

中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段 土壤氮磷有效性

詹书侠, 陈伏生*, 胡小飞, 甘露, 朱友林

(南昌大学生命科学学院生物学基础实验中心, 南昌 330031)

摘要:在中亚热带典型丘陵红壤区选取裸露地、马尾松(*Pinus massoniana*)林地、针阔混交林地、常绿阔叶林地为研究对象,开展土壤氮(N)、磷(P)供应、有效性及其耦合过程的研究。结果表明,土壤有机C、全N、净矿化速率、中性磷酸酶活性表现为随森林演替进展呈现逐步提高的变化趋势;而土壤全P、C/N、C/P、氨化速率、硝化速率、树脂P、NaHCO₃-P、NaOH-P、声波P、酸性P、总有效P、酸性磷酸酶活性未表现出此趋势;但反映N、P有效供应的指标,除氨化速率、树脂P和酸性磷酸酶外,在常绿阔叶林中均为最高。相关分析表明大部分N、P供应指标之间存在显著相关性($P < 0.05$)。丘陵红壤区森林演替初级阶段P的限制性明显强于N,土壤N、P供应在森林演替进展过程中可以逐步得到优化而实现协调供应。以常绿阔叶林为中亚热带丘陵红壤区植被恢复的最终目标是可行和理想的。

关键词:土壤养分供应;PVC顶盖埋管法;Hedley磷分级法;森林演替;中亚热带地区

文章编号:1000-0933(2009)09-4673-08 中图分类号:Q142,Q948.1,S718.5 文献标识码:A

Soil nitrogen and phosphorus availability in forest ecosystems at different stages of succession in the central subtropical region

ZHAN Shu-Xia, CHEN Fu-Sheng*, HU Xiao-Fei, GAN Lu, ZHU You-Lin

Laboratory of Basic Biology, College of Life Sciences, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4673 ~ 4680.

Abstract: Soil nitrogen (N) and phosphorus (P) content and availability were examined in four ecosystems representing different stages of forest succession: bare hillside, Masson pine (*Pinus massoniana*) forest, conifer-broadleaf mixed forest and evergreen broad-leaved forest. All sites were located on the luvisols red soil in the central subtropical region. Soil nitrogen and phosphorus data were obtained by closed-top PVC tube incubation and Hedley P fractionation methods. The results indicated that soil organic carbon, total N, net N-mineralization rate and neutral phosphatase activity increased with the successional stages. Soil total P, C/N ratio, C/P ratio, ammonification rate, nitrification rate, resin P, NaHCO₃-P, NaOH-P, sonic P, acid P, total available P, and acidic phosphatase activity did not show distinct trends with successional stages. All soil nutrient measures except for ammonification rate, resin P and acidic phosphatase activity were greatest in the evergreen broad-leaved forest. Strong correlations ($P < 0.05$) were found among most of these measurements. In our study systems, P limitation to plant growth was stronger than N limitation at early successional stages and soil N and P availability were improved with forest successional development. Our data suggests that the evergreen broad-leaved forest shall be considered as the final purpose of vegetation restoration in central subtropical region.

Key Words: soil nutrient supply; closed-top PVC tube incubation method; Hedley P fractionation method; forest

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30600473);江西省自然科学基金资助项目(2007GQN1935);中国博士后基金资助项目(20070421040);江西省教育厅科学计划资助项目(GJJ08055)

收稿日期:2008-10-17; 修订日期:2009-03-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenfush@hotmail.com

succession; central subtropical region

地处中亚热带长江以南的大片丘陵地带,气候湿润温和,全年降水丰沛,淋溶作用强烈,发育成了具有独特性质的红壤。在此水热气候条件相对优势的地域内,如何重建和管理森林生态系统,充分发挥森林生态系统的服务功能是林学和生态学等领域学者关注的重大课题^[1]。森林演替理论是指导植被恢复的重要依据。而在本区域内,由于丘陵地形、降水丰富、地表植被缺少,养分流失严重,土壤有效营养成分、酶和微生物的活性都相当低^[2]。土壤养分缺乏成为植被恢复和森林管理首要面临的问题。因此,开展森林演替典型阶段土壤肥力动态变化规律的研究有助于提高植被恢复效率和森林管理水平。

