

植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征^{*}

蒲玉琳^{1,2,3} 林超文⁴ 谢德体^{1,3**} 魏朝富^{1,3} 倪九派^{1,3}

(¹西南大学资源环境学院, 重庆 400715; ²四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; ³重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716; ⁴四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘要 基于植物篱控制水土流失的长期定位试验, 研究植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征. 结果表明: 与常规等高农作模式相比, 植物篱-农作复合农业模式下土壤>0.25 mm 机械稳定性和水稳性团聚体含量分别显著增加 13.3% ~ 16.1% 和 37.8% ~ 55.6%, 明显提高了各坡位粒级>0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量, 改善了粒级>0.25 mm 土壤水稳性团聚体在下坡位的相对富集和上坡位相对贫乏的状况. 植物篱显著提高了土壤团聚体平均质量直径和几何平均直径, 降低了土壤团聚体分形维数和>0.25 mm 土壤团聚体破坏率, 进而增强了土壤团聚体的稳定性和抗蚀性. 坡度与植物篱类型对土壤团聚体组成、稳定性和坡面变化无显著影响.

关键词 植物篱 土壤团聚体 土壤结构破坏率 坡度 水土流失

文章编号 1001-9332(2013)01-0122-07 **中图分类号** S152.3 **文献标识码** A

Composition and stability of soil aggregates in hedgerow-crop slope land. PU Yu-lin^{1,2,3}, LIN Chao-wen⁴, XIE De-ti^{1,3}, WEI Chao-fu^{1,3}, NI Jiu-pai^{1,3} (¹College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; ²College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; ³Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China; ⁴Institute of Soil and Fertilizer, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 122-128.

Abstract: Based on a long-term experiment of using hedgerow to control soil and water loss, this paper studied the composition and stability of soil aggregates in a hedgerow-crop slope land. Compared with those under routine contour cropping, the contents of >0.25 mm soil mechanical-stable and water-stable aggregates under the complex mode hedgerow-crop increased significantly by 13.3% - 16.1% and 37.8% - 55.6%, respectively. Under the complex mode, the contents of >0.25 mm soil water-stable aggregates on each slope position increased obviously, and the status of >0.25 mm soil water-stable aggregates being relatively rich at low slope and poor at top slope was improved. Planting hedgerow could significantly increase the mean mass diameter and geometric mean diameter of soil aggregates, decrease the fractal dimension of soil aggregates and the destruction rate of >0.25 mm soil aggregates, and thus, increase the stability and erosion-resistance of soil aggregates in slope cropland. No significant effects of slope and hedgerow types were observed on the composition, stability and distribution of soil aggregates.

Key words: hedgerow; soil aggregates; destruction rate of soil structure; slope; soil and water loss.

土壤团聚体是在生物与非生物单独或共同作用下经由团聚和破碎交替过程形成的^[1], 常视作土壤结构的物质基础与土壤肥力的载体, 其数量和大

小分布与土壤肥力状况、生物活性密切相关^[2]. 因此, 土壤团聚体尤其是水稳性团聚体的定量指标, 如分形维数、平均质量直径等可作为定量评价土壤抗蚀性和肥力的指标^[3-4].

坡地植物篱技术作为一种复合农林业模式, 其成本比梯田低, 简单实用, 而且生态、经济、社会效益显著, 因此受到广泛重视并用于实践. 植物篱技术的

^{*}“十二五”国家水专项(2012ZX07104-003)、重庆市工程技术研究中心建设项目(CSTC, 2010CB7008)、国家自然科学基金项目(41101298)和西南大学生态学重点学科“211工程”经费资助.

^{**}通讯作者. E-mail: xdt@swu.edu.cn

2012-06-11 收稿, 2012-11-04 接受.

