

凋落物管理和城市环境胁迫 对湿地松林土壤氮素矿化过程的耦合效应

沈文清¹ 余明泉² 胡小飞³ 冯雪³ 任文³ 陈伏生³

(1. 江西省山江湖开发治理委员会办公室, 江西 南昌 330046; 2. 江西科技师范学院 生命科学学院, 江西 南昌 330038; 3. 南昌大学 江西省植物资源重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘要:以南昌“城区—郊区—乡村”梯度下的湿地松(*Pinus elliottii*)人工林为对象,采用原位控制和PVC顶盖埋管法,开展凋落物管理措施和城市化所引起的环境变化对森林土壤氮素(N)转化及其有效性季节动态影响的研究。结果表明,凋落物移除有利于抑制土壤硝化过程,提高土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。城市化过程易加速土壤N转化速率,尤其是提高土壤硝化速率和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。凋落物移除和城市环境胁迫对森林土壤N矿化速率和N有效性的含量、组成及其季节动态均存在明显的耦合效应;城区森林可通过移除凋落物来应对N沉降等城市环境所带来的负面影响,而乡村森林保持完整的凋落物层有利于提高土壤N矿化及其供应能力;城市森林的管理对策应该有别于传统林业。

关键词:城市森林;土壤氮素矿化;顶盖埋管法;生态系统管理

中图分类号:S791.246 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2011)06-1236-06

Interactive Effects of Litter Removal and Urbanization Environment Change on Soil Nitrogen Mineralization in Slash Pine Plantations

SHEN Wen-qing¹, YU Ming-quan², HU Xiao-fei³,
FENG Xue³, REN Wen³, CHEN Fu-sheng³

(1. Office of the Mountain-River-Lake Development Committee of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China; 2. College of Life Sciences, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Plant Resources, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The effects of litter management practice and urbanization environment change on soil nitrogen (N) transformation and its availability were studied in slash pine (*Pinus elliottii*) plantations across urban-suburban-rural gradients of Nanchang City using *in situ* PVC tube incubation method. The results showed that litter removal would inhibit nitrification and decrease soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentrations. Urbanization would lead to acceleration of soil N transformation rate, and especially improve nitrification rate and soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration. The interactive effects of litter removal and urbanization environment pressure were found on the amount, components and seasonality of soil N mineralization rate and N availability. Therefore, litter removal in urban forests would be helpful to alleviate the negative urbanization influence on N cycling, however litter input in rural forest should be a good way to increase soil N mineralization and N availability. In sum, urban forests management would differ with that in traditional forestry.

收稿日期:2011-07-01 修回日期:2011-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(30960311)和国家自然科学基金青年基金项目(30600473)

作者简介:沈文清(1974—)女,副研究员,博士,主要从事生态系统管理研究, E-mail: shenwenqing33@163.com。

Key words: urban forest; soil nitrogen mineralization; top tube incubation method; ecosystem management

土壤氮素(N)矿化过程是森林生态系统N生物地球化学循环的关键过程之一,既反映了土壤N的供应能力,又与N淋溶、N挥发等环境问题密切相关^[1]。近年来,N矿化过程的研究已成为森林生态学研究的热点问题和前沿领域,受到国内外学者的广泛关注^[1-4]。

目前,城市化是世界范围内社会发展变化的重要格局,不过森林生态系统对城市化过程的响应仍知之甚少^[5]。城市森林作为一种有别于传统森林的类型,其所处的环境条件和经营管理有其特殊性,这些特殊性对森林养分循环的影响仍不清楚^[6]。凋落物的质量和数量、环境因子、人为干扰、土壤生物、全球变化、生态系统管理等因素均影响森林土壤N矿化过程,但是不同影响因素之间的耦合效应仍需全面了解^[7-8]。其中凋落物移除管理和城市环境胁迫是城市林业的鲜明特点,两者对土壤N矿化的影响及其交互过程仍有待深入^[9]。