土壤氮(N)和磷(P)是植物生长最重要的两种营养元素,其有效性对森林生产力和稳定性具有重要影响^[3]。N被认为是陆地生态系统最易耗竭和植物生长的关键限制性因子^[4],N有效性通常由其矿化速率所决定。因此,N矿化的研究是深入剖析N有效性最有效的手段。P是地质时代尺度上生物生产力的限制性养分元素^[5],土壤中95%~99%的P以难以利用的迟效状态存在,参与生物循环的P仅是土壤全P的很小部分,其含量由土壤内一系列的生物、物理、化学因素共同调节^[6]。由于红壤的特性,P对丘陵红壤区的植物生长影响更为明显^[7]。再加上P有效性研究方法的不成熟,研究体系的不完善,以Hedley的土壤P分级为基础,土壤P的功能分级成为森林土壤P转化及其有效性研究的新思路^[8]。

此外,土壤中N、P矿化与扩散速率差异巨大,容易造成植物根际土中可利用的营养元素不平衡^[9],从而导致营养吸收的抑制作用。有研究表明,在某些地区P的缺乏虽然没有影响植物正常生长,但却导致微生物的生长活动受到限制,影响土壤酶的分泌以及N矿化,从而限制了植物的生长^[10]。可见,养分元素之间的耦合过程及其响应机制非常重要。近些年来,生态化学计量学的发展,为更好地揭示N、P的耦合关系提供了新途径^[11]。

基于以上考虑,本文选取中亚热带典型丘陵红壤区森林演替阶段的林地为研究对象,开展土壤N、P贮量、供应过程、微生物调控及其耦合过程的研究,为研究区的植被恢复、生态建设和森林管理提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新建县位于江西省中部偏北,位于东经115°27′~116°35′,北纬28°09′~29°11′。气候湿润温和,属亚热带季风区,雨量充沛,四季分明,春秋短,夏季长。年平均气温17.5℃,年降雨量1600~1800 mm,年平均相对湿度为77%,年日照时间1900.5 h,年平均风速2.5 m·s⁻¹,年无霜期291 d。实验区风景优美,有大片常绿阔叶林、针阔混交林、马尾松(*Pinus massoniana*)林等林地,土壤类型为典型的中亚热带代表性红壤,且由于部分林地遭到人为破坏,有小面积水土流失严重的裸露山坡。

1.2 样地选择及其基本情况

土壤样品采自江西省南昌市郊新建县南昌大学前湖校区生态学教学基地。在研究区范围内,于2007年7月,在4种森林演替典型阶段,即受破坏形成的裸露山坡、马尾松林地、针阔混交林地、常绿阔叶林地内分别随机选取一块20 m×20 m的样地。参照生态学常规方法^[12]调查样地的基本情况(表1)。

1.3 土壤基本理化特性

在选定的样地中,将其分成4个10 m×10 m的小样方,于每块小样方中,随机地选取5点,分别用内径4 cm的土钻取0~15 cm土样,然后混合成一个样品,装入自封袋。照此,每块样地中获得4个混合的样地,所有样地共计16个样品,带回实验室。每个样品再次充分拌匀后,分成3份。其中一份用于土壤有机C、全N和全P的测定;另一份用于土壤P分级及其有效性测定;还有一份用于土壤脲酶、中性磷酸酶和酸性磷酸酶的测定。

土壤预处理后,用重铬酸钾外源加热法测定有机C含量,凯式定氮法测定其全N,钼锑抗比色法测定全P^[13]。

表 1 研究样地基本情况
Table 1 Basic situation of research sites

演替阶段 Succession stage	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average height (m)	盖度 Coverage	代表植物 Typical plants
裸露山坡 Bare hillside	—	—	—	2 株幼年马尾松、少许苔藓和地衣 Two young pine, a little moss and lichen
马尾松林 Masson pine forest	10.8	9.8	0.80	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 黄栀子 <i>Gardenia jasminoides</i> , 黄瑞木 <i>Adinandra millettii</i> , 山矾 <i>Symplocos</i> sp., 小叶女贞 <i>Ligustrum quihoui</i>
针阔混交林 Conifer-broadleaf mixed forest	13.8	12.5	0.85	苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i> , 枫香 <i>Liquidambar formosana</i> , 乌药 <i>Lindera aggregata</i> , 赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	20.0	15.0	0.70	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i> , 苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i> , 木荷 <i>Schima superba</i> , 山矾 <i>Symplocos</i> sp., 乌药 <i>Lindera aggregata</i> , 檫木 <i>Loropetalum chinense</i>

