

DOI: 10.5846/stxb201912272807

王志康, 祝乐, 许晨阳, 李艳, 耿增超, 王强, 刘莉丽, 秦一郎, 杜旭光. 秦岭天然林凋落物去除对土壤团聚体稳定性及细根分布的影响. 生态学报, 2022, 42(13): 5493-5503.

Wang Z K, Zhu L, Xu C Y, Li Y, Geng Z C, Wang Q, Liu L L, Qin Y L, Du X G. Effects of litter removal on soil aggregate stability and distribution of fine roots in natural forests of Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5493-5503.

## 秦岭天然林凋落物去除对土壤团聚体稳定性及细根分布的影响

王志康<sup>1,6</sup>, 祝乐<sup>1,7</sup>, 许晨阳<sup>1</sup>, 李艳<sup>2</sup>, 耿增超<sup>1,3,\*</sup>, 王强<sup>1</sup>, 刘莉丽<sup>4</sup>, 秦一郎<sup>1</sup>, 杜旭光<sup>5</sup>

1 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨陵 712100

2 陕西省耕地质量与农业环境保护工作站, 西安 710000

3 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081

4 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

5 汉中市勉县农业技术推广站, 汉中 724200

6 青岛冠中生态股份有限公司, 青岛 266102

7 乌兰察布市农牧业生态资源保护中心, 乌兰察布 012000

**摘要:** 研究凋落物去除对秦岭天然林土壤团聚体稳定性及细根分布特征的影响机制, 为森林生态治理提供理论依据。结果表明: (1) 凋落物去除导致云杉林 10—40 cm 土层土壤中粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量 ( $WR_{0.25}$ ) 较对照显著降低 ( $P < 0.05$ ); 混交林 10—40 cm 土层的大于 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量 ( $DR_{0.25}$ ) 显著降低 ( $P < 0.05$ ); 红桦林表层 0—10 cm 土壤团聚体的平均质量直径 (MWD) 显著降低 ( $P < 0.05$ ); (2) 凋落物去除导致三种天然林 0—20 cm 土层的细根生物量密度 (FRBD) 较对照显著降低 44.18%—57.24%, 细根体积 (FRV) 显著降低 24.64%—60.41%; 三种天然林中红桦林 0—40 cm 各土层的 FRV 最高; (3) 凋落物去除导致云杉林 0—40 cm 土层的土壤容重较对照显著增加 5.24%—13.04%, 三种天然林 0—40 cm 土层的土壤有机碳含量显著降低 7.92%—25.21%, 全氮含量显著降低 10.17%—18.10%; (4) 相关分析表明, 云杉林土壤的团聚体破坏率 (PAD) 和土壤不稳定团粒指数 ( $E_{LT}$ ) 与 FRBD、细根根长密度 (FRLD) 和 FRV 均呈极显著负相关, 混交林土壤的 PAD 与 FRBD 呈极显著负相关关系 ( $r = -0.814$ ), 红桦林土壤团聚体 MWD 与 FRBD、FRLD 和细根比根长 (FSRL) 均呈显著负相关关系 ( $r = -0.777$ 、 $-0.771$  和  $-0.786$ )。综上, 凋落物去除在总体上降低了天然林土壤团聚体的稳定性及有机碳和全氮含量, 并且不利于林木细根的生长。

**关键词:** 天然林; 凋落物去除; 团聚体稳定性; 细根分布

## Effects of litter removal on soil aggregate stability and distribution of fine roots in natural forests of Qinling Mountains

WANG Zhikang<sup>1,6</sup>, ZHU Le<sup>1,7</sup>, XU Chenyang<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, GENG Zengchao<sup>1,3,\*</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, LIU Lili<sup>4</sup>, QIN Yilang<sup>1</sup>, DU Xuguang<sup>5</sup>

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China

2 Cultivated land Quality and Agri-environment Protection Workstation, Department of Agriculture and Rural Affairs of Shaanxi Province, Xi'an

**基金项目:** 农业部农业环境重点实验室开放基金 (K4030217149); 国家林业公益性行业科研专项 (201304307)

**收稿日期:** 2019-12-27; **网络出版日期:** 2022-03-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gengzengchao@126.com

710000, China

3 Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

4 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

5 Agrotechnical Promotion Station in Mianxian Country, Hanzhong 724200, China

6 Qingdao Greensum Ecology Co., LTD, Qingdao 266102, China

7 Agriculture and Animal Husbandry Ecological Resources Protection Center of Ulanqab, Ulanqab 012000, China

**Abstract:** The objective of this study is to investigate the effects of litter removal on the characteristics of soil aggregates stability and fine root distribution so as to provide theoretical bases for vegetation restoration and ecological protection in Qinling Mountains. Results indicated that (1) the litter removal significantly decreased the percentages of  $>0.25$  mm water-stable aggregates ( $WR_{0.25}$ ) in 10—40 cm soil layer ( $P<0.05$ ). The percentage of  $>0.25$  mm mechanical-stable aggregates ( $DR_{0.25}$ ) in 10—40 cm soil layer of mixed forest was also decreased significantly ( $P<0.05$ ). The mean weight diameter (MWD) of aggregates in 0—10 cm soil layer of *Betula albosinensis* forest was decreased ( $P<0.05$ ) by litter removal. (2) By litter removal, the fine root biomass density (FRBD) in 0—20 cm soil layer of the three forests significantly decreased by 44.18%—57.24%; the fine root volume (FRV) significantly decreased by 24.64% to 60.41%. The FRV in 0—40 cm soil layer of *Betula albosinensis* forest was the highest among the three forests. (3) After 3-year litter removal, the soil bulk density in 0—40 cm soil layer of *Picea asperata* forest significantly decreased by 5.24%—13.04%. The soil organic carbon contents in 0—40 cm soil layer of the three forests significantly decreased by 7.92%—25.21%, and the contents of total nitrogen significantly decreased by 10.17%—18.10%. (4) The results of correlation analysis showed that percentage of aggregate destruction (PAD) and unstable soil aggregate index ( $E_{LT}$ ) of *Picea asperata* forest soil had significantly negative correlations ( $P<0.01$ ) with FRBD, fine root length density (FRLD), and FRV. The PAD of mixed forest soil showed a significantly negative correlation ( $P<0.01$ ) with FRBD ( $r=-0.814$ ). The aggregate MWD of *Betula albosinensis* forest soil had significantly negative correlations ( $P<0.01$ ) with FRBD, FRLD and fine specific root length (FSRL) ( $r=-0.777$ ,  $-0.771$  and  $-0.786$ ). Overall, the litter removal decreased the stability of soil aggregates, the contents of soil organic carbon and total nitrogen in soils of natural forests, which also inhibited the growth of fine roots.