基于此,本文选择南昌市“城区—郊区—乡村”梯度的6块湿地松(*Pinus elliottii*)为对象,采用PVC顶盖埋管法定位监测不同凋落物管理措施(保持原状与收集移除比较)林地土壤矿质N、N矿化速率的月份动态,检验以下科学假设:(1)由于凋落物移除会减少了N的输入,从而可降低土壤N矿化速率和矿质N含量;(2)城市化引发N沉降、温度升高等环境变化,从而加速土壤N矿化过程和提高有效N水平;(3)由于凋落物移除和城市环境变化对土壤N转化影响产生正负相反的效应,因此两者对土壤N矿化过程将产生明显的交互效应。为此,本研究有利于更好地理解城市森林土壤N循环的基本规律,为科学经营和管理城市森林提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

南昌市位于东经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1600~1800mm,年平均相对湿度为77%,年日照时间1901h,年平均风速2.5m/s,年无霜期291d^[10]。

试验区域位于从南昌市中心沿105国道一直向北30km的范围内,从南昌大学新校区始向北延伸经过郊区的江西农业大学到达新建县溪霞镇,沿样带自然地理条件变化不大。分别在城区、郊区和乡村各选取2块20m×20m的人工湿地松林典型样地,共6个样地,林分密度(600~800)株/hm²,平均胸径12~16cm,树龄为18年左右,林分郁闭度为0.7~0.9。城区由于受人为干扰多,灌木层植物较少,主要为小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、十大功劳(*Mahonia fortunei*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)等;而郊区和乡村的灌木层主要为短柄栎(*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)、黄栀子(*Gardenia jasminoides*)、青灰叶下珠(*Phyllanthus glaucus*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、山合欢(*Albizia kalkora*)等。城区、郊区和乡村分别选取1块,共计3块,对凋落物进行收集和移除;而相对应的另外3块,保持林地凋落物的原状;试验处理时间>2年。样地土壤质地基本一致,均为典型丘陵红壤,其基本理化性质见表1。

表1 研究样地表层土壤(0~15cm)基本属性

Tab.1 The properties of top soil (0-15 cm) in our study sites

研究样地 Plots	土壤容量/ (g·cm ⁻³) Bulk density	pH值 pH value	有机碳/ (mg·g ⁻¹) Organic carbon	全氮/ (mg·g ⁻¹) Total nitrogen	全磷/ (mg·g ⁻¹) Total phosphorus	碳氮比 C:N ratio	氮磷比 N:P ratio
城区 Urban							
保持凋落物 No litter raking	1.33 ± 0.01d	4.50 ± 0.02ab	6.37 ± 0.39c	0.58 ± 0.02c	0.25 ± 0.02cd	14.43 ± 0.53ab	2.64 ± 0.17b
移除凋落物 Litter removal	1.38 ± 0.02d	4.61 ± 0.02ab	0.94 ± 0.09a	0.17 ± 0.02a	0.23 ± 0.02cd	5.64 ± 0.58a	0.78 ± 0.11a
郊区 Suburban							
保持凋落物 No litter raking	1.25 ± 0.01c	4.64 ± 0.04b	13.76 ± 1.54d	0.42 ± 0.08bc	0.27 ± 0.01d	40.38 ± 5.84c	1.55 ± 0.29ab
移除凋落物 Litter removal	1.10 ± 0.02b	4.57 ± 0.02ab	6.20 ± 0.47bc	0.24 ± 0.04ab	0.19 ± 0.01bc	29.15 ± 3.63bc	1.29 ± 0.27ab
乡村 Rural							
保持凋落物 No litter raking	1.04 ± 0.04a	4.48 ± 0.04a	12.52 ± 0.35d	1.02 ± 0.06d	0.15 ± 0.01ab	12.48 ± 0.66ab	7.02 ± 0.58c
移除凋落物 Litter removal	0.98 ± 0.08a	4.63 ± 0.05b	4.61 ± 0.92b	0.25 ± 0.03a	0.12 ± 0.01a	25.50 ± 9.21abc	2.05 ± 0.12ab

平均值 ± 标准差;同一列中不同字母表差异显著,否则差异不显著($P < 0.05$)。

Mean ± Standard error; Different letters in the same column denote significant differences among six plots at $P < 0.05$.

