

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

李娅芸¹, 刘 雷¹, 安韶山^{1,2*}, 曾全超^{1,3}, 李 鑫¹

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院、教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 论文通过 Le Bissonnais 法对黄土丘陵区森林、森林草原和草原三种植被区下的土壤团聚体分布特征、稳定性以及土壤可蚀性进行了分析研究。研究结果表明: 1) 在不同植被区表层土壤(0~20 cm)中, 土壤的水稳性团聚体含量($R_{0.2}$)和平均重量直径(MWD)整体上表现为阳坡小于阴坡, 土壤可蚀性因子 K 值则表现为阳坡大于阴坡, 但是阴、阳坡差异均不显著; 2) 表层土壤的 $R_{0.2}$ 、 MWD 均表现为森林区>森林草原区>草原区, 可蚀性因子 K 值则表现为草原区>森林草原区>森林区, 土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力由高到低依次为森林区、森林草原区和草原区; 3) 扰动后湿润处理(WS)和快速湿润处理(FW)下的森林区与草原区土壤的稳定性和可蚀性指标差异显著, FW 处理下二者差异尤为显著, 而森林草原区土壤则居于前面两种土壤之间。总体来说, 在黄土丘陵地带, 植被区从北向南, 由草原区向森林区变化过程中, 土壤团聚体的稳定性和抗侵蚀性在不断提高, 南部森林区的土壤团聚体稳定性比北部草原区更强, 抗侵蚀能力更大。

关键词: 坡向; 植被区; Le Bissonnais 法; 水稳性团聚体; 土壤可蚀性; 黄土丘陵区

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2016)02-0287-12

DOI: 10.11849/zrzyxb.20141207

土壤侵蚀是导致黄土高原土地资源退化乃至破坏的主要原因^[1], 黄土丘陵区由于地理位置特殊, 土壤侵蚀相当严重, 致使该地区生态系统十分脆弱。土壤团聚体作为土壤组成的基本单元, 是土壤养分的储存库^[2-3], 对土壤的许多理化性质有着重要的影响^[4]。而土壤团聚体稳定性与土壤侵蚀密切相关, 是侵蚀的有效指示因子, 可间接量化土壤可蚀性^[5-6]。许多学者把土壤团聚体的水稳性作为评价土壤可蚀性的重要指标, 通过提高土壤水稳性团聚体的数量和质量来提高土壤的抗侵蚀能力^[7-8]。土壤团聚体稳定性和抗蚀性的大小除了与土壤有机质、矿质养分、水分和 pH 值等内在理化性质有关外, 还受植被类型(林草植被具有较高的水土保持功能^[9])、立地条件等外部因素的间接影响^[10]。立地条件中, 由于受其光热条件和水分状况的影响, 不同坡向表现出极大差异^[11-18], 研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对其土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响, 对于认识和提高该地区的土壤

收稿日期: 2014-09-15; 修订日期: 2015-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171226); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2011JM5011); 西北农林科技大学基本业务费专项(Z109021514)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 41171226; Natural Science Basic Research Program of Shaanxi, No. 2011JM5011; Fundamental Research Funds for the Northwest A & F University, No. Z109021514.]

第一作者简介: 李娅芸(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向是植物与土壤的相互作用机制。E-mail: 13689259629@sina.cn

***通信作者简介:** 安韶山(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤生态学及流域生态与管理研究工作。E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

抗侵蚀能力具有重要意义。目前,与黄土丘陵区土壤团聚体稳定性和可蚀性有关的研究已有诸多报道^[19-21],但对不同植被区和坡向条件下土壤团聚体稳定性和可蚀性的报道还比较少。

黄土丘陵区由于地形破碎、沟壑纵横的特征,导致了不同区域具有不同的侵蚀方式、类型、强度和不同的抗侵蚀能力^[18,19-22]。因此,研究不同植被区和坡向土壤团聚体稳定性与可蚀性,对于了解该地区土壤的抗侵蚀能力和土壤的改良作用都具有重要意义。Le Bissonnais (LB)法是一种新的土壤团聚体稳定性测定方法,根据不同团聚体崩解的作用力采用不同的处理,从不同的处理结果可以更加清楚地表现出土壤团聚体的状态和原因,进而了解田间土壤团聚体被破坏的主要机制^[23-24]。其中快速湿润处理(FW)模拟了土壤在快速湿润(暴雨、灌溉等)下的团聚体崩解作用,主要反映团聚体崩解的消散机制;慢速湿润处理(SW)反映了土壤慢速湿润过程中土壤粘粒膨胀引起的团聚体崩解作用;扰动后湿润处理(WS)应用乙醇湿润团聚体,主要反映了团聚体在机械扰动下的崩解作用。本文选择黄土丘陵区延河流域作为研究区域,针对森林、森林草原和草原植被区,利用LB法对土壤团聚体进行分级,计算土壤团聚体稳定性和可蚀性指标(土壤的水稳性团聚体含量 $R_{0.2}$ 、平均重量直径MWD、土壤可蚀性因子K值),对不同植被区土壤团聚体稳定性和可蚀性进行评价;并对不同坡向土壤团聚体稳定性进行分析,探讨坡向立地因子对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响。以期为研究植被恢复改善土壤团聚体结构、提高土壤抗侵蚀能力提供新的佐证,也为该地区黄土高原植被恢复与重建、生态效益评价和土壤质量评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安塞县地处西北内陆黄土高原腹地、鄂尔多斯盆地边缘,地理位置为 $108^{\circ}51'44'' \sim 109^{\circ}26'18''E$, $36^{\circ}30'45'' \sim 37^{\circ}19'31''N$,南北长92 km,东西宽36 km,东临子长县和宝塔区,西与志丹县交界,南与甘泉县接壤,北与靖边县毗邻。安塞县属典型的大陆性半干旱季风气候,夏秋多雨,冬季干寒。年日照时数2 415.5 h,辐射总量480.06 kJ/cm²,无霜期160~180 d,平均气温8.8℃,≥10℃活动积温3 177.4℃,多年平均降水量505.3 mm,年蒸发量1 645.4 mm。县内最高海拔高程为1 731.1 m(镰刀湾乡高岭山),最低海拔高程为1 012 m(沿河湾镇罗家沟),平均海拔高程为1 371.9 m。地势除王家湾乡南高北低外,其他地区多由西北、西南向中部及东南倾斜。该地区地形地貌复杂多样,属于典型的梁峁状丘陵沟壑区,土壤侵蚀作用十分强烈。全县总土地面积2 949.1 km²,水土流失面积2 320.2 km²,占总土地面积的78.7%,是黄河中游水土流失重点县之一,也是西北地区典型的生态环境脆弱区。土壤类型以黄绵土为主,约占总面积的95%,在黄土母质上发育的黄绵土,土壤瘠薄,保水保肥和抗侵蚀性差,有机质含量低,其有机质含量一般不足1%。

