

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

张超^{1,3}, 刘国彬¹, 薛蕙^{1,2}, 宋籽霖², 张昌胜²

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:【目的】研究黄土丘陵区坡耕地退耕后不同植被根际土壤微团聚体及颗粒的分形特征, 为该地区植被恢复中土壤质量评价和生态恢复的持续健康发展提供科学依据。【方法】通过室内分析, 运用分形理论, 研究黄土丘陵区墩山小流域天然草地、人工草地和人工灌木等 6 种植被根际土壤微团聚体以及颗粒组成的分形特征。【结果】黄土丘陵区坡耕地退耕后, 不同植被对土壤微团聚体以及颗粒组成影响不同。无论是根际还是非根际, 天然草地 0.25—0.05 mm、0.05—0.01 mm 微团聚体含量以及土壤团聚状况、团聚度均高于人工灌木和人工草地, 而 0.25—0.05 mm、0.05—0.01 mm 土壤颗粒含量以及分散系数、分散率低于人工灌木和人工草地, 根际微团聚体分形维数和颗粒分形维数高于人工灌木和人工草地。除柳枝稷外, 根际土壤团聚状况和团聚度高于非根际, 分散系数和分散率低于非根际; 不同植被根际微团聚体分形维数和颗粒分形维数均低于非根际土。相关性分析表明, 与非根际相比, 根际土壤微团聚体及颗粒分形维数与土壤基本理化性质相关性更显著。【结论】黄土丘陵区坡耕地退耕后, 天然草地对于土壤微团聚体的改善作用优于人工灌木和人工草地。与非根际相比, 根际土壤具有更好团聚结构, 而且根际土壤分形特征能更好反映土壤性质的变化规律, 因此可作为该地区植被恢复过程中土壤质量评价的指标。

关键词: 黄土丘陵区; 根际; 微团聚体; 分形维数

Fractal Features of Rhizosphere Soil Microaggregate and Particle-Size Distribution Under Different Vegetation Types in the Hilly-Gully Region of Loess Plateau

ZHANG Chao^{1,3}, LIU Guo-bin¹, XUE Sha^{1,2}, SONG Zi-lin², ZHANG Chang-sheng²

(¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi; ²Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi; ³Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: 【Objective】The research was made to provide scientific guidance for the sustainable development of ecological restoration and the evaluation of soil quality by studying fractal features of rhizosphere soil microaggregate and particle-size distribution under different vegetation types on abandoned slope cropland in the hilly-gully region of Loess Plateau. 【Method】In this paper, the fractal theory was applied to analyze the fractal features of rhizosphere soil microaggregate and particle-size distribution under natural grassland, artificial grassland and artificial shrubland in Dunshan watershed through experimental analysis. 【Result】The results showed that the effect of different plants on the soil microaggregate and particles was different after slope cropland was abandoned. Whatever in rhizosphere or non-rhizosphere soil, 0.25-0.05 mm, 0.05-0.01 mm class size microaggregate, aggregate state and aggregate degree in natural grassland was higher than that in artificial shrubland and artificial grassland, the content of 0.25-0.05 mm, 0.05-0.01 mm particle, dispersion coefficient and dispersion rate was lower than that in artificial shrubland and artificial grassland. With the exception of *Panicum virgatum*, a higher aggregate state and aggregate degree was found in rhizosphere compared with non-rhizosphere soil where the dispersion coefficient and dispersion rate was observed. Microaggregate

收稿日期: 2010-06-29; 接受日期: 2010-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(40801094)、国家“973”计划项目(2007CB407205)、中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-05)、西北农林科技大学 2009 年基本科研业务费青年项目(QN2009080)

联系方式: 张超, E-mail: zhangchaolynn@163.com. 通信作者刘国彬, E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

and particle fractal dimension in rhizosphere was lower than that in non-rhizosphere soil. Correlation analysis indicated a more significant correlation between rhizosphere microaggregate, particle fractal dimension and soil physico-chemical properties than non-rhizosphere soil. 【Conclusion】 In the hilly-gully region of Loess Plateau, the improvement of natural grassland of soil microaggregate is more significant than artificial shrubland and artificial grassland after slope cropland was abandoned. Compared to the non-rhizosphere soil, the aggregate structure in rhizosphere is more favorable and the fractal feature can better reflect the change of soil properties, thus it can be used for evaluating the soil quality during the revegetation in this region.

Key words: hilly-gully region of Loess Plateau; rhizosphere; microaggregate; fractal dimension