1.4 土壤矿质氮与氮素矿化

土壤 N 矿化采用 PVC 顶盖埋管法^[14]。在每个样地 4 个 10 m × 10 m 的小样方, 随机选取 4 个点。在每个点上将 2 个长为 15 cm, 直径为 4.0 cm 的 PVC 管垂直插入土内, 在每个点上留下一个原位培养, 另外一个带土的 PVC 管取出, 立即带回实验室分析, 测定其 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量作为初始值, 30 d 后将所有土样全部取出, 测定培养后的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量。 NH_4^+ -N 用靛酚兰比色法测定, NO_3^- -N 含量用镀铜镉还原-重氮偶合比色法测定^[15]。

$$\text{氨化速率}[\text{mg} \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}] = (\text{土壤培养 30 d 后的 } \text{NH}_4^+ \text{-N}) - (\text{土壤初始的 } \text{NH}_4^+ \text{-N}) \quad (1)$$

$$\text{硝化速率}[\text{mg} \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}] = (\text{土壤培养 30 d 后的 } \text{NO}_3^- \text{-N}) - (\text{土壤初始的 } \text{NO}_3^- \text{-N}) \quad (2)$$

$$\text{土壤氮净矿化速率}[\text{mg} \cdot \text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 30\text{d}^{-1}] = (\text{土壤培养 30 d 后的 } \text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}) - (\text{土壤初始 } \text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}) \quad (3)$$

1.5 土壤磷素分级与有效性

有效 P 是土壤中可被植物根系吸收的 P, 为深入研究土壤 P 的各有效形态, 将取来的其中一份新鲜土样充分混合均匀, 自然风干后, 研磨过筛, 取完全干燥的土样用 Hedley 分级法测定 5 种形态的有效 P 含量, 具体为树脂 P、 NaHCO_3 -P、 NaOH -P、声波 P 和酸性 P^[16,17]。由于本实验分析的红壤性质与 Hedley 的实验有较大差异, 通过反复预实验, 在实验中作出以下调整: (1) 由于红壤有效 P 含量偏低, 将分析土壤样品的质量由 1 g 增加为 2 g, 将使用阴离子交换树脂的质量增加为 1 g, 以获得理想的数值; (2) 使用 NaCl 代替 HCl 作为冲洗树脂的溶液; (3) 采用多次离心的方法去除土壤中大量有机质对比色的影响; (4) 更换新浸提液时先用双蒸水冲洗以防止试剂对土壤溶液 pH 的破坏, 然后将因离心而紧密聚合分层的土壤重新打散, 以利于溶液的均匀反应。

1.6 土壤酶活性

土壤酶的活性大致反映了某种生态状况下生物化学过程的相对强度, 本研究选取与土壤的 N 矿化及 P 形态转化密切相关的酶, 即脲酶, 中性磷酸酶和酸性磷酸酶作为测定的指标。将野外实验获得的一份新鲜土样保存在 -20°C 的冰箱中, 实验前, 取出部分解冻后用相应底物培养 24h, 在 pH 6.7 的缓冲液条件下用靛酚蓝比色法测定脲酶活性, 其活性表示为单位时间内铵态氮的释放量 ($\text{mg} \cdot \text{NH}_3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。在 pH 5.5 和 7 的缓冲液条件下用磷酸苯二钠法分别测定中性磷酸酶和酸性磷酸酶的活性, 其活性表示为单位时间内产生酚的量 ($\text{mg} \cdot \text{酚} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)^[18]。

1.7 数据处理

方差分析 (ANOVA) 用来比较不同处理之间的显著性, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 土壤基本理化特性

森林演替对土壤 0 ~ 15 cm 层基本理化特性影响的差异性均达到极显著 ($P < 0.001$) (表 2)。其中土壤有

机 C 为裸露山坡 < 马尾松林 < 针阔混交林 ≤ 阔叶林; 土壤全 N 为裸露山坡 < 马尾松林 < 针阔混交林 < 阔叶林; 土壤全 P 为针阔混交林 < 裸露山坡 ≤ 马尾松林 < 阔叶林; C/N 比为裸露山坡 ≤ 阔叶林 ≤ 马尾松林 ≤ 针阔混交林; C/P 和 N/P 比均为裸露山坡 < 阔叶林 ≤ 马尾松林 < 针阔混交林(表 2)。可见, 土壤全 P 和土壤有机 C、全 N 的变化趋势有别, 未表现出随着森林进展演替而逐渐增加的趋势, 在针阔混交林中出现了明显偏低的现象。

表 2 中亚热带森林演替典型阶段土壤基本理化特性

Table 2 Basic physicochemical properties of soils at different typical stages of forest succession in central subtropical region

