

DOI: 10.5846/stxb201311302855

陈珊, 陈双林, 郭子武. 林地覆盖经营对雷竹鞭根主要养分内循环的影响. 生态学报, 2015, 35(17): - - .

Chen S, Chen S L, Guo Z W. Effects of mulching management on the internal cycling of nutrients in the rhizomatous roots of *Phyllostachys violascens*. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - - .

林地覆盖经营对雷竹鞭根主要养分内循环的影响

陈 珊, 陈双林*, 郭子武

中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400

摘要:为了给林地覆盖经营雷竹 *Phyllostachys violascens* 林可持续经营提供理论参考,探讨了休养式覆盖经营(覆盖 3 a 后休养 3 a)、长期覆盖经营(覆盖 6 a)和不覆盖雷竹林(CK)2 年生壮龄竹鞭及其 1 级、2 级根 N、P、K、Mg、Ca、Fe 浓度和养分迁移、内循环率的差异。结果表明:不同覆盖经营年限雷竹林 N、P、K、Mg、Ca 和 Fe 浓度总体上 1 级根显著高于 2 级根。1 级根和 2 级根中均存在 N、P、K、Mg 的养分内循环,且 1 级根养分内循环率大于 2 级根,Fe、Ca 内循环不明显。N、P、K、Mg 养分浓度与养分迁移速率随时间的推延,1 级根为持续降低,2 级根为先升高后降低。与不覆盖雷竹林相比,休养式林地覆盖经营总体上提高了 1 级、2 级根的 N、P、K、Ca 的浓度和 P、K、Mg 的迁移速率、N、P、K 的迁移量、P、K 的养分内循环率以及 1 级根 Mg 的浓度和迁移量、2 级根 N 的迁移速率和 Mg 的内循环率;长期林地覆盖经营虽提高了雷竹 1 级根 N、K 的浓度和 N 的迁移量及 2 级根 N 的浓度和内循环率,但总体上降低了 1 级根 P、K、Mg 和 2 级根 N、P、Mg 的迁移量与 1 级、2 级根 P、Mg 的迁移速率及 P、K、Mg 的养分内循环率。研究表明:雷竹林鞭根中存在明显的养分内循环,且 1 级根对养分内循环的贡献较大。休养式林地覆盖经营利于雷竹林对养分的循环利用,而长期覆盖经营阻碍了根系对养分的平衡吸收,减弱了根系养分的内循环,不利于雷竹林的生长更新。

关键词:雷竹; 林地覆盖; 鞭根; 养分内循环; 养分迁移

Effects of mulching management on the internal cycling of nutrients in the rhizomatous roots of *Phyllostachys violascens*

CHEN Shan, CHEN Shuanglin*, GUO Ziwu

Research institute of Subtropical Forestry, Chinese Forestry Academy, Fuyang 311400, China

Abstract: Although fine roots constitute only a small part of the biomass of root systems, they significantly facilitate the uptake of nutrients from soils, and therefore play a very important role in the flow of energy and matter in the biosphere. The nutrient cycle in fine roots is accordingly of particular importance in enhancing the nutrition efficiency of plants. However, the internal cycling of nutrients in fine roots during senescence has, for a long time, been an issue of some controversy. Moreover, fine roots are very sensitive to environmental stress factors, such as those due to soil nutrient and water deficiency, temperature, and CO₂ concentration, which affect the characteristics and, in turn, the nutrient absorption and utilization of fine roots. However, despite its important role in plant nutrition, the senescence mechanism of fine roots is still unclear. As a bamboo species with high yield and efficiency, based on excellent regeneration of its shoots, *Phyllostachys violascens* is typically affected by frequent and severe artificial disturbance. Although mulching management is commonly employed in *P. violascens* plantations, in some plantations the practice of mulching and fertilization under intensive cultivation management has seriously affected the health of *P. violascens* stands. The present study was conducted in order to elucidate the mechanism underlying the deleterious effects of mulching on *P. violascens* stands and to provide theoretical

基金项目:国家林业局林业科学技术推广项目([2011]02 号);浙江省林业科技推广项目(2011B01);浙江省农业科技成果转化项目(2012T201-03)

收稿日期:2013-11-30; 网络出版日期:2014-11-03

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

guidance for the regeneration of degraded bamboo stands. We determined the N, P, K, Mg, Ca, and Fe concentrations in the rhizome and the first and second rhizome roots of *P. violascens* plants subjected to three different treatments: respite mulching (mulched for 3 years and rested for 3 years), long-term mulching (6 years continuous mulching), and no mulching (CK). The results showed that, in all stands, N, P, K, Mg, Ca, and Fe concentrations in the first roots were significantly higher than those in the second roots. Furthermore, there was an obvious internal cycling of N, P, K, and Mg in the first and second roots, and the internal cycling rate of these nutrients in the first roots was significantly higher than that in the second roots. For Fe and Ca, however, there was no significant internal cycling. With an increase in the length of the trial, there was a decrease in the concentrations of N, P, K, and Mg and a decrease in the retranslocation rates of these nutrients in the first roots. In the second roots, there were initial increases in the concentrations and retranslocation of these nutrients, but these subsequently declined. Compared with CK, respite mulching led to significant increases in N, P, K, and Ca concentrations, P, K, and Mg retranslocation rates, N, P, and K migration, and P and K internal cycling rates in the first and second roots. Respite mulching also resulted in significant increases in the concentration and migration of Mg in the first roots, and in the retranslocation rate of N and the internal cycling rate of Mg in the second roots. Furthermore, long-term mulching led to a significant increase in N and K concentrations and N migration in the first roots, and in the N concentration and internal cycling rate in the second roots. In contrast, long-term mulching resulted in significant decline in P, K, and Mg migration in the first roots and in N, P, and Mg migration in the second roots, and in P and Mg retranslocation rates and P, K, and Mg internal cycling rates in the first and second roots. Thus, it can be concluded that there was an obvious internal cycling of N, P, K, and Mg in the first and second rhizome roots of *P. violascens*, and that the first roots made a larger contribution to nutrient cycling. Moreover, whereas respite mulching proved to be beneficial for internal nutrient cycling, long-term mulching hindered the absorption of nutrients, and reduced internal cycling, which was detrimental to the growth and regeneration of *P. violascens*.