0 引言

【研究意义】土壤作为一种由不同颗粒组成、具有不规则形状自相似结构的多孔介质，具有一定的分形特征^[1]。近 20 年来，随着分形理论的提出^[2]，其逐渐被应用到土壤的研究当中，这为量化分析土壤结构与功能提供了有效的研究工具。黄土高原丘陵区地形破碎，自然植被遭到破坏，土壤结构疏松，是中国水土流失严重的地区之一，该区也是国家退耕还林还草及生态建设的重点区域。近年来开展的生态建设和退耕还林（还草）生态工程极大地改善了该区的生态环境，使得该区的土壤质量发生一些变化。研究黄土丘陵区不同植被根际土壤微团聚体及颗粒分形特征对于该地区的土壤质量评价具有重要意义。【前人研究进展】国内外学者就土壤分形特征进行了大量研究^[3-4]。杨培岭等^[5]提出用粒径的重量分布取代粒径的数量分布来直接计算粒径分布的分形维数，从而表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度。吴承桢等^[6]分别用分形模型研究不同经营模式下的土壤团粒结构的分形特征，表明土壤团粒分形特征可作为土壤质量评价指标之一。安韶山等^[7]则运用分形理论探讨了黄土高原植被群落与土壤团聚体之间的关系。【本研究切入点】众多研究表明黄土丘陵区坡耕地退耕后，天然草地或人工种植草地和灌木均可提高土壤的物理性质^[7-9]，从而达到恢复土壤结构的目的。然而，这些研究大多集中在非根际土壤团粒结构^[10-11]、水稳性团聚体^[12-13]和颗粒组成^[14-16]等方面，而对于土壤中物质交换频繁、生化反应最为强烈的区域——根际的研究相对较少。【拟解决的关键问题】本文以黄土丘陵区不同植被类型根际土壤为研究对象，分析根际、非根际土壤微团聚体以及颗粒分形特征的变化规律，探讨其与土壤理化性质之间的关系，从而为黄土高原土壤质量评价和生态恢复的持续健康发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持实验站的墩山（109°19′23″E, 36°51′30″N），海拔为 1 330 m；多年平均降雨量为 510 mm，但年际变化大且年内分配不均，其中 60%以上集中于 7、8、9 月；地形破碎，沟壑纵横，属黄土高原丘陵沟壑地貌，亦为典型的侵蚀环境；土壤为黄土母质上发育的黄绵土，土壤抗冲抗蚀能力差，水土流失严重；土壤质地类型为粉砂壤土，砂粒（2.00—0.05 mm）含量占 19.0%，粉粒（0.05—0.02 mm）含量占 65.2%，黏粒（<0.02 mm）含量占 15.8%。流域植被属于暖温带落叶阔叶林区向暖温带草原区过渡的森林草原植被。1938—1973 年，由于毁林开荒及人类活动的影响，地带性植被已经破坏殆尽，流域生态系统严重退化。

1.2 样地选择和样品采集

根据流域地貌特征、植被以及土地利用状况，以典型性和代表性为原则，在流域内选择种植前均为坡耕地，坡度坡向相似，年限均为 8 年的人工灌木林，包括柠条林（*Caragana korshinskii*, CK）、沙棘林（*Hippophae rhamnoides*, HR），人工草地，包括沙打旺（*Astragalus adsurgens*, AD）、柳枝稷（*Panicum virgatum*, PV）和天然草地，包括阿尔泰狗娃花（*Heteropappus altaicus*, HA）、茵陈蒿（*Artemisia capillaries*, AC），共 6 种植被类型，其基本特征及林下植被如表 1。

2008 年 9 月，在各试验样地选取 3 个 20 m×20 m 研究小区，在每个小区按“S”形选取 6 点，用铁铲挖取具有完整根系的土体（体积大小视根系本身的范围而定），先轻轻抖落大块不含根系的土壤，然后用力将根表面附着的土壤全部抖落下来，迅速装入塑料袋内（根际土）。同时用土钻在远离植被处钻取 0—20 cm 深的土样，为非根际土。所有土壤样品带回室内充分混匀风干，过 1 mm 和 0.25 mm 筛后测定土壤基本化学性质以及微团聚体和颗粒组成。微团聚体和颗粒组成采用英国马尔文公司的 MS2000 型激光粒度仪测定，有机碳用重铬酸钾氧化外加热法；全氮用半微量凯氏法；pH（水：土=2.5：1，pH 计测定）；全

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of sampling plots

植被类型 Types	主要植被 Main vegetation	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree	海拔 Altitude (m)	土壤类型 Soil type	其它植被 Minor herbaceous
人工灌木 Artificial shrubland	柠条 <i>Caragana korshinskii</i> , CK	N	20°	1257	黄绵土 Loessal soil	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>
	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> , HR	N	22°	1220	黄绵土 Loessal soil	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i> ; 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
人工草地 Artificial grassland	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i> , AD	NE 10°	20°	1235	黄绵土 Loessal soil	兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> ; 苦苣菜 <i>Lactuca indic</i>
	柳枝稷 <i>Panicum virgatum</i> , PV	NW 25°	24°	1282	黄绵土 Loessal soil	早熟禾 <i>Poa annua</i> ; 阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>
天然草地 Natural grassland	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> , HA	NW10°	24°	1311	黄绵土 Loessal soil	长芒草 <i>Stipa bungeana</i> ; 铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>
	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i> , AC	N	27°	1298	黄绵土 Loessal soil	胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> ; 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>

磷用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法 (岛津 2401 紫外可见分光光度计); 速效磷用 Olsen 法, 基本理化性质见表 2。

