

滨海沙地木麻黄人工林细根的生产、分解及周转研究*

张立华¹ 叶功富^{2,3**} 林益明¹ 侯杰⁴ 卢昌义³ 曾国强⁵(1. 厦门大学生命科学学院 厦门 361005; 2. 福建省林业科学研究院 福州 350012;
3. 厦门大学海洋与环境学院 厦门 361005; 4. 闽江学院数学系 福州 350108;
5. 福建省惠安赤湖林场 惠安 362100)

摘要 在福建省惠安县赤湖林场用根钻法和分解袋法对 18年生木麻黄人工林细根生物量、分解及周转进行了研究。结果表明,18年生木麻黄活细根生物量平均为 $6.693 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,死细根平均为 $2.292 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,细根生物量具有明显的季节动态,活细根和死细根生物量年变化均为双峰型,活细根生物量峰值出现在 1月和 7月,死细根出现在 3月和 7月。用试验期间不同时间数据拟合得到木麻黄细根分解回归方程: $x/x_0 = 1.06e^{-0.0014t}$ 。应用模拟方程计算出木麻黄分解 1年的干重损失率理论值(35.96%)与实测值(38.19%)较为接近。木麻黄细根半分解时间为 537 d,95%分解时间为 2181 d。结合木麻黄人工林在不同季节的细根生物现存量,18年林龄木麻黄细根年死亡量分别为 $1.825 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,年生长量为 $3.173 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,年周转 0.474次。

关键词 木麻黄 细根 生产 分解 周转 滨海沙地

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2008)01-0020-05

Production, decomposition and turnover of fine roots in *Casuarina equisetifolia* plantation

ZHANG Li-Hua¹, YE Gong-Fu^{2,3}, LIN Yi-Ming¹, HOU Jie⁴, LU Chang-Yi³, ZENG Guo-Qiang⁵(1. School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Academy of
Forestry, Fuzhou 350012, China; 3. College of Oceanography and Environmental Sciences, Xiamen University,
Xiamen 361005, China; 4. Mathematic Department of Minjiang College, Fuzhou 350108, China;
5. Hui'an County Chifu Forestry Fam, Fujian Province, Hui'an 362100, China)

Abstract The sequential root coring and litter bag technique were used to study fine root biomass, decomposition and turnover in an 18-year-old *Casuarina equisetifolia* plantation, from Chihu Forestry Fam of Hui'an County. Results show that the average live fine root biomass is $6.693 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and that of dead fine root is $2.292 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. Annual dynamic curves of both live and dead fine roots have double apices. Curve peaks of live fine root biomass occur in Jan and July, while that for dead fine root occur in March and July. The regression equation, based on dry matter decomposition data gained during different experimental periods is: $x/x_0 = 1.06e^{-0.0014t}$. Theoretic annual dry-weight loss rate of 35.96% calculated from the equation is close to the metrical value of 38.19%. It takes 537 days and 2181 days to respectively decompose 50% and 95% of the fine roots. Annual mortality of fine roots in the 18-year-old plantation is $1.825 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and annual productivity is $3.173 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, with an annual turnover rate of 0.474.

Key words *Casuarina equisetifolia*, Fine root, Production, Decomposition, Turnover, Shore sandy soil

(Received May 28, 2006; accepted Oct 7, 2006)

由于不同树种细根(Fine root)形态和大小不同,甚至同一树种在不同立地条件下也不同,目前还没有一致的细根定义。Marshall和Waring^[1]将细

根定义为没有次生加厚的根,但并没有给出具体的细根直径。一般定义直径在 2~5 mm 以下的为细根^[2],但多数定义为直径 < 2 mm^[3],也有人将直径

* 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAB03A14-01)、福建省科技重大项目(2006NZ0001-2)和国家林业局南方山地用材林培育重点实验室项目资助

** 通讯作者, E-mail: gongfuye@hotmail.com

张立华(1980~),男,山东临清人,硕士,主要从事海岸防护林生态与经营研究。

收稿日期:2006-05-28 接受日期:2006-10-07

小于 3 mm^[4]和 5 mm^[5],甚至 6 4 mm^[6]的根作为细根。细根有巨大的吸收表面积,生理活性强,是树木水分和养分吸收的主要器官,且多数树种有菌根侵染,吸收表面积增加。同时树木细根生长和周转迅速,对树木碳分配和养分循环起着十分重要的作用^[7]。另外,细根还可分泌多种无机和有机物质,产生化学他感作用。细根动态对环境变化具有指示作用,可反映树木或生态系统的健康状况^[8]。

