

DOI: 10.5846/stxb201708271545

聂阳意, 陈坦, 吕茂奎, 张康靖, 曾敏, 邓翠, 任寅榜, 谢锦升. 植被恢复过程中芒萁覆盖对侵蚀红壤氮组分的影响. 生态学报, 2018, 38(19): - .
Nie Y Y, Chen T, Lyu M K, Zhang K J, Zeng M, Deng C, Ren Y B, Xie J S. Effects of *Dicranopteris dichotoma* coverage on nitrogen components during the vegetation restoration process in eroded red soil. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

植被恢复过程中芒萁覆盖对侵蚀红壤氮组分的影响

聂阳意^{1,2}, 陈 坦^{1,2}, 吕茂奎^{1,2}, 张康靖^{1,2}, 曾 敏^{1,2}, 邓 翠^{1,2}, 任寅榜^{1,2}, 谢锦升^{1,2,3,*}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

3 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福州 350007

摘要: 氮素是限制陆地生态系统生产力的重要因子。采用时空替代法, 以红壤侵蚀区未治理、恢复 12 年和 30 年的马尾松林为研究对象, 对比分析了林下芒萁覆盖地与裸地表层土壤之间氮同位素、不同形态氮组分含量以及不同组分氮含量所占比例之间的差异。结果表明: 在所有马尾松林中, 芒萁覆盖增加了表层土壤的全氮含量, $\delta^{15}\text{N}$ 值则比林下裸地显著降低了 33.8%—83.1% ($P < 0.05$)。随着恢复年限增加, 林下芒萁覆盖地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著下降, 而林下裸露地 $\delta^{15}\text{N}$ 值没有显著变化 ($P > 0.05$)。不同恢复年限马尾松林的芒萁覆盖地表层土壤微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮含量显著高于林下裸地 ($P < 0.05$), 而硝态氮含量则显著低于林下裸地 ($P < 0.05$)。随恢复年限增加, 表层土壤微生物生物量氮、可溶性有机氮、铵态氮含量均呈增加趋势, 而硝态氮含量则呈下降趋势, 不同形态氮占全氮比例表现为: 微生物生物量氮 > 铵态氮 > 可溶性有机氮 > 硝态氮。相关分析表明土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与硝态氮极显著正相关, 与其它氮组分极显著负相关 ($P < 0.01$)。由此可见, 与林下裸地相比, 芒萁覆盖在植被恢复过程中有助于提高表层土壤中全氮、微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮含量, 降低硝态氮的淋溶损失风险, 促进土壤氮保持和积累, 从而有利于退化红壤生态系统的恢复。

关键词: 植被恢复; 芒萁; 氮保持; ^{15}N 稳定同位素; 侵蚀红壤

Effects of *Dicranopteris dichotoma* coverage on nitrogen components during the vegetation restoration process in eroded red soil

NIE Yangyi^{1,2}, CHEN Tan^{1,2}, LYU Maokui^{1,2}, ZHANG Kangjing^{1,2}, ZENG Min^{1,2}, DENG Cui^{1,2}, REN Yingbang^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2,3,*}

1 College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

3 Province-Ministry Co-Constructed Ministry of Education Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Fuzhou 350007, China

Abstract: Nitrogen is an important factor limiting the productivity of terrestrial ecosystems. We used the method of spatiotemporal substitution and *Pinus massoniana* woodlands with different restoration history lengths as the research subject. In order to understand the effects of *Dicranopteris dichotoma* on nitrogen fixation during the vegetation restoration process, we measured the stable isotope ^{15}N , the nitrogen content of different components, and the ratios of different components of nitrogen to total nitrogen in the topsoil between *D. dichotoma* soil (WD) and non-*D. dichotoma* soil (ND). The results showed that *Dicranopteris dichotoma* coverage increased the total nitrogen (TN) content of the topsoil in all *Pinus massoniana* woodlands. The $\delta^{15}\text{N}$ values of WD were significantly decreased, from 33.8% to 83.1%, compared with those of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31370465); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600204)

收稿日期: 2017-08-27; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jshxie@163.com