本研究采样地点均属于延河流域安塞县境内。其中,洞子沟流域位于延河流域一级支流西川流域($36^{\circ}31'13'' \sim 36^{\circ}35'26''N$, $109^{\circ}7'34'' \sim 109^{\circ}10'34''E$),属森林区,海拔1 166~1 490 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、典型黑垆土和冲积土,土地利用以林地为主;高家沟流域位于延河上游干流($37^{\circ}12'31'' \sim 37^{\circ}16'36''N$, $108^{\circ}58'5'' \sim 109^{\circ}2'52''E$),属草原区,海拔1 245~1 634 m,流域总面积

27.31 km², 土壤类型以黄绵土为主, 间有少量典型黑垆土, 土地利用以草地和耕地为主; 小河流域位于延河流域上游干流 (36°59'33" ~ 37°2'40"N, 109°11'58" ~ 109°14'39"E), 属森林草原区, 海拔1 118 ~ 1 505 m, 流域总面积10.77 km², 土壤类型以黄绵土为主, 间有少量典型黑垆土、冲积土, 土地利用以草地和耕地为主, 兼有零星林地。

1.2 样品采集与试验方法

2011年7月, 通过对研究区域的植被区和地形条件进行详细的调查, 按照不同坡向和植被区选取了23个代表性样地, 样地基本状况见表1。各样地内选取3个10 m×10 m的采样单元, 保持每个单元坡度坡向一致, 分别用铝盒采集0~10 cm以及10~20 cm原状土样, 将其自然风干, 并用手将大块沿纹理轻轻地掰成小块, 去除杂物, 干筛法获得3~5 mm的土壤团聚体。并用常用方法测定样地基本理化性质, 详细情况见表2。根据LB法的3种处理方法^[23-24]即快速湿润法(FW)、慢速湿润法(SW)和扰动湿润处理(WS)对3~5 mm的土壤团聚体分析。

LB法具体测定步骤如下: 取3~5 mm干筛团聚体于40 °C烘箱内烘24 h, 使团聚体土壤含水量一致后进行以下3种处理: 1) FW, 取5 g团聚体快速浸没在去离子水中, 10 min后用移液管吸掉水分; 2) SW, 取5 g团聚体置于张力为-0.3 kPa滤纸上, 静置30~40 min使团聚体完全湿润; 3) WS, 取5 g团聚体浸没在酒精中以排出空气, 浸泡10 min后用移液管吸掉酒精, 将土壤转入盛有50 mL去离子水的500 mL三角瓶中, 加水至200 mL, 加塞后上下振荡20次, 静置30 min使粗分散体沉淀, 然后用吸管吸去多余水分。将已作湿润处理的土壤转移到浸没在95%浓度酒精中的0.05 mm孔径筛子上, 上下振荡20次(幅度2 cm); 然后在40 °C烘箱中蒸干酒精, 转入烧杯中, 40 °C下烘干48 h, 称重。再过2、1、0.5、0.2、0.1和0.05 mm套筛, 称重得到每个级别的破碎团聚体。试验过程中每个样品每种处理重复测试3次。

1.3 计算方法

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^[25-26]如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

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

其中: $GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right)$; \bar{x}_i 为*i*粒级团聚体的平均直径(mm); w_i 为*i*粒级下的

团聚体质量百分含数。

1.4 数据处理与分析方法

用Excel 2013和SPSS 20.0统计分析软件对试验数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体粒径与R0.2分布特征