演替阶段 Succession stage	有机碳 Organic C (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
裸露山坡 Bare hillside	0.86 ± 0.03a	0.15 ± 0.00a	0.19 ± 0.00a	5.73 ± 0.22ab	4.52 ± 0.08a	0.79 ± 0.02a
马尾松林 Masson pine forest	7.91 ± 0.37b	0.61 ± 0.05b	0.22 ± 0.02a	13.28 ± 1.03cd	36.98 ± 2.91b	2.81 ± 0.21b
针阔混交林 Conifer-broadleaf mixed forest	13.43 ± 0.54c	0.92 ± 0.06c	0.13 ± 0.00b	15.01 ± 1.62d	103.95 ± 6.92c	7.03 ± 0.39c
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	14.16 ± 1.07c	1.43 ± 0.06 d	0.54 ± 0.02c	9.87 ± 0.45bc	26.13 ± 1.17b	2.65 ± 0.05b
方差分析 ANOVA	$F_{3,12} = 96.90$, $P < 0.001$	$F_{3,12} = 113.66$, $P < 0.001$	$F_{3,12} = 187.49$, $P < 0.001$	$F_{3,12} = 16.72$, $P < 0.001$	$F_{3,12} = 127.35$, $P < 0.001$	$F_{3,12} = 138.59$, $P < 0.001$

同列数据后不同字母为差异达 0.05 显著水平 Different letters in the same column indicates means are significant different at $\alpha = 0.05$ level; 下同 the same below

2.2 土壤有效氮与矿化速率

森林演替对土壤铵态 N、硝态 N、矿质 N、硝化速率、净矿化速率($P < 0.001$)和土壤氨化速率($P < 0.05$)影响的差异性均达到显著水平。具体来看, 土壤铵态 N 为针阔混交林 ≤ 马尾松林 ≤ 阔叶林 < 裸露山坡; 硝态 N 为马尾松林 ≤ 针阔混交林 < 裸露山坡 < 阔叶林; 矿质 N 为针阔混交林 ≤ 马尾松林 < 裸露山坡 < 阔叶林(图 1A); 氨化速率为裸露山坡 ≤ 阔叶林 ≤ 马尾松林 < 针阔混交林; 硝化速率为马尾松林 ≤ 针阔混交林 ≤ 裸露山坡 < 阔叶林; 净矿化速率为裸露山坡 ≤ 马尾松林 ≤ 针阔混交林 < 阔叶林(图 1B)。可见, 森林演替的不同典型阶段土壤有效 N 的含量与相对应的氨化、硝化和净矿化速率高低排列次序并不一致。为此, 可以推断土壤有效 N 含量不仅仅取决于其微生物的矿化-固持过程, 还受到其它过程如植物吸收、土壤淋溶等的影响。

2.3 土壤磷分级与有效磷

除树脂 P 外, 森林演替对土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 、 NaOH-P 、声波 P、酸性 P 和总有效 P 影响的差异性均达到极显著($P < 0.001$)。其中, 土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 为马尾松林 ≤ 针阔混交林 ≤ 裸露山坡 < 阔叶林; NaOH-P 为针阔混交林 ≤ 裸露山坡 ≤ 马尾松林 < 阔叶林; 声波 P 为针阔混交林 ≤ 马尾松林 ≤ 裸露山坡 < 阔叶林; 酸性 P 为针阔混交林 ≤ 马尾松林 ≤ 裸露山坡 < 阔叶林; 总有效 P 为针阔混交林 ≤ 裸露山坡 ≤ 马尾松林 < 阔叶林(表 3)。可以明显的注意到, 针阔混交林的总有效 P 及除树脂 P 以外的其它不同 P 分级均偏低, 这与其土壤全 P 偏低相符。同时, 还可以发现从构成总有效 P 的 P 分级来看, NaOH-P 为亚热带丘陵红壤区森林土壤总有效 P 的主要形式, 而树脂 P 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 所占比例最低(表 3)。

2.4 土壤酶活性

森林演替对土壤脲酶、酸性磷酸酶和中性磷酸酶活性影响的差异性均达到极显著($P < 0.001$)。其中, 脲酶为裸露山坡 < 针阔混交林 < 马尾松林 < 阔叶林; 酸性磷酸酶为阔叶林 ≤ 裸露山坡 < 马尾松林 ≤ 针阔混交林; 中性磷酸酶为裸露山坡 < 马尾松林 ≤ 针阔混交林 < 阔叶林(图 1C)。可以发现, 针阔混交林中土壤脲酶和阔叶林中土壤酸性磷酸酶活性与森林演替 N 和 P 供应增加不符, 值得关注和讨论。

