

DOI: 10.5846/stxb201412162505

苏瑾, 王迪海. 黄土区不同林龄刺槐人工林细根的衰老生理特征. 生态学报, 2016, 36(14): - .

Su J, Wang D H. Physiological characteristics and senescence of fine roots in *Robinia pseudoacacia* plantations of different forest ages in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): - .

黄土区不同林龄刺槐人工林细根的衰老生理特征

苏 瑾, 王迪海*

西北农林科技大学林学院, 杨陵 712100

摘要:以黄土高原刺槐人工林为研究对象, 采用手工挖掘法, 配合完整土块法获取根系样品, 分析幼龄(11a), 中龄(22a), 成熟(34a)刺槐人工林细根活力、可溶性糖、可溶性蛋白含量和细胞膜透性等细根衰老生理指标的差异, 为深入了解刺槐细根的生长和衰老机制提供参考。结果表明:(1)在生长季节, 刺槐细根活力表现为, 幼龄林>成熟林>中龄林, 可溶性糖含量、可溶性蛋白含量随着林龄增大而增加, 而细胞膜透性则随林龄的增加而减小。(2)随着根序增加, 根活力和可溶性糖含量增加, 而可溶性蛋白含量和细胞膜透性则呈波动式降低。这表明, 在生长季节幼龄林细根较中龄林和成熟林更容易出现衰老, 刺槐不同根序衰老具有顺序性, 衰老先从 1 级根开始, 然后是 2 级根和 3 级根。

关键词:刺槐; 林龄; 细根衰老; 根序; 黄土高原

Physiological characteristics and senescence of fine roots in *Robinia pseudoacacia* plantations of different forest ages in the Loess Plateau

SU Jin, WANG Dihai*

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

Abstract: Owing to their large surface area and high biological activity, fine roots are the main vegetative organs by which trees absorb water and nutrients, and provide material support for aboveground growth and the physiological metabolism of other underground root systems. The senescence of fine roots affects plant growth and development, stand productivity and the chemical cycle of forest ecosystems. As one of the main tree species for water and soil conservation in the Loess Plateau, *Robinia pseudoacacia* plays an important role in improving the ecological environment. For this reason, *R. pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau were selected as the study site, and the hand-digging and intact clod methods were used to obtain root system samples to analyze differences in the physiological indicators (e.g., vigor, soluble sugar content, soluble protein content, and cell membrane permeability) of the fine root senescence for plantation stands of different ages [i.e., young forests (11a), middle-aged forests (22a) and mature forests (34a)]. These results provide a detailed description of the growth and senescence mechanisms of the fine roots of *R. pseudoacacia*. During the growing season, the vigor of fine roots with respect to forest age, in descending order, was as follows: young forest > mature forest > middle-aged forest. As forest age increased, the soluble sugar content and soluble protein content increased, while the cell membrane permeability decreased. Higher-order roots were associated with increased fine root vigor and soluble sugar content, but nonlinearly decreased soluble protein content and cell membrane permeability. Based on an ANOVA, the fine root vigor, soluble sugar content (except for second-order fine roots), soluble protein content (except for first-order fine roots), and cell membrane permeability exhibited significant differences with respect to stand age within root orders ($P < 0.05$). The differences in fine

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2011JM3001); 西北农林科技大学基本科研创新重点项目(ZD2012012); 国家“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD22B0302)

收稿日期: 2014-12-16; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wdhzz@nwsuaf.edu.cn

root vigor (except for middle-aged forests), soluble protein content (except for young forests), and cell membrane permeability in roots at identical stand ages exhibited significant differences with respect to root order ($P < 0.05$). The soluble sugar content differed significantly only in mature forests ($P < 0.05$). In summary, during the growing season, fine roots of the young forests are more prone to senescence than those of the middle-aged and mature forests. The sequence of fine root senescence in *Robinia pseudoacacia* begins with first-order fine roots and progresses to second-order and the third-order roots.