1.3 土壤团聚度、分散率计算方法

$$X_1 = n_1 - n_2$$

式中, X_1 为土壤团聚状况, n_1 为 >0.05 mm 微团聚体分析值, n_2 为 >0.05 mm 颗粒组成分析值。

$$X_2 = X_1/n_1 \times 100\%$$

式中, X_2 为土壤团聚度, X_1 为团聚状况, n_1 为 >0.05 mm 微团聚体分析值。

$$X_3 = n_3/n_4$$

式中, X_3 为分散系数, n_3 为 <0.001 mm 微团聚体分析值, n_4 为 <0.001 mm 颗粒组成分析值。

$$X_4 = n_5/n_6 \times 100\%$$

式中, X_4 为分散率 (%), n_5 为 <0.05 mm 微团聚体分析值, n_6 为 <0.05 mm 颗粒组成分析值。

1.4 土壤分形维数计算方法

土壤是一种具有自相似结构的多孔介质, 由大于

某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots$) 的土粒构成, 因此可运用分形理论^[16]建立土壤团粒结构的分形模型。小于某一特定测量尺度的累积土粒质量 m_i 与 d_i 之间的分形关系式为:

$$(d_i/d_{\max})^{3-D} = m_i/m_{\max}$$

式中, d_i 为相邻两筛分粒级的粒径平均值 (mm); d_{\max} 为最大土粒的粒径 (mm); m_i 为粒径小于 d_i 的累积土粒质量 (kg); m_{\max} 为各粒级质量的总和 (kg); D 为分形维数。分别以 $\lg(m_i/m_{\max})$ 、 $\lg(d_i/d_{\max})$ 为纵、横坐标作图, 则 $3-D$ 是该试验直线的斜率, 故可用回归分析方法对土壤分形维数 (D) 进行测定。

1.5 数据分析

对所得试验数据用 Excel 和 SPSS 13.0 统计分析软件进行分析处理。

2 结果

2.1 不同植被根际、非根际土壤微团聚体组成及其分形维数

表 2 不同植被土壤基本理化性质

Table 2 Soil physico-chemical properties under revegetated plants

植 被 Vegetation	有机碳 Organic C (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	有效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	pH	容 重 Bulk density (g·cm ⁻³)
柠条 CK	1.87±0.24	0.14±0.02	0.47±0.01	0.27±0.02	15.61±2.21	76.48±0.52	8.81±0.02	1.32±0.08
沙棘 HR	2.77±0.20	0.33±0.02	0.51±0.01	1.95±0.13	25.48±3.15	106.55±2.40	8.76±0.07	1.27±0.02
沙打旺 AD	2.64±0.11	0.27±0.04	0.46±0.01	0.42±0.04	23.28±1.91	73.86±1.13	8.81±0.02	1.46±0.09
柳枝稷 PV	3.11±0.13	0.36±0.02	0.51±0.01	3.25±0.10	25.48±1.39	84.68±0.74	8.85±0.01	1.21±0.03
阿尔泰狗娃花 HA	3.83±0.09	0.48±0.01	0.53±0.02	3.23±0.02	37.53±1.22	80.66±0.55	8.76±0.01	1.21±0.06
茵陈蒿 AC	3.16±0.06	0.38±0.02	0.52±0.02	3.34±0.05	34.17±1.55	78.36±2.05	8.84±0.02	1.14±0.03

土壤微团聚体是团粒结构的初级阶段,具有抵抗机械破坏和调节土壤水、肥、气、热以及生物活动多种功能,其组成影响着土壤养分的吸收和释放,是土壤肥力的一个重要特征^[17]。由表 3 可以看出,坡耕地退耕种植不同植被后,根际、非根际土壤微团聚体及其分形维数差异显著。其中根际 1—0.25 mm 微团聚体变化范围为 0.75%—3.97%,表现为阿尔泰狗娃花、茵陈蒿高于柠条、沙打旺等其它植被,非根际呈现出相似的变化趋势。根际 0.25—0.05 mm 微团聚体变化为 34.19%—38.00%,沙打旺最高,阿尔泰狗娃花和茵

陈蒿次之,非根际表现为阿尔泰狗娃花和茵陈蒿高于其它植被。此外,从表 3 可以看出,根际 0.25—0.05 mm、0.05—0.01 mm 微团聚体含量均高于非根际,而根际 0.01—0.002 mm、0.002—0.001 mm 和 <0.001 mm 微团聚体的含量低于非根际。根际微团聚体分形维数变化范围为 2.41—2.50,变化顺序为阿尔泰狗娃花>茵陈蒿、柳枝稷>沙棘>柠条>沙打旺,非根际分形维数变化范围为 2.50—2.55,阿尔泰狗娃花最高,柠条、沙打旺、沙棘次之,柳枝稷和茵陈蒿最低,各种植被根际微团聚体分形维数均小于非根际。

表 3 不同植被根际、非根际土壤微团聚体组成及其分形维数

Table 3 Microaggregate distribution and fractal dimension in rhizosphere and non-rhizosphere soil under revegetated plants

