

植物篱-农作坡耕地土壤微团聚体组成及分形特征*

蒲玉琳^{1,2,3} 谢德体^{1,3†} 林超文⁴ 丁恩俊^{1,3} 张坤^{1,3} 魏朝富^{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 611134)

(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 400715)

(4 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘要 利用植物篱控制水土流失的长期定位实验, 采用数理统计法研究了 13 a 期植物篱-农作坡耕地土壤微团聚体组成及分形特征。结果表明, 与传统横坡农作模式相比, 植物篱能明显增加 < 0.2 mm 粒级土壤微团粒含量, 尤其是 0.2 ~ 0.05 mm 粒级, 提高了土壤微团聚体分形维数与团聚度, 降低了坡耕地土壤小粒级微团聚体在下坡位的相对富集程度, 优化了土壤大小粒级微团聚体的坡面分布。紫色丘陵区植物篱-农作模式下土壤微团聚体分形维数反映了坡耕地土壤的物理性质、养分肥力与抗蚀能力。

关键词 植物篱; 土壤微团聚体; 分形特征; 坡面分布

中图分类号 S152.3 **文献标识码** A

土壤微团聚体作为土壤结构的颗粒单元, 既是良好土壤结构体的物质基础, 也是有机碳、氮磷等养分的主要载体^[1-2], 其含量及组成与土壤肥力、抗蚀性密切相关^[3-4]。特征微团聚体(陈恩凤等^[5]以 0.01 mm 为界, 龚伟等^[6]以 0.02 mm 为界)的比例及土壤微团粒分形维数常用来表征土壤肥力高低^[5-7], 因而, 研究土壤微团聚体组成及分形特征对评价土壤肥力与土壤抗蚀性有极其重要的意义。

坡地植物篱技术作为一种复合农林业模式, 因其成本低, 简单实用, 生态、经济、社会效益显著, 受到许多研究者的广泛重视并用于实践, 如我国西南丘陵区 and 黄土高原地区成功推广应用近百万公顷^[8]。国内外研究表明, 植物篱不仅能保持水土, 控制农业非点源污染, 还能提高土地生产力, 包括土壤物理性质的改善和养分含量与储量的提高^[9-11], 坡面土壤养分含量空间分布的优化^[12]。已有文献对植物篱改善土壤物理性质的研究报道主要集中在土壤容重、土壤饱和入渗率与含水量和孔度等方面, 如 20 a 的紫檀树、柳树植物能减小土壤容重和抗阻系数, 增加土壤孔度^[13]; 5 a 的果草植物

篱也能减小紫色土容重, 增加土壤孔度与改善土壤过砂质地^[14], 但关于植物篱模式下土壤微团聚体组成、分形维数及其坡面分异特征的研究报道甚少。鉴于此, 本文以西南紫色丘陵区的坡地长期植物篱-农作复合农业土壤为研究对象, 探究不同植物篱模式下土壤微团聚体及其分形特征, 以期为进一步综合评价坡地植物篱-农作复合农业系统的土壤质量与植物篱技术的生态-环境-社会综合效益提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于四川省资阳市雁江镇的花椒沟小流域, 位于东经 104°34'12" ~ 104°35'19"、北纬 30°05'12" ~ 30°06'44"。该区是典型的四川盆地红岩丘陵区, 多为浑圆形或长条状、桌状的浅丘和中丘。属亚热带季风气候, 多年平均降雨量为 965.8 mm, 最高年 1 290.7 mm, 最低年 725.2 mm, 70% 分布在 6 月至 9 月, 年均温 16.8℃。地势起伏不大, 海拔 395 m, 出露的地层主要为侏罗系遂宁

* 国家“十二五”水专项(2012ZX07104-003)、重庆市工程技术研究中心建设项目(CSTC, 2010CB7008)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

作者简介: 蒲玉琳(1976—), 女, 四川西充人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土壤与农业环境研究。E-mail: pyulin@sicau.edu.cn

收稿日期: 2012-01-07; 收到修改稿日期: 2012-06-22

组。成土母质为残坡积物,土壤为紫色新成土,土层较薄,一般为 50 ~ 80 cm, pH 8.2 ~ 8.6, 呈石灰性,土壤层次分化不明显,质地较轻,属砂质壤土。作物轮作方式为水田大麦(油菜)-水稻,旱地小麦-玉米-甘薯。