Key Words: *Robinia pseudoacacia*; forest age; fine root senescence; fine root order; Loess Plateau

细根是根系中生理活性较强的部分^[1]。细根衰老是细根周转过程中的重要阶段^[2-3],影响着树木养分和水分吸收、碳分配格局以及生态系统化学循环。研究细根衰老对于深入认识树木生长发育、林分生产力及森林生态系统碳循环和养分流动具有重要意义^[2,4]。目前,国内外学者在根系衰老的影响因子、代谢变化、调控机制等方面取得了长足的进步。徐文静等研究得出,遮荫处理使水曲柳幼苗细根活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量显著降低和膜透性增大,导致细根出现明显衰老^[5];卫星通过研究干旱胁迫对 1 年生水曲柳苗木细根衰老的影响得出,细根活力和可溶性蛋白含量均下降,细胞膜透性增加,细根衰老死亡^[6];干旱洪涝、干扰等胁迫和树木与土壤间的养分循环都会对根系的衰老过程发生作用,土壤中养分的存在形式,某些离子的浓度也直接影响到根的寿命^[7-9]。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是黄土高原主要的水土保持树种之一,曾进行大面积栽植,对改善这一地区生态环境、防止水土流失以及改善土壤质量发挥着重要作用^[10]。刺槐林的细根分布特征^[11-12]、细根与土壤水分特征^[13]以及生长与生物量效应^[14]等都有过较为详细的研究,而对刺槐林细根衰老研究几乎是空白。因此,本文以黄土高原不同林龄刺槐人工林为研究对象,研究分析不同林龄刺槐细根在生长季节的衰老生理特征,为深入认识不同林龄刺槐林分的生长发育、生产力及其生长稳定性提供参考。

1 研究区概况

研究地点位于陕西省永寿县槐坪林场(108°07'E, 34°48'N),属黄土高原南部残塬沟壑区,土壤类型为黄壤土。该地区属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 601.6 mm,降水多集中在 8—9 月份,年平均气温 10.8 °C,积温 3470.3 °C,年日照时数 2166.2 h,无霜期约 210 天。植被地带属于暖温带落叶阔叶林区。乔木以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)居多,灌木以酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne)等为主,草本以鹅观草(*Roegneria kamoji*)、羊茅(*Festuca ovina*)、赖草(*Leymus secalinus*)等为主。

2 研究方法

2.1 试验材料采集

2013 年 7 月中旬(黄土区此时的刺槐正处于生长旺盛期),在立地条件基本相同,林相整齐,生长良好的幼龄(11a),中龄(22a),成熟(34a)刺槐人工林中分别设置 3 个 20m×20m 的样地(如表 1),进行样地调查。在每个样地中选取 3 棵平均木进行根系取样。根系挖掘过程中主要采用手工挖掘法,配合完整土块法^[15]在每株树的基部用手工挖掘土壤,待主侧根暴露后,任选一条主根,采集其上的完整根系 5—10 个,保证所采根生长在 0 至 20cm 土壤中。取出的根系样品放入 2°C—4°C 冷藏箱中,带回实验室后,用去离子水洗净,于低温条件下(冰块中)对细根根序进行分级,并取前 3 级细根进行生理指标测定。

2.2 试验方法

测定不同林龄、不同根序的衰老生理指标(细根活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和膜透性),具体方

法如下^[16]。

表 1 样地概况
Table 1 Survey of sample plots

林龄/a Age	平均树高/m Mean height	平均胸径/cm Mean DBH	坡向 Slope aspect	土壤类型 Soil type	密度/(株/hm ²) Stand density	海拔/m Elevation
11	8.24	5.59	阳坡	黄壤土	3000	1267
11	7.96	5.94	阳坡	黄壤土	1700	1189
11	9.20	6.70	阳坡	黄壤土	2300	1205
22	10.28	10.30	阳坡	黄壤土	2600	1384
22	11.35	11.35	阳坡	黄壤土	2000	1296
22	11.23	10.69	阳坡	黄壤土	1800	1234
34	12.52	10.37	阳坡	黄壤土	1800	1372
34	12.38	10.98	阳坡	黄壤土	1900	1287
34	12.29	9.50	阳坡	黄壤土	1100	1143

