

川西亚高山森林两种优势树种不同径级根系腐殖化特征*

刘群¹ 庄丽燕¹ 杨万勤^{1,2} 李婷婷¹ 谭波³ 张丽¹ 徐振锋^{1,2**}

¹四川农业大学生态林业研究所, 四川省林业生态工程重点实验室 成都 611130

²四川农业大学高山森林生态系统定位研究站, 长江上游生态安全协同创新中心 成都 611130

³四川农业大学林学院 成都 611130

摘要 亚高山森林根系腐殖化是地下土壤形成和碳吸存的重要途径之一, 并可能受到根系直径和物种类型的影响。对川西亚高山两个优势林木粗枝云杉 (*Picea asperata*) 和岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 细根 (直径 ≤ 2 mm)、中根 (直径 2-5 mm) 和粗根 (直径 5-10 mm) 的腐殖化特征进行分析。结果表明: 粗枝云杉和岷江冷杉腐殖质碳、富里酸碳、胡敏酸碳含量受根系径级的显著影响, 并随根系径级增大而减少。表征腐殖化度的两个指标 ($\Delta \log K$ 和 E_4/E_6) 在两个林木之间差异显著, 粗枝云杉腐殖化程度高于岷江冷杉。单因素方差分析表明粗枝云杉和岷江冷杉腐殖化度受根系径级显著影响, 随径级的增大呈减小趋势。两种林木细根、中根和粗根的腐殖化度分别为 40.13%-41.66%、36.13%-38.86%、27.19%-27.51%。综上所述, 川西亚高山森林林木细根更有利于腐殖化。(图3 表1 参38)

关键词 岷江冷杉; 粗枝云杉; 根系; 腐殖质组分; 腐殖化程度

CLC S718.554.2

Humification characteristics of different root diameters of two dominant subalpine tree species in western Sichuan*

LIU Qun¹, ZHUANG Liyan¹, YANG Wanqin^{1,2}, LI Tingting¹, TAN Bo³, ZHANG Li¹ & XU Zhenfeng^{1,2**}

¹Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering of Sichuan Province, Institute of Ecology & Forest, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

²Long-term Research Station of Alpine Forest Ecosystems and Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

³Forestry College, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract Root humification is one of the important ways of soil formation and carbon sequestration in the subalpine forest ecosystems of western Sichuan, which could be affected by tree species and root diameters. Therefore, the humification characteristics of fine (≤ 2 mm), medium (2-5 mm), and coarse (5-10 mm) roots of two dominant tree species (*Picea asperata* and *Abies faxoniana*) of western Sichuan were investigated in this study. The contents of humus carbon, humic acid carbon, and fulvic acid carbon in both species were dramatically influenced by root diameters; they often decreased with increasing root diameter. Regardless of root diameters, the values of absorbance logarithm ($\Delta \log K$) between 400 nm and 600 nm and absorbance ratio (E_4/E_6) from 465 nm to 665 nm were significantly different between the two species, and the humification degree of *P. asperata* was greater compared to that of *A. faxoniana*. In addition, the humification degree tended to decrease with increasing diameter. The humification degrees of the fine, medium, and coarse roots in both tree species were 40.13%-41.66%, 36.13%-38.86%, and 27.19%-27.51%, respectively. Taken together, these results indicated that fine roots, as compared to coarse roots, may be more favorable for the humification process in the subalpine forests of western Sichuan.

Keywords *Abies faxoniana*; *Picea asperata*; roots; humus component; humification degree

根系腐殖化对土壤形成、发育和碳吸存具有重要意义^[1-2]。腐殖质是一种构造复杂的胶体状高分子有机化合物, 是有机物质在土壤中经微生物和酶的作用络合而成的产

物^[3]。根系腐殖化是植物根系分解释放养分形成结构复杂的腐殖质过程^[4]。因此, 物理环境、根系化学组分和微生物等综合因素均会影响根系分解, 从而影响根系腐殖化过程^[5]。在同种气候条件下, 根系分解主要受自身性质 (如根系化学性质) 影响^[6]。不同物种的根系化学组分差异显著^[7-8], 同一物种不同根系径级间化学组分也存在显著差异。而根系径级在很大程度上表征根系物理和化学特性^[9]。已有研究发现, 随着林木根系直径的增加, 养分浓度降低、难分解组分增加, 分