1.2 样品采集与制备

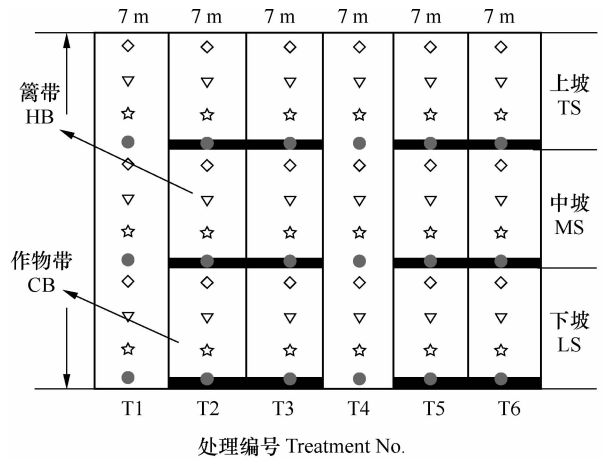
土壤样品采集于花椒沟小流域四川省农业科学院资阳市农业资源保护与利用试验站的 13 a 期坡地植物篱-农作复合农业试验点径流小区。各小区四周用水泥挡板分隔,投影长 20 m、宽 7 m。20°坡地处理设有横坡农作(对照(T1))、等高紫穗槐+横坡农作(T2)、等高香根草+横坡农作(T3);13°坡地为横坡农作(对照(T4))、等高紫花苜蓿+横坡农作(T5)、等高蕨草+横坡农作(T6)。

各植物篱模式均于 1997 年等高栽植 3 带篱植物,其中篱带宽 0.5 m,带间距 6.16 m,每带 2 行。至 2010 年 10 月采样时,各植物篱模式已经沿植物篱带栽植处基本形成生物梯田格局。各处理的种植制度均是小麦-玉米轮作。

样点布置与样品采集:在径流小区的下、中、上坡位篱带内,下、中、上坡位作物带内距其篱带上缘 1.5、3.5、5.5 m 处采集表层 0 ~ 20 cm 土样,重复五点,对照也在相同坡位点采集 0 ~ 20 cm 土样(图 1)。然后将各坡位土样缩分至 500 g 左右带回室内分析。

土壤基本理化性质测定方法参见文献[15],其结果见表 1。土壤微团聚体采用蒸馏水浸泡土样 24 h 后再振荡 2 h,按照国际制土壤颗粒分级标准用吸管法^[16]测定其组成。

土壤微团聚分形维数(D)采用重量分形模型计



注: HB、CB 分别表示篱带与作物带, LS、MS、TS 分别表示下、中、上坡位, ●、☆、▽、◇ 分别表示篱带内、距篱带 1.5、3.5、5.5m 处的采样点; T1、T2 和 T3 分别表示 20° 坡地的横坡农作、紫穗槐+横坡农作和香根草+横坡农作处理, T4、T5 和 T6 分别表示 13° 坡地横坡农作、紫花苜蓿+横坡农作和蕨草+横坡农作处理; 下同 Note: HB and CB represents hedgerow belt and crop belt, respectively; BL, ML and TL represents lower slope, middle slope and top slope, respectively. ●、☆、▽、◇ represents sampling sites hedgerow belt, 1.5, 3.5 and 5.5m away from the hedgerow belt, respectively. T1, T2 and T3 represents treatment of contour cropping, Amorphia hedgerow plus contour cropping, and Vetiver hedgerow plus contour cropping on slopeland 20° in slope, respectively; T4, T5 and T6 represents treatment of contour cropping, Alfalfa hedgerow plus contour cropping and Eulaliopsis binata hedgerow plus contour cropping on slopeland 13° in slope, respectively. The same below

图 1 试验小区及采样点分布

Fig. 1 Experimental plot and sampling sites

算^[17];土壤微团聚体结构稳定性指标团聚状况、团聚度、分散系数和分散率的计算方法参见文献[18]。

1.3 数据分析

实验数据用 Excel 2003 和 DPS 7.0 统计分析软件进行分析处理。

表 1 不同植物篱模式下土壤基本理化性状

Table 1 Physicochemical properties of soils under different patterns of hedgerow

坡度 Slope	处理编号 Treatment No.	土壤粒级 Soil particle size (%)			容重 Bulk density (g cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity (%)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全量养分 Total nutrient (g kg ⁻¹)			速效养分 Available nutrient (mg kg ⁻¹)		
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay				全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK
20°	T1	59.77	21.48	18.75	1.46	49.71	6.38	0.59	1.06	20.77	26.11	10.09	45.29
	T2	58.52	22.02	19.46	1.39	50.14	7.34	0.68	1.14	21.05	33.45	11.04	49.02
	T3	55.31	24.91	19.78	1.38	50.19	6.70	0.61	1.11	21.34	32.38	11.22	46.97
13°	T4	61.11	19.28	19.62	1.43	46.35	5.88	0.53	1.04	20.25	25.86	7.76	45.81
	T5	59.15	20.45	20.40	1.34	49.20	7.07	0.62	1.11	20.91	33.18	8.09	47.91
	T6	59.32	20.62	20.06	1.34	50.05	7.10	0.61	1.12	20.32	30.40	8.26	54.51