Key Words: *Phyllostachys violascens*; mulched stand; rhizome root; nutrient internal cycling; nutrient retranslocation

养分内循环是植物体内器官或组织之间进行的养分交换^[1]。大量研究表明,衰老的叶片在凋落前会将 N、P、K 等养分元素转移到植物其他组织^[2-4],这不仅可以降低植物对土壤养分可利用性波动的影响,而且能减少凋落物分解时的养分淋溶量,从而减缓养分从整个系统中的损失,降低植物对环境养分供应的依赖,是植物保持营养最重要的策略之一,也是植物适应养分贫乏环境的重要机制^[5-6]。根系是控制植物与其周围环境进行能量和物质分配的关键器官之一,具有吸收、传输、固定与支撑等功能,其中吸收功能尤为重要。但对于根系,尤其是寿命短、周转快的细根(直径<2 mm)在衰老过程中是否存在养分内循环,一直以来颇有争议^[1,7-12]。在根系统中,尽管细根所占的生物量并不大,但细根获取的土壤资源在生物圈的能量和物质流动中起着十分重要的作用^[13]。因此,植物细根的养分内循环对提高植物养分利用效率的意义尤为重要。此外,细根对环境胁迫十分敏感,土壤养分和水分有效性、温度、CO₂浓度等都会对植物细根特性产生影响^[14-15],进而影响细根对养分的吸收利用。因此,研究不同生境条件下植物细根的养分动态变化,探讨细根养分内循环及其对环境变化的响应具有重要的意义。

雷竹是一种优良的笋用竹种,具有出笋早、产量高、笋味鲜美等特点,广泛分布在中国长江以南广大地区。自上世纪 90 年代以来,以重施肥和冬季地表覆盖增温为核心的竹笋早出高效栽培技术,在生产中得到大面积推广应用,显著提高了竹笋产量和经济效益。但长期林地覆盖经营会造成竹鞭明显上浮,竹子开花增多,病虫害发生严重^[16],土壤养分失衡、酶活性异常、重金属含量增加等一系列的负面效应^[17-18],严重影响雷竹林的可持续经营。林地覆盖经营对雷竹林土壤性状和环境及竹子生长的影响,也势必会影响到雷竹鞭根对养分的吸收利用。目前从鞭根养分内循环来探讨林地覆盖经营雷竹林退化机理的研究还未见有报道。本试验以不同林地覆盖经营年限雷竹林为对象,对雷竹竹鞭及鞭根 N、P、K、Mg、Ca 和 Fe 养分浓度进行测定,试图探明雷竹

鞭根是否存在养分内循环及其对林地覆盖经营的响应规律,这对于揭示林地覆盖经营雷竹林退化机理,指导退化雷竹林恢复具有重要的科学价值和生产指导意义。

1 研究区概况

试验地位于浙江省临安市太湖源镇(119°37' E, 30°20' N),属中亚热带季风气候,年降水量 1250—1600 mm,年平均气温 15.4 °C,年平均无霜期 235 d,年日照时数 1850—1950 h,土壤为红壤。试验区属临安市雷竹重点产区,全镇有雷竹林面积 0.4 万 hm^2 ,是雷竹林地覆盖高效经营技术推广最早、面积最大的乡镇。雷竹林地覆盖方法为:11 月中下旬用稻草、苍糠或竹叶进行地表覆盖,覆盖前先将林地浇透水,后铺设稻草 10 cm 左右(增温层),再铺上苍糠或竹叶 20—30 cm 左右(保温层),至翌年 3 月份自然出笋时将覆盖物清除出林外。雷竹林除正常的留笋养竹、伐竹和林地垦复等措施外,每年施 3 次肥,施肥时间分别为 5 月、9 月和 11 月,每次施肥量为无机复合肥($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=16:16:16$) $0.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和尿素(含 N 46%) $0.375 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,或施养分含量基本相同的有机肥。

2 材料与方法

2.1 试验雷竹林选择

2013 年 6 月在试验区雷竹林中,分别选择休养式覆盖(覆盖 3 年后休养 3 年,2007—2009 年连续覆盖,2010—2012 年不覆盖)、长期覆盖(连续覆盖 6 年,2007—2012 年连续覆盖)和不覆盖雷竹林(CK)各 3 块,每块雷竹林面积不小于 0.1 hm^2 ,之间有道路或深 30 cm 以上的沟隔离。试验雷竹林栽植前均为种植水稻的农业耕作地,土地平整,雷竹栽植时立地条件一致,栽植年限接近,均是在 20 世纪 90 年代后期发展起来的。试验林林分结构和土壤化学状况见表 1。

表 1 试验林林分结构和土壤化学性状

Table 1 General situation of stand structures and soil nutrient content and pH in *Phyllostachys violascens* forest under different mulching management years

