

文章编号: 1008-2786-(2019)6-797-11
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000470

太行山油松人工林土壤微团聚体变化特征及其影响因素

张文旭^{1,2,3}, 李建红¹, 郭灵辉^{1*}, 高江波^{4,5}

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中国科学院大学, 北京 10049;
3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 4. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;
5. 中国科学院 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 土壤微团聚体是土壤水分和养分保蓄与释供的关键载体。本研究以太行山绿化先锋树种油松人工林为研究对象, 基于空间代替时间序列的思想, 综合采用分形维数(D)、特征微团聚体组成比例(PCM)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)等指标分析油松人工林恢复过程中土壤微团聚体的变化特征, 探讨土壤微团聚体变化特征与土壤养分之间的定量关系。结果表明: 随着油松人工林恢复, $0.25 \sim 0.05$ mm 粒级土壤微团聚体含量先增加后减少, 而 <0.02 mm 粒级土壤微团聚体含量减少后增加。33 ~ 49 a 油松人工林土壤微团聚体 PCM 、 D 分别增加 65.57% 和 3.44%, 而 MWD 与 GMD 分别减小约 26% 和 33%。不同恢复年限土壤微团聚体 D 与 MWD 、 GMD 及 PCM 显著相关, 而且与碱解氮和全磷相关紧密, 说明 D 在一定程度上能够反映土壤颗粒的粒径分布状况及土壤养分状况, 可作为表征土壤结构稳定性及土壤肥力的一个重要指标。

关键词: 油松人工林; 土壤微团聚体; 分形维数; 土壤养分; 太行山

中图分类号: P942

文献标志码: A

土壤微团聚体是构成土壤结构的基本单位, 其粒径分布状况能够调节土壤水肥气热条件, 影响土壤生物学活性, 与土壤质量密切相关^[1-3]。土壤微团聚体的组成特征、演变过程及其吸储-释供、转化和缓冲的能力历来是土壤科学的研究热点^[4-6]。植被生长发育被认为是影响土壤微团聚体形成演变的重要因素^[7-8], 迄今, 一些学者认为随种植年限的增加, 在土壤表层微团聚体中大粒径含量显著增加, 土壤微团聚体中小粒径含量降低^[8-11], 也有发现土壤表层大粒级微团聚体含量和小粒级微团聚体含量随着种植年限的延长先增加再减小^[12], 甚至出现土壤

微团聚体大粒级含量降低, 而小粒级含量明显升高的现象^[13], 土壤微团聚体对植被生长发育的响应特征尚无一致认识。

分形作为一种几何工具, 能够有效地描述自然界杂乱无章的、不规则的现象^[14], 其不仅可以量化和评价土壤的粒径分布^[15], 也可揭示粒径分布与相关理化性质的差异^[16], 在土壤微团聚体结构与肥力评价方面具有很好的应用价值^[17-18]。近年来, 我国学者分别在黄土高原、川中丘陵、五台山地、泥石流源区等地开展了大量卓有成效的研究^[10, 19-23], 但研究结果存在差异。蒲玉琳等(2012)^[22]与张超等

收稿日期(Received date): 2019-02-15; 改回日期(Accepted date): 2019-12-04

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41601580, 41671098); 中国科学院陆地表层格局与模拟院重点实验室开放基金(LBKF201801); 河南省博士后经费资助。[National Natural Science Foundation of China (41601580, 41671098); Fund of Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences (LBKF201801); Post Doctoral Fund of Henan Province]

作者简介(Biography): 张文旭(1996-), 男, 河南三门峡人, 硕士生, 主要从事山地生态水文变化过程学习研究。[ZHANG Wenxu (1996-), male, born in Sanmenxia, Henan province, M. Sc. candidate, research on ecological hydrological change process] E-mail: 937240377@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 郭灵辉(1983-), 男, 河南洛阳人, 博士, 主要从事气候变化与生态效应研究。[GUO Linghui (1983-), male, born in Luoyang, Henan province, Ph. D., research on climate change and ecological process] E-mail: guolinghui@hpu.edu.cn

(2011)^[23]发现土壤微团聚体分形维数 D 值与土壤有机质、碱解氮、全磷、全氮等土壤养分含量正相关,一些学者则认为土壤微团聚体分形维数与土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾等养分负相关^[21,24]、与微生物数量、酶活性显著负相关^[11],甚至不显著相关^[25]。可见,土壤微团聚体分形维数对土壤肥力的表征能力区域异质性明显。

为此,本研究以太行山绿化先锋树种油松为研究对象,采用分形模型并结合特征微团聚体组成比例、平均质量直径、几何平均直径等指标综合探讨不同恢复年限油松人工林土壤微团聚体的变化特性,分析土壤微团聚体分形维数与土壤养分之间的关系,揭示油松人工林恢复过程中土壤微团聚体分形维数对土壤肥力的表征能力,以期为太行山绿化工程土壤肥力调控及林木可持续经营管理提供依据。

1 实验区概况

依托焦作市太行山生态公益林,选择不同恢复年限油松人工林布设实验,林地处于 $113^{\circ}08' \sim 113^{\circ}10'E, 35^{\circ}19' \sim 35^{\circ}20'N$ 之间,大陆性季风型气候明显,夏季炎热多雨、冬季寒冷干燥,年均降水量约 $575 \sim 641 \text{ mm}$,年均气温为 $11.4 \sim 14.9^{\circ}\text{C}$ 。区域土壤为石灰岩母质上发育起来的山地褐土,土壤厚度空间异质性较大,阴坡土层深度可达 $50 \sim 60 \text{ cm}$,阳坡土层相对较薄,平均土壤容重为 1.30 g/cm^3 。由于长期的过度开发利用和巨大的人口压力,区内原生植被基本荡然无存,水土流失十分严重。油松 (*Pinus tabulaeformis*)耐旱耐贫瘠,作为该区荒山绿化先锋树种之一于 20 世纪 60 年代末至 70 年代中期通过植苗和 20 世纪 80 年代中期机播等造林方式被大面积营造,经过多年禁采禁伐,油松人工林整体长势良好,林分大多数处于近熟林 ($30 \sim 40 \text{ a}$) 和成

熟林 ($40 \sim 60 \text{ a}$)^[26],是研究人类严重干扰下太行山森林生态系统恢复演变的理想之地。该区人工林生物多样性丰富,灌木主要有连翘 (*Forsythia suspensa*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor Turcz*)、山皂角 (*Gleditsia horrida*)、黄荆 (*Vitex negundo Linn*) 等,草本多以白草 (*Pennisetum flaccidum Griseb*)、羊胡子草 (*Carex rigescens*) 等为主。

