤团聚体平均重量直径越大, 土壤结构越稳定, 土壤抗侵蚀能力越强。由表 3 可知: 在森林植被类型内, 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤 MWD 值均为 $SW>FW>WS$ 。这说明在 0—10 cm 和 10—20 cm, LB 法 3 种处理的土壤团聚体的稳定性规律一致, 即慢速湿润 $>$ 快速湿润 $>$ 预湿后扰动, 说明 3 种处理中, 慢速湿润处理的土壤抗侵蚀能力最强, 预湿后扰动处理的土壤抗侵蚀能力最弱, 快速湿润介于二者之间。

表 3 Yoder 法与 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林植被类型土壤的团聚体平均重量直径 (MWD) 值

Table 3 MWD Value of forest soil under Yoder method and 3 treatments of Le Bissonnais method

样点 Code	0—10 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm				10—20 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm			
	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting	湿筛 Yoder	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting	湿筛 Yoder
1	3.39±0.02	2.06±0.30	2.58±0.11	1.60±0.12	3.39±0.02	1.46±0.12	1.27±0.15	1.56±0.14
2	3.23±0.04	1.69±0.12	2.71±0.46	1.13±0.17	3.39±0.04	1.03±0.27	1.72±0.37	0.62±0.13
3	3.25±0.01	1.01±0.37	2.35±0.12	1.26±0.19	3.13±0.07	0.69±0.07	1.84±0.12	0.98±0.08
4	2.72±0.54	0.75±0.10	1.75±0.06	1.33±0.20	3.26±0.04	0.87±0.04	1.56±0.31	1.26±0.05
5	3.36±0.01	0.72±0.27	1.34±0.26	2.03±0.00	3.29±0.06	0.79±0.06	0.64±0.26	1.85±0.01
6	3.36±0.02	0.92±0.20	2.28±0.23	1.43±0.19	3.38±0.04	0.74±0.08	1.97±0.18	1.54±0.13
7	3.38±0.02	1.00±0.15	2.14±0.08	2.00±0.11	3.38±0.03	0.73±0.10	1.56±0.26	1.93±0.18
8	3.42±0.01	0.47±0.06	0.51±0.07	1.89±0.12	3.40±0.01	0.29±0.02	0.42±0.06	1.83±0.10

森林草原植被类型土壤采用 Yoder 法和 LB 法 3 种处理后, 计算出的土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 值如表 4 所示。可知: 在森林草原植被类型, MWD 值同样为 $SW>FW>WS$ 。另外在相同的处理方式下, 森林植

被类型的 MWD 值比森林草原植被类型大,说明森林植被类型的土壤团聚体的水稳性高于森林草原植被类型,这个结论与上面由团聚体分布情况得出的规律一致。植被能够使土壤团聚体由小颗粒向大颗粒转变,土壤结构趋于稳定,在黄土丘陵区,森林植被对土壤结构的改善作用优于森林草原植被。

表 4 Yoder 法与 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林草原植被类型土壤的 MWD 变化

Table 4 Changes of forest steppe soil MWD under Yoder and 3 treatments of Le Bissonnais method

