

DOI: 10.5846/stxb201905130972

高冉, 赵勇钢, 刘小芳, 栗文玉, 杜雨佳, 张星星. 黄土丘陵区人工柠条种植年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2020, 40(9): 2964-2974.

Gao R, Zhao Y G, Liu X F, Li W Y, Du Y J, Zhang X X. Effects of stand age and slope position of *Caragana korshinskii* plantations on soil aggregate stability in the loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2964-2974.

黄土丘陵区人工柠条种植年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响

高 冉, 赵勇钢*, 刘小芳, 栗文玉, 杜雨佳, 张星星

山西师范大学生命科学学院, 临汾 041000

摘要: 柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.) 种植是黄土高原地区生态环境建设中重要的人工植被恢复措施。选择黄土丘陵区条带种植 15、25 和 35 年的柠条坡地, 以荒草坡地为对照, 运用 Le Bissonnais 法分析柠条种植不同年限和坡位对 0—40 cm 土层团聚体分布及其稳定性的影响。结果表明: 长时间柠条种植对土壤团聚体稳定性的影响主要在 0—20 cm 土层; 不同处理下土壤大团聚体 (>0.25 mm) 含量总体表现为柠条 35 年 > 柠条 25 年 > 柠条 15 年 > 荒草地, 表明柠条种植年限增加促进了大团聚体的形成。从坡面尺度看, 柠条平均重量直径整体表现为坡下 > 坡上 > 坡中; 在上坡的柠条 35 年样地具有最大值 (3.08 mm), 但在下坡荒草地显著高于柠条林地 ($P < 0.05$)。基于相对消散指数和相对机械破碎指数, 上中坡土壤团聚体均对消散作用和机械破碎作用较敏感, 而下坡的下层土壤团聚体对破碎作用更敏感。冗余分析表明, 土壤有机碳和粘粒含量与柠条平均重量直径呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。种植年限是影响土壤团聚体稳定性的主要因素, 解释了 30.4% 的变异; 其次是土层 (2.75%) 和坡位 (0.61%)。总体而言, 柠条种植年限增加有利于促进黄土丘陵区土壤团聚体稳定性提升, 但这种影响在不同坡位具有差异: 在上中坡团聚体稳定性均随种植年限增加而增强, 在下坡则先降后增。

关键词: 团聚体稳定性; 种植年限; 坡位; Le Bissonnais 法; 柠条

Effects of stand age and slope position of *Caragana korshinskii* plantations on soil aggregate stability in the loess hilly region

GAO Ran, ZHAO Yonggang*, LIU Xiaofang, LI Wenyu, DU Yujia, ZHANG Xingxing

College of Biology Science, Shanxi normal university, Linfen 041000, China

Abstract: Planting shrubs such as *Caragana korshinskii* Kom. is one of the main components of the ecological rehabilitation project implemented on the Loess Plateau of China. However, the effects of *C. korshinskii* plantations on soil aggregate stability in the loess hilly region remain unclear. The objectives of the present study were to investigate the distribution and stability of soil aggregates in *C. korshinskii* stands of different ages (15, 25, and 35 years of strip planting) in the loess hilly region, with natural grassland as the control (> 40 years). Soil samples were collected from four depths (0—10, 10—20, 20—30, and 30—40 cm) at three slope positions (upper, middle, and lower). Soil aggregate stability was determined using the Le Bissonnais method. The results showed that long-term planting of *C. korshinskii* mainly affected soil aggregate stability at the shallower depths (0—20 cm). In all cases, the proportion of soil macro-aggregates (> 0.25 mm) increased with increasing stand age, indicating that older stands better facilitated the formation of soil macro-aggregates. Mean weight diameter (MWD) of soil aggregates at different slope positions followed the order: lower slope > upper slope > middle slope. On the upper slope, the highest MWD was found in 35-year stands (3.08 mm), whereas on the lower slope, the MWD in 35-year stands was significantly lower than that of the control ($P < 0.05$). Based on the relative slaking index and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401242); 山西省自然科学基金项目 (201601D021103)

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2019-10-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoyg@sxnu.edu.cn

relative mechanical breakdown index, soil aggregates were sensitive to both slaking and mechanical breakdown on the middle and upper slopes, whereas soil aggregates at the deeper depths (20—40 cm) were more sensitive to mechanical breakdown on the lower slope. Redundancy analysis indicated that MWD was significantly correlated with soil organic carbon and clay contents ($P < 0.05$). Soil aggregate stability was primarily affected by stand age, which explained 30.4% of the observed variation; soil depth and slope position were less influential, accounting for 2.75% and 0.61% of the variation, respectively. In conclusion, soil aggregate stability improved with increasing stand age of *C. korshinskii* in the loess hilly region; however, this effect varied with slope position. On the upper and middle slopes, soil aggregate stability increased with increasing stand age, whereas on the lower slope it first decreased and then increased.

Key Words: soil aggregate stability; stand age; slope position; Le Bissonnais method; *Caragana korshinskii*

植被恢复是干旱半干旱地区生态环境建设的重要措施。自 20 世纪 90 年代黄土高原地区实施的退耕还林(草)工程,显著增加了植被覆盖率,促进了土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)积累,是控制区域水土流失和提升土壤质量的重要举措^[1]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性与土壤抗侵蚀、固碳效应、水文过程和土壤肥力等土壤功能的表达密切相关^[2]。土壤团聚体稳定性除了与土壤母质、有机碳含量、微生物多样性等内在理化性质有关外,还受植被类型、恢复年限、立地条件等外在因素的影响^[3-6]。许多研究已表明,由于植被恢复类型的不同,致使植物地上和地下生物量以及凋落物输入及根系结构的差异,影响其土壤团聚体的形成过程和稳定性^[7]。刘梦云等^[8]研究表明,黄土台塬区灌木林地的土壤团聚体稳定性显著高于恢复草地或耕地。An 等^[9]发现植被恢复显著提高 >0.25 mm 团聚体含量,且草地恢复 7 年后、人工造林实施 3 年后,团聚体稳定性将维持在较高的稳定状态。程曼等^[10]对宁南山区不同植被恢复措施和年限下土壤团聚体稳定性研究发现土壤团聚体稳定性在天然草地和 25a 柠条相对较大,15a 柠条次之,坡耕地最小。这些研究表明了随着植被恢复进程延续,土壤团聚体稳定性也会随之改变。由于土壤团聚体形成及其稳定性具有较大的复杂性,其在不同植被恢复方式及时间演变下的变化规律仍需进一步的研究。