显著生态效益之一是提高土地生产力^[5],集中表现为植物篱模式下土壤团聚体含量增加^[6-7],促进土壤物理性质的改善和养分含量与储量的提高^[8-9],以及坡面土壤养分含量空间分布的优化^[10].例如,吴电明等^[6]研究表明,白三叶(*Trifolium repens*)与黄花菜(*Heremacallis citrina*)植物篱地 0~20 cm 土层粒级>2 mm 土壤水稳性团聚体的含量和平均质量直径显著高于常规脐橙园和脐橙园套种农作物模式;Bu 等^[7]研究发现,香根草(*Vetiveria zizanioids*)、马桑(*Coriaria sinica*)、黄荆(*Vitex negundo*)和银合欢(*Leucaena salvadorensis*)4 种植物篱显著增加了 0.2~2 mm 土壤团聚体含量,减少了粒级<0.2 mm 土壤团聚体含量(香根草除外).目前,有关植物篱及其类型对土壤团聚体组成和稳定性的影响研究多集中在耕作管理措施、土壤结构和植物篱的水土保持效益研究^[7-8],专题研究鲜有报道.为此,本文采用长期定位试验,研究植物篱-农作坡耕地土壤团聚体组成和稳定性特征,以期为进一步综合评价坡地植物篱-农作复合农业土壤质量和生态-环境-社会综合效益提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省资阳市雁江镇花椒沟小支流的响水滩上段(30°05′12″—30°06′44″ N, 104°34′12″—104°35′19″ E).气候属亚热带季风气候,年均温 16.8℃,年降雨量 965.8 mm,70%降雨集中在 6—9 月.该区属于典型的四川盆地红岩丘陵区,丘陵多为浑圆形、长条状、桌状的浅丘和中丘.地势起伏不大,平均海拔 395 m,土壤为紫色新成土,土层较薄,一般为 50~80 cm,土壤 pH 8.2~8.6,土壤层次分化不明显,质地较轻,属砂质壤土.作物轮作方式为小麦-玉米.

表 1 不同植物篱模式下土壤基本理化性状
Table 1 Soil physico-chemical properties under different hedgerow patterns

坡度 Slope	处理 Treat- ment	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	粘粒 Clay (%)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	总孔度 Total porosity (%)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
20°	T ₁	59.8	21.5	18.8	1.46	49.7	6.38	0.59	1.06	20.77	26.11	10.09	45.29
	T ₂	58.5	22.0	19.5	1.39	50.1	7.34	0.68	1.14	21.05	33.45	11.04	49.02
	T ₃	55.3	24.9	19.8	1.38	50.2	6.70	0.61	1.11	21.34	32.38	11.22	46.97
13°	T ₄	61.1	19.3	19.6	1.43	46.4	5.88	0.53	1.04	20.25	25.86	7.76	45.81
	T ₅	59.2	20.6	20.4	1.34	49.2	7.07	0.62	1.11	20.91	33.18	8.09	47.91
	T ₆	59.3	20.6	20.1	1.34	50.1	7.10	0.61	1.12	20.32	30.40	8.26	54.51

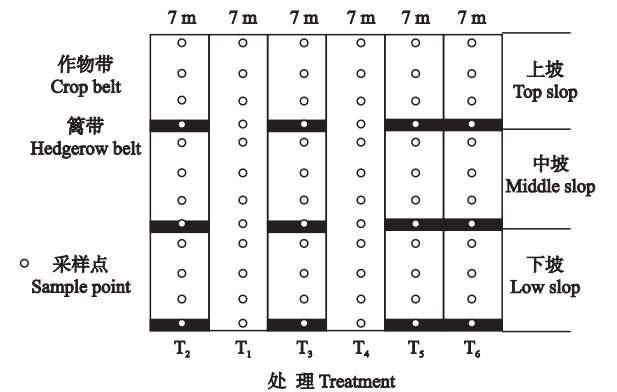


图 1 试验小区和采样点分布
Fig. 1 Distribution of experimental plots and sampling sites.

1.2 试验设计

试验于 2010 年 10 月在四川省农业科学院资阳市农业资源保护与利用试验站的坡地植物篱-农作复合农业试验点的 6 个径流小区进行,每个径流小区大小为 20 m×7 m,四周用与径流小区等长的水泥挡板分隔.试验设 6 个处理,其中,20°坡地设常规等高农作(T₁)、等高紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)间作农作(T₂)、香根草间作农作(T₃);13°坡地设常规等高农作(T₄)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)间作农作(T₅)、蓼草(*Eulaliopsis binata*)间作农作(T₆).1997 年种植植物篱,篱带长 7 m,宽 0.5 m,带间距 6.16 m(图 1).各植物篱模式的土壤基本理化性状见表 1.

2010 年 10 月在径流小区的上、中、下 3 个坡位,距篱带上部边缘 1.5、3.5、5.5 m 处采集 0~20 cm 土层原状土,2 个重复.待土样达土壤塑限含水量条件,沿土壤自然破碎面将土样掰开,剥成直径 10~12 mm 的小块,并除去粗根和石砾.再将 2 个重复样混合,采用四分法,取 500 g 土样继续风干,备用.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤机械稳定性团聚体含量测定 采用干筛

法^[11]测量土壤机械稳定性团聚体含量:称 200 g 风干土样置于孔径依次为 10、5、2、0.5 和 0.25 mm 的套筛最上层,以每分钟 30 次频率手工上下震荡 5 min,测定各孔径筛子上的土样质量。