样点 Code	0—10 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm				10—20 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm			
	慢速湿润	湿润后扰动	快速湿润	湿筛	慢速湿润	湿润后扰动	快速湿润	湿筛
	Slow wetting	Wet stirring	Fast wetting	Yoder	Slow wetting	Wet stirring	Fast wetting	Yoder
1	3.14±0.06	0.65±0.15	0.81±0.26	1.07±0.01	3.24±0.01	0.93±0.25	0.60±0.06	0.77±0.02
2	3.14±0.06	0.23±0.04	0.20±0.07	0.46±0.11	2.96±0.29	0.22±0.05	0.27±0.09	0.46±0.04
3	3.15±0.07	0.13±0.01	0.22±0.05	0.30±0.13	3.09±0.08	0.23±0.02	0.33±0.06	0.29±0.03
4	3.19±0.02	1.19±0.21	1.95±0.54	1.78±0.14	3.31±0.07	0.71±0.10	0.35±0.11	1.69±0.22
5	3.03±0.25	0.68±0.30	1.01±0.48	0.35±0.02	3.20±0.15	0.68±0.12	0.58±0.28	0.37±0.09
6	3.37±0.06	0.54±0.22	0.71±0.32	2.13±0.15	3.34±0.03	0.58±0.11	0.75±0.42	1.63±0.09
7	3.34±0.06	0.87±0.14	1.57±0.21	1.40±0.06	3.36±0.01	0.32±0.04	0.39±0.08	1.46±0.25
8	3.35±0.02	0.85±0.15	1.80±0.39	0.98±0.13	3.34±0.01	0.79±0.15	1.05±0.23	1.40±0.11
9	3.30±0.05	0.79±0.18	1.23±0.60	0.56±0.09	3.28±0.18	0.43±0.22	1.02±0.34	0.59±0.08
10	3.08±0.18	0.31±0.08	0.51±0.21	0.80±0.20	3.01±0.09	0.25±0.06	0.39±0.13	0.47±0.12
11	3.09±0.05	0.32±0.10	0.46±0.08	0.32±0.16	3.14±0.04	0.31±0.04	0.43±0.06	0.46±0.08
12	3.12±0.01	0.61±0.03	0.92±0.48	0.96±0.01	3.11±0.05	0.50±0.18	0.72±0.18	1.17±0.13
13	2.93±0.21	0.51±0.02	0.68±0.09	0.61±0.02	3.10±0.15	0.36±0.04	0.64±0.22	1.15±0.06

由表 5 可知,森林植被类型 0—10 cm 和 10—20 cm 土层, LB 法 3 种处理中,慢速湿润处理后的土壤可蚀性 K 值平均值均为最小,说明和其他 2 种处理相比,慢速湿润处理后的土壤抗侵蚀能力最强,这与根据 MWD 值分析得出的规律一致。Yoder 法处理结果土壤可蚀性 K 值平均值最大,说明 Yoder 法处理对土壤团聚结构破坏程度最大,而且 LB 法中预湿后扰动处理结果与 Yoder 法处理结果更为接近。

表 5 Yoder 法与 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林植被类型土壤可蚀性 K 值变化

Table 5 Changes of forest soil erodibility values under Yoder and 3 treatments of Le Bissonnais method

样点 Code	0—10 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm				10—20 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm			
	慢速湿润	湿润后扰动	快速湿润	湿筛	慢速湿润	湿润后扰动	快速湿润	湿筛
	Slow wetting	Wet stirring	Fast wetting	Yoder	Slow wetting	Wet stirring	Fast wetting	Yoder
1	0.0233	0.0317	0.0279	0.0441	0.0234	0.0375	0.0400	0.0453
2	0.0240	0.0354	0.0279	0.0551	0.0233	0.0422	0.0348	0.0659
3	0.0240	0.0454	0.0315	0.0560	0.0247	0.0491	0.0348	0.0614
4	0.0275	0.0478	0.0351	0.0529	0.0240	0.0457	0.0373	0.0544
5	0.0235	0.0474	0.0397	0.0426	0.0239	0.0519	0.0511	0.0440
6	0.0235	0.0442	0.0308	0.0521	0.0235	0.0454	0.0335	0.0507
7	0.0235	0.0428	0.0320	0.0434	0.0235	0.0467	0.0370	0.0444
8	0.0232	0.0508	0.0532	0.0416	0.0233	0.0553	0.0528	0.0435

由表 6 可知,森林草原植被类型 0—10 cm 及 10—20 cm 土层,土壤可蚀性 K 值规律跟森林植被类型一致,即慢速湿润处理后土壤抗侵蚀性最强,Yoder 法处理后土壤抗侵蚀性最差。同时也可以看出森林植被类型与森林草原植被类型对应土层用相同方法处理结果相比,森林植被类型土壤抗侵蚀性优于森林草原植被类型。

表 6 Yoder 法与 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林草原植被类型土壤可蚀性 K 值变化

Table 6 Changes of forest steppe soil erodibility values under Yoder and 3 treatments of Le Bissonnais method