细根是森林生态系统生物量和养分库的重要动态组成部分,在森林生态系统能量流动和物质循环中起关键作用^[9-11]。许多林分年净初级生产力的 50%以上均用于细根的生产 and 维持^[2,12,13],全球平均约为 33%^[14]。细根周转对土壤碳和养分输入的量等于甚至超过地上部枯落物的归还量^[15-17]。如果忽略森林生态系统中根(尤其是细根)的作用,有机质及养分归还将被低估 20%~80%^[17]。国外对树木细根周转、分解及其对土壤养分、树木营养和生态系统碳平衡影响的研究日益受到重视,取得了丰硕的研究成果,国内也开展了少量的研究^[18-23],但对木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)防护林细根分解、周转及净生产力的研究却未见报道。本研究从 2005 年 1 月到 2006 年 1 月,对福建省滨海沙地上木麻黄人工林细根的生产、分解及周转进行了系统研究,为提高木麻黄人工林生产力、加强人工林的营造提供依据。

1 试验地概况和研究方法

1.1 试验地概况

试验地设在福建省沿海中部惠安县崇武赤湖国有防护林场,该林场位于东经 118°55',北纬 23°45'。属南亚热带海洋性季风气候区,年平均气温 19.8℃,绝对最高气温 37.0℃,绝对最低气温 2.2℃,全年无霜期 320 d,年均降水 1 029 mm,年均蒸发 2 000 mm,干湿季明显,干旱频率高。试验样地设置在 18 年生(成熟林)木麻黄人工纯林内,株行距 2.0 m × 2.0 m,样地面积为 20 m × 20 m,该样地内木麻黄初始密度 2 500 株·hm⁻²,现有密度 1 648 株·hm⁻²,平均胸径 13.78 cm,平均树高 13.97 m。林地内的凋落物厚 3~5 cm,且分解良好。林下灌木、草本稀少。本试验地无人工施肥及灌溉,试验期间的气候条件与往年相当,属正常年份。

1.2 细根生物量的研究方法

2005 年 1~11 月生长季内,隔月月初在样地内以“S 型”随机选择 20 个样点,每样点用内径为 8 cm、长度 70 cm 的土钻钻取土芯,使土芯保存完整,带回实验室,或者当场按每 10 cm 1 层分割土芯,共分为 7 层,分别在土壤套筛上过筛,捡出根系,用清水冲

洗干净,分出乔木根和林下植被根,并根据外形、颜色、弹性及根皮与中柱分离的难易程度区分活死根。风干后称重,然后在 80℃ 下烘干至恒重,计算干重率,按下列公式计算细根生物量:

$$M = m / r^2 \times 10^2 \quad (1)$$

式中, M 为细根生物量(t·hm⁻²), m 为平均每钻土芯细根干重(g), r 为土钻半径(cm)。

2005 年 1 月在 18 年生木麻黄样地内进行细根分解试验。在林地内随机挖取细根,用流水冲洗干净,去除颜色发暗、无弹性的死根,晾至自然含水量,剪成 5 cm 长的根段,称取 5.0 g 细根装入孔径为 0.5 mm,20 cm × 20 cm 的尼龙网袋。共计 54 袋随机平埋入木麻黄林内深 0~20 cm 的土壤中,表层覆盖凋落物,于树木生长季每月取 4~5 袋,取出后除去附着的土壤、杂物和新长入的细根,并用清水冲洗干净,假定冲洗掉的细根已分解,将剩余根系于 80℃ 烘箱中烘干后测定干重。细根净生产力和周转主要采用 McClaugherty^[24]提出的最大最小值方法计算,同时考虑分解作用对这一方法进行必要的修改,建立细根年周转量模型:

$$M = X_{\max} - X_{\min} + D \quad (2)$$

$$P = Y_{\max} - Y_{\min} + M \quad (3)$$

$$T = P/Y \quad (4)$$

式中, M 为细根年死亡量, P 为细根年生长量, D 为细根年分解量, X_{\max} 为死细根生物量最大值, X_{\min} 为死细根生物量最小值, Y_{\max} 为活细根生物量最大值, Y_{\min} 为活细根生物量最小值, T 为细根年周转率, Y 为活细根平均生物量。

采用 Excel 对试验数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 木麻黄人工林细根生物量及动态