1.3.2 土壤水稳性团聚体含量测定 采用湿筛法^[11]测量土壤水稳性团聚体含量:将干筛后各级土壤团聚体按其质量比例配成 80 g 土样,置于孔径依次为 10、5、2、0.5 和 0.25 mm 的套筛最上层,加去离子水淹没最上层筛面 2~3 cm,浸泡 10 min,然后以每分钟 25 次频率手工上下震荡 2 min,将留在每个筛子上的土壤冲洗到铝盒中,105℃下烘干,称质量。

1.4 数据处理

土壤团聚体的平均质量直径(mean mass diameter, MMD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、团聚体分形维数(fractal dimension, *D*)和粒径>0.25 mm 土壤团聚体破坏率(percentage of aggregate destruction, PAD_{0.25})的计算方法参见文献[12–13]。

采用 Excel 2003 和 DPS 7.0 软件进行数据统计分析,采用单因子方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)进行不同处理间土壤团聚体含量及其稳定参数的差异显著性检验($\alpha=0.05$)。表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 植物篱-农作坡地土壤机械稳定性团聚体组成
干筛法较少破坏土壤中某些瞬变性、临时性有机胶结物质,如生物产生的多糖、植物根、真菌菌丝体等,其测定的是自然状态下土壤机械稳定团聚体含量,包括水稳性和非水稳性团聚体^[12],反映出侵蚀发生后坡面土壤团聚体的分布特征^[14]。

由表 2 可知,各处理坡地粒径>0.25 mm 土壤机械稳定性团聚体含量(DR_{0.25})较高,为 78.2%~

91.7%。20°坡地 T₂和 T₃处理土壤 DR_{0.25}比 T₁处理均显著增加 16.1%;13°坡地 T₅和 T₆处理土壤 DR_{0.25}比 T₄处理分别显著增加 13.3%和 14.1%。可见,长期种植植物篱可以显著增加土壤 DR_{0.25},且坡度越大,植物篱提高土壤 DR_{0.25}的效应越大。

两坡度下,植物篱间作农作模式下各粒级土壤机械稳定性团聚体含量均与常规等高农作土壤存在差异。20°坡地紫穗槐(T₂)和香根草(T₃)植物篱地粒级>0.5 mm 的土壤团聚体含量高于常规等高农作土壤(T₁),其中,粒级为 10~5、5~2 和 2~0.5 mm 达显著水平;而粒级<0.5 mm 的土壤团聚体含量则低于 T₁,其中,粒级<0.25 mm 达显著水平。13°坡地苜蓿(T₅)和蓼草(T₆)植物篱地粒级>2 mm 的土壤团聚体含量高于常规等高农作土壤(T₄),其中,粒级>10 和 10~5 mm 达显著水平;粒级<2 mm 的土壤团聚体含量则低于 T₄,其中,粒级为 0.5~0.25 和<0.25 mm 达显著水平。

20°坡地各处理与 13°坡地常规等高农作(T₄)土壤机械稳定性团聚体的数量优势级为 2~0.5 mm 团粒,13°坡地植物篱地则是 10~5 mm 和>10 mm 团粒。其原因可能是低坡度下土壤侵蚀减弱,土壤有更多粘粒(表 1);另一方面,2011 年 13°坡地苜蓿和蓼草的地上生物干质量分别为 38.91 和 37.80 kg,而 20°坡地紫穗槐和香根草的地上生物干质量分别为 20.57 和 32.83 kg,可见苜蓿和蓼草有相对较多的地上生物量返还给土壤,能进一步促进土壤小粒级团聚体向较大粒级团聚体转化。因此,随着坡度的减缓,植物篱提高粒级>5 mm 土壤机械稳定性团粒的效果更佳。

2.2 植物篱-农作坡地土壤水稳性团聚体组成

湿筛法测得的是坡面土壤水稳性团聚体含量,反映了土壤潜在的抗蚀能力。由表 3 可知,各处理坡地粒级>0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量(WR_{0.25})为 31.0%~50.9%,低于 DR_{0.25}。20°坡地 T₂和 T₃处

表 2 不同植物篱模式下土壤机械稳定性团聚体组成
Table 2 Composition of soil mechanical-stable aggregates under different hedgerow patterns (%)