1.2 实验方法

1.2.1 土壤样品采集 将所选取6个20 m×20 m的样方均分成4个10 m×10 m的小样方,在每个小样方中,用土钻(内径2.5 cm)随机取5个0~15 cm层的土样,混均后带回实验室,风干,预处理,贮藏,用于土壤基本理化性质分析。与此同时,于生长季(8月)详细调查每块样方的林分特征。

1.2.2 土壤氮素矿化 土壤氮素矿化采用PVC顶盖埋管法^[11]。取样于2007年1月10日开始,在每个小样方内随时选取两点,把2个长为15 cm、内径4 cm的PVC管垂直打入土中,一个带土取出带回实验室分析,测定其NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量作为初始值,另一个顶盖留下原位培养30 d后取出分析。以后每个月定期取样1次,至2008年2月10日止,共12次。每个月的初始值用于评价土壤矿质N(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)的动态;培养前后的差值用于估测土壤N矿化速率。

1.2.3 样品测定与分析 风干土壤用于基本化学特性分析;其中有机C用油浴-高铬酸钾容量法测定,全N用开氏消煮法测定,全P用浓硫酸-高氯酸催化消煮,钼锑抗比色法测定,容重用环刀法测定,pH值用1:2水溶液,pH计测定。新鲜土壤用于测定NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量;其中NH₄⁺用靛酚兰比色法测定,NO₃⁻-N用镀铜镉还原-重氮偶合比色法测定^[12]。以上变量均换成干土质量计。

1.3 数据处理与分析

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

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

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

根据南昌气候条件和植物物候情况,考虑到数据分析和结果讨论的方便,本研究中将3月、4月、5月的监测数据归并,统称为春季;6月、7月、8月为夏季;9月、10月、11月为秋季;12月、1月、2月为冬季。

所有数据采用统计软件SPSS 11.0进行多因素方差分析,并对“城区—郊区—乡村”梯度和春、夏、秋、冬四季分别进行单因素方差分析和多重比较,显著性取P<0.05。