2.2.1 细根活力测定

根系活力测定采用 TTC 染色法。称取 0.2g 的刺槐根系剪碎混匀放在试管中,加入 1%TTC 溶液 5mL 和 1/15mol/L 磷酸盐缓冲液 5mL(pH 7.0)充分混合,置于 37℃ 温箱内保温培养 1h 后,立即加入 1mol/L H₂SO₄ 溶液 2mL 以终止反应。取出根系,用滤纸吸干水分,至于研钵中,加入乙酸乙酯和少量石英砂研磨以提取甲胈。将红色提取液小心移入 10mL 容量瓶,并用乙酸乙酯定容至刻度,用分光光度计在波长 485nm 下比色。根据标准曲线,计算根系活力:TTC 还原强度(μg g⁻¹ h⁻¹) = 在标准曲线上查得的 TTF(μg)/[根鲜重(g) * 显色时间(h)]。

2.2.2 可溶性糖含量测定

可溶性糖含量采用蒽酮比色法。称取剪碎混匀的新鲜样品 1.0g,放入三角瓶中,加入 25mL 蒸馏水,在沸水浴中煮沸 20 min,取出冷却,过滤入 100mL 容量瓶中,用蒸馏水冲洗残渣数次,定容至刻度。然后制作标准曲线。取待测样品提取液 1.0mL 加蒽酮试剂 5mL,在 620nm 波长下,用空白调零测定吸光度。

2.2.3 可溶性蛋白含量测定

采用考马斯亮蓝 G-250 染色法。称取新鲜根系样品 0.5g,放入研钵,加 5mL 蒸馏水研磨成匀浆后,离心(4000 r/min,10min),然后将上清液倒入 10mL 容量瓶。再向残渣中加入 2mL 蒸馏水,悬浮后再离心 10min,合并上清液,定容至刻度。另取一只具塞试管,准确加入 0.1mL 样品提取液,加入蒸馏水 0.9mL 和 5mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液,充分混合,放置 5min 后,以标准曲线 1 号试管作参比在 595nm 波长下比色。

2.2.4 细胞膜透性测定

采用电导率法。称取 0.2g 样品放入小烧杯中,加 20mL 去离子水,真空渗入 20 min,静置 1h,用电导仪测定组织外渗液电导率 C₁,然后将试管置于沸水 15min 杀死植物组织,取出冷却至室温后测定其煮沸电导率 C₂,细胞膜相对透性(%) = C₁(浸泡电导率值)/C₂(煮沸电导率)。

2.3 数据分析方法

对不同林龄生理指标测定数据进行计算,得出各个根序(1—3 级细根)的平均活力、平均可溶性糖含量、平均可溶性蛋白含量和平均膜透性及对应的标准误差,选择 LSD 法检验(P<0.05)同一树龄不同根级、同一根级不同树龄生理指标的差异是否显著。所有数据分析用 SPSS17.0 软件完成,相关图表用 Microsoft Excel 2003 绘制。

3 结果与分析

3.1 不同林龄刺槐细根的活力

根活力表示植株中根系吸收和转化根系环境中水分和养分的能力,通常作为根系衰老的一个指标^[17]。

由图 1(A)可知,不同林龄相同根序刺槐 1—3 级细根的活力均表现为,幼龄林>成熟林>中龄林;相同林龄不同根序之间细根的活力(图 1(B))表现为,3 级>2 级>1 级。方差分析结果显示,不同林龄相同根序之间均差异显著($P<0.05$),相同林龄不同根序之间的差异,除中龄林外,均达显著水平($P<0.05$)。