**Key Words:** natural forest; litter removal; soil aggregate stability; fine root distribution

凋落物转化是土壤有机质的主要来源,凋落物分解并释放矿质养分是生物地球化学循环的重要环节,对林木生长意义重大<sup>[1]</sup>。土壤团聚体是不均匀的土壤结构单元,通过控制土壤孔隙影响土壤的透气性、保水性以及抗侵蚀能力,并且为土壤微生物提供良好的生境<sup>[2]</sup>。近期研究开始深入地揭示凋落物分解与土壤有机质形成和土壤团聚作用之间的耦合机理<sup>[3]</sup>。以往研究表明,土壤团聚体能够为土壤有机质提供保护,同时团聚体的形成也依赖凋落物转化形成的大分子有机物<sup>[4]</sup>。然而,凋落物不是土壤有机质的唯一主要来源,植物根系尤其是细根的周转及根际微生物的代谢也是土壤有机质的重要来源,并且还是土壤团聚体形成的关键因素<sup>[5]</sup>。但是,目前还未见有研究能够在原位分离凋落物因素与根系因素对土壤团聚作用的影响。

细根(直径 $\leq 2$  mm)是林木获取水分、养分的主要器官<sup>[6]</sup>,研究表明根系作为植物与土壤进行物质交换的纽带,与土壤理化性质密切相关<sup>[7]</sup>。以往研究发现凋落物层对林木天然更新具有物理阻碍作用和化感作用,建议将凋落物清理作为一项林木抚育措施<sup>[8-9]</sup>,但是凋落物去除对土壤结构及根系的影响还缺少相应的评估<sup>[10]</sup>;考虑到凋落物对土壤结构性能的重要性<sup>[11]</sup>,凋落物去除作为抚育的一种措施,对林下土壤影响如何,现有研究仍不够系统、全面;目前研究主要集中在对土壤碳、氮循环的影响方面<sup>[11-13]</sup>,凋落物去除对不同树种细根分布及土壤团聚体稳定性影响的研究仍鲜有报道。为了探明凋落物层的去除对土壤团聚体稳定性及林木根系的影响,本文选取秦岭三种不同类型的天然林进行凋落物去除试验,研究凋落物层去除条件下土壤团聚体稳定性与林木根系的关系,以期进一步了解凋落物层、根系与土壤团聚作用三者之间的互动关系,为森林生

态治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

秦岭通天河国家森林公园(34°10′—34°20′N, 106°28′—106°38′E)即原陕西省宝鸡市凤县辛家山林场,位于秦岭中西段的陕甘相接处,海拔 1580—2738 m,属暖温带半湿润山地气候,年均气温 7.6 °C,年均降水量 900 mm<sup>[14]</sup>。成土母质主要为残积物和坡积物;土壤类型主要为湿润锥形土或淋溶土(在发生分类中属于棕壤和暗棕壤)。研究区森林覆盖率达 96.8%,含以云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies Mill*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和华山松(*Pinus armandii*)为主要树种的针叶林,和以红桦(*Betula albosinensis*)、锐齿栎(*Quercus aliena var. acuteserrata*)、辽东桦(*Betula schmidtii*)、漆树(*Toxicodendron succedaneum*)、山杨(*Populus davidiana*)和鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)为主要树种的阔叶林,以及多种针阔混交林。冠层以下植被主要有:竹类的毛竹(*Phyllostachys edulis*)、灌木类的悬钩子(*Rubus corchorifolius*)和栓翅卫矛(*Euonymus phellomanus Loes*)等;草本有龙芽草(*Agrimonia pilosa Ldb.*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla Bunge*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、茜草(*Rubia cordifolia L.*)和披针叶苔草(*Carex lanceolata Boott*)等<sup>[15]</sup>。

### 1.2 样地选择

为探究凋落物去除对不同森林类型土壤团聚体稳定性及细根分布的影响,本文选择具有代表性的云杉(针叶)林、红桦(阔叶)林及云杉+红桦(针阔)混交林三种典型天然林开展研究。于 2016 年 8 月,在每个林分设置 3 个样地(20 m×20 m)作为重复,每个样地设置 3 个凋落物去除样点(距树 1 m 处,2 m×2 m),并设置 3 个无处理样点作为对照<sup>[15]</sup>。在生长季(6—9 月)逐月清除样点地表凋落物<sup>[16]</sup>。各林分基本情况如表 1 所示。

表 1 三种林分的立地条件及林木参数

Table 1 Site conditions and forest parameters of three forest stands

林分类型 Forest stand	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	土壤类型 Soil type	郁闭度 Canopy density	林木密度 Tree density/ (株/hm <sup>2</sup> )	胸径 DBH/cm	树高 Height/m
云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	106°31′32″	34°16′49″	2123	锥形土	0.84	625	33.9	17.8
云杉+红桦混交林 Mixed forest	106°31′32″	34°16′50″	2140	锥形土	0.80	413/373	37.0/14.9	18.2/10.7
红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest	106°31′32″	34°16′51″	2153	锥形土	0.94	1422	15.6	15.8