土壤团聚体稳定性也受坡位的影响。在坡面尺度上,土壤团聚体的形成除了受土壤剖面纵向上各种因子的影响外,也受降雨和径流在坡面横向上的影响^[11]。降雨和径流作用下的侵蚀-沉积过程会使土壤颗粒及物质元素沿坡面产生流动和分布,影响坡面土壤生境状况^[12]。如 Gregorich 和 Anderson^[13]发现土壤有机质含量从坡顶到坡脚逐渐增加,土层逐渐增厚。Zou 等^[14]对不同坡位的 6 种灌木林研究发现,大团聚体(>5 mm)和小团聚体(<0.25 mm)受坡位的影响最大,在下坡 >5 mm 占比较大, <0.25 mm 在上坡通常更为普遍。从目前的研究来看,团聚体稳定性除了与植被因素密切相关外,与坡位也有重要关系,其在两者耦合作用下的变化仍有进一步研究的必要^[15]。

柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)是宁、陕、晋、甘等黄土高原地区的主要人工种植灌木树种之一,在水土流失控制和脆弱生态系统功能恢复中发挥了重要作用^[16]。柠条多以条带状种植,并结合如水平阶、水平沟反坡台、鱼鳞坑等微地形改造措施进行,这使得地表起伏发生改变,水分与物质的连通性与分布在坡面具有较大空间差异性^[17],并可能对坡面土壤团聚体稳定性产生重要影响。目前,有关坡面尺度上黄土丘陵区柠条种植年限与坡位对土壤团聚体稳定性影响的研究还较少。此外,土壤团聚体稳定性的测定结果与研究采用的方法有关^[9,18-19]。Le Bissonnais^[20]提出了快速润湿(fast wetting, FW)、慢润湿润(slow wetting, SW)和预湿后扰动(wet stirring, WS)3 种处理的一种方法(简称 LB 法),可以区分消散作用、粘粒膨胀和机械打击对团聚体破坏的不同机制,但应用该方法分析不同坡位土壤团聚体稳定性方面的研究还不多。因此,本研究以宁南黄土丘陵区人工柠条地为对象,运用 LB 法测定不同坡位和种植年限下团聚体稳定性特征,并分析其影响因素,以期揭示黄土高原植被恢复改善土壤结构的作用机制提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市原州区河川乡上黄村的中科院水利部水土保持研究所固原生态试验

站(106°26′—106°30′E, 35°59′—36°03′N), 属半干旱温带季风气候, 年平均气温为 6.9℃, 干燥度 1.55—2.00, 海拔高度 1534—1822 m, 多年平均降水量为 419.1 mm, 降水主要集中在 7—9 月。研究区属黄土高原梁状丘陵区, 土壤类型以黄土母质上发育的黄绵土为主。研究区水土流失严重, 林草覆盖度由初期(1982 年)的 1.9% 上升到“十五”期间的 51.7%, 土壤侵蚀模数也由 6000 t km⁻² a⁻¹ 降到“十五”期间的 1000 t km⁻² a⁻¹ [21]。植被类型为森林草原带向典型草原带过渡的灌丛草原类型。土地利用方式主要由灌木、草地和农田组成。灌木主要是自 1984 年开始分批次种植的柠条。天然草本植物主要有长芒草(*Stipa bungeana*)、大针茅(*Stipa grandis*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、芡蒿(*Artemisia giraldii*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。

1.2 试验设计

选取柠条种植年限分别以 15 年(2004 年种植)、25 年(1994 年种植)、35 年(1984 年种植)为样地, 以相邻的荒草地为对照。荒草地撂荒时间大于 40 年, 主要植被有铁杆蒿、大针茅和长芒草等。各研究样地基本情况见表 1。在坡面从上至下分为上坡、中坡和下坡, 上坡距离垡顶约 20 m, 中坡与上坡和下坡各相距约 30—50 m。在每个坡位沿坡面 10 m 范围内水平设置取样条带, 设置 3 个 10×10 m 的样方, 作为重复, 每个样方间距约 10 m。柠条为条带种植, 种植前有微地形水平阶整地, 种植柠条阶面宽 0.5—1 m, 反坡约 3°—5°, 开挖最大深度为 10—20 cm, 相邻柠条间为 2—3 m 长的荒草地自然坡面。

2018 年 8 月进行采样。每个样方在水平沟内距柠条茎干约 30 cm 处挖 40 cm 深的土壤剖面, 分别采集 0—10、10—20、20—30 cm 和 30—40 cm 共 4 个土层的原状土, 装入塑料盒带回实验室, 去除植物根系等杂质按纹理掰成小块, 风干待测。同时, 采取 3 个样方各土层的混合样, 室内风干后分别过 0.15 mm 和 2 mm 筛, 分别用于 SOC 和机械组成测定分析。

1.3 样品测定

土壤团聚体分布和稳定性根据 LB 法 [20] 进行测定。该方法包括慢速湿润、快速湿润和预湿后扰动 3 种处理。本文在该方法基础上有部分调整: 筛取风干的 3—5 mm 团聚体, 在烘箱中 40℃ 烘干 24 h, 使土壤含水量恒定后分别进行 3 种处理。每种处理有 3 个重复。FW 处理将土样迅速浸入去离子水中, 相反 SW 处理将土样置于加入 95% 乙醇的海绵上进行湿润; WS 处理则是将土样先浸入 95% 乙醇中, 再转到加去离子水的三角瓶中翻转晃动。上述处理之后, 吸去多余水分, 使用乙醇将团聚体洗入预先放在乙醇溶液中的筛子(0.053 mm), 再将筛子上的团聚体洗入小烧杯后烘 48 h。之后, 与 LB 法不同, 本研究过 2、0.25 mm 和 0.053 mm 套筛, 精确称量后, 计算得到 >2 (较大团聚体, larger macro-aggregate)、2—0.25 (较小团聚体, smaller macro-aggregate)、0.25—0.053 mm (微团聚体, micro-aggregate) 和 <0.053 mm (粉粘粒级团聚体) 粒径团聚体质量分数, 并据此进行团聚体稳定性指标计算。土壤团聚体稳定性分析指标选取平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) [22]、相对消散指数 (relative slaking index, RSI) 和相对机械破碎指数 (relative mechanical breakdown index, RMI) [23], 计算公式如下:

$$MWD = \sum_i^n x_i \omega_i / \sum_i^n \omega_i \quad (1)$$

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

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

式中, ω_i 为第 i 级团聚体重量百分含量, x_i 为第 i 级的团聚体平均直径 (mm); 分别用 MWD_{SW} 、 MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 表示慢速湿润 (SW)、快速湿润 (FW) 和预湿后扰动 (WS) 的计算结果。