样点 Code	0—10 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm				10—20 cm 平均重量直径 Mean weight diameter/mm			
	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting	湿筛 Yoder	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting	湿筛 Yoder
1	0.0245	0.0516	0.0518	0.0584	0.0240	0.0440	0.0542	0.0636
2	0.0245	0.0632	0.0598	0.0746	0.0258	0.0630	0.0655	0.0740
3	0.0247	0.0683	0.0696	0.0794	0.0253	0.0687	0.0665	0.0797
4	0.0244	0.0419	0.0335	0.0470	0.0238	0.0502	0.0508	0.0488
5	0.0257	0.0518	0.0461	0.0768	0.0245	0.0547	0.0549	0.0742
6	0.0235	0.0528	0.0542	0.0424	0.0237	0.0558	0.0525	0.0489
7	0.0237	0.0476	0.0388	0.0523	0.0236	0.0572	0.0607	0.0516
8	0.0237	0.0474	0.0356	0.0617	0.0239	0.0508	0.0461	0.0532
9	0.0240	0.0481	0.0386	0.0718	0.0242	0.0503	0.0438	0.0694
10	0.0251	0.0632	0.0567	0.0668	0.0256	0.0642	0.0600	0.0748
11	0.0250	0.0612	0.0576	0.0786	0.0248	0.0585	0.0581	0.0734
12	0.0247	0.0519	0.0419	0.0632	0.0248	0.0552	0.0502	0.0578
13	0.0257	0.0558	0.0513	0.0715	0.0249	0.0574	0.0521	0.0580

2.4 四种处理方法测定的土壤团聚体稳定性结果的相关性分析

从表 7 可以看出,在 0—10 cm 土层,森林植被类型中的 WS 和 FW 处理呈现出显著的正相关,说明森林植被类型 0—10 cm 土壤团聚体在机械扰动下的崩解作用和使团聚体崩解的消散作用呈现出显著相关性。

表 7 Yoder 法与 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林植被类型土壤团聚体稳定性结果(MWD 值)的相关性

Table 7 Correlation of forest soil MWD under Yoder and 3 treatments of Le Bissonnais method

0—10cm 土层 Soil layer	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting	10—20cm 土层 Soil layer	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting
慢速湿润 Slow wetting(SW)	1			SW	1		
湿润后扰动 Wet stirring(WS)	0.192	1		WS	0.029	1	
快速湿润 Fast wetting(FW)	-0.070	0.781*	1	FW	-0.302	0.536	1
湿筛 Yoder	0.514	-0.390	-0.598	Yoder	0.376	-0.383	-0.584

**表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$; $n = 8$

如表 8 所示,在 0—10 cm 处,森林草原植被类型中的 WS 和 FW 处理极显著正相关,SW 和 Yoder 法显著正相关。在 10—20 cm 处,WS 和 SW 呈现显著正相关性,和 FW 则呈现出极显著正相关性。说明森林草原植被类型 0—10 cm 土壤团聚体在机械扰动下的崩解作用和消散作用显著相关,慢速湿润处理和传统湿筛法(Yoder 法)显著正相关。10—20 cm 土壤团聚体在机械扰动下的崩解作用和由土壤粘粒膨胀引起的崩解作用具有显著的正相关性,和消散作用则具有极显著的正相关性。这表明 LB 法中团聚体崩解的 3 种机制之间具有内在联系。

表 8 Yoder 法与 Le Bissonnais 法 3 种处理下森林草原植被类型土壤团聚体稳定性结果(MWD 值)的相关性

Table 8 Correlation of forest steppe soil MWD under Yoder and 3 treatments of Le Bissonnais method

0—10 cm 土层 Soil layer	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting	10—20 cm 土层 Soil layer	慢速湿润 Slow wetting	湿润后扰动 Wet stirring	快速湿润 Fast wetting
慢速湿润 Slow wetting(SW)	1			SW	1		
湿润后扰动 Wet stirring(WS)	0.352	1		WS	0.660*	1	
快速湿润 Fast wetting(FW)	0.412	0.974**	1	FW	0.590	0.939**	1
湿筛 Yoder	0.638*	-0.031	0.062	Yoder	0.219	0.239	0.367

