

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201510016

彭勇, 陈冠陶, 梁政, 等. 瓦屋山常绿阔叶次生林建群种扁刺栲的细根分布及其碳氮特征 [J]. 广西植物, 2016, 36(2): 177-185

PENG Y, CHEN GT, LIANG Z, et al. Distribution patterns and carbon and nitrogen contents of *Castanopsis platyacantha* fine roots, the constructive species of evergreen broad-leaved secondary forest in Wawushan Mountain of Sichuan Province [J]. Guihaia, 2016, 36(2): 177-185

瓦屋山常绿阔叶次生林建群种扁刺栲的 细根分布及其碳氮特征

彭勇, 陈冠陶, 梁政, 李顺, 彭天驰, 涂利华*

(四川农业大学 林学院, 成都 611130)

摘要: 四川瓦屋山国家森林公园是我国西部的中亚热带湿性常绿阔叶林的典型代表, 具有四川现存的较为完好的扁刺栲 (*Castanopsis platyacantha*)—华木荷 (*Schima sinensis*) 群系, 该研究利用土钻法探讨了该群系内主要建群种扁刺栲标准木的细根分布及其碳氮特征。结果表明: (1) 扁刺栲细根总生物量为 $173.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中活根生物量为 $135.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。(2) 随着土层深度的增加, 扁刺栲细根生物量、根长密度、根系表面积和比根长呈下降趋势, 0~30 cm 土层所占比例分别为 67.23%、69.53%、69.48% 和 57.20%; 根长密度、根系表面积和比根长均随细根直径的增加而显著下降, 直径小于 1 mm 的根系所占比例分别为 58.84%、52.59% 和 51.36%。(3) 扁刺栲细根生物量、根长和表面积消弱系数 β 均随根系直径的增加而增加。(4) 根系 C 含量在第 I 土层中随细根直径的增加而显著增加, 在其他土层则无显著差异; 直径小于 2 mm 的根系 C 含量在第 I 土层中显著低于其他土层, 大于 2 mm 的根系 C 含量在各土层间的差异不大。(5) 根系 N 含量随根系直径和土层深度的增加而减少, C/N 值则与之相反。该研究结果在一定程度上反映了该次生林地下细根的垂直分布及养分特征, 为揭示该生态系统地下生态过程及今后在该生态系统研究环境变化对地下生态过程的影响提供了基础数据。

关键词: 常绿阔叶林, 扁刺栲, 细根, 碳含量, 氮含量

中图分类号: Q948, S71 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)02-0177-09

Distribution patterns and carbon and nitrogen contents of *Castanopsis platyacantha* fine roots, the constructive species of evergreen broad-leaved secondary forest in Wawushan Mountain of Sichuan Province

PENG Yong, CHEN Guan-Tao, LIANG Zheng, LI Shun, PENG Tian-Chi, TU Li-Hua*

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: The Wawushan Mountain National Forest Park in Sichuan Province, where there is relatively intact *Castanopsis platyacantha*-*Schima sinensis* formations, is a typical representative of the mid-subtropical moist evergreen broad-leaved forest in West China. Using the soil core method, this study investigated the fine root distribution and characteristics of carbon and nitrogen of sample *C. platyacantha* which is the main constructive

收稿日期: 2015-10-14 修回日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金 (31300522, 31200474); 国家教育部博士学科点专项基金 (20125103120018); 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2011BAC09B05); 四川省教育厅重点项目 (12ZA118, 13ZA0246) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31300522, 31200474); the Specialized Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education (20125103120018); the National Key Technology Research and Development Program During the 12th Five-year Plan Period (2011BAC09B05); the Key Project of Sichuan Provincial Department of Education (12ZA118, 13ZA0246)].

作者简介: 彭勇 (1990-), 男, 四川叙永人, 硕士研究生, 主要从事森林生态学相关研究, (E-mail) penyom@163.com.

*通讯作者: 涂利华, 博士, 副教授, 主要从事森林生态、全球变化相关研究, (E-mail) iamtlh@163.com.

species in this formation. The results were as follows: (1) The total fine root biomass of *C. platyacantha* was $173.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ and the total biomass of live fine roots was $135.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. (2) The fine root biomass, root length density, root surface area and specific root length decreased with the increase of soil depth, and their proportions in 0–30 cm layers were 67.23%, 69.53%, 69.48% and 57.20%, respectively; root length density, root surface area and specific root length decreased significantly with increasing root diameter, and 58.84%, 52.59% and 51.36% of them were in the roots that diameter was less than 1 mm, respectively. (3) Root extinction coefficient in biomass, length and surface area of *C. platyacantha* fine root increased with the rise of the root diameter. (4) In the first soil layer, the roots C content increased significantly with the rising root diameter, but there was no significant difference in other soil layers; the C content of the roots whose diameter was less than 2 mm in the first soil layer was significantly lower than other soil layers, while the differences of roots C content of greater than 2 mm among soil layers was insignificant. (5) The roots N content decreased with the increase of soil depth and root diameter, while the C/N ratio value was opposite. These results reflected the vertical distribution of the secondary forest underground fine root system and nutrient characteristics, which would provided some basic data for revealing the subsurface ecological processes and the effects of environmental change on ecological processes in the underground in the ecosystem.