收稿日期 Received: 2017-01-14 接受日期 Accepted: 2017-02-15

*国家自然科学基金项目 (31570601, 31500509) 和四川省教育厅重点基金 (17ZA0321) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31570601, 31500509) and the Key Program of Sichuan Education Department (17ZA0321)

**通讯作者 Correspondence author (E-mail: sicauxzf@163.com)

解速率显著不同^[6, 10]. 那么, 同一气候带下, 根系腐殖化可能在不同物种及不同径级根系之间存在巨大差异, 但至今却缺乏相关研究.

川西亚高山森林地处青藏高原东缘, 作为西南林区的主力, 在调节区域气候、保持水土、涵养水源和生物多样性保育等方面具有重要的作用和地位^[11-12]. 常年的低温和频繁的地质活动, 造成川西亚高山森林土壤发育缓慢, 缺乏完整的土壤层次结构^[11]. 已有研究发现, 川西亚高山根系分布主要集中在表层土壤^[13], 是土壤有机质形成和腐殖化最为活跃的层次. 因此, 根系腐殖化对该区森林土壤有机质形成和地下生态系统物质循环具有重要的意义. 已有的研究仅仅关注凋落叶腐殖化特征^[14], 对根系的研究也多关注于细根分解及其对环境变化的响应^[15-16], 而忽视了林木根系腐殖化及根系径级的潜在影响. 因此, 本研究在前期的研究基础上, 调查探讨川西亚高山森林两种优势林木岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 和粗枝云杉 (*Picea asperata*) 不同径级根系 (≤ 2 mm, 2-5 mm 和 5-10 mm) 腐殖化特征, 为进一步了解川西亚高山森林生态系统地下生态过程提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究区域位于四川农业大学高山森林生态系统定位研究站 (102°53'-102°57'E, 31°14'-31°19'N, 海拔2 458-4 619 m). 地处青藏高原东缘褶皱带最外缘部分, 具有典型的高山峡谷地貌, 属丹巴-松潘半湿润气候. 区域内年平均温度为2-4℃, 全年最高温度23.7℃, 最低温度-18℃, 1月和7月平均温度分别为14.7℃和-2.1℃, 年平均降雨量为850 mm, 集中降雨在5-8月^[17]. 研究区域的土壤形成和发育过程缓慢, 土壤通常是雏形土和新成土, 其中以暗棕壤为主, 并含有较多的石砾和石块, 地表凋落物层较厚^[18]. 区域内主要森林植被有岷江冷杉 (*Abies faxoniana*) 原始林、粗枝云杉 (*Picea asperata*) 和红桦 (*Betula albosinensis*) 次生林, 灌木主要有高山杜鹃 (*Rhododendron delavayi*)、华西箭竹 (*Fargesia spathacea*)、花楸 (*Sorbus rufopilosa*)、扁刺蔷薇 (*Rosa weginzowii*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、三颗针 (*Berberis sargentiana*) 等, 草本主要有冷蕨 (*Cystopteris montana*)、蟹甲草 (*Cacalia spp.*)、苔草 (*Carex spp.*) 等^[11].

1.2 研究方法

2013年8月, 选取一个云杉-冷杉混交林用于根系样本采集. 云杉-冷杉林基本情况如下: 坡度5°, 坡向NE46°, 暗棕壤. 表层土壤有机碳为88.5 g/kg、全氮为5.5 g/kg、全磷为0.5 g/kg和pH = 6.3. 在云杉-冷杉混交林内随机选取3个100 m × 100 m样方, 样方距离大于50 m. 在每个样方内选择胸径大小相似的云冷目标树种各5棵, 之后在每棵树的树干基部2 m左右范围内用铲子挖取5个长宽高50 cm × 50 cm × 20 cm大小的土块, 收集土块中的树木根系. 在整个采根的过程尽量保持根系完整性, 且主要采用手工挖掘法^[19]. 同一样方内采集根系混合作为一个根系样本. 清除根表面土壤和杂质, 装进贴有标签的封口袋中, 用冰袋带回实验室存于冰箱待用.