黄土丘陵区3种植被区下干筛的3~5 mm土壤团聚体在LB法不同湿润处理下形成的

表1 样地基本状况

Table 1 Basic situation of samples

植被类型	编号	海拔/m	坡向	经度(E)	纬度(N)	坡位	坡度/(°)	主要植物
草原	1	1 337	阴	108.987 8°	37.217 5°	沟谷	13	硬质早熟禾、铁杆蒿、达乌里胡 枝子、芨芨
	2	1 312	阴	108.592 4°	37.135 3°	沟谷	40	铁杆蒿、达乌里胡枝子、芨芨
	3	1 345	阴	108.990 5°	37.231 3°	梁峁坡	36	铁杆蒿、百里香、野菊花、沙棘
	4	1 285	阴	108.989 7°	37.232 4°	梁峁坡	39	铁杆蒿、芨芨、大针茅、达乌里 胡枝子
	5	1 379	阳	108.985 4°	37.211 6°	梁峁坡	38	芨芨、达乌里胡枝子、长芒草、 铁杆蒿
	6	1 321	阳	108.989 9°	37.231 9°	梁峁坡	42	铁杆蒿、芨芨、冷蒿、达乌里胡 枝子
	7	1 270	阳	108.987 9°	37.232 0°	沟谷	43	芨芨、达乌里胡枝子、铁杆蒿、 狼牙刺、杠柳
森林草原	8	1 309	阴	109.210 2°	37.016 8°	梁峁坡	37	芨芨、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花、 大针茅、沙棘
	9	1 312	阴	109.222 7°	37.017 5°	梁峁坡	38	铁杆蒿、百里香、芨芨、长芒草
	10	1 315	阴	109.222 9°	37.017 7°	沟谷	27	铁杆蒿、芨芨、大针茅、长芒 草、百里香
	11	1 315	阴	109.226 4°	37.017 2°	梁峁坡	27	大针茅、铁杆蒿、达乌里胡枝 子、长芒草
	12	1 345	阳	109.210 4°	37.015 9°	梁峁坡	30	白羊草、铁杆蒿、达乌里胡枝 子、芨芨
	13	1 265	阳	109.212 0°	37.013 9°	沟谷	45	白羊草、铁杆蒿、芨芨、达乌里 胡枝子、长芒草、灌木铁线莲
	14	1 307	阳	109.221 7°	37.016 6°	沟谷	31	白羊草、芨芨、铁杆蒿、长芒 草、杠柳
	15	1 338	阳	109.221 8°	37.016 9°	梁峁坡	35	白羊草、铁杆蒿、芨芨、达乌里 胡枝子
	16	1 307	阳	109.226 7°	37.018 2°	沟谷	21	白羊草、达乌里胡枝子、铁杆 蒿、芨芨、长芒草
	17	1 349	阳	109.226 9°	37.018 4°	梁峁坡	39	白羊草、达乌里胡枝子、铁杆 蒿、芨芨
森林	18	1 259	阴	109.174 2°	36.555 0°	沟谷	28	辽东栎、茶条槭+中华绣线菊、六 道木+披针苔草、多花胡枝子
	19	1 348	阴	109.158 3°	36.581 7°	梁峁坡	25	铁杆蒿、芨芨、达乌里胡枝子、 披针苔草
	20	1 334	阴	109.153 3°	36.575 4°	梁峁坡	21	三角槭+黄刺玫
	21	1 346	阳	109.166 1°	36.574 3°	梁峁坡	27	狼牙刺、灌木铁线莲+白羊草、铁 杆蒿、达乌里胡枝子、长芒草
	22	1 301	阳	109.163 2°	36.556 5°	沟谷	30	侧柏+六道木、丁香+披针苔草
	23	1 351	阳	109.158 2°	36.581 9°	峁顶	26	铁杆蒿、猪毛蒿

注：表中阳坡为南坡，阴坡为北坡，坡度的测量采用多功能坡度尺。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)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)；草本：披针苔草 (*Carex lanceolata* Boott)、多花胡枝子 (*Lespedeza floribunda* Bunge)、披针苔草 (*Carex lanceolata* Boott)、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)、芨芨 (*Artemisia giraldii* Pamp)、百里香 (*Thymus mongolicus*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus hispidus*)、硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes*)、大针茅 (*Stipa grandis*)。

表2 样地表层土壤(0~20 cm)基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of sample soil (0~20 cm)

植被类型	土样编号	坡向	pH值	有机碳/(g/kg)	有机质/(g/kg)	总氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	全钾/(g/kg)	C/N
草原	1	阴	8.88	4.83	6.40	0.37	0.54	17.43	10.15
	2	阴	8.81	6.45	11.12	0.63	0.64	19.72	10.20
	3	阴	8.87	5.49	7.10	0.44	0.60	19.47	9.36
	4	阴	8.78	5.77	12.77	0.82	0.55	19.19	9.01
	5	阳	8.96	3.27	5.64	0.36	0.53	18.26	9.83
	6	阳	9.00	2.71	4.94	0.36	0.59	18.98	7.96
	7	阳	9.22	3.67	3.73	0.25	0.55	19.66	8.53
森林草原	8	阴	8.89	5.40	9.31	0.65	0.59	18.97	8.30
	9	阴	8.91	5.77	9.22	0.66	0.61	19.19	9.70
	10	阴	8.94	4.95	9.45	0.53	0.60	19.12	10.29
	11	阴	9.02	4.09	7.04	0.33	0.59	19.87	13.01
	12	阳	9.09	4.43	4.59	0.28	0.58	20.93	9.89
	13	阳	8.91	6.18	13.29	0.81	0.58	19.39	9.52
	14	阳	9.11	3.12	5.37	0.34	0.55	18.94	9.48
	15	阳	8.98	4.17	5.86	0.34	0.54	19.36	10.48
	16	阳	9.01	5.14	7.53	0.55	0.56	19.77	8.23
	17	阳	8.97	6.41	11.05	0.60	0.56	20.28	11.23
森林	18	阴	8.34	32.36	53.94	2.56	0.71	20.38	12.02
	19	阴	8.46	19.82	42.71	2.19	0.72	19.31	11.04
	20	阴	8.72	7.61	13.12	0.71	0.60	18.63	10.75
	21	阳	8.52	18.78	42.61	2.07	0.68	18.53	12.08
	22	阳	8.85	5.57	9.77	0.52	0.61	18.67	11.64
	23	阳	8.77	5.19	8.95	0.36	0.58	18.27	14.39