表中所统计林木的起测胸径为 10 cm,起测树高为 5 m。DBH 表示胸径(the diameter at breast height)。

### 1.3 样品的采集和处理

#### 1.3.1 土壤团聚体样品

土壤团聚体分析样品的采集时间为 2019 年 8 月,采集方法为:先挖掘一个 40 cm 深,20 cm 宽的垂直土壤剖面,然后在剖面上分层采集 0—10、10—20 和 20—40 cm 土层的原状土,装入盒中带回实验室。将原状土样挑去根系和石块等杂质,沿土体自然结构轻轻掰成约 1 cm<sup>3</sup>大小的土块后风干。不同径级的土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量分别采用干筛法和湿筛法测定<sup>[17]</sup>。

>0.25 mm 的机械稳定性团聚体含量(>0.25 mm mechanical stable aggregates,  $DR_{0.25}$ )的计算如下:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n d_i$$

>0.25 mm 的水稳性团聚体含量( $WR_{0.25}$ )的计算公式如下:

$$WR_{0.25} = \sum_{i=1}^n w_i$$

计算机稳定性团聚体平均质量直径(MWD)的公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times d_i)}{\sum_{i=1}^n d_i}$$

计算团聚体破坏率(PAD)的公式如下:

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%$$

计算土壤不稳定团粒指数( $E_{LT}$ )的公式如下:

$$E_{LT} = \frac{W_T - WR_{0.25}}{W_T} \times 100\%$$

式中, $d_i$ 与 $w_i$ 分别为第*i*粒级机械稳定性和水稳性团聚体质量百分比; $x_i$ 为第*i*粒级团聚体的平均直径(mm); $W_T$ 为供试土壤的总质量<sup>[18]</sup>。

### 1.3.2 根系样品

采用根钻法<sup>[15,19]</sup>对各样点进行样品采集,用内径5 cm的土钻分别采取0—10、10—20和20—40 cm各层根系+土壤样品,用编号塑封袋封装带回。将取回的样品进行根系和土壤的分离,仔细根据根系的外形、气味、颜色等辨认筛选出云杉和红桦的所有根系并放入清水中浸泡,除去根系表面土粒和杂质,用清水冲洗干净后将根系挑出装入自封袋,在4℃下保存。处理好的根样用数字化扫描仪扫描成像,利用“Win RHIZO根系分析系统”软件分析,获取不同径级根系的长度(cm)和体积( $\text{cm}^3$ ),将扫描过的根样放入80℃烘箱内烘干至恒重后,挑出细根称量并记录细根生物量(g)。各指标计算方法如下:细根生物量密度(Fine root biomass density, FRBD)计算公式为:FRBD = FRB/RCV,细根根长密度(Fine root length density, FRLD)计算公式为:FRLD = FRL/RCV,单位细根体积(Fine root volume, FRV)计算公式为:FRV = TFRV/RCV;细根比根长(Fine specific root length, FSRL)计算公式为:FSRL = FRL/FRB。式中FRL表示细根总长度,TFRV表示细根总体积,FRB表示细根生物量,RCV表示根钻体积。

### 1.3.3 土壤样品

将各层筛选完根系的土壤样品混匀后分成两份,一份过2 mm筛后低温(4℃)保存用于测定土壤水分等指标,另一份风干研磨过2 mm和0.25 mm筛用于化学分析;土壤容重采用环刀(100  $\text{cm}^3$ )法测定,土壤水分含量采用烘干法测定(105℃, 24 h),土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定,土壤全氮含量采用半微量凯氏法测定<sup>[20]</sup>。

## 1.4 统计分析

数据分析和绘图分别采用IBM SPSS 19.0和OriginPro 8.5软件,相关性分析用于分析根系与团聚体指标之间的关系。单因素方差分析(One-way ANOVA)用于比较不同林分 and 不同处理之间的差异显著性,用Duncan新复极差法进行多重比较。结果以平均值±标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理土壤团聚体的变化

#### 2.1.1 粒径>0.25 mm土壤团聚体含量的变化

如表2所示,凋落物去除3 a后,云杉林10—20 cm土层的 $DR_{0.25}$ 、 $WR_{0.25}$ 及20—40 cm土层的 $WR_{0.25}$ 较对照均显著( $P < 0.05$ )降低;混交林10—20 cm和20—40 cm土层的 $DR_{0.25}$ 显著( $P < 0.05$ )低于对照。说明凋落物去除对各天然林不同土层土壤团聚体形成的影响不尽相同。三种天然林0—10 cm土层的 $DR_{0.25}$ 均显著( $P <$

0.05) 低于其他土层;红桦林各土层的  $DR_{0.25}$  均为最高,且红桦林 0—10 cm 和 20—40 cm 土层的  $WR_{0.25}$  在三种林分中也是最高。

表 2 不同处理下各土层的  $DR_{0.25}$  和  $WR_{0.25}$  / %Table 2  $DR_{0.25}$  and  $WR_{0.25}$  at each soil layer under different treatments

指标 Index	处理 Treatment		土层深度 Soil depth/cm		
			0—10	10—20	20—40
大于 0.25mm 机械稳定性团聚体含量( $DR_{0.25}$ ) Content of mechanical stable aggregates >0.25 mm / %	凋落物去除	云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	93.72±0.75Ac	94.86±0.08Bb	96.38±0.31Aa
		云杉+红桦混交林 Mixed forest	93.05±1.04Ab	95.90±0.40Ba	95.70±0.26Ba
		红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest	94.30±0.60Ab	97.05±0.37Aa	97.09±0.05Aa
	对照	云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	91.10±0.09Bb	96.23±0.61Aa	95.64±0.42Aa
		云杉+红桦混交林 Mixed forest	93.33±0.17Ac	96.77±0.15Ab	97.65±0.24Aa
		红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest	92.81±0.62Bb	96.60±0.65Aa	96.04±0.68Aa
大于 0.25mm 水稳性团聚体含量( $WR_{0.25}$ ) Content of water-stable aggregates >0.25 mm / %	凋落物去除	云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	89.54±0.10Aa	87.63±0.15Bb	87.43±0.47Bb
		云杉+红桦混交林 Mixed forest	90.12±0.22Ab	91.55±1.10Aa	89.82±1.42Ab
		红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest	91.18±0.56Aa	88.77±0.93Ab	90.66±0.58Aa
	对照	云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	88.99±0.55Ab	88.89±0.45Ab	91.47±1.09Aa
		云杉+红桦混交林 Mixed forest	86.68±0.40Bc	91.86±0.64Aa	89.27±1.05Ab
		红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest	90.74±0.40Aa	90.03±0.73Ab	90.93±0.55Aa