试验林 Experimental forest	林分结构 Stand structures			土壤化学性状 Soil nutrient content and pH			
	立竹密度 Stand density/ (万株/ hm^2)	立竹胸径 DBH/cm	立竹年龄结构 3 a; 2 a; 1 a Age structure	全氮 Total N/ (mg/kg)	全磷 Total P/ (mg/kg)	全钾 Total K/ (mg/kg)	pH
长期覆盖经营雷竹林 Long-term mulching stand	1.67	3.63	1;0.72;0.69	1.81	0.82	7.67	3.27
休养式覆盖经营雷竹林 Respite-mulching stand	1.86	4.19	1;0.96;1.01	1.89	0.79	8.45	3.52
不覆盖雷竹林 Non mulching stand	1.2	4.53	1;0.68;0.61	1.55	0.54	7.75	3.72

3a;2a;1a 表示 3 年生、2 年生、1 年生立竹株数的比例

2.2 试验方法

将内径 9.5 cm、长 22 cm 的黑色塑料瓶,沿瓶子立体对角线方向划开,待用。在每块试验雷竹林中随机选取鞭径($1.62 \pm 0.05 \text{ cm}$)大小基本一致,生长良好的壮龄鞭(2 年生竹鞭,颜色深黄色,有光泽,鞭根多),竹鞭为去鞭方向。用木刀轻轻去除表层土壤,将距竹鞭左右 15 cm 区域的泥土挖去,用木刀将竹鞭下部的土壤慢慢挖出,露出整个竹鞭,用刷子轻轻刷去附着在竹鞭和鞭根上的泥土,用事先准备好的黑色塑料瓶将竹鞭小心套住,沿瓶子外周用胶带缠绕,裂缝处用玻璃胶密封,待胶水凝固后,将塑料瓶重新埋回原地土壤中,并在旁边插上标签。每块试验林 8 个重复,每种林地覆盖经营年限试验林 24 个重复,共 72 个重复。将细根置于独立空间,既保证细根连体死亡过程中能正常呼吸,又使其无法接触土壤微生物和水,避免了衰老过程中根的分解对

养分内循环的影响^[19]。从试验当天开始,每间隔 7 d 在每块试验林中挖取 2 个黑色塑料瓶中的竹鞭,每种林地覆盖经营年限试验雷竹林获得 6 个竹鞭,根据试验中细根衰老状态共采集 4 次(2013-06-12,2013-06-19,2013-06-26,2013-07-03),竹鞭采集后装入自制便携式冰箱立即带回实验室,用去离子水清洗干净,参照 Pregitzer 等^[20]的根序分级方法及鞭根的生长状态,将直接生长在竹鞭上的根归为 2 级根(根径 0.5—2.0 mm),生长在 2 级根上的为 1 级根(根径 < 0.5 mm),分级后的鞭根连同竹鞭在 80℃ 烘箱中烘干至恒重,过 100 目(0.15 mm 孔径)筛后,分别用凯氏定 N 法、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定各级根和竹鞭中 N、P、K 的浓度,用原子吸收分光光度法测定 Mg、Ca 和 Fe 的浓度^[21]。

$$1 \text{ 级根养分内循环率}(\%) = \frac{1 \text{ 级根期初浓度} - 1 \text{ 级根期末浓度}}{1 \text{ 级根期初浓度}} \times 100\%$$

$$2 \text{ 级根养分内循环率}(\%) = \left[\frac{\frac{2 \text{ 级根期初与期末养分浓度变化量} + (\text{竹鞭期末养分浓度} - \text{期初养分浓度})}{2 \text{ 级根期初养分浓度}} - \frac{1 \text{ 级根期初养分浓度} - 1 \text{ 级根期末养分浓度}}{2 \text{ 级根期初养分浓度}} \right] \times 100\%$$

$$1 \text{ 级根养分迁移速率}(\text{mg/d}) = \frac{1 \text{ 级根前次取样养分浓度} - 1 \text{ 级根后一次取样养分浓度}}{\text{取样间隔时间}}$$

$$2 \text{ 级根养分迁移速率}(\text{mg/d}) = \left[\frac{2 \text{ 级根相邻两次取样浓度变化量}}{\text{取样间隔时间}} + \frac{\text{竹鞭后一次取样养分浓度} - \text{前次取样养分浓度}}{\text{取样间隔时间}} - \frac{1 \text{ 级根前次取样养分浓度} - 1 \text{ 级根后一次取样养分浓度}}{\text{取样间隔时间}} \right]$$

式中,期初浓度——2013-06-12 取样养分浓度;期末浓度——2013-07-03 取样养分浓度。

2.3 数据分析

试验数据在 Excel 2003 统计软件中进行整理。不同覆盖经营年限雷竹林竹鞭养分浓度和各级根养分浓度、迁移速率、内循环率比较在 SPSS 10.0 统计软件中进行,采用单因素(One-way)方差分析。试验数据均表示为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 林地覆盖经营对雷竹竹鞭和鞭根养分浓度的影响

3.1.1 试验雷竹林期初竹鞭和不同根序鞭根养分浓度比较

如表 2 所示,试验期初,除不覆盖雷竹林 1 级根 P、Ca 浓度和长期覆盖经营雷竹林 1 级根 Ca 浓度与 2 级根中对应养分浓度差异不显著外,各试验雷竹林 1 级根其它养分浓度均显著高于 2 级根。不覆盖雷竹林 1 级根 N 浓度和各试验雷竹林 1 级根 K、Mg、Ca、Fe 浓度均显著高于竹鞭中对应养分浓度;不覆盖雷竹林 2 级根 Mg、Fe 浓度和休养式覆盖经营雷竹林 2 级根 K、Fe 浓度及长期覆盖经营雷竹林 2 级根 Ca、Fe 浓度均高于竹鞭中对应养分浓度。休养式覆盖经营雷竹林 2 级根 N、P 浓度和长期覆盖经营雷竹林 2 级根 P 浓度均低于竹鞭中对应养分浓度。