ND ($P < 0.05$). With the increase of restoration time, the $\delta^{15}\text{N}$ value of WD significantly decreased, while the $\delta^{15}\text{N}$ value of ND did not significantly change ($P > 0.05$). The average contents of microbial biomass nitrogen (MBN), dissolved organic nitrogen (DON), and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) of WD were significantly higher than those of the ND under different restoration years ($P < 0.05$), but the content of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) had the complete opposite trend ($P < 0.05$). With the increase in the duration of restoration, the contents of MBN, DON, and NH_4^+ in topsoil increased, while $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content decreased. The ratios of different components of nitrogen to total nitrogen were in the following order: $\text{MBN} > \text{NH}_4^+\text{-N} > \text{DON} > \text{NO}_3^-\text{-N}$. Correlation analysis showed that the $\delta^{15}\text{N}$ values of topsoil had highly significant positive correlations with the content of $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and highly significant negative correlations with the others ($P < 0.01$). Thus, compared with ND, *Dicranopteris dichotoma* coverage was helpful in improving the contents of TN, MBN, DON, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in topsoil and reducing the risk of nitrate leaching loss during the vegetation restoration process, and promoted the retention and accumulation of soil nitrogen, which was beneficial to the restoration of the degraded red soil ecosystem.

Key Words: vegetation restoration; *Dicranopteris dichotoma*; nitrogen fixation; ^{15}N stable isotope; eroded red soil

氮是植物生长和发育所需的大量营养元素之一,也是大多数生态系统生产力的主要限制因子^[1]。土壤氮绝大部分以有机氮的形式存在,除氨基酸等小分子含氮化合物外,大部分有机氮需经土壤微生物矿化转化成无机氮才能被植物所吸收利用。植物在生态系统氮保持中起着重要作用,除把无机氮转化为有机氮之外,也能降低土壤氮素的淋溶损失,而且植物还可通过根系分泌物和凋落物增加土壤氮输入^[2],进而促进微生物生长,增强微生物氮的固定。

我国南方红壤区是仅次于黄土高原的第二大侵蚀区,开展了大量的植被恢复与重建实践工作,不仅改善了当地的生态与环境,而且有效促进了土壤氮素的积累^[3-5]。但另一方面,由于对林下植被恢复重视不够,仍然存在大面积的林下水土流失现象^[6]。芒萁作为南方红壤侵蚀区植被恢复过程中重要的先锋草被植物,不仅能有效防止水土流失,而且能提高土壤有机碳和氮素积累^[7]。在森林生态系统中氮的去向主要包括土壤固定、植物吸收、硝化-反硝化导致的气体损失、氮挥发以及径流、淋溶损失等^[8],其中反硝化和淋溶是氮素损失最重要的途径^[9]。然而在红壤侵蚀区,植被恢复如何影响氮的去向尤其是林下植被在土壤氮积累中的作用与贡献仍不清楚。土壤的 ^{15}N 自然丰度是氮循环的综合结果,可以提供氮输入、转化和输出的综合信息,已广泛用于植被恢复如何影响土壤氮循环过程的研究^[5,9-11]。本文以在严重侵蚀地上恢复的不同年限的马尾松林为研究对象,结合 ^{15}N 稳定同位素技术,对比林下芒萁覆盖地和裸露地土壤氮同位素以及不同形态氮组分的变化,探讨在植被恢复过程中芒萁增强土壤氮固持的机理,为侵蚀红壤区植被恢复提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省龙岩市长汀县河田镇($25^{\circ}33'\text{—}25^{\circ}48'\text{N}$, $116^{\circ}18'\text{—}116^{\circ}31'\text{E}$),海拔 300—500 m。该区属中亚热带季风气候,年平均气温 $17.5\text{—}18.8^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 1700 mm,年平均蒸发量 1403 mm。平均日照时间 1924.6 h,平均无霜期 260 d。地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,但已基本被破坏殆尽,现存植被主要以人工种植的马尾松(*Pinus massoniana*)和次生林为主,林下植被以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主。土壤为中粗粒花岗岩发育的红壤,抗蚀性弱,属南方典型强度侵蚀区,许多地方土壤 A 层流失殆尽, B 层出露,立地条件极差。随着经济不断发展和政府重视,河田镇植被恢复工作成效显著,植被覆盖率由 20 世纪 80 年代的 15%—35% 提高到目前的 65%—91%。