2 研究方法

土样获取:于 2017 年 7 月选择海拔、坡度坡位等立地条件相似(阴坡坡中,样地海拔高度约 $830 \sim 870 \text{ m}$)的不同恢复年限油松人工林样地,每个样地随机选取 3 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的样方开展植被调查(表 1)。不同样地内采用蛇形取样法随机开挖 3 个土壤剖面,剖面选于相邻两颗油松株干中心处,按照 $0 \sim 10、10 \sim 20、20 \sim 30、30 \sim 40、40 \sim 50 \text{ cm}$ 分层采集土样,每层重复 2 次,同一剖面同一土层土样均匀混合去除细根石块等杂物,在自然条件下风干并进行研磨,采用 4 分法获取土样进行土壤理化性质测定。

土壤养分指标测定:选取吸管法测定土壤微团聚体及其机械组成状况;电位计法测量土壤 pH;硫酸-重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量;半微量凯氏法测定土壤全氮含量;NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量取乙酸铵浸提火焰光度法测定土壤速效钾含量;碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;选取碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量^[28]。将土壤混合样品分成三份,进行上述实验,取其平均值。不同样地土壤理化性质全剖面基本信息见表 1。

土壤微团聚体指标:采用分形维数 (D) 并结合平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 以及特征微团聚体组成比例 (PCM) 综合分析微团聚

表 1 不同恢复年限油松人工林样地基本信息^[27]

Tab. 1 Basic information of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage

恢复年限 /a	胸径 /cm	树高 /m	密度 /(株·hm ⁻²)	容重 /(g·cm ⁻³)	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)	速效磷 /(mg·kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)
33	10.35 ± 0.60	6.71 ± 0.88	2567 ± 3.51	1.36 ± 0.12	7.86 ± 0.22	28.87 ± 6.53	4.57 ± 0.62	40.88 ± 19.08	136.60 ± 17.16
45	10.52 ± 0.34	7.54 ± 1.75	2500 ± 1.30	1.32 ± 0.13	6.78 ± 0.03	22.13 ± 2.15	1.97 ± 0.27	36.77 ± 2.65	129.87 ± 33.45
49	15.60 ± 0.80	7.78 ± 0.12	2300 ± 0.00	1.29 ± 0.09	7.20 ± 0.33	19.51 ± 4.64	2.13 ± 0.34	50.72 ± 4.66	120.33 ± 11.24

体变化过程及分形特性。计算公式如下:

$$(3 - D) \lg(\bar{x}_i/x_{\max}) = \lg(w_{(\delta < x_i)}/w_0) \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i) / \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right) \quad (3)$$

$$PCM = \frac{x_3 + x_4}{x_1 + x_2} \quad (4)$$

式中, \bar{x}_i 为第 i 粒级微团聚体的平均直径 (mm); w_i 为第 i 粒级微团聚体微团聚体的质量 (g); x_{\max} 为最大粒级微团聚体的平均直径 (mm); $w_{(\delta < x_i)}$ 为直径小于 x_i 微团聚体累积质量 (g); w_0 为全部粒级微团聚体的质量总和 (g); x_1 为土壤中 0.25 ~ 0.05 mm 粒级微团聚体的质量 (g); x_2 为土壤 0.05 ~ 0.02 mm 粒级微团聚体的质量 (g); x_3 为土壤中 0.02 ~ 0.002 mm 粒级微团聚体的质量 (g); x_4 为土壤中

<0.002 mm 粒级微团聚体的质量 (g)。

土壤养分表聚特征: 表聚系数 C

$$C_i = \frac{N_i}{N_{50,i}} \quad (5)$$

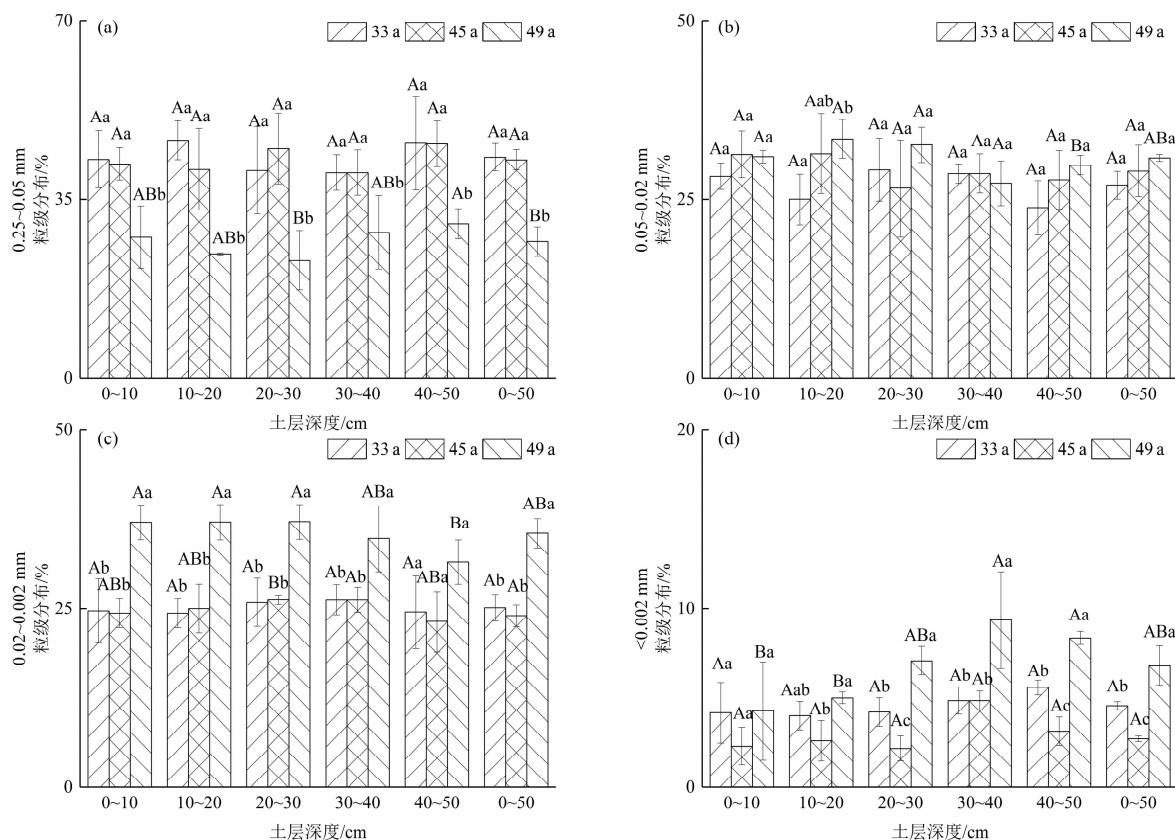
式中, C_i 为第 i 种土壤养分在表层 (0 ~ 10 cm) 的聚集系数; N_i 为第 i 种土壤养分在表层中的含量; $N_{50,i}$ 为第 i 中土壤养分在整个剖面的总含量; C_i 数值越大则表聚程度越明显。