3.1.2 试验雷竹林竹鞭和鞭根养分浓度变化

与对照雷竹林相比,休养式覆盖经营能显著提高雷竹 1 级根和竹鞭 N、P、K、Mg、Ca 浓度和 2 级根 N、P、K、Ca 浓度,对竹鞭、鞭根 Fe 浓度无显著影响;长期林地覆盖经营显著提高了雷竹 1 级根、竹鞭 N、K 浓度和 2 级根 N 浓度,而显著降低了 1 级根 Mg 浓度和 2 级根 P、Fe 浓度及竹鞭 Ca 浓度,对竹鞭、鞭根中其它养分浓度无显著影响。

试验结果表明林地覆盖经营对雷竹林竹鞭和鞭根的养分浓度均会产生一定的影响,休养式林地覆盖经营

总体上提高了竹鞭和鞭根中 N、P、K、Mg 和 Ca 浓度,而长期林地覆盖经营阻碍了鞭根系对养分的平衡吸收。

3.2 林地覆盖经营对雷竹鞭根养分迁移的影响

3.2.1 林地覆盖经营对雷竹鞭根养分迁移量的影响

从表 2 可以看出,竹鞭装入黑色塑料瓶后,不覆盖、休养式和长期覆盖经营雷竹林,1 级根 N、P、K、Mg 浓度在时间序列上均表现为持续下降,期末浓度与期初浓度相比,N 分别减少 18.37%、17.72%和 20.04%,P 分别减少 37.72%、41.07%和 30.77%,K 分别减少 56.31%、61.67%和 41.50%,Mg 分别减少 13.19%、14.57%和 8.80%,Ca 浓度变化不明显。Fe 浓度表现为富集过程,期末浓度与期初浓度相比,Fe 分别增加 12.22%、13.02%和 16.59%。

表 2 不同林地覆盖经营年限雷竹林竹鞭和鞭根养分浓度 (mg/g)

Table 2 Nutrient concentrations of rhizome and different root order under different mulching management years (mg/g)

试验林 Experimental forest	竹鞭、鞭根 Rhizome, rhizome roots	取样日期 Sampling date	N	P	K	Mg	Ca	Fe
不覆盖雷竹林 Non mulching stand	1 级根	2013-06-12	11.16±0.37b a	1.14±0.05b a	7.21±0.82b a	1.44±0.16a a	1.42±0.08b a	2.21±0.14a a
		2013-06-19	9.55±0.66b a	0.85±0.09b ab	4.01±0.34b b	1.31±0.08ab a	1.51±0.13b a	2.16±0.09a a
		2013-06-26	9.31±0.58b a	0.76±0.09b ab	3.27±0.37b c	1.29±0.12a a	1.45±0.11b a	2.14±0.03ab a
		2013-07-03	9.11±0.89b ab	0.71±0.05b b	3.15±0.35b c	1.25±0.14a a	1.47±0.16bc a	2.48±0.23a a
	2 级根	2013-06-12	7.41±0.46c b	0.91±0.07b a	4.62±0.30b b	0.74±0.08a b	1.28±0.10ba ab	1.21±0.13a b
		2013-06-19	8.80±0.46b b	1.17±0.08b a	6.88±0.71b a	0.60±0.03b b	1.33±0.07a ab	1.32±0.05a b
		2013-06-26	10.11±1.20c a	0.62±0.04b ab	5.80±0.42b ab	0.75±0.08a b	1.25±0.14b ab	1.19±0.10a b
		2013-07-03	9.12±0.87c ab	0.75±0.05b b	6.10±0.48a b	0.62±0.04a b	1.27±0.11a b	1.25±0.07a b
	竹鞭	2013-06-12	8.15±0.91b b	0.99±0.06c a	4.26±0.67b b	0.39±0.04b c	0.92±0.08a b	0.13±0.02a c
		2013-06-19	9.34±0.57b a	1.14±0.08b a	6.10±0.74b a	0.47±0.04b b	0.92±0.10a b	0.11±0.01a c
		2013-06-26	9.70±0.68b a	1.21±0.14c a	6.82±0.52b a	0.49±0.03b c	0.87±0.04ab b	0.12±0.02a c
		2013-07-03	9.74±0.91c a	1.28±0.16c a	7.50±0.82b a	0.52±0.04b b	0.88±0.05a c	0.17±0.02a c
休养式覆盖经营雷竹林 Respite-mulching stand	1 级根	2013-06-12	14.11±1.11a a	1.68±0.13a a	11.35±0.79a a	1.51±0.13a a	2.02±0.19a a	2.15±0.17a a
		2013-06-19	12.53±0.73a a	1.33±0.11a ab	7.39±0.81a b	1.37±0.15a a	1.92±0.21a a	2.39±0.21a a
		2013-06-26	12.15±1.34a a	1.05±0.14a b	4.75±0.52a c	1.32±0.11a a	1.96±0.18a a	2.44±0.25a a
		2013-07-03	11.61±0.94ab ab	0.99±0.12ab b	4.35±0.33a bc	1.29±0.15a a	2.05±0.23a a	2.43±0.06a a
	2 级根	2013-06-12	9.50±0.13b b	1.43±0.95a b	9.07±0.52a b	0.73±0.03a b	1.40±0.16a b	1.18±0.08a b
		2013-06-19	11.84±1.23a a	1.89±0.79a a	10.87±1.17a a	0.87±0.09a b	1.35±0.04a ab	1.25±0.09a a
		2013-06-26	12.66±1.41b a	1.28±0.10a b	7.41±0.91a b	0.58±0.04b b	1.39±0.08a b	1.22±0.13a b
		2013-07-03	11.53±0.78b ab	1.00±0.08a b	6.13±0.66a b	0.61±0.06a b	1.30±0.07a b	1.20±0.07a b
	竹鞭	2013-06-12	11.11±0.90a a	1.80±0.16a a	5.11±0.33a c	0.62±0.04a b	0.90±0.07a bc	0.14±0.01a c
		2013-06-19	11.63±1.12ab a	1.92±0.21a a	7.99±0.68a b	0.69±0.08a b	0.97±0.06a b	0.16±0.02a c
		2013-06-26	12.78±1.41ab a	2.31±0.27a a	9.69±1.02a a	0.70±0.05a b	0.96±0.05a c	0.15±0.01a c
		2013-07-03	13.03±1.25b a	2.41±0.18a a	10.63±1.14a a	0.80±0.05a b	0.91±0.03a c	0.17±0.02a c
长期覆盖经营雷竹林 Long-term mulching stand	1 级根	2013-06-12	15.12±1.35a a	1.04±0.07bc ab	8.41±0.73ab a	1.25±0.16b a	1.48±0.07b a	2.05±0.16a a
		2013-06-19	13.53±1.35a ab	0.81±0.06b b	5.77±0.64b b	1.18±0.13b a	1.63±0.05b a	2.10±0.18a a
		2013-06-26	12.73±1.22a b	0.78±0.09b b	5.2±0.63a b	1.15±0.10ab a	1.52±0.14b a	2.36±0.22a a
		2013-07-03	12.09±1.18a b	0.72±0.05b b	4.92±0.34a b	1.14±0.07ab a	1.61±0.12b a	2.39±0.07a a
	2 级根	2013-06-12	11.32±0.89a b	0.71±0.05c b	5.24±0.60b b	0.73±0.09a b	1.28±0.08b ab	1.09±0.06ab b
		2013-06-19	12.58±1.33a b	0.94±0.13bc b	7.53±0.45b a	0.80±0.09a ab	1.33±0.07a b	1.15±0.13b b