2 结果与分析

2.1 植篱模式下土壤微团聚体组成及坡面分布特征

本研究土壤大小粒级微团聚体的划分以 0.02 mm 为界^[6]:大粒级微团聚体 0.02 ~ 0.2 mm,小粒级微团聚体 < 0.02 mm。小粒级微团聚体有助于土壤养分离子的吸附保存,尤其是氮、磷养分;大粒级微团聚体则有助于土壤养分的解吸供应^[19]。由表 2 可知,20°坡地不同处理土壤 < 0.2 mm 微团聚体总量高低趋势是,香根草 > 紫穗槐 > 对照;13°坡地的为,蓼草 > 紫花苜蓿 > 对照。方差分析显示,两坡度下植物篱地土壤微团聚体含量显著高于相应对照土壤的;不同植物篱模式之间的高低趋势则是,草本大于灌木,但差异不显著,可能是草篱比灌木篱有较多的地上生物量返还给土壤及根系,进而促进土壤微团聚体的形成。植物篱地土壤微团聚体组成与对照土壤的存在显著差异:20°坡地紫穗槐和香根草植物篱地土壤中 < 0.002 mm 和 0.2 ~ 0.05 mm 粒级含量显著高于对照土壤,0.02 ~ 0.05 mm 和 0.02 ~ 0.002 mm 粒级含量无明显差异。13°坡地紫花苜蓿和蓼草植物篱地土壤中 < 0.002 mm 和 0.2 ~ 0.05 mm 粒级含量显著高于对照土壤,0.002 ~ 0.02 mm 微团聚体也明显高于对照,0.02 ~ 0.05 mm 微团聚体则显著低于对照。说明篱植物能通过其机械阻滞作用^[20]、覆盖作用、篱积带的黏滞作用^[21]与回水带^[22]效应增加土壤黏粒与有机质含量(表 1)、土壤微生物数量^[23],而黏粒与有机质能在微生物作用下,通过各种作用力形成土壤微团聚体,尤其是大粒级微团聚体。因此,植物篱能显著提高 < 0.2 mm 粒级微团聚体含量,尤其是 0.2 ~ 0.05 mm 粒级。

与对照相比,20°坡地紫穗槐和香根草植物篱地土壤 < 0.2 mm 粒级微团聚体含量分别增加 33%、35%;13°坡地紫花苜蓿和蓼草植物篱地土壤 < 0.2 mm 粒级含量分别增加 34%、23%,说明在本研究条件下,坡度越大,植物篱改善微团聚体含量及组成的效果越明显。

由图 2 可知,与对照相比,20°坡地下,紫穗槐与香根草植物篱地下坡位土壤小粒级微团聚体含量约降低 6%~18%,中、上坡位土壤的则分别约增加 10%~21%、39%;下、中、上坡位土壤大粒级微团聚体含量分别约增加 55%~72%、22%~23%、0.9%~14%。13°坡地下,紫花苜蓿和蓼草植物篱地下、中、

上坡位土壤大、小粒级微团聚体含量均明显增加,其中小粒级含量在下、中、上坡位分别约增加 12%~14%、25%~29%、52%~56%,大粒级含量在下、中、上坡位分别约增加 6%~7%、8%~12%、3%~6%。说明由于植物篱的拦截、覆盖、根系固土等作用,导致细土粒(中细粉粒、黏粒)在篱带与篱前富集,提高了各坡位土壤微团聚体含量。两坡度下,自下坡位到上坡位,对照土壤大粒级微团聚体含量变化较小,小粒级含量逐渐减小,20°坡地自 39% 减小为 27%,13°坡地自 30% 减小为 18%。植物篱地土壤大、小粒级微团聚体含量变化情况总体上与对照土壤相反,大粒级含量一般明显减少,20°坡地减小幅度为 4%~22%,13°坡地为 2%~9%;小粒级含量变化较小。由此可见,植物篱降低了坡耕地土壤小粒级微团聚体在下坡位相对富集程度,促进大粒级微团聚体形成,从而提高整个坡面土壤微团聚体含量,优化土壤微团聚体的坡面分布状况。坡度越大植物篱改善土壤小粒级微团聚体相对富集的效应越显著;同一坡度下,不同植物篱的改善效应无明显差异。

2.2 植物篱模式下土壤微团聚体分形维数及其坡面分布特征

土壤微团聚体分形维数是反映土壤微团聚体结构几何形状的参数,表现为黏粒含量越高,其分形维数越高,单一粒级的集中程度对分形维数也有重要影响^[24]。表 2 显示,供试土壤微团聚体的分形维数在 2.655~2.710 之间,其回归分析的相关系数均在 0.96 以上,达极显著水平。20°坡地土壤微团聚体分形维数的趋势是:香根草 > 紫穗槐 > 对照,13°坡地则为紫花苜蓿 > 蓼草 > 对照。各植物篱地土壤微团聚体分形维数均与对照差异显著,不同植物篱模式之间无显著差异,说明植物篱能明显增加土壤中黏粒级微团聚体含量,从而提高其土壤微团聚体分形维数。不同坡度下,植物篱提高土壤微团聚体分形维数的效应也无显著差异,只是草篱略高于灌木篱。