采用 SPSS 和 Excel 等软件对数据进行统计分析, 应用最小显著差法 (LSD) 和单因素方差分析 (One-way-ANOVA) 进行差异显著性检验, 运用 Pearson 分析方法来进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 土壤微团聚体构成

由图 1 可知, 油松人工林土壤微团聚体组成随



注: 不同小写字母表示不同恢复年限同一土层土壤微团聚体组成差异显著 ($P < 0.05$);

不同大写字母表示同一恢复年限不同土层土壤微团聚体组成差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同恢复年限油松人工林土壤不同粒级微团聚体特征

(a) 0.25 ~ 0.05 mm 粒级; (b) 0.05 ~ 0.02 mm 粒级; (c) 0.02 ~ 0.002 mm 粒级; (d) 0.02 ~ 0.002 mm 粒级

Fig. 1 Proportion of different size micro-aggregates in soils of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage:

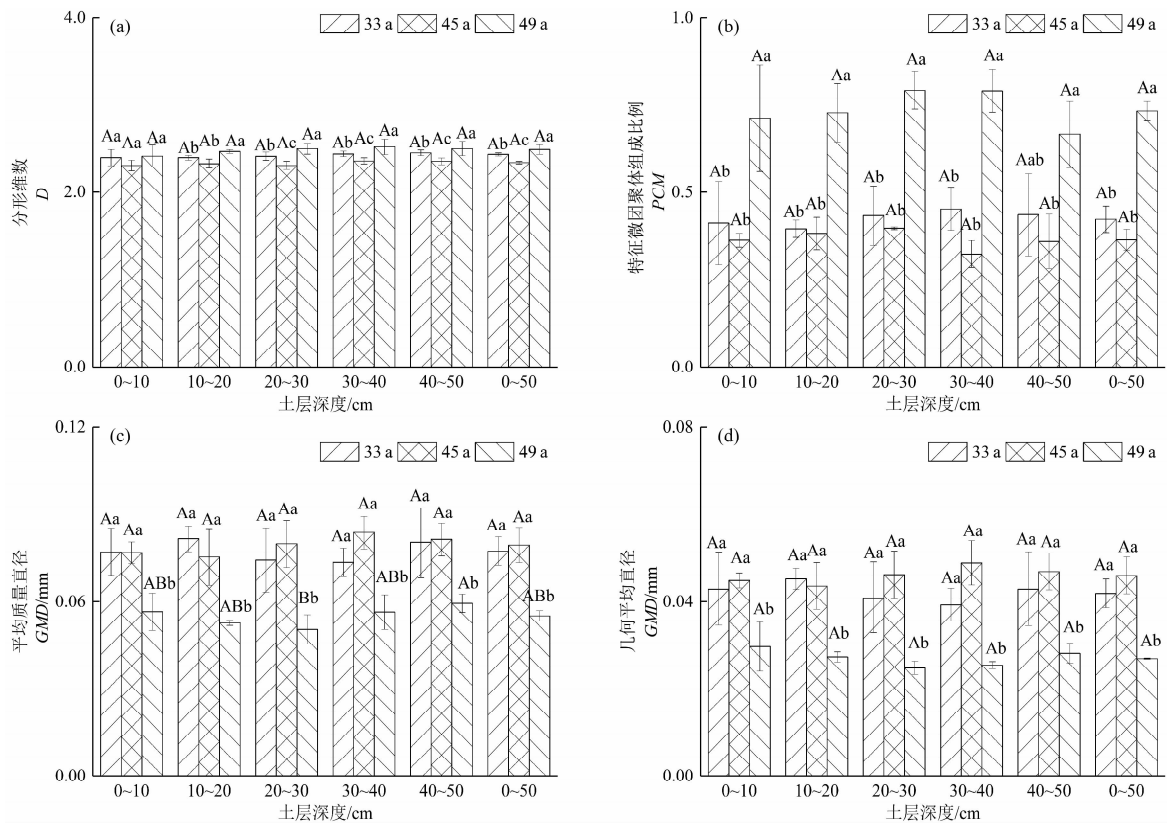
(a) 0.25 ~ 0.05 mm; (b) 0.05 ~ 0.02 mm; (c) 0.02 ~ 0.002 mm size; (d) 0.02 ~ 0.002 mm size

恢复年限变化差异较大。33 a 和 45 a 油松人工林土壤微团聚体以 0.25 ~ 0.05 mm 粒级为主,平均占微团聚体总量的 43.32% 和 44.30%,而 49 a 油松人工林却以 0.02 ~ 0.002 mm 粒级为主,平均占 34.52%。就不同粒级含量变化而言,0.25 ~ 0.05 mm 粒级土壤微团聚体平均含量由 33 ~ 45 a 油松人工林波动增加,而 49 a 油松人工林较前两者分别减少 33.36 和 32.94% ($P < 0.05$),且各土层均差异显著。0.05 ~ 0.02 mm 粒级土壤微团聚体平均含量随油松恢复年限增加无显著差异,仅 49 a 油松人工林 10 ~ 20 cm 土层大于 33 a 油松人工林 ($P < 0.05$)。49 a 油松人工林 0.02 ~ 0.002 mm 粒级土壤微团聚体平均含量分别较 33 a 和 45 a 油松人工林显著增加 37.36% 和 38.03% ($P < 0.05$),并在 0 ~ 40 cm 土层差异显著。<0.002 mm 粒级土壤微团聚体平均含量随油松恢复年限增加在 20 ~ 30 cm、40 ~ 50 cm 土层呈先减少后增加态势

($P < 0.05$)。这说明油松由近熟林转变为成熟林后,大粒级土壤微团聚体先增加后减少,而小粒级土壤微团聚体先减少后增加。不同恢复年限油松人工林土壤微团聚体组成垂直变化规律差异较大,其中 49 a 油松人工林 0.05 ~ 0.02 mm 和 0.02 ~ 0.002 mm 粒级土壤微团聚体含量分别在 30 ~ 40 cm 和 40 ~ 50 cm 土层小于 0 ~ 30 cm 各土层,而 <0.002 mm 粒级土壤微团聚体底层(30 ~ 50 cm)显著大于 0 ~ 30 cm 各土层。

3.2 土壤微团聚体分形特征

由图 2 可知,与 33 a 油松人工林相比,45 a 油松人工林土壤微团聚体平均 PCM 、 D 分别减少了 14.16% ($P = 0.17$) 和 3.62% ($P < 0.05$),而 49 a 油松人工林分别增加了 65.57% 和 3.44% (图 2a 和图 2b)。具体而言,0 ~ 10 cm 土层土壤微团聚体 D 变化不大,而 30 ~ 50 cm 土层 D 随恢复年限呈先减小后增加的趋势,而土壤微团聚体 PCM 在各土层