土壤机械组成利用激光分散法 (Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Malvern, England) 进行测定, SOC 含量采用重铬酸钾外加热法进行测定 [24]。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic condition of plots

样地 Sites	坐标 Coordinates	海拔 Elevation/m	坡度 Slope degree/(°)	坡长 Slope length/m	坡向 Aspect/(°)	土壤类型 Soil type
CK	36°0'4.4"N 106°29'0.5"E	1722—1797	25.5—30.0	100—120	SW15	黄绵土
N15	36°0'28.8"N 106°29'2.8"E	1746—1780	23.0—26.0	190—200	SW17	黄绵土
N25	36°0'33.5"N 106°28'12.7"E	1638—1658	22.5—28.0	180—200	SW22	黄绵土
N35	36°0'20.1"N 106°28'21.7"E	1588—1670	21.0—26.5	130—150	SW25	黄绵土

CK:荒草地 Natural grassland;N15:柠条种植 15 年 15-year-old *Caragana korshinskii* Kom. shrubland;N25:柠条种植 25 年 25-year-old *Caragana korshinskii* Kom. shrubland;N35:柠条种植 35 年 35-year-old *Caragana korshinskii* Kom. shrubland

1.4 数据处理

利用单因素方差分析(ANOVA)检验每种 LB 处理在不同样地、坡位和深度土壤团聚体的粒级分布以及 MWD、RSI 和 RMI 的差异,并采用最小显著性差异法(least significant difference, LSD)进行多重比较,显著性水平为 0.05。所有数据统计分析利用 SPSS 17.0 软件(SPSS, Inc., Chicago, IL, USA)完成。利用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)分析土壤团聚体稳定性指标与影响因素之间的关系。RDA 分析应用 CANOCO 5.0 软件完成,其余采用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果

2.1 SOC 和机械组成

柠条种植年限和坡位对 SOC 含量及机械组成有显著影响($P<0.05$, 表 2)。SOC 含量在上坡和中坡均在种植 35 年最高,但下坡荒草地则显著高于柠条种植样地($P<0.05$)。有机碳和粘粉粒含量在同一年限不同坡位表现为坡下>坡上>坡中。随柠条种植年限增加,上坡和中坡的粘粒和粉粒含量均呈增加趋势,下坡则是先降低后增加,种植 15 年柠条地显著低于其他样地($P<0.05$)。砂粒含量与粘粉粒含量呈相反变化规律。

表 2 不同种植年限与坡位 0—40 cm 土层 SOC 和机械组成

Table 2 Soil organic carbon and mechanical composition of 0—40 cm in different stand ages and slope positions

坡位 Slope position	样地 Plot	有机碳 Soil organic carbon /(g/kg)	土壤机械组成 Soil mechanical composition/%		
			粘粒 Clay (<0.02 mm)	粉粒 Silt ($0.002—0.02$ mm)	砂粒 Sand ($0.02—2$ mm)
上坡 Upper slope	CK	7.42c	17.22b	23.83d	58.95a
	N15	10.72b	18.28ab	25.47c	56.23b
	N25	12.16a	17.81b	28.38a	53.81c
	N35	13.55a	20.18a	26.30b	53.60c
中坡 Middle slope	CK	10.47c	16.25c	23.41c	60.52a
	N15	11.17c	17.48b	24.01b	58.52b
	N25	12.46b	20.08a	24.82b	55.09c
	N35	14.57a	19.15ab	27.91a	52.93d
下坡 Lower slope	CK	17.46a	19.90	27.36b	52.81b
	N15	11.67d	20.55	27.28b	52.31b
	N25	13.34c	18.75	24.99c	56.34a
	N35	15.01b	18.90	30.61a	50.50c
F 值 F value	年限(A)	66.13 ***	12.88 ***	186.54 ***	126.89 ***
	坡位(P)	31.99 ***	38.34 ***	32.51 ***	112.73 ***
	A×P	28.94 ***	13.94 ***	32.11 ***	40.75 ***

A:种植年限 Stand age;P:坡位 Slope position;A×P:种植年限和坡位的交互作用 Interaction effect of stand age and slope position;不同小写字母表示同一坡位不同种植年限差异显著($P<0.05$);* $P<0.05$,*** $P<0.01$

2.2 土壤团聚体粒径分布

种植年限、坡位和土层深度对 3 种处理下的各粒级土壤团聚体含量具有显著影响,除了坡位对 SW 处理中的<0.053 mm 和 WS 处理中的 0.25—0.053 mm 粒级无显著影响(表 3)。随着土壤深度的增加,3 种处理下>0.25 mm 粒级团聚体含量均呈降低趋势,种植年限对土壤深度的影响主要在 0—20 cm(图 1)。SW 处理下,0—40 cm 土层的>2 mm 团聚体含量占比最多,约为总土重的 65.7%—92.5%,并且总体表现下坡高于上坡和中坡。在上坡和中坡>2 mm 团聚体含量表现为随种植年限增长而增加,在下坡则为先降低后增加。FW 和 WS 处理下的各粒级团聚体含量随种植年限的变化趋势与 SW 处理相似。FW 处理下,0—20 cm 土层>0.25 mm 粒级团聚体约占 56.84%,且主要为>2 mm 粒级,但在 20—40 cm 土层>0.25 mm 粒级团聚体约为 54.09%,且以 2—0.25 mm 粒级为主。WS 处理下团聚体分布特征与 FW 处理相似,但 WS 处理在<0.25 mm 粒级(尤其是<0.053 mm 粒级)的团聚体含量要低于 FW 处理。

表 3 不同 Le Bissonnais 处理下种植年限、坡位和土层团聚体分布和 MWD 的方差分析

Table 3 Variance analysis for the effects of stand age, slope position and soil depth on soil aggregate distribution and MWD under Le Bissonnais method