1.2 样地设置与样品采集

利用时空代换法,在典型红壤侵蚀区福建省龙岩市长汀县河田镇选取了土壤母岩均为花岗岩的不同恢复

年限的马尾松林地组成植被恢复系列, 分别为: 未治理地(简称 Y0)、恢复 12 年的马尾松林地(简称 Y12)、恢复 30 年的马尾松林地(简称 Y30)。其中 Y12 和 Y30 治理前均为土壤 A 层流失殆尽, B 层出露, 本底条件与 Y0 基本一致。样地基本情况见表 1。

2014 年 5 月在严重侵蚀退化红壤地上不同恢复年限(Y0、Y12、Y30)的马尾松林地上设置两种处理: 保留芒萁覆盖(WD)、与之毗邻的林下未生长芒萁的裸露地(ND)。在每个马尾松林芒萁覆盖区域设置 3 个 20 m×20 m 的标准样地, 作为保留芒萁覆盖处理, 同时以每个芒萁覆盖地相邻的无芒萁覆盖的林下裸露地作为参照, 其面积和形状依每个样地实际裸露情况确定, 面积不少于 10 m²。

在每个样地用取土钻(内径为 5 cm)按 S 型随机多点(15 个点)取 0—10 cm 土层的土壤并混合。取回的部分新鲜土样迅速冷藏, 带回实验室拣去石砾、植物根系和大于 2 mm 的碎屑并过 2 mm 土壤筛。取部分过 2 mm 土壤筛的新鲜土壤样品在室内阴凉处风干, 再进行研磨并过 0.149 mm 土壤筛, 存于密闭自封袋中, 用于土壤基本理化性质等的测定(表 2)。另一部分则立即存于密闭自封袋中, 贮藏在 4°C 的冰箱中保鲜, 用于土壤可溶性有机氮、微生物生物量氮和矿质氮等的测定。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic information of experiment plots

恢复年限 Restoration year	治理历史 Governance history	优势种 Dominant species	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	密度 Stem density/ (株/hm ²)	坡度 Slope/(°)
Y0	土壤侵蚀严重	马尾松+芒萁	2.0	3.1	1741	19
Y12	2002 年治理	马尾松+芒萁	7.0	7.4	3341	8
Y30	1984 年治理	马尾松+芒萁	13.7	14.0	1433	11

Y0: 未治理地 Without vegetation restoration; Y12: 12 年植被恢复地 vegetation restoration for 12 years; Y30: 30 年植被恢复地 vegetation restoration for 30 years

表 2 表层土壤(0—10 cm)基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of top soils (0—10 cm)

恢复年限 Restoration year	处理 Treatment	全碳 Total carbon/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	pH	砂粒含量 Sand/%	粉粒含量 Silt/%	黏粒含量 Clay/%
Y0	林下裸地 ND	1.51±0.10	0.20±0.02	5.00±0.05	43.23±0.14	37.85±0.14	18.92±0.21
	芒萁覆盖地 WD	6.10±1.02	0.30±0.04	4.78±0.10	43.28±0.15	33.85±0.07	22.88±0.12
Y12	林下裸地 ND	6.66±0.98	0.32±0.03	4.71±0.01	31.42±0.72	39.06±0.11	29.53±0.77
	芒萁覆盖地 WD	9.91±0.19	0.50±0.07	4.46±0.08	46.93±0.21	31.26±0.27	21.65±0.48
Y30	林下裸地 ND	4.55±0.61	0.31±0.05	4.96±0.09	43.09±0.46	29.83±0.77	27.07±0.31
	芒萁覆盖地 WD	11.70±0.40	0.40±0.05	4.72±0.05	58.03±0.16	19.78±0.35	20.99±0.21

林下裸地 non-D. *dichotoma* (ND); 芒萁覆盖地 with D. *dichotoma* (WD)