植被 Vegetation	部位 Position	微团聚体组成 Microaggregate distribution (%)						分形维数 <i>D</i>
		1—0.25 mm	0.25—0.05 mm	0.05—0.01 mm	0.01—0.002 mm	0.002—0.001 mm	<0.001 mm	
柠条 CK	根际 R	2.44±0.25b	35.57±3.86c	53.73±5.77b	2.62±0.34d	1.39±0.17d	4.26±0.43d	2.43±0.02d
	非根际 NR	1.06±0.19d	32.99±4.27d	52.69±4.57b	3.74±0.42b	2.25±0.21c	7.27±0.58b	2.53±0.01b
沙棘 HR	根际 R	0.75±0.12de	34.19±2.86d	55.41±6.01a	3.05±0.27c	1.67±0.32c	4.93±0.27c	2.46±0.01c
	非根际 NR	1.91±0.35b	30.12±2.98e	54.38±7.23a	4.02±0.51a	2.35±0.15b	7.22±0.33b	2.53±0.02b
沙打旺 AD	根际 R	1.36±0.26c	38.00±5.24a	53.16±4.30b	2.32±0.28e	1.33±0.35d	3.83±0.17e	2.41±0.02e
	非根际 NR	1.48±0.22c	33.79±4.25c	51.78±3.78bc	3.56±0.42c	2.20±0.32c	7.21±0.63b	2.53±0.01b
柳枝稷 PV	根际 R	0.97±0.14d	35.55±2.57c	51.59±3.55c	3.68±0.25a	2.19±0.19a	6.03±0.43a	2.48±0.02b
	非根际 NR	1.41±0.25c	35.49±2.98b	51.54±5.69bc	3.42±0.20d	2.06±0.26d	6.07±0.55c	2.50±0.02c
阿尔泰 狗娃花 HA	根际 R	3.97±2.17a	36.92±4.25b	48.66±6.02d	3.31±0.33b	1.86±0.41b	5.29±0.87b	2.50±0.02a
	非根际 NR	2.45±2.28a	35.60±4.64ab	47.91±5.11e	3.90±0.48ab	2.48±0.25a	7.67±0.67a	2.55±0.01a
茵陈蒿 AC	根际 R	2.49±2.47b	37.89±4.56a	50.80±4.68c	3.48±0.52ab	2.00±0.12ab	5.44±0.38b	2.48±0.02b
	非根际 NR	1.89±0.18b	36.01±5.47a	48.68±6.26d	3.41±0.28d	2.05±0.32d	5.97±0.60c	2.50±0.01c

不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著 Different letters in the same column represent statistic significance at 0.05 level. R: Rhizosphere; NR: Non-rhizosphere

2.2 不同植被根际、非根际土壤颗粒组成及其分形维数

土壤颗粒分布影响土壤的水力特性、土壤肥力状况,并与土壤侵蚀和退化直接相关,是重要的土壤物理特性之一。研究表明(表 4),坡耕地退耕种植不同植被后,根际、非根际土壤颗粒组成及其分形维数存在一定差异。根际中 0.25—0.05 mm 和 0.05—0.01 mm 粒径土粒的含量较大,分别占 29.24%—33.79%和 48.94%—53.20%。在土壤根际,0.25—0.05 mm 粒径土粒含量表现为沙打旺植被最高,柳枝稷、柠条次之,阿尔泰狗娃花和沙棘最低;非根际土壤则表现为柳枝稷、柠条和沙打旺植被较高,茵陈蒿、阿尔泰狗娃花次之,沙棘最低。而在根际与非根际土壤中 0.05—0.01 mm 粒径土粒含量均表现为沙棘和柠条植被高于其它

植被。根际土壤中 0.01—0.002 mm、0.002—0.001 mm 和 <0.001 mm 粒径土粒含量表现为阿尔泰狗娃花和茵陈蒿植被均显著高于其它植被,但低于在非根际土壤中的含量。根际颗粒分形维数变化为 2.53—2.61,表现为阿尔泰狗娃花>茵陈蒿>柳枝稷>沙棘>柠条>沙打旺。与非根际相比,根际颗粒分形维数较低。