处理 Treatment	粒级等因子 Factors	种植年限(A) Stand age	坡位(P) Slope position	土层(D) Soil depth	A×P	A×D	P×D	A×P×D
SW	>2 mm	9.40 ***	11.94 ***	27.80 ***	4.00 ***	0.73	0.62	0.57
	2—0.25 mm	4.98 ***	14.89 ***	38.66 ***	10.29 ***	0.92	1.77	1.15
	0.25—0.053 mm	16.28 ***	12.69 ***	22.90 ***	4.54 ***	1.86	1.27	1.79 *
	<0.053 mm	9.68 ***	2.22	5.66 ***	1.93	0.74	1.44	1.01
FW	>2 mm	7.60 ***	17.44 ***	94.23 ***	1.75	0.45	5.28 ***	1.12
	2—0.25 mm	5.69 ***	7.06 ***	21.45 ***	2.46 *	2.58	3.04 ***	2.30 ***
	0.25—0.053 mm	9.88 ***	25.81 ***	20.33 ***	4.25 ***	5.41 ***	4.10 ***	2.43 ***
	<0.053 mm	24.76 ***	4.68 *	24.81 ***	2.83 *	11.14 ***	4.95 ***	5.61 ***
WS	>2 mm	12.35 ***	3.28 *	59.27 ***	9.60 ***	1.2	2.01	1.3
	2—0.25 mm	5.79 ***	14.37 ***	30.43 ***	3.14 ***	1.27	1.11	1.28
	0.25—0.053 mm	7.92 ***	2.06	36.87 ***	6.45 ***	2.68 ***	3.40 ***	3.03 ***
	<0.053 mm	3.53 *	5.21 ***	6.69 ***	2.46 *	5.44 ***	2.91 *	1.55
稳定指标	MWD _{SW}	10.88 ***	11.09 ***	25.62 ***	3.27 *	0.74	0.75	0.6
Stability index	MWD _{FW}	8.99 ***	15.28 ***	90.39 ***	1.56	0.74	5.32 ***	1.34
	MWD _{WS}	11.84 ***	3.30 *	55.50 ***	9.59 ***	1.53	2.15	1.43
	RSI	5.17 ***	16.32 ***	74.08 ***	0.67	0.75	6.80 ***	1.06
	RMI	4.19 ***	0.76	23.79 ***	4.53 ***	1.27	1.33	0.90

A: 种植年限 Stand age; P: 坡位 Slope position; D: 土层 Soil depth; A×P: 种植年限和坡位交互作用 Interaction effect of stand age and slope position; A×D: 种植年限和土层交互作用 Interaction effect of stand age and soil depth; P×D: 坡位和土层交互作用 Interaction effect of slope position and soil depth; A×P×D: 种植年限、坡位和土层交互作用 Interaction effect of stand age, slope position and soil depth; SW: 慢速湿润 Slow wetting; FW: 快速湿润 Fast wetting; WS: 预湿后扰动 Wet stirring; MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; RSI: 相对消散指数 Relative slaking index; RMI: 相对机械破碎指数 Relative mechanical breakdown index; * $P<0.05$, *** $P<0.01$

2.3 土壤团聚体稳定性

种植年限、坡位和土层深度对 3 种处理下 MWD 值有显著影响(表 3,图 2)。MWD_{SW}、MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 变化范围分别为 2.47—3.27、0.40—2.00 mm 和 0.98—2.46 mm。随着种植年限的增加,3 种处理 MWD 值在上坡和中坡表现出增加的趋势,在下坡则是先降低后增加。并且同一种种植年限不同坡位的 MWD 值,均表现为坡下>坡上>坡中。3 种处理下同一样地的 MWD 值均随土层深度的增加而减小。MWD_{SW} 和 MWD_{FW} 主要在 0—20 cm 土层有显著差异,MWD_{WS} 则在上坡 0—40 cm、中坡 0—20 cm 和下坡 0—30 cm 土层有显著差异($P<0.05$)。与 30—40 cm 土层相比,不同坡位 0—10 cm 土层的 MWD_{SW}、MWD_{FW} 和 MWD_{WS} 分别增加了 5.38%—25.94%、51.88%—380.91% 和 29.79%—137.33%。