图 3 显示,径流小区坡面自下而上,20°和 13°坡度下对照土壤微团聚体分形维数逐渐降低,植物篱地土壤的呈波浪式降低,呈现篱带下高于作物带,篱带前大于篱带下的特征。作物带内一般随距篱带上部边缘距离的增加而降低。两坡度下,除距径流小区下部边缘 0.5 m 与 2.0 m 处外,植物篱地不同坡位土壤微团聚体分形维数均比对应坡位对照土壤的高,且其差异一般自下坡位向上坡位逐渐增大。这是由于对照下坡位距径流小区下部边缘

表 2 不同植物篱模式下土壤微团聚体组成及分形维数

Table 2 Composition and fractal dimension of soil micro-aggregates under different patterns of hedgerow

坡度 Slope	处理编号 Treatment No.	微团聚体组成 Micro-aggregate distribution (%)					分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient
		2 ~ 0.2 mm	0.2 ~ 0.05 mm	0.02 ~ 0.05 mm	0.002 ~ 0.02 mm	< 0.002 mm		
20°	T1	47.56a	5.68c	14.16b	23.29a	9.32b	2.671bc	0.968**
	T2	42.13b	12.28b	11.60cd	21.58ab	12.40a	2.706a	0.979**
	T3	39.90bc	11.59b	13.03bc	22.96a	12.54a	2.710a	0.976**
13°	T4	44.35ab	13.29b	18.26a	14.54d	9.56b	2.655c	0.989**
	T5	37.00c	24.80a	8.69e	16.71cd	12.81a	2.701a	0.992**
	T6	36.37c	23.93a	9.66de	18.79bc	11.75a	2.692ab	0.989**

注 Note: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$) Different letters within the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level; ** $p < 0.01$; 下同 The same below

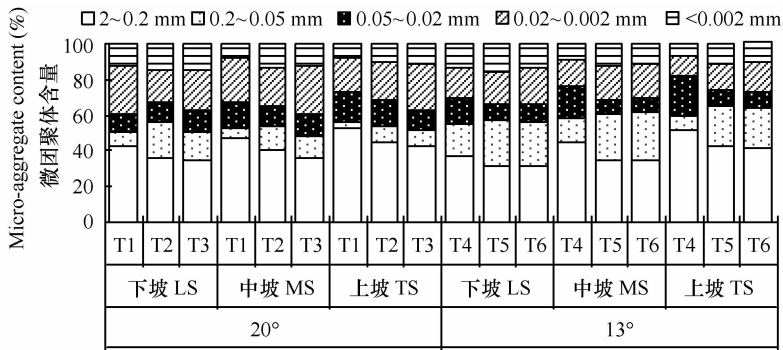


图 2 不同植物篱模式下土壤微团聚体组成的坡面分布

Fig. 2 Slope distribution of soil micro-aggregates composition under different patterns of hedgerow

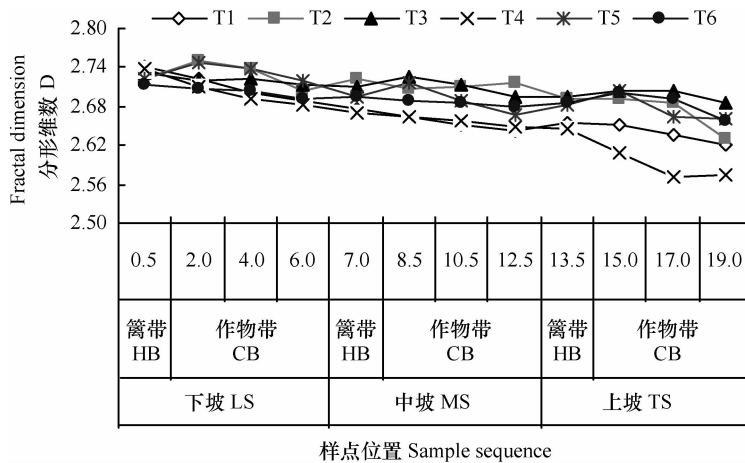


图 3 不同植物篱模式下土壤微团聚体分形维数的坡面分布

Fig. 3 Slope distribution of fractal dimensions of soil micro-aggregates under different patterns of hedgerow

0.5 m 与 2.0 m 处土壤中 < 0.002 mm 黏粒富集较多,微团聚体分形维数较大;植物篱地因篱植物的拦截等作用,其坡地中、上部土壤中 < 0.002 mm 黏粒分别在相应的篱带与篱前堆积,到距径流小区下

部边缘 0.5 m 与 2.0 m 处土壤中 < 0.002 mm 黏粒富集量较少,微团聚体分形维数较相对应照土壤的减小。同一坡度下不同植物篱地土壤微团聚体分形维数在坡面内无明显差异。