木麻黄林细根生物量季节变化趋势如图 1 所示。6 次调查结果表明,木麻黄活细根生物量平均为 6.693 t·hm⁻²,死细根平均为 2.292 t·hm⁻²。活细根和死细根生物量季节变化趋势基本上都呈倒“S”型,活细根生物量的波动范围为 6.077~7.425 t·hm⁻²,两个峰值分别出现在 1 月和 7 月,死细根生物量的波动范围为 1.845~2.795 t·hm⁻²,两个峰值分别出现在 3 月和 7 月。这与湖南省会同和鼎湖山等地的研究结果相似,但湖南会同杉木(*Cunninghamia lanceolata*)火力楠(*Muchelia macclurei*)纯林的 2 个高峰分别在 6 月和 12 月,最低值出现在 9 月,而死细根生物量 7 月最大,8 月最低^[20];鼎湖山季风常绿阔叶林和针阔混交林活细根生物量 7 月最大,12 月最低,而死细根 4 月或 7 月最大,12 月最小^[25]。

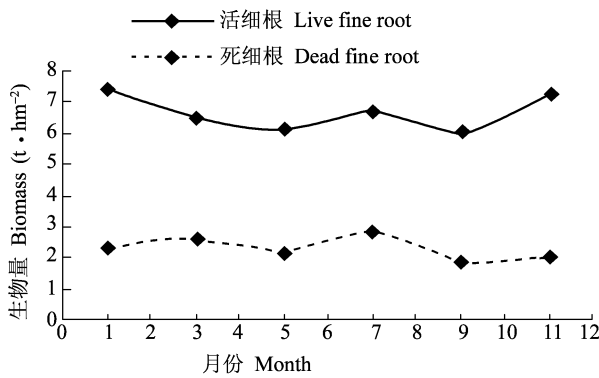


图 1 18年生木麻黄人工林细根生物量季节动态

Fig 1 Seasonal changes of fine root biomass of 18-year old *C. equisetifolia* plantation

本研究细根生物量峰值出现在地上部分开始生长之前的 1 月份和地上部分达到生长高峰之后的 7 月份,这与地上部分快速生长其地下部分根系生长特别慢的研究结果相一致^[26,27]。早春气温回升,降水量增多,但地温回升滞后于气温,灌木和草本植物及木麻黄地上部分的生长同细根争夺养分,使细根的死亡速度大于生长速度,而土壤含水量的升高也促进了前期死细根的分解。至 5 月份土壤条件适于细根生长,细根生物量开始增加,到 7 月达到峰值。9 月份木麻黄地上部分进入另一个生长盛期^[28],导致地下细根生物量出现第 2 个低峰。此后,气温开始下降,灌草及木麻黄地上部分生长减慢或停止,使细根的生物量进入第 2 个增长期,直至翌年 1 月。

2.2 木麻黄人工林细根的分解规律

木麻黄细根的分解始终比较平缓(图 2),尤其是前 3 个月,几乎呈直线平缓下降;在 4 月份后下降幅度较大,继而又渐趋平缓,到 8 月份后,细根分解相对波动较大,干重残留率下降较快。因此,细根分解较快的时间出现在 4 月和 8 月。死细根生物量的峰值一般出现在 3 月和 7 月(图 1)。由此可见,在死细根生物量达到 1 个高峰之后,会出现 1 个细

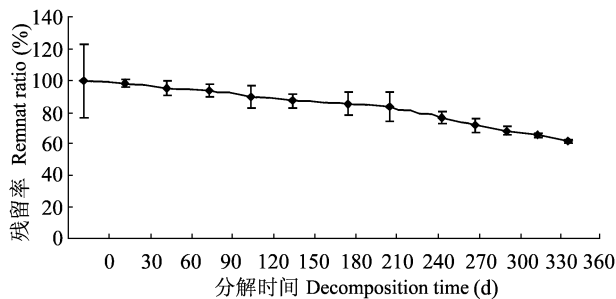


图 2 木麻黄人工林细根分解过程中干重残留率

Fig 2 The remnant ratio of fine root of *C. equisetifolia* plantation during the decomposition

根分解的高峰。细根分解系数(k)反映细根分解速率的大小, k 值越大说明干物质损失越快。多数文献分解系数的计算是基于 Olson^[29]提出的公式 $x/x_0 = e^{-kt}$ (式中, x 为分解 t 时间后干重残留率, x_0 为初始干重, k 为分解系数),即细根干重残留率与分解时间 t 呈负指数关系。依据上述公式,计算出各月份木麻黄细根的分解系数和失重率(表 1)。