从冰箱中将采回的根系取出, 使其在常温下解冻, 将解

冻后的根系放于40目的网筛中, 挑拣出非根系杂质后, 于流水下冲洗其表面土壤, 再用牛皮纸将根系水份吸干, 挑选完整的根系. 用游标卡尺测量根系直径, 按直径大小分为细根 (直径 ≤ 2 mm), 中根 (直径2-5 mm), 粗根 (直径5-10 mm) 3个径级^[20-21]. 将分置好的样品风干后粉碎, 过100目筛.

1.2.1 胡敏酸碳、富里酸碳和腐殖化度的计算 胡敏酸碳 (Humic acid carbon)、富里酸碳 (Fulvic acid carbon) 的分离和提取参照《中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1238-1999》. 用100 mL 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 混合液浸提, 腐殖质碳 (Humus carbon, HC)、胡敏酸碳 (Humic acid carbon, HAC) 使用TOC总碳分析仪 (Multi N/C 2100, analytic jena, Germany) 测定, 测定结果用于计算富里酸碳 (Fulvic acid carbon, FAC)、腐殖化度以及胡敏酸碳/富里酸碳^[14, 22].

富里酸碳 = 腐殖质碳 - 胡敏酸碳

腐殖化度 (Humification degree, HD) = $C_{\text{HC}}/C_{\text{OC}} \times 100\%$ ^[23]

式中, C_{HC} 为腐殖质碳含量, C_{OC} 为有机碳含量.

1.2.2 E_4/E_6 和 $\Delta \log K$ 根据碱提取液在400和600 nm时吸光度对数值 (即 $\Delta \log K$) 以及在465和665 nm吸光度比值 (即 E_4/E_6) 表征根系的腐殖化强弱程度, 其反映的是腐殖酸分子结构组成和布局的变化, 即根系腐殖化度变化^[24]. 测定 $\Delta \log K$ 和 E_4/E_6 的具体操作如下^[25]: 称取0.100 g过筛后的风干样品于150 mL锥形瓶中, 加 0.1 mol/L NaOH和0.1 mol/L $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 混合提取液100 mL, 加塞后震荡10 min, 沸水浴30 min, 待提取液冷却后过 0.45 μm 滤膜, 所得滤液即为待测液. 使用紫外可见分光光度计 (TU-1901, Puxi, Beijing, China) 测定. E_4/E_6 和 $\Delta \log K$ 值的计算方法如下:

$$\Delta \log K = \log (A_{400}/A_{600})$$

$$E_4/E_6 = A_{465}/A_{665}$$

A_{400} 、 A_{465} 、 A_{600} 、 A_{665} 分别是碱提取液在波长为400、465、600、665 nm测定的吸光度.

1.3 数据处理和统计分析

采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 检验根系径级、树种类型及其交互作用对HC、HAC、FAC、HAC/FAC、 E_4/E_6 、 $\Delta \log K$ 和HD的影响; 采用单因素方差分析和最小显著差异法检验HC、HAC、FAC、HAC/FAC、 E_4/E_6 、 $\Delta \log K$ 和HD在同一树种不同径级之间的差异. 绘图和数据方差分析分别使用Origin8.0和SPSS17.0 (IBM SPSS Statistics Inc., Chicago, IL, USA) 完成.

2 结果与分析

2.1 腐殖质碳组分特征

川西亚高山森林根系腐殖化过程中HC、HAC和FAC含量在不同径级间差异显著 ($P < 0.01$), 但相同径级两个树种差异不显著 (表1). 不同树种根系腐殖化过程中HC、HAC和FAC含量随径级变化基本一致. 两个林木细根和中根 (根径 ≤ 2 mm和2-5 mm) 的HC、HAC和FAC含量均显著高于粗根 (根径5-10 mm), 总体表现出随根系径级的增大呈下降的趋势 (图1a-c). 树种和径级对腐殖化过程中HAC/FAC比值无显著影响 (表1).