坡度 Slope	处理 Treatment	粒径 Size (mm)						DR _{0.25}
		>10	10~5	5~2	2~0.5	0.5~0.25	<0.25	
20°	T ₁	15.9±4.0a	17.3±4.6b	13.4±1.3b	27.5±2.3b	4.2±0.8a	21.8±8.4a	78.2±8.4b
	T ₂	15.9±6.4a	23.1±5.8a	15.5±1.5a	33.0±6.0a	3.7±1.2a	9.2±4.7b	90.8±4.7a
	T ₃	18.6±7.3a	23.9±3.6a	16.1±2.2a	29.3±5.4ab	2.9±0.4b	9.3±5.6b	90.7±5.6a
13°	T ₄	17.1±5.1b	17.7±4.4c	14.4±2.4a	25.0±1.5a	6.7±3.9a	19.3±8.5a	80.9±8.5b
	T ₅	26.3±10.8a	25.1±5.2b	14.6±2.1a	22.9±7.0b	2.3±0.9b	8.9±6.0b	91.1±6.0a
	T ₆	18.6±10.4b	31.8±4.8a	14.6±2.8a	24.3±7.5a	2.4±0.8b	8.3±3.9b	91.7±3.9a

同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同植物篱模式下土壤水稳性团聚体组成
Table 3 Composition of soil water-stable aggregates under different hedgerow patterns (%)

坡度 Slope	处理 Treatment	粒径 Size (mm)						WR _{0.25}
		>10	10 ~ 5	5 ~ 2	2 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	<0.25	
20°	T ₁	2.1±1.4b	5.0±2.7b	7.9±2.7b	13.3±3.3b	2.7±1.1b	67.0±11.1a	31.0±11.1b
	T ₂	4.8±2.2a	8.1±2.2a	11.3±2.3a	18.6±2.2a	5.5±1.8a	51.7±10.1b	48.3±10.1a
	T ₃	4.6±2.1a	8.0±3.6a	11.2±2.7a	17.4±3.4a	5.6±1.2a	53.8±12.2b	46.2±12.2a
13°	T ₄	2.9±1.4b	7.0±1.4b	7.8±2.0b	15.4±3.0b	3.7±1.1b	63.2±8.9a	36.8±8.9b
	T ₅	6.5±2.9a	10.6±2.8a	9.5±2.0a	18.7±2.5a	5.7±2.1a	49.1±11.9b	50.9±11.9a
	T ₆	5.8±2.5a	10.0±3.2a	10.4±2.3a	18.1±3.9a	6.5±2.7a	49.3±14.3b	50.7±14.3a

理土壤 $WR_{0.25}$ 比 T_1 处理分别显著增加 55.6% 和 48.8% ;13°坡地 T_5 和 T_6 处理土壤 $WR_{0.25}$ 分别比 T_4 处理显著增加 38.4% 和 37.8% . 可见,长期种植植物篱可以显著增加土壤 $WR_{0.25}$,且坡度越大,植物篱提高土壤 $WR_{0.25}$ 的效应越大.

两坡度下,植物篱间作农作模式下各粒级土壤水稳性团聚体含量均与常规等高农作存在显著差异.20°坡地 T_2 和 T_3 处理粒级>5 mm (大团聚体)、5~2 mm (中团聚体)、2~0.25 mm (小团聚体)土壤水稳性团聚体含量分别比 T_1 处理显著增加 77.5%~81.7%、41.8%~43.0%、43.8%~50.6% ,而粒级<0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量比 T_1 处理显著减少 19.7%~22.8% ;13°坡地 T_5 和 T_6 处理的各级土壤水稳性团聚体含量与 T_4 处理相比也有相似趋势,其中,大、中、小土壤水稳性团聚体含量分别显著增加 59.6%~72.7%、21.8%~33.3%、27.7%~28.8% ,而粒级<0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量减少 22.0%~22.3% . 可见,植物篱显著提高了土壤大、中、小粒级团聚体含量,尤其是大粒级团聚体,从而有助于提高土壤团聚体的稳定性和抗蚀性.同一坡度下,不同植物篱地间各级土壤水稳性团聚体含量差异均不显著.

2.3 植物篱-农作坡地土壤团聚体的稳定性特征
土壤团聚体的平均质量直径(MMD)、几何平均

直径(GMD)、团聚体分形维数(D)和粒径>0.25 mm 土壤团聚体破坏率($PAD_{0.25}$)都可以表征土壤团聚体的稳定程度.其中,MMD 和 GMD 反映土壤团聚体大小分布状况,其值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[15] ; D 表征土壤结构组成及其均匀程度, D 值越小,土壤具有越良好的结构^[3] ; $PAD_{0.25}$ 表示土壤团聚体在水蚀作用下的分散程度, $PAD_{0.25}$ 值越小,土壤团聚体的稳定性越高^[16].

由表 4 可知,20°坡地 T_2 和 T_3 处理土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的 MMD 和 GMD 基本都显著大于 T_1 处理,而 D 和 $PAD_{0.25}$ 均显著减小;13°坡地 T_5 和 T_6 处理的 MMD 和 GMD 也均显著大于 T_4 处理,而 D 和 $PAD_{0.25}$ 均显著减小.表明与常规等高种植模式相比,植物篱-农作复合农业模式可以显著提高坡耕地土壤团聚体的平均粒径团聚度,改良土壤结构,降低土壤结构破坏率,从而提高土壤团聚体的稳定性.