表中不同大写字母表示相同林分和土层不同处理差异显著( $P<0.05$ ), 不同小写字母表示相同林分和处理不同土层差异显著( $P<0.05$ )

### 2.1.2 土壤团聚体稳定性的变化

如表 3, 相比对照, 红桦林 0—10 cm 表层的 MWD 显著 ( $P<0.05$ ) 降低 8.89%; 云杉林和混交林 10—20 cm 土层的 MWD 分别降低了 13.44% 和 7.38%; 云杉林 20—40 cm 土层的 MWD 降低了 15.35%。三种天然林中, 红桦林 0—10 cm 和 20—40 cm 土层的干筛 MWD 最高。相比对照, 红桦林 10—20 cm 土层的 PAD 增加了 34.86%; 云杉林和红桦林 20—40 cm 土层的 PAD 分别增加了 76.92% 和 49.73%; 云杉林 10—20 cm 和 20—40 cm 土层的  $E_{IT}$  分别增加了 11.34% 和 37.38%。

### 2.2 不同处理细根分布特征的变化

三种天然林 0—10 cm 土层具有最高的 FRBD、FRLD 和 FRV (图 1); 随土壤深度增加, 三种林分的 FRBD、FRLD 和 FRV 均显著降低 ( $P<0.05$ ); 凋落物去除 3a, 在 0—10 cm 土层, 三种林分的 FRBD、FRLD 和 FRV 均显著降低 ( $P<0.05$ ), 其中云杉林、混交林和红桦林的 FRBD 分别降低 44.18%、48.19%、57.24%, FRLD 分别降低 48.89%、40.11%、32.45%, FRV 分别降低 46.80%、41.28%、24.64%; 在 10—20 cm 土层, 云杉林、混交林和红桦林的 FRBD 分别显著降低了 44.80%、57.00%、46.29%, FRV 分别显著降低了 50.19%、60.41%、47.26%; 在 20—40 cm 土层, 三种林分各处理的 FRBD、FRLD 和 FRV 与对照相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。三种林分中, 红桦林 10—20 cm 土层的细根生物量最高, 0—40 cm 土层的 FRV 最高, 表明红桦林的细根发达程度最高。

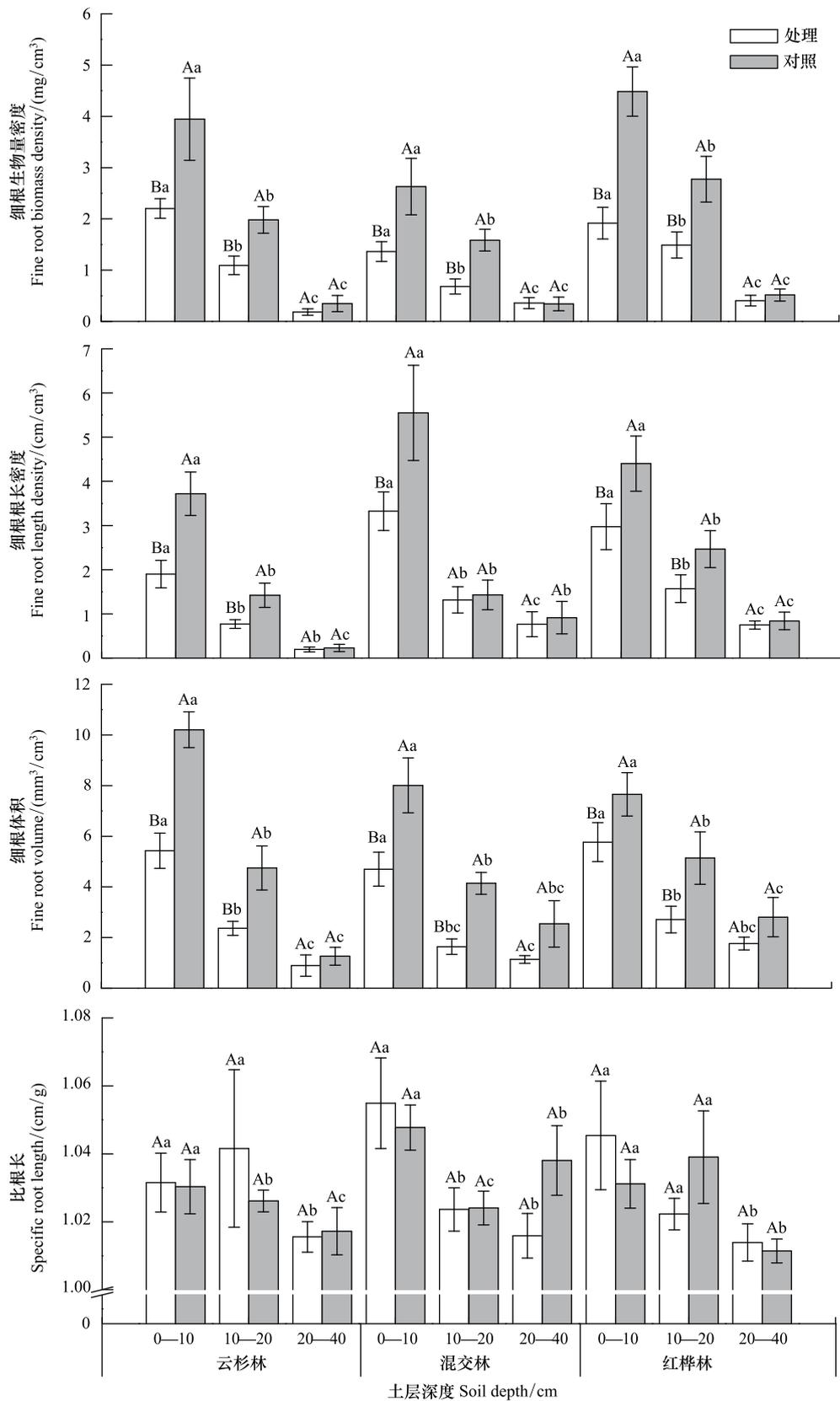


图 1 不同处理下各土层的细根分布特征

Fig.1 Distribution characteristics in each soil layers under different treatment

图中不同大写字母表示相同林分和土层在处理与对照之间差异显著( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示相同林分和处理不同土层差异显著( $P < 0.05$ )