注:不同小写字母表示不同恢复年限同一土层土壤微团聚体组成差异显著 ($P < 0.05$);

不同大写字母表示同一恢复年限不同土层土壤微团聚体组成差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同恢复年限油松人工林土壤微团聚体分形特征

(a) 分形维数; (b) 特征微团聚体组成; (c) 平均质量直径; (d) 几何平均直径

Fig. 2 Fractal characteristics of soil of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage

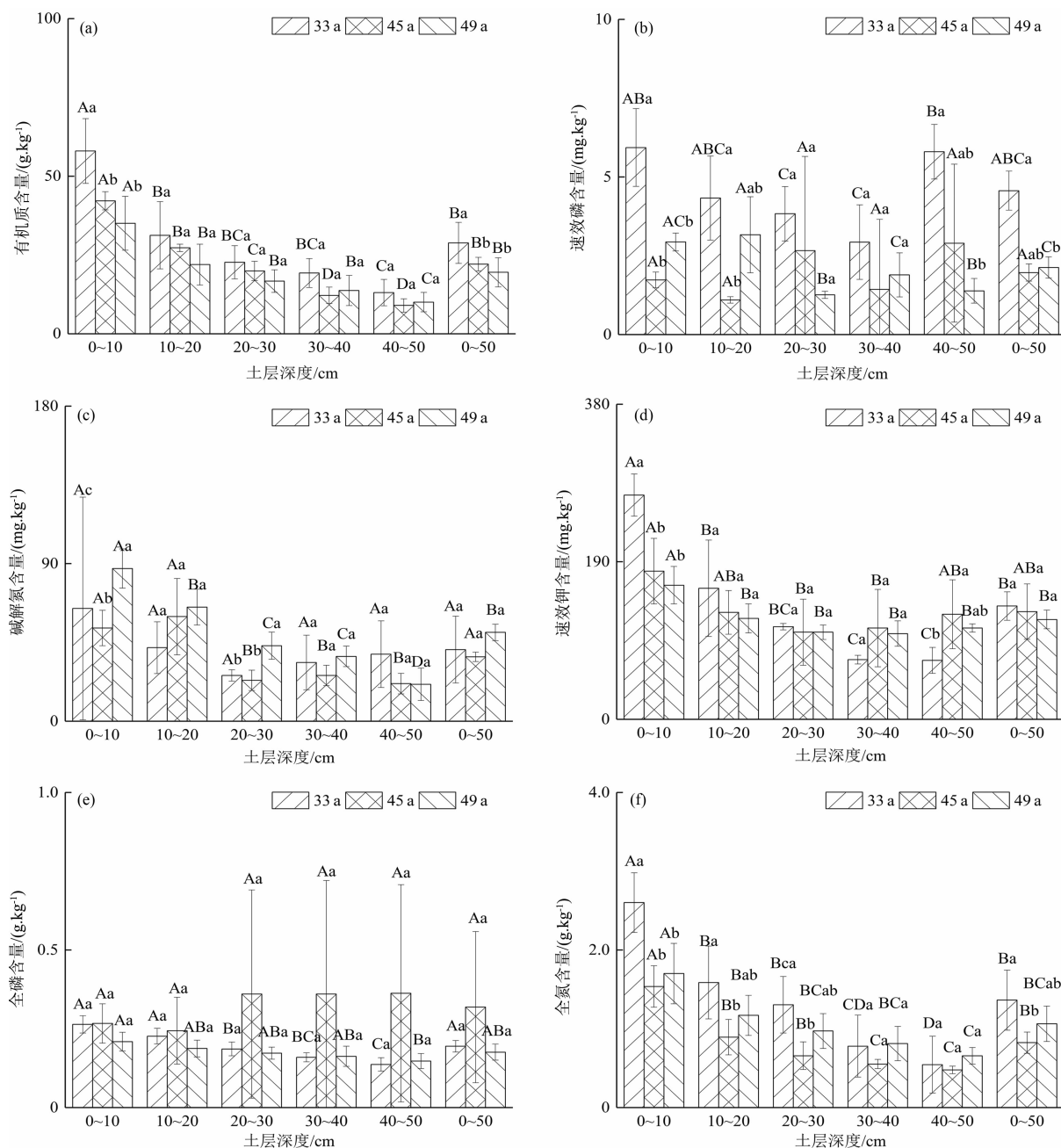
(a) D ; (b) PCM ; (c) MWD ; (d) GMD

(40~50 cm 除外)均表现出 49 a 油松人工林大于 33 a 和 45 a 油松人工林。土壤微团聚体 *MWD* 和 *GMD* 变化规律比较一致,各土层 49 a 油松人工林土壤微团聚体 *MWD* 和 *GMD* 均显著小于 33 a 和 45 a 油松人工林,而 33 a 和 45 a 油松人工林间无显著差异(图 2c 和图 2d)。各恢复年限油松人工林土壤微

团聚体 *D*、*PCM*、*MWD*、*GMD* 垂直变化差异较小,仅 49 a 生油松人工林土壤微团聚体 *MWD* 在 20~30 cm 与 40~50 cm 土层差异显著($P < 0.05$)。

3.3 土壤养分构成差异

由图 3 可知,33 a 油松人工林土壤有机质含量在 0~10 cm 土层显著高于 49 a 油松人工林,49 a



注:不同小写字母表示不同恢复年限同一土层土壤微团聚体组成差异显著($P < 0.05$);

不同大写字母表示同一恢复年限不同土层土壤微团聚体组成差异显著($P < 0.05$)。

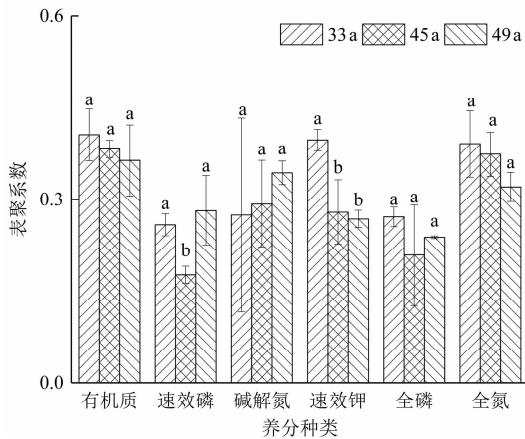
图 3 不同恢复年限油松人工林土壤养分含量变化

(a) 有机质; (b) 速效磷; (c) 碱解氮; (d) 速效钾; (e) 全磷; (f) 全氮

Fig. 3 Changes in soil nutrient content of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage: (a) organic matter;

(b) fast-acting phosphorus; (c) alkaline nitrogen; (d) fast-acting potassium; (e) total phosphorus; (f) total nitrogen