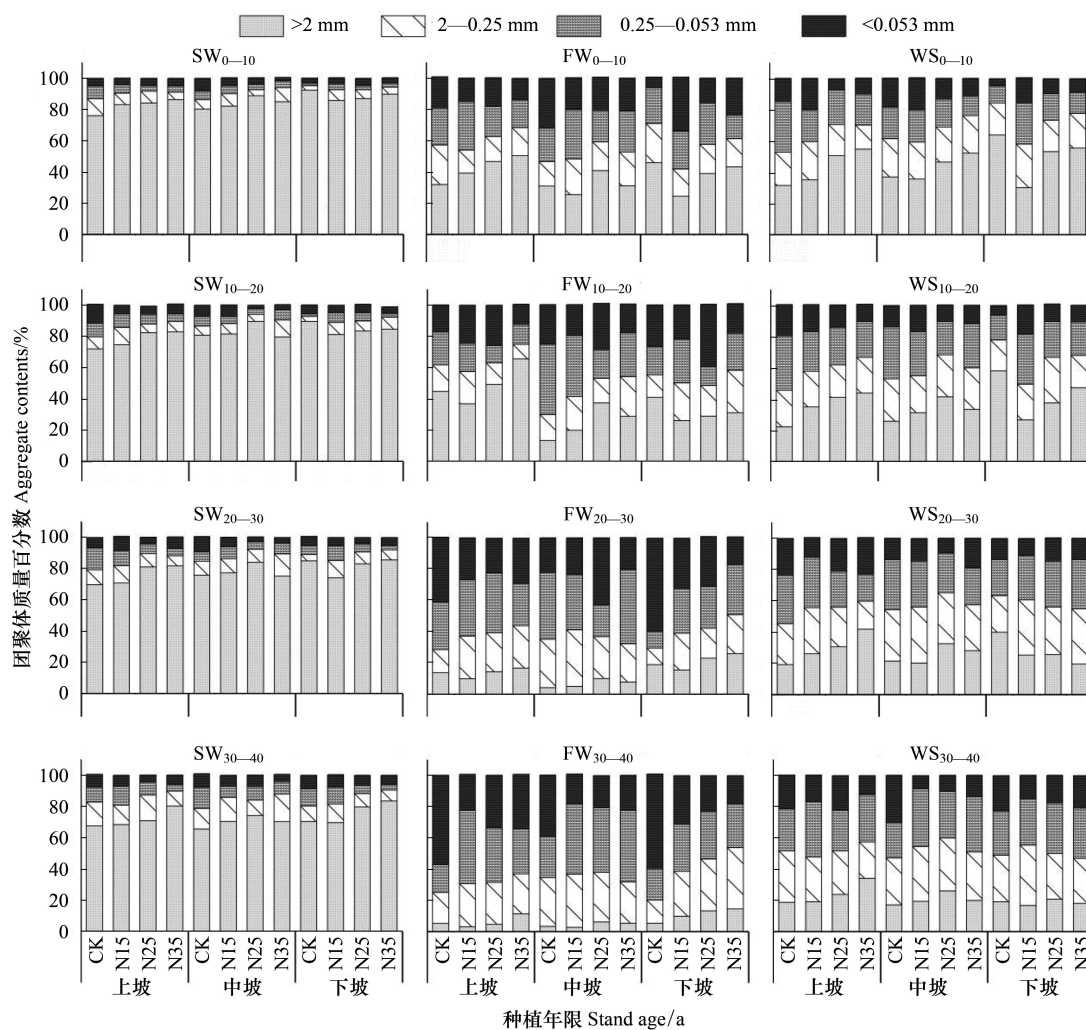


图1 Le Bissonnais 方法三种处理下土壤水稳性团聚体分布

Fig.1 Distribution of soil water-stable aggregates in the three treatments by Le Bissonnais method

CK: 荒草地 Natural grassland; N15: 柠条种植 15 年 15-year-old *Caragana korshinskii* Kom. shrubland; N25: 柠条种植 25 年 25-year-old *Caragana korshinskii* Kom. shrubland; N35: 柠条种植 35 年 35-year-old *Caragana korshinskii* Kom. Shrubland; SW: 慢速湿润 Slow wetting; FW: 快速湿润 Fast wetting; WS: 预湿后扰动 Wet stirring; 0—10、10—20、20—30 和 30—40 分别代表土层深度

RSI 值总体呈坡下>坡上,并且随土层深度增加而增大。种植年限仅对上坡 10—20 cm 和下坡 0—10 cm 土层 RSI 值有显著影响($P<0.05$,图 3)。随着种植年限增加,RSI 值先增大后降低,种植 15 年样地有最大值(0.80)。RMI 值总体为中坡>上坡>下坡,并且也随土层深度增加而增大。不同种植年限样地 RMI 值在坡上和坡下 0—20 cm 以及坡中 0—10 cm 土层存在显著差异($P<0.05$,图 3)。RMI 值在下坡变化规律与 RSI 值一致,但上坡和中坡则随种植年限增加逐渐下降,荒草地有最大值(0.60)。

2.4 土壤团聚体稳定性影响因子

通过对外在因素(柠条种植年限、坡位和土层)和土壤内在性质(有机碳、粘粒、粉粒和砂粒)7 个因素分别与 3 种不同处理下的 MWD、RSI 和 RMI 进行冗余分析,以分析各因素对团聚体稳定性指标的影响程度(图 4)。种植年限、坡位、土层、有机碳和粘粉砂粒均与 MWD、RSI 和 RMI 值存在相关关系。3 种处理下,内外因素对土壤团聚体稳定性的影响占土壤团聚体的变异值分别为 56.06% ($F=8.9, P=0.02$)、60.01% ($F=10.3, P=0.002$) 和 57.98% ($F=9.6, P=0.002$)。其中在 WS 处理中,年限和粘粉粒对团聚体稳定指标的影响最大,分别解释了 30.4% 和 9.86% 的变异,其次是 SOC(8.69%),土层(2.75%),而坡位对其的解释量仅是 0.61%。RDA

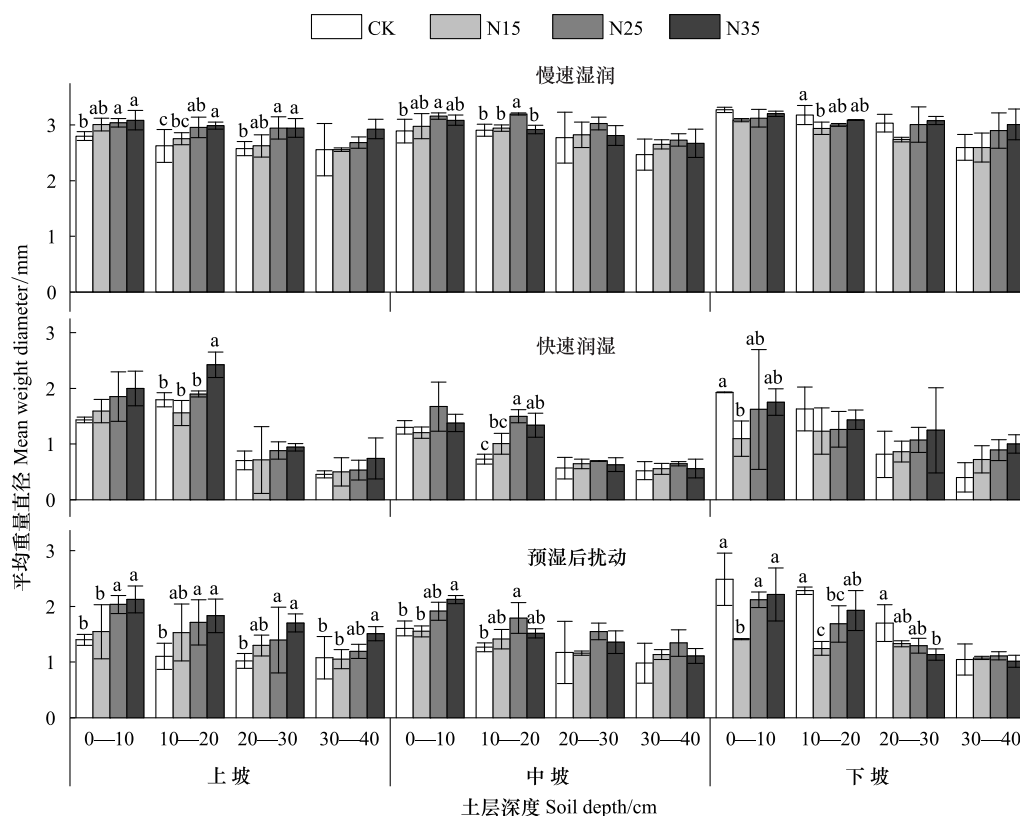


图2 Le Bissonnais 三种处理方法下土壤的 MWD 值变化

Fig.2 Changes of MWD values in the three treatments by Le Bissonnais method

误差棒表示标准差,不同小写字母表示同一坡位同一土层不同种植年限差异显著 ($P < 0.05$)