2.3 植物篱模式下土壤团聚结构特征

团聚状况、团聚度、分散系数、分散率常作为土壤微团聚体稳定性的定量评价指标。一般团聚状况与团聚度越高,分散系数与分散率越低,土壤微团聚体稳定越好,抗蚀能力越强^[25]。由表 3 可知,栽植植物篱后,土壤团聚状况和团聚度较对照土壤的显著提高。20°坡地紫穗槐植物篱地土壤的团聚状况和团聚度分别较对照增加 117%、110%,香根草植物篱地土壤的分别增加 114%、121%;13°坡地紫花苜蓿植物篱地土壤的团聚状况和团聚度分别较对照增加 100%、87%,蓑草植物篱地土壤的分别

增加 97%、88%。栽植植物篱后,土壤分散系数、分散率则较对照显著降低。20°坡地紫穗槐植物篱地土壤的分散系数和分散率分别较对照土壤的降低 23%、6%,香根草植物篱地土壤的分别降低 31%、6%;13°坡地紫花苜蓿植物篱地土壤的分散系数和分散率分别较对照降低 25%、8%,蓑草植物篱地土壤的分别降低 17%、8%。说明植物篱能显著增加土壤团聚状况与团聚度,降低土壤分散系数与分散率,进而提高土壤微团聚体的稳定性、增强土壤抗蚀性,且坡度越大效果越明显,但同一坡度下不同植物篱模式之间无显著差异,仅草篱的效应大于灌木篱。

表 3 不同植物篱模式下土壤团聚结构

Table 3 Soil aggregate structure under different patterns of hedgerow

坡度 Slope	处理编号 Treatment No.	团聚状况 (%) Aggregate state	团聚度 (%) Aggregate degree	分散系数 Dispersion coefficient	分散率 (%) Dispersion rate
20°	T1	2.70b	5.12b	0.26a	94.61a
	T2	5.87a	10.76a	0.20b	88.55b
	T3	5.78a	11.32a	0.18b	89.36b
13°	T4	3.45b	6.06b	0.24a	92.59a
	T5	6.89a	11.35a	0.18b	84.92c
	T6	6.79a	11.42a	0.20b	85.57c

2.4 植物篱模式下土壤微团聚体分形维数与理化性质的相关性

很多研究^[6,18,26]显示,土壤微团聚体分形维数与其理化性质密切相关。本文作了土壤微团聚体分形维数与其不同粒级微团聚体含量、理化性质及团聚因子的相关性分析(表 4)。结果表明,20°和 13°坡度下,对照土壤微团聚体分形维数与 0.2 ~ 0.05 mm、0.02 ~ 0.002 mm、<0.002 mm 粒级含量呈极显著正相关,与 2 ~ 0.2 mm、0.05 ~ 0.02 mm 粒级含量呈极显著负相关,与土壤容重呈负相关,但未达显著;与总孔隙度、有机质、全氮、碱解氮、有效磷含量总体上呈显著或极显著正相关;与团聚状况、团聚度呈极线性正相关;与分散系数、分散率总体上呈显著或极显著线性负相关。

植物篱模式下,各植物篱地土壤微团聚体分形维数与其不同粒级微团聚体、理化性质及团聚因子的相关性总体趋势与相应对照土壤的类似,但二者也存在明显差异。首先,因植物篱能改善坡地土壤结

构,减小土壤容重,增加土壤总孔隙度(表 1),使土壤分形维数与总孔隙度、容重等物理性质的相关程度较对照密切,其中紫穗槐模式的容重,紫花苜蓿模式的总孔隙度已达显著水平。其次,分形维数与其不同粒级微团聚体、养分及团聚因子的相关系数小于相应的对照土壤,特别是分散系数与分散率,仅香根草与蓑草植物篱模式的达显著。这可能是植物篱虽能通过拦截等作用、返还的地上生物量等方式提高土壤砂粒组团聚体与微团聚体含量,但植物篱与农作物的间作模式使土壤不同微团聚体、养分及团聚因子在整个坡面上不像对照土壤呈单调增加或减小趋势,而是在篱带、篱前出现突然增加或减小的“跳跃”状况,从而减弱了植物篱地土壤微团聚体分形维数与土壤微团聚体、养分及团聚因子的相关程度。

因此,植物篱-农作坡耕地土壤微团聚体分形维数也能在一定程度上表征土壤物理性质的优劣、养分肥力的高低以及抗蚀能力的强弱。

表 4 植物篱模式下土壤微团聚体分形维数与理化性质及团聚结构相关性

Table 4 Correlation of fractal dimension of soil micro-aggregate with physicochemical properties and aggregate structure under different patterns of hedgerow