2.3 不同植被根际、非根际土壤团聚结构变化

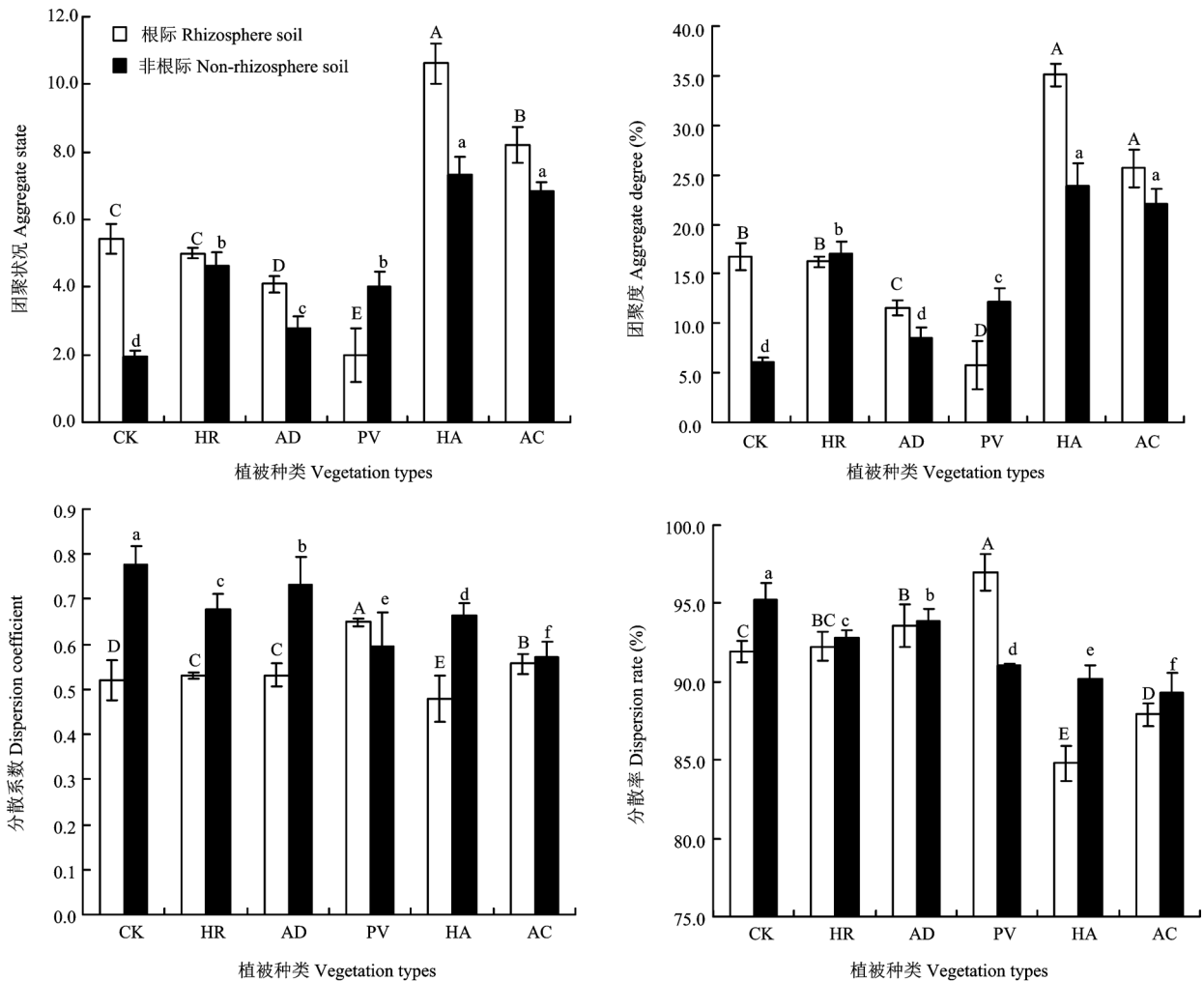
良好的土壤团聚状况是土壤抵抗水土流失的重要保证。团聚结构稳定,土壤抗侵蚀能力强;团聚结构差,土壤透水性能低,抗水抗蚀性则明显减弱。从图可以看出,根际土壤团聚状况和团聚度均表现为阿尔泰狗娃花、茵陈蒿植被>柠条、沙棘植被>沙打旺、柳枝稷植被,即天然草地>人工灌木>人工草地;非根际土壤团聚状况和团聚度则表现为阿尔泰狗娃花植

表 4 不同植被根际、非根际土壤颗粒组成及其分形维数

Table 4 Particle distribution and fractal dimension in rhizosphere and non-rhizosphere soil under revegetated plants

植被 Vegetation	部位 Position	颗粒组成 Particle distribution (%)						分形维数 <i>D</i>
		1—0.25 mm	0.25—0.05 mm	0.05—0.01 mm	0.01—0.002 mm	0.002—0.001 mm	<0.001 mm	
柠条 CK	根际 R	0.34±0.03d	32.23±4.12bc	52.37±6.01a	4.30±0.36e	2.58±0.34d	8.18±0.64d	2.55±0.01e
	非根际 NR	0.97±0.07d	31.13±3.19ab	51.34±4.34b	4.39±0.50e	2.81±0.28d	9.36±1.44c	2.58±0.01d
沙棘 HR	根际 R	0.69±0.70c	29.24±3.79e	53.20±5.65a	4.70±0.30c	2.87±0.32c	9.29±0.63c	2.57±0.01d
	非根际 NR	1.26±0.09c	26.12±2.99e	53.30±3.79a	5.28±0.37b	3.37±0.40b	10.68±1.21ab	2.60±0.02b
沙打旺 AD	根际 R	1.48±0.20b	33.79±2.69a	51.78±7.21b	3.56±0.34f	2.20±0.29e	7.21±0.42e	2.53±0.02f
	非根际 NR	2.77±0.34a	30.06±4.02b	49.33±6.24d	4.50±0.46d	2.99±0.38c	10.36±1.78b	2.60±0.01b
柳枝稷 PV	根际 R	1.57±0.14ab	32.98±3.05b	48.94±4.03d	4.39±0.50d	2.85±0.16c	9.28±1.21c	2.58±0.01c
	非根际 NR	0.79±0.08e	32.11±2.45a	49.32±3.78d	4.55±0.29d	3.06±0.27c	10.18±0.89 b	2.59±0.02c
阿尔泰	根际 R	0.73±0.04c	29.54±4.08e	49.56±4.69cd	5.60±0.43a	3.54±0.47a	11.03±1.01a	2.61±0.01a
狗娃花 HA	非根际 NR	1.51±0.02b	29.24±4.11c	48.47±5.64e	5.52±0.56a	3.68±0.43a	11.59±0.63a	2.62±0.01a
茵陈蒿 AC	根际 R	1.64±0.24a	30.43±3.03d	49.96±3.58c	5.03±0.62b	3.18±0.43b	9.76±0.67b	2.59±0.01b
	非根际 NR	1.66±0.19b	29.38±3.67c	50.07±6.21c	5.11±0.49c	3.35±0.32b	10.43±1.64b	2.60±0.01b