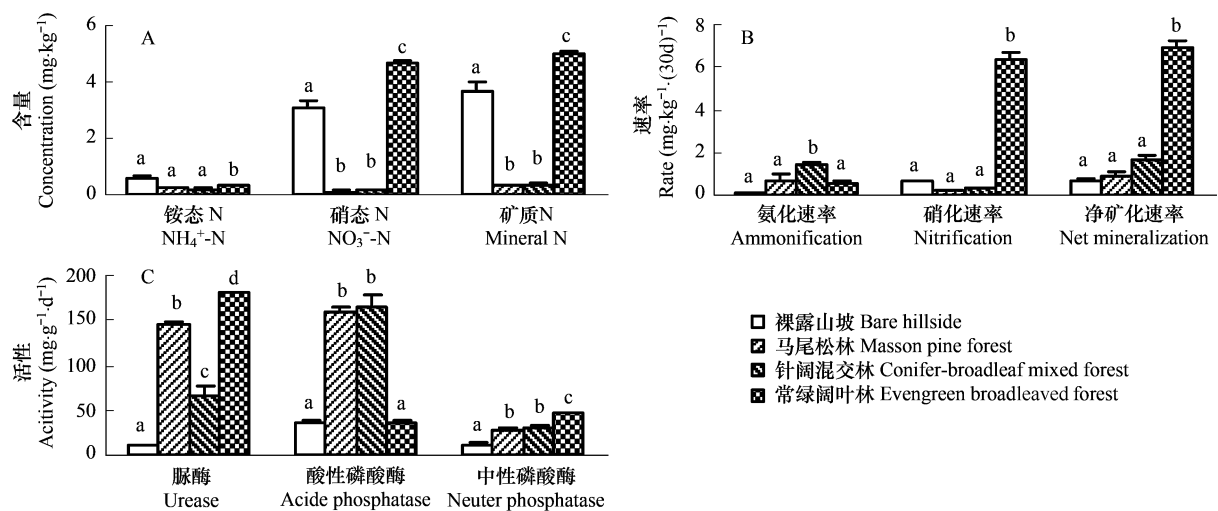


图1 中亚热带森林演替典型阶段的土壤有效氮(A)、矿化速率(B)和酶活性(C)

Fig. 1 Available N (A), mineralization rate (B) and enzymic activities (C) of soils at different typical stages of forest succession in central subtropical region

表3 中亚热带森林演替不同典型阶段的土壤磷分级

Table 3 P fractions at different typical stages of forest succession in central subtropical region

演替阶段 Succession stage	树脂磷 Resin-P (mg·kg ⁻¹)	NaHCO ₃ 磷 NaHCO ₃ -P (mg·kg ⁻¹)	NaOH 磷 NaOH-P (mg·kg ⁻¹)	声波磷 Sonic-P (mg·kg ⁻¹)	酸性磷 Acid-P (mg·kg ⁻¹)	总有效磷 Total available P (mg·kg ⁻¹)
裸露山坡 Bare hillside	1.24 ± 0.34a	1.31 ± 0.22a	7.46 ± 0.51a	7.75 ± 0.87a	4.59 ± 0.19a	22.34 ± 1.25a
马尾松林 Masson pine forest	0.94 ± 0.08a	0.63 ± 0.13a	11.96 ± 0.33a	6.98 ± 1.12a	4.58 ± 0.18a	25.10 ± 1.13a
针阔混交林 Conifer-broadleaf mixed forest	1.94 ± 0.24a	1.18 ± 0.10a	6.63 ± 0.22a	3.53 ± 0.10a	2.46 ± 0.24b	15.74 ± 0.39b
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	1.22 ± 0.22a	3.17 ± 0.19b	89.93 ± 2.49b	29.06 ± 1.74b	7.94 ± 0.39c	131.31 ± 1.22c

2.5 氮磷供应及其耦合关系

以上对中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤 C、N、P 供应与有效性等表征指标分别作了较为详细的对比分析,但对于 C、N、P,特别是 N 和 P 之间耦合关系没有进行揭示。为此,本部分通过对上文所提到的若干指标进行相关分析(表 4),以期剖析 N 和 P 供应的耦合关系。从表 4 可知,有机 C 与全 N、C/N、氨化速率、硝化速率、净矿化速率、N/P、NaOH-P、总有效 P 和中性磷酸酶存在显著正相关,而与铵态 N 表现为显著负相关($P < 0.05$);反映 N 供应及其有效性主要指标,如全 N、矿质 N、净矿化速率和脲酶与反应 P 供应及其有效性的主要指标,如全 P、总有效 P 和中性磷酸酶之间存在显著正相关($P < 0.05$)。同时还可知,反映 N 和 P 供应及其有效性的部分指标之间不存在相关性,如供 N 能力的所有指标与树脂 P;或者存在负相关,如铵态 N、硝态 N、矿质 N、硝化速率和净矿化速率与酸性磷酸酶之间($P < 0.05$)。这说明土壤 N、P 供应存在明显的耦合关系,而且在森林演替不同阶段 N、P 供应的矛盾存在差异,是一个动态变化的过程。