2 结果与分析

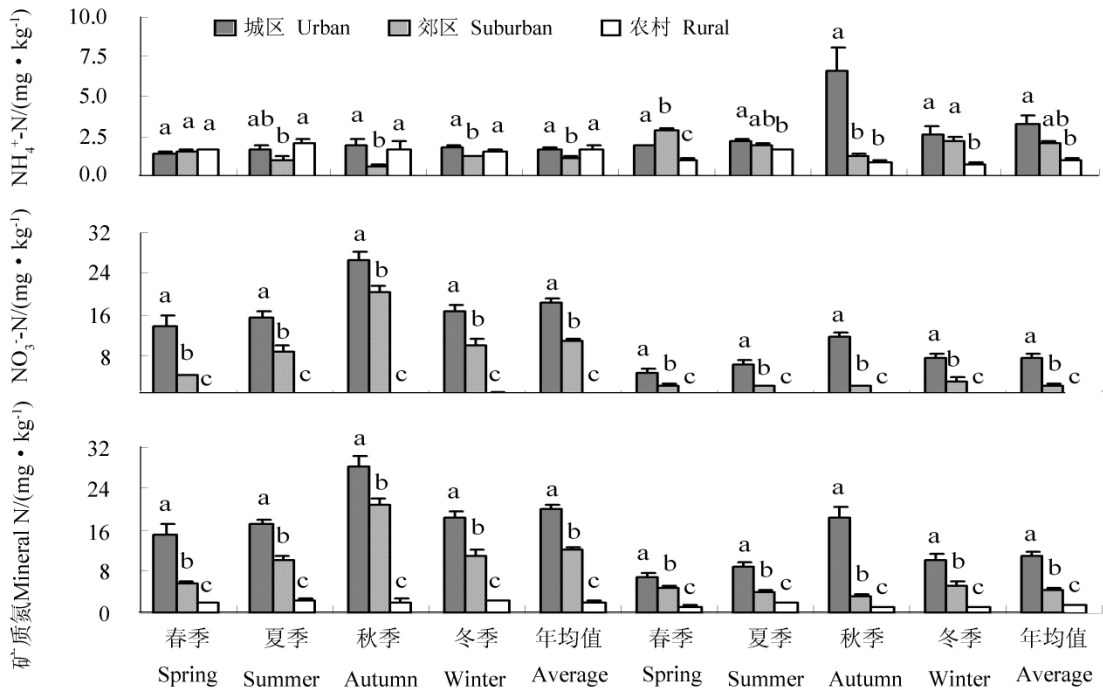
2.1 土壤矿质N

除采样季节对土壤NH₄⁺-N的影响不显著之外,凋落物管理、城乡梯度和采样季节及其它它们之间的交互作用均对湿地松土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和矿化N含量影响显著(表2)。尽管不同样地之间土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和矿化N含量的季节变化规律不完全一致;综合来看,土壤NH₄⁺-N除城区凋落物收集林地秋季较高外,其它林地的季节波动均不明显;土壤NO₃⁻-N和矿化N均表现为秋季明

表2 凋落物管理、城乡梯度和采样季节对湿地松土壤矿化氮含量和矿化速率影响的方差分析

Tab.2 ANOVA of effects of litter management, urban-rural gradient and sampling season on soil mineral N concentration and N mineralization rate in slash pine plantations

影响因素 Factors	自由度 df	F值 F value					
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	矿质N Mineral N	氨化速率 Ammonification rate	硝化速率 Nitrification rate	净矿化速率 Net-N mineralization rate
凋落物管理 Litter management (LM)	1	17.34***	337.95***	199.94***	48.67***	0.00 ^{NS}	3.97*
城乡梯度 Urban-rural gradient (URG)	2	21.85***	446.98***	386.17***	31.13***	43.17***	23.21***
采样季节 Sampling season (SS)	3	2.54 ^{NS}	55.05***	47.09***	14.03***	6.08***	10.27***
凋落物管理×城乡梯度 LM×URG	2	20.33***	83.75***	37.76***	3.22****	4.57*	6.59**
凋落物管理×采样季节 LM×SS	3	3.48*	22.11***	11.34***	4.52**	2.12 ^{NS}	0.72 ^{NS}
城乡梯度×采样季节 URG×SS	6	12.59***	14.43***	16.33***	12.44***	12.23***	15.44***
凋落物管理×城乡梯度 ×采样季节 LM×URG×SS	12	6.49***	8.99***	8.03***	7.76***	0.69 ^{NS}	0.98 ^{NS}



不同字母表示同一季节不同位置林地之间的差异。

Different letters in the same season denote significant differences among three sites across the urban-suburban-rural gradient at $P < 0.05$.

图 1 不同凋落物管理条件下“城区—郊区—乡村”梯度湿地松林土壤矿质氮的季节动态

Fig. 1 Seasonal variations in soil mineral N in slash pine plantations of different litter managements across urban-suburban-rural gradient in Nanchang City

显高于春、夏和冬季(图 1)。从城乡梯度的比较来看,未收集凋落物林地的土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 表现为郊区略高于城区和乡村,而收集凋落物的林地表现为城区较低、郊区居中和乡村较高;而土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和矿化 N 无论凋落物收集与否均表现为城区最高、郊区居中和乡村最低。从凋落物管理措施的对比来看,凋落物收集显著提高城区和郊区林地土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量,但乡村林地土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 反之;凋落物收集显著降低城区和郊区林地土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和矿化 N 含量,而乡村林地凋落物收集与否差异不显著(图 1)。此外,土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 占矿质的比值秋季(0.82)高于其它季节(0.71~0.79),城区(0.84)和郊区(0.81)远远高于乡村(0.18),凋落物未收集(0.86)高于凋落物收集(0.61)。