不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著 Different letters in the same column represent statistic significance at 0.05 level



不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著 Different letters represent statistic significance at 0.05 level

图 不同植被根际、非根际土壤团聚结构特征

Fig. Aggregate structure in rhizosphere and non-rhizosphere soil under revegetated plants

被>茵陈蒿植被>沙棘>柳枝稷>沙打旺>柠条;除柳枝稷土壤团聚状况和团聚度根际小于非根际外,其它植被根际土壤团聚状况和团聚度均大于非根际。根际土壤分散系数与分散率表现为柳枝稷最高,阿尔泰狗娃花最低,非根际土壤分散系数与分散率的变化规律大体相似,即柠条、沙打旺、沙棘植被较高,柳枝稷、阿尔泰狗娃花和茵陈蒿较低。与非根际相比,除柳枝稷根际土壤分散系数与分散率较高外,其它植被根际土壤分散系数与分散率均低于非根际。

2.4 不同植被根际、非根际分形维数与土壤理化性质的相关性

对根际、非根际土壤分形维数与理化性质进行相关性分析,见表5。结果表明,根际微团聚体分形维数和颗粒分形维数与土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷、碱解氮以及土壤团聚状况、团聚度呈极显

著正相关关系($P<0.01$),与分散系数、分散率呈极显著负相关;非根际微团聚体分形维数与土壤有效磷呈显著负相关,与分散系数呈极显著正相关($P<0.01$),与其它土壤因子相关性较小,未达到显著水平;颗粒分形维数除与分散系数相关性不显著外,与其它土壤因子呈显著或极显著相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。与非根际相比,根际微团聚体分形维数与土壤因子及团聚结构的相关性均达到显著水平,根际颗粒分形维数的相关系数总体上也高于非根际颗粒分形维数,根际微团聚体分形维数与颗粒分形维数之间也呈极显著相关。以上可以看出,与非根际相比,根际微团聚体分形维数与颗粒分形维数与土壤理化性质及团聚结构关系更为密切,更能反映土壤性质的变化,因此在一定程度上可以作为评价土壤质量的理想指标。

表5 根际、非根际土壤分形维数与理化性质及团聚结构相关性分析

Table 5 Correlation among fractal dimension, physico-chemical properties and aggregate structure in rhizosphere and non-rhizosphere under revegetated plants

因子 Indicators	根际微团聚体分形维数 R-MD	根际颗粒分形维数 R-PD	非根际微团聚体分形维数 NR-MD	非根际颗粒分形维数 NR-PD
根际微团聚体分形维 R-MD	1.000	0.871**	-0.598**	0.373
根际颗粒分形维数 R-PD	0.871**	1.000	-0.193	0.614**
团聚状况 Aggregate state	0.689**	0.874**	-0.119	0.787**
团聚度 Aggregate degree	0.667**	0.846**	-0.081	0.779**
分散系数 Dispersion coefficient	-0.872**	-0.667**	0.725**	-0.408
分散率 Dispersion rate	-0.845**	-0.825**	0.440	-0.677**
有机碳 Organic C	0.668**	0.896**	-0.024	0.816**
全氮 Total N	0.733**	0.809**	-0.050	0.890**
全磷 Total P	0.851**	0.905**	-0.332	0.586*
有效磷 Available P	0.956**	0.894**	-0.493*	0.586*
碱解氮 Available N	0.624**	0.778**	-0.051	0.856**

*表示差异达显著水平($P<0.05$), **表示差异达极显著水平($P<0.01$)

*Correlation is significant at the $P<0.05$ level (2-tailed); **Correlation is significant at the $P<0.05$ level (2-tailed)

3 讨论

良好的微团聚体结构能够抵抗机械扰动(包括耕作)的破坏^[18],特别是在团粒结构水稳性较差的黄土高原区,土壤微团聚体的数量和质量(稳定性、大小等)对于改善土壤结构的作用就显得尤其重要。位于黄土丘陵区坡耕地由于恶劣的环境条件以及长期不合理的耕作活动,水土流失严重,土壤结构遭到破坏,土壤微团聚体结构较差,坡耕地退耕种植植被后,大