20°坡地 T_2 和 T_3 处理 $PAD_{0.25}$ 比 T_1 处理分别降低 22.9% 和 18.9% ,13°坡地 T_5 和 T_6 处理 $PAD_{0.25}$ 比 T_4 处理分别降低 18.9% 和 17.8% ,可见,随坡度增大,植物篱提高土壤团聚体稳定性的效果更明显.同一坡度下,不同植物篱地间土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的 MMD、GMD、 D 和 $PAD_{0.25}$ 均无显著差异.

表 4 不同植物篱模式下土壤团聚体稳定性参数
Table 4 Stability parameters of soil aggregates under different hedgerow patterns

坡度 Slope	处理 Treatment	机械稳定性团聚体 Mechanical-stable aggregate			水稳性团聚体 Water-stable aggregate			团聚体 破坏率 PAD _{0.25} (%)
		平均质量直径 MMD (mm)	几何平均直径 GMD (mm)	分形维数 D	平均质量直径 MMD (mm)	几何平均直径 GMD (mm)	分形维数 D	
20°	T ₁	3.77±0.71b	1.90±0.62b	2.56±0.16a	1.21±0.45b	0.51±0.14b	2.89±0.04a	61.2±10.4a
	T ₂	4.28±0.91ab	2.63±0.74a	2.30±0.13b	1.86±0.45a	0.75±0.19a	2.81±0.05b	47.2±8.6b
	T ₃	4.61±0.87a	2.87±0.81a	2.30±0.15b	1.82±0.57a	0.74±0.24a	2.82±0.06b	49.7±10.6b
13°	T ₄	3.91±0.88b	2.05±0.82b	2.53±0.20a	1.46±0.34b	0.58±0.12b	2.87±0.04a	54.9±7.2a
	T ₅	5.34±1.22a	3.52±1.14a	2.31±0.15b	2.15±0.57a	0.84±0.27a	2.80±0.06b	44.6±9.8b
	T ₆	5.09±1.08a	3.36±1.01a	2.30±0.10b	2.06±0.58a	0.82±0.26a	2.80±0.08b	45.2±13.7b

2.4 植物篱-农作坡地土壤团聚体含量和分形维数的坡面变化

有研究表明,土壤水稳性团聚体含量的高低比机械稳定性团聚体更能反映土壤结构保持和供应养分能力的强弱^[17],粒径>0.25 mm 土壤团聚体含量与土壤抗蚀性密切相关^[12]. 因此,以 $WR_{0.25}$ 分析不同植物篱模式下土壤团聚体的坡面变化. 由图 2 可知,两坡度下,各坡位植物篱地土壤 $WR_{0.25}$ 均高于常规等高农作土壤,其中,20°坡地 T_2 和 T_3 处理土壤 $WR_{0.25}$ 较常规等高农作增高 20.1% ~ 138.1% 和 13.7% ~ 119.1%;13°坡地 T_5 和 T_6 处理土壤 $WR_{0.25}$ 较常规等高农作增高 19.6% ~ 82.3% 和 19.6% ~ 99.9%. 说明植物篱显著提高了各坡位土壤 $WR_{0.25}$.

径流小区坡面自下而上,各处理 $WR_{0.25}$ 含量均逐渐下降,其中,常规等高农作(T_1 、 T_4)土壤 $WR_{0.25}$ 近直线式降低,各植物篱地呈波浪式降低,在作物带(2.0 ~ 6.0、8.5 ~ 12.5、15.0 ~ 19.0 m)逐渐减小,在篱带(0.5、7.0、13.5 m 处)则大幅增加. 下坡位 0.5 m 至上坡位 19.0 m 处,20°坡地 T_1 和 13°坡地 T_4 处理 $WR_{0.25}$ 从 49.5% 和 49.3% 减小到 15.6% 和 22.0%;20°坡地 T_2 和 T_3 处理 $WR_{0.25}$ 从 66.5% 和 66.0% 分别减小到 31.9% 和 27.3%;13°坡地 T_5 和 T_6 处理 $WR_{0.25}$ 从 73.2% 和 72.3% 分别减小到 34.4% 和 27.3%. 可见,植物篱改善了坡地土壤

$WR_{0.25}$ 在下坡位相对富集、上坡位相对贫乏的状况,优化了土壤 $WR_{0.25}$ 的坡面分布;且坡度越大,植物篱改善上坡位土壤 $WR_{0.25}$ 贫乏的效应越明显. 同一坡度下,不同植物篱提高土壤 $WR_{0.25}$ 的效应无显著差异.