表1 径级和树种对HC、HAC、FAC、HAC/FAC、 $\Delta\log K$ 、 E_4/E_6 和HD值双因素方差分析Table 1 Two-way ANOVA resting for root diameter, species and their interaction on HC, HAC, FAC, HAC/FAC, $\Delta\log K$, E_4/E_6 and HD

因素 Factor	d_f	F_{HC}	F_{HAC}	F_{FAC}	$F_{HAC/FAC}$	$F_{\Delta\log K}$	F_{E_4/E_6}	F_{HD}
树种 Species (S)	1	0.017	0.597	0	0	16.992*	26.502**	1.024
径级 Diameter (D)	2	26.788**	13.719*	17.115**	2	3.285	2.381	39.422**
物种×径级 S×D	2	0.434	3.089	0.269	0	0.838	0.656	0.468

HC: 腐殖质碳; HAC: 胡敏酸碳; FAC: 富里酸碳; HAC/FAC: 胡敏酸碳/富里酸碳; HD: 腐殖化度。

HC: Humus carbon; HAC: Humic acid carbon; FAC: Fulvic acid carbon; HAC/FAC: Humic acid carbon to fulvic acid carbon ratio; HD: Humification degree. * $P < 0.01$; ** $P < 0.001$. $N = 3$.

2.2 $\Delta\log K$ 和 E_4/E_6

两个林木根系腐殖化过程中 $\Delta\log K$ 存在显著差异 ($P < 0.01$), 而根系径级对 $\Delta\log K$ 值无显著影响 ($P > 0.05$) (表1). 粗枝云杉不同径级根系的 $\Delta\log K$ 值均小于岷江冷杉, 且两树种 $\Delta\log K$ 的最大值均出现在中根, 分别为1.08和1.15 (图2a). 同样, E_4/E_6 值在两个林木之间也存在显著差异 ($P < 0.001$), 根系径级对腐殖化过程中 E_4/E_6 值无显著影响 ($P > 0.05$) (表1). 岷江冷杉3个径级根系的 E_4/E_6 值均高于粗枝云杉, 岷江冷杉和粗枝云杉3个径级 E_4/E_6 平均值分别为13.67和10.07 (图2b).

2.3 腐殖化度

腐殖化过程中HD在两个物种之间没有显著差异, 而根系径级对HD有显著影响 ($P < 0.001$) (表1). 两个树种HD在3个径级变化趋势相似, 中小径级HD显著高于大径级, 其细根、中根和粗根的HD分别为40.13%~41.66%、36.13%~38.86%、27.19%~27.51% (图3).

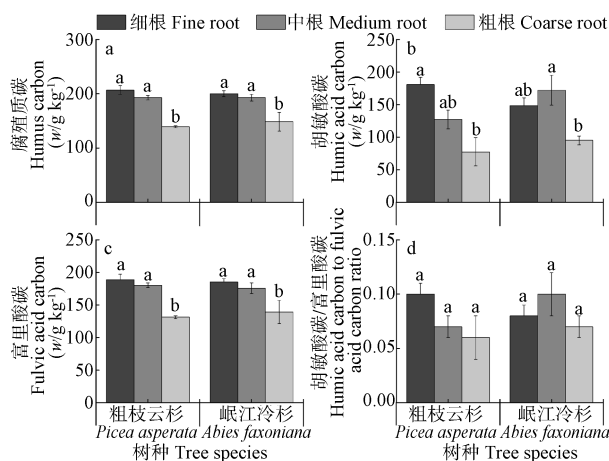


图1 两种林木不同径级根系腐殖质碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏酸碳/富里酸碳 (平均值±标准误差, $N = 3$). 小写字母不同表示同一树种不同径级之间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 1 HC, HAC, FAC, HAC/FAC (mean ± SE, $N = 3$) in different diameter roots of two tree species. Lowercase letters show significant differences between different root diameters in the same tree species ($P < 0.05$).