**表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$; $n = 13$

3 讨论

3.1 植被类型对土壤团聚体粒径分布的影响

不同植被对土壤性质会产生很大的影响。植被对土壤的影响主要表现在植物根系对土壤的挤压、穿插和分割作用;死亡根系和枯枝落叶产生的有机质及根际分泌物对土壤性质的影响等方面。在同一成土母质基础上发育的土壤,因植被类型不同,团聚体的组成和数量都可发生很大的变化,说明植被类型对土壤团聚体的形成具有较大的影响^[22-23]。其中最直接的影响就是植被演替形成的有机质有利于土壤团聚作用^[24],有机碳含量越高,土壤团聚体水稳性程度也越好^[25]。在研究中,森林草原植被类型 0—10 cm、10—20 cm 土层 >0.2 mm 团聚体平均含量,均比森林植被类型团聚体平均含量低。可见经过 LB 法 3 种处理后,在森林植被类型土壤大颗粒团聚体 (>0.2 mm) 平均百分含量在 0—10 cm、10—20 cm 土层均大于森林草原植被类型,植被恢复能够改善土壤表层团聚体的性质^[25]。在黄土丘陵区,植被群落由 1 年生草本—多年生灌草—半灌木—灌木—乔木方向的演替过程中,土壤水稳性团聚体由小粒径向大粒径方向转变,土壤结构会趋于相对稳定,这与已有研究一致^[16]。

3.2 植被类型对土壤抗蚀性因子 K 值的影响

森林草原植被类型与森林植被类型土壤可蚀性 K 值相比,采样相同处理方式,0—10 cm 和 10—20 cm 土层均为森林草原植被类型土壤可蚀性 K 值较大,说明森林草原植被类型土壤对侵蚀营力分离和搬运用敏感性高于森林植被类型,土壤抗蚀性能低于森林植被类型,土壤更加容易遭受侵蚀,因此在同一单位降雨侵蚀力作用下土壤越易侵蚀产沙^[26]。从土壤抗蚀性的角度来看,黄土高原植被恢复重建取得明显生态效果,尽管本研究中森林植被类型样地乔木、灌木植物的数量还较少,但已经在植物群落多样性和结构等方面开始发挥重要影响^[27-28],表现出重要的生态和景观功能。特别是沟谷地,已经形成乔灌草共存的植被群落,其根系系统及生态调控功能将对控制沟谷地的侵蚀^[29-30]产生积极影响。从本研究可以看出,森林植被类型较森林草原植被类型在提高土壤抗蚀性方面的作用较为明显,造成这种差异的主要原因是由于乔木覆盖下土壤枯枝落叶等凋落物含量更高,根系更为发达,随着根系分泌物的分解,释放养分归还土壤,土壤有机质含量逐渐增加,土壤肥力水平提高,土壤结构得到改善,从而增强了土壤的抗蚀性。

3.3 LB 法 3 种处理下土壤水稳性团聚体破坏机制的现实意义

LB 法是根据团聚体崩解的原因区分了其破坏的不同机制:FW 处理模拟干燥土壤在快速湿润条件下(如暴雨或灌溉条件)由于封闭的气体爆破而产生的破坏机制,强调的是湿润破坏机制的消散作用;SW 处理模拟小雨或者滴灌等条件下,土壤结构由毛细作用等破坏,强调的是土壤粘粒膨胀作用;WS 处理主要强调的是机械扰动作用^[17]。在本研究中,预湿后扰动处理对团聚体的破坏程度最大,说明暴雨或灌溉是黄土丘陵区土壤团聚体破坏的主要影响因素;慢速湿润对团聚体破坏程度最小,说明小雨或滴灌对此区域土壤团聚体破坏作用不大。不同人工灌溉方式对该地区团聚体破坏作用不同,除去降雨等自然因素,应采取对团聚体破坏程度较小的灌溉方式以减轻土壤侵蚀。综合以上分析,本研究认为,黄土丘陵区土壤团聚体破坏的主要机制是土壤孔隙中的气泡爆破产生的消散作用和机械扰动,这也与已有报道一致^[16]。

3.4 Le Bissonnais 法与 Yoder 法比较

MWD 是评价土壤结构的有效方法,土壤可蚀性 K 指标是表征土壤性质对侵蚀敏感程度的指标,二者均为土壤侵蚀和水土流失定量评价的重要参考依据。在黄土丘陵区的不同植被类型下,根据 MWD 和 K 值计算结果说明,在 LB 法的 3 种处理中,预湿后扰动的测定结果与传统的湿筛法更接近。LB 法不仅可以代表传统湿筛法处理结果,还能从团聚体崩解机理方面对土壤结构稳定性进行区别评价,比 Yoder 法处理结果提供的信息更为全面,有助于判断土壤结构破坏过程的作用来源。