分析中种植年限和粘粉粒与 MWD 呈较强的正相关性,与 RSI 和 RMI 呈负相关,SOC 的影响程度次之。坡位、土层和砂粒对 RSI 和 RMI 为正贡献,但坡位的贡献程度较小。

3 讨论

3.1 植被恢复年限对土壤团聚体稳定性的影响

本研究中 RDA 分析结果表明,柠条种植年限是影响土壤团聚体分布及稳定性的主要因素(图4),并且 > 0.25 mm 团聚体含量和 MWD 值总体均随年限增加而升高(图1、图2),说明柠条种植年限的增加提高了土壤团聚体稳定性。安韶山和黄懿梅^[25]对宁南区人工柠条林的研究也有类似的结果,他们发现种植柠条与耕地相比显著增加了 > 0.25 mm 水稳性团聚体和 > 0.01 mm 微团粒含量。此外随着柠条种植年限的增加,SOC 和粘粉粒也有同样增加的趋势(表2),并且 RDA 分析表明 SOC、粘粉粒与 MWD 相关性较强(图4)。这说明柠条种植年限的增加有利于增加 SOC 和黏粒含量,促进土壤的团聚作用而形成较大粒径团聚体,从而提高团聚体稳定性。一般认为,土壤团聚体的形成及稳定性主要依赖土壤中各胶结物质的数量和性质,其中 SOC 和黏粒是最主要的胶结物质^[26]。SOC 主要来源于植物地上凋落物和地下根系死亡分解后的输入^[27]。在研究区,与灌木林地土壤相比,表层荒草土壤的根系密度和周转率较高^[28],但柠条种植后,随着年限的增加,其凋落物和根系死亡累积量要较荒草地更大,可能更有利于增加土壤有机质的积累,从而提高土壤团聚体稳定性。此外,植被恢复过程可能通过增加土壤微生物量和多样性、根系生物量和分泌物^[29-31]、细根与菌根真菌相互作用产生的渗出物和结合剂^[32]等多方面促进土壤团聚体间的粘结作用,提高团聚体稳定性。Deng 等^[33]研究也发现,由于植物枯枝落叶等的投入,SOC 和微生物活性增加,增加了土壤团聚体水稳定性。但这种影响会随着

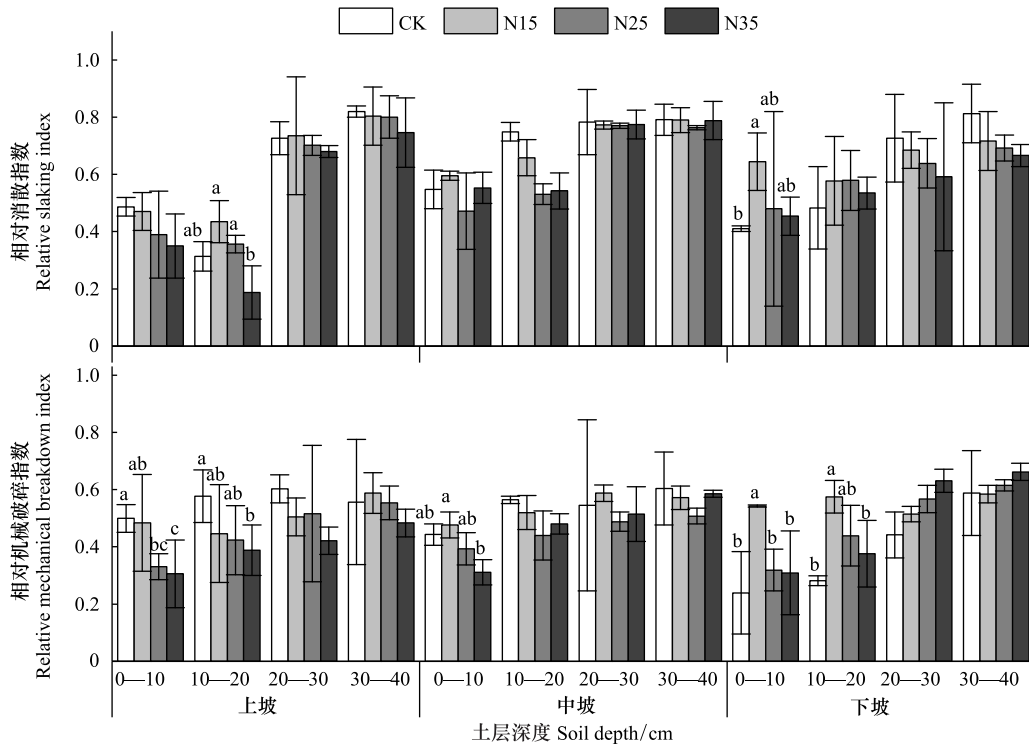


图3 Le Bissonnais 处理下土壤的敏感性指标变化

Fig.3 Changes of soil sensitivity index in the three treatments by Le Bissonnais method

土层深度的增加而降低,这与宋丽萍等^[34]的研究基本一致。因为土壤团聚体的水稳性依赖于有机物质的胶结作用,植物根系和真菌菌丝的机械纠缠作用对水稳性大团聚体的形成与稳定极为重要^[35],随着土壤由表层过渡到下层,土壤有机质含量降低,导致其团聚体的水稳性亦随之降低^[36]。