1.3 测定方法与数据处理

土壤全碳、全氮含量采用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario MAX, Hanau, Germany)测定; 土壤全磷测定采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮法提取, 使用连续流动分析仪(Skalar San++, Delft, Holland)测定; 土壤 pH 值采用玻璃电极 pH 计测定, 土水比 1: 2.5; 土壤颗粒组成用土壤粒径分析系统(SEDIMAT 4-12, UGT, Berlin, Germany)测定; 微生物生物量氮采用氯仿-熏蒸 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提法; 可溶性有机氮用去离子水浸提后用连续流动分析仪测定; 铵态氮和硝态氮用 KCL 浸提, 连续流动分析仪测定; 土壤 δ¹⁵N 值利用稳定同位素质谱分析仪(MAT 253, Thermo Scientific, Madison, USA)测定; 芒萁地上生物量采用烘干称重法测定。

所有数据通过 Excel 2013 软件进行统计处理, 利用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析、双因素方差分析和 Pearson 相关分析。采用 Origin 9.0 画图软件绘制图形。图表中的数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 植被恢复过程中芒萁覆盖对土壤氮同位素的影响

不同恢复年限的(Y0、Y12、Y30)芒萁覆盖地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值均极显著低于林下裸地土壤,分别降低了33.8%、60.4%、83.1% ($P < 0.01$) (图1)。植被恢复过程中,不同恢复年限的马尾松林林下裸地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值无显著差异,而芒萁覆盖地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值则呈显著降低趋势(图1)。恢复年限和覆盖类型及其两者间的交互作用都对表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值影响极显著。

2.2 土壤全氮及不同形态氮组分含量的变化

不同恢复年限马尾松林中,芒萁覆盖地表层土壤全氮含量均高于林下裸地,但其中Y12的两者之间没有显著差异,Y30的芒萁覆盖地表层土壤全氮含量最高,为林下裸地的2.13倍(表3)。同样,在所有样地中,表层土壤微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮含量均表现为芒萁覆盖地显著高于林下裸地($P < 0.05$),分别高161.9%—305.6%、38.6%—80.4%和81.8%—115.3%(表3);而表层土壤的硝态氮含量则相反,芒萁覆盖地的显著比林下裸地的低43.5%—74.5% ($P < 0.05$) (表3)。随着恢复年限的增加,表层土壤微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮含量均呈增加趋势(表3),Y12、Y30的3种氮组分的含量一般显著高于Y0 ($P < 0.05$);而硝态氮含量则呈下降趋势,Y0的硝态氮含量一般显著高于Y12和Y30 ($P < 0.05$)。

恢复年限和覆盖类型及其两者间的交互作用对表层土壤微生物生物量氮、可溶性有机氮、硝态氮影响极显著。表层土壤全氮和铵态氮在不同恢复年限和覆盖类型之间均表现为极显著差异,而恢复年限和覆盖类型间交互作用并无显著差异(表4)。

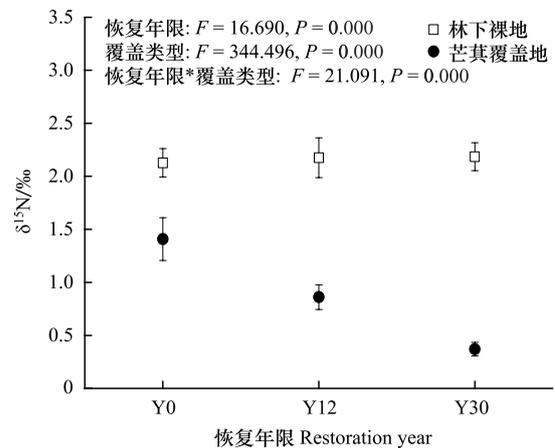


图1 不同恢复年限表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Fig. 1 $\delta^{15}\text{N}$ values of top soil in forest lands with different vegetation restorations

Y0: 未治理地 Without vegetation restoration; Y12: 12年植被恢复地 vegetation restoration for 12 years; Y30: 30年植被恢复地 vegetation restoration for 30 years