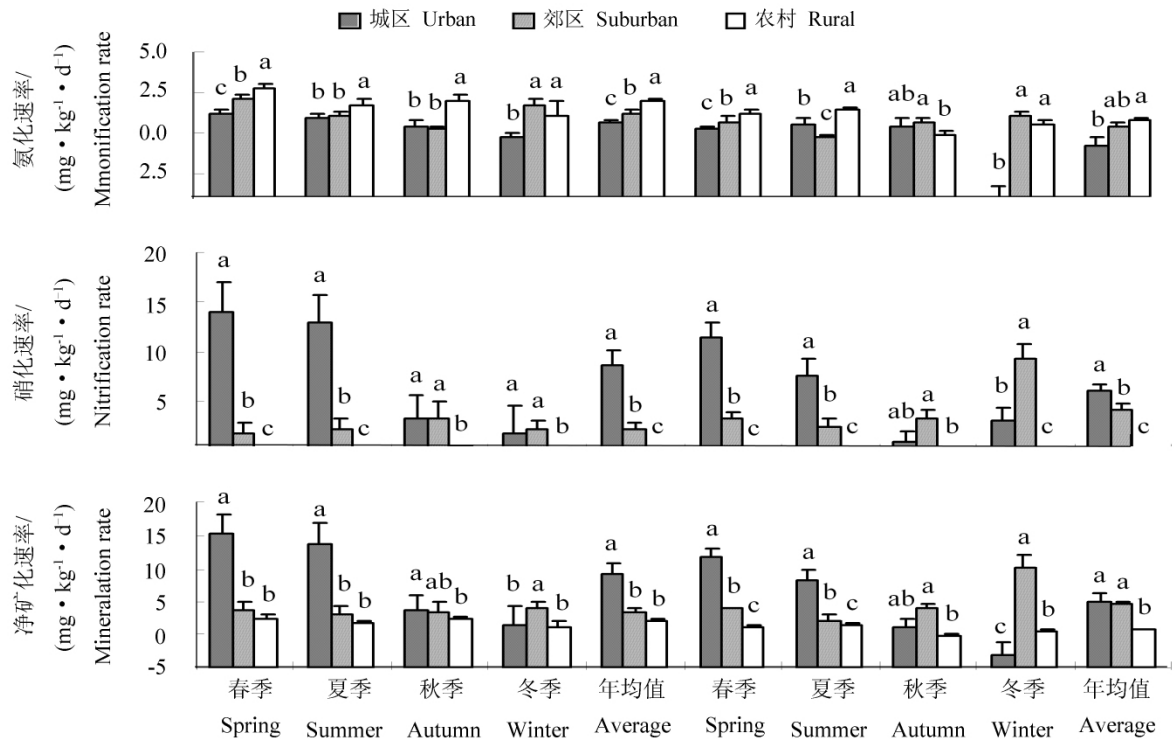
2.2 土壤矿化速率

除凋落物管理对土壤硝化速率影响不显著外,凋落物管理、城乡梯度和采取季节对土壤氨化、硝化和净矿化速率影响显著;凋落物管理和城乡梯度、城乡梯度和采样季节的交互作用对土壤氨化、硝化和净矿化速率影响显著;但凋落物管理和采样季节两因素以及凋落物管理、城乡梯度和采样季节三因素的交互作用仅对土壤氨化速率影响显著、而对硝化和净矿化速率影响不显著(表 1)。

城区和乡村土壤氨化速率表现随春、夏、秋、冬的季节交替呈下降的趋势,而郊区表现春、冬季高于夏、秋季;年氨化速率表现为城区最低,郊区居中,乡村最高;凋落物收集降低林地土壤氨化速率。城区土壤硝化速率表现为春、夏季远高于秋、冬季,而郊区和乡村表现为春、夏季稍低于秋、冬季;年硝化速率城区最高,郊区居中,乡村最低;而凋落物是否收集差异微小。城区土壤净矿化速率表现为春、夏季高于秋、冬季,而郊区和乡村不同林地季节变化规律较杂乱;凋落物未收集林地表现为城区高于郊区和乡村,而凋落物收集林地表现为城区和郊区高于乡村(图 2)。此外,城区和郊区林地每个季节及年总值均表现为氨化速率远远低于硝化速率,而乡村却完全相反(图 2)。

3 讨论与结论

森林土壤 N 转化过程十分复杂,通常受气候条件(主要是温度、湿度)、凋落物量及其化学组成、土壤理化特性等多种因子控制^[7]。已有研究证实,从乡村到城区的空间样带上,许多环境要素,如人口密



不同字母表示同一季节不同位置林地之间的差异。

Different letters in the same season denote significant differences among three sites across the urban-suburban-rural gradient at $P < 0.05$.