油松人工林土壤碱解氮含量在 20~30 cm 土层显著高于 33 a 和 49 a 油松人工林,而土壤速效钾含量在 0~10 cm、40~50 cm 变化剧烈。相比而言,土壤速效磷和全氮含量随恢复年限增加差异较大,33 a 油松人工林显著高于 49 a 油松,但土壤速效磷在 0~20 cm 和 40~50 cm 土层变化剧烈,而全氮在 0~30 cm 土层变化显著。就垂直变化而言,33 a 油松人工林土壤有机质、速效钾、全氮和全磷含量随土层深度增加呈现逐渐降低的变化特征,而碱解氮含量无显著差异。45 a 油松人工林土壤有机质、全氮含量随深度增加而降低,全磷、速效磷含量波动明显。相比之下,随土层增加 49 a 油松人工林土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮含量逐渐降低,而速效磷含量呈先升后降趋势(图 3)。此外,油松人工林土壤有机质、碱解氮、全磷和全氮表聚现象受恢复年限影响较大,其中 45 a 油松人工林速效磷表聚系数最低,显著低于 33 a 和 49 a 油松人工林,而 33 a 油松人工林速效钾表聚系数显著高于 45 a 和 49 a 油松人工林(图 4)。



注:不同小写字母表示不同恢复年限同一粒级土壤养分组成差异显著($P < 0.05$)。

图 4 不同恢复年限油松人工林土壤养分表聚特征

Fig. 4 Soil nutrient accumulation features in the surface layer of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage

3.4 土壤微团聚体特征与土壤养分关系

相关分析显示(表 2),土壤微团聚体分形维数 D 与 MWD 、 GMD 显著负相关,与 PCM 显著正相关。就粒级而言,0.25~0.05 mm 微团聚体含量与 D 呈显著的负相关关系,而 0.02~0.002 mm ($P < 0.05$) 与 < 0.002 mm ($P < 0.05$),甚至 0.02~

0.05 mm 微团聚体含量与 D 呈正相关,可见 0.05 mm 粒级可作为土壤微团聚体分形维数的临界值,小于这一粒级微团聚体含量增加,分维值增大,反之,分维值降低。

油松恢复过程中土壤有机质与 PCM 呈负相关关系($P < 0.10$),而与 MWD ($P < 0.05$)、 GMD ($P < 0.10$) 显著正相关。土壤速效钾与 MWD ($P < 0.05$)、 GMD ($P < 0.10$) 显著正相关,全磷与 D ($P < 0.10$) 负相关,与 MWD 、 GMD 正相关。相比之下,碱解氮与 D ($P < 0.10$)、呈正相关关系。土壤养分与土壤微团聚体间关系随土层变化差异较大,10~20 cm 土层土壤微团聚体 D 、 PCM 、 MWD 、 GMD 与有机质、速效钾关系紧密,而 20~30 cm 土层其与有机质、碱解氮关系密切,这可能与养分来源与迁移过程有关(表 3)。

4 讨论

土壤 D 与 MWD 、 GMD 显著负相关,与 PCM 显著正相关,这意味着 D 能较好地表征该区土壤微团聚体的大小和质地组成的均匀程度,且 D 与 < 0.002 mm 粒级土壤微团聚体含量的关系程度明显高于 MWD 、 GMD 与 PCM ,说明其在表征该粒级含量变化方面更具优势。植被生长发育是土壤微团聚体 D 动态变化的重要影响因素^[29-30]。王晟强等^[9]和唐海龙等^[11]研究表明随种植年限增加,土壤微团聚体 MWD 有所增大,而土壤微团聚体 D 和 PCM 逐渐减小。然而,郭宝妮等^[13]在研究黄土高原小流域油松林土壤微团聚体变化特征时发现,油松林土壤 0.25~0.05 mm 粒级含量降低,0.01~0.005 mm 粒级含量先减小后增加,随林龄增加 D 越大。郭灵辉等^[37]在研究太行山油松人工林土壤水稳性团聚体稳定性时发现,油松恢复后期土壤中水稳性团聚体下降,团聚体易受水蚀破碎。本研究发现,随着太行山油松人工林恢复年限增加,0.25~0.05 mm 粒级含量下降,而 0.02~0.002 mm 和 < 0.002 mm 粒级含量呈先减小后增加的现象, PCM 、 D 先减小后增加,这与前者研究差异较大,与后者的结果相对吻合,这可能是由于油松人工林恢复抚育更新不够,随着林木发育成熟,油松林通过枯枝落叶和根系改良土壤所培育的肥力小于林木生长的肥力消耗所致^[13,27]。

表 2 不同恢复年限油松人工林土壤微团聚体特征与土壤理化性质的关系

Tab.2 Correlation analysis between soil nutrient content and soil micro-aggregates of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage

土壤 性状	土壤理化性质指标													
	养分含量						微团聚体特征				不同粒级微团聚体含量			
	有机质	速效磷	碱解氮	速效钾	全磷	全氮	<i>D</i>	<i>MWD</i>	<i>GMD</i>	<i>PCM</i>	0.25 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	<0.002 mm
有机质	1													
速效磷	0.57 ^b	1												
碱解氮	0.32	-0.17	1											
速效钾	0.70 ^a	0.18	0.17	1										
全磷	0.18	-0.27	-0.2	0.76 ^a	1									
全氮	0.83 ^a	0.57 ^b	0.62 ^a	0.4	-0.19	1								
<i>D</i>	-0.16	0.04	0.48 ^b	-0.22	-0.49 ^b	0.31	1							
<i>MWD</i>	0.65 ^a	0.27	-0.28	0.60 ^a	0.55 ^b	0.17	-0.82 ^a	1						
<i>GMD</i>	0.54 ^b	0.2	-0.34	0.53 ^b	0.57 ^b	0.05	-0.90 ^a	0.99 ^a	1					
<i>PCM</i>	-0.55 ^b	-0.24	0.37	-0.42	-0.43	-0.07	0.88 ^a	-0.97 ^a	-0.98 ^a	1				
0.25 ~ 0.05 mm	0.68 ^a	0.29	-0.26	0.63 ^a	0.57 ^b	0.20	-0.80 ^a	1.00 ^a	0.98 ^a	-0.96 ^a	1			
0.05 ~ 0.02 mm	-0.79 ^a	-0.37	-0.14	-0.95 ^a	-0.64 ^a	-0.52 ^b	0.22	-0.67 ^a	-0.58 ^b	0.49 ^b	-0.70 ^a	1		
0.02 ~ 0.002 mm	-0.64 ^a	-0.26	0.31	-0.49 ^b	-0.45	-0.16	0.81 ^a	-0.98 ^a	-0.97 ^a	0.99 ^a	-0.98 ^a	0.56 ^a	1	
<0.002 mm	-0.13	-0.03	0.50 ^b	-0.15	-0.41	0.32	0.99 ^a	-0.79 ^a	-0.87 ^a	0.86 ^a	-0.77 ^a	0.18	0.78 ^a	1