Key words: evergreen broad-leaved forest, *Castanopsis platyacantha*, fine root, carbon content, nitrogen content

根系是陆地生态系统的重要组成部分,不仅是植被地上部分的支撑者和植被从土壤中吸收水分和养分的主要器官(Hajek et al, 2014; Ma et al, 2014),而且能通过生成各种生物化合物来调节植物生长,同时在陆地生态系统碳分配与碳循环过程中具有核心地位(彭少麟等, 2005)。根系形态和分布状况决定植被从土壤吸收水分和养分的能力,也反映林木对立地条件的利用状况(Liu et al, 2011)。根系的发育主要受植物种类特征和环境因素如土壤水分和生物化学特性的影响(Lehmann, 2003; Schenk, 2008)。一般来说,根系更倾向于集中分布在表土层,并随土层深度的增加呈指数递减(Schenk, 2008)。如Fortier et al(2013)对加拿大Québec南部不同树种和年龄的天然林的研究表明,0~20 cm土层根系占总根系生物量60%以上,其中铁杉(*Tsuga chinensis*)林达99%。在根系描述方面,Gale & Grigal(1987)提出的单一参数模型(Single Parameter Model)是目前国内外公认的描述根系垂直分布较理想的模型,并受到广泛应用(Gwenzi et al, 2011; 李鹏等, 2005; 云雷等, 2010)。

近年来,我国中亚热带地区由于社会经济不断发展、人类需求不断扩大,加上土地利用变化等人为活动的干扰,该地区典型的地带性植被——常绿阔叶林受到严重破坏,取而代之的是大面积的次生林(王希华等, 2005; 李强等, 2007; Xiang et al, 2013)。不断增加的次生林已成为中国森林资源的主体(朱教君, 2002)。这对水源涵养、水土保持、生物多样性保护和固碳等具有重要意义(Xiang et al, 2013; Liu et al,

2008; 王芸等, 2012)。四川洪雅县南部的瓦屋山国家森林公园位于华西雨屏区中心地带(潘开文等, 2000),是我国西部的中亚热带湿性常绿阔叶林的典型代表(包维楷等, 2002),具有四川现存的较为完好的扁刺栲(*Castanopsis platyacantha*)—华木荷(*Schima sinensis*)群系(潘开文等, 2003)。公园内次生林是在1956年大炼钢铁时期砍伐乔木层而遭到破坏后,在几乎无人干扰的情况下自然恢复的(包维楷等, 2000)。包维楷和刘照光(2002)对该区群落学特征的研究表明,扁刺栲在次生林中均占据着重要地位,重要值达21.126,是该区常绿阔叶次生林主要建群种。因此,扁刺栲的根系生长状态在该生态系统地下碳分配、养分循环等方面具有重要作用。

扁刺栲(*Castanopsis platyacantha*),又称扁刺锥或峨眉栲,为壳斗科(Fagaceae)栲属(*Castanopsis*)常绿乔木,主要分布于四川、贵州中部以西和云南东南部等海拔1000~2400 m的阔叶混交林中。扁刺栲作为中亚热带湿性常绿阔叶林区扁刺栲—华木荷群落中的优势乔木树种,同时也是该区域内一种发展前途很大的重要乡土阔叶树种,次生阔叶林中的快速生长期在10~14 a之间,胸径和树高生长最大值分别为0.85 cm和0.56 m(张远彬等, 2003)。目前有关扁刺栲的报道基本以群落为基础(包维楷和刘照光, 2002; 潘开文等, 2003),对树种本身还鲜有研究,对其细根的研究更是缺乏相应关注。本研究选择该区典型次生常绿阔叶林的主要建群种扁刺栲为研究对象,探讨其细根的分布和碳氮特征,为区域性森林地下生物量和碳

氮分布特征提供基础依据。

1 试验地概况及研究方法

试验地位于瓦屋山中山区的木姜岗林班 (29°32'35" N, 103°15'41" E), 海拔 1 600 m 左右。该地段具有温和湿润、日照短、雨水多、云雾多、湿度大等特点, 属中亚热带季风性湿润气候。年均温 10 °C 左右, 月均最高和最低温分别为 22.5 和 -0.9 °C, 年日照时数 330 h, 年降水日 278 d, 年降雨量和蒸发量分别为 2 323 mm 和 467 mm, 年均相对空气湿度为 85%~90% (潘开文等, 2000)。该区成土母质是晚古生界二迭纪至元古界的砂岩、玄武岩、花岗岩等古老

岩层风化的残积物, 土壤类型为山地黄壤。该地段在破坏前均为顶极地带性常绿阔叶林扁刺栲+华木荷群落, 1956 年遭到砍伐破坏, 遗留下一些幼树幼苗, 后基本上无进一步的干扰破坏而得以自然恢复。目前已形成次生常绿阔叶成林, 乔木层优势种为扁刺栲和华木荷; 灌木层优势种为冬青 (*Ilex purpurea*) 和柃木 (*Eurya japonica*) 等; 草本层主要是莎草 (*Cyperus rotundus*), 呈聚集分布 (包维楷等, 2000)。该样地林分结构为郁闭度 (0.7)、密度每公顷为 725 株; 平均胸径为林分 23.5 cm、扁刺栲 (*Castanopsis platyacantha*) 23.8 cm、华木荷 (*Schinus sinensis*) 25.4 cm。样地土壤基本理化性质见表 1。

表 1 瓦屋山常绿阔叶次生林土壤理化性质 (平均值 ± 标准误)

Table 1 Soil physicochemical properties of an evergreen broad-leaved secondary forest in Wawushan Mountain (Mean±SE)

土层深度 Soil depth (cm)	pH (水浸提) Extracted by distilled water	土壤容重 Soil bulk density (g · cm ⁻³)	有机碳 Organic carbon (g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g · kg ⁻¹)
0~10	3.2±0.1	0.41±0.10	121.9±40.4	5.80±1.05	0.50±0.05	13.89±3.17
10~40	3.8±0.2	0.66±0.14	26.6±8.8	1.51±0.27	0.26±0.09	17.07±2.83
40~70	4.0±0.1	0.89±0.13	12.6±4.2	0.82±0.18	0.18±0.04	19.02±4.07
70~100	4.0±0.1	0.99±0.17	7.8±2.8	0.57±0.13	0.21±0.04	19.31±4.36