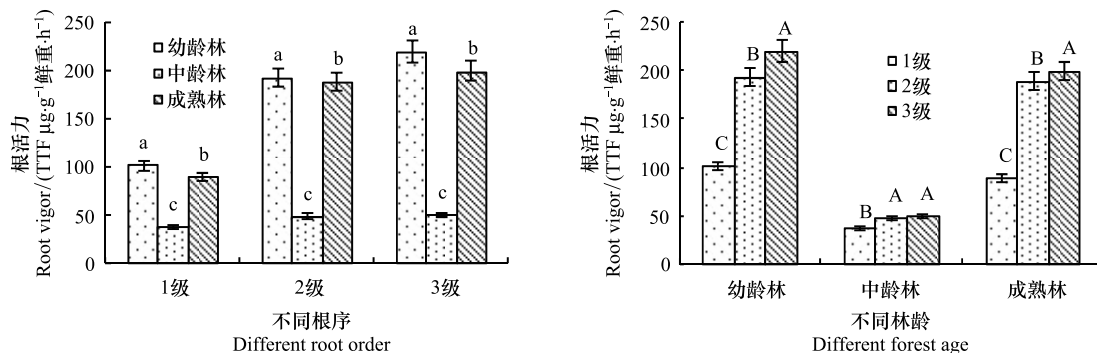


图 1 不同根序(图 A)、不同林龄(图 B)刺槐细根的活力

Fig.1 Fine root vigor of different root orders and forest ages of *Robinia pseudoacacia*

相同林龄不同根序之间的差异显著性用大写字母(A, B, C)表示,不同林龄相同根序之间差异显著性用小写字母(a, b, c)表示,有相同字母者,表示差异不显著(5%显著水平,下同)。

3.2 不同林龄刺槐细根可溶性糖含量

可溶性糖是根系可以直接利用和运输的养分存在形式,与地上部分的光合作用及生长有密切关系^[18]。从图 2(A)可以看出,不同林龄相同根序刺槐 1—3 级细根的可溶性糖含量均表现为,成熟林>中龄林>幼龄林;相同林龄不同根序之间细根可溶性糖含量(图 2(B))均表现为,3 级>1 级>2 级。经方差分析结果得出,不同林龄相同根序之间(除 2 级根外)均差异显著($P<0.05$),相同林龄不同根序之间的差异仅在成熟林中达到显著水平($P<0.05$)。

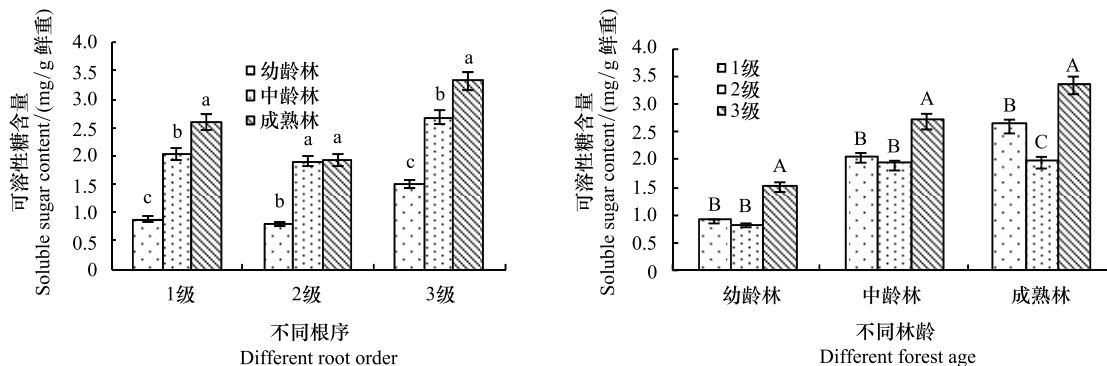


图 2 不同根序(图 A)、不同林龄(图 B)刺槐细根的可溶性糖含量

Fig.2 The content of soluble sugar of fine roots of *Robinia pseudoacacia* in different root orders and forest ages