注: 表层土壤(0~20 cm)的各种属性值为0~10 cm及10~20 cm两层的算术平均值。

团聚体各粒级质量分数分布特征见图1。SW处理下,表层土壤(0~20 cm)阴、阳坡向的土壤团聚体各粒级变化规律都相似,均以2~5 mm团聚体为主,部分处理2~5 mm团聚体含量超过90%;FW处理下各粒径团聚体颗粒分布较均匀,但是森林区土壤主要以>0.2 mm粒径团聚体为主,森林草原区和草原区则是以<0.2 mm粒径团聚体为主;WS处理与FW处理相似,但是>0.2 mm粒径团聚体数量较之FW处理均有不同程度的下降。

土壤中>0.25 mm粒径团聚体称为水稳性团聚体,本文根据实际情况(套筛孔径只有0.2 mm,没有0.25 mm孔径)将>0.2 mm粒径团聚体含量($R_{0.2}$)当作水稳性团聚体含量进行分析,土壤团聚体 $R_{0.2}$ 分布特征见图2。从图2(b)中可以看出,除了森林、森林草原区10~20 cm土层SW处理和草原0~10 cm土层SW、WS处理表现为阳坡大于阴坡外,其余处理的 $R_{0.2}$ 均表现为阳坡小于阴坡,但是方差分析结果显示阴、阳坡 $R_{0.2}$ 的差异均不显著。

对于不同植被区,阴阳坡表层土壤 $R_{0.2}$ 均表现为森林>森林草原>草原[图2(a)]。在0~10 cm土层,SW处理下3种植被区之间 $R_{0.2}$ 的差异不显著;WS处理森林与森林草原、草原的差异显著($P<0.05$),但森林草原与草原的差异不显著;FW处理下森林与草

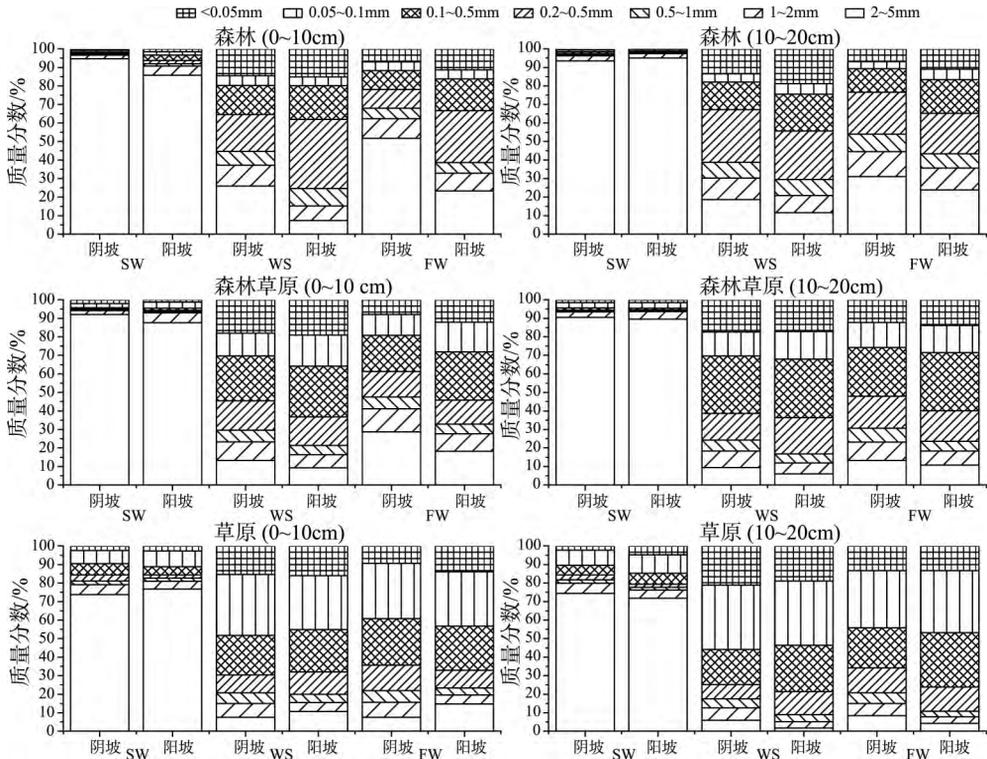


图1 3种植被区LB法3种处理下的土壤团聚体粒级分布

Fig. 1 Grain-size distribution of stable soil aggregates in three vegetation zones by three treatments of Le Bissonnais method