土壤团聚体分形维数(D)可用于表征土壤团聚体的稳定性、养分肥力和微生物活性高低,以及物理性质的优劣^[18],而土壤水稳性团聚体与养分肥力的关系比机械稳定性团聚体更为紧密. 因此,以土壤水稳性团聚体分形维数分析不同植物篱模式下土壤团聚体稳定性的坡面变化. 由图 2 可知,两坡度下,各坡位植物篱地土壤水稳性团聚体 D 值均低于常规等高农作土壤,其中,20°坡地 T_2 和 T_3 处理土壤 D 值较常规等高农作降低 1.2% ~ 4.4% 和 0.8% ~ 3.6%;13°坡地 T_5 和 T_6 处理土壤 D 值较常规等高农作降低 1.2% ~ 5.4% 和 0.6% ~ 5.3%. 说明植物篱显著增加了各坡位土壤团聚体的稳定性.

径流小区坡面自下而上,各处理土壤水稳性团聚体 D 值均逐渐增大,其中,常规等高农作(T_1 、 T_4)土壤水稳性团聚体 D 值呈近直线式增大,而各植物篱地呈波浪式增大,在作物带逐渐增大,在篱带则明显减小. 可见,植物篱模式下篱带与篱前土壤团聚体较强的稳定性有助于减缓作物带土壤流失,从而增强作物带土壤团聚体的稳定性. 同一坡度下,不同植物篱提高土壤水稳性团聚体分形维数的效应无显著差异.

3 讨 论

土壤团聚体是良好的土壤结构体,具有多孔性和水稳性^[19]. 土壤团聚体的充气、持水孔隙比例适当,能协调土壤水、气、热和养分的矛盾,粒径>0.25 mm 土壤团聚体含量是土壤肥沃的标志之一^[20]. 影响土壤团聚体含量和稳定性的内在因素是形成土壤团聚体的胶结物质,土壤团聚体的主要胶结剂是有机质(含有机残体和菌丝等粗有机质)、粘粒和二氧化物(主要是无定形 Fe_2O_3 、 Al_2O_3)^[21-22]. 因此,能够影响土壤有机质和粘粒含量的土地利用方式、耕作管理、施用有机肥等措施都会影响土壤团聚体含量及其组成和稳定性^[23-27].

有研究表明,桂西北喀斯特原生林地、自然恢复地、放牧+火烧草地的 $WR_{0.25}$ 显著高于玉米-红薯轮作地,土壤结构破坏率则相反^[23];深松、旋耕和免耕措施均能显著提高 0 ~ 40 cm 土层中粒级>2 mm、0.25 ~ 2 mm 土壤团聚体含量和团聚体 MMD^[24];秸秆覆盖能增加 $DR_{0.25}$ 13.0% ~ 26.4%,增加 $WR_{0.25}$

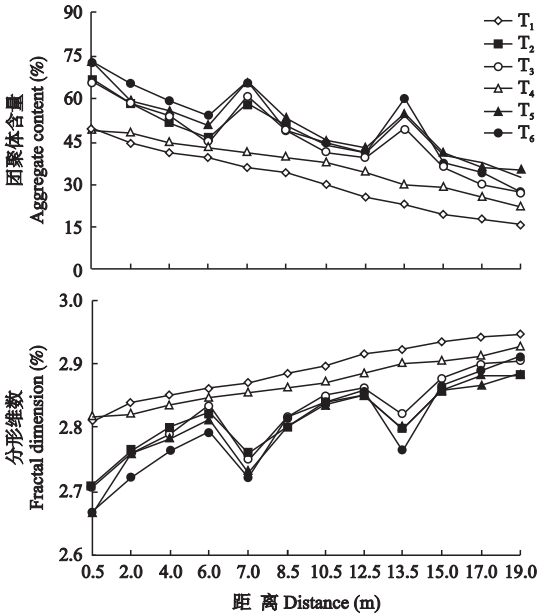


图 2 不同植物篱模式下粒径>0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量和水稳性团聚体分形维数的坡面变化
Fig. 2 Slope distribution in the content of >0.25 mm soil water stability aggregates and fractal dimension of water stability aggregates under different hedgerow patterns.