1.1 样地设置和细根样品采集

2012 年 10 月, 根据典型性和代表性原则在木姜岗林班设置 10 块 20 m×20 m 的样地, 各样地间缓冲带大于 20 m, 坡向为北向, 坡度 0°~5°。2013 年 12 月初, 于各样地内按照平均标准木选择 3 株生长较好, 相对独立的扁刺栲。采用土钻法采集扁刺栲细根样品 (杨丽韞等, 2007; 罗东辉等, 2010; 王迪海等, 2011)。在树干周围 1/2 冠幅的位置 (到树干的距离约 1 m) 对称地选择两个样点, 每样地 6 个样点, 共 60 个样点。每样点用根钻 ($\Phi = 7$ cm) 由上至下分 4 层 (分别用 I、II、III、IV 来表示, 每一层垂直深度约为 15 cm) 钻取土芯样品。将取回的土芯样品放入 0.2 mm 筛中用流水浸泡冲洗, 使根与大部分土壤分离后将根系挑出, 并据根系形态和颜色区分扁刺栲的活根 (Live roots) 与死根 (Dead roots)、灌木及杂草根系, 并将灌木和杂草根系去除 (杨丽韞等, 2007)。最后将扁刺栲细根用去离子水冲洗干净后, 低温冷冻保存。

1.2 细根形态和养分的测定

将扁刺栲活根按直径 <1 mm ($D < 1$)、1~2 mm ($1 \leq D < 2$)、2~5 mm ($2 \leq D < 5$) 和 ≥ 5 mm ($D \geq 5$)

分级。采用 Epson 数字化扫描仪 (Expression 10000XL 1.0, Epson Electronics Inc., San Jose, USA) 对分级后的根先进行扫描, 再放入 65 °C 烘箱中烘干至恒重, 测定各级根系生物量干重 (精确到 0.000 1 g)。根系扫描图像用 WinRHIZO (Pro 2004b) 软件 (Regent Instruments Inc., Quebec City, Canada) 进行形态特征分析, 主要指标包括各个根系直径、长度和体积。比根长 (SRL: $m \cdot g^{-1}$) 用总长度除以生物量计算得到。

全碳 (Total carbon, TC) 用重铬酸钾氧化-外加热法测定 (LY/T 1237-1999); 全氮 (Total nitrogen, TN) 用硫酸-高氯酸消煮, 用半微量凯氏法测定 (LY/T 1269-1999)。各指标均做 3 次平行测定。

1.3 数据分析与统计

用 Gale & Grigal (1987) 提出的根系垂直分布模型 $\gamma = 1 - \beta^d$, 对不同直径的根系生物量、根系长度和根系表面积进行系数回归分析, 式中, γ 为从地表到一定深度的根系生物量、长度或表面积的累积百分比; d 为土层深度 (cm); β 为根系消弱系数 (root extinction coefficient)。 β 值越大, 说明根系在深层土壤中分布的百分比越大; 反之则说明根系主要集中在近表层土壤中。

采用 SPSS16.0(SPSS Inc., USA)中线性回归分析方法研究 C/N 与根系 C 和 N 含量变异的关系,并以根系直径和土层深度为因子对试验数据进行双因素方差分析 (two-factors ANOVA)。利用 Sigmaplot 10.0 (Systat software Inc., USA)绘图。

2 结果与分析

2.1 扁刺栲细根生物量分布特征

扁刺栲细根总生物量为 $173.62 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中活根生物量为 $135.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 占 78%。方差分析结果表明, 扁刺栲细根生物量主要分布在第 I 土层, 并随土层深度的增加呈极显著下降趋势, 第 I、第 II、第 III、第 IV 土层细根生物量所占比例分别为 39%、28%、19%和 14%; 扁刺栲细根生物量随直径的增加而显著减少, $D < 1$ 的根系生物量占活根生物量的 35.15%, 是 $D \geq 5$ 根系的 2.4 倍 (图 1, 表 2)。

2.2 扁刺栲细根形态分布特征

扁刺栲细根总根长密度为 $2.51 \text{ m} \cdot \text{m}^{-2}$, 总表面积为 $116.88 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 。两者均随根系直径的增加而

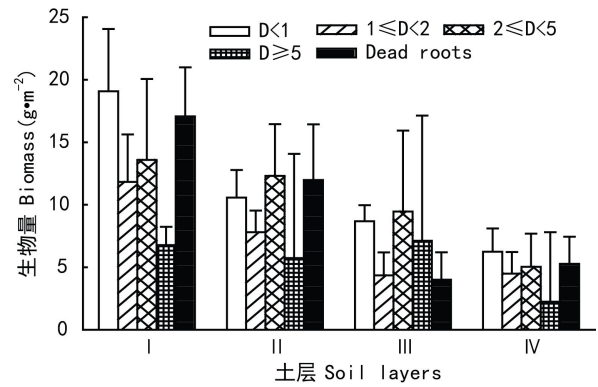


图 1 扁刺栲细根生物量的分布特征
Fig. 1 Distribution patterns of fine root biomass of *C. platyacantha*

呈极显著减小趋势, 随土层深度的增加而显著降低 (图 2: i, iii; 表 2)。其中, $D < 1$ 根系的根长密度和表面积分别占 54.30%和 56.16%, $D \geq 5$ 的根系仅占 7.88%和 6.08%; 第 I 土层细根的根长密度和表面积分别占总细根根长密度和表面积的 45.83%和 47.38%, 第 IV 土层占 12.97%和 12.90%。扁刺栲细根的比根长随根系直径增加而极显著减小, $D < 1$ 根系的比根长

表 2 扁刺栲细根生物量和形态指标的方差分析

Table 2 ANOVA of fine root biomass and morphology indicators of *C. platyacantha*

因子 Factor	生物量 Biomass		根长密度 Root length density		比根长 Specific root length		根系表面积 Root surface area	
	F	P	F	P	F	P	F	P
直径 Diameter	5.639	0.019*	8.580	0.004**	113.479	<0.001**	8.021	0.003**
土层 Soil layer	9.878	0.003**	3.990	0.046*	4.777	0.029*	3.863	0.029*

注: *表示显著; **表示极显著。

Note: * indicates significant difference; ** indicates highly significant difference.

