

## 紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下土壤团聚体形态结构、组成及有机碳特征

张家洋, 蔺芳, 詹乃才, 任敏

(新乡学院生命科学技术学院, 河南新乡 453000)

**摘要:** 通过豫北地区 6 a 定位试验, 以撂荒地作为对照, 研究了紫花苜蓿 *Medicago sativa* 单播、无芒雀麦 *Bromus inermis* 单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播 3 种不同的栽培模式对土壤团聚体组成与有机碳垂直分布的影响, 并探讨了两者的相互关系。结果表明: 人工草地建植后, 土壤团聚体形态结构改善较为明显; 土壤机械稳定性团聚体组成以 5.00~3.00 和 3.00~2.00 mm 粒径为主(比例为 35.55%~57.12%); 土壤水稳性团聚体组成以 <0.25 mm 和 3.00~1.00 mm 为主(比例为 53.47%~74.47%); 无论机械稳定性团聚体还是水稳性团聚体, 不同栽培模式下土壤团聚体质量分形维数的大小顺序依次为撂荒地、无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播; 土壤总有机碳、活性有机碳和腐殖质碳质量分数均随土层的增加而降低, 各栽培模式下 0~40 cm 土壤有机碳质量分数从大到小依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、撂荒地; Pearson 双侧检验结果显示: 总有机碳、活性有机碳以及腐殖质碳质量分数两两之间均具有极显著的相关性( $P < 0.01$ )。机械稳定性和水稳性团聚体的分形维数值均与小粒径团聚体(<0.25 mm)呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。结论: 相对于撂荒地, 人工建植草地后能够显著改变土壤团聚体的分布, 促进土壤固碳, 其中又以紫花苜蓿/无芒雀麦混播为最佳栽培模式。图 3 表 4 参 30

**关键词:** 土壤学; 栽培模式; 土壤团聚体; 有机碳; 分形维数; 相关性

**中图分类号:** S152.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2019)06-1077-10

## Morphological structure, composition, and organic carbon characteristics of soil agglomerations for alfalfa and ryegrass planting patterns

ZHANG Jiayang, LIN Fang, ZHAN Naicai, REN Min

(School of Life Science and Technology, Xinxiang University, Xinxiang 453000, Henan, China)

**Abstract:** Through consecutive location tests in northern Henan Province over 6 years and compared with a waste land, the effects of different planting patterns for alfalfa (*Medicago sativa*) and ryegrass (*Bromus inermis*) on the composition of soil aggregate structure and vertical distribution of organic carbon were studied using a correlation analysis. The relationship between the two was also discussed. Results showed that morphological structure of the soil aggregates changed after an artificial grassland was planted. Soil dry-sieving aggregates consisted mainly of 2.00–3.00 mm and 3.00–5.00 mm particle sizes (proportion: 35.55%–57.12%); whereas, soil water-stable aggregates were composed of particles <0.25 mm and 1.00–3.00 mm in size (proportion: 53.47%–74.47%). The order of fractal dimensions for both dry-sieving aggregates and water-stable aggregates was wasteland > ryegrass single-sowing > alfalfa single-sowing > alfalfa/ryegrass mixed-sowing. Total organic carbon content, soil active organic carbon, and humus carbon decreased with an increase of soil depth, and organic carbon content in the 0–40 cm soil layer was alfalfa/ryegrass mixed-sowing > alfalfa single-sowing > ryegrass single-sowing > wasteland. Also, a two-sided test for pears showed a highly significant correlation ( $P < 0.01$ ) to

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2019-01-30

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102110192, 162102110028)

作者简介: 张家洋, 副教授, 从事土壤生态修复研究。E-mail: skxsyszr@163.com。通信作者: 任敏, 教授, 从事植物生态学研究。E-mail: 451923619@qq.com

total organic carbon and active organic carbon( $r = 0.975$ ), active organic carbon and humus carbon( $r = 0.975$ ), and total organic carbon and humus carbon ( $r = 0.954$ ); and fractal dimension values were highly significant ( $P < 0.01$ ) and positively correlated to small-particle size aggregates ( $< 0.25$  mm) for both dry-sieving aggregates ( $r = 0.972$ ) and water-stable aggregates ( $r = 0.980$ ). In conclusion, compared to wasteland, the distribution of soil aggregates was greatly changed and soil carbon sequestration was promoted after artificial grassland was planted with alfalfa/ryegrass mixed-sowing being the best planting pattern. [Ch, 3 fig. 4 tab. 30 ref.]

**Key words:** soil science; planting pattern; soil aggregates; organic carbon; fractal dimension; correlation analysis

土壤团聚体是指由许多土壤单粒在有机碳的黏结下形成的土壤构造, 它的结构组成与土壤有机碳有着紧密的联系<sup>[1]</sup>。土壤团聚体重要的表征形式主要是土壤机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体<sup>[1]</sup>。土壤总有机碳即有机质中的总碳含量, 在土壤碳汇中具有重要意义。土壤总有机碳根据化学组分的不同可分为活性有机碳和腐殖质碳等。其中, 活性有机碳是土壤总有机碳中不稳定的部分, 是植物营养元素的直接来源。腐殖质碳是土壤总有机碳经过微生物分解转化后形成的较为稳定的部分, 因两者具有较高的生物利用率与损失率, 因而能显著影响土壤的理化性质<sup>[2]</sup>。土壤团聚体组成的变化与有机碳的变化紧密相关, 两者作为重要的土壤属性, 在保持土壤生物活性、通气性、渗透性和抗侵蚀能力等方面起着十分重要的作用, 目前已被广泛认为是评价土壤肥力或土壤质量的综合指标<sup>[3-4]</sup>。因此, 开展土壤团聚体组成及有机碳特征研究具有十分重要的意义。紫花苜蓿 *Medicago sativa* 因其粗蛋白含量高、固氮能力强而享有“牧草之王”的美誉, 是世界范围内普遍种植的豆科 Leguminosae 牧草<sup>[5]</sup>。无芒雀麦 *Bromus inermis* 适口性好, 是可消化物质产量较高的禾本科 Gramineae 牧草之一<sup>[6]</sup>。目前, 两者已成为豫北地区不可替代的战略保障性饲草。近年来, 许多学者对土壤团聚体组成及有机碳特征开展了广泛研究, 但大多数的研究对象是林地或农田土壤<sup>[7-8]</sup>, 且多集中于不同母质<sup>[9-10]</sup>、施肥模式<sup>[11-12]</sup>和施肥量<sup>[13-14]</sup>等, 而对不同栽培模式草地土壤团聚体组成和有机碳特征的研究较少。笔者曾对豫北地区紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下沙化土壤微生物量和酶活性进行了研究<sup>[15]</sup>。本研究对该地区紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下, 土壤团聚体组成和有机碳的影响以及两者的相互关系, 旨在为该区人工草地建植及土壤环境改善提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于河南省新乡市洪门镇原堤村(35°16'N, 113°57'E)。地处豫北地区, 北临余河通道, 南临黄河, 属黄河冲积平原, 年平均气温为 14.2 °C, 年平均降水量 573.4 mm, 年均日照时数 2 400.0 h, 年平均相对湿度 68%, 无霜期 220.0 d。试验地土壤类别为砂壤土, 0~40 cm 土壤基础理化性质如下: 砂粒 44%, 粉粒 38%, 黏粒 18%, 全氮 1.13 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.69 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 13.42 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 31.50 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 12.05 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 88.02 mg·kg<sup>-1</sup>, 有机质 9.08 g·kg<sup>-1</sup>, 田间持水量 28.54%, 土壤 pH 7.94。