3.2 不同坡位对土壤团聚体稳定性的影响

坡地形影响土壤的形成和发育,不同坡位的 SOC、颗粒等条件和侵蚀过程不同,致使土壤属性可能产生差异。Lal^[12]研究发现坡面侵蚀使得细颗粒和有机碳含量损失,这改变了坡面尺度景观的土壤质地,并导致坡底中较高的富集,周萍等^[37]和刘世梁等^[38]也有类似研究结果。从坡面尺度来看,本研究中荒草地(对照)和不同种植年限柠条地不同坡位的 MWD 值和大团聚体(>0.25 mm)、SOC 和粘粉粒含量均表现为坡下>坡上>坡中(图 1,图 2,表 2),说明坡位对土壤团聚体稳定性及其影响因素具有明显影响。由于坡面的侵蚀-沉积作用,坡上和坡中为“侵蚀区”,侵蚀强度较大,因此土壤有机质、黏粉粒等易被冲刷淋溶,土壤团聚作用减弱;而下坡多为“沉积区”,具有相对较强的“汇”的功能,土壤物质元素在此减速、沉积,有利于土壤团聚体的形成^[14]。

本研究也发现条带性柠条种植其年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响具有耦合效应。与荒草地相比,种植柠条样地的土壤团聚体稳定性在上中坡均较强且随种植年限的增加而增强,但在下坡则呈现先降后增的转折性变化(图 1 和图 2)。冗余分析表明土壤团聚体稳定性与种植年限的相关性比坡位更强(图 4)。Garten 和 Ashwood^[39]有类似的结果,对不同景观地貌 SOC 固定的研究发现植被对其的影响要高于地形因子。柠条种植所形成的阻隔带对整体坡面降雨分配和土壤侵蚀过程有分割拦截作用,会改变其原有径流、土壤颗粒、易溶性物质等的传输路径,从而影响土壤水分、养分等土壤性质在坡面的空间分布(尤其是对下坡的输入影响较大)。而这些因素的差异又会影响柠条的生长和土壤有机碳的积累,从而间接影响土壤团聚体的形成和稳定性。一些研究表明柠条种植生长状况在不同坡位下有所差异并对土壤团聚体稳定性产生影响^[40]。王子婷等^[41]对黄土区小流域不同坡位柠条林研究发现,下坡位土壤水分及养分条件良好,大株柠条的灌木高度和冠

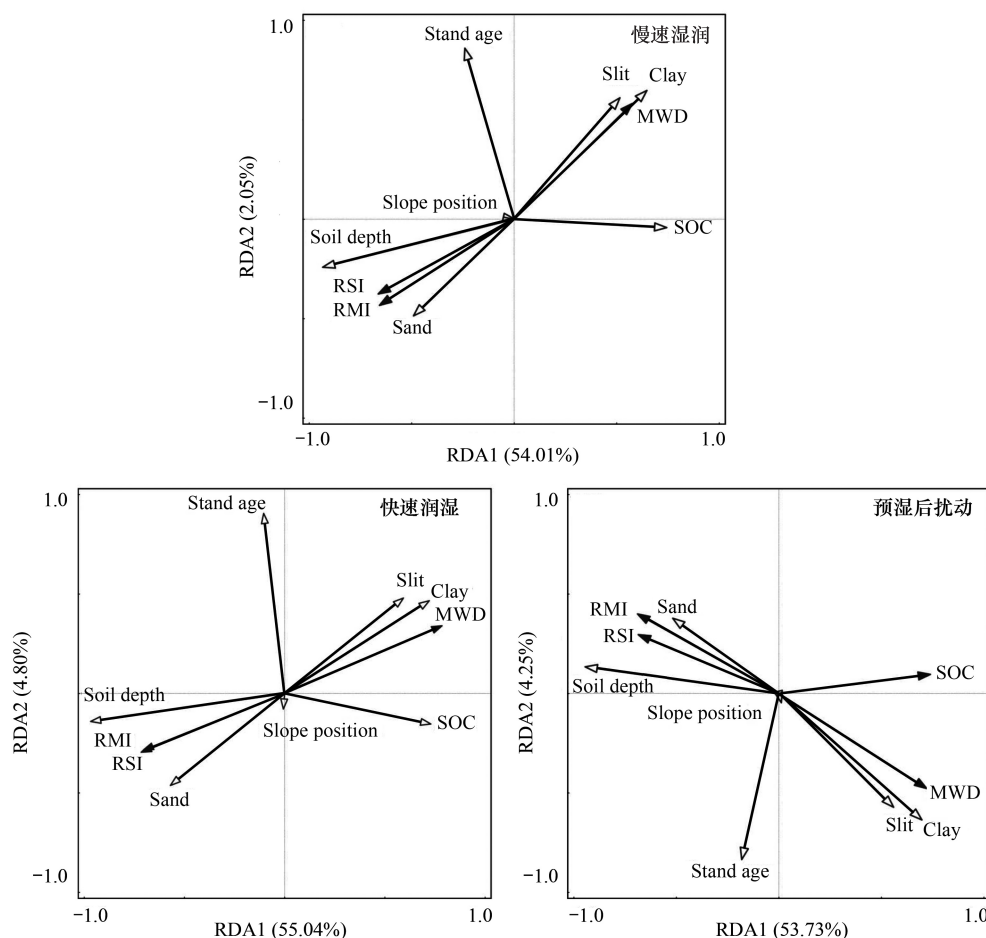


图4 环境因子与土壤团聚体稳定性指标的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis among stability indexes of soil aggregates and environmental factors

Soil depth: 土层深度; Stand age: 种植年限; Slope position: 坡位; Clay: 粘粒; Slit: 粉粒; Sand: 砂粒; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; RMI: 相对机械破碎指数 Relative slaking index; RSI: 相对消散指数 Relative mechanical breakdown index

幅长度高于中上坡位。刘思禹等^[42]对不同坡位柠条根系分布研究也表明均呈现坡位越低,根系分布越集中的趋势,土壤结构越良好。这可能由于植被枯落物和根系及其分泌物不断在土壤中积累,促进有机质转化过程并为土壤微生物提供碳源^[43],这一过程也更加促进水稳性团聚体的形成^[44]。

3.3 三种处理下土壤水稳性团聚体破坏的实际意义

本研究区属于干旱半干旱地区,降雨具有偏少且集中在夏秋之际的特征。LB 法根据团聚体的崩解原因区分其不同机制,SW 处理模拟的是小雨较平缓等实际条件下的状况,FW 处理模拟夏季暴雨条件下的消散作用,WS 处理模拟机械扰动的破坏机制^[20]。研究表明,SW 处理土壤 MWD 明显高于 FW 和 WS 处理(图 2),说明土壤孔隙中由于气体封闭造成的爆破产生消散作用和机械扰动是黄土丘陵区土壤团聚体破坏的主要机制。RSI 和 RMI 结果表明,中上坡对消散作用和机械破碎作用较敏感,下坡的下层土壤对破碎作用更敏感(图 3);柠条种植 35 年后敏感性最低,抵抗消散作用及机械打击破坏的能力也越强。这说明荒草坡地引入柠条种植后,年限和坡位耦合作用下土壤与植被产生的互馈作用及演变格局使得土壤的破碎机制产生差异,这也反向说明了柠条种植年限和坡位对团聚体形成和稳定性的显著影响^[45-46]。