分别是 $1 \leq D < 2$ 、 $2 \leq D < 5$ 和 $D \geq 5$ 根系的 1.4、5.0 和 60.9 倍; 随土层深度的增加而显著减小, 第 I 土层细根的比根长分别是第 II、第 III、第 IV 土层的 1.1、1.3 和 1.6 倍 (图 2: iii; 表 2)。

2.3 扁刺栲细根的垂直分布特征参数

表 3 显示, 扁刺栲细根生物量、根长和表面积消弱系数 β 均随着根系直径的增加而增加, 根据 β 所表达的意义, 说明直径越大的根系在深层土壤中的分布比例越大, 而直径越小的根系则越集中分布在近表层土壤中。调查结果显示, $D < 1$ 和 $1 \leq D < 2$ 的根系生物量、长度和表面积在第 I 土层中所占比例分别是 42.80% 和 41.56%、47.97% 和 44.54%、47.99%和 45.22%, 而 $2 < D < 5$ 和 $D > 5$ 的细根生物量、

长度和表面积在第 I 土层中所占比例分别是 33.63% 和 30.95%、38.62%和 21.13%、39.50%和 33.22%, 与 β 值所反映的变化规律一致。

2.4 扁刺栲细根的碳氮分布特征

扁刺栲细根 C 储量为 $72.45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, N 储量为 $1.61 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中, 活细根所占比例分别为 76.71% 和 72.81%, $D < 2 \text{ mm}$ 细根 C、N 含量分别为 $376.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-2}$ 和 $9.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-2}$, 储量分别为 $27.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 分别占活根储量的 49.5%和 58.5% (图 1, 图 3, 表 5)。第 I 土层中, 细根 C 含量随根系直径的增加而增加, 总的来说不同直径和不同土层间细根 C 含量无显著差异 (表 4)。细根 N 含量随根系直径的增加而极显著减少, $D < 1$ 的根系 N 含量较其

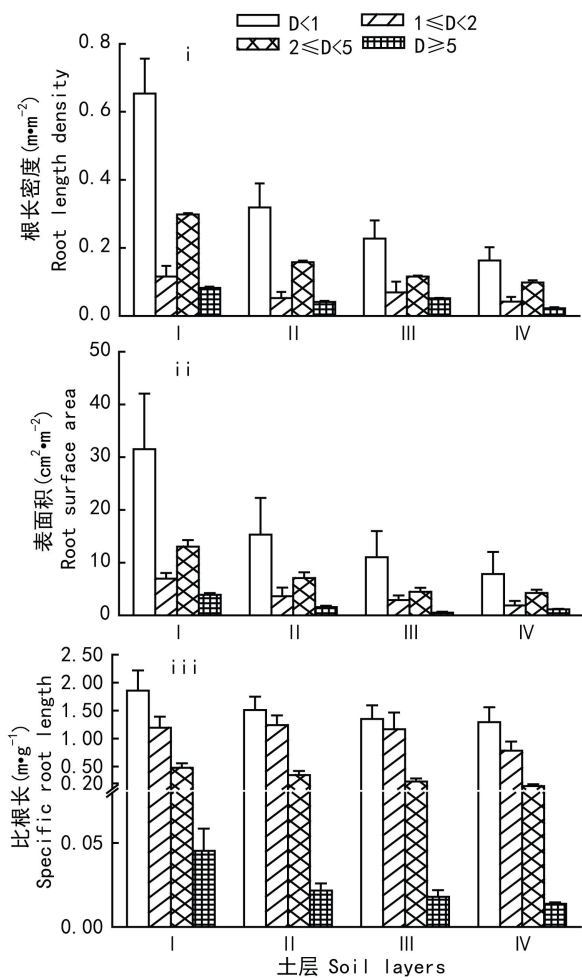


图 2 扁刺栲细根形态指标的分布特征

Fig. 2 Distribution patterns of fine root morphology of *C. platyacantha*

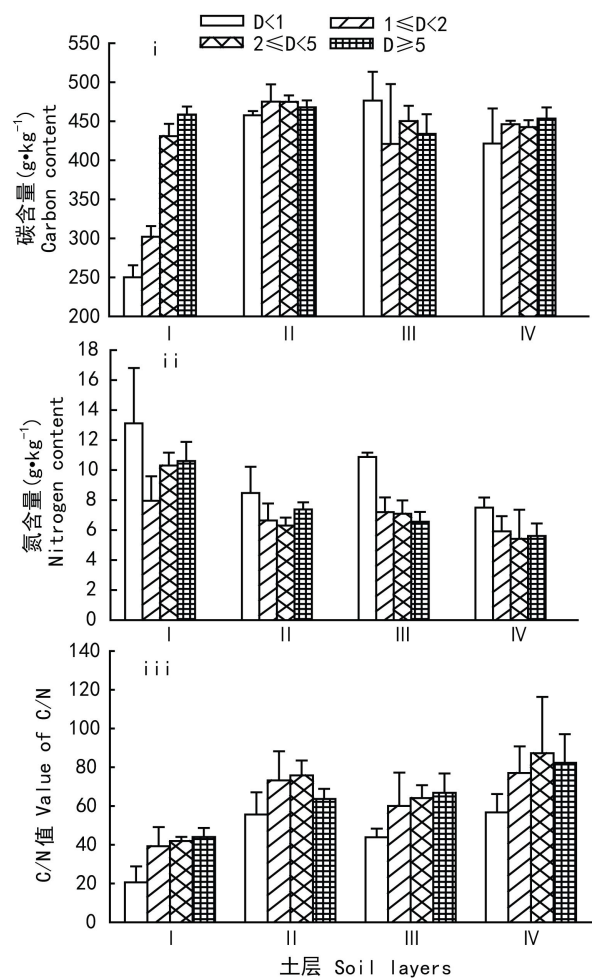


图 3 扁刺栲细根碳氮分布特征

Fig. 3 Distribution patterns of fine root carbon and nitrogen contents of *C. platyacantha*

表 3 扁刺栲细根生物量、根长和根系表面积消弱系数

Table 3 Root extinction coefficient in fine root biomass, length and surface area of *C. platyacantha*