表3 表层土壤不同形态氮组分含量

Table 3 Nitrogen content of different components in top soil

恢复年限 Restoration year	处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen/ (mg/kg)	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen/ (mg/kg)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg/kg)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg/kg)
Y0	林下裸地 ND	0.27±0.01Bb	1.72±0.32Bb	0.83±0.03Bb	2.12±0.15Bb	0.69±0.12Aa
	芒萁覆盖地 WD	0.51±0.10Ba	4.52±1.10Ba	1.15±0.03Ba	4.57±0.89Ba	0.23±0.05Ab
Y12	林下裸地 ND	0.49±0.10Aa	2.32±0.72Bb	1.46±0.16Ab	5.15±0.90Ab	0.46±0.13Ba
	芒萁覆盖地 WD	0.57±0.04Ba	9.39±2.96Ba	2.57±0.15Aa	9.37±0.19Aa	0.12±0.03Bb
Y30	林下裸地 ND	0.34±0.07Bb	13.36±3.16Ab	1.59±0.14Ab	5.53±1.28Ab	0.23±0.05Ca
	芒萁覆盖地 WD	0.73±0.06Aa	38.94±6.77Aa	2.86±0.33Aa	10.59±0.95Aa	0.13±0.03Bb

不同大写字母表示同一处理不同恢复年限间差异显著;不同小写字母表示同一恢复年限不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 土壤不同组分氮含量所占的比例

表层土壤微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮占全氮的比例仅在Y12马尾松林中的芒萁覆盖地显著高于林下裸地,而在Y0和Y30马尾松林中则没有显著差异,硝态氮占全氮的比例则在不同恢复年限的马尾松林中均为芒萁覆盖地显著低于林下裸地。随着恢复年限增加,芒萁覆盖地和林下裸地微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮占总氮的比例呈上升趋势,硝态氮占全氮的比例则呈下降趋势(表5)。一般地,芒

其覆盖地和林下裸地不同组分氮占总氮比例大小依次为:微生物生物量氮>铵态氮>可溶性有机氮>硝态氮。其中微生物生物量氮的比例在 Y0 和 Y12 马尾松林中没有显著差异,而在 Y30 马尾松林中微生物生物量氮的比例比 Y0 分别显著提高了 5.94、6.18 倍(表 5, $P<0.05$),并显著高于铵态氮的比例。可溶性有机氮占全氮的比例低于 0.5%,随恢复年限的增加变化不大。无机氮主要以铵态氮为主,铵态氮占全氮比例为 0.77%—1.71%,而硝态氮占全氮的比例很低,仅占 0.02%—0.25%之间。

表 4 不同恢复年限和覆盖类型对表层土壤不同形态氮组分的双因素方差分析

Table 4 Two way ANOVA of nitrogen content of different components in top soil to restoration year and cover type

因素 Factors	全氮 Total nitrogen		微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen		可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen		铵态氮 Ammonium nitrogen		硝态氮 Nitrate nitrogen	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	恢复年限 Restoration year	7.649	0.007	85.774	0.000	89.206	0.000	54.729	0.000	20.054
覆盖类型 Cover type	48.017	0.000	56.732	0.000	124.308	0.000	98.273	0.000	66.947	0.000
恢复年限×覆盖类型 Restoration year × Cover type	6.636	0.110	19.869	0.000	13.257	0.001	3.816	0.052	7.915	0.006

表 5 表层土壤不同组分氮占总氮的比例

Table 5 Ratio of different components of nitrogen to total nitrogen in top soil

恢复年限 Restoration year	处理 Treatment	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen/%	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen/%	铵态氮 Ammonium nitrogen/%	硝态氮 Nitrate nitrogen/%
Y0	林下裸地 ND	0.63±0.13Ba	0.30±0.02Aa	0.77±0.03Aa	0.25±0.04Aa
	芒萁覆盖地 WD	0.91±0.27Ba	0.23±0.06Ba	0.95±0.42Ba	0.05±0.00Ab
Y12	林下裸地 ND	0.48±0.09Bb	0.31±0.07Ab	1.08±0.17Ab	0.09±0.01Ba
	芒萁覆盖地 WD	1.63±0.42Ba	0.45±0.02Aa	1.65±0.13Aa	0.02±0.00Bb
Y30	林下裸地 ND	3.90±0.57Aa	0.48±0.13Aa	1.71±0.77Aa	0.07±0.02Ba
	芒萁覆盖地 WD	5.40±1.32Aa	0.39±0.06Aa	1.46±0.18ABa	0.02±0.00Bb