注:样本数 $N=9$, a 表示 $P<0.05$, b 表示 $P<0.10$ 。

表 3 不同恢复年限油松人工林土壤微团聚体特征与土壤性状的分层特征

Tab.3 Correlation analysis between soil nutrient content and soil micro-aggregates with different depth of *Pinus tabulaeformis* plantation at different restoration stage

土层	土壤	相关系数						土层	土壤	相关系数					
/cm	性状	有机质	速效磷	碱解氮	速效钾	全磷	全氮	/cm	性状	有机质	速效磷	碱解氮	速效钾	全磷	全氮
0 ~ 10	<i>D</i>	0.19	0.16	0.31	0.06	-0.29	0.31	10 ~ 20	<i>D</i>	-0.29	0.40	0.04	0.04	-0.15	0.15
	<i>MWD</i>	0.45	0.31	-0.40	0.44	0.58 ^a	0.34		<i>MWD</i>	0.64 ^a	-0.01	-0.40	0.52 ^b	0.69 ^a	0.30
	<i>GMD</i>	0.29	0.23	-0.41	0.33	0.54 ^b	0.20		<i>GMD</i>	0.63 ^a	-0.10	-0.36	0.47 ^b	0.67 ^a	0.22
	<i>PCM</i>	-0.39	-0.18	0.30	-0.37	-0.49 ^b	-0.19		<i>PCM</i>	-0.60 ^a	0.29	0.25	-0.36	-0.55 ^a	-0.15
20 ~ 30	<i>D</i>	-0.41	-0.38	0.79 ^a	-0.15	-0.53 ^b	0.20	30 ~ 40	<i>D</i>	0.09	0.07	0.40	-0.18	-0.54 ^b	0.38
	<i>MWD</i>	0.74 ^a	0.25	-0.70 ^a	0.39	0.57 ^b	0.12		<i>MWD</i>	0.14	-0.15	-0.29	0.27	0.57 ^b	-0.16
	<i>GMD</i>	0.69 ^a	0.28	-0.76 ^a	0.34	0.57 ^b	0.05		<i>GMD</i>	0.01	-0.15	-0.36	0.27	0.60 ^a	-0.28
	<i>PCM</i>	-0.66 ^a	-0.44	0.73 ^a	-0.14	-0.32	-0.13		<i>PCM</i>	-0.12	0.04	0.36	-0.10	-0.42	0.23
40 ~ 50	<i>D</i>	0.00	-0.11	-0.11	-0.25	-0.37	0.19	40 ~ 50	<i>GMD</i>	0.39	0.46	0.39	0.24	0.50 ^b	0.03
	<i>MWD</i>	0.49 ^b	0.55 ^b	0.46	0.16	0.45	0.08		<i>PCM</i>	-0.42	-0.35	-0.30	-0.26	-0.48 ^b	-0.04

注:样本数 $N=9$, a 表示 $P<0.05$, b 表示 $P<0.10$ 。

不同恢复阶段油松人工林土壤有机质、全氮含量随土层深度增加而逐渐降低,表聚效应明显,这与党鹏等^[31]、邱新彩等^[32]研究结果一致。土壤表层枯落物归还量大,土壤微生物与土壤动物数量和活动较强,有机质形成与积累较多^[33],而有机质的矿化会使得氮素增加。土壤全磷、速效磷、全钾、速效钾以及碱解氮也存在一定的表聚特征,但垂直波动明显,这与耿增超等^[34]的研究结果一致。迄今人工林土壤养分含量随林龄变化的研究结果不一^[32, 34],一些研究指出,随林龄增加土壤有机质、全氮含量呈上升趋势,土壤速效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮呈波动变化^[31],也有学者认为土壤有机碳质量分数和土壤有机碳密度先增大后减小^[35]。本研究发现33 a油松人工林土壤有机质、速效磷含量显著大于49 a油松人工林,速效钾、碱解氮等呈波动变化。原因可能在于:(1)人工林恢复初期,林木枝条、叶、根生物量比例较大,养分归还相对较多,以及土壤中原有的枯枝落叶及死根不断分解,会促进土壤养分条件改善^[36-37]。(2)随着恢复年限增加,林木生物量增加,根、枝、叶生物量比例及凋落物量减少,养分供需变化使得有机碳含量随林龄增加呈现显著的先上升后下降趋势^[38-39]。Zhang等发现12~58 a樟子松生物量显著增加,其中树干生物量比例由22.9%升高到54.2%,而枝条、叶、根系生物量分别由22.9%、23.3%、31.7%下降至12.1%、5.2%和27.7%^[38]。(3)油松人工林在快速生长阶段内,利用酶来大量合成蛋白质等有机物,在进入成熟林阶段后,林分中积累富含碳的结构性物质,因此不同恢复阶段油松人工林林木及其凋落物内C、N、P的含量差异较大,从而影响了养分归还速率^[40]。此外,土壤空间异质性是土壤重要的属性之一,本研究采用空间代替时间的思想,尽管选取立地条件非常相似的油松人工林样地,但样地微环境、样地数量以及林分密度等不免会带来一定的影响。

土壤肥力的高低不仅受土壤微团聚体粒级大小的影响^[2, 12],还与其数量组成密切相关^[8],本研究发现土壤微团聚体D与有机质、速效磷、速效钾和全氮微弱关系,而与碱解氮和全磷显著相关($P < 0.10$),这说明土壤微团聚体分形维数在一定程度上能够表征土壤养分肥力状况。但表征程度上不及前人研究^[11, 21, 24, 41],这可能是本研究中山地褐土缺氮少磷有关^[27]。本研究土壤中速效磷、碱解氮

含量仅为唐海龙等^[11]、舒正悦等^[24]研究的5%和50%。不同土层土壤养分与土壤微团聚体分形间关系也佐证了两者的复杂关系。因此,若想进一步了解土壤微团聚体分形与土壤肥力的关系实质,深入探讨不同粒级微团聚体的形成机制和功能作用是十分必要的。

5 结论

综上,本研究得出以下结论:

(1)油松人工林由近熟林转变为成熟林后,土壤微团聚体中大粒径微团聚体含量先增加后减少,而小粒径土壤微团聚体含量先减少后增加。

(2)土壤微团聚体分形维数与平均质量直径、几何平均直径显著负相关,与特征微团聚体组成比例显著正相关,分维值可作为定量描述该区土壤微团聚体结构特征的一种重要手段。

(3)随着油松恢复年限的增加,土壤微团聚体分形维数呈先减小后增加的特点,从33 a油松至49 a油松增加了3.44%。土壤微团聚体分形维数在一定程度上能够表征该区土壤养分变化,但两者间关系复杂,进一步探讨不同粒级微团聚体的形成机制和功能尤为必要。

参考文献 (References)

- [1] 陈恩凤,关连珠,汪景宽,等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 49-53. [CHEN Enfeng, GUAN Lianzhu, WANG Jingkuan, et al. Characteristic micro-aggregates and soil fertility evaluation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 49-53]
- [2] WANG S, LI T, ZHENG Z. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon and nutrient within micro-aggregates in the hilly region of western Sichuan, China [J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 113-119.
- [3] WANG Junguang, YANG Wei, YU Bing, et al. Estimating the influence of related soil properties on macro-and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China [J]. Catena, 2016, 137: 545-553.
- [4] LU Q, WANG E, CHEN X. Effect of mechanical compaction on soil micro-aggregate composition and stability of black soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 54-59.
- [5] TOTSCHKE K U, AMELUNG W, GERZABEK M H, et al. Micro-aggregates in soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181(1): 104-136.