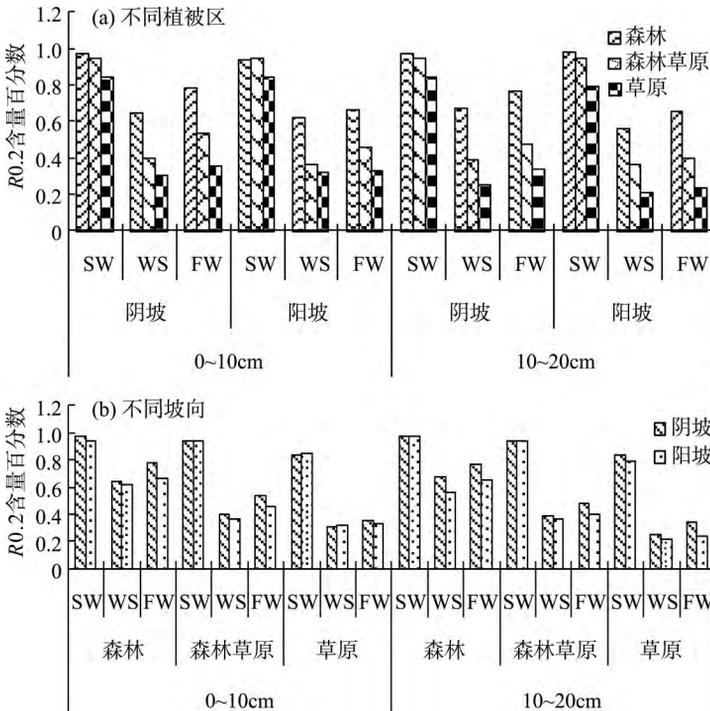


图2 土壤团聚体R0.2分布特征

Fig. 2 R0.2 distribution characteristics of soil aggregate

原的差异显著 ($P<0.05$)，森林草原与森林、草原差异均不显著。在10~20 cm土层，阴坡土壤的R0.2草原与森林、森林草原差异显著 ($P<0.05$)，但森林与森林草原差异不显著；阳坡土壤的R0.2森林与草原差异显著 ($P<0.05$)，但森林草原与森林、草原差异均不显著。

2.2 土壤团聚体平均重量直径(MWD)分布特征

不同坡向和植被区土壤团聚体平均重量直径(MWD)分布特征见图3。从图3(d)中可以看出，除了森林区10~20 cm土层的SW处理、森林草原区10~20 cm土层的WS处理和草原区

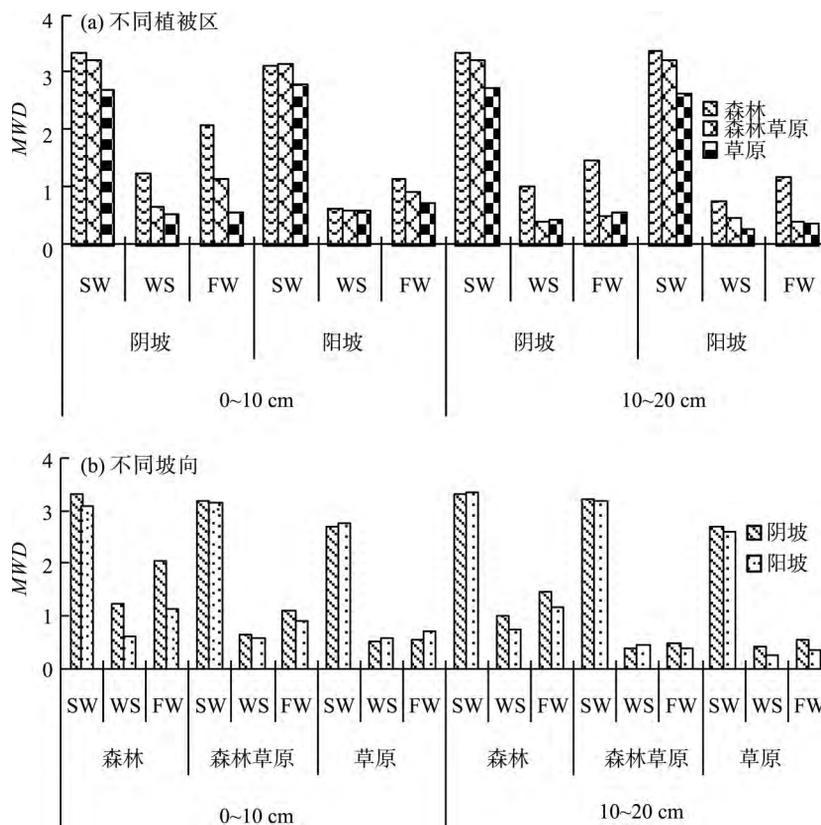


图3 土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 分布特征
Fig. 3 MWD distribution characteristics of soil aggregate

0~10 cm 土层的3种处理的土壤团聚体 MWD 表现为阳坡大于阴坡外, 其余处理的土壤团聚体 MWD 均表现为阳坡小于阴坡, 阴、阳坡差异不显著。

对于不同植被区, 阴阳坡表层土壤的 MWD 均表现为森林>森林草原>草原 [图3(a)]。在0~10 cm 土层, 除了FW处理的阴坡外, 其余处理3种植被区之间的差异不显著; FW处理阴坡森林与森林草原、草原的差异均显著 ($P<0.05$), 但森林草原与草原的差异不显著。在10~20 cm 土层, SW处理森林与草原差异显著 ($P<0.05$), 但森林草原与森林、草原差异均不显著; WS处理阴阳坡和FW处理阳坡土壤的 MWD 值均表现为森林土壤最大, 且森林与草原土壤的 MWD 差异显著 ($P<0.05$); FW处理阴坡土壤的 MWD 森林与森林草原、草原之间差异都显著 ($P<0.05$), 而森林草原与草原之间的差异却不显著。