表 1 不同月份木麻黄细根的分解系数与累计失重率

Tab 1 Decomposition coefficients and percentage of dry mass loss of fine roots of *C. equisetifolia* plantations at different month

月份 Month	分解系数(k) Decomposition coefficient	失重率(R) Percentage of dry mass loss(%)
2	0.000 6	1.92 ±0.088 1
3	0.000 8	4.94 ±0.161 5
4	0.000 7	6.32 ±0.131 1
5	0.000 9	9.89 ±0.256 9
6	0.000 9	12.64 ±0.158 1
7	0.000 9	14.56 ±0.277 0
8	0.000 9	16.48 ±0.342 0
9	0.001 1	23.35 ±0.135 0
10	0.001 2	28.30 ±0.162 4
11	0.001 3	31.59 ±0.100 9
12	0.001 3	34.62 ±0.033 5
1	0.001 3	38.19 ±0.048 2

由表 1 可见,细根各月的分解系数不同,即单位时间木麻黄细根干重残留率(x/t)并不是一个常数,这可能是由于各月土壤水热情况不一等所致^[30]。由此可见,分解系数是 1 个与时间有关,并受物质干湿损失程度影响的变量^[18]。尽管等式 $x/x_0 = e^{-kt}$ 为不少学者所接受,但仅是 1 个经验方程。本文对 Olson 的方程进行了改动,拟合出木麻黄细根分解过程,即 $x/x_0 = Ae^{-kt}$,式中 A 为系数。

利用试验期间不同时间数据计算得到木麻黄细根分解的回归方程为: $x/x_0 = 1.06e^{-0.0014t}$ 。公式拟合结果与观测结果对比列于表 2。从表 2 可以看出,应用模拟方程计算出分解 1 年的干重损失率理论值(35.96%)与实测值(38.19%)较为接近。木麻黄细根半分解时间为 537 d,95% 分解时间为 2 181 d。方程参数的推导与试验条件,尤其与试验地局部环境如温度、湿度有关。方程的生态学意义在于其不仅反映了各类林木细根本身的固有分解速率这一内在因素,也间接地反映了试验林地小区域水热条件等局部环境的影响。为使方程能更准确地反映木麻黄细根的分解情况,还应进行不同年份和不同水热条件下的试验,综合考虑,以便使方程能更准确的反映木麻黄细根的实际分解情况,并能够进行

合理科学地预测^[18]。

表 2 残留干重拟合结果与观测结果对比

Tab 2 Comparison of observed remained percentage of dry mass with that of predicted by modified exponential model

分解时间 Decomposition time (d)	拟合结果 Predicted remained dry mass(g)	观测结果 Observed remained dry mass(g)	相对误差 Relative error
30	1.016 4	0.980 8	3.63
60	0.974 6	0.950 5	2.54
90	0.934 5	0.936 8	0.25
120	0.896 1	0.901 1	0.55
150	0.859 2	0.873 6	1.65
180	0.823 9	0.854 4	3.57
210	0.790 0	0.835 2	5.41
240	0.757 5	0.766 5	1.17
270	0.726 3	0.717 0	1.30
300	0.696 5	0.684 1	1.81
330	0.667 8	0.653 8	2.14
360	0.640 4	0.618 1	3.61

影响细根分解的因素很多,如细根本身的特性、各种非生物因素(如温度、水分、土壤养分有效性等)、土壤生物的活动以及分解时间的长短等。本研究中木麻黄细根生长 1 年后的实际分解率为 38.19%,与木麻黄落叶的分解速率(38.1%)相当,略高于落果(31.6%),远高于落枝(19.5%)^[31],这一数值不仅低于亚热带的格式栲(*Castanopsis kawakamii*)人工林(63.51%~77.95%)^[19]、杉木(61.3%)和火力楠(92.8%)^[20],也低于长白山阔叶红松林中红松(*Pinus koraiensis*)、椴树(*Tilia turan*)、色木(*Acer mono*)的平均失重率(56.31%)^[21]。木麻黄细根的分解率低可能与其所处的滨海沙地持水能力差,土壤含水量低有关。

2.3 木麻黄人工林细根年生长量、年死亡量及其周转率

根据 1 年时间内不同季节细根分解速率和死亡细根生物量计算出木麻黄细根年分解量,再利用 McCloughery^[24]的极差模型计算年生长量、年死亡量和周转率。木麻黄活细根生物量为 6.693 t·hm⁻²,死细根生物量为 2.292 t·hm⁻²,细根年生长量为 3.173 t·hm⁻²,年死亡量为 1.825 t·hm⁻²,年分解量为 0.875 t·hm⁻²,年周转率为 0.474 次。