3.3 不同林龄刺槐细根可溶性蛋白含量

可溶性蛋白是植物体内的一种蛋白,参与细胞的生理代谢,其含量的下降是植物衰老的一个标志^[19]。研究表明(图 3(A)),不同林龄相同根序刺槐 1—3 级细根的可溶性蛋白含量(除 2 级根外)均表现为,成熟林>中龄林>幼龄林;相同林龄不同根序之间细根的可溶性蛋白含量(图 3(B))均表现为,1 级>3 级>2 级。方差分析结果显示,不同林龄相同根序之间(除 1 级根外)均差异显著($P<0.05$),相同林龄不同根序之间的差异,除幼龄林外,均达显著水平($P<0.05$)。

3.4 不同林龄刺槐细根细胞膜透性

由图 4(A)得出,不同林龄相同根序刺槐 1—3 级细根的细胞膜透性均表现为幼龄林>中龄林>成龄林,相

同林龄不同根序之间细胞膜透性(图 4(B))均表现为 2 级>3 级>1 级。方差分析结果显示,不同林龄相同根序之间均差异显著($P<0.05$),相同林龄不同根序之间差异也均显著($P<0.05$)。

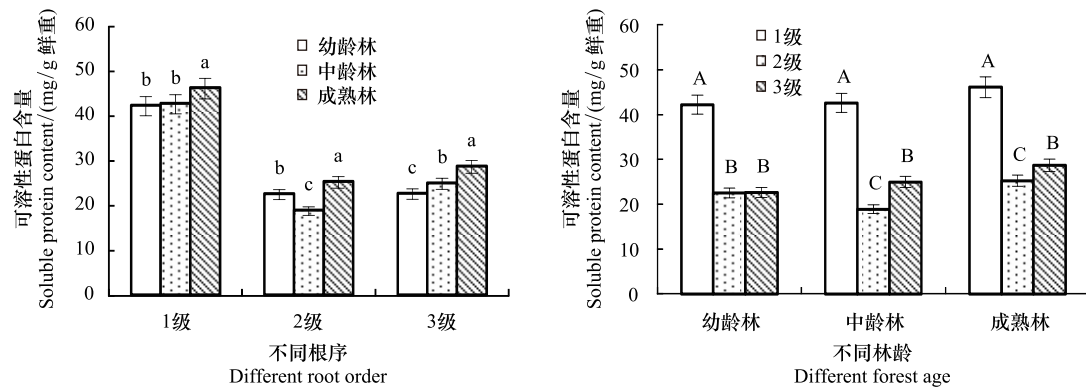


图 3 不同根序(图 A)、不同林龄(图 B)刺槐细根的可溶性蛋白含量

Fig.3 The content of soluble protein of fine roots of *Robinia pseudoacacia* in different root orders and forest ages

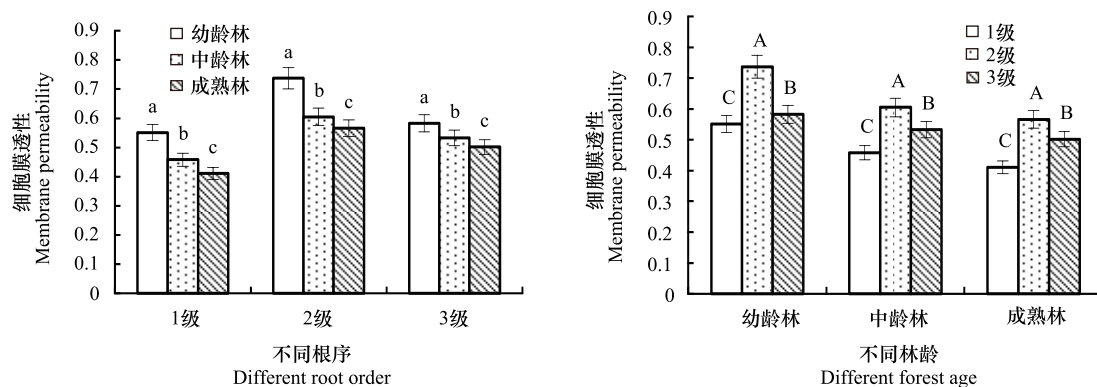


图 4 不同根序(图 A)、不同林龄(图 B)刺槐细根的细胞膜透性

Fig.4 Membrane permeability of fine roots of *Robinia pseudoacacia* in different root orders and forest ages