4 结论

(1) 在 LB 法 3 种湿润处理下,预湿后扰动处理(WS)对土壤团聚体结构的破坏程度最大,处理后土壤水稳性团聚体以 <0.2 mm 为主;慢速湿润处理(SW)对团聚体的破坏程度最小,处理后土壤水稳性团聚体主要以

>2 mm 团聚体为主;而快速湿润处理(FW)对团聚体的破坏程度介于 WS 和 SW 之间。黄土丘陵区土壤团聚体破坏的主要机制是土壤孔隙中的气泡爆破产生的消散作用和机械扰动。除去自然因素,应采取对团聚体破坏程度较小的人工灌溉方式以减轻土壤侵蚀。

(2) 从 LB 法 3 种处理方式下计算出的 MWD 值和土壤可蚀性因子 K 值可以看出:森林植被类型土壤团聚体稳定性高于森林草原植被类型。土壤水稳性团聚体由小颗粒向大颗粒转变,土壤结构趋于稳定。不同植被类型下土壤有机质含量不同,土壤团聚体形成过程及土壤团聚度也有差异,因而造成土壤可蚀性和土壤抗蚀性能不同。

(3) LB 法的 3 种处理结果中预湿后扰动的测定结果与传统的湿筛法(Yoder 法)更接近,此外,快速湿润处理和预湿后扰动处理能模拟不同降雨和灌溉方式对土壤团聚体稳定性的影响,应用 LB 法能够全面、准确的测定土壤团聚体结构,适宜作为黄土丘陵区土壤团聚体稳定性评价方法。

References:

- [1] Tisdall J M , Oades J M . Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* , 1982 , 33(2) : 141-163.
- [2] Semmel H , Horn R , Hell U , Dexter A R , Schulze E D . The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology* , 1990 , 3(2) : 113-129.
- [3] Yao S H , Qin J T , Peng X H , Zhang B . The effects of vegetation on restoration of physical stability of a severely degraded soil in China. *Ecological Engineering* , 2009 , 35(5) : 723-734.
- [4] Zhou X , Peng X , Peth S , Xiao T Q . Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. *Soil & Tillage Research* , 2012 , 124 : 17-23.
- [5] Bronick C J , Lal R . Soil structure and management: a review. *Geoderma* , 2005 , 124(1/2) : 3-22.
- [6] Wang Y M , Liu B Z , Li C Y , Gao B S . Study on the erosion resistance of soil in *Robinia pseudoacacia* lands. *Practical Forestry Technology* , 1984 , 5(5) : 9-13.
- [7] Cantón Y , Solé-Benet A , Asensio C , Chamizo S , Puigdefábregas J . Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. *Catena* , 2009 , 77(3) : 192-199.
- [8] Fatteta M , Fu Y , Ghestem M , Ma W , Foulonneau M , Nespoulous J , Le Bissonnais Y , Stokes A . Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena* , 2011 , 87(1) : 60-69.
- [9] Pohl M , Graf F , Buttler A , Rixen C . The relationship between plant species richness and soil aggregate stability can depend on disturbance. *Plant and Soil* , 2012 , 355(1/2) : 87-102.
- [10] Xue S , Li Z B , Li P , Liu G B , Dai Q H . Effects of different vegetation restoration models on soil anti-erodibility in loess hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* , 2009 , 25(S1) : 69-72.
- [11] Duchicela J , Vogelsang K M , Schultz P A , Kaonongbua W , Middleton E L , Bever J D . Non-native plants and soil microbes: potential contributors to the consistent reduction in soil aggregate stability caused by the disturbance of North American grasslands. *New Phytologist* , 2012 , 196(1) : 212-222.
- [12] Peng X H , Zhang B , Zhao Q G . Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica* , 2003 , 23(10) : 2176-2183.
- [13] Lu S G , Zhu L , Zheng X P . Le Bissonnais method of measuring aggregate stability in ferrisols and its implications. *Journal of Soil and Water Conservation* , 2004 , 18(1) : 7-11.
- [14] Zheng X P , Lu S G . Characterization and physical mechanisms of aggregate stability in Ferrisols. *Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences* , 2005 , 31(3) : 305-310.
- [15] Wang H Y , Wu S W , Ma H Y , Guo J L , Lu S G . Stability and its mechanism of aggregates in easily eroded soils derived from purple rock in the south of Zhejiang province. *Chinese Journal of Soil Science* , 2010 , (2) : 429-433.
- [16] Guo M , Zheng F L , An S S , Liu Y , Wang B , Darboux F . Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability in the Hilly-gully region. *Science of Soil and Water Conservation* , 2010 , 8(2) : 68-73.
- [17] Le Bissonnais Y . Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I . Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* , 1996 , 47(4) : 425-428.
- [18] Le Bissonnais Y , Arrouays D . Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility II . Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* , 1997 , 48(1) : 39-48.