表 3 不同处理下各土层的土壤团聚体稳定性指标

Table 3 Soil aggregates stability index at each soil layers under different treatment

处理 Treatment	土层深度 Layers/cm	平均重量直径(MWD) Mean weight diameter/mm	团聚体破坏率(PAD) Percentage of aggregate destruction/%	不稳定团粒指数( $E_{LT}$ ) Unstable soil aggregate index/%	
凋落物去除 Litter removal	云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	0—10	26.45±0.25Aa	3.73±0.82Ab	10.46±0.02Ab
		10—20	26.92±0.66Ba	7.62±0.24Aa	12.37±0.15Aa
		20—40	23.17±0.66Ba	9.12±0.51Aa	12.57±0.47Aa
云杉+红桦混交林 Mixed forest		0—10	27.29±1.23Ac	4.52±0.04Bb	9.88±0.22Ba
		10—20	28.51±0.22Bb	5.33±0.54Ab	8.45±1.1Ab
		20—40	32.04±1.74Aa	11.09±1.29Aa	10.18±1.42Aa
红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest		0—10	26.32±1.35Bb	4.66±2.07Ab	8.82±0.56Ab
		10—20	30.77±6.75Aa	8.33±0.94Aa	11.23±0.93Aa
		20—40	31.46±2.1Aa	8.47±1.29Aa	9.34±0.58Ab
对照 Control	云杉林 <i>Picea asperata</i> forest	0—10	24.31±0.01Bc	2.64±0.34Ab	11.01±0.55Aa
		10—20	31.1±1.4Aa	7.94±0.23Aa	11.11±0.45Ba
		20—40	27.37±0.4Ab	5.16±0.37Bc	9.15±0.15Bb
云杉+红桦混交林 Mixed forest		0—10	26.12±0.44Ac	7.12±0.59Ab	13.32±0.4Aa
		10—20	30.61±0.01Ab	5.74±0.15Ab	8.14±0.64Ac
		20—40	31.46±0.26Aa	11.59±2.16Aa	10.73±1.05Ab
红桦林 <i>Betula albo-sinensis</i> forest		0—10	28.89±0.32Ac	2.23±0.23Ab	9.26±0.4Ab
		10—20	30.89±0.93Ab	6.18±0.13Ba	10.37±0.25Aa
		20—40	32.85±0.05Aa	5.66±0.89Ba	9.07±0.55Ab

### 2.3 不同处理土壤基础理化性质的变化

如表 4 所示,相比对照土壤,3 a 的凋落物去除使云杉林和混交林表层 0—10 cm 的土壤容重分别增加了 13.04% 和 21.74%;使云杉林 10—20 cm 和 20—40 cm 土层的容重分别增加了 5.24% 和 9.93%;使云杉林、混交林和红桦林 0—10 cm 表层的有机碳含量分别降低了 10.61%、7.92% 和 8.86%;混交林和红桦林 10—20 cm 土层的有机碳含量分别降低了 16.61% 和 20.07%;云杉林和红桦林 20—40 cm 土层的有机碳含量分别显著 ( $P < 0.05$ ) 降低了 15.64% 和 25.21%;使云杉林和混交林 0—10 cm 土壤的全氮含量分别降低了 18.10% 和 10.87%;使云杉林、混交林和红桦林 10—20 cm 土壤的全氮含量分别降低了 10.49%、14.10%、和 10.17%;使红桦林 20—40 cm 土层的土壤全氮含量降低了 15.84%。

### 2.4 土壤团聚体稳定性与细根分布特征的关系

凋落物去除 3a,不同林分细根特征参数与土壤稳定性指标的相关关系如表 5 所示。在云杉林,土壤  $WR_{0.25}$  与 FRBD、FRLD、FRV 均呈极显著正相关关系 ( $r$  值分别为 0.885、0.867、0.913);PAD 和  $E_{LT}$  与 FRBD、FRLD 和 FRV 均呈极显著负相关关系。在混交林,土壤 PAD 与 FRBD 呈极显著负相关关系 ( $r$  值为 -0.814),与 FRLD 和 FSRL 呈显著负相关关系 ( $r$  值分别为 -0.687、-0.683);MWD 与 FRBD、FRLD、FRV 和 FSRL 均呈极显著负相关关系 ( $r$  值分别为 -0.874、-0.961、-0.931、-0.810)。在红桦林,土壤 PAD 与 FRLD 呈显著负相关关系 ( $r$  值为 -0.778),与 FRV 呈极显著负相关关系 ( $r$  值为 -0.896);MWD 与 FRBD、FRLD 和 FSRL 均呈显著负相关关系 ( $r$  值分别为 -0.777、-0.771、-0.786),与 FRV 呈极显著负相关关系 ( $r$  值为 -0.887)。三种天然林中,云杉林土壤  $WR_{0.25}$ 、PAD 和  $E_{LT}$  与 FRBD、FRLD 和 FRV 的相关性最高。

## 3 讨论

### 3.1 凋落物去除对土壤团聚体的影响

土壤中直径  $>0.25$  mm 的团聚体含量和 MWD 越高,说明团聚体稳定性越强,土壤的结构性能越好<sup>[21-23]</sup>。

表 4 不同林分凋落物处理下各土层的土壤理化指标

Table 4 Soil physicochemical properties at each soil layers under different treatment