因子 Factors		处理编号 Treatment No.					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
微团聚体	2 ~ 0.2	-0.958 **	-0.674 *	-0.594 *	-0.958 **	-0.871 **	-0.666 *
粒级	0.2 ~ 0.05	0.982 **	0.496	0.648 *	0.946 **	0.667 *	0.450
micro-aggre	0.05 ~ 0.02	-0.973 **	-0.046	0.260	-0.969 **	0.360	0.406
gate size (mm)	0.02 ~ 0.002	0.917 **	-0.464	-0.256	0.909 **	0.097	0.274
	< 0.002	0.990 **	0.958 **	0.960 **	0.981 **	0.986 **	0.985 **
容重 Bulk density		-0.201	-0.574 *	-0.405	0.207	-0.486	-0.397
总孔隙度 Total porosity		0.701 *	0.154	0.779 **	0.267	0.554 *	0.590 *
有机质 Organic matter		0.801 **	0.589 *	0.541 *	0.908 **	0.535 *	0.571 *
全氮 Total N		0.855 **	0.728 **	0.735 **	0.884 **	0.561 *	0.649 *
碱解氮 Alkaline hydrolytic N		0.887 **	0.858 **	0.884 **	0.914 **	0.701 *	0.660 *
有效磷 Available P		0.780 **	0.502 *	0.663 *	0.902 **	0.675 *	0.379
团聚状况 Aggregate state		0.788 **	0.554	0.638 *	0.785 **	0.655 *	0.613 *
团聚度 Aggregate degree		0.845 **	0.618 *	0.612 *	0.840 **	0.740 **	0.689 *
分散系数 Dispersion coefficient		-0.304	-0.280	-0.282	-0.957 **	-0.513	-0.684 *
分散率 Dispersion rate		-0.697 *	-0.454	-0.528 *	-0.685 *	-0.380	-0.448

3 讨论

土地利用方式会影响土壤微团聚体组成及剖面分布。刘梦云等^[27]发现,灌木林地、人工草地和天然草地土壤中 1 ~ 0.01 mm 微团聚体含量较果园和耕地土壤中的高。刘晔等^[28]研究指出,林地、柞蚕园地和耕地三种利用方式下,表层土壤 < 0.01 mm 微团聚体含量和特征微团聚体比例高低顺序为,耕地 > 柞蚕园地 > 林地,而 0.01 ~ 0.25 mm 微团聚体含量却相反。林草地土壤大粒级微团聚体含量大于农耕地,表明随干扰程度的增强,土壤大粒级微团聚体含量减小,小粒级微团聚体所占比例则增大。本研究发现,20°和 13°坡地植物篱-农作模式土壤中 < 0.002 mm 和 0.2 ~ 0.05 mm 粒级微团聚体含量显著高于常规轮作模式,即微团聚体总量明显提高。虽然植物篱-农作土地利用方式同时增加了大、小粒级微团聚体的含量,但是以 0.2 ~ 0.05 mm 粒级为主,与刘梦云等^[27]和刘晔等^[28]的研究结论相似,但其机理有所不同。植物篱-农作土地利用方式主要是因

为植物篱的拦截等作用增加了土壤中 < 0.002 mm 黏粒含量,在微生物与少量篱植物的枯落物等的进一步作用下使土壤颗粒胶结,而灌木林地、天然草地等主要是因为地表年枯落物量大,增加了土壤有机质含量,经过微生物的作用使土壤颗粒胶结,改善土壤结构。可能正因为如此,不同植物篱模式对土壤微团聚体组成的影响无显著差异,只是草篱略优于灌木篱。

土壤团粒分形维数除了能表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度^[17],还可有效地表征土壤理化性质的变化趋势^[29]。很多学者就此问题做了探讨,但研究结果不尽一致。龚伟等^[6]和张昌顺等^[26]认为,林地土壤微团粒分形维数与容重、全磷呈显著正相关,与总孔隙度、有机质、全氮、全磷、有效磷、碱解氮呈显著负相关。张超等^[18]则认为林草地根际土壤微团粒分形维数与有机质、全氮、全磷、有效磷、碱解氮呈显著正相关。本研究中植物篱-农作坡耕地微团粒分形维数与土壤理化性质的关系同龚伟等^[6]和张昌顺等^[26]的研究结论相反,与张超等^[18]的结论一致,可能是土地利用类型与土壤性质

的差异所致。龚伟等研究的林地土壤有机质丰富,达到 $27 \sim 116 \text{ g kg}^{-1}$ [6,26],有机-无机物质经多次胶结复合后形成的土壤微团聚体以大粒级为主,而分形维数与大粒级微团聚体含量呈显著负相关。本研究中紫色土与黄土丘陵退耕还草地的土壤有机质含量较少,低于 10 g kg^{-1} ,土壤养分主要靠无机胶体即黏粒级微团聚体保蓄,而分形维数与小粒级微团聚体含量呈负相关。