3 结论与讨论

高山常年低温和频繁的地质活动特点, 造成川西亚高山森林土壤发育缓慢^[11]. 植物地下根系的分解腐殖化过程对土壤有机质形成和土壤碳吸存极为重要^[26-27]. 已有研究表明, 植物根系分解与腐殖化密切相关^[3], 而细根 (直径 < 2

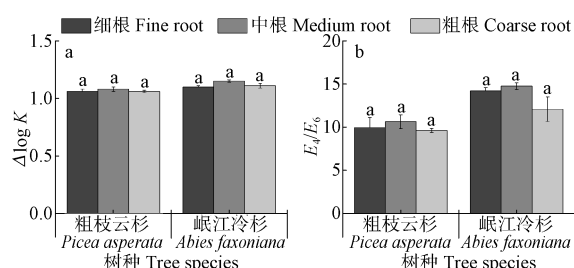


图2 两种林木不同径级根系 $\Delta\log K$ 和 E_4/E_6 (平均值±标准误差, $N = 3$). 小写字母不同表示同一树种不同径级之间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 2 $\Delta\log K$ and E_4/E_6 in different diameter roots of two tree species (mean ± SE, $N = 3$). Lowercase letters show significant differences between different root diameters in the same tree species.

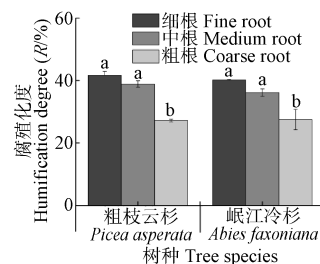


图3 两种林木不同径级根系腐殖化度 (平均值±标准误差, $N = 3$). 小写字母不同表示同一树种不同径级之间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 3 Humification degree in different diameter roots of two tree species (mean ± SE, $N = 3$). Lowercase letters show significant differences between different root diameters in the same tree species.

mm)、粗根 (直径 > 2 mm) 分解对土壤碳及养分的输入贡献存在显著差异^[28], 因此根系腐殖化过程中腐殖物质含量受植物根系径级影响. 本研究发现, 川西亚高山两种林木不同径级根系腐殖化过程中HC、HAC和FAC含量在不同径级根系间差异显著 ($P < 0.05$), 随根系径级的增大而减小 (图1a-c). 这是因为在根系腐殖化过程中, 较小径级的根系中含有大量可溶性组分, 为土壤微生物提供良好的底物^[29-30], 有利于微生物利用和分解; 其次, 根系比根长和比根面积通常随直径增加而下降. 对比粗根, 细根具有较大的表面积, 有利于微生物接触和分解, 增强微生物的聚合, 从而可能有利于腐殖质形成^[31]. HAC/FAC表征腐殖质的组成情况^[24]. 本研究发现, 两种林木3个径级的HAC/FAC均小于0.1 (图1d). 这可能是因为HAC的芳香环缩合程度低, 结构不稳定, 易转变为FAC^[32], 造成2种林木的HAC含量低; 另一方面, 在腐殖质形成初期, 分解产生的非结构性物质转化为FAC的速率远大于HAC的形成速率, 造成HAC含量较低^[33]. 此外, 本研究还发现, 川西亚高山森林优势林木根系HAC/FAC远低于对应凋落叶HAC/FAC^[25], 这可能是根系可溶性组分较凋落物低 (如N