2.4 土壤氮同位素与土壤各形态氮含量关系

表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与全氮、微生物生物量氮、可溶性有机氮、铵态氮均呈极显著的负相关关系,与硝态氮呈极显著的正相关关系(表 6)。土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值能在一定程度上反映土壤氮的保持情况。由此可见,微生物生物量氮、可溶性有机氮以及铵态氮含量高,可能更加有利于土壤氮素的保持。而硝态氮含量越多,被淋溶损失的风险可能更大,不利于土壤氮的保持。

表 6 表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与各形态氮含量关系Table 6 Relationship between nitrogen forms and soil $\delta^{15}\text{N}$ values in top soil

	全氮 Total nitrogen	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen
$\delta^{15}\text{N}$	-0.779 **	-0.703 **	-0.808 **	-0.828 **	0.705 **

** 表示两个因素之间极显著相关($P<0.01$); $n=18$

3 讨论

土壤稳定氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)是由长期的氮输入速率与损失速率共同决定,能间接反映陆地生态系统的氮循环特征,同时也能够用来评估生态系统的氮通量,且已被部分学者用作生态系统氮饱和状态的指示指标^[12-13]。相关研究表明,土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集与氮循环速率和氮损失增加有较强的相关性^[14-15]。表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值高,说明土壤氮循环系统较开放,对土壤氮的保护较弱,使较轻的¹⁴N 同位素优先通过淋溶和反硝化作用输

出系统,导致土壤表层 ^{15}N 富集^[16]。本文对不同恢复年限的马尾松林芒萁覆盖地和林下裸地表层土壤氮同位素的研究中发现,不同恢复年限之间马尾松林下裸地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异不显著,但3个恢复年限林下裸地的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均显著高于芒萁覆盖地(图1),这表明与芒萁覆盖地相比,林下裸地氮循环生态系统更加开放,有更多的氮被淋溶和以气态形式损失。同时随着恢复年限增加,芒萁覆盖地表层土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著降低(图1),则表明随着马尾松林恢复年限增加,土壤中氮的损失减小,土壤对氮素的保持能力加强。

在植被恢复过程中,植物通过凋落物和根系分泌物为土壤提供碳氮,影响土壤氮的输入^[17]。在本研究中,随着恢复年限的增加,马尾松林芒萁覆盖地表层土壤全氮含量呈增加趋势,到恢复30年(Y30)时,芒萁覆盖地表层土壤全氮含量显著大于其林下裸地(表3)。这是因为芒萁覆盖增加了地表枯死物和土壤中密布成网的芒萁根系,这都为土壤提供了丰富的氮素。与林下裸地相比,芒萁覆盖地由于芒萁的覆盖及生长,根系分泌物增加,加速了土壤中可溶性有机氮的生成。同时,芒萁产生的大量枯落物,为微生物的活动提供了充足的底物,促进了微生物活性,从而提高了土壤可溶性氮的含量(表3),也使得芒萁覆盖地土壤中的氮更多的转变为微生物生物量氮(表3),微生物生物量氮占全氮的比例逐渐提高(表5)。刘占锋等^[18]在不同恢复年限人工油松林以及胡婵娟等^[19]和吴建平^[20]在黄土丘陵沟壑区的研究也表明随着恢复年限增加微生物生物量氮含量呈增长趋势。而土壤微生物生物量氮含量的增加,会使土壤矿质氮含量降低,减少土壤无机态氮的损失,使土壤中 ^{15}N 贫化,从而增加土壤氮素的保持^[21]。同样,本研究的相关分析结果表明土壤全氮、可溶性有机氮、微生物生物量氮均与 $\delta^{15}\text{N}$ 值有极显著的负相关关系(表6),表明马尾松芒萁覆盖地由于芒萁的生长使土壤中不同形态氮含量增加,相对降低了生态系统中氮素的损失。