续表

试验林 Experimental forest	竹鞭、鞭根 Rhizome, rhizome roots	取样日期 Sampling date	N	P	K	Mg	Ca	Fe
		2013-06-26	14.14±1.51a a	0.72±0.08b b	6.42±0.55ab ab	0.65±0.07ab b	1.29±0.10b ab	1.11±0.05a b
		2013-07-03	13.67±1.27a b	0.83±0.04b b	6.68±0.72a a	0.66±0.06a b	1.31±0.06a b	1.03±0.06b b
	竹鞭	2013-06-12	13.12±1.17a ab	1.44±0.09b a	5.42±0.45a b	0.45±0.04b b	0.79±0.02b c	0.09±0.01a c
		2013-06-19	14.23±1.24a a	1.62±0.14a a	6.62±0.71b ab	0.48±0.03b b	0.88±0.04ab c	0.08±0.01a c
		2013-06-26	15.31±1.44a a	1.72±0.13b a	7.16±0.51b a	0.49±0.05b b	0.75±0.03c b	0.10±0.01a c
		2013-07-03	16.30±1.38a a	1.76±0.16b a	7.90±0.83b a	0.51±0.04b b	0.79±0.05b c	0.10±0.01ab c

前面字母表示不同林地覆盖经营年限雷竹林相同取样时间同级根、竹鞭间比较,后面字母表示相同林地覆盖经营年限雷竹林相同取样时间不同级根、竹鞭间比较。相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$),不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

不覆盖、休养式和长期覆盖经营雷竹林,2级根中N、P、K、Mg浓度总体上呈先增加后减少的变化趋势,养分浓度峰值出现于第2次或第3次取样,期末浓度与期初浓度相比,N分别增加23.08%、21.37%和20.76%,P分别减少17.58%、30.07%和-15.49%,K浓度分别减少-32.03%、32.41%和-27.48%,Mg分别减少16.22%、16.44%和9.59%,Ca、Fe浓度变化均不明显。

不覆盖、休养式和长期覆盖经营雷竹林,竹鞭中N、P、K、Mg浓度的变化趋势一致,均随取样时间的推迟而升高,期末浓度与期初浓度相比,N分别增加19.51%、17.28%和24.24%,P分别增加29.30%、33.89%和22.22%,K分别增加76.06%、108.02%和45.76%,Mg分别增加28.21%、29.03%和13.33%,Ca、Fe浓度变化均不明显。

上述研究结果表明雷竹1级根和2级根中均存在N、P、K、Mg的养分内循环,而Ca、Fe内循环不明显。林地覆盖经营对雷竹鞭根N、P、K、Mg的迁移量会产生一定的影响。与对照雷竹林相比,休养式林地覆盖经营总体上提高了1级根N、P、K、Mg和2级根P、K、Mg的迁移量,长期林地覆盖经营虽提高了1级根N的迁移量,但降低了1级根P、K、Mg和2级根N、P、Mg的迁移量。

3.2.2 林地覆盖经营对雷竹鞭根养分迁移速率的影响

由表3可以看出,各试验雷竹林,1级根和2级根N、P、K、Mg的养分迁移速率均为K、N最高,P次之,Mg最小,并且1级根N、P、K、Mg的养分迁移速率在第2次取样时总体上显著高于2级根,而在第3次、第4次取样时显著低于2级根。随着试验时间的推延,各试验雷竹林鞭根N、P、K、Mg的养分迁移速率1级根均逐渐降低,2级根均为先升高后降低。