2.3 土壤可蚀性因子 K 值比较

土壤可蚀性 K 值是土壤抵抗水蚀能力大小的一个相对综合指标, K 值越大, 土壤抗侵蚀能力越弱, 相反, K 值越小, 土壤抗侵蚀能力越强。本试验土壤团聚体的 K 值分布特征见图4。从图4(b)中可以看出, 除了森林区10~20 cm 土层SW处理和草原区0~10 cm 土层的 K 值表现为阳坡小于阴坡外, 其余所有处理的土壤团聚体 K 值均表现为阳坡大于阴坡, 方差分析显示阴、阳坡之间的 K 值差异均不显著。

对于不同植被区, 阴阳坡表层土壤 K 值均表现为草原>森林草原>森林 [图4(a)]。在0~10 cm 土层, SW处理阴阳坡、WS处理阳坡和FW处理阳坡3种植被区之间的 K 值差

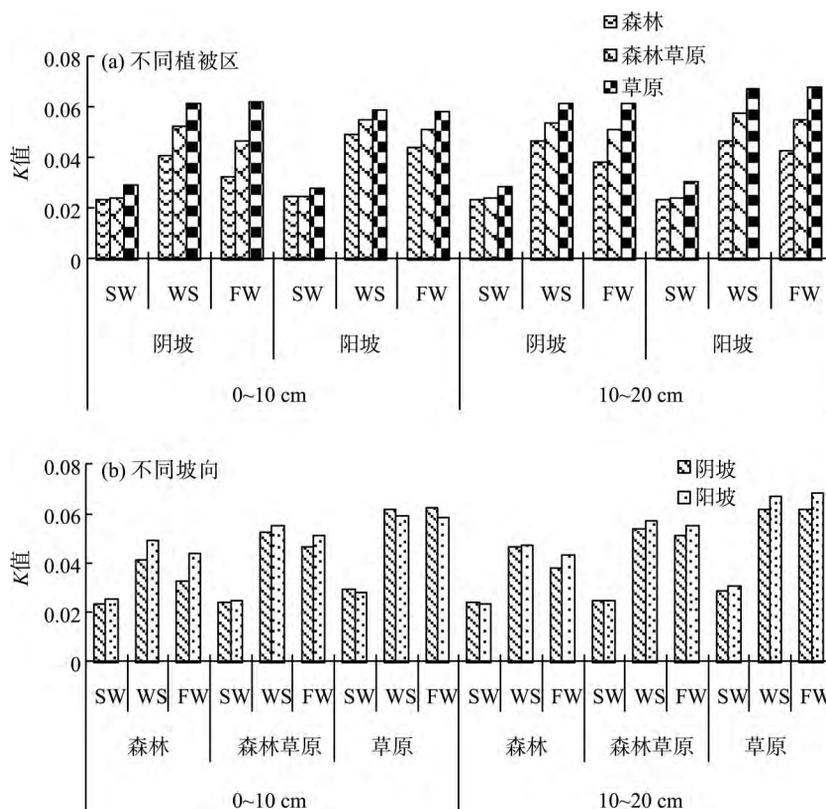


图4 土壤可蚀性因子K值分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of soil erodibility values

异均不显著；WS处理阴坡土壤森林与草原之间的差异显著 ($P < 0.05$)，森林草原与森林、草原的差异均不显著；FW处理阴坡土壤草原与森林区、森林草原之间的差异均显著 ($P < 0.05$)，森林草原与森林的差异不显著。在10~20 cm土层，SW处理阳坡土壤K值3种植被区差异不显著，阴坡土壤森林与草原之间的差异显著 ($P < 0.05$)，森林草原与森林、草原的差异均不显著；WS与FW处理阴阳坡土壤K值森林与草原之间差异显著 ($P < 0.05$)，森林草原与森林、草原的差异均不显著。

3 讨论

3.1 不同坡向土壤R0.2、MWD和可蚀性K值变化

在森林、森林草原和草原3种植被区0~20 cm土层，LB法处理下的土壤水稳性团聚体含量R0.2大致表现为阳坡小于阴坡，这可能与阳坡土壤有机碳密度、含水量和含磷量低于阴坡土壤有关^[17-18]。因为土壤粘粒、有机质、菌丝等物质通常是土壤团聚体形成的主要胶结物质，凡是能够影响土壤有机质和粘粒含量的措施都会影响土壤团聚体含量及其组成和稳定性，特别是土壤大团聚体的形成。而阳坡土壤受光照时间长，强度大，土壤水分蒸发强烈，土壤肥力低，植被蒸腾量大，导致阳坡的有机碳、含水量和矿物质养分等都小于阴坡^[11-12]。