4 讨论

4.1 不同林龄刺槐细根衰老特征

细根活力指细根整个代谢的强弱,包括吸收、合成、呼吸作用和氧化能力,根系活力的大小与整个植株生命活动的强度紧密相关^[20]。可溶性糖和可溶性蛋白含量的降低是植物衰老的一个标志^[19,21]。本研究结果表明,不同林龄相同根序刺槐 1—3 级细根活力、可溶性糖和可溶性蛋白含量不同。从幼龄林到成熟林,细根活力呈现出先减弱后增强的变化过程,而细根可溶性糖和可溶性蛋白含量均呈增加趋势。这是由于刺槐从幼龄林到成熟林,郁闭度先增大后减小^[22],导致了林下光强先降低后升高,进而光合作用出现先降低后增加的变化,而光合作用的减弱导致了碳向细根的转运减少,使得根活力降低^[23]。李亚男^[24]等研究表明,叶片光合产物通过韧皮部向地下运输,根系将光合产物转化成可溶性糖和可溶性蛋白贮藏起来。这表明细根中可溶性糖和可溶性蛋白一直在不断的积累。因此,与细根活力的变化不同,细根中可溶性糖和可溶性蛋白含量的变化是随着林龄增大呈增加趋势。

细胞膜完整性下降是细胞衰老的基本特征^[25]。本研究表明,生长期的刺槐随着林龄增大,细根膜透性降低。从幼龄林到成熟林,随着林龄的增大,树木抗逆性就会增强^[26],抗逆性增强说明树木抵御外界干扰与胁迫能力增大。而抗逆性差的幼龄林可能受到当地 7 月中旬高温、干旱胁迫的影响,使正常细胞膜脂类物质的代谢发生变化,膜的完整性受到破坏,选择透性消失,离子大量外渗,相对电导率增加,细胞膜的破坏程度不

断增加。因此,外界干扰以及幼龄林树木抗逆能力较弱可能是导致幼龄林细根细胞膜透性较高的主要原因。

4.2 不同根序之间细根衰老的差异

相同林龄不同根序之间细根衰老也存在差异。在 1—3 级根中,随着根序增大,细根活力和可溶性糖含量均呈现增大趋势,这与前人^[27-28]研究结果基本一致。随着根序增大,细根直径增粗^[29-30],而直径影响细根的寿命^[31],即 3 级根寿命长于 1 级与 2 级根^[32]。根序寿命的差异反应了生理功能的不同,1 级根主要是吸收水分和养分,而高级根还具有运输和生成新侧根的功能^[30],据此推断,3 级根的活力要比 1 级根强;Guo^[30]等研究表明,高级根发挥储存和运输功能,而且碳是由高级根向低级根运输,这可能是 3 级根可溶性糖含量比 1 级与 2 级根高的原因。

然而,蛋白质含量随着根序(1—3 级)增加而下降,这与梅莉^[33]研究水曲柳和落叶松不同根序蛋白质含量变化规律相反。这可能是由以下几个因素综合作用的结果:一方面,可溶性蛋白参与了 3 级根次生生长及木栓层形成^[34];另一方面,刺槐根可形成根瘤,而根瘤先在 3 级根上产生,根瘤产生之后会合成豆血红蛋白,因而消耗了可溶性蛋白^[35]。

细根膜透性随着根序(1—3 级)增加表现出波动式增大,这与徐静文^[5]研究不相符,可能也与根系形成根瘤有关。有研究表明,根瘤菌形成初期,病原物所产生的吸器可使根细胞壁被溶解,进而通过细胞质膜进入细胞吸取营养,增大了细胞膜透性^[36],而根瘤先在高级根上产生,据此可知,3 与 2 级根细胞膜透性大于 1 级根。