与对照雷竹林相比,试验期间,休养式林地覆盖经营总体上显著提高了雷竹1级根P、K、Mg和2级根N、P、K、Mg的养分迁移速率;长期林地覆盖经营显著提高了雷竹1级根和2级根N的养分迁移速率,显著降低了1级根和2级根P、Mg的养分迁移速率,对K的养分迁移速率影响不显著。试验结果表明林地覆盖经营对雷竹鞭根的养分迁移速率有一定的影响,总体上,休养式覆盖经营雷竹林鞭根的养分迁移速率提高,而长期覆盖经营雷竹林降低,而且不同级根在不同时间段的养分迁移速率存在差异。

3.3 林地覆盖经营对雷竹鞭根养分内循环率的影响

由表4可以看出,各试验雷竹林1级根中K的内循环率最大,P次之,N、Mg最小;2级根,不覆盖雷竹林为P最大,N、K次之,Mg最小,休养式覆盖经营雷竹林为 $P>K>N>Mg$,长期覆盖经营雷竹林为 $N>P>K>Mg$ 。相同林地覆盖经营年限雷竹林鞭根N、P、K、Mg的养分内循环率总体上为1级根显著高于2级根。

与对照雷竹林相比,休养式林地覆盖经营显著提高了雷竹1级根P、K和2级根P、K、Mg的养分内循环率,对1级根、2级根N的养分内循环率并没有明显影响;长期林地覆盖经营虽显著提高了雷竹1级根、2级根N的养分内循环率,但显著降低了1级根和2级根P、K、Mg的养分内循环率。试验结果表明林地覆盖经营对雷竹鞭根的养分内循环有一定的影响,其中,休养式林地覆盖经营提高了雷竹鞭根P、K、Mg的养分内循环率,

而长期林地覆盖经营雷竹林相反。

表 3 不同林地覆盖经营年限雷竹林鞭根养分迁移速率 (mg/天)

Table 3 Nutrient retranslocation rate of rhizome root under different mulching management years (mg/d)

养分元素 Nutrient elements	取样次数 Sampling times	1 级根 first roots			2 级根 second roots		
		不覆盖雷竹林 Non mulching stand	休养式覆盖经营雷竹林 Respite-mulching stand	长期覆盖经营雷竹林 Long-term mulching stand	不覆盖雷竹林 Non mulching stand	休养式覆盖经营雷竹林 Respite-mulching stand	长期覆盖经营雷竹林 Long-term mulching stand
N	第 2 次	230.00±21.35a a	225.71±24.64a a	227.14±19.86a a	138.57±12.45b b	182.86±16.62a b	111.43±9.41b b
	第 3 次	34.29±3.66b b	54.29±3.56b b	114.29±10.31a b	204.29±12.56b a	227.14±20.45a a	248.57±15.78a a
	第 4 次	28.57±2.51b b	77.14±5.43ab b	91.43±7.68a ab	118.57±12.21a a	120.00±10.56a a	117.14±10.53a a
P	第 2 次	41.43±2.11b a	50±3.77a a	32.86±1.75c a	32.86±2.46a ab	32.86±4.10a b	25.71±1.89b a b
	第 3 次	12.86±0.88b b	40±2.58a b	4.29±0.44c b	75.71±8.06b a	102.86±9.65a a	41.43±3.93c a
	第 4 次	7.14±0.56b b	8.57±0.64a b	8.57±0.92a b	21.42±1.35b a	45.72±5.11a a	12.86±1.04c a
K	第 2 次	457.14±34.22b a	565.71±43.54a a	377.14±26.87c a	128.57±13.62a b	102.86±8.73ab b	121.43±7.59a b
	第 3 次	105.71±9.46b ab	377.14±23.52a a	81.43±4.37bc b	151.43±11.76b a	360.00±30.74a a	154.29±11.42b a
	第 4 次	17.14±1.66b b	57.14±6.23a b	40.00±2.35ab b	122.86±10.57b a	260.00±24.38a a	102.86±9.75bc a
Mg	第 2 次	18.57±2.00ab a	20.00±1.82a a	10.00±1.24c a	12.86±1.41a ab	10.00±1.14a b	4.29±0.37b b
	第 3 次	2.86±0.34bc b	7.14±0.83a b	4.29±0.37b b	21.43±1.66b a	35.71±2.78a a	18.57±1.94c a
	第 4 次	5.71±0.47a b	4.29±0.51a b	1.43±0.18b ab	17.14±1.54a a	14.29±1.56a a	2.86±0.31b a

前面字母表示不同林地覆盖经营年限雷竹林相同取样时间同级根间比较,后面字母表示相同林地覆盖经营年限雷竹林相同取样时间不同级根间比较。相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$),不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

表 4 不同林地覆盖经营年限雷竹林鞭根养分内循环率 (%)

Table 4 Nutrient internal cycling rate of different root order under different mulching management years (%)

鞭根 Rhizome roots	试验林 Experimental forest	N	P	K	Mg
1 级根 First roots	不覆盖雷竹林	18.37±0.56ab a	37.72±1.45b a	56.31±3.76b a	13.89±1.04a a
	休养式覆盖经营雷竹林	17.72±0.89b a	41.07±2.11a a	61.67±3.16a a	14.57±1.89a a
	长期覆盖经营雷竹林	19.38±1.21a a	30.77±0.78c a	41.50±2.33c a	8.80±1.02b a
2 级根 Second roots	不覆盖雷竹林	15.52±0.55b b	21.98±1.23b b	14.29±1.32b b	8.11±0.69b b
	休养式覆盖经营雷竹林	15.26±1.11b b	24.48±2.63a b	19.51±2.13a b	10.96±1.46a b
	长期覆盖经营雷竹林	22.08±0.63a a	16.90±1.02c b	8.21±0.63c b	2.74±0.11c b