计算结果表明,木麻黄细根年死亡量高于杉木(0.497 t·hm⁻²)、火力楠(0.595 t·hm⁻²)及其混交林(1.149 t·hm⁻²)^[20],低于长白山阔叶红松林(2.0 t·hm⁻²)^[21]、格氏栲(5.148 t·hm⁻²)和杉木人工林(2.492 t·hm⁻²)^[19]。单建平等^[21]基于长白山阔叶红松林细根周转的研究,提出森林凋落

物的组成不仅是指枯枝落叶部分,还应包括细根的死亡部分,即根系凋落物。叶功富等^[31]的研究表明,18 年生木麻黄人工林地上部分凋落物量约为 2.662 t·hm⁻²,年死亡量占其年凋落物量的 68.56%。由此可见,由于细根的分解速率比凋落物快,且细根养分含量比凋落物高,因而细根在群落养分归还中的作用可能比凋落物大。

木麻黄人工林细根年生长量低于同处亚热带的武夷山甜槠林(*Castanopsis eyrei*, 7.372 t·hm⁻²)^[22]、鼎湖山常绿阔叶林(3.740 t·hm⁻²)^[25]和火力楠纯林(4.318 t·hm⁻²)^[20],甚至低于长白山阔叶红松林(4.860 t·hm⁻²)^[21]。但高于杉木纯林(1.137 t·hm⁻²)^[19],处于已报道的范围内(1.310~9.000 t·hm⁻²)^[14]。从现有资料看,森林细根的年周转率范围在 0.29~1.20 次之间,多数在 0.50~1.20 次^[14],木麻黄细根的年周转率也处于正常范围内。

3 讨论

木麻黄适于滨海防风固沙、盐碱地改良和干旱地区造林,是沿海防护林系统重要的组成部分。这与其生物学特性有关,其中细根生物量大是原因之一。本研究表明,木麻黄细根生物量具有明显的季节动态。由于木麻黄人工林所处的海岸沙地贫瘠,凋落物分解和地下部分尤其是细根周转是其养分的主要来源。细根周转的原因主要是林地土壤水分不断变化,树木必须生长新的细根,替代旧细根以吸收水分和养分,而避免过多根系呼吸消耗更多能量^[32]。木麻黄细根的分解率(38.19%)低除了与木麻黄细根本身的特性有关之外,还可能与其所处的滨海沙地持水能力差,土壤含水量低等环境条件有关。尽管细根分解速率较低,但由于生物量较大,每年细根死亡量(1.825 t·hm⁻²)仍相当高。通过大量细根的生长,木麻黄吸收表面积增加,吸收空间扩大,有利于木麻黄从干旱、贫瘠的风积沙土中吸收较多的水分和养分,从而具有耐旱、抗贫瘠、耐盐碱和抗风沙等特性。

由于分解试验中所用细根样品采自均一性风积沙土上 18 年林龄的样地,至于不同林龄和不同立地类型之间细根分解速率是否有差别,以及差别的大小,尚需深入研究。此外还应进行木麻黄与其他阔叶林细根混合样品分解过程的特征研究,为适宜木麻黄伴生树种的选择提供理论依据。实际上自然死亡的根系才会分解,但本研究中是以人为致死的细根为研究对象。这是由于在生态系统水平上确定根系衰老相当困难,收集足够多新死亡细根不太可能,因此可能会导致研究过程与自然状态有

所不同, 毕竟活根致死与自然死亡的根系在存在形式等方面均不同, 因此采用活根进行研究会使分解率下降、上升或者变化不大, 从而导致对细根分解估计不准确, 这些问题在目前研究中仍未解决。