- [19] Laboratory of Soil Physics, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Methods of Soil Physical Measurement. Beijing: Science Press, 1978: 83–85.
- [20] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Science Society America Proceedings, 1994, 14: 20–23.
- [21] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(1): 142–147.
- [22] An S S, Mentler A, Mayer H, Blum W E H. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. Catena, 2010, 81(3): 226–233.
- [23] An S S, Zheng F L, Zhang F, Van Pelt S, Hammer U, Franz M. Soil quality degradation processes along a deforestation chronosequence in the Ziwuling area, China. Catena, 2008, 75(3): 248–256.
- [24] Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil anti-scourability during vegetation succession of Ziwuling secondary forest. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3270–3275.
- [25] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, Zhu J M, Zeng H D, Yang Z J. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 702–708.
- [26] Zha X C, Tang K L. Change about soil erosion and soil properties in reclaimed forestland of Loess hilly region. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(3): 464–469.
- [27] Gao X M, Huang J H, Wan S Q, Chen L Z. Ecological studies on the plant community succession on the abandoned cropland in Taibaishan, Qinling Mountains II. The community α diversity feature of the successional series. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(6): 619–625.
- [28] Wang G L, Liu G B, Liu F, Hou X L, Zhou S L. Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at loess gully region. Acta Ecologica Sinica, 2003, 12(12): 2550–2557.
- [29] Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, Cai X A. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: A research review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 895–904.
- [30] Yang Y H, Liu S Z, Wang C H, Xiao Q H. A study of tensile strength tests of arborous species root system in forest engineering technique of shallow landslide. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 138–140.

参考文献:

- [6] 王佑民, 刘秉正, 廖超英, 高保山. 刺槐林地土壤抗蚀性的研究. 林业实用技术, 1984, 5(5): 9–13.
- [10] 薛莲, 李占斌, 李鹏, 刘国彬, 戴全厚. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤抗蚀性的影响. 农业工程学报, 2009, 25(S1): 69–72.
- [12] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2176–2183.
- [13] 卢升高, 竹蕾, 郑晓萍. 应用 Le Bissonnais 法测定富铁土中团聚体的稳定性及其意义. 水土保持学报, 2004, 18(1): 7–11.
- [14] 郑晓萍, 卢升高. 富铁土团聚体稳定性的表征及其物理学机制. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(3): 305–310.
- [15] 王虹艳, 吴士文, 马海洋, 郭军玲, 卢升高. 浙南易蚀土壤的团聚体稳定性及其稳定机理. 土壤通报, 2010, (2): 429–433.
- [16] 郭曼, 郑粉莉, 安韶山, 刘雨, 王彬, Darboux F. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区土壤团聚体稳定性. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 68–73.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 83–85.
- [24] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. 生态学报, 2006, 26(10): 3270–3274.
- [25] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 朱锦懋, 曾宏达, 杨智杰. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 702–708.
- [26] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵区林地土壤侵蚀与土壤性质变化. 地理学报, 2003, 58(3): 464–469.
- [27] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 陈灵芝. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究 II 演替系列的群落 α 多样性特征. 生态学报, 1997, 17(6): 619–625.
- [28] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 侯喜禄, 周生路. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. 生态学报, 2003, 23(12): 2550–2557.
- [29] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895–904.
- [30] 杨永红, 刘淑珍, 王成华, 肖清华. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究. 水土保持研究, 2007, 14(1): 138–140.