### 1.2 试验设计

2012~2017 年连续 6 a 进行试验, 随机区组设计, 设 4 个处理, 即: 以撂荒地为对照, 设紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播 3 种不同的栽培模式(图 1), 每个处理 3 次重复, 共 12 个小区, 小区面积 20 m<sup>2</sup>(4 m × 5 m), 总面积 240 m<sup>2</sup>。2012 年 10 月播种, 紫花苜蓿的单播播量为 15 kg·hm<sup>-2</sup>, 无芒雀麦的单播播量为 18 kg·hm<sup>-2</sup>, 紫花苜蓿/无芒雀麦混播播量均为对应单播播量的一半。播种方式为条播, 行距 25 cm。试验期间免耕处理, 不施用任何肥料, 每年定期进行浇水与人工除草。

### 1.3 土壤样品采集及测定

于 2017 年 11 月, 以 5 点取样法, 用土钻分别取 0~10, 10~20, 20~30 和 30~40 cm 4 个土层的原状土样, 每个深度 3 个重复, 将土样中的杂草剔除后, 装入自封袋, 用于土壤机械稳定性团聚体、水稳性团聚体和有机碳质量分数的实验室测定。

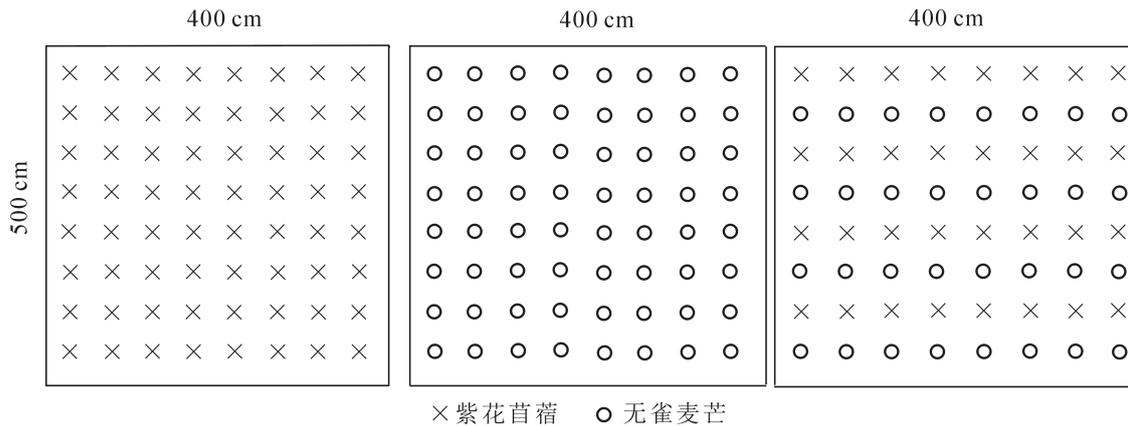


图 1 研究区域及样方布置示意图

Figure 1 Schematic map of the study area and quadrat

团聚体形态和表面特征观察: 在风干处理并沿自然裂缝掰开的原状土样(0~40 cm)中, 选择自然断面并且平整的土样, 用导电胶粘于铜台上并编号, 然后进行喷金处理, 用 SS 550 型号扫描电镜进行观察。

团聚体测定步骤: 按孔径大小(10.00, 7.00, 5.00, 3.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 mm)由上至下套好筛组, 将已称量(200 g)的土样倒入最上部筛子中, 对筛组左右摆动进行筛分, 机械稳定后分成了 9 个粒级( $\geq 10.00$ , 10.00~7.00, 7.00~5.00, 5.00~3.00, 3.00~2.00, 2.00~1.00, 1.00~0.50, 0.50~0.25 和  $< 0.25$  mm(上限排除法)。对各级筛子中的土样称量, 计算机械稳定性团聚体组成。取机械稳定性后所得的各粒级土样 50 g, 将筛组(从上到下依次是 5.00, 3.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 mm)放入水桶中并置于振荡架上, 电动振荡(30 min)后将筛组轻轻拿出水面, 将各级筛上的团聚体洗入蒸发皿, 烘干(60 °C)后称量, 并计算水稳性团聚体组成。

测定方法: 采用总有机碳分析仪(Elementar, 德国)测定土壤总有机碳质量分数。采用高锰酸钾氧化-比色法测定活性有机碳质量分数<sup>[2]</sup>; 采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法测定腐殖质碳质量分数<sup>[2]</sup>。

#### 1.4 数据处理与分析

土壤团聚体质量分形维数( $D_m$ )的计算方法:  $D_m = 3 - \lg[W(\delta < i)/W_T] / \lg(i/x_{max})$ 。其中:  $W(\delta < i)$  为土粒直径  $< i$  的土壤颗粒累计质量;  $W_T$  为土粒的质量之和;  $i$  为粒级之间的平均粒径;  $x_{max}$  为最大粒级的平均直径。由于  $\lg[W(\delta < i)/W_0]$  与  $\lg(i/x_{max})$  具有线性关系, 因此可采用最小二乘法进行线性拟合,  $3 - D_m$  即为直线斜率, 由此得到  $D_m$ <sup>[16]</sup>。