前面字母表示不同林地覆盖经营年限雷竹林同级根间比较,后面字母表示相同林地覆盖经营年限雷竹林不同级根间比较;相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$),不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

4 结论与讨论

植物细根养分内循环的研究已开展了 20 多年,而关于养分内循环的机制至今仍没有定论,目前多数的研究者认为,养分内循环是植株为适应贫瘠环境而提高养分循环利用率的一种自我保护机制^[5,6],但也有研究者认为这只不过是大多数植物的一个特征而已^[22-23]。且已开展的细根养分内循环的研究多数是采用比较活细根和死细根养分浓度的方法进行的,因此其结果会受细根分解的影响,所得结论的可靠性还值得商榷^[1,12]。本研究将细根置于独立空间,避免了衰老过程中根分解对养分内循环的影响。结果表明,各试验雷竹林鞭根 N、P、K、Mg、Ca、Fe 浓度总体上为 1 级根高于 2 级根(表 2),这与 Guo 等^[24]对长叶松(*Pinus palustris*)细根的研究结果相似,这种养分分配格局与根的生理代谢活动强弱有关,通常生理代谢活动旺盛的组织(如根尖、叶片、形成层等)的养分浓度最高^[25]。立竹 1 级根较高的 N、P、K、Mg 养分内循环率与其较高的养分浓度相一致,说明根与叶片养分内循环的机制相同,即养分浓度是影响养分内吸收率的重要因素^[26-27],较高的养分浓

度是养分的内吸收率较高的结果^[28],也说明 1 级根对根系养分内循环的贡献较大。此外,据对树木叶子的研究表明,叶片保留的时间长度与内循环强度成反比^[29],因此,细根养分内循环可能与细根寿命也密切相关,而一级细根寿命较短,较高根序细根寿命较长^[20,30]。细根养分内循环与细根寿命及养分浓度的密切关系,表明细根根序等级可能是衡量细根养分内循环的重要依据。各试验雷竹林不同级根 N、P、K、Mg 的迁移速率及内循环率存在很大差异,这主要与养分元素自身的移动性强弱有关,而 Ca、Fe 不存在明显的内循环,可能与 Ca、Fe 在植物体内是以稳定化合物的形式存在的,移动性较差的特性有关^[12]。

关于养分有效性水平对再吸收效率影响,多数研究结果支持养分再吸收是植物对高或低养分有效性的一种适应机制^[5-6,31]。随覆盖经营年限的延长,细根 P、Mg 养分内循环率均随细根养分浓度的减少而降低,再次表明细根较高的养分浓度是其养分内吸收率较高的结果^[28]。长期覆盖经营雷竹林虽土壤养分含量丰富,但土壤酸化严重、重金属含量增加促进元素间的拮抗络合作用、根系活力减弱^[18,32]等抑制了根系养分的内循环,也说明养分内循环不仅是植物对高或低养分有效性的一种适应,也是植物对养分状况差异的一种表现型反应^[33]。此外,也有学者认为影响植物养分迁移的主要原因并不是土壤肥力及植物本身的养分状态,而是植物养分转移中的“源”与“库”的关系^[22],加强“库”或减弱“源”都能提高养分的内迁移效率^[34]。休养式林地覆盖经营雷竹林提高了 1 级根 P、K 和 2 级根 P、K、Mg 的养分内循环率,这与土壤理化性质良好,增强了根系活力,立竹吸收水分和养分的能力及光合作用增强,加大了对地下部分 C 的输入,延长了细根寿命^[35-36],从而使养分转移中的“源”减弱,“库”增强。而长期覆盖经营雷竹林土壤劣变严重,增加了土壤还原性微生物、厌气性微生物数量^[37],致使大量的病原菌、根腐菌破坏细根的结构,减少细根碳水化合物化合物的储存,再加上细根由于进行无氧呼吸会代谢掉大量的碳水化合物,最终使活细根活力下降,衰老增快^[38],致使养分转移中有较强的“源”和较弱的“库”,造成鞭根 P、Mg 迁移速率及 P、K、Mg 的内循环率的降低。这说明此时细根养分转移主要受养分转移中源库关系控制,而不是单个细根的生命,也说明控制细根养分转移的主导因素会因环境条件的改变而发生变化。

雷竹鞭根中存在 N、P、K、Mg 的养分内循环,Fe、Ca 内循环不明显。不同覆盖经营年限雷竹林总体上 1 级根养分浓度和养分内循环率显著高于 2 级根。1 级根养分迁移速率随时间推延而降低,2 级根表现出先升高后降低的趋势。林地覆盖经营对雷竹鞭根的养分浓度、迁移量、迁移速率和内循环率均会产生一定的影响,休养式林地覆盖经营总体上提高了雷竹鞭根养分浓度、迁移速率和内循环率,增强了根系养分内循环,而长期林地覆盖经营虽提高了雷竹鞭根部分养分浓度,但总体上降低了根系的养分内循环率和迁移速率,减弱了根系养分内循环。休养式林地覆盖经营利于雷竹林对养分的循环利用,长期覆盖经营阻碍了根系对养分的平衡吸收和内循环,不利于雷竹的生长更新。