5 结论

1) 生长季节,刺槐细根活力表现为,幼龄林>成熟林>中龄林,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量随着林龄增大而增加,而细胞膜透性则随林龄的增加而减小。从生理水平上说明,在生长季节幼龄林细根较中龄林和成熟林更容易出现衰老。由于幼龄林生长速度快,代谢旺盛,细根为了吸取更多的养分和水分以供给地上部分的生长和对环境的适应性而引起周转加快,导致细根最先引起衰老,中龄林次之,成熟林最晚。

2) 随着根序增加,根活力和可溶性糖含量增加,而可溶性蛋白含量和细胞膜透性则呈波动式降低,这也表明了刺槐不同根序衰老具有顺序性,衰老先从 1 级根开始,然后是 2 级根和 3 级根。

由于本文的研究对象是生长季节的不同林龄刺槐林,而在其他时期的刺槐林是否也具有上述结论尚需进一步研究考证。另外,不同林龄刺槐,其土壤容重、叶面积、土壤微生物、土壤温度等都存在着很大的差异^[37-39],这些环境因素可能也影响刺槐细根衰老^[40],所以还不能很好的回答很多有关于不同林龄刺槐细根衰老过程和机理问题,这些还有待深入和连续研究。

参考文献(References):

- [1] 梅莉,王政权,程云环,郭大立. 林木细根寿命及其影响因子研究进展. 植物生态学报, 2004, 28(4): 704-710.
- [2] 吴楚,王政权,范志强. 树木根系衰老研究的意义与现状. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1276-1280.
- [3] Bloomfield J, Vogt Kristiina A, Wargo P M. Tree root turnover and senescence // Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U eds. Plant Roots: the Hidden Half. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1996: 363-381.
- [4] Corpas Francisco J, Barroso Juan B, Sandalio Luisa M, Palma José M, Lupiáñez José A, Rfo Luis A del. Peroxisomal NADP-dependent isocitrate dehydrogenase, characterization and activity regulation during natural senescence. Plant Physiology, 1999, 121(3): 921-928.
- [5] 徐文静,王政权,范志强,孙海龙,贾淑霞,吴楚. 遮荫对水曲柳幼苗细根衰老的影响. 植物生态学报, 2006, 30(1): 104-111.
- [6] 卫星. 干旱胁迫对水曲柳苗木细根衰老的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [7] 张小全,吴可红. 森林细根生产和周转研究. 林业科学, 2001, 37(3): 126-137.
- [8] 孙启祥,张建锋. 林木根系衰老研究评述. 水土保持研究, 2007, 14(1): 72-75.
- [9] 王瑞丽,程瑞梅,肖文发,封晓辉,刘泽彬,王晓荣. 森林细根生产和周转的影响因素. 世界林业研究, 2012, 25(1): 19-23.
- [10] 张超,刘国斌,薛莲,宋籽霖,樊良新. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征. 林业科学, 2010, 46(12): 23-29.
- [11] 张良德,徐学选,胡伟,李星. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征. 林业科学, 2011, 47(11): 31-36.
- [12] 薛文鹏,赵忠,李鹏,曹扬. 王东沟不同坡向刺槐细根分布特征研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 27-32.