利用 SPSS 19.0 软件对分形维数的回归方程进行线性拟合, 并对土壤团聚体结构及有机碳组分进行 Pearson 相关性分析(双侧检验), 表中的数据以平均值来表示, 并用 Duncan 法进行显著性分析。

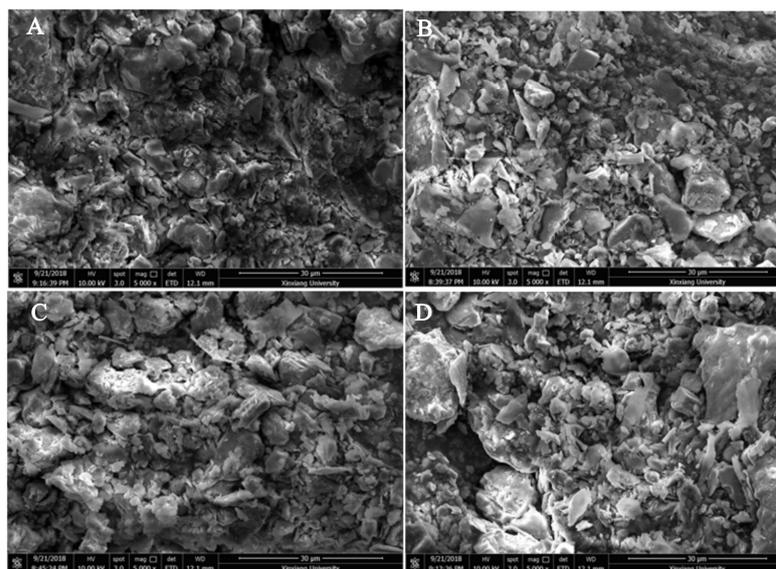
## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培模式下土壤团聚体的形态特征

通过扫描电镜对土壤团聚体的形态进行观察, 紫花苜蓿与无芒雀麦不同栽培模式下的团聚体形态有明显的不同。撂荒地(图 2A)土壤团聚体外表表面孔隙较少, 凝结成片。人工草地建植后的土壤团聚体大多呈现出球状或块状, 表面孔隙较多且较为疏松, 大多呈圆润多孔状(图 2B 和图 2C)。各模式下团聚体形态从优至劣依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、撂荒地。其中, 紫花苜蓿/无芒雀麦混播模式表现最为明显, 团聚体凝聚程度较高。说明紫花苜蓿/无芒雀麦混播对团聚体形态改变促进作用较为明显。

### 2.2 土壤机械稳定性团聚体组成与分形特征

由表 1 可以看出: 土壤机械稳定性团聚体组成均以 5.00~3.00 和 3.00~2.00 mm 粒径为主(比例为 35.55%~57.12%)。其中: 对于 5.00~3.00 mm 粒径的土壤团聚体而言(4 个土层的均值), 无芒雀麦单播、苜蓿单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播分别比撂荒地增加 10.90%~22.55%, 12.25%~27.17% 和 27.15%~38.14%, 且与撂荒地的差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。对于 3.00~2.00 mm 粒径的土壤团聚体而言(4 个土层的均值), 无芒雀麦单播、苜蓿单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播分别比撂荒地增加 22.98%~41.64%,



A. 撿荒地; B. 无芒雀麦单播;  
C. 紫花苜蓿单播; D. 紫花苜蓿/无芒雀麦混播

图2 不同栽培模式下土壤团聚体的形态特征

Figure 2 Morphological characteristics of soil aggregates under different planting patterns

25.92%~45.10%和 35.87%~50.38%，且与撿荒地的差异也均显著( $P<0.05$ )。团聚体所占比例最少的是 0.50~0.25 mm 粒径，占 0.46%~2.66%。与撿荒地相比，单播或混播 $<0.25$  mm 机械稳定性团聚体明显减少，5.00~3.00 和 3.00~2.00 mm 团聚体明显增加。

分形维数是表征土壤肥力的一个定量化评价指标<sup>[17]</sup>。分形维数越小，土壤结构良好且肥力越高<sup>[18]</sup>。由表 1 可知：各样地土壤机械稳定性团聚体分形维数值大小排序为撿荒地、无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播，变化范围为 1.626~2.165。与撿荒地相应的土层相比，无芒雀麦单播 (30~40 cm)，紫花苜蓿单播(0~10, 30~40 cm)，紫花苜蓿/无芒雀麦混播(0~10, 10~20, 20~30 和30~40 cm)