18.6%~45.7%^[25];红壤旱地化肥配施厩肥、绿肥等有机肥能提高粒级>0.25 mm 土壤团聚体含量,促进土壤中水稳性小团聚体向水稳性大团聚体转化^[26];渭北干旱地区土壤连续施用4年鸡粪后 $WR_{0.25}$ 显著提高,并随有机肥用量的增加而增加^[27]。本研究表明,紫穗槐等植物篱套种小麦-玉米间作模式显著提高了0~20 cm 土层土壤 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$,以及粒级为0.5~10 mm 土壤机械稳定性团聚体,这与吴电明等^[6]和 Bu 等^[7]的研究结果相似。紫穗槐等植物篱能通过机械阻滞作用^[28]、覆盖作用、篱积带的粘滞作用^[29]和回水带效应^[30]增加坡地土壤粘粒和有机质含量,以及土壤微生物数量^[31],而粘粒和有机质能在微生物的作用下,通过各种作用力形成土壤微团聚体,再经多级团聚形成土壤大团粒。因此,植物篱-农作模式提高了各坡位土壤 $WR_{0.25}$ 。随着坡度的增大,植物篱提高土壤 $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 的效应越大,这可能是因为高坡度下土壤粘粒含量较低,而在有机质含量较低的土壤中,粘粒是土壤大粒级团聚体形成的主要胶结剂。

有研究表明,中国红壤侵蚀地区胡枝子恢复地土壤水稳性团聚体 MMD 显著高于裸地^[32];单施鸡粪土壤机械稳定性团聚体 MMD 和 GMD 显著高于配施鸡粪和无机肥土壤以及单施无机肥土壤^[33]。周萍等^[34]研究表明,不同土地利用类型土壤水稳性团聚体 D 值按天然草地、坡耕地、果园的顺序减小;魏亚伟等^[23]研究表明,不同土地利用方式下土壤结构破坏率大小顺序为:原生林地(9.6%)<自然恢复地(9.8%)<放牧+火烧草地(23.2%)<玉米-红薯轮作地(54.9%)。本研究中,紫穗槐等植物篱套种小麦-玉米间作模式下土壤团聚体 MMD 和 GMD 均显著高于常规等高农作土壤,土壤团聚体 D 和 $PAD_{0.25}$ 则相反,这与吴电明等^[6]的研究结果相似,说明植物篱显著提高了土壤团聚体的平均粒径团聚度,减小了土壤团聚体 D 和 $PAD_{0.25}$,进而提高土壤团聚体稳定性。植物篱提高土壤团聚体稳定的效应随坡度的增大而增加,其原因可能是高坡度下土壤粘粒含量较低所致。

本研究中,土壤 $WR_{0.25}$ 的坡面变化特征是,常规等高农作下呈近直线式降低,植物篱-农作模式下呈波浪式降低,在作物带逐渐减小,在篱带则大幅增加;土壤团聚体 D 的坡面变化特征与此相反。这是由于侵蚀细土粒一般在篱带下或篱前富集^[10,35],而且篱植物的枯枝落叶就地归还至篱带及其边缘,使篱带内土壤有机质含量较作物带高,另外,篱带植物

根际微生物丰富,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^[21]。

参考文献

- [1] Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 2005, **124**: 3–22
- [2] Chen F-E (陈凤恩). The Material Base of Soil Fertility and Its Regulation. Beijing: Science Press, 1991: 101–103 (in Chinese)
- [3] Wu C-Z (吴承祯), Hong W (洪伟). Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1999, **36**(2): 162–166 (in Chinese)
- [4] Zheng Z-C (郑子成), Yang Y-M (杨玉梅), Li T-X (李廷轩). Difference and evaluation model of soil anti-erodibility with different de-farming patterns. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(10): 199–205 (in Chinese)
- [5] Lenka NK, Dass A, Sudhishri S, *et al.* Soil carbon sequestration and erosion control potential of hedgerows and grass filter strips in sloping agricultural lands of eastern India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, **158**: 31–40
- [6] Wu D-M (吴电明), Xia L-Z (夏立忠), Yu Y-C (俞元春). Effects of protective management of navel orange orchards on slope land on structure of and carbon, nitrogen and phosphorus content in soil aggregates. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48**(5): 996–1003 (in Chinese)
- [7] Bu CF, Cai QG, Ng SL, *et al.* Effects of hedgerows on sediment erosion in Three Gorges Dam Area, China. *International Journal of Sediment Research*, 2008, **23**: 119–129
- [8] Oyedele DJ, Awotoye OO, Popoola SE. Soil physical and chemical properties under continuous maize cultivation as influenced by hedgerow trees species on an alfisol in South Western Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, 2009, **4**: 736–739
- [9] Walter C, Merot P, Laver B. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslope. *Soil Use and Management*, 2003, **19**: 201–207
- [10] Lin CW, Tu SH, Huang JJ. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China. *Soil & Tillage Research*, 2009, **105**: 307–312
- [11] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). Soil Physical and Chemical Analysis. Beijing: Shanghai Science and Technology Press, 1978 (in Chinese)
- [12] Zhou H (周虎), Lü Y-Z (吕贻忠), Yang Z-C (杨志臣). Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(9): 1973–1979 (in Chinese)
- [13] Fan R-Q (范如芹), Liang A-Z (梁爱珍), Yang X-M (杨学明). Effects of tillage on soil aggregates in black soils in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica* (中