根系直径 Root diameter	根系生物量 Root biomass		根系长度 Root length		根系表面积 Root surface area	
	消弱系数 Extinction coefficient (β)	相关系数 Correlation coefficient (r)	消弱系数 Extinction coefficient (β)	相关系数 Correlation coefficient (r)	消弱系数 Extinction coefficient (β)	相关系数 Correlation coefficient (r)
D<1	0.958±0.004	0.972	0.953±0.003	0.982	0.953±0.003	0.982
1≤D<2	0.958±0.004	0.974	0.957±0.004	0.978	0.956±0.003	0.979
2≤D<5	0.961±0.006	0.950	0.960±0.004	0.965	0.960±0.004	0.967
D≥5	0.963±0.007	0.927	0.973±0.006	0.896	0.963±0.005	0.953
全部细根 All fine roots	0.960±0.005	0.962	0.955±0.004	0.978	0.956±0.004	0.979

他直径的根系高出 24.55%~30.67%；垂直方向上，细根 N 含量随土层深度的增加而减少，第 I 土层较其他土层高 24.47%~41.81%（图 3: ii；表 4）。扁刺

栲细根 C/N 值随土层深度和根系直径的增加而极显著增加，第 I 土层中细根 C/N 值为其他土层的 35.85%~69.28%，D<1 的根系 C/N 值为其他细根的

45.76%~87.43% (图 3: iii; 表 4)。扁刺栲死细根 C 含量在不同土层间无显著差异, N 含量随着土层的增加而显著减小, 第 I 土层中 N 含量比其他土层高出 36.05%~52.00%。扁刺栲死细根 C/N 值随着土层的增加而显著增加, 第 I 土层根系 C/N 值为其他土层的 51.59%~64.05% (表 5)。

表 4 扁刺栲细根碳氮的方差分析

Table 4 ANOVA of fine root carbon and nitrogen contents of *C. platyacantha*

因子 Factor	C 含量 Carbon content		N 含量 Nitrogen content		C/N C/N ratio	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	直径 Diameter	1.043	0.420	9.542	0.004**	24.354
土层 Soil layer	3.314	0.071	17.092	<0.001**	64.164	<0.001**

表 5 扁刺栲死细根碳氮分布特征

Table 5 Distribution patterns of dead fine root carbon and nitrogen of *C. platyacantha* ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土层 Soil layer	I	II	III	IV
碳含量 Carbon content	446.45± 25.46 a	451.04± 32.07 a	416.60± 37.35 a	413.32± 13.57 a
氮含量 Nitrogen content	14.73± 0.87 a	9.42± 1.65 b	8.80± 0.83 bc	7.07± 0.74 c
碳氮比 C/N ratio	30.34± 1.86 c	48.56± 5.68 b	47.37± 1.31 b	58.81± 5.43 a

注: 不同字母表示不同土层在 0.05 水平差异显著。

Note: Different letters indicate significant differences among different soil layers at 0.05 level.

3 讨论

根系作为植物生命活动中重要的生理器官, 是植被与土壤界面进行物质和能量交换的主要通道, 其形态和分布直接反映了林木对立地条件的利用状况, 并对树木的生长起着决定性的作用。为保证植物生长所必需的水分和养分, 根系生物量须维持在一定水平(梅莉等, 2006)。本研究中扁刺栲总细根生物量为 $173.62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中活根系总生物量为 $135.29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。活细根中直径小于 2 mm 的细根生物量为 $73.04 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 所占比例为 54.99%, 与同处于中亚热带的青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*, $54.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和米楮 (*Castanopsis carlesii*, $85.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 接近, 略低于拟赤杨 (*Alniphyllum fortune*, $104.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)、枫香 (*Liquidambar acakycina*, $122.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和细柄阿丁

枫 (*Altingia gracilipes*, $122.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) (张雷, 2009; 黄锦学, 2012), 显著低于该区格氏栲 (*Castanopsis kawakamii*) 细根生物量 ($494.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) (杨玉盛, 2003)。这说明与同气候带常绿阔叶林相比, 该次生林扁刺栲细根生物量较大多数树种低。这可能与瓦屋山常绿阔叶次生林常年无人管理, 林内扁刺栲出现较多枯枝, 甚至逐渐死亡有关。本研究还发现扁刺栲直径小于 1 mm 活细根根长密度、比根长和根系表面积所占比例分别达 58.84%、51.36% 和 52.59%, 说明直径小于 1 mm 的根系在扁刺栲根系中占主要地位, 对其生理生态功能具有重要意义。Caldwell et al (1994) 认为, 根系动态主要是细根的动态, 保持细根的吸收能力是维持细根生理生态功能的关键, 这要求细根应具有较高的根长密度、比根长和表面积。因为这不仅能减少构建和维持单位长度细根的碳水化合物消耗, 且有利于细根行使其吸收功能 (Guo et al, 2004)。

植物根系的生理生态功能除与其形态有关外, 还与根系组织中一些元素, 尤其是 C 和 N 含量密切相关 (Eissenstat et al, 1997)。本研究中, $D < 2 \text{ mm}$ 细根 C、N 含量分别为 376.4 和 $9.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-2}$, 均低于 Jackson et al (1997) 在全球尺度上对细根 (直径小于 2 mm) C、N 含量的估计 (488 和 $11.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-2}$)。扁刺栲细根 C 含量在不同土层和不同直径间无显著变化, 而 N 含量随细根直径和土层深度的增加而下降。其中 N 含量随根系直径的变化趋势与 Gordon & Jackso(2000)及 Burton et al (2012)的研究一致; 而 C 含量变化则有所不同, Gordon & Jackson (2000) 综合前人的研究表明根系 C 含量随直径的增加而增加。扁刺栲细根 N 含量随直径变化的原因可能是: 一方面直径越小的根系其生理代谢活动较为活跃, 根尖细胞分裂旺盛 (于立忠等, 2009); 另一方面直径较小的细根主要功能是吸收养分和水分, 而根尖细胞的分裂及养分的吸收、同化和运输需消耗大量的能量 (Lambers et al, 1998); 因此扁刺栲 $< 1 \text{ mm}$ 的细根 N 含量最高。许旻等 (2011) 认为根系 C、N 含量的这种变化与根系维根比大小有关。维根比高低反映的是皮层厚度的相对大小, 维根比高, 说明皮层较薄, 木质部占的比例较高 (Guo et al, 2008)。刘颖等(2010)的研究也证明, 根系 N 含量随维根比增加而显著降低, C 含量则显著升高。垂直方向上, 随着土层深度的增加, 该次生林土壤有机质和 N、P