除了森林区10~20 cm土层的SW处理和草原区0~10 cm土层外，其余处理的土壤

团聚体 MWD 均表现为阳坡小于阴坡, 而土壤 K 值则表现为阳坡大于阴坡。这说明在研究区域内, 大部分土壤受到消散作用、机械扰动和土壤慢速湿润的粘粒膨胀崩解作用等外部作用时, 阳坡土壤团聚体的稳定性和抗侵蚀能力整体上小于阴坡土壤, 这与土壤团聚体 $R0.2$ 含量的表现基本一致。有机碳含量越高, 土壤团聚体水稳性程度也越好, 土壤抗侵蚀能力越强, 一些研究也都得到了阳坡有机质小于阴坡的结果^[14-15,17-18]。虽然本研究样地的阳坡土壤有机质也显著小于阴坡土壤, 但是水稳性团聚体 ($R0.2$)、平均重量直径 (MWD) 和土壤可蚀性因子 (K 值) 在阴阳坡上所表现的差异均不显著, 这可能也说明该地区的土壤团聚体的稳定性除了受到土壤有机质的影响外, 还受到其他因素的制约。

3.2 不同植被区土壤 $R0.2$ 、 MWD 和可蚀性 K 值变化

对于不同植被区, LB法3种处理下整个表层土壤阴阳坡的 $R0.2$ 、 MWD 值均表现为森林>森林草原>草原, K 值则表现为草原>森林草原>森林, 说明在各种外部因素影响下, 森林土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力在3种植被区中最高, 森林草原植被区次之, 草原植被区最低, 这与以往一些关于黄土丘陵区土壤团聚体研究结果类似^[19-20,22]。不同植被会对土壤性质产生影响, 植被对土壤的影响一般表现在植物根系对土壤的挤压、穿插、分割以及死亡根系和枯枝落叶产生的有机质及根际分泌物等方面。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影响^[27-28], 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, 有机质含量越高, 土壤团聚体水稳性程度也越好^[28]。

由于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^[19-20], 那么研究 WS 和 FW 处理下各种植被区土壤团聚体稳定性及可蚀性指标, 对于该地区防治土壤侵蚀具有重大意义。在研究中, 除了少数处理外, 基本上所有的 WS 和 FW 处理的森林与草原土壤的稳定性及可蚀性指标差异都显著, FW 处理下差异尤为显著, 森林草原土壤团聚体稳定性和可蚀性则居于前面两种土壤之间。这可能是森林植被覆盖度大, 一定程度上减缓雨水对土壤的击打, 再加上森林枯枝落叶等凋落物使土壤有机质含量高, 使土壤团聚体稳定性得以提高, 土壤抗侵蚀能力增强。

4 结论

本文应用LB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, 结果表明: 1) 在表层土壤 (0~20 cm) 中, $R0.2$ 和 MWD 整体表现为阳坡小于阴坡, K 值表现为阳坡大于阴坡, 阴坡土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力高于阳坡; 2) 对于不同植被区, 表层土壤的 $R0.2$ 、 MWD 均表现为森林>森林草原>草原, K 值则表现为草原>森林草原>森林, 森林土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力最高, 草原最低, 森林草原则介于二者之间; 3) WS 和 FW 处理下的土壤团聚体的稳定性和可蚀性指标 ($R0.2$ 、 MWD 、 K 值) 整体表现为森林与草原差异都显著, 而森林草原土壤的各项指标均居于森林区和草原区土壤之间, 草原区土壤对大雨、暴雨和机械扰动等作用的敏感程度远远高于森林土壤, 在该研究区的草原区土壤更易发生土壤侵蚀, 这可能与草原植被覆盖度低有关。因此, 为了提高黄土丘陵区土壤团聚体的稳定性, 在防治土壤侵蚀的过程中, 不仅要充分考虑该地区不同坡向所固有的差异外, 还必须增加研究区的植被覆盖度, 减少人为干扰, 切实提高土壤抗侵蚀能力。

参考文献(References):

- [1] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用 [J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345-350. [LIU B Y, ZHANG K L, JIAO J Y. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model. Journal of Natural Resources, 1999, 14(4): 345-350.]
- [2] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 66-70. [AN S S, ZHANG Y, ZHENG F L. Fractal dimension of the soil aggregate and its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of Loess Plateau. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2): 66-70.]
- [3] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [4] OADES J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for managements [J]. Plant and Soil, 1984, 76: 319-337.
- [5] BERNARD B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels [J]. Catena, 2002, 47: 133-149.
- [6] 郭伟, 史志华. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响 [J]. 生态学报, 2007(6): 2516-2522. [GUO W, SHI Z H. Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hillslope in red soils. Acta Ecologica Sinica, 2007(6): 2516-2522.]
- [7] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49. [WU Y, LIU S Q, FU X Q, et al. Study on improving soil's water stable aggregates amounts by botanic roots. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(1): 45-49.]
- [8] 马祥华, 焦菊英, 温仲明, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 17-21. [MA X H, JIAO J Y, WEN Z M, et al. The changes of soil physical properties in abandoned lands during vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 17-21.]
- [9] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-375. [SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 365-375.]
- [10] COTLER H, ORTEGA-LARROCEA M P. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamla watershed Mexico [J]. Catena, 2006, 65(2): 107-117.
- [11] 林超, 李昌文. 阴阳坡在山地地理研究中的意义 [J]. 地理学报, 1985(1): 20-28. [LIN C, LI C W. The significance of aspect in mountain geography. Acta Geographica Sinica, 1985(1): 20-28.]
- [12] 李孝地. 黄土高原不同坡向土壤侵蚀分析 [J]. 中国水土保持, 1988(8): 52-54. [LI X D. Analysis of different aspect of soil erosion in Loess Plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 1988(8): 52-54.]
- [13] 马娟霞, 肖玲, 关帅朋, 等. 黄土高原刺槐林地土壤水分与立地因子关系研究 [J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1311-1315. [MA J X, XIAO L, GUAN S P, et al. Study on the relationship between the soil moisture and the site factors of *Robinia pseudoacacia* plantation forestland in Loess Plateau. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1311-1315.]
- [14] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 259-265. [LIU M X, WANG G. Responses of plant community diversity and soil factors to slope aspect in alpine meadow. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(2): 259-265.]
- [15] 秦松, 樊燕, 刘洪斌, 等. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 47-52. [QIN S, FAN Y, LIU H B, et al. Study on the relations between topographical factors and the spatial distributions of soil nutrients. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 47-52.]
- [16] 葛翠萍, 赵军, 王秀峰, 等. 东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 17-19. [GE C P, ZHAO J, WANG X F, et al. Influence of topographic factors on soil water and bulk density in a typical slope land in the black soil area of Northeast China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 17-19.]
- [17] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 赤峰市小流域地形因子对土壤有机碳密度的影响 [J]. 中国水土保持, 2014(3): 43-46. [LI L, YAO Y F, QIN F C, et al. Study on spatial variations of soil organic carbon in small watershed—Taking Huanghuadianzi Watershed as an example. Soil and Water Conservation in China, 2014(3): 43-46.]
- [18] 刘旻霞, 马建祖. 阴阳坡植物功能性状与环境因子的变化特征 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 102-106. [LIU M X,