和P), 而难降解组分所占比例更高, 因而不利于微生物分解及腐殖质合成, 使得HAC和FAC形成缓慢^[28, 31]。

在物理、化学和生物因子的共同作用下, 林木根系腐殖化物质能为动、植物以及微生物提供良好的生长环境^[25]。 $\Delta \log K$ 和 E_4/E_6 是表征植物根系腐殖化强弱程度, 反映腐殖酸分子结构组成与布局的主要指标^[24], 其大小与腐殖化程度成反比^[34]。本研究发现, 川西亚高山森林两种林木根系腐殖化过程 $\Delta \log K$ 和 E_4/E_6 值在不同树种之间差异显著(表1, $P < 0.05$)。与岷江冷杉相比, 粗枝云杉 $\Delta \log K$ 和 E_4/E_6 值小(图2)。说明粗枝云杉腐殖化程度高, 腐殖酸结构复杂, 芳香环缩合度高。这可能归因于不同树种间的化学成分差异, 一方面, 粗枝云杉根系结构性碳水化合物含量(木质素和纤维素等)比岷江冷杉低^[35], 其根系分解更容易, 有利于腐殖质的转化进程^[33]; 另一方面, 粗枝云杉的养分浓度(如N和P)比岷江冷杉高^[35], 为微生物活动提供良好的微环境, 利于土壤微生物转化有机质为腐殖质。

林木根系作为森林生态系统重要组成, 在腐殖化过程中, 其径级的粗细, 显著影响腐殖化度(表1)。川西亚高山两种林木细根、中根、粗根的HD分别为40.13%-41.66%、36.13%-38.86%和27.19%-27.51%(图3), 略低于对应亚高山森林粗木质残体HD^[36]。这可能与氧含量、微生物活动、pH值、土壤湿度有关^[5]。研究表明, 腐殖质的形成与转化可能是一个氧化过程^[3]。川西亚高山森林土壤孔隙度随土层加深而降低, 土壤含氧量低于空气含氧量^[37]。一方面不利于腐殖质氧化过程, 另一方面阻碍了好氧微生物的生长, 减缓其对根系的腐解, 使腐殖化进程缓慢。张夫道等研究发现, 腐殖酸可被土壤矿物质吸收, 导致根系HD低于粗木质残体^[33]。此外, 腐殖化度与碳氮比呈显著负相关^[38], 而川西亚高山粗枝云杉的碳氮比低于岷江冷杉^[35], 因此粗枝云杉腐殖化度更高(图3)。

综上所述, 本研究发现川西亚高山森林粗枝云杉和岷江冷杉根系HC、HAC、FAC含量及HD受根系径级显著影响, 随根系径级增大而减小。细根的腐殖化物质含量和HD最大, 两种林木根系HD随径级增加而下降。 $\Delta \log K$ 和 E_4/E_6 在一定程度上反映了两种林木根系在不同径级的腐殖化强弱程度。其次, 根系腐殖化强弱在不同物种之间也有所差异, 粗枝云杉腐殖化程度大于岷江冷杉。

参考文献 [References]

- Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008
- Abakumov EV, Cajthaml T, Brus J, Frouz J. Humus accumulation, humification, and humic acid composition in soils of two post-mining chronosequences after coal mining [J]. *J Soils Sed*, 2013, **13** (3): 491-500
- Stevenson FJ. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1994
- 吴楚, 张秀娟, 王政权. 细根分解研究概况[J]. 长江大学学报, 2005, **2** (8): 76-78 [Wu C, Zhang XJ, Wang ZQ. Research on fine root decomposition [J]. *J Yangtze Univ*, 2005, **2** (8): 76-78]
- Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship [J]. *Oikos*, 1997, **79**: 439-449
- Silver WL, Miya RK. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects [J]. *Oecologia*, 2001, **129**: 407-419
- 温达志, 魏平, 张佑昌, 孔国辉. 鼎湖山亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态[J]. 生态学杂志, 1998, **17** (2): 1-6 [Wen ZD, Wei P, Zhang YC, Kong GH. Dry mass loss and chemical changes of the decomposed fine roots in three China south subtropical forests at Dinghushan [J]. *Chin J Ecol*, 1998, **17** (2): 1-6]
- 靳贝贝, 国庆喜, 蒙古栎, 白桦根系分解及养分动态[J]. 生态学报, 2013, **33** (8): 2416-2424 [Jin BB, Guo QX. Root decomposition and nutrient dynamics of *Quercus mongolica* and *Betula platyphylla* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (8): 2416-2424]
- Fahey TJ, Arthur MA. Further studies of root decomposition following harvest of a northern hardwoods forest [J]. *For Sci*, 1994, **40**: 618-629
- Ludovici KH, Kress LW. Decomposition and nutrient release from fresh and dried pine roots under two fertilizer regimes [J]. *Canad J For Res*, 2006, **36**: 105-111
- Yang WQ, Wang KY, Kellomaki S, Zhang J. Litter dynamics of three subalpine forests in western Sichuan [J]. *Pedosphere*, 2005, **15**: 653-659
- 邓仁菊, 杨万勤, 冯瑞芳, 胡建利, 秦嘉励, 熊雪晶. 季节性冻融期间亚高山森林凋落物的质量损失及元素释放[J]. 生态学报, 2009, **29** (10): 5730-5735 [Deng RJ, Yang WQ, Feng RF, Hu JL, Qin JL, Qiong XJ. Mass loss and element release of litter in the subalpine forest over one freeze-thaw season [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (10): 5730-5735]
- 胡建利, 杨万勤, 张健, 邓仁菊. 川西亚高山冷杉和白桦细根生物量与碳储量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15** (3): 313-317 [Hu JL, Yang WQ, Zhang J, Deng RJ. Characteristics of biomass and carbon stock of fir and birch fine roots in subalpine forest of western Sichuan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15** (3): 313-317]
- Ni XY, Wu FZ, Yang WQ, Tan B, He J, Xu LY, Li H. Accelerated foliar litter humification in forest gaps: dual feedbacks of carbon sequestration during winter and the growing season in an alpine forest [J]. *Geoderma*, 2015, **241-242**: 136-144
- Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Den RJ. Fine root decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season [J]. *Can J For Res*, 2010, **40** (2): 298-307
- 魏圆云, 武志超, 杨万勤, 吴福忠. 季节性冻融期亚高山/高山森林细根分解动态[J]. 林业科学, 2013, **49** (8): 21-27 [Wei YY, Wu ZC, Yang WQ, Wu FZ. Fine root decomposition dynamics during freeze-thaw season in the subalpine/alpine forests [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49** (8): 21-27]
- 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 杨玉莲, 王奥, 康丽娜. 雪被去除对川西高山森林冬季土壤温度及碳、氮、磷动态的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (10): 2553-2559 [Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Yang YL, Wang A, Kang LN. Effects of snow pack removal on the dynamics of winter-time soil temperature, carbon, nitrogen, and phosphorus in alpine forests of west Sichuan [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (10): 2553-2559]
- Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Den RJ. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season [J]. *Acta Oecol*, 2010, **36** (1): 135-140
- Böhm W. Methods of Studying Root Systems (Ecological Studies, V33) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979
- Smit AL, George E, Groenwold J. Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil [M]//Smit AL, Bengough AG,