3 讨论

3.1 有效氮磷供应与耦合关系

由表 2 看出,从裸露山坡演替到常绿阔叶林的过程中,土壤全 N 增加了 10 倍,有机 C 增加了 16 倍,而全 P 只增加了 2.5 倍。土壤 N/P 比表现出从裸露山坡到针阔混交林逐渐上升,到常绿阔叶林反而下降的变化趋势。可见,在森林演替的不同阶段土壤 N 和 P 的积累速率存在差异。而从不同阶段 N、P 有效性的比值变化,如矿质 N 与有效 P、净矿化速率与有效 P 之比来看,与土壤 N/P 比的变化规律明显不一致。这表明,N、P 耦

合关系不仅仅表现在土壤全 N 和全 P 含量的变化,还必须考虑 N、P 供应能力上的异同,即土壤 N、P 有效性的耦合关系。

表 4 土壤氮磷供应与有效性的相关分析表

Table 4 Pearson relationship for N and P supply and availability of soils

表征指标 Index	有机碳 Organic C	全磷 Total-P	氮磷比 N/P	树脂磷 Resin-P	NaHCO ₃ 磷 NaHCO ₃ -P	NaOH-磷 NaOH-P	声波磷 Sonic-P	酸性磷 Acid-P	总有效磷 Total available P	酸性磷酸酶 Acide phosphatase	中性磷酸酶 Neuter phosphatase
有机碳 Organic C	1.00**	0.44	0.67*	0.29	0.46	0.54*	0.39	0.16	0.50*	0.30	0.88**
全氮 Total N	0.91**	0.71**	0.42	0.07	0.72*	0.80**	0.67*	0.48	0.77**	-0.02	0.92**
碳氮比 C/N	0.66*	-0.23	0.71*	0.36	-0.28	-0.15	-0.25	-0.36	-0.18	0.79**	0.42
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	-0.75*	0.00	-0.74*	-0.07	0.08	-0.08	0.04	0.18	-0.04	-0.71*	-0.57*
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	-0.03	0.78**	-0.57*	-0.14	0.84**	0.77**	0.83**	0.81**	0.79**	-0.93**	0.27
矿质氮 Mineral N	-0.09	0.75*	-0.61*	-0.14	0.80**	0.73*	0.79**	0.79**	0.75*	-0.95**	0.21
氨化速率 Ammonification rate	0.63*	-0.25	0.87**	0.34	-0.20	-0.16	-0.34	-0.51*	-0.21	0.69*	0.23
硝化速率 Nitrification rate	0.50*	0.97**	-0.19	-0.16	0.95**	0.99**	0.96**	0.87**	0.99**	-0.61*	0.73*
净矿化速率 Net mineralization rate	0.65*	0.93**	-0.01	-0.09	0.92**	0.97**	0.91**	0.78**	0.96**	-0.48	0.81**
脲酶 Urease	0.66*	0.72*	0.05	-0.22	0.46	0.72*	0.66*	0.62*	0.71*	0.08	0.84**

* 为显著相关($P < 0.05$), ** 为极显著相关($P < 0.001$)

而土壤 N、P 供应及其有效性的相关分析表明,反映 N 供应及其有效性指标与反应 P 供应及其有效性指标之间既有些存在显著正相关,又有一些存在负相关,还有少数不存在相关性(表 4)。进一步的分析发现,N 硝化速率和净矿化速率与 NaOH-P 和有效 P 之间相关系数很高,均超过 0.90。这正好反映了研究区红壤 N 和 P 供应的实际情况,一方面,红壤的供 N 能力主要表现为净矿化速率,而且在大多数森林生态系统中硝化速率是净矿化速率的主体^[19];另一方面,红壤的供 P 能力可以由有效 P 来表示,且 NaOH-P 是其最重要的有效 P 源^[20]。这些指标也正是红壤中变化速率最快,对植物生长影响最大的养分有效性。供 N 指标,如铵态 N、硝态 N、矿质 N、硝化速率和净矿化速率与酸性磷酸酶的负相关,表明土壤 N、P 供应还存在明显的负反馈过程。其可能机制是土壤 N 有效性较高时,能够补偿 P 的不足,而酸性磷酸酶活性的下降,正好可以减弱有效 P 的释放,避免土壤 P 的消耗。同时,还可以发现反映 N 和 P 供应及其有效性的少数指标之间不存在相关性,如供 N 能力的所有指标与树脂 P,这表明森林演替的不同阶段 N、P 供应及其有效性存在不同步性。不过,反映 N 和 P 有效供应的指标,除氨化速率、树脂 P 和酸性磷酸酶外在常绿阔叶林中均达到最高,这表明土壤 N、P 协调供应在演替的高级阶段得到了优化。