图2 不同凋落物管理条件下“城区—郊区—乡村”梯度湿地松林土壤氮素矿化速率的季节动态

Fig. 2 Seasonal variations in soil N mineralization rate in slash pine plantations of different litter managements across urban-suburban-rural gradient in Nanchang City

度、道路密度、机动车辆、空气和土壤污染程度、平均气温(或热岛效应)、平均降水量、土壤紧实度、土壤盐碱度以及其他人类干扰指标均表现出明显的梯度变化^[6]。与此同时,城市及其周边森林由于环境卫生和景观需求等,地表凋落物经常被清扫收集,导致凋落物的积累明显低于乡村自然林地^[13]。而到目前为止,城市环境变化和凋落物输入减少对森林土壤N转化影响的耦合效应未见报道。

本研究表明,凋落物移除对城区、郊区和乡村的土壤N矿化过程及其有效性的影响效应及其强度不一。主要表现在:(1)从均值的高低来看,凋落物移除总体上提高了土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,却降低了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、矿质N、氨化和净矿化速率;尽管硝化速率均值无差异,但是硝化过程却得到了一定程度地抵制。(2)从环境梯度变化来说,城区凋落物移除有利于提高土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量和氨化速率,却降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、矿质N、硝化和净矿化速率;乡村凋落物移除对硝化速率影响不显著之外,其它变量都不同程度的下降;而郊区有些变量类似于城区,另一些变量与乡村林地响应一致。(3)从N矿化和有效N的组成来讲,凋落物的移除往往有利于抵制硝化过程,而提高土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量。总体上来看,凋落物的归还还是森林生态系统土壤N的主要来源,凋落物量是生态系统土壤N最重要的输入,控制着土壤有机N库的大小^[14-15];本研究基本支持科学假设I,凋落物移除会减少N的输入,从而降低土壤N矿化速率和矿质N含量。

与此同时,本研究还表明,“城区—郊区—乡村”环境梯度变化调控森林土壤N转化及其供应过程。具体表现在:(1)年均值的差异明显,土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、矿质N、硝化和净矿化速率均表现为沿城区—郊区—乡村环境梯度变化降低的趋势,而氨化速率正好相反;这可能主要受到城市化所带来的N沉降和土壤碱化等因素多重影响。一方面,N沉降加剧带到土壤N输入的增加,N源的增加导致N转化速率及其有效N供应的提高^[13-16];另一方面,城市土壤较高的pH值,有利于硝化过程的发生,造成氨化过程产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 快速转化成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 来缓冲阴阳离子平衡^[17],其结果是净氨化速率的反而非常低。(2)季节波动规律不一,城区和郊区土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和矿质N在城区和郊区林地往往秋季显著高于其它季节,而乡村变化幅度微小;硝化和净矿化速率在城区林地表现为春、夏明显高于秋、冬季,郊

区表现为秋季较高,而乡村主要受凋落物管理措施的控制。推断这时因为城市化导致环境因子和土壤理化特性的改变所致。相对于乡村,城区森林处于高温、潮湿、土壤污染、人为踩踏等环境胁迫^[18],而这些因素影响土壤微生物活动和植物的养分吸收,从而改变了N矿化过程及其供应的季节波动规律^[2]。(3)土壤N矿化和有效N组成明显改变,土壤 NO_3^- -N占矿质N的比值和土壤硝化速率占净矿化速率的比例均表现出随城区、郊区再到乡村呈下降的趋势。因此,本研究也支持科学假设II,城市化引发N沉降、温度升高等环境变化,从而有利于加速土壤N矿化过程和提高有效N水平。与此同时,鉴于 NO_3^- -N是城市森林总矿质N的主体部分,且城区硝化速率异常强烈,而土壤 NO_3^- -N不易被土壤胶体颗粒吸附,易被流水冲刷而淋失,造成养分元素的失衡^[18-19];同时可以通过反硝化作用以气态的形式脱离土壤,形成温室气体^[20]。因此,建议在城市森林的规划时,结合城市的景观需要,适当配植林下植被,特别是吸收N能力强的草本花卉植物,并且适时收获移除,可以降低城市N沉降等带来的风险^[21]。