处理 Treatment	土层深度 Layers /cm	容重 Soil bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	土壤水分 Soil moisture/%	有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)		
凋落物去除 Litter removal	云杉林 <i>Picea asperata forest</i>	0—10	0.84±0.02Ab	0.53±0.03Aa	42.18±1.93Ba	4.10±0.07Ba	
		10—20	0.91±0.01Aa	0.46±0.04Ab	31.61±1.36Ab	3.07±0.15Bb	
		20—40	1.59±0.05Aa	0.39±0.05Ac	26.38±0.42Bc	2.34±0.56Ac	
	云杉+红桦混交林 Mixed forest	0—10	1.05±0.03Ab	0.40±0.01Ba	35.56±0.72Ba	3.28±0.01Ba	
		10—20	1.06±0.12Aa	0.40±0.01Ba	28.87±1.29Bb	2.68±0.08Bb	
		20—40	1.14±0.02Aa	0.35±0.03Ab	19.53±0.33Ac	2.53±0.12Ab	
红桦林 <i>Betula albo-sinensis forest</i>		0—10	0.99±0.08Ab	0.46±0.05Aa	36.93±0.37Ba	3.49±0.05Aa	
		10—20	0.99±0.03Aa	0.40±0.03Aa	25.48±0.19Bb	2.56±0.02Bb	
		20—40	1.22±0.03Aa	0.34±0.01Ab	16.64±1.34Bc	1.86±0.06Bc	
	对照 Control	云杉林 <i>Picea asperata forest</i>	0—10	0.74±0.04Bc	0.56±0.02Aa	47.19±0.50Aa	5.00±0.01Aa
			10—20	0.86±0.02Bb	0.45±0.01Ab	38.92±5.98Ab	3.43±0.14Ab
			20—40	1.45±0.01Ba	0.34±0.01Ac	31.27±0.13Ac	2.98±0.12Ac
云杉+红桦混交林 Mixed forest		0—10	0.86±0.02Bc	0.47±0.01Aa	38.62±1.70Aa	3.68±0.11Aa	
		10—20	1.05±0.06Ab	0.43±0.01Ab	34.62±1.49Ab	3.12±0.02Ab	
		20—40	1.14±0.02Aa	0.40±0.01Ac	24.44±2.06Ac	2.63±0.03Ac	
红桦林 <i>Betula albo-sinensis forest</i>		0—10	0.98±0.06Ab	0.45±0.03Aa	40.52±1.21Aa	3.67±0.14Aa	
		10—20	0.97±0.01Ab	0.37±0.01Ab	31.88±0.47Ab	2.85±0.12Ab	
		20—40	1.25±0.02Aa	0.35±0.03Ab	22.25±1.15Ac	2.21±0.10Ac	

表 5 土壤团聚体稳定性指标与细根特征参数之间的相关关系

Table 5 Correlation analyses of soil aggregates stability and fine root parameters

处理 Treatment	指标 Index	>0.25mm 的水稳性 团聚体含量 (WR <sub>0.25</sub> ) Content of water-stable aggregates > 0.25 mm	团聚体破坏率 (PAD) Percentage of aggregate destruction	平均重量直径 (MWD) Mean weight diameter	土壤不稳定团粒 指数 (E <sub>LT</sub> ) Unstable soil aggregate index
云杉林 <i>Picea asperata forest</i>	细根生物量密度	0.885 **	-0.951 **	-0.936 **	-0.885 **
	细根根长密度	0.867 **	-0.864 **	-0.877 **	-0.867 **
	细根体积	0.913 **	-0.933 **	-0.943 **	-0.913 **
	细根比根长	0.355	-0.447	-0.328	-0.355
云杉+红桦混交林 Mixed forest	细根生物量密度	0.261	-0.814 **	-0.874 **	-0.261
	细根根长密度	-0.152	-0.687 *	-0.961 **	0.152
	细根体积	-0.192	-0.585	-0.931 **	0.192
红桦林 <i>Betula albo-sinensis forest</i>	细根比根长	-0.06	-0.683 *	-0.810 **	0.06
	细根生物量密度	-0.122	-0.495	-0.777 *	0.122
	细根根长密度	0.234	-0.778 *	-0.771 *	-0.234
	细根体积	0.468	-0.896 **	-0.887 **	-0.468
	细根比根长	0.592	-0.461	-0.786 *	-0.592

\* \* : P&lt;0.01; \* : P&lt;0.05

而 PAD 和 E<sub>LT</sub> 越大,表示土壤结构越脆弱<sup>[24]</sup>。结果表明,凋落物去除对各天然林不同土层土壤团聚体形成的影响不尽相同,这是因为林分类型,密度不同,导致凋落物种类和凋落量不同<sup>[25]</sup>。三种天然林 0—10 cm 土层的 DR<sub>0.25</sub> 均显著低于其他土层,这是因为天然林表土层 0—10 cm 土壤易受环境扰动影响,导致大团聚体的破坏<sup>[26]</sup>;三种天然林中,红桦林 0—40 cm 土层的 DR<sub>0.25</sub>、WR<sub>0.25</sub> 和 MWD 最高,表明红桦林土壤的结构性能最好,

这可能是因为红桦林细根的发达程度高,有机质输入提供的胶结物质多,从而增加了土壤大团聚体含量<sup>[27]</sup>。凋落物去除使三种天然林土壤的团聚体稳定性在整体上显著降低,这是因为凋落物是土壤中大分子有机物的主要的直接和间接来源,这些大分子有机物是团聚作用中关键的胶结物质,凋落物的去除直接导致了胶结物质的数量减少<sup>[15, 28]</sup>;混交林与云杉纯林的变化有较多的一致性,可能是因为混交林中云杉所占比例高于红桦。此外,凋落物去除导致地表裸露,增加了雨滴对表土的打击作用,且地表径流还会进一步冲蚀土壤,逐渐导致大团聚体的破坏<sup>[29]</sup>。