综上所述,本研究认为土壤 N、P 供应存在明显的耦合过程;不同演替阶段 N、P 供应是不同步的,森林演替的早期阶段土壤 P 的限制性明显强于 N;N、P 供应在森林演替进展过程中可以逐步得到优化而实现协调供应。

3.2 森林演替与养分动态

由表 2 可知,红壤中硝态 N 为有效 N 的主要形式,矿化过程是以硝化作用为主,这主要与红壤 pH 低有关。还可知,裸露山坡的矿质 N 含量仅次于阔叶林,但是其矿化速率却是最低的,这说明在裸露山坡中,由于缺乏地表植物,对矿质 N 的吸收处于停滞状态,造成矿质 N 的积累。可见,影响土壤矿化及其有效性的因素既包括土壤理化特性,也与地上植被状况密切相关。

由表 3 可看出,有效 P 的含量大致为阔叶林 > 马尾松林 > 裸露山坡 > 混交林。一般来说,有效 P 的含量随着森林演替逐渐增加,由于混交林处在森林演替关键阶段,阔叶植物迅速生长而马尾松并未消亡,故 N 迅速积累而 P 消耗加大,大量的 P 转移至植物体内,导致了 N/P 比的增高。表 3 的数据都是在短期内提供 P 的

主要形态,而最重要有效 P 源则是 NaOH-P。张教林^[20]在对云南胶园的砖红壤研究中将长期耕作条件下的 P 形态分为了积累型、稳定型、消耗型 3 种,而在自然无干扰的植被恢复情况下,NaOH-P 也类似以上的作用,与其他有效成分一起共同提供植物生长所需要的 P^[20]。张教林还发现微生物活动减弱后,会引起 P 循环减慢,使大量易矿化的 P 形态向稳定的 P 形态转化,引起植物可利用的有效 P 源减少,最终导致 P 有效性水平的降低^[20]。

在裸露山坡中,由于土壤条件差,缺乏地被植物,土壤矿质养分主要由微生物和环境因素决定,矿质 N 和 P 随着缓慢风化和矿化积累而达到了一定的水平,一旦满足先锋植物生长的要求,就产生了最初的地表植被。相反,如果由于水土流失导致营养流失大于积累,无法满足植物生长的需要,则土壤会进一步退化,而流失的营养转移到其他区域,通常这样的转移距离不会太远,范围在 1~200 m 左右^[21]。在马尾松幼苗形成的初期,由于自身生产力低下,抗干扰能力差,且植被对环境的影响太小,无法改善土壤微生物的生存环境,土壤养分供应不足。如果植物能适应此时的土壤养分条件,改善土壤环境,改善了微生物的生存条件,使得土壤养分大大增加,森林植被的多样性增加,微生物多样性也增加^[22],生态系统生产力增加,土壤中有机 N 不断积累,N/P 比也逐渐增加。随着森林发展到一定阶段,总生物量的增加,P 由于其迟效部分含量高,扩散速率低等原因,磷酸盐在土壤中向根系吸收的位置扩散速率非常小^[23],造成了普遍缺乏 P 的情况,虽然植物有自身适应调节,但是在 N/P 比过高时,由于缺乏 P 对整个森林生态系统的发展产生了抑制,P 在此时成为限制因子。随着演替的进展,土壤中 P 的有效性逐渐得到改善,表层植被根系可吸收的 P 逐渐增加,N/P 也随之降低,有效 N 和 P 的含量都进一步升高,如此演替到亚热带常绿阔叶林阶段。此过程这也进一步表明土壤肥力是森林演替的主要推动力,N、P 供应在森林演替进展中是一个逐步优化和协调供应的过程。

根据以上分析,本研究认为以森林演替过程为基础的植被恢复将有利于逐步提高土壤的 N、P 供应能力,在研究区内以常绿阔叶林为植被恢复的最终目标是可行和理想的。不过,在植被恢复过程中,仍需结合实际情况选择合适的恢复模式,合理地添加养分,加快土壤肥力的改良,提高植被恢复效率,改善林分质量,增强生态系统的服务功能。

References:

- [1] Guo X M, Niu D K, Liu Y Q, *et al.* The vegetation restoration and reconstruction of different types of degraded barren ecosystems in Jiangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 879—884.
- [2] Li Z A, Zou B, Cao Y S, *et al.* Nutrient properties of soils in typical degraded hilly land in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1648—1656.
- [3] Li G C, Han X G, Huang J H, *et al.* A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1187—1195.
- [4] Mooney H A, Vitousek P V, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, 1987, 238: 926—932.
- [5] Compton J S, Mallinson D J, Glenn C R, *et al.* Variations in the global phosphorus cycle. In: Glenn C R ed. *Marine Authigenesis: From Global to Microbial*. Society of Sedimentary Geology, 2000, 66: 21—33.
- [6] Zhao Q, Zeng D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 153—163.
- [7] Shen P C, Zhang D H. Research progress of the inorganic phosphorus of acidity soil. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2005, 32(1): 75—78.
- [8] Lei H J, Zhu R W, L X, Zhou W B, *et al.* Phosphorus Adsorption-Desorption Characteristics in Acid Soils under Amendment. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 636—640.
- [9] Nye P H, Tinker P B. *Solute Movement in the Soil-root System*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1977.
- [10] Cleveland C C, Townsend A R, Schmidt S K. Phosphorus limitation on microbial processes in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubations and field studies. *Ecosystems*, 2002, 5: 680—691.
- [11] Chen F S, Hu X F, Ge G. Leaf N:P Stoichiometry and nutrient resorption efficiency of *Ophiopogon japonicus* in Nanchang City. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(4): 47—54.

- [12] Zhang J A. General Experimental Methods and Techniques in Ecological Research. Beijing: Chemic Industry Press, 2007. 82—102.
- [13] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and Chemical Analysis Methods of Soil. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 56—98.
- [14] Chen F S, Zeng D H, Fan Z P, *et al.* Advances in assessment methods of forest soil nitrogen availability. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(S1): 83—88.
- [15] Lu R K. Soil Agriculture Chemical Analysis Method. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 283~287.
- [16] Hedley M J, Steward J W B. Changes in inorganic and organic soil phosphorous fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science*, 1982, 46: 970—976.
- [17] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W. A simplified, sequential phosphorus fractionation method. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2000, 31 (11214): 1981—1991.
- [18] Guan S Y. Soil Enzyme and Research Methods. Beijing: Agriculture Press, 1986. 274—276.
- [19] OuYang X J, Zhou G Y. Soil organic carbon and nitrogen mineralization along a forest successional gradient in Southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1688—1694.
- [20] Zhang J L, Chen A G, Liu Z Q. Soil phosphorus form and its availability under 3, 13 and 34 year rubber garden in tropical zone. *Soils*, 2000, 6: 319—322.
- [21] Li Q K. Red Soil in China. Beijing: Science Press, 1983. 1—5.
- [22] Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P, *et al.* Study on relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem of MT. JinYun. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 124—128.
- [23] Smith F W, Mudge S R, Rae A L. Phosphate transport in plants. *Plant and Soil*, 2003, 248: 71—83.

参考文献:

- [1] 郭晓敏, 牛德奎, 刘苑秋, 等. 江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复与重建措施. *生态学报*, 2002, 22(6): 879~884.
- [2] 李志安, 邹碧, 曹裕松, 等. 南方典型丘林退化荒坡地土壤养分特征分析. *生态学报*, 2003, 23(8): 1648~1656.
- [3] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展. *生态学报*, 2001, 21(7): 1187~1195.
- [6] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 153~163.
- [7] 沈乒聪, 张鼎华, 酸性土壤无机磷研究进展. *福建林业科技*, 2005, 32(1): 75~78.
- [8] 雷宏军, 朱端卫, 刘鑫, 等. 酸性土壤在改良条件下磷的吸附-解吸特性. *土壤学报*, 2004, 41(4): 636~640.
- [11] 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.
- [12] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术. 北京: 化工出版社, 2007. 82~102.
- [13] 南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [14] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 等. 森林土壤氮素有效性的野外估测方法. *林业科学*, 2007, 43(S1): 83~88.
- [15] 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.
- [18] 关松荫等. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 欧阳学军, 周国逸. 亚热带森林植被恢复演替序列的土壤有机碳氮矿化. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1688~1694.
- [20] 张教林, 陈爱国, 刘志秋. 定植 3, 13, 34 年热带胶园的土壤磷素形态变化和有效性研究. *土壤*, 2000, 6: 319~322.
- [21] 李庆逵. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983. 1~5.
- [22] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系. *林业科学*, 2001, 37(4): 124~128.