综合来看,凋落物管理措施和城市化环境变化对土壤N循环的影响具有明显的耦合效应。城区凋落物适量移除可能有利于减缓城市环境胁迫对森林土壤N循环带来的负面影响。而进一步加强城市凋落物分解过程、城市森林地下根系养分吸收特征、城市森林根际—微生物互作过程、树种配置对城市森林N循环的影响等方面的研究将有助于更好地全面认识城市森林养分循环的特殊性。建立有别于传统林业的城市森林经营管理体系任重而道远。

参考文献:

- [1]陈伏生,曾德慧,范志平等.沙地不同树种人工林土壤氮素矿化过程及其有效性研究[J].生态学报,2006,26(2):341-348.
- [2]Zhu W X, Carreiro M M. Temporal and spatial variations in nitrogen transformations in deciduous forest ecosystems along an urban-rural gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36: 267-278.
- [3]陈伏生,余焜,甘露等.温度、水分和森林演替对中亚热带丘陵红壤氮素矿化影响的模拟实验[J].应用生态学报,2009,20(7):1529-1535.
- [4]秦晓蕾,余明泉,刘苑秋等.退化红壤区不同重建模式森林土壤氮素矿化过程及其有效性[J].江西农业大学学报,2009,31(2):278-282.
- [5]McDonnell M J, Pouyat R V, Zipperer W C, et al. Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient[J]. Urban Ecosystems, 1997, 1: 21-36.
- [6]张金屯, Pickett S T A. 城市化对森林植被、土壤和景观的影响[J].生态学报,1999,19(5):654-658.
- [7]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[J].生态学报,2001,21(7):1187-1195.
- [8]胡小飞,陈伏生,葛刚.森林采伐对林地表层主要特征及其生态过程的影响[J].土壤通报,2007,38(6):1213-1218.
- [9]Young R F, Wolf S A. Goal attainment in urban ecology research: A bibliometric review 1975 - 2004 [J]. Urban Ecosystem, 2006, 9: 179-193.
- [10]甘露,陈伏生,胡小飞等.南昌市不同植物类群叶片氮磷浓度及其化学计量比[J].生态学杂志,2008,27(3):344-348.
- [11]Binkley D, Hart S C. The components of nitrogen availability assessments in forest soils [J]. Advances in Soil Science, 1989, 10: 5-111.
- [12]鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1998.
- [13]Chen F S, Fahey T J, Yuan M Y, et al. Key nitrogen cycling processes in pine plantations along a short urban-rural gradient in Nanchang, China [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259: 477-486.
- [14]Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: Comparison across North American forest sites [J]. Oecologia, 1997, 111: 151-159.
- [15]弓晓静,余明泉,胡小飞等.氮磷添加对红壤区域郊湿地松林凋落叶分解的影响[J].生态学杂志,2010,29(12):2327-2333.
- [16]方运霆,莫江明, Gundersen P, 等.森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J].生态学报,2004,24(7):1523-1531.
- [17]Curtin D, Campbell C A, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(1):57-64.
- [18]余明泉,杜天真,陈伏生等.城乡梯度土壤有效氮季节动态[J].江西农业大学学报,2009,31(1):137-143.
- [19]Brimblecombe P, Stedman D H. Historical evidence for a dramatic increase in the nitrate component of acid rain [J]. Nature, 1982, 298: 460-462.
- [20]Hart S C. Potential impacts of climate change on nitrogen transformations and greenhouse gas fluxes in forests: A soil transfer study [J]. Global Change Biology, 2006, 12: 1032-1046.
- [21]莫江明,孔国辉.凋落物和林下层收割对鼎湖山马尾松林土壤有效氮动态的影响[J].生态学报,1997,17(1):109-112.