- Engels C, Noordwijk MV, Pellerin S, vande Geijn SC. Root Methods. New York: Springer Verlag, 1999: 236-266
- 21 张秀娟, 吴楚, 梅莉, 韩有志, 王政权. 水曲柳和落叶松人工林根系分解与养分释放[J]. 应用生态学报, 2006, **17** (8): 1370-1376 [Zhang XJ, Wu C, Mei, L, Han YZ, Wang ZQ. Root decomposition and nutrient release of *Fraxinus manshurica* and *Larix gmelinii* plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17** (8): 1370-1376]
- 22 Wang H, Hong YT, Lin QH, Hong B, Zhu YX, Wang Y, Xu H. Response of humification degree to monsoon climate during the holocene from the Hong yuan peat bog, eastern Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography*, 2010, **286** (3-4): 171-177
- 23 Gigliotti G, Busenlli D, Gusquiani PL. Composition changes of soil humus after massive application of urban waste compost: a comparison between FT-IR spectroscopy and humification parameters [J]. *Nutr Cycl Agroecol*, 1999, **55** (1): 23-28
- 24 窦森, 于水强, 张晋京. 不同CO₂浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44** (3): 458-466 [Dou S, Yu SQ, Zhang JJ. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in cornstalk decomposition [J]. *Acta Pedol Sin*, 2007, **44** (3): 458-466]
- 25 Ni XY, Wu FZ, Yang WQ, Xu LY, He J, Tan B. The response of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest [J]. *Can J Soil Sci*, 2014, **94**: 1-9
- 26 Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **220** (1): 242-258
- 27 Ponge JF. Plant-soil feedbacks mediated by humus forms: a review [J]. *Soil Biol Biochem*, 2013, **57**: 1048-1060
- 28 郭大力. 植物根系: 结构、功能及在生态系统物质循环中的地位[M]. 北京: 第三届现代生态学讲座暨国际学术研讨会, 2006: 92-109 [Guo DL. Plant Roots: Structure, Function and the Role in Carbon and Nutrient Cycling [M]. Beijing: The 3rd Symposium on Modern Ecology and International Symposium, 2006: 92-109]
- 29 Silver WL, Miya RK. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects [J]. *Oecologia*, 2001, **129** (3): 407-419
- 30 Ludovici KH, Kress LW. Decomposition and nutrient release from fresh and dried pine roots under two fertilizer regimes [J]. *Can J For Res*, 2006, **36**: 105-111
- 31 Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Deneff K, Paul E. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. *Glob Chan Biol*, 2013, **19**:988-995
- 32 刘小虎, 邹德乙, 康笑峰, 程艳丽, 王洪岩, 周崇峻, 王绍新. 长期轮作施肥对棕壤腐殖质动态变化的影响[J]. 土壤通报, 1999, **30** (2): 68-70 [Liu XH, Zou DY, Kang XF, Cheng YL, Wang HY, Zhou CJ, Wang SX. The effect of persistent rotation fertilization on dynamic change in humic acid of brown earth [J]. *Chin J Soil Sci*, 1999, **30** (2): 68-70]
- 33 张夫道, Fokin AD. 作物秸秆碳在土壤中分解和转化规律的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1994 (1): 27-38. [Zhang FD, Fokin AD. Study on the decomposition and transformation of crop straws C in soils [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 1994 (1): 27-38]
- 34 张晋京, 窦森, 李翠兰, 王淑华. 土壤腐殖质分组研究[J]. 土壤通报, 2004, **35** (6): 707-709 [Zhang JJ, Dou S, Li CL, Wang SH. Studies on fractionation of soil humus [J]. *Chin J Soil Sci*, 2004, **35** (6): 707-709]
- 35 唐仕姗, 杨万勤, 何伟, 王海鹏, 熊莉, 聂富育, 徐振锋. 川西亚高山3种优势林木不同径级根系分解及木质素、纤维素降解特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (4): 754-761 [Tang SH, Yang WQ, He W, Wang HP, Xiong L, Nie FY, Xu ZF. Root decomposition, lignin and cellulose degradation of three dominant subalpine trees of different diameters in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (4): 754-761]
- 36 刘辉, 杨万勤, 倪祥银, 肖洒, 吴福忠. 高山森林不同类型粗木质残体腐殖化特征[J]. 生态环境学报, 2015, **24** (7): 1143-1149 [Liu H, Wu FZ, Yang WQ, Ni XY, Xiao S. Characters of different type of coarse woody debris humification in an alpine forest [J]. *Ecol Environment Sci*, 2015, **24** (7): 1143-1149]
- 37 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦. 川西亚高山针叶林植物群落演替对土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2003, **17** (4):42-45 [Pang XY, Liu SQ, Liu Q, Wu Y, Lin B, He H, Zhang ZJ. Influence of plant community succession on soil physical properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan [J]. *J Soil Water Conserv*, 2003, **17** (4): 42-45]
- 38 倪祥银, 杨万勤, 李晗, 徐李亚, 何洁, 吴福忠. 雪被斑块对川西亚高山森林6种凋落叶冬季腐殖化的影响[J]. 植物生态学报, 2014, **38** (6): 540-549 [Ni XY, Yang WQ, Li H, Xu LY, He J, Wu FZ. Effects of snowpack on early foliar litter humification during winter in a subalpine forest of western Sichuan [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, **38** (6): 540-549]