量的枯枝落叶和营养元素等物质返回到土壤中,土壤结构得到了改善,然而由于不同植被的枯枝落叶成分不同,以及根系的大小、分布等差异,从而造成不同植被土壤的微团聚体结构不同。刘梦云等^[19]研究结果表明,黄土丘陵区灌木林、农地、天然草地、人工草地等6种土地利用方式中,天然草地更有助于土壤微团聚体的形成。本研究发现无论是根际还是非根际,0.25—0.05 mm、0.05—0.01 mm微团聚体含量以及土壤团聚状况、土壤团聚度均表现为阿尔泰狗娃花和茵

陈蒿植被较高, 而该植被的土壤分散系数和分散率较低。这说明在植被恢复过程中, 天然草地对于土壤大团聚体以及土壤团聚结构的改善作用好于人工灌木和人工草地。这是由于天然草地是在自然条件下植被演替过程中形成的, 是经过长期的物种之间的竞争而生存下来的优势种, 其对外界环境条件的适应性均大大强于人工灌木和人工草地, 而且随着植被演替的进行, 草地由一年生植被演变为多年生植被, 地表年枯落物增加了地表土壤有机物来源, 使土壤颗粒间有机质胶结作用加强, 且多年生植物的地下根系较多, 其根系分布较浅且须根发达^[20], 大多分布在土壤表层, 根在土壤中的穿透和扎伸能力增强, 使土壤结构相对松散、通透性好^[21], 土壤结构得到改善。土壤颗粒组成作为土壤的属性之一, 影响着土壤水分和养分在土壤中的迁移、分布和利用, 继而对植被的组成和结构产生重要的影响^[22]。本研究发现, 无论是根际还是非根际, 人工草地 0.25—0.05 mm 粒径土粒的含量以及人工灌木 0.05—0.01 mm 粒径土粒的含量均大于天然草地, 这说明在土壤颗粒组成方面, 人工草地和人工灌木优于天然草地, 这可能与人工草地和灌木的多层次冠幅结构、地上部分持水量大且每年有大量的凋落物归还土壤、土壤腐殖质积累多, 利于土壤颗粒的形成有关。

分形维数可以在一定程度上在反映土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征, 并揭示其变化规律性^[23]。宫阿都等^[24]研究表明土壤团粒分形维数与其结构及稳定性关系紧密, 即团粒结构的分形维数愈小, 土壤愈具有良好的结构与稳定性。本研究发现, 根际微团聚体分形维数和颗粒分形维数均低于非根际土壤, 这说明与非根际相比, 根际土壤结构较好, 稳定性更强。这是由于根际土壤具有庞大复杂的根系系统, 根系在土壤中不断的穿插和缠结, 有效地加速了土壤团聚结构的形成^[25]。此外, 由于根际土壤紧附于根表面, 其根系强大的合成功能, 在一定程度上促进了更多分泌物的生成^[26], 而这些分泌物对于土壤颗粒具有一定的胶结作用, 从而提高了团聚结构和稳定性, 根际土壤较高的团聚状况和团聚度以及较低的土壤分散系数和分散率也再次证明了这一点。然而, 从图中可发现, 并不是所有植被的根际土壤团聚结构均优于非根际, 柳枝稷根际土壤团聚状况和团聚度显著低于非根际土壤, 而分散系数和分散率高于非根际, 其原因可能与其根系的分布状况以及根际分泌物的组成有关。无论是微团聚体还是颗粒组成, 茵陈蒿和阿尔泰

狗娃花植被的根际土壤分形维数均高于其它植被, 即天然草高于人工草地和人工灌木, 这与刘梦云等^[19]研究结果相反。这可能与不同的土壤性质有关, 刘梦云等研究主要针对于根外土, 而本研究集中于根际土。由于根系在生长过程中和根际土壤进行着频繁的物质交换, 不断改变根系周围环境的养分、水分、pH、氧化还原电位和通气状况^[27], 从而引起根际范围内的土壤环境不同于根际外的土壤。

4 结论

4.1 黄土丘陵区坡耕地种植植被后, 土壤微团聚体以及颗粒组成变化显著。不同植被对土壤微团聚体以及颗粒组成影响不同。无论是根际还是非根际, 天然草地 0.25—0.05 mm、0.05—0.01 mm 微团聚体含量以及土壤团聚状况、团聚度均高于人工灌木和人工草地, 而 0.25—0.05 mm、0.05—0.01 mm 土壤颗粒含量以及分散系数、分散率低于人工灌木和人工草地, 根际微团聚体分形维数和颗粒分形维数高于人工灌木和人工草地。

4.2 除柳枝稷外, 根际土壤团聚状况和团聚度高于非根际土壤, 分散系数和分散率低于非根际土壤; 不同植被根际微团聚体分形维数和颗粒分形维数均低于非根际土壤。从以上可以看出, 根际比非根际具有更好的土壤结构以及更强的稳定性。

4.3 相关性分析表明, 与非根际相比, 根际土壤分形特征与土壤理化性质相关性更显著, 能更好反映土壤性质的变化规律, 因此可作为黄土丘陵区植被恢复过程中土壤质量评价的指标。