等养分逐渐降低。Nadelhoffer (2000) 研究认为, 根系 N 含量与土壤资源有效性密切相关。杨振安等 (2014) 对华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 人工林根系的研究在一定程度上说明了根系氮含量与土壤氮含量正相关。因此, 扁刺栲细根氮含量随土壤深度增加而下降, 约 40% 的细根氮储存在表层土壤中。这说明根系对养分的吸收主要是集中在土壤表层, 同时也表明细根在生态系统养分循环中具有重要的作用 (刘波等, 2008)。扁刺栲细根 C 和 N 浓度的这种变化必然会导致其细根 C/N 值随直径的增加而增加, 这与许多研究都是一致的 (Gordon et al, 2000; 许旻等, 2011)。

本研究表明, 扁刺栲细根的分布随土层深度的增加而减少, 超过 67% 的细根分布于 0~30 cm 土层, 该区内细根的根长密度和根系表面积所占比例在 70% 以上; 分布在 0~15 cm 土层的细根占 39%, 其根长密度和根系表面积所占比例分别达到 46% 和 45%。可见, 扁刺栲细根主要分布在表层土壤中, 这与 Macinnis-Ng et al (2010) 对 Cumberland 平原的根系生物量分布和罗东辉等 (2010) 对我国西南山地喀斯特榕叶冬青 (*Ilex ficoidea*) + 西南米楮 (*Castanopsis carlesii*) 群落的研究结果相同。扁刺栲细根在不同土层间的这种分布模式可能与其生长的土壤养分含量和土壤容重随土层深度的变化有关。该次生林土壤 C、N、P 含量随土层深度的增加而减少, 土壤容重则呈现出相反的趋势。一般而言, 植物在较为肥沃的土层中会投入较多的光合产物、扩大根系表面积, 从而尽可能多地吸收养分和水分, 以满足自身的生理需求 (Fransen et al, 1998)。因此, 本研究中扁刺栲细根会较多的分布在较为肥沃的表层, 而在相对贫瘠的下层分布较少。梅莉等 (2006) 和 Fortier et al (2013) 的研究也说明不同土层间土壤资源有效性的差别是导致细根在表层分布较多的原因。另外, 细根在土壤中更趋向于向阻力更小的方向生长。因此, 在土壤容重较小的表层土壤中, 细根生长受到的阻力较小, 且由于土壤中养分充足, 扁刺栲细根生长更快, 表现为细根的根长密度、根系表面积和比根长较大, 细根 N 含量也较高; 而在土壤容重较大的下层土壤, 由于细根生长受到的阻力较大, 且分配得到的同化物质及土壤中可供吸收的养分较少, 扁刺栲细根的分布极显著降低。可见, 该次生林不同土层间土壤容重的变化也是导致扁刺

栲细根在表层土壤中分布较多的原因之一。

综上所述, <1 mm 的细根在扁刺栲根系中占有重要地位, 由于其代谢活跃且具有吸收功能, N 含量最高, C/N 最小; 为吸收养分和水分, 扁刺栲 <1 mm 的细根生物量、根长、表面积和比根长均较高。这对发挥扁刺栲生理生态功能具有重要意义。由于该次生林不同土层间土壤理化性质不同, 导致扁刺栲细根在肥沃疏松的表层分布较多、生长较快、N 含量较高, 而在贫瘠紧密的底层分布较少、N 含量减小、C/N 增加。这在一定程度上反映了该次生林地下细根垂直分布及养分特征, 为揭示该生态系统地下生态过程及今后在该生态系统研究环境变化 (如氮沉降) 对地下生态过程的影响提供了基础数据。

参考文献:

- BAO WK, LIU ZG, LIU CL, et al, 2000. Fifteen-year changes of tree layer in secondary *Castanopsis Schima* humid evergreen broad-leaves forest in central subtropics of Western China [J]. *J Plant Ecol*, 24(6): 702-709. [包维楷, 刘照光, 刘朝禄, 等. 2000. 中亚点苦湿性常绿阔叶次生林自然恢复 15 年来群落乔木层的动态变化 [J]. *植物生态学报*, 24(6): 702-709.]
- BAO WK, LIU ZG, 2002. Community features of the primary and naturally secondary evergreen broad-leaf forests in MT. Wawu in Sichuan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 8(2): 120-126. [包维楷, 刘照光. 2002. 四川瓦屋山原生和次生常绿阔叶林的群落学特征 [J]. *应用与环境生物学报*, 8(2): 120-126.]
- BURTON AJ, JARVEY JC, JARVI MP, 2012. Chronic N deposition alters root respiration-tissue N relationship in northern hardwood forests [J]. *Glob Change Biol*, 18(1): 258-266.
- CALDWELL M, PEARCY R, 1994. Exploitation of environmental heterogeneity by plants: Ecophysiological processes above-and Belowground [M]. San Diego: Academic Press: 305-323.
- EISSENSTAT DM, YANAI RD. 1997. The ecology of root lifespan [J]. *Adv Ecol Res*, 27: 1-60.
- FORTIER J, TRUAX B, GAGNON D, et al, 2013. Root biomass and soil carbon distribution in hybrid poplar riparian buffers, herbaceous riparian buffers and natural riparian woodlots on farmland [J]. *Springer Plus*, 539(2):1-19.
- FRANSEN B, DE KROON H, BERENDSE F, 1998. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability [J]. *Oecologia*, 115(3): 351-358.
- GALE MR, GRIGAL DF, 1987. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status [J]. *Can J For Res*, 17(8): 829-834.
- GORDON WS, JACKSON RB, 2000. Nutrient concentrations in fine roots [J]. *Ecology*, 81(1): 275-280.
- GUO DL, MITCHELLI RJ, HENDRICKS JJ. 2004. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink

- manipulations in a longleaf pine forest [J]. *Oecologia*, 140(3): 450–457.
- GUO DL, XIA MX, WEI X, et al, 2008. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species [J]. *New Phytol*, 180(3): 673–683.
- GWENZI W, VENEKLAAS EJ, HOLMES KW, et al, 2011. Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed ecosystem in a water-limited environment [J]. *Plant Soil*, 348(1-2): 471–489.
- HAJEK P, HERTEL D, LEUSCHNER C, 2014. Root order- and root age-dependent response of two poplar species to belowground competition [J]. *Plant Soil*, 377(1-2):337-355.
- Huang JX, 2012. Estimating fine root production and mortality in subtropical *Altingia grilipes* and *Castanopsis carlesii* forests [D]. Fuzhou: Fujian Normal University. [黄锦学. 2012. 中亚热带细柄阿丁枫和米楮天然林群落细根生产和死亡动态研究 [D]. 福州: 福建师范大学.]
- JACKSON RB, MOONEY HA, SCHULZE ED, 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, 94(14): 7 362–7 366.
- LAMBERS H, CHAPIN FS I, PONS TL, 1998. *Plant Physiological Ecology* [M]. New York: Springer-Verlag.
- LEHMANN J. 2003. Subsoil root activity in tree-based cropping systems [J]. *Plant Soil*, 255(1): 319–331.
- LI P, ZHAO Z, LI ZB, et al, 2005. Characters of root biomass spatial distribution of *Robinia pseudoacacia* in Weibei Loess areas[J]. *Ecol Environ*, 14(3): 405–409.[李鹏, 赵忠, 李占斌, 等. 2005. 渭北黄土区刺槐根系空间分布特征研究 [J]. *生态环境*, 14(3): 405–409.]
- LI Q, MA MD, LIU YJ, et al, 2007. Study on soil carbon and nutrients pools of several evergreen broad-leaved forest types in Northwest Sichuan[J]. *J Soil Water Conserv*, 21(6): 114–125. [李强, 马明东, 刘跃建, 等. 2007. 川西北几种常绿阔叶林土壤碳库和养分库的比较[J]. *水土保持学报*, 21(6): 114–125.]
- LIU B, YU YF, ZHANG YQ, et al, 2008. Fine root biomass and related nutrients in different aged stands of subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed*, 32(5): 81–84. [刘波, 余艳峰, 张贇齐, 等. 2008. 亚热带常绿阔叶林不同林龄细根生物量及其养分[J]. *南京林业大学学报·自然科学版*, 32(5): 81–84.]
- LIU J, LI S, OUYANG Z, et al, 2008. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. *Proc Nat Acad Sci*, 105(28): 9 477–9 482.
- LIU L, GAN Y, BUECKERT R, et al, 2011. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile [J]. *Field Crop Res*, 122(3): 248–255.
- LIU Y, GU JC, WEI X, et al, 2010. Variations of morphology, anatomical structure and nitrogen content among first-order roots in different positions along branch orders in tree species [J]. *J Plant Ecol*, 34(11): 1 336–1 343. [刘颖, 谷加存, 卫星, 等. 2010. 树木不同着生位置 1 级根的形态, 解剖结构和氮含量 [J]. *植物生态学报*, 34(11): 1 336–1 343.]
- LUO DH, XIA J, YUAN JW, et al, 2010. Root biomass of karst vegetation in a mountainous area of southwestern China [J]. *J Plant Ecol*, 34(05): 611–618.[罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 等. 2010. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探[J]. *植物生态学报*, 34(05): 611–618.]
- MA L, WU P, WANG X, 2014. Root distribution chronosequence of a dense dwarfed jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau [J]. *J For Res*, 19(1): 62–69.
- MACINNIS-NG CMO, FUENTES S, O'GRADY AP, et al, 2010. Root biomass distribution and soil properties of an open woodland on a duplex soil [J]. *Plant Soil*, 327(1-2): 377–388.
- MEI L, WANG ZQ, HAN YZ, et al, 2006. Distribution patterns of *Fraxinus mandshurica* root biomass, specific root length and root length density[J]. *Chin J Appl Ecol*, 17(1): 1–4. [梅莉, 王政权, 韩有志, 等. 2006. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局 [J]. *应用生态学报*, 17(1): 1–4.]
- NADELHOFFER KJ. 2000. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems [J]. *New Phytol*, 147(1): 131–139.
- PAN KW, LIU CL, LIU ZG, et al, 2000. Climate resource and the utilization strategies in Wawushan Mountain Area [J]. *J MT Sci*, 18(2):122-128. [潘开文, 刘朝禄, 刘照光, 等. 2000. 四川瓦屋山地区气候资源特点与利用对策 [J]. *山地学报*18(2): 122– 128.]
- PAN KW, ZHANG YB, 2003. Percentage of soil absolute moisture content at different succession stages of *Castanopsis platyacantha-Schima sinensis* formation in central subtropical zone of Sichuan Province [J]. *Chin J App Ecol*, 14(2): 165–169. [潘开文, 张远彬. 2003. 四川中亚热带扁刺栲-华木荷群系不同演替阶段土壤含水率的研究[J]. *应用生态学报*14(2): 165–169.]
- PENG SL, HAO YR, 2005. The dynamics of forest root and its distribution during succession[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 44(5): 65-69. [彭少麟, 郝艳茹. 2005. 森林演替过程中根系分布的动态变化 [J]. *中山大学学报·自然科学版*, 44(5): 65– 69.]
- SCHENK HJ, 2008. The shallowest possible water extraction profile: a null model for global root distributions [J]. *Vadose Zone J*, 7(3): 1 119–1 124.
- WANG DH, ZHAO Z, LI J, 2010. Difference of surface area of fine roots of *Robinia pseudoacacia* in the different climate regions of Loess Plateau [J]. *Sci Silv Sin*, 46(5): 70–76. [王迪海, 赵忠, 李剑. 2010. 黄土高原不同气候区刺槐细根表面积的差异 [J]. *林业科学*, 46(5): 70–76.]
- WANG XH, YAN ER, YAN X, et al, 2005. Analysis of degraded evergreen broad-leaved forest communities in Eastern China and issues in forest restoration [J]. *Acta Ecol Sin*, 25(7): 1 796–1 803. [王希华, 闫恩荣, 严晓, 等. 2005. 中国东部常绿阔叶林退化群落分析及恢复重建研究的一些问题 [J]. *生态学报*, 25(7): 1 796–1 803.]
- WANG Y, OUYANG ZY, ZHENG H, et al, 2012. Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China[J]. *Acta Ecol Sin*, 32(6): 1 839-1 845. [王芸, 欧阳志云, 郑华, 等. 2012. 中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素[J]. *生态学报*, 32(6): 1 839–1 845.]
- XIANG W, LIU S, LEI X, et al, 2013. Secondary forest floristic