表1 土壤机械稳定性团聚体组成及分形维数

Table 1 Composition and fractal dimension of soil mechanical stable aggregates

| 栽培模式        | 土层/cm | 不同粒径土壤机械稳定性团聚体百分比组成/% |            |           |           |           |           |           |           |            | $D_m$   | $R^2$   |
|-------------|-------|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|---------|
|             |       | $\geq 10.00$          | 10.00~7.00 | 7.00~5.00 | 5.00~3.00 | 3.00~2.00 | 2.00~1.00 | 1.00~0.50 | 0.50~0.25 | $<0.25$ mm |         |         |
| 撿荒地         | 0~10  | 15.893 a              | 11.668 a   | 8.263 d   | 21.683 c  | 19.476 c  | 7.060 b   | 7.561 a   | 2.650 a   | 5.746 a    | 1.845 a | 0.986** |
|             | 10~20 | 17.431 a              | 13.224 a   | 12.139 a  | 19.481 c  | 18.836 c  | 7.694 b   | 5.575 a   | 1.655 a   | 3.965 a    | 1.885 a | 0.982** |
|             | 20~30 | 19.110 a              | 14.615 a   | 14.773 a  | 18.222 c  | 17.818 c  | 9.850 b   | 2.376 c   | 0.587 a   | 2.649 a    | 2.025 a | 0.946** |
|             | 30~40 | 20.100 a              | 17.214 a   | 10.125 a  | 17.206 c  | 18.346 b  | 10.068 bc | 3.976 a   | 0.518 ab  | 2.447 a    | 2.165 a | 0.970** |
| 无芒雀麦单播      | 0~10  | 13.531 b              | 9.122 b    | 11.414 a  | 24.744 b  | 24.113 b  | 7.872 b   | 3.195 c   | 1.863 b   | 4.146 b    | 1.765 b | 0.953** |
|             | 10~20 | 14.391 b              | 9.434 b    | 7.736 b   | 23.041 b  | 22.933 b  | 12.979 a  | 5.575 a   | 1.458 ab  | 2.453 b    | 1.846 a | 0.977** |
|             | 20~30 | 18.051 b              | 10.632 b   | 10.050 b  | 21.023 b  | 22.177 b  | 11.089 b  | 3.634 b   | 0.839 a   | 2.505 a    | 1.844 b | 0.962** |
|             | 30~40 | 19.040 bc             | 13.413 b   | 9.323 a   | 19.841 b  | 21.319 a  | 10.870 b  | 3.395 a   | 1.008 a   | 1.791 b    | 1.983 b | 0.969** |
| 紫花苜蓿单播      | 0~10  | 12.182 c              | 8.372 bc   | 10.721 b  | 25.549 b  | 23.749 b  | 9.094 a   | 5.905 b   | 1.660 bc  | 2.768 c    | 1.713 b | 0.981** |
|             | 10~20 | 13.931 b              | 9.680 b    | 13.576 a  | 22.113 b  | 24.068 ab | 9.478 b   | 3.784 b   | 1.039 ab  | 2.331 b    | 1.792 b | 0.968** |
|             | 20~30 | 16.351 b              | 10.854 bc  | 9.136 b   | 20.318 b  | 22.378 b  | 13.860 a  | 4.037 ab  | 0.833 a   | 2.233 ab   | 1.813 c | 0.963** |
|             | 30~40 | 19.897 b              | 14.211 b   | 9.617 a   | 20.628 b  | 21.815 a  | 9.040 c   | 2.590 b   | 0.462 b   | 1.740 b    | 1.855 c | 0.949** |
| 紫花苜蓿/无芒雀麦混播 | 0~10  | 11.627 c              | 8.022 c    | 9.219 bc  | 28.355 a  | 28.767 a  | 7.350 b   | 3.271 c   | 1.541 c   | 1.848 d    | 1.626 c | 0.961** |
|             | 10~20 | 12.042 c              | 8.734 b    | 7.934 b   | 25.963 a  | 25.429 a  | 12.784 a  | 4.982 a   | 0.759 b   | 1.373 c    | 1.682 c | 0.971** |
|             | 20~30 | 13.299 c              | 11.032 c   | 6.860 c   | 23.441 a  | 24.849 a  | 13.329 a  | 4.455 a   | 0.932 a   | 1.803 b    | 1.703 d | 0.967** |
|             | 30~40 | 15.670 c              | 13.336 c   | 5.024 b   | 22.328 a  | 22.573 a  | 14.674 a  | 3.903 a   | 0.717 ab  | 1.775 b    | 1.715 d | 0.962** |

说明：不同小写字母表示在相同土层不同地块团聚体间差异显著( $P<0.05$ )；\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )

的分形维数均差异显著( $P < 0.05$ ), 它们的线性方程的相关系数( $R^2$ )均在 0.946 以上, 且都达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

### 2.3 土壤水稳性团聚体组成与分形特征

由表 2 可知: 各样地土壤水稳性团聚体组成以  $< 0.25$  和  $3.00 \sim 1.00$  mm 粒径为主(比例为 53.47%~74.47%)。与撂荒地同一土层相比, 无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播  $< 0.25$  和  $3.00 \sim 1.00$  mm 团聚体的含量均显著减少( $P < 0.05$ )。

$\geq 0.25$  mm 水稳性团聚体是表征土壤生态效应的重要指标, 其含量越高, 土壤团聚体水稳性越强, 土壤结构越稳定<sup>[19]</sup>。对于  $\geq 0.25$  mm 粒径团聚体, 其含量(4 个土层的平均值)高低排序为紫花苜蓿/无芒雀麦混播(64.58%)、紫花苜蓿单播(57.96%)、无芒雀麦单播(56.37%)、撂荒地(40.81%), 其中主要是促进了  $3.00 \sim 1.00$  和  $1.00 \sim 0.50$  mm 水稳性团聚体的形成, 且无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播均较撂荒地呈现显著性差异( $P < 0.05$ )。

同机械稳定性结果一样, 各样地土壤水稳性团聚体分形维数值大小排序也为撂荒地、无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播, 变化范围为 2.636~2.840, 但各样地同一土层下的分形维数值之间并无显著性差异( $P > 0.05$ )。与土壤机械稳定性团聚体各分形维数拟合方程的情况一样, 水稳性团聚体线性拟合方程的相关系数( $R^2$ )在 0.947 以上, 且也均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

表 2 土壤水稳性团聚体组成及其分形维数

Table 2 Composition and fractal dimension of soil water stable aggregates

| 栽培方式                | 土层/cm | 不同粒径土壤水稳性团聚体百分比组成/% |                  |                  |                  |                  |             | $D_m$   | $R^2$   |
|---------------------|-------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|---------|---------|
|                     |       | $\geq 5.00$         | $5.00 \sim 3.00$ | $3.00 \sim 1.00$ | $1.00 \sim 0.50$ | $0.50 \sim 0.25$ | $< 0.25$ mm |         |         |
| 撂荒地                 | 0~10  | 3.451 c             | 9.886 c          | 17.153 c         | 8.217 c          | 7.581 b          | 53.712 a    | 2.803 a | 0.965** |
|                     | 10~20 | 4.524 c             | 7.697 b          | 16.618 d         | 7.934 d          | 6.241 b          | 56.986 a    | 2.826 a | 0.957** |
|                     | 20~30 | 4.988 d             | 6.644 b          | 16.358 c         | 7.376 c          | 7.065 d          | 57.569 a    | 2.837 a | 0.960** |
|                     | 30~40 | 5.401 b             | 5.718 b          | 16.171 c         | 6.265 c          | 8.143 c          | 58.302 a    | 2.840 a | 0.959** |
| 无芒雀<br>麦单播          | 0~10  | 14.798 a            | 9.556 bc         | 26.823 a         | 9.788 a          | 6.072 c          | 32.963 b    | 2.687 a | 0.947** |
|                     | 10~20 | 13.121 a            | 6.531 c          | 24.316 b         | 10.164 b         | 6.876 b          | 38.992 b    | 2.736 a | 0.959** |
|                     | 20~30 | 7.639 a             | 5.175 c          | 22.746 ab        | 10.289 b         | 9.964 b          | 44.187 b    | 2.747 a | 0.974** |
|                     | 30~40 | 4.283 c             | 4.876 c          | 20.454 b         | 11.747 a         | 8.462 c          | 50.178 b    | 2.765 a | 0.980** |
| 紫花苜<br>蓿单播          | 0~10  | 13.520 b            | 9.007 b          | 27.824 a         | 9.973 a          | 7.574 b          | 32.102 b    | 2.665 a | 0.956** |
|                     | 10~20 | 9.742 b             | 7.787 b          | 25.890 a         | 12.658 a         | 6.236 b          | 37.687 b    | 2.682 a | 0.963** |
|                     | 20~30 | 6.799 b             | 5.638 c          | 24.462 a         | 11.855 a         | 8.754 c          | 42.492 b    | 2.727 a | 0.974** |
|                     | 30~40 | 2.523 d             | 6.039 b          | 21.429 b         | 12.351 a         | 10.477 b         | 47.181 b    | 2.756 a | 0.984** |
| 紫花苜蓿/<br>无芒雀麦<br>混播 | 0~10  | 4.603 d             | 17.259 a         | 22.661 b         | 9.198 b          | 15.468 a         | 30.811 c    | 2.636 a | 0.969** |
|                     | 10~20 | 5.048 c             | 15.645 a         | 21.058 c         | 9.272 c          | 16.393 a         | 32.584 c    | 2.655 a | 0.968** |
|                     | 20~30 | 5.484 c             | 11.658 a         | 21.828 b         | 9.598 b          | 16.950 a         | 34.482 c    | 2.674 a | 0.973** |
|                     | 30~40 | 6.411 a             | 8.346 a          | 24.853 a         | 10.367 b         | 12.231 a         | 37.792 c    | 2.700 a | 0.976** |