土壤团粒的分形维数也能表征土壤结构体的稳定性。通常团粒结构的分形维数愈小,土壤团聚性越强,结构越稳定 [30],其抗蚀能力也越强 [25]。本研究表明,除紫穗槐植物篱外,香根草等植物篱地土壤微团粒分形维数与团聚状况、团聚度呈显著或极显著正相关,各植物篱地土壤微团粒分形维数与分散系数、分散率呈负相关,其中香根草与蓼草植物篱模式达显著,说明植物篱-农作坡耕地土壤团粒分形维数也能在一定程度上反映团聚结构的好坏与抗蚀能力的强弱,同一坡度下,分形维数越高,团聚状况与团聚度越高,分散系数与分散率越低,土壤抗蚀能力越强,这与张超等 [18] 的研究结论一致。

4 结 论

与传统横坡农作模式相比,植物篱能显著提高 $< 0.2 \text{ mm}$ 粒级土壤微团粒含量,尤其是 $0.2 \sim 0.05 \text{ mm}$ 粒级。植物篱降低了坡耕地土壤小粒级微团聚体在下坡位的相对富集程度,优化了土壤大小粒级微团聚体的坡面分布。

与传统横坡农作模式相比,植物篱也能显著提高土壤微团聚体分形维数与团聚度、团聚状况。径流小区坡面自下而上,对照土壤微团聚体分形维数逐渐降低,植物篱地土壤的呈波浪式降低,且一般篱带下高于作物带。

紫色丘陵区植物篱-农作模式下,土壤微团聚体分形维数随黏粒粒级微团聚体比例、总孔隙度、有机质含量、以及团聚度的增加而增大,随砂粒级团粒、容重、分散系数和分散率的增加而减小,表明土壤微团聚体分形维数能反映坡耕地土壤物理性质的优劣、养分肥力的高低以及抗蚀能力的强弱。

参 考 文 献

[1] 袁颖红,李辉信,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤性水稻土

微团聚体有机碳汇的影响. 生态学报,2004,24(12):2 961—2 965. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil(In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004,24(12):2 961—2 965