References

- [1] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. 土壤与环境, 2000, 9(4): 263-265.
Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4): 263-265. (in Chinese)
- [2] Mandelbrot B B. *Fractals, Form, Chance, and Dimension*. San Francisco: Freeman, 1977: 1-234.
- [3] Turcotte D L. Fractal fragmentation. *Geography Research*, 1986, 91 (12): 1921-1926.
- [4] Arya L M, Paris J F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 1023-1031.
- [5] 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): 1896-1899.
- Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Using weight distribution of soil particle size to express soil fractal features. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896-1899. (in Chinese)
- [6] 吴承祯, 洪 伟. 不同经营模式土壤团聚结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-166.
- Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162-166. (in Chinese)
- [7] 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. 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. (in Chinese)
- [8] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征. 地理研究, 2007, 26(3): 518-525.
- Jia X H, Li X R, Li Y S. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area. *Geographical Research*, 2007, 26(3): 518-525. (in Chinese)
- [9] 薛 蕙, 李占斌, 李 鹏, 刘国彬, 戴全厚. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤抗蚀性的影响. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 1): 69-72.
- Xue S, Li Z B, Li P, Liu G B, Dai Q H. Effects of different vegetation restoration models on soil anti-erodibility in loess hilly area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (Supply.1): 69-72. (in Chinese)
- [10] 朱冰冰, 李占斌, 李 鹏, 薛 蕙. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤团聚分形特征及抗蚀性演变. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 377-382.
- Zhu B B, Li Z B, Li P, Xue S. Research on the fractal features of soil aggregate and dynamic changes in anti-erodibility during the process of vegetation recovery on the loess hilly areas. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(4): 377-382. (in Chinese)
- [11] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚结构分形特征. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- Ding W F, Ding D S. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau. *Geographical Research*, 2002, 21(6): 700-706. (in Chinese)
- [12] 戴全厚, 刘国彬, 薛 蕙, 余 娜, 张 超. 侵蚀环境人工刺槐林土壤水稳性团聚体演变及其养分效应. 水土保持通报, 2008, 28(4): 56-59.
- Dai Q H, Liu G B, Xue S, Yu N, Zhang C. Dynamics of soil water-stable aggregates in the restoration process of artificial *Robinia Pseudoacacia* under erosion environment. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4): 56-59. (in Chinese)
- [13] 马祥华, 焦菊英, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕植被恢复地土壤水稳性团聚体的变化特征. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 69-74.
- Ma X H, Jiao J Y, Bai W J. The changes of soil water-stable aggregates in abandoned lands during vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 69-74. (in Chinese)
- [14] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 赵 坤. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
- Dang Y A, Li S Q, Wang G D, Zhao K. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(9): 74-78. (in Chinese)
- [15] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its application to land use. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545-550. (in Chinese)
- [16] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 35-41.
- Dong L L, Zheng F L. Fractal characteristics of soil particles in the hilly-gully regions of the Loess Plateau, North of Shaanxi, China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2): 35-41. (in Chinese)
- [17] 沈 慧, 姜凤岐, 杜晓军, 郭 浩, 王世忠. 水土保持林土壤肥力及其评价指标. 水土保持学报, 2000, 14(2): 60-65.
- Shen H, Jiang F Q, Du X J, Guo H, Wang S Z. Study on soil fertility of water and soil conservation forest and its evaluation indexes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 60-65. (in Chinese)
- [18] 史 奕, 陈 欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1491-1494.
- Shi Y, Chen X, Shen S M. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1491-1494. (in Chinese)
- [19] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰. 不同土地利用方式的土壤团聚及微团聚体的分形特征. 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 microaggregate under different land use. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 47-51. (in Chinese)
- [20] 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. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(4): 396-402. (in Chinese)
- [21] 刘金福, 洪 伟. 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征. 山地学报, 2001, 19(6): 565-569.
- Liu J F, Hong W. Study on fractal feature of soil fertility under different original *Castanopsis kanakamii* stands. *Journal of Mountain Research*, 2001, 19(6): 565-569. (in Chinese)
- [22] Stark J M. Causes of soil nutrient heterogeneity at different scales//Caldwell M M, Percy R W. *Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants*. California: Academic Press, 1994: 255-284.
- [23] 周 萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 75-82.
- Zhou P, Liu G B, Hou X L. Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 75-82. (in Chinese)
- [24] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112-115.
- Gong A D, He Y R. 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*, 2001, 15(3): 112-115. (in Chinese)
- [25] 张 超, 刘国彬, 薛 蕙, 余 娜. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤抗蚀性演变过程. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 1-7.
- Zhang C, Liu G B, Xue S, Yu N. Evolution of soil anti-erodibility of *Robinia pseudoacacia* L. plantation at different ages in hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(2): 1-7. (in Chinese)
- [26] 张学利, 杨树军, 张百习, 袁春良. 不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比. 福建林学院学报, 2005, 25(1): 80-85.
- Zhang X L, Yang S J, Zhang B X, Yuan C L. Comparative research on rhizosphere soil and non-rhizosphere soil properties in different stand age of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixation forest. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2005, 25(1): 80-85. (in Chinese)
- [27] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全, 俞新妥. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性的研究. 生态学报, 1998, 18(2): 20-23.
- Yang Y S, He Z M, Zou S Q, Yu X T. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis Kauakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 20-23. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)