参考文献 (References):

- [1] 黄石竹, 张彦东, 王政权. 树木细根养分内循环. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1395-1399.
- [2] 安卓, 牛得草, 文海燕, 杨益, 张洪荣, 傅华. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及 C: N: P 化学计量特性的影响. 植物生态学报, 2011, 35(8): 801-807.
- [3] 刘波, 王力华, 阴黎明, 毛沂新. 两种林龄冠果叶 N、P、K 的季节变化及再吸收特征. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1270-1276.
- [4] 曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 赵琼, 冀小燕. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率. 林业科学, 2005, 41(5): 21-27.
- [5] May J D, Killingbeck K T. Effects of preventing nutrient resorption on plant fitness and foliar nutrient dynamics. Ecology, 1992, 73(5): 1868-1878.
- [6] 薛立, 徐燕, 吴敏, 李燕. 4 种阔叶树种叶中氮和磷的季节动态及其转移. 生态学报, 2005, 25(3): 520-526.
- [7] 廖利平, 高洪, 于小军, 韩士杰. 人工混交林中杉木、桉木和刺楸细根养分迁移的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(2): 161-164.
- [8] 齐泽民, 王开运. 密度对缺苞箭竹凋落物养分归还及养分利用效率的影响. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2025-2029.
- [9] Ritz K, Newman E I. Evidence for rapid cycling of phosphorus from dying roots to living plants. Oikos, 1985, 45(2): 174-180.
- [10] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots. Ecology, 2000, 81(1): 275-280.
- [11] Vogt K A, Vogt D J, Ashbjomsen H, Dahlgren R A. Roots, nutrients and their relationship to spatial patterns. Plant and Soil, 1995, 168-169: 113-

123.

- [12] Nambiar E K S. Do nutrients retranslocate from fine roots. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(8): 913-918.
- [13] Aerts R, Bakker C, De Caluwe H. Root turnover as determinant of the cycling of C, N, and P in a dry heathland ecosystem. *Biogeochemistry*, 1992, 15(3): 175-190.
- [14] 张小全. 环境因子对树木细根生物量、生产与周转的影响. *林业科学研究*, 2001, 14(5): 566-573.
- [15] 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.
- [16] 周国模, 金爱武, 郑炳松, 方伟浩, 余伟朵. 雷竹保护地栽培林分立竹结构的初步研究. *浙江林学院学报*, 1998, 15(2): 111-115.
- [17] 姜培坤, 叶正钱, 徐秋芳. 高效栽培雷竹林地土壤重金属含量的分析研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 61-63.
- [18] 孙晓, 庄舜尧, 刘国群, 李国栋, 桂仁意, 何钧潮. 集约经营下雷竹种植对土壤基本性质的影响. *土壤*, 2009, 41(5): 784-789.
- [19] 吴勇, 李贤伟, 荣丽, 刘语欣, 罗艺霖. 柳杉细根衰老过程中的养分内循环. *林业科学*, 2010, 46(2): 1-5.
- [20] Pregitzer K S, DeForest J A, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] Nambiar E K S, Fife D N. Growth and nutrient retranslocation in needles of radiata pine in relation to nitrogen supply. *Annals of Botany*, 1987, 60(2): 147-156.
- [23] Nambiar E K S, Fife D N. Nutrient retranslocation in temperate conifers. *Tree Physiology*, 1991, 9(1/2): 185-207.
- [24] Guo D L, Mitchell R J, Hendricks J J. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in longleaf pine forest. *Oecologia*, 2004, 140(3): 450-457.
- [25] Farrar J F, Jones D L. The control of carbon acquisition by roots. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 43-53.
- [26] 高甲荣, 张东升, 肖斌, 牛健植. 黄土区油松人工林生态系统营养元素分配格局和积累的研究. *北京林业大学学报*, 2002, 24(1): 26-30.
- [27] 薛智德, 刘世海, 余新晓. 京北山区板栗林主要养分元素积累与分配的研究. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 37-40.
- [28] Nordell K O, Karlsson P S. Resorption of nitrogen and dry matter prior to leaf abscission: Variation among individuals, sites and years in the mountain birch. *Functional Ecology*, 1995, 9(2): 326-333.
- [29] 金明仕 J P. 森林生态学. 文剑平, 译. 北京: 中国林业出版社, 1987: 94-96.
- [30] 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.
- [31] 陈伏生, 胡小飞, 葛刚. 城市地被植物麦冬叶片氮磷化学计量比和养分再吸收效率. *草业学报*, 2007, 16(4): 47-54.
- [32] 胡超宗, 金爱武, 郑建新. 雷竹地下鞭的系统结构. *浙江林学院学报*, 1994, 11(3): 264-268.
- [33] Pugnaire F I, Chapin III F S. Controls over nutrient resorption from leaves of evergreen Mediterranean species. *Ecology*, 1993, 74(1): 124-129.
- [34] 邢雪荣, 韩兴国, 陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述. *应用生态学报*, 2000, 11(5): 785-790.
- [35] Bloomfield J, Vogt K A, Wargo P. Tree root turnover and senescence// *Plant Roots: the Hidden Half*. New York: Marcel Dekker, 1996: 363-381.
- [36] Hendricks J J, Nadelhoffer K J, Aber J D. A N^{15} tracer technique for assessing fine root production and mortality. *Oecologia*, 1997, 112(3): 300-304.
- [37] 袁娜. 覆盖雷竹林土壤生化性质及其变化动态. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [38] Steele S J, Gower S T, Vogel J G, Norman J M. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology*, 1997, 17(8-9): 577-587.