- [2] Liu X L, He Q, Zhang H L, et al. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients. Pedosphere,2010, 20(5): 666—673
- [3] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控. 北京: 科学出版社, 1991. Chen E F. The material basis of soil fertility and its regulation(In Chinese). Beijing: Science Press, 1991
- [4] 徐文远,刘玉花,王晓春,等. G111 公路讷嫩段 9 种护坡灌木根系增强土壤抗蚀性比较. 水土保持学报,2011,25(2):72—77. Xu W Y, Liu Y H, Wang X C, et al. Comparison of the soil anti-erodibility enhanced by nine shrub roots at the section from Nehe to Nenjiang of the G111 highway(In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2):72—77
- [5] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义. 土壤学报,1994,31(1):18—25. Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil micro-aggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1):18—25
- [6] 龚伟,胡庭兴,王景燕,等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究. 土壤学报,2007,44(3):571—575. Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Fractal features of soil micro-aggregates in soils under natural and regenerated evergreen broadleaved forests in south Sichuan Province(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 571—575
- [7] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对小麦-玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响. 土壤学报,2011,48(6):1 141—1 148. Gong W, Yan X Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on composition and fractal feature of soil micro-aggregates under a wheat-maize cropping system(In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011,48(6):1 141—1 148
- [8] Sun H, Tang Y, Xie J S. Contour hedgerow intercropping in the mountains of China: A review. Agroforest Syst, 2008, 73:65—76
- [9] 廖晓勇,罗承德,陈义相,等. 陡坡地饲草玉米生物篱的生态效益研究. 农业环境科学学报,2009,28(3):633—638. Liao X Y, Luo C D, Chen Y X, et al. Ecological effects of forage maize hedgerow on abrupt slope land (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(3):633—638
- [10] 孙辉,唐亚,何永华,等. 高固氮植物篱模式对坡耕地土壤养分的影响. 中国农业生态学报,2002,6(2):79—82. Sun H, Tang Y, He Y H, et al. Studies on soil nutrient redistribution under contour hedgerow system(In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 6(2):79—82
- [11] Walter C, Merot P, Layer B, et al. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. Soil Use and Management,2003,19(3): 201—207
- [12] Lin C W, Tu S H, Huang J J, et al. 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(2):307—312
- [13] Oyedele D J, Awotoye O O, Popoola S E. 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(8): 736—739
- [14] 王海明, 陈治谏, 廖晓勇, 等. 三峡库区坡耕地植物篱技术对土壤特性的影响. *安徽农业科学*, 2009, 37(2): 692—694. Wang H M, Chen Z J, Liao X Y, et al. Study on soil nutrient in the slope croplands by applying plant hedgerows techniques in Three Gorges Reservoir area(In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(2): 692—694
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry*(In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and technology Press, 2000
- [16] 中国标准出版社. 中国林业标准汇编: 营造林卷. 北京: 中国标准出版社, 1998. Standards Press of China. *The collection of China forestry standardization: Afforestation volume* (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1998
- [17] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. *科学通报*, 1993, 38(20): 1 896—1 899. Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Using weight distribution of soil particle size to express soil fractal features (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1 896—1 899
- [18] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征. *中国农业科学* 2011, 44(3): 507—515. Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Fractal features of rhizosphere soil micro-aggregate and particle-size distribution under different vegetation types in the hilly-gully region of Loess Plateau (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 507—515
- [19] 关连珠, 张伯泉, 颜丽. 不同肥力黑土、棕壤各级微团聚体中胶结物质的组成及其特性. *沈阳农业大学学报*, 1991, 22(1): 55—60. Guan L Z, Zhang B Q, Yan L. Composition and properties of cementing substances in the micro-aggregates of black soils and brown forest soils with different fertility levels(In Chinese). *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1991, 22(1): 55—60
- [20] 陈正刚, 朱青, 王文华, 等. 坡改梯经济植物篱技术的示范效果. *耕作与栽培*, 2006(2): 61—62. Chen Z G, Zhu Q, Wang W H, et al. Economic hedgerow technology of demonstration effect in transforming slope into terrace(In Chinese). *Tillage and Cultivation*, 2006(2): 61—62
- [21] 彭熙, 李安定, 李苇洁, 等. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究. *土壤*, 2009, 41(1): 107—111. Peng X, Li A D, Li W J, et al. Changes of soil physical properties, runoff and soil erosion under different hedgerow system (In Chinese). *Soils*, 2009, 41(1): 107—111
- [22] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(2): 23—29. Xu F, Cai Q G, Wu S A, et al. Effect of contour hedgerows on soil nutrient loss in slopeland (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(2): 23—29
- [23] 王玉川, 陈强, 林超文, 等. 不同植物篱对石灰性紫色土坡耕地土壤微生物学特性影响研究. *土壤*, 2012, 44(1): 73—77. Wang Y C, Chen Q, Lin C W, et al. Microbial features of sloping farmland soil in calcareous purple area affected by different hedgerows treatments in sichuan basin(In Chinese). *Soils*, 2012, 44(1): 73—77
- [24] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. *土壤学报*, 1999, 36(2): 162—167. Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns(In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162—167
- [25] 薛莲, 刘国彬, 张超, 等. 黄土丘陵区人工灌木林土壤抗蚀性演变特征. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3 143—3 150. Xue S, Liu G B, Zhang C, et al. Change of soil anti-erodibility of artificial shrubs in Loess Hilly Area(In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3 143—3 150
- [26] 张昌顺, 范少辉, 漆良华, 等. 闽北典型毛竹林土壤微团聚体分形特征研究. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 170—175. Zhang C S, Fan S H, Qi L H, et al. Fractal features of soil micro-aggregates under typical phyllostachys edulis forests in northern Fujian Province (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 170—175
- [27] 刘梦云, 常庆瑞, 安韶山, 等. 土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 247—250. Liu M Y, Chang Q R, An S S, et al. Features of soil aggregate and tiny aggregate under different land use (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11): 247—250
- [28] 刘晔, 邵日晶, 耿涌, 等. 不同利用方式对棕壤微团聚体组成的影响. *辽宁农业科学*, 2010(4): 1—5. Liu Y, Tai R J, Geng Y, et al. Influence of composition of soil micro-aggregates under different land use types(In Chinese). *Liaoning Agricultural Sciences*, 2010(4): 1—5
- [29] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征. *草地学报*, 2008, 16(4): 396—402. Zhou P, Liu G B, Hou X L. Study on fractal features of soil microaggregates during different restoration stages in the Loess Hilly Region (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(4): 396—402
- [30] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰. 不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 47—51. Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B. Fractal features of soil aggregate and micro-aggregate under different land use (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 47—51

COMPOSITION AND FRACTAL FEATURES OF SOIL MICRO-AGGREGATES IN SLOPING FARMLAND WITH HEDGEROW

Pu Yulin^{1,2,3} Xie Deti^{1,3*} Lin Chaowen⁴ Ding Enjun^{1,3} Zhang Kun^{1,3} Wei Chaofu^{1,3}

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611134, China)

(3 Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area,
Chongqing 400715, China)

(4 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract Based on a long-term (13 a) experiment on effect of hedgerows controlling soil and water loss, composition and fractal features of soil micro-aggregates in slope farmlands with established hedgerows were studied with mathematical statistics. Results show that compared to the pattern of traditional contour cropping, the pattern of contour cropping plus hedgerows obviously increased the content of soil micro-aggregates, <0.2 mm in particle size, especially the fraction of 0.2 ~ 0.05 mm. Hedgerows significantly increased soil micro-aggregate fractal dimension (D) and aggregation degree, reduced relative enrichment of soil micro-aggregates small in particle size at lower slopes, and optimized slope distribution of soil large-and small-sized micro-aggregates. The soil micro-aggregate D values reflect soil physical properties, soil fertility, and erosion-resistance of slopelands under the pattern of contour cropping plus hedgerow in the purple hill region.

Key words Hedgerows; Soil micro-aggregates; Fractal features; Slope distribution