4 结论

黄土丘陵区种植柠条后主要对 0—20 cm 土层土壤团聚体稳定性有显著影响,在坡面上表现为下坡>上坡

>中坡。随着柠条种植年限增加,土壤团聚体稳定性在上中坡表现出逐渐提升的趋势,但在下坡则表现出先降低后增强的趋势。LB 法结果表明,中上坡对消散作用和机械破碎作用较敏感,下坡的下层土壤对破碎作用更敏感,柠条种植 35 年后抵抗消散作用及机械打击破坏的能力最强。冗余分析结果表明,种植年限是影响团聚体稳定性的主要因素,坡位和土层次之,SOC 和黏粒含量与 MWD 值有显著相关关系。总体上,柠条种植的年限增加促进了土壤团聚体稳定性的提升,柠条条带性种植方式增强了上坡和中坡土壤团聚体稳定性,对下坡则是先降后增。因此,在黄土高原地区大面积种植柠条背景下,在对柠条恢复下土壤结构稳定和固碳机制揭示、生态系统功能评估以及实际柠条种植方式时,需注意考虑坡面尺度的坡位特征和种植年限的综合作用。

参考文献 (References):

- [1] Cao S X, Chen L, Yu X X. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions; a case study in Northern Shaanxi Province. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(3): 536-543.
- [2] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [3] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.
- [4] Wang H, Guan D S, Zhang R D, Chen Y J, Hu Y T, Xiao L. Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field. *Ecological Engineering*, 2014, 70: 206-211.
- [5] 景航, 史君怡, 王国梁, 薛蕊, 梁楚涛, 周昊翔. 皆伐油松林不同恢复措施下团聚体与球囊霉素分布特征. *中国环境科学*, 2017, 37(8): 3056-3063.
- [6] 张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] 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.
- [8] 刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 虞亚楠. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响. *自然资源学报*, 2016, 31(9): 1564-1576.
- [9] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma*, 2013, 209-210: 75-85.
- [10] 程曼, 朱秋莲, 刘雷, 安韶山. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响. *生态学报*, 2013, 33(9): 2835-2844.
- [11] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils. *Geoderma*, 2015, 243-244: 205-213.
- [12] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [13] Gregorich E G, Anderson D W. Effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in the Canadian prairies. *Geoderma*, 1985, 36(3/4): 343-354.
- [14] Zou L Q, Chen F S, Duncan D S, Fang X M, Wang H M. Reforestation and slope-position effects on nitrogen, phosphorus pools, and carbon stability of various soil aggregates in a red soil hilly land of subtropical China. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(1): 26-35.
- [15] 刘文祥, 李勇, 于寒青. 草灌植被恢复提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性: 退耕年限的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 164-170.
- [16] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 李玉霖. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 93-100.
- [17] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [18] Xu M X, Li Q, Wilson G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 9-18.
- [19] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1936, 28(5): 337-351.
- [20] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1): 11-21.
- [21] 郝仕龙, 李志萍. 半干旱黄土丘陵区生态建设与经济发展模式探讨——以固原上黄试区为例. *中国水土保持科学*, 2007, 5(5): 11-15.
- [22] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14(C): 20-23.
- [23] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99(1/2): 123-145.

- [24] Walkley A, Black I A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 1934, 37(1): 29-38.
- [25] 安韶山, 黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究. *林业科学*, 2006, 42(1): 70-74.
- [26] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.
- [27] Laganière J, Angers D, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [28] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 2005, 269(1/2): 341-356.
- [29] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 梁向锋. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 14-20.
- [30] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, Soussana J F, Bessler H, Engels C, Habekost M, Gleixner G, Weigelt A, Weisser W W, Scheu S, Eisenhauer N. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 285-299.
- [31] Erktan A, Cécillon L, Graf F, Roumet C, Legout C, Rey F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2): 121-137.
- [32] Eisenhauer N, Milcu A, Sabais A C W, Bessler H, Brenner J, Engels C, Klärner B, Maraun M, Partsch S, Roscher C, Schonert F, Temperton V M, Thomisch K, Weigelt A, Weisser W W, Scheu S. Plant diversity surpasses plant functional groups and plant productivity as driver of soil biota in the long term. *PLoS One*, 2011, 6(1): e16055.
- [33] Deng L, Kim D G, Peng C H, Shanguan Z P. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3974-3984.
- [34] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 蔡立群, 张仁陟, 牛伊宁. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿-作物轮作对土壤物理性质的影响. *草业学报*, 2015, 24(7): 12-20.
- [35] Rovira P, Vallejo V R. Physical protection and biochemical quality of organic matter in mediterranean calcareous forest soils: a density fractionation approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(2): 245-261.
- [36] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, 2002, 238(2): 325-333.
- [37] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 7-12.
- [38] 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河, 陈利顶, 马克明. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响. *生态学报*, 2003, 23(3): 414-420.
- [39] Garten C T, Ashwood T L. Landscape level differences in soil carbon and nitrogen: Implications for soil carbon sequestration. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1114.
- [40] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多锋, 戚建莉. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. *生态学报*, 2013, 33(13): 4011-4020.
- [41] 王子婷, 杨磊, 蔡国军, 莫保儒, 柴春山, 戚建莉, 张洋东. 半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析. *生态学报*, 2017, 37(23): 7872-7881.
- [42] 刘思禹, 姚云峰, 郭月峰, 祁伟. 不同坡位对柠条锦鸡儿根系特性及游离氨基酸含量的影响. *中国农业科技导报*, 2017, 19(6): 111-116.
- [43] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [44] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, Denison R F, van Kessel C. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1078-1085.
- [45] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 刘娜娜. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27-28, 69-69.
- [46] Zeng Q C, Darboux F, Man C, Zhu Z L, An S S. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). *Catena*, 2018, 167: 276-283.