说明: 不同小写字母表示在相同土层不同地块团聚体间差异显著( $P < 0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ )

### 2.4 土壤各种形态有机碳的分布特征

由图 3 可知: 各样地土壤总有机碳质量分数(4 个土层的平均值)高低排序为紫花苜蓿/无芒雀麦混播( $10.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、紫花苜蓿单播( $8.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、无芒雀麦单播( $8.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、撂荒地( $6.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 活性有机碳以及腐殖质碳质量分数也具有同样的变化规律。其中: 土壤表层(0~20 cm)无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播总有机碳、活性有机碳和腐殖质碳均较撂荒地呈现显著性差异( $P < 0.05$ ); 土壤亚表层(20~40 cm)无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播总有机碳、活性有机碳均较撂荒地呈现显著性差异( $P < 0.05$ ), 紫花苜蓿/无芒雀麦混播腐殖质碳较撂荒地差异显著( $P < 0.05$ ), 而无芒雀麦单播和紫花苜蓿单播腐殖质碳较撂荒地差异不显著( $P > 0.05$ )。此外, 从土壤剖面来看, 各种形态的有机碳质量分数均随土层的加深而降低。

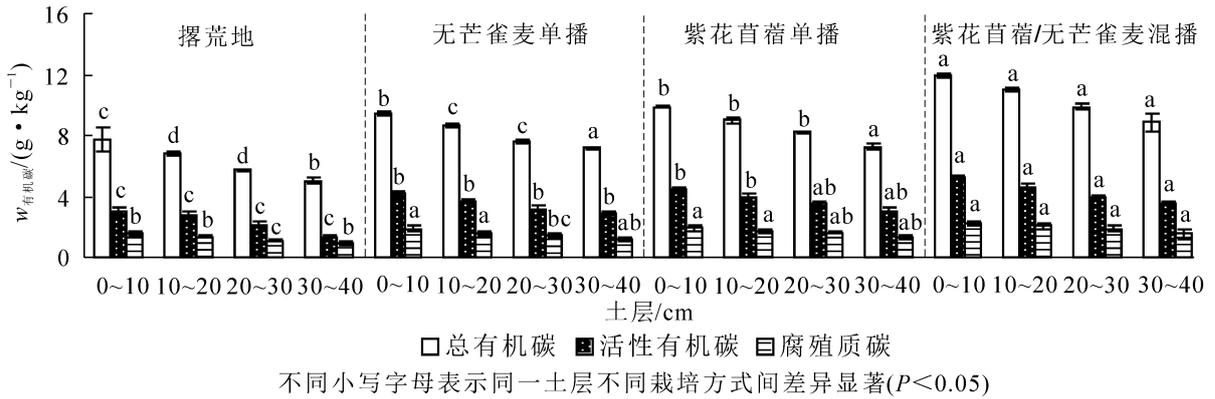


图3 不同栽培模式下土壤有机碳质量分数

Figure 3 Soil organic carbon content of different planting patterns

2.5 土壤团聚体与各种形态有机碳的相关性分析

由表3可知：土壤总有机碳、活性有机碳和腐殖质碳两两之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。其中，总有机碳与活性有机碳、腐殖质碳的相关系数分别为0.975和0.954，活性有机碳与腐殖质碳的相关系数为0.975。

土壤机械稳定性团聚体分形维数与土壤总有机碳、活性有机碳、腐殖质碳均呈负相关。土壤机械稳定性团聚体的分形维数与 $\geq 10.00$ ， $10.00 \sim 7.00$ ， $7.00 \sim 5.00$ ， $1.00 \sim 0.50$ ， $0.50 \sim 0.25$ 和 $< 0.25$  mm粒径团聚体呈正相关，其中与 $1.00 \sim 0.50$ ， $0.50 \sim 0.25$ 和 $< 0.25$  mm粒径团聚体呈显著或极显著正相关，相关系数分别为0.515，0.745和0.972。机械稳定性团聚体分形维数与 $5.00 \sim 3.00$ ， $3.00 \sim 2.00$ 和 $2.00 \sim 1.00$  mm粒径呈负相关，其中与 $2.00 \sim 1.00$  mm粒径团聚体呈极显著负相关(相关系数为 $-0.632$ )。这说明机械稳定性团聚体分形维数受小粒径( $1.00 \sim 0.50$ ， $0.50 \sim 0.25$ 和 $< 0.25$  mm)和中等粒径( $5.00 \sim 3.00$ ， $3.00 \sim 2.00$ 和 $2.00 \sim 1.00$  mm)含量的影响明显，即分形维数值随小粒径团聚体含量的增加而增加，随中等粒径团聚体的增加而降低。