- [6] DENG L, KIM D G, PENG C, et al. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China [J]. Land Degradation & Development, 2018, **29**(11): 3974–3984.
- [7] MONCADA, M P, GABRIELS D, CORNELIS W, et al. Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators [J]. Land Degradation & Development, 2013, **26**: 843–852.
- [8] ZHU F, CHENG Q, XUE S, et al. Influence of natural regeneration on fractal features of residue micro-aggregates in bauxite residue disposal areas [J]. Land degradation & development, 2018, **29**(1): 138–149.
- [9] 王晟强, 郑子成, 李廷轩. 四川茶园土壤微团聚体组成及其分形特征[J]. 林业科学, 2014, **50**(9): 10–17. [WANG Shengqiang, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan. Composition and fractal features of soil micro-aggregates in *Camellia Sinensis* plantations, Sichuan Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(9): 10–17]
- [10] 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[J]. 草地学报, 2008, **16**(4): 396–402. [ZHOU Ping, LIU Guobin, HOU Xilu. Study on fractal features of soil micro-aggregates during different restoration stages in the Loess Hilly region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, **16**(4): 396–402]
- [11] 唐海龙, 龚伟, 王景燕, 等. 青花椒种植对土壤微团聚体分形维数和生化特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, **47**(1): 90–97, 106. [TANG Hailong, GONG Wei, WANG Jingyan, et al. Effect of planting *Zanthoxylum armatum* on fractal dimension and biochemical characteristics of soil micro-aggregates [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, **47**(1): 90–97, 106]
- [12] 吴铭, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤微团聚体及有机碳分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(7): 1041–1047. [WU Ming, ZHENG Zicheng, LI Tingxuan, et al. Distribution characteristics of soil micro-aggregates and its organic carbon in different tea plantation age [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(7): 1041–1047]
- [13] 郭宝妮, 张建军, 黄明, 等. 吉县蔡家川流域不同树龄刺槐林和油松林土壤微团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2012, **43**(4): 787–792. [GUO Baoni, ZHANG Jianjun, HUANG Ming, et al., Study on fractal features of soil micro-aggregates under the *robinia Pseudoacacia* and *Pinus Tabulaeformis* of different ages in Caijiachuan watershed of Ji county [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(4): 787–792]
- [14] JING Juntao, FENG Pingfa, WEI Shiliang, et al. Investigation on the surface morphology of Si3N4 ceramics by a new fractal dimension calculation method [J]. Applied Surface Science, 2016, **387**: 812–821.
- [15] KOLAY E, & KAYABALI K. Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach [J]. Engineering Geology, 2006, **86**: 271–284.
- [16] GAO, G L, DING, G D, ZHAO, Y Y, et al. Fractal approach to estimating changes in soil properties following the establishment of *Caragana korshinskii*, shelterbelts in Ningxia, NW China [J]. Ecological Indicators, 2014, **43**: 236–243.
- [17] 郭晓蒙, 姚云, 何丙辉, 等. 不同坡长扰动土壤微团聚体及颗粒组成的分形特征[J]. 中国农业大学学报, 2017, **22**(7): 90–98. [GUO Xiaomeng, YAO Yun, HE Binghui, et al. Fractal features of soil micro-aggregate and particle size distribution under different slope length and disturbance surface [J]. Journal of China Agriculture University, 2017, **22**(7): 90–98]
- [18] 黄小娟, 郝庆菊, 袁雪. 耕作方式对紫色水稻土微团聚体分形特征影响的研究[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(6): 97–102. [HUANG Xiaojuan, HAO Qingju, YUAN Xue. Effect of Tillage Systems on the Fractal Features of Soil Micro-aggregate Structure in a Purple Paddy Soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, **28**(6): 97–102]
- [19] 闫建梅, 何联君, 何丙辉, 等. 川中丘陵区不同治理模式对土壤微团聚体分形特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22**(11): 1294–1300. [YAN Jianmei, HE Lianjun, HE Binghui, et al. Effects of different governance patterns of small watershed on fractal features of soil micro-aggregates in the hilly areas of central Sichuan basin [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, **22**(11): 1294–1300]
- [20] 李杨波, 刘楠, 韩进斌, 等. 冻融循环对五台山典型植被土壤微团聚体的影响[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(5): 21–27. [LI Yangbo, LIU Nan, HAN Jinbin et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil micro-aggregates in typical vegetations of Wutai mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(5): 21–27]
- [21] 郭灵辉, 王道杰, 张云红, 等. 泥石流源区新银合欢林地土壤微团聚体分形特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(5): 243–247. [GUO Linghui, WANG Daojie, ZHANG Yunhong, et al. Fractal features of soil micro-aggregates under *Leucaena leucocephala* forest in debris flow source area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(5): 243–247]
- [22] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 植物篱-农作坡耕地土壤微团聚体组成及分形特征[J]. 土壤学报, 2012, **49**(6): 1069–1077. [PU Yulin, XIE Deti, LIN Chaowen, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregates in sloping farmland with hedgerow [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(6): 1069–1077]
- [23] 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[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(3): 507–515. [ZHANG Chao, LIU Guobin, XUE Sha, et al. Fractal features of Rhizosphere soil microaggregate and particle size distribution under different vegetation types in the hilly gully region of Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **44**(3):