土壤铵态氮和硝态氮含量能反应土壤氮素供应情况,显著影响着土壤生产力^[22]。本研究中,无论是不同恢复年限之间的比较,还是芒萁覆盖地与林下裸地相比,都表现出铵态氮含量大于硝态氮含量(表3)。孟盈等^[23]在西双版纳不同热带森林的研究、鞠敏睿等^[24]对原始红松林和次生林的研究以及赵维俊等^[22]在祁连山青海云杉林的研究,其结果都表明铵态氮为土壤有效氮的主要赋存形式。这主要是由于铵态氮带正电荷,易与主要带负电荷的土壤胶体颗粒接触并被大量吸附,其含量受反硝化作用、淋溶的影响较弱。而硝态氮是阴离子,难以被带负电荷为主的土壤胶体吸附,且较容易被水淋溶损失,是氮素损失的重要途径^[25]。与未治理地(Y0)相比,恢复12年(Y12)和30年(Y30)的马尾松林林下芒萁覆盖度由15%分别增加至90%和85%(表7)。Y12和Y30马尾松林地上芒萁生物量极显著高于Y0(表7, $P < 0.01$),分别是Y0的22.68、18.95倍,芒萁地上生物量大幅度增加。无芒萁覆盖的林下裸地由于缺乏地表植物的保护,而研究区强降雨导致马尾松林林下水土流失严重,根据同位素分馏原理(较轻的同位素优先于重同位素参加反应)^[26],土壤中较轻的 ^{14}N 随地表径流和泥沙从森林生态系统中流失了,造成土壤中 ^{15}N 富集。而芒萁覆盖度的增加可以改善马尾松林林下水土流失现象,减少土壤氮素的侵蚀损失,产生土壤 ^{15}N 贫化。同时,芒萁等植物的生长主要吸收土壤中的铵态氮、硝态氮等无机氮,并将这些无机氮同化成体内的蛋白质等有机氮。而芒萁等植物的凋落物和残体在微生物的作用使其体内的氮素和养分又重新进入土壤中,如此循环往复,大大减少了本地生态系统中土壤氮素的流失,使土壤中的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低。与林下裸地相比,芒萁覆盖度的增加有助于减少马尾松林土壤中氮素的淋溶流失,使土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值逐渐降低,增强了土壤氮保持能力。

表7 芒萁地上生物量

Table 7 Aboveground biomass of *D. dichotoma*

恢复年限 Restoration year	芒萁盖度 Coverage/%	芒萁高度 Heigh/cm	地上生物量 Aboveground biomass/(g/m ²)	芒萁氮含量 <i>D. dichotoma</i> nitrogen/(g/kg)	芒萁总氮 Total <i>D. dichotoma</i> nitrogen/(mg/m ²)
Y0	15	23	39.1±17.7B	8.9±0.87A	348.2±157.2C
Y12	90	71	887.3±34.1A	8.0±0.52A	7098.6±273.0A
Y30	85	59	741.6±140.3A	7.4±1.39A	5488.1±1037.9B

同列不同大写字母表示恢复年限间差异显著($P < 0.05$)

4 结论

红壤侵蚀区马尾松林不同恢复年限(Y0、Y12、Y30)芒萁覆盖地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著低于其林下裸地。芒萁覆盖地表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值随着恢复年限增加显著降低而林下裸地不同年限间表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值却无显著差异。可见,芒萁覆盖增强了土壤对氮的保持能力,并且随着恢复时间的延长,氮保持能力也逐渐加强。随着植被恢复年限的增加,马尾松林芒萁覆盖地与林下裸地相比显著增加了表层土壤全氮、微生物生物量氮、可溶性有机氮和铵态氮的含量,降低了硝态氮含量。到恢复30年时,微生物生物量氮占全氮的比例最高,其次是铵态氮,硝态氮所占比例最小,说明在马尾松林植被恢复过程中土壤微生物对土壤氮的保持贡献较大,土壤氮的有效性高。表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与硝态氮呈极显著的正相关关系,与其他氮组分呈极显著的负相关关系,表明硝态氮含量越低,其他氮组分含量越高,可能越有利于土壤氮素的保持。

参考文献(References):