土壤总有机碳、活性有机碳、腐殖质碳与团聚体( $\geq 10.00$ ， $10.00 \sim 7.00$ ， $7.00 \sim 5.00$ ， $< 0.25$  mm)呈负相关，其中与 $\geq 10.00$ ， $10.00 \sim 7.00$  mm粒径团聚体呈极显著负相关( $P < 0.01$ )，而与团聚体( $5.00 \sim 3.00$ ， $3.00 \sim 2.00$ ， $2.00 \sim 1.00$ ， $1.00 \sim 0.50$ ， $0.50 \sim 0.25$  mm)呈正相关，尤其与 $5.00 \sim 3.00$ 和 $3.00 \sim 2.00$  mm团聚体呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。由此可见，中等粒径( $5.00 \sim 3.00$ ， $3.00 \sim 2.00$  mm)团聚体含量越高，大粒径( $\geq 10.00$ ， $10.00 \sim 7.00$  mm)团聚体含量越低，越有助于土壤有机碳质量分数的提高。

表3 土壤有机碳和土壤机械稳定性团聚体的相互关系

Table 3 Correlation between soil organic carbon and soil dry-sieved aggregates

| 参数    | 总有机碳   | 活性有机碳   | 腐殖质碳    | 不同粒径土壤机械稳定性团聚体 |                   |                  |                  |                  |                  |                  |                  |             |
|-------|--------|---------|---------|----------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|
|       |        |         |         | $\geq 10.00$   | $10.00 \sim 7.00$ | $7.00 \sim 5.00$ | $5.00 \sim 3.00$ | $3.00 \sim 2.00$ | $2.00 \sim 1.00$ | $1.00 \sim 0.50$ | $0.50 \sim 0.25$ | $< 0.25$ mm |
| 分形维数  | -0.456 | -0.323  | -0.220  | 0.135          | 0.111             | 0.388            | -0.265           | -0.442           | -0.632**         | 0.515*           | 0.745**          | 0.972**     |
| 总有机碳  | 1      | 0.975** | 0.954** | -0.887**       | -0.903**          | -0.319           | 0.928**          | 0.964**          | 0.123            | 0.041            | 0.170            | -0.350      |
| 活性有机碳 |        | 1       | 0.975** | -0.947**       | -0.931**          | -0.282           | 0.957**          | 0.964**          | 0.022            | 0.116            | 0.314            | -0.202      |
| 腐殖质碳  |        |         | 1       | -0.952**       | -0.933**          | -0.292           | 0.955**          | 0.916**          | -0.018           | 0.218            | 0.401            | -0.091      |

说明：\*\*表示在0.01水平(双侧)上极显著相关；\*表示在0.05水平(双侧)上显著相关

由表4可知：土壤水稳性团聚体分形维数与总有机碳、活性有机碳和腐殖质碳均呈极显著负相关( $P < 0.01$ )，相关系数分别为 $-0.964$ ， $-0.930$ 和 $-0.894$ 。水稳性团聚体分形维数与小粒径水稳性团聚体( $< 0.25$  mm)呈极显著正相关(相关系数为0.980)，而与中小粒径水稳性团聚体( $\geq 5.00$ ， $5.00 \sim 3.00$ ， $3.00 \sim 1.00$ ， $1.00 \sim 0.50$ ， $0.50 \sim 0.25$  mm)则基本呈显著或极显著负相关。同机械稳定性结果类似，这说明小粒径水稳性团聚体的增加有利于提高水稳性团聚体分形维数，而中小粒径水稳性团聚体的增加则会降低水稳性团聚体分形维数。

表 4 土壤有机碳和土壤水稳性团聚体的相互关系

Table 4 Correlation between soil organic carbon and soil water stable aggregates

| 参数    | 总有机碳     | 活性有机碳    | 腐殖质碳     | 不同粒径土壤水稳性团聚体 |           |           |           |           |          |
|-------|----------|----------|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|       |          |          |          | ≥5.00        | 5.00~3.00 | 3.00~1.00 | 1.00~0.50 | 0.50~0.25 | <0.25 mm |
| 分形维数  | -0.964** | -0.930** | -0.894** | -0.567*      | -0.636**  | -0.776**  | -0.406    | -0.509*   | 0.980**  |
| 总有机碳  | 1        | 0.975**  | 0.954**  | 0.491        | 0.726**   | 0.673**   | 0.363     | 0.532*    | -0.944** |
| 活性有机碳 |          | 1        | 0.975**  | 0.504*       | 0.714**   | 0.664**   | 0.348     | 0.446     | -0.909** |
| 腐殖质碳  |          |          | 1        | 0.490        | 0.779**   | 0.579*    | 0.192     | 0.481     | -0.881** |

说明: \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关; \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同人工草地栽培模式对土壤机械稳定性团聚体的影响

同一母质发育的土壤因栽培模式不同, 土壤团聚体组成的分布特性可发生较大变化<sup>[20]</sup>。本试验研究结果表明: 土壤机械稳定性团聚体组成以中等粒径(5.00~3.00 和 3.00~2.00 mm)团聚体为主, 这一结果与王轶浩等<sup>[21]</sup>的研究结果一致, 但宋丽萍等<sup>[22]</sup>在对黄土高原黄绵土团聚体的研究中却发现: 土壤机械稳定性团聚体以≥0.25 mm 粒径为主。这是因为本试验地位于黄河冲积平原, 地表多含有黄河沉沙, 土壤机械组成中砂粒比例较大, 因而在此基础上形成的团聚体以中等粒径居多。由此可见, 土壤团聚体组成受到土壤颗粒组成的影响很大。另外, 本研究中, 人工草地建植 6 a 后, ≥0.25 mm 粒径土壤机械稳定性团聚体含量增加, 其中又以 5.00~3.00 和 3.00~2.00 mm 粒径团聚体的增加最为明显, 单播和混播模式下均有此趋势, 其含量由高到低依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播。这可能是因为相对于地表裸露的撂荒地, 人工建植的草地由于增加了土壤表层植物残体的积累, 土壤中植物根系分泌物、微生物及其代谢产物增多, 提高了土壤生物活性, 土壤中的有机残体、真菌菌丝体和粪便类物质增加, 进而通过土壤动物吞食和排泄活动结合在一起形成较多的中等粒径团聚体<sup>[23]</sup>, 导致土壤团聚体组成发生了改变。