- 507–515]
- [24] 舒正悦, 王景燕, 龚伟, 等. 复合养殖对柑橘林土壤微团聚体分形特征及理化性质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, **41**(5): 92–98. [SHU Zhengyue, WAN Jingyan, GONG Wei, et al. Effects of compound management in citrus orchard on soil micro-aggregate fractal features and soil physical and chemical properties [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, **41**(5): 92–98]
- [25] 代文才, 高明, 王子芳, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式土壤剖面微团聚体组成及分形特征[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(6): 259–264. [DAI Wencai, GAO Ming, WANG Zifang, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregate under Different land use types in purple hilly area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(6): 259–264]
- [26] 张学伍, 陈云明, 王铁梅, 等. 黄土丘陵区中龄至成熟油松人工林的水文效应动态[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012(1): 93–100. [ZHANG Xuewu, CHEN Yunming, WANG Tiemei, et al. Trends of hydrological effects of *Pinus tabulaeformis* forest from middle age to mature in the Loess hilly region [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Sciences Edition), 2012(1): 93–100]
- [27] 郭灵辉, 张文旭, 高江波, 等. 太行山油松人工林土壤水稳性团聚体稳定性及其演变机制[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(11): 1861–1868. [GUO Linghui, ZHANG Wenxu, GAO Jiangbo, et al. Stability features and evolution mechanism of soil water-stable aggregates in *Pinus tabulaeformis* plantation in Taihang mountain [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(11): 1861–1868]
- [28] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 18–75. [YANG Jianghong, WANG Chenglin, DAI Henglin. Agrochemical Soil Analysis and Environmental monitoring [M]. Beijing: China land press, 2008: 18–75]
- [29] 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[J]. 土壤学报, 2007, **44**(3): 571–575. [GONG Wei, HU Tingxing, WANG Jingyan, et al. Fractal features of soil micro-aggregates in soils under natural and regenerated evergreen broadleaved forests in south Sichuan province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(3): 571–575]
- [30] 陈爱民, 邓浩俊, 严思维, 等. 蒋家沟 5 种植被土壤分形特征与养分关系[J]. 山地学报, 2016, **34**(3): 290–296. [CHEN, Aimin, DENG Haojun, YAN Siwei, et al. Fractal Features of Soil and their relation with Soil Fertility under Five Vegetation in Jiangjiagou Gully [J]. Journal of Mountain Science, 2016, **34**(3): 290–296]
- [31] 党鹏, 王乃江, 王娟婷, 等. 黄土高原子午岭不同发育阶段油松人工林土壤理化性质的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(6): 115–121. [DANG Peng, WANG Naijiang, WANG Juanting, et al. Changes of soil physical-chemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantation at different development stages in Ziowuling region of Loess Plateau [J]. Journal of northwest A & F university, 2014, **42**(6): 115–121]
- [32] 邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(2): 221–229. [QIU Xincan, PENG Daoli, LI Weili, et al., Soil physicochemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantations of different ages in Yanqing, Beijing [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2018, **24**(2): 221–229]
- [33] 邱甜甜, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原不同生长阶段油松人工林土壤微生物生物量碳的变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 681–687. [QIU Tiantian, LIU Guobin, WANG Guoliang, et al. Change of soil microbial biomass carbon and their impact factors for *Pinus tabulaeformis* plantation at different development stages on the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of applied ecology, 2016, **27**(3): 681–687]
- [34] 耿增超, 张社奇, 王国栋, 等. 黄土高原油松人工林地土壤养分及化学性质的时空效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(8): 98–104. [GENG Zengchao, ZHANG Sheqi, WANG Guodong, et al. Time-space distributive feature of soil nutrient condition and chemical properties of *pinus tabulaeformis* plantation forestland in Loess Plateau [J]. Journal of northwest A & F university, 2006, **34**(8): 98–104]
- [35] 宋超, 陈云明, 曹扬, 等. 黄土丘陵区油松人工林土壤固碳特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2015, **13**(3): 76–82. [SONG Chao, CHEN Yunming, CAO Yang, et al. Characteristics of soil carbon sequestration in *Pinus tabulaeformis* plantations and influencing factors in the Loess Hilly Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, **13**(3): 76–82]
- [36] DU Hu, ZENG Fuping, PENG Wanxia, et al. Carbon Storage in a Eucalyptus Plantation Chronosequence in Southern China [J]. Forests, 2015, **6**: 1763–1778.
- [37] CAO Jixin, WANG Xiaoping, TIAN Yun et al. Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest [J]. Ecological Research, 2012, **27**: 883–892.
- [38] ZHANG Xiao, ZHANG Xueli, HAN Hui, et al. Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in an Age-Sequence of *Mongolian Pine* Plantations in Horqin Sandy Land, China [J]. Forests, 2019, **10**(2): 197.
- [39] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 833–843. [WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al. Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(3): 833–843]
- [40] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2016, **36**(19): 6188–

6197. [JIANG Peipei, CAO Yang, CHEN Yunming et al. Variation of C, N and P stoichiometry in plant tissue, litter and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6188–6197]
- [41] 李强, 李志伟, 王全, 等. 云南陆良植烟土壤粒径分布及其分形维数空间变异研究[J]. 山地学报, 2017(1): 23–31. [LI Qiang, Li Zhiwei, WANG Quan, et al. Spatial variation of soil particle distribution and its fractal dimensions in a Tobacco planting area—a case study of Luliang Tobacco growing area [J]. Journal of Mountain Science, 2017(1): 23–31]

Change Features of Soil Micro-aggregates of *pinus tabulaeformis* Plantation at Different Developmental Stages in the Southern Taihang Mountain and Its Relationship with Soil Nutrients

ZHANG Wenxu^{1,2,3}, LI Jianhong¹, GUO Linghui^{1*}, GAO Jiangbo^{4,5}

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 China;

4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

5. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Soil micro-aggregates stability is one of the most important properties in soils and affects water erosion, soil aeration, nutrient recycling, as well as plant growth. Therefore, a better understanding of the composition of soil micro-aggregates during vegetation restoration is essential to maintain structural stability in soils. In this study, it took the Taihang Mountain greening pioneer tree *Pinus tabulaeformis* plantation as the research object, and based on the idea of space instead of time series. Fractal dimensions (D) combined with characteristics micro-aggregates proportion (PCM), mean weight diameter (MWD), geometrical mean diameter (GMD) was used to investigate the soil micro-aggregates change process and its fractal characteristics in *Pinus tabulaeformis* restoration, then the relationship between soil micro-aggregates D and soil nutrients was studied. The results showed that the proportion of 0.25 ~ 0.05 mm fraction in soil micro-aggregates displayed a sigmoidal pattern, first rapidly growing from 33 years to 45 years and then gradually decreasing, while the proportion of <0.02 mm appeared an opposite pattern. The PCM and D of soil micro-aggregates increased by 3.44% and 65.57% from 33 a to 49 a, while MWD and GMD decreased about 26% and 33%, respectively. With *Pinus tabulaeformis* restoration, soil micro-aggregates D was not only significantly correlated with soil micro-aggregates MWD , GMD and PCM , but also was closely related with available nitrogen and total phosphorus, indicating that soil micro-aggregates D could be regarded as a considerable parameter to reflect variations in soil properties.

Key words: *Pinus tabulaeformis* plantation; soil micro-aggregate; fractal dimension; soil nutrients; Taihang Mountain