- [13] 王迪海, 赵忠, 张彦. 黄土高原刺槐细根与土壤水分特征. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 1-5.
- [14] 程杰, 王吉斌, 程积民, 张耀宏. 渭北黄土区人工刺槐林生长与生物量效应. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 72-79.
- [15] 银森录, 孔德良, 郭大立. 鼎湖山 9 种常见树木细根组织 N 浓度的季节变化. 植物生态学报, 2011, 35(11): 1106-1116.
- [16] 史树德, 孙亚卿, 魏磊. 植物生理学实验指导. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [17] 王彦荣, 华泽田, 陈温福, 代贵金, 王岩, 郝宪彬, 张忠旭, 苏玉安. 粳型超级杂交稻辽优 3225 根系生理特性研究. 中国水稻科学, 2003, 17(1): 37-41.
- [18] 王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 吴光南, 刘宝仁, 张金渝. 水稻叶片蛋白水解酶的某些理化特性及其与衰老的关系. 江苏农业学报, 1985, 1(1): 1-10.
- [20] 张巍巍, 郑飞翔, 王效科, 冯兆忠, 欧阳志云. 臭氧对水稻根系活力, 可溶性蛋白含量与抗氧化系统的影响. 植物生态学报, 2009, 33(3): 425-432.
- [21] 丑敏霞, 朱利泉, 张玉进, 张明, 别之龙, 陈仕江, 李泉森. 光照强度对石斛生长与代谢的影响. 园艺学报, 2000, 27(5): 380-382.
- [22] 刘江华. 黄土高原刺槐人工林生长特征及天然化程度评价[D]. 陕西杨凌: 中国科学院研究生院, 2008.
- [23] Högborg Peter, Nordgren Anders, Nina Buchmann, Taylor Andrew F S, Ekblad Alf, Högborg Mona N, Nyberg Gert, Ottosson-Löfvenius, Read David J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. Nature, 2001, 411(6839): 789-792.
- [24] 李亚男, 钟清平, 邱秀丽, 孟章兵, 陈洪国. 桂花根系可溶性糖、蛋白质及矿质营养含量变化. 咸宁学院学报, 2008, 28(6): 111-113.
- [25] 周香云, 李爽, 李连国, 项鹏宇. 低温胁迫对 8 种葡萄砧木根系细胞膜透性影响的研究. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33(4): 51-53.
- [26] 文佳. 不同树龄及低温胁迫对油茶生理生化指标的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [27] 凌华, 袁一丁, 杨智杰, 陈光水, 高人, 杨玉盛. 亚热带杉木人工林细根寿命特征. 第二届中国林业学术大会—S10 林业与气候变化论文集, 2009: 234-244.
- [28] 徐文静. 遮荫对水曲柳苗木细根衰老的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [29] 王向荣, 王政权, 韩有志, 谷加存, 郭大立, 梅莉. 水曲柳和落叶松不同根序之间细根直径的变异研究. 植物生态学报, 2005, 29(6): 871-877.
- [30] Guo Dali, Robert J Mitchell, Joseph J Hendricks. Fine root branch orders respond differently to carbon Source-Sink manipulations in a longleaf pine forest. Oecologia, 2004, 140(3): 450-457.
- [31] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root lifespan. Advances in Ecological Research, 1997, 27: 1-60.
- [32] Kurt S Pregitzer, Jared L Deforest, Andrew J Burton, Michael F Allen, Roger W Ruess, Ronald L Hendric. Fine root architecture of nine North American trees. Ecological Monographs, 2002, 72(2): 293-309.
- [33] 梅莉. 水曲柳落叶松人工林细根周转与碳分配[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [34] 卫星, 刘颖, 陈海波. 黄波罗不同根序的解剖结构及其功能异质性. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1238-1247.
- [35] 韩素芬, 李东. 刺槐根瘤发育过程外部形态和结构的观察. 南京林业大学学报, 1993, 17(2): 35-39.
- [36] 韩素芬, 黄金生, 甘习华, 苏纪宇. 刺槐根瘤发生的超微结构研究. 南京林业大学学报, 1996, 20(4): 17-20.
- [37] 李瑞霞, 凌宁, 郝俊鹏, 闵建刚, 陈信力, 关庆伟. 林龄对侧柏人工林碳储量以及细根形态和生物量的影响. 南京林业大学(自然科学版), 2013, 37(2): 21-27.
- [38] 王迪海, 赵忠, 李剑. 土壤水分对黄土高原主要造林树种细根表面积季节动态的影响. 植物生态学报, 2010, 34(7): 819-826.
- [39] 王迪海, 赵忠, 李剑. 黄土高原不同气候区刺槐细根表面积的差异. 林业科学, 2010, 46(5): 70-76.
- [40] 张秀娟, 梅莉, 王政权, 韩有志. 细根分解研究及其存在的问题. 植物学通报, 2005, 22(2): 246-254.