#### 3.2 不同人工草地栽培模式对土壤水稳性团聚体的影响

团聚体水稳性表征的是团聚体抵抗灌水浸泡和降雨击打的能力。有研究指出: ≥0.25 mm 水稳性团聚体的含量与土壤生态效应呈正比<sup>[22]</sup>。本研究表明: ≥0.25 mm 水稳性团聚体含量的高低排序为紫花苜蓿/无芒雀麦混播(64.58%)、紫花苜蓿单播(57.96%)、无芒雀麦单播(56.37%)、撂荒地(40.81%)。究其原因, 可能是因为相对于撂荒地, 人工建植的草地由于地表被植物覆盖, 且地下根系密集, 土壤持水性和渗透性均得到了有效改善, 因而能有效拦截降雨或灌溉引起的地表径流和地下渗流对水稳性团聚体(≥0.25 mm)的冲刷和破坏作用<sup>[21]</sup>。此外, 相对于单播模式, 紫花苜蓿/无芒雀麦混播模式下这种格局变化更为明显。究其原因, 可能是由于混播草地地表凋落物种类增多, 且豆科植物的直根系与禾本科植物的须根系相互交错, 地下形成了密集网络结构<sup>[24]</sup>, 因而水稳性团聚体(≥0.25 mm)的结构更加稳定, 含量最高。

#### 3.3 不同人工草地栽培模式对土壤团聚体质量分形维数的影响

土壤团聚体质量分形维数( $D_m$ )是土壤团聚体结构的定量化反映<sup>[25]</sup>。研究表明: 土壤团聚体质量分形维数与其中的团聚体内部组成呈显著相关, 表现为团聚结构粒径分布的分形维数越小, 土壤越具有良好的结构与稳定性, 抗蚀能力越强<sup>[26]</sup>。目前, 对于分形维数  $D$  值的评定主要是 TYLER 提出的分形理论体系, 其中土壤质量分形维数( $D_m$ )和体积分形维数( $D_v$ )是该体系的重要参数。 $D_m$  较  $D_v$  可以更好地表征土壤某些属性, 如土壤结构、肥力和退化程度等<sup>[27]</sup>, 特别是可以很好地反映沙漠化逆转过程中土壤颗粒物质和养分的变化状况<sup>[28]</sup>。本研究结果表明: 土壤机械稳定性和水稳性团聚体分形维数值的从大到小顺序均表现为撂荒地、无芒雀麦单播、紫花苜蓿单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播。这是因为本研究样地位于豫北黄河冲积平原, 土壤质地类别为砂壤土, 是由沙性母质发育而来, 风沙化较为严重, 因此沙化裸地为砂质壤土, 有机质含量低, 所以土壤团聚体质量分形维数相对其他 3 种模式最大, 而人工草地建植后土壤团聚体质量分形维数随之降低, 并在紫花苜蓿/多年生黑麦草混播模式下最低。由此证明: 随着人工草地的建植土地沙化得到了不同程度地逆转, 尤以紫花苜蓿/无芒雀麦混播模式效果最佳。

### 3.4 不同人工草地栽培模式对土壤各种形态有机碳分布特征的影响

WU 等<sup>[29]</sup>认为: 相对于退化草地, 物种多样性越丰富的草地其土壤养分和碳含量也越高。本试验研究结果表明: 土壤各有机碳质量分数从大到小排序依次是紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、撂荒地。这主要是因为与撂荒地相比, 单播或混播草地由于土壤生物活动明显, 大量的植物残体进入土壤为微生物的生长与繁衍提供了充足的碳源, 其中不稳定的活性有机碳作为植物营养的主要来源, 可直接为植物根系所吸收和利用, 而稳定的腐殖质碳又是土壤团聚体形成的核心。此外, 相较于紫花苜蓿或无芒雀麦单播, 紫花苜蓿/无芒雀麦混播草地由于各自产生的根系分泌物互相促进, 且微生物数量及代谢产物增多, 因而增加了土壤有机胶结物质, 有利于混播草地土壤微环境的改善, 因而土壤固碳能力更强。

### 3.5 土壤团聚体组成和土壤各种形态有机碳质量分数的相互关系

土壤团聚体形成的实质是土壤有机无机体在静电引力、氢键及羟基等官能团作用下的复合过程。这些有机体无机体多少及其作用机制均会影响团聚体的形成与稳定。土壤有机碳作为团聚体的重要胶结物质, 在团聚体的形成与稳定中具有极其重要的作用<sup>[30]</sup>。本研究 Pearson 双侧检验结果表明: 土壤各种形态的有机碳(总有机碳、活性有机碳、腐殖质碳)两两之间呈极显著正相关, 且机械稳定性和水稳性团聚体的分形维数值均与各有机碳质量分数和小粒径团聚体( $<0.25$  mm)呈正相关, 与中等粒径团聚体(5.00~3.00, 3.00~1.00 mm)呈负相关。可见, 土壤小粒径团聚体的减少和中等粒径团聚体的增加有利于降低土壤团聚体质量分形维数, 提高土壤稳定性与肥力。

## 4 参考文献

- [1] PIRMORADIAN N, SEPASKHAH A, HAJABBASI R M. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments [J]. *Biosyst Eng*, 2005, **90**(2): 227 - 234.
- [2] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(3): 324 - 332.  
MA Ruiping, LIU Lei, AN Shaoshan, *et al.* Soil organic carbon and its fractions in aggregates under different plant-communities in the hill-gully region of the Loess Plateau [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2013, **21**(3): 324 - 332.
- [3] CHRISTENSEN B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [M]//STEWART B A. *Advances in Soil Science: Vol 20*. New York: Springer, 1992.
- [4] PERFECT F E, KAY B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. *Soil Tillage Res*, 1995, **36**(1): 1 - 20.
- [5] 刘晓静, 张进霞, 李文卿, 等. 施肥及刈割对干旱地区紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. 中国沙漠, 2014, **34**(6): 1516 - 1526.  
LIU Xiaojing, ZHANG Jinxia, LI Wenqing, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition and cuttings on yield and quality of alfalfa in dry region of Gansu, China [J]. *J Desert Res*, 2014, **34**(6): 1516 - 1526.
- [6] 邵继承, 杨恒山, 范富, 等. 播种方式对紫花苜蓿+无芒雀麦草地土壤碳密度和组分的影响[J]. 草业科学, 2010, **27**(6): 102 - 107.  
TAI Jicheng, YANG Hengshan, FAN Fu, *et al.* Effects of sowing methods on soil carbon density and composition in the alfalfa and *Bromus inermis* pasture [J]. *Pratacultural Sci*, 2010, **27**(6): 102 - 107.
- [7] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 517 - 527.  
SHEN Fangfang, YUAN Yinghong, FAN Houbao, *et al.* Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(2): 517 - 527.
- [8] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(9): 1973 - 1979.  
ZHOU Hu, LÜ Yizhong, YANG Zhichen, *et al.* Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China [J]. *Sci Agric Sin*, 2007, **40**(9): 1973 - 1979.
- [9] 马世五, 高雪松, 邓良基, 等. 不同母质发育的紫色水稻土腐殖质分布特征[J]. 山地学报, 2008, **26**(1): 45 - 52.  
MA Shiwu, GAO Xuesong, DENG Liangji, *et al.* Distribution of humus in purple paddy soils derived from different