- 国农业科学), 2010, **43**(18): 3767–3775 (in Chinese)
- [14] Wang Y (王宇), Han X (韩兴), Zhao L-P (赵兰坡). Composition characteristics of black soil aggregates on sloping farmland. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2010, **30**(5): 88–90 (in Chinese)
- [15] Salako FK, Hauser S. Influence of different fallow management systems on stability of soil aggregates in southern Nigeria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, **32**: 1483–1498
- [16] Gong A-D (宫阿都), He Y-R (何毓蓉). Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2001, **15**(3): 112–115 (in Chinese)
- [17] Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙). Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2005, **6**(3): 415–421 (in Chinese)
- [18] Gong W (龚伟), Hu T-X (胡庭兴), Wang J-Y (王景燕). Study on fractal features of soil aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and artificial regeneration in southern Sichuan Province. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(1): 56–65 (in Chinese)
- [19] Huang C-Y (黄昌勇), Xu J-M (徐建明). Soil Science. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 121–127 (in Chinese)
- [20] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil structure and soil organic matter. II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**: 1042–1049
- [21] Shi Y (史奕), Chen X (陈欣), Shen S-M (沈善敏). Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(11): 1495–1498 (in Chinese)
- [22] Yao X-L (姚贤良), Xu X-Y (许绣云), Yu D-F (于德芬). Formation of structure in red soils under different forms of utilization. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1990, **27**(1): 25–33 (in Chinese)
- [23] Wei Y-W (魏亚伟), Su Y-R (苏以荣), Chen X-B (陈香碧), *et al.* Effects of human disturbance on soil aggregates content and their organic C stability in Karst regions. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(1): 159–165 (in Chinese)
- [24] Wang Y (王勇), Ji Q (姬强), Liu S (刘帅), *et al.* Effects of tillage practices on water-stable aggregation and aggregate-associated organic C in soils. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2012, **31**(7): 1365–1373 (in Chinese)
- [25] Wang H-X (王海霞), Sun H-X (孙红霞), Han Q-F (韩清芳), *et al.* Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(4): 1025–1030 (in Chinese)
- [26] Jiang C-L (姜灿烂), He Y-Q (何园球), Liu X-L (刘晓利). Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(4): 715–722 (in Chinese)
- [27] Wang X-J (王晓娟), Jia Z-K (贾志宽), Liang L-Y (梁连友). Effects of organic manure application on dry land soil organic matter and water stable aggregates. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(1): 159–165 (in Chinese)
- [28] Chen Z-G (陈正刚), Zhu Q (朱青), Wang W-H (王文华). Economic hedgerow technology of demonstration effect in transforming slope into terrace. *Tillage and Cultivation* (耕作与栽培), 2006(2): 61–62 (in Chinese)
- [29] Peng X (彭熙), Li A-D (李安定), Li W-J (李苇洁). Changes of soil physical properties, runoff and soil erosion under different hedgerow system. *Soils* (土壤), 2009, **41**(1): 107–111 (in Chinese)
- [30] Xu F (许峰), Cai Q-G (蔡强国), Wu S-A (吴淑安), *et al.* Effect of contour hedgerows on soil nutrient loss in slopland. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation* (土壤侵蚀与水土保持学报), 1999, **5**(2): 23–29 (in Chinese)
- [31] Wang Y-C (王玉川), Chen Q (陈强), Lin C-W (林超文). Microbial features of sloping farmland soil in calcareous purple area affected by different hedgerows treatments in Sichuan Basin. *Soils* (土壤), 2012, **44**(1): 73–77 (in Chinese)
- [32] Zhou H, Peng X, Peth S, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 2012, **124**: 17–23
- [33] Zhao H (赵红), Yuan P-M (袁培民), Lü Y-Z (吕贻忠). Effects of organic manure application on stability of soil aggregates. *Soils* (土壤), 2011, **43**(2): 306–311 (in Chinese)
- [34] Zhou P (周萍), Liu G-B (刘国彬), Hou X-L (侯喜禄). Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2008, **6**(2): 75–82 (in Chinese)
- [35] Lin CW, Tu SH, Huang JJ, *et al.* Effects of plant hedgerows on soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple soil area. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**: 2191–2198

作者简介 蒲玉琳,女,1976年生,博士研究生,副教授。主要从事土壤与环境研究。E-mail: pyulin@sicau.edu.cn

责任编辑 孙菊