### 3.2 凋落物去除对细根分布特征的影响

结果表明,三种天然林 0—10 cm 土层具有最高的 FRBD、FRLD 和 FRV;且随土壤深度增加均显著降低( $P < 0.05$ ),说明表层 0—10 cm 细根发达程度最高。因森林表层土壤具有较好的养分和水分条件,从而为林木细根向表层土壤聚集提供良好的条件<sup>[30]</sup>。且随土壤深度加深养分和水分等资源减少,致使细根分布随土壤深度加深而减少<sup>[31]</sup>。凋落物去除 3a,在 0—10 cm 土层,三种林分的 FRBD、FRLD 和 FRV 均显著降低( $P < 0.05$ ),在 20—40 cm 土层,三种林分各处理的 FRBD、FRLD 和 FRV 与对照相比均无显著差异( $P > 0.05$ )。说明凋落物去除显著抑制了 0—20 cm 土层细根的生长。因为根系具有很强的趋肥性,根系分布与土壤养分有着密切的关系<sup>[32-33]</sup>,凋落物去除降低了各林分 0—20 cm 土层的有机碳、全氮含量,进而抑制了细根的生长。此外,本研究混交林的根系生物量及郁闭度相较两种纯林较低;吴晓永等<sup>[34]</sup>也发现桦树与云杉混交时,生长会受到抑制,处于不利的竞争地位,混交林会逐渐演变为云杉纯林。因此,杉桦混交林中的云杉和红桦之间可能发生了不利于整体生物量的种间竞争。

### 3.3 凋落物去除对土壤理化性质的影响

本研究表明凋落物去除使云杉林表土层容重增加,这可能是因为云杉林的林分密度较小,发生降雨时,凋落物去除使雨滴可以直接击溅矿质土壤,造成土壤团粒破坏,释放出自由粘粉粒和可溶性盐<sup>[15]</sup>;同时,淋溶使粘粉粒及可溶性盐下渗和迁移,最终导致土壤容重增加,孔隙度降低<sup>[35]</sup>。凋落物去除使秦岭 3 种天然林表土层的有机碳含量显著减少,这是因为森林凋落物是土壤有机碳的重要来源<sup>[15, 36]</sup>,凋落物去除影响了凋落物分解向土壤中的养分释放,进而改变了土壤养分的可利用性和对植物的养分供应<sup>[37]</sup>。此外,凋落物去除使秦岭 3 种天然林表土层的全氮含量显著降低,这一结果与 Nzila 在美国 Andrews 森林和 Holub 在匈牙利 Sikfokut 森林及刚果的森林中氮素含量下降的研究结果相一致<sup>[38-39]</sup>;这是因为:一方面凋落物去除减少了土壤氮素的输入<sup>[40]</sup>;另一方面地表裸露会加速土壤氮素淋溶,导致土壤氮素损失<sup>[41]</sup>。

### 3.4 凋落物去除下土壤团聚体稳定性与细根分布特征的关系

土壤结构与细根的空间分布特征密切相关<sup>[42]</sup>,土壤团聚体的形成易受到外界环境因素的影响,根际是林木、土壤与微生物相互作用的重要场所,林木根系及其分泌物在土壤团聚体的形成、稳定与周转过程中具有重要作用<sup>[43]</sup>。研究表明,FRBD、FRLD、FRV 与土壤团聚体稳定性密切相关,因为首先根系能通过穿插、挤压和缠绕等机械作用能有效促进水稳性团聚体的形成,植物细根能够与菌丝共同作用提高大粒径团聚体的含量<sup>[44]</sup>;其次,根系分泌物中的多糖等物质能胶结土壤颗粒<sup>[45]</sup>,此外根系分泌物还能促进微生物活动,加速土壤有机碳的分解,从而促进团聚体的形成<sup>[5, 43]</sup>。本研究的三种天然林中,云杉林  $WR_{0.25}$ 、PAD、 $E_{IT}$  与 FRBD、FRLD、FRV 的相关性最高。说明云杉林细根对土壤团聚体稳定性的影响最大,这可能与云杉林的根系分泌物的种类和数量有关,具体原因有待进一步研究。