- MA J Z. Feature variations of plant functional traits and environmental factor in south-and north-facing slope. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 102-106.]
- [19] 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. [LIU L, AN S S, HUANG H W. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetation on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6670-6680.]
- [20] 董莉丽, 郑粉莉, 秦瑞杰. 基于LB法不同植被类型下土壤团聚体水稳性研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 191-196. [DONG L L, ZHENG F L, QIN R J. Study on effects of different vegetation types on soil aggregate water stability based on LB method. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 191-196.]
- [21] AN S S, DARBOUX F, CHENG M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China) [J]. *Geoderma*, 2013, 209: 75-85.
- [22] 寇萌, 焦菊英, 杜华栋, 等. 黄土丘陵沟壑区不同立地条件草本群落物种多样性与生物量研究 [J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(1): 12-18. [KOU M, JIAO J Y, DU H D, et al. Species diversity and biomass of herbosa at different site conditions in the hilly-gullied Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(1): 12-18.]
- [23] 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 [J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(1): 39-48.
- [24] LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425-437.
- [25] VAN BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14(C): 20-23.
- [26] SHIRAZI M A, BOERSMA L. A unifying quantitative analysis of soil texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(1): 142-147.
- [27] AN S S, MENTLER A, MAYER H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2010, 81(3): 226-233.
- [28] AN S S, ZHENG F L, ZHANG F, et al. Soil quality degradation processes along a deforestation chronosequence in the Ziwuling area, China [J]. *Catena*, 2008, 75(3): 248-256.
- [29] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 702-709. [XIE J S, YANG Y S, CHEN G S, et al. 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): 702-709.]

Research on the Effect of Vegetation and Slope Aspect on the Stability and Erodibility of Soil Aggregate in Loess Hilly Region Based on Le Bissonnais Method

LI Ya-yun¹, LIU Lei¹, AN Shao-shan^{1,2}, ZENG Quan-chao^{1,3}, LI Xin³

(1. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS, Yangling 712100, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this article, the distribution characteristics, stability and erodibility of soil aggregate in three zones of forest, forest-steppe and steppe on the Loess Plateau are studied with the Le Bissonnais (LB) method. The effect of vegetation and slope aspect on the characteristics and erodibility of soil aggregate is also discussed. The results show that: 1) for the surface soil (0–20 cm) in different vegetation zones, both the content of soil aggregate ($R_{0.2}$) and the mean weight diameter (MWD) are less on sunny slopes than on shady slopes, while the soil erodibility factor K is a little bigger on sunny slopes than on shady slopes with no significance. This implies that both the stability and erodibility of soil aggregate are slightly higher on the shady slope than on the sunny slope in the three vegetation zones in hilly loess region, but the differences are not significant. 2) In the surface layer (0–20 cm) under different vegetation, $R_{0.2}$ and MWD decrease as follows: forest > forest steppe > steppe, while soil erodibility factor K decreases in the following order: steppe > forest-steppe > forest. This suggests that the stability and anti-erosion ability of soil aggregate in the forest vegetation zone is the highest. 3) Under processes of WS (wet-stirring sieving method) and FW (fast-wetting sieving method), there are significant difference between samples in forest zone and in steppe zone in both the soil stability and the soil erodibility ($R_{0.2}$, MWD , K value), especially under the process of FW. The stability and erodibility of soil in forest-steppe zone are in between. A conclusion can be drawn that in the hilly loess zone, the stability and the anti-erosion ability of soil aggregate is ever increasing from north to south. The stability and the anti-erosion ability of soil aggregate is significantly higher in the southern forest zone than in the northern steppe zone.

Key words: aspect; vegetation zone; Le Bissonnais method; water stable aggregate; soil erodibility; Loess Plateau