- composition, structure, and spatial pattern in subtropical China [J]. *J For Res*, 18(1): 111–120.
- XU Y, GU JC, DONG XY, et al, 2011. Fine root morphology, anatomy and tissue nitrogen and carbon contents of the first five orders in four tropical hardwood species in Hainan Island, China [J]. *J Plant Ecol*, 35(9): 955–964. [许旻, 谷加存, 董雪云, 等. 2011. 海南岛4个热带阔叶树种前5级细根的形态、解剖结构和组织碳氮含量[J]. *植物生态学报*, 35(9): 955–964.]
- YANG YL, LUO TX, WU ST, 2007. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, Northeast China[J]. *Acta Ecol Sin*, 27(9): 3 609–3 617. [杨韞丽, 罗天祥, 吴松涛. 2007. 长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及其次生林细根生物量与垂直分布特征 [J]. *生态学报*, 27(9): 3 609–3 617.]
- YANG YS, CHEN GS, LIN P, et al, 2003. Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 23(9): 1 719–1 730. [杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 2003. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力 [J]. *生态学报*, 23(9): 1 719–1 730.]
- YANG ZA, SONG SF, LI J, et al, 2014. A study on root characteristics and nutrients of different aged *Larix Principis-rupprechtii* Mayr. plantations [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 34(07): 1 432–1 442. [杨振安, 宋双飞, 李靖, 等. 2014. 不同林龄华北落叶松人工林根系特征和氮磷养分研究 [J]. *西北植物学报*, 34(07): 1 432–1 442.]
- YU LZ, DING GQ, ZHU JJ, et al, 2009. Effects of fertilization on nutrient concentrations of different root orders' fine roots in *Larix kaempferi* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 20(4): 747–753. [于立忠, 丁国泉, 朱教君, 等. 2009. 施肥对日本落叶松不同根序细根养分浓度的影响[J]. *应用生态学报*, 20(4): 747–753.]
- YUN L, BI HX, MA WJ, et al, 2010. Spatial distribution characteristics of root system of walnut trees in the Walnut-Peanut Intercropping System in the Loess Region of Western Shanxi [J]. *J NE For Univ*, 38(7): 67–70. [云雷, 毕华兴, 马雯静, 等. 2010. 晋西黄土区核桃花生复合系统核桃根系空间分布特征 [J]. *东北林业大学学报*, 38(7): 67–70.]
- ZHANG L, 2009. Fine root distribution, morphology and adaptation to competition of three main dominated broad-leaved species in a secondary subtropical forest [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology. [张雷. 2009. 3种阔叶树细根分布、形态及其对竞争的适应 [D]. 长沙: 中南林业科技大学.]
- ZHANG YB, WANG KY, HU TX, et al, 2003. Analysis on growth of *Castanopsis platycantha* in two different stands[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 9(4): 336–340. [张远彬, 王开运, 胡庭兴, 等. 2003. 扁刺栲在两种类型林分中的生长过程分析 [J]. *应用与环境生物学报*, 9(4): 336–340.]
- ZHU JJ, 2002. A review on fundamental studies of secondary forest management [J]. *Chin J Appl Ecol*, 13(12): 1 689–1 694. [朱教君. 2002. 次生林经营基础研究进展[J]. *应用生态学报*, 13(12): 1 689–1 694.]

(上接第 176 页 Continue from page 176)

- Acta Ecol Sin*, 33(19): 6 209–6 217. [肖以华, 李炯, 旷远文, 等. 2013 广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM_{2.5} 浓度及水溶性离子特征 [J]. *生态学报*, 33(19): 6 209–6 217.]
- ZHANG GX, YAN YL, GUO LL, et al, 2015. Composition and variation characteristics of atmospheric carbonaceous species in PM_{2.5} in Taiyuan, China [J]. *Chin J Environ Sci*, 36(3): 780–786. [张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 等. 2015. 太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 [J]. *环境科学*, 36(3): 780–786.]
- ZHANG ZD, XI BY, CAO ZG, et al, 2014. Exploration of a quantitative methodology to characterize the retention of PM_{2.5} and other atmospheric particulate matter by plant leaves: taking *populustomentosa* as an example [J]. *Chin J Appl Ecol*, 25(8): 2 238–2 242. [张志丹, 席本野, 曹治国, 等. 2014. 植物叶片吸滞 PM_{2.5} 等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨叶片为例 [J]. *应用生态学报*, 25(8): 2 238–2 242.]
- ZHAO CX, WANG YJ, WANG YQ, et al, 2013. Interactions between fine particulate matter (PM_{2.5}) and vegetation: a review [J]. *Chin J Ecol*, 32(8): 2203–2210. [赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 2013. 细颗粒物(PM_{2.5})与植被关系的研究综述[J]. *生态学杂志*, 32(8): 2 203–2 210.]
- ZHAO ST, LI XY, LI YM, 2014. The characteristics of deposition of airborne particulate matters with different size on certain plants [J]. *Ecol & Environ*, 23(2): 271–276. [赵松婷, 李新宇, 李延明. 2014. 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律 [J]. *生态环境学报*, 23(2): 271–276.]