- parent materials [J]. *J Mt Sci*, 2008, **26**(1): 45 – 52.
- [10] 马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究[J]. 土壤学报, 2014, **51**(1): 104 – 112.  
MA Ruiping, AN Shaoshan, DANG Tinghui, *et al.* Soil organic carbon and enzymatic activity in aggregates of soils under different plant communities in hilly-gully regions of Loess Plateau [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(1): 104 – 112.
- [11] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(4): 675 – 682.  
XU Jiangbing, LI Chengliang, HE Yuanqiu, *et al.* Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2007, **44**(4): 675 – 682.
- [12] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 1035 – 1041.  
LIU Enke, ZHAO Bingqiang, MEI Xurong, *et al.* Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(4): 1035 – 1041.
- [13] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(5): 1122 – 1130.  
ZHANG Peng, JIA Zhikuan, LU Wentao, *et al.* Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2011, **17**(5): 1122 – 1130.
- [14] 李亚杰, 徐文修, 苏丽丽, 等. 水氮管理对麦后复播大豆土壤固碳效应和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(3): 524 – 531.  
LI Yajie, XU Wenxiu, SU Lili, *et al.* Effects of water and nitrogen management on soil carbon sequestration and soybean yields in wheat-soybean cropping fields [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2016, **35**(3): 524 – 531.
- [15] 蔺芳, 邢晶鑫, 任思敏, 等. 不同栽培模式下豫北沙化土壤微生物量和酶活性[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(3): 590 – 597.  
LIN Fang, XING Jingxin, REN Simin, *et al.* Microbial biomass and enzymatic activity in sandy soils of northern Henan Province with different alfalfa and awnless brome cultivation patterns [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(3): 590 – 597.
- [16] 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[J]. 科学通报, 1993, **38**(20): 1896 – 1899.  
YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. *Chin Sci Bull*, 1993, **38**(20): 1896 – 1899.
- [17] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(1): 340 – 347.  
QI Yingchun, WANG Yiquan, LIU Jun, *et al.* Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index [J]. *Trans CSAE*, 2011, **27**(1): 340 – 347.
- [18] 蔺芳, 刘晓静, 张家洋. 人工草地种植模式对沙化土壤团聚体及有机质含量的影响[J]. 中国沙漠, 2018, **38**(6): 1219 – 1229.  
LIN Fang, LIU Xiaojing, ZHANG Jiayang. Effects of planting patterns on soil aggregates and organic matter characteristics of sandy soil [J]. *J Desert Res*, 2018, **38**(6): 1219 – 1229.
- [19] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(22): 7116 – 7124.  
TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, *et al.* Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(22): 7116 – 7124.
- [20] 蔡立群, 杜伟, 罗珠珠, 等. 陇中坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(1): 200 – 208.  
CAI Liqun, DU Wei, LUO Zhuzhu, *et al.* Effect of different plants on fractal features of soil aggregates after land retired from crop cultivation in slopes of central Gansu [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26**(1): 200 – 208.
- [21] 王轶浩, 耿养会, 黄仲华. 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5493 – 5499.

- WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua. Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(18): 5493 – 5499.
- [22] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 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[J]. 草业学报, 2015, **24**(7): 12 – 20.  
SONG Liping, LUO Zhuzhu, LI Lingling, *et al.* Effect of lucerne-crop rotations on soil physical properties in the semi-arid Loess Plateau of Central Gansu [J]. *Acta Prataculturae Sin*, 2015, **24**(7): 12 – 20.
- [23] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil Till Res*, 2004, **79**(1): 7 – 31.
- [24] 秦娟, 上官周平. 植物之间互作效应及其生理机制[J]. 干旱地区农业研究, 2005, **23**(3): 225 – 230.  
QIN Juan, SHANGGUAN Zhouping. Interaction effect and physiological mechanism in plants [J]. *Agric Res Arid Areas*, 2005, **23**(3): 225 – 230.
- [25] 赵鹏, 史东梅, 赵培, 等. 紫色土坡耕地土壤团聚体分形维数与有机碳关系[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(22): 137 – 144.  
ZHAO Peng, SHI Dongmei, ZHAO Pei, *et al.* Relation of soil aggregate fractal dimension and organic carbon in purple-soilslope farmland [J]. *Trans CSAE*, 2013, **29**(22): 137 – 144.
- [26] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(6): 1410 – 1416.  
WANG Jingyan, HU Tingxing, GONG Wei, *et al.* Fractal features of soil aggregate structure in slope farm land with different de-farming patterns in south Sichuan Province of China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(6): 1410 – 1416.
- [27] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, **39**(2): 221 – 226.  
ZHANG Shirong, DENG Liangji, ZHOU Qian, *et al.* Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties [J]. *Acta Pedol Sin*, 2002, **39**(2): 221 – 226.
- [28] 姚姣转, 刘廷玺, 童新, 等. 科尔沁沙地沙丘-草甸相间地土壤颗粒的分形特征[J]. 中国沙漠, 2016, **36**(2): 433 – 440.  
YAO Jiaozhuan, LIU Tingxi, TONG Xin, *et al.* Soil particle fractal dimension in the dune-meadow ecotone of the Horqin Sandy Land [J]. *J Desert Res*, 2016, **36**(2): 433 – 440.
- [29] WU Gaolin, LIU Zhenheng, ZHANG Lei, *et al.* Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland [J]. *Plant Soil*, 2010, **333**(1/2): 469 – 479.
- [30] FONTE S J, YEBOAH E, OFORI P, *et al.* Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, **73**(3): 961 – 966.