## 4 结论

(1) 凋落物去除导致秦岭云杉林、混交林及红桦林土壤团聚体稳定性在整体上显著降低。

(2) 凋落物去除显著抑制了 0—20 cm 土层细根的生长,但对 20—40 cm 土层细根的影响不大;三种天然林中,红桦林的细根发达程度最高。

(3) 凋落物去除显著增加了云杉林 0—40 cm 各土层的土壤容重,显著降低了三种天然林 0—40 cm 土层

的土壤有机碳和全氮含量。

(4)凋落物去除能够抑制细根的生长并降低土壤团聚体的稳定性,云杉林细根对土壤团聚体稳定性的影响最大。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Holmes K W, Chadwick O A, Kyriakidis P C, de Filho E P S, Soares J V, Roberts D A. Large-area spatially explicit estimates of tropical soil carbon stocks and response to land-cover change. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3004.
- [ 2 ] Liu Y, Hu C, Hu W, Wang L, Li Z G, Pan J F, Chen F. Stable isotope fractionation provides information on carbon dynamics in soil aggregates subjected to different long-term fertilization practices. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 54-60.
- [ 3 ] Angst G, Pokorn J, Mueller C W, Prater I, Preusser S, Kandeler E, Meador T, Straková P, Hájek T, van Buiten G, Angst S. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 159: 108302.
- [ 4 ] Dungait J A, Hopkins D W, Gregory A S, Whitmore A P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology*, 2012, 18:1781 - 1796.
- [ 5 ] Oades J M. Soil organic-matter and structural stability—mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 1984, 76: 319 - 337.
- [ 6 ] Ruess R W, Van Cleve K, Yarie J, Viereck L A. Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1326-1336.
- [ 7 ] Lei P F, Scherer-Lorenzen M, Bauhus J. Belowground facilitation and competition in young tree species mixtures. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 191—200.
- [ 8 ] 任文萍. 不同林地清理方式对油松幼苗生长的影响. *林业科技*, 2016, 41(5): 33-35.
- [ 9 ] 张珊珊, 向振勇, 康洪梅, 杨文忠. 云南蓝果树凋落物对其天然更新的影响. *东北林业大学学报*, 2016, 44(1): 6—10.
- [ 10 ] Tian D L, Peng Y Y, Yan W D, Fang X, Kang W X, Wang G J, Chen X Y. Effects of thinning and litter fall removal on fine root production and soil organic carbon content in Masson pine plantations. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 486-493.
- [ 11 ] 刘瑞强, 黄志群, 何宗明, 万晓华, 余再鹏, 郑璐嘉, 肖好燕. 根系去除对米老排和杉木凋落物分解的影响. *林业科学*, 2015, 51(9): 1-8.
- [ 12 ] Huang W J, Spohn M. Effects of long-term litter manipulation on soil carbon, nitrogen, and phosphorus in a temperate deciduous forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 12-18.
- [ 13 ] 彭信浩, 韩海荣, 徐小芳, 蔡锰柯, 白英辰, 程小琴. 间伐和改变凋落物输入对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5351-5361.
- [ 14 ] Cheng F, Wei X, Hou L, Shang Z C, Peng X B, Zhao P, Fei Z X, Zhang S X. Soil fungal communities of montane natural secondary forest types in China. *Journal of Microbiology*, 2015, 53(6): 379-389.
- [ 15 ] 祝乐. 秦岭天然林凋落物对土壤氮素分布特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [ 16 ] Zhao Q, Classen A T, Wang W W, Zhao X R, Mao B, Zeng D H. Asymmetric effects of litter removal and litter addition on the structure and function of soil microbial communities in a managed pine forest. *Plant and Soil*, 2017, 414(1/2): 81-93.
- [ 17 ] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [ 18 ] 李娟, 韩霁昌, 陈超, 李劲彬. 山地丘陵区不同土地利用方式对空心村整治还田土壤团聚体特征的影响. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 174-181.
- [ 19 ] Meinen C, Hertel D, Leuschner C. Biomass and morphology of fine roots in temperate broad-leaved forests differing in tree species diversity: is there evidence of below-ground overyielding? *Oecologia*, 2009, 161(1): 99-111.
- [ 20 ] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 21 ] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 党廷辉. 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. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 324-332.
- [ 22 ] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 杨建军, 何学敏, 刘志东, 蔡艳. 不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 15-21.
- [ 23 ] Lehrs G A, Kincaid D C. Sprinkler droplet energy effects on soil penetration resistance and aggregate stability and size distribution. *Soil Science*, 2006, 171(6): 435-447.
- [ 24 ] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征. *生态学报*, 2014, 34(7): 1654-1662.
- [ 25 ] Castro-Díez P, Fierro-Brunnenmeister N, González-Muñoz N, Gallardo A. Effects of exotic and native tree leaf litter on soil properties of two

- contrasting sites in the Iberian Peninsula. *Plant and Soil*, 2012, 350(1): 179-191.
- [26] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 杨玉盛, 吴君君, 付林池, 陈坦, 李伟. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 177-189.
- [27] 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Thongsouk S, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响. *环境科学*, 2019, 40(7): 3361-3368.
- [28] Spaccini R, Piccolo A. Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 129: 45-51.
- [29] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响. *环境科学*, 2014, 35(12): 4695-4704.
- [30] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 611-619.
- [31] 陈海波, 卫星, 王婧, 王政权. 水曲柳苗木根系形态和解剖结构对不同氮浓度的反应. *林业科学*, 2010, 46(2): 61-66.
- [32] Vennetier M, Zanetti C, Meriaux P, Mary B. Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes. *Plant and Soil*, 2015, 387(1/2): 81-101.
- [33] 吴晓永, 杨华, 吕延杰, 王全军, 孙权. 云杉-白桦混交林结构特征分析. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 64-72.
- [34] 闫小莉, 戴腾飞, 邢长山, 贾黎明, 张龙宁. 水肥耦合对欧美 108 杨幼林表土层细根形态及分布的影响. *生态学报*, 2015, 35(11): 3692-3701.
- [35] Gong T T, Lei H M, Yang D W, Jiao Y, Yang H B. Effects of vegetation change on evapotranspiration in a semiarid shrubland of the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2014, 11(12): 13571-13605.
- [36] 王利彦, 周国娜, 朱新玉, 高宝嘉, 许会道. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2709-2718.
- [37] Krishna M P, Mohan M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. *Energy, Ecology and Environment*, 2017, 2(4): 236-249.
- [38] de Dieu Nzila J, Bouillet J P, Laclau J P, Ranger J. The effects of slash management on nutrient cycling and tree growth in *Eucalyptus* plantations in the Congo. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171(1/2): 209-221.
- [39] Holub S M, Lajtha K, Spears J D H, Tóth J A, Crow S E, Caldwell B A, Papp M, Nagy P T. Organic matter manipulations have little effect on gross and net nitrogen transformations in two temperate forest mineral soils in the USA and central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2005, 214(1/3): 320-330.
- [40] Zhang H C, Yuan W P, Dong W J, Liu S G. Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 2014, 20: 240-247.
- [41] 孔青, 王传宽, 王兴昌. 植物残体去除对帽儿山温带落叶林土壤碳、氮、磷化学计量特征及其相关因子的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2173-2182.
- [42] Norby R J, Ledford J, Reilly C D, Miller N E, O'Neill E G. Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(26): 9689-9693.
- [43] 宋日, 刘利, 马丽艳, 吴春胜. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响. *南京农业大学学报*, 2009, 32(3): 97-101.
- [44] Gould I J, Quinton J N, Weigelt A, de Deyn G B, Bardgett R D. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1140-1149.
- [45] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 李秋嘉. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 105-113.