参考文献

- [1] Marshall J. D., Waring R. H. Predicting fine root production and turnover by monitoring root starch and soil temperature[J]. Can J. For Res, 1985, 15: 791- 800
- [2] Fogel R., Hunt G. Fungal and arboreal biomass in a western Oregon Douglas-fir ecosystem: Distribution patterns and turnover[J]. Can J. For Res, 1979, 9: 245- 256
- [3] Persson H. Root dynamics in a young Scots pine stand in central Sweden[J]. Oikos, 1978, 30: 508- 519
- [4] Aber J. D., Melillo J. M., Nadelhoffer K. J., et al Fine root turnover in forest ecosystem in relation to quality and form of nitrogen availability: a comparison of two methods[J]. Oecologia, 1985, 66: 317- 321
- [5] Van Praag H. J., Sougniez-Remy S., Weissen F., et al Root turnover in a beech and a spruce stand of the Belgian Ardennes[J]. Plant and Soil, 1988, 105: 87- 103
- [6] Kimmins J. P., Hawkes B. C. Distribution of chemistry of fine roots in a white spruce-subalpine fir stand in Britain Columbia: implication for management[J]. Can J. For Res, 1978, 8: 265- 279
- [7] 张小全, 吴可红, Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 875- 883
- [8] Vogt K. A., Publicover D. A., Bomfield J., et al Below-ground responses as indication of environmental change[J]. Environ Exp Bot, 1993, 33: 189- 205
- [9] Usman S., Singh S. P., Rawat Y. S., et al Fine root decomposition and nitrogen mineralization patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 131: 191- 199
- [10] Hendrick R. L., Pregitzer K. S. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems[J]. Can J. For Res, 1993, 23: 2507- 2520
- [11] Fahey T. J., Hughes J. W. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH[J]. Journal of Ecology, 1994, 82: 533- 548
- [12] Harris W. F., Xineron R. S., Edwards N. T. Comparison of belowground biomass in natural deciduous forests and loblolly pine plantations[J]. Pedobiologia, 1977, 17: 369- 381
- [13] Keyes M. R., Grier C. C. Below- and above-ground biomass and net production in two contrasting Douglas fir stands on low and high productivity sites[J]. Can J. For Res, 1981, 11: 599- 605
- [14] Jackson R. B., Mooney H. A., Schulze E. D. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents[J]. Ecology, 1997, 94: 7362- 7366
- [15] Pregitzer K. S., Hendrick R. L., Fogel R. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen[J]. New Phytol, 1993, 125: 575- 580
- [16] Arthur M. A., Fahey T. J. Biomass and nutrients in an Engelmann spruce subalpine fir forest in north central Colorado: pool, annual production and internal cycling[J]. Can J. For Res, 1992, 22: 315- 325
- [17] Vogt K. A., Crier C. C., Gower S. T., et al Overestimation of net root production: A real or imaginary problem? [J]. Ecology, 1986, 67: 577- 579
- [18] 李培芝, 范世华, 王力华, 等. 杨树细根及草根的生产力与周转的研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 829- 832
- [19] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格式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, 2003, 23(9): 1719- 1731
- [20] 廖利平, 陈楚莹, 张家武, 等. 杉木、火力楠纯林及混交林细根周转的研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 7- 10
- [21] 单建平, 陶大力, 王森, 等. 长白山阔叶红松林细根周转的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 241- 245
- [22] 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣, 等. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(4): 337- 340
- [23] 翟明普, 蒋三乃, 贾黎明. 沙地杨树刺槐混交林细根动态[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 39- 44
- [24] McClaugherty C. A., Aber J. D., Melillo J. M. The role of fine root in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems[J]. Ecology, 1982, 3(5): 1481- 1490
- [25] 温志达, 魏平, 孔国辉, 等. 鼎湖山南亚热带森林细根生产力与周转[J]. 植物生态学报, 1999, 23(4): 361- 369
- [26] Eissenstat D. M., Van Rees K. C. J. The growth and function of pine roots[J]. Ecological Bulletins, 1994, 43: 76- 91
- [27] Law B. E., Ryan M. G., Anthoni P. M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem[J]. Global Change Biology, 1999, 5: 169- 182
- [28] 叶功富, 张水松, 苏全兴, 等. 木麻黄主要类型防护林生长发育规律的研究[J]. 防护林科技, 2000, (专刊 1): 6, 14
- [29] Olson J. S. Energy storage and the balance of producer and decomposers in ecological systems[J]. Ecology, 1963, 44: 322- 331
- [30] Brinson M. M. Decomposition and nutrient exchange of litter in an alluvial swamp forest[J]. Ecology, 1977, 58: 601- 609
- [31] 叶功富, 隆学武, 潘惠忠, 等. 木麻黄的凋落物动态及其分解[J]. 防护林科技, 1996(专辑): 30- 34, 76
- [32] Bartsch N. Responses of root systems of young *Pinus sylvestris* and *Picea abies* plants to water deficits and soil acidity[J]. Can J. For Res, 1987, 17: 805- 815