- [1] Grant R F. Nitrogen mineralization drives the response of forest productivity to soil warming: modelling in *ecosys vs.* measurements from the Harvard soil heating experiment. *Ecological Modelling*, 2014, 288: 38-46.
- [2] Cheng X L, Yang Y H, Li M, Dou X L, Zhang Q F. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 415-424.
- [3] Hernandez-Ramirez G, Sauer T J, Cambardella C A, Brandle J R, James D E. Carbon sources and dynamics in afforested and cultivated US Corn Belt soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(1): 216-225.
- [4] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 林仲桂, 宋光桃, 陈志阳, 赵林峰. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变. *生态学报*, 2014, 34(10): 2693-2701.
- [5] Dou X L, Xu X, Shu X, Zhang Q F, Cheng X L. Shifts in soil organic carbon and nitrogen dynamics for afforestation in central China. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 263-270.
- [6] 何圣嘉, 谢锦升, 周艳翔, 胥超, 吕茂奎, 杨玉盛. 南方红壤侵蚀区马尾松林下植被恢复限制因子与改造技术. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 118-124.
- [7] 陈坦, 江军, 杨燕华, 吕茂奎, 胥超, 付林池, 杨玉盛, 谢锦升. 植被恢复过程中芒萁对侵蚀红壤碳氮库的影响. *南昌工程学院学报*, 2014, 33(4): 23-27.
- [8] Sun Z G, Mou X J, Li X H, Wang L L, Song H L, Jiang H H. Application of stable isotope techniques in studies of carbon and nitrogen biogeochemical cycles of ecosystem. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(2): 129-148.
- [9] Fang Y T, Koba K, Makabe A, Takahashi C, Zhu W X, Hayashi T, Hokari A A, Urakawa R, Bai E, Houlton B Z, Xi D, Zhang S S, Matsushita K, Tu Y, Liu D W, Zhu F F, Wang Z Y, Zhou G Y, Chen D X, Makita T, Toda H, Liu X Y, Chen Q S, Zhang D Q, Li Y D, Yoh M. Microbial denitrification dominates nitrate losses from forest ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(5): 1470-1474.
- [10] Marin-Spiotta E, Silver W L, Swanston C W, Ostertag R. Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures. *Global Change Biology*, 2009, 15(6): 1584-1597.
- [11] Deng Q, Cheng X L, Yang Y H, Zhang Q F, Luo Y Q. Carbon-nitrogen interactions during afforestation in central China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69(1): 119-122.
- [12] Kahmen A, Wanek W, Buchmann N. Foliar $\delta^{15}\text{N}$ values characterize soil N cycling and reflect nitrate or ammonium preference of plants along a temperate grassland gradient. *Oecologia*, 2008, 158(2): 371-371.
- [13] Xu Y Q, He J C, Cheng W X, Xing X R, Li L H. Natural ^{15}N abundance in soils and plants in relation to N cycling in a rangeland in Inner Mongolia. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(3): 201-207.
- [14] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Organic matter turnover in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland: evidence from natural ^{13}C and ^{15}N . *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(11): 3197-3210.
- [15] Sollins P, Swanston C, Kleber M, Filley T, Kramer M, Crow S, Caldwell B A, Lajtha K, Bowden R. Organic C and N stabilization in a forest soil: evidence from sequential density fractionation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(11): 3313-3324.
- [16] Pardo L H, Hemond H F, Montoya J P, Fahey T J, Siccama T G. Response of the natural abundance of ^{15}N in forest soils and foliage to high nitrate loss following clear-cutting. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(7): 1126-1136.

- [17] Rutigliano F A, Ascoli R D, De Santo A V. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1719-1729.
- [18] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 胡会峰, 郑晓翾, 吴雅琼. 人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 1011-1018.
- [19] 胡婵娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 45-50.
- [20] 吴建平, 韩新辉, 任成杰, 杨改河, 任广鑫. 黄土丘陵区不同恢复年限退耕林地土壤碳氮差异及其影响因素. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(6): 123-133.
- [21] 王春阳, 周建斌, 夏志敏, 刘瑞. 黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响. *生态学报*, 2011, 31(8): 2139-2147.
- [22] 赵维俊, 刘贤德, 车宗玺, 敬文茂, 张学龙, 马钰. 祁连山东段青海云杉林土壤有效氮研究. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 99-102.
- [23] 孟盈, 薛敬意, 沙丽清, 唐建维. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 99-104.
- [24] 鞠敏睿, 郝敬梅, 崔晓阳. 原始红松林及其次生林土壤游离氨基酸季节动态变化. *东北林业大学学报*, 2010, 38(9): 74-77.
- [25] Owen A G, Jones D L. Competition for amino acids between wheat roots and rhizosphere microorganisms and the role of amino acids in plant N acquisition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4/5): 651-657.
- [26] Robinson D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology and Evolution*, 2001, 16(3): 153-162.