

祁连山哈溪林区移植前后土壤氮对比研究

裴雯¹, 车宗玺¹, 刘贤德², 车宗奇³, 张珊⁴, 成彩霞², 温娅丽²

(1. 甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000; 3. 张掖市环境保护局, 甘肃 张掖 734000; 4. 甘肃农业大学, 兰州 730070)

摘要: 研究不同海拔梯度森林土壤氮的分布特征, 对于合理利用森林资源、改善森林的生态功能都有重要意义。采用封顶埋管法, 对祁连山东段哈溪林区不同海拔梯度和不同植被类型的土壤氮进行了研究。结果表明: (1) 海拔2 650 m 青海云杉林土壤的初始 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量均最低, 海拔2 950 m 青海云杉林土壤的初始 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量均最高; 各海拔梯度青海云杉林土壤经培养后, 其 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量均减小。(2) 就不同植被类型而言, 青海云杉林土壤 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量均最高, 草地和灌丛土壤 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量较低, 且二者差异不大。草地和灌丛土壤培养后 TN 和 NH_4^+ -N 含量显著升高, NO_3^- -N 含量变化不大。(3) 某一海拔青海云杉林土壤移植到其他海拔青海云杉林培养后, 土壤 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量变化不大; 不同植被类型之间土壤相互移植培养后, 土壤 TN, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量变化明显, 不同植被类型对土壤氮的含量差异显著。

关键词: 土壤氮; 埋管法; 海拔梯度; 祁连山东段

中图分类号: S152.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0349-06

Research on Soil Nitrogen After Transplant in Haxi Forest of Qilian Mountains

PEI Wen¹, CHE Zongxi¹, LIU Xiande², CHE Zongqi³, ZHANG Shan⁴, CHENG Caixia², WEN Yali²

(1. Management Bureau in Qilian Mountains National Nature Reserve, Zhangye, Gansu 734000, China;

2. Academy of Water Resources Conservation Forest of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu 734000, China; 3. Environmental Protection Bureau of Zhangye, Zhangye, Gansu 734000, China; 4. Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Study of the distribution characteristics of soil nitrogen at different elevations is a significant effect for reasonably utilizing forest resources and improving ecology function of forest. The soil nitrogen of *Picea crassifolia* forest at different elevations and the soil nitrogen of different vegetation types were studied by close-top incubation method. The results are summarized as follows. (1) The original contents of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N of soil in *Picea crassifolia* forest at elevation of 2 650 m are the lowest; nevertheless, they are the highest at elevation of 2 950 m. The contents of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N of soils in *Picea crassifolia* forests at different elevations decrease after the soils are incubated at primary position. (2) For the different vegetation types, the contents of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N of *Picea crassifolia* forest are the highest, but they are lower at shrubs and grassland in which the content differences are not significant. The contents of TN and NH_4^+ -N of soils in shrubs and grassland increase after the soils are incubated at primary position. The contents of NO_3^- -N of soils in shrubs and grassland are stable. (3) The contents of TN, NH_4^+ -N and NO_3^- -N of soil *Picea crassifolia* forest at a certain elevation are stable when they are moved to other elevation. But these contents of nitrogen significantly vary when soils are moved to different vegetation types. It shows that vegetation type is one of the most critical factors influencing soil nitrogen. The contents of soil nitrogen in different vegetation types are significantly different.

Keywords: soil nitrogen; incubation method; elevation gradient; eastern Qilian Mountains

氮是植物生长必不可少的元素,植物体内许多重要有机化合物的组成都需要氮元素的参与^[1-3],植物在其正常生长发育过程中需要从土壤中吸收足够的氮素营养,但是占土壤氮库总量 95% 以上的有机态氮却不能被植物直接利用^[4-9],这些氮素只有通过微生物的矿化作用转化为土壤中的无机形态(NO_3^- -N, NH_4^+ -N)才能被植物吸收利用。森林土壤是地球氮素循环的重要环节,也是最重要的氮库,因此研究森林土壤氮库特点对氮循环研究具有特殊的意义^[10]。氮的可利用性限制了植物对土壤氮素的养分利用效率,直接影响到陆地生态系统生产力;氮的可利用性与群落演替、植物多样性、生态系统退化和健康之间存在反馈关系^[11-14]。在自然界中,人们忽视土壤植物系统氮循环的规律,为追求短期经济利益,大范围超载放牧、滥垦、滥伐,使植物系统内部凋落物的归还大大减少,打破了植物与土壤间原有的氮循环,在无人工氮肥输入的情况下,土壤氮库储量严重亏缺,使大量植物在无法摄入氮素营养不能完成其生活史的前提下逐渐消亡,导致生物多样性下降或土壤荒漠化形成^[15-16]。许多学者研究了林地土壤氮生态计量特征及其空间异质性,结果表明海拔、坡度、温度、水分、植被类型等是影响氮素空间变异的主要因素^[17-20]。氮素含量影响着森林生态系统的结构和功能,本文研究青海云杉林、灌丛和草地土壤氮含量以及将某一海拔青海云杉林土壤移到其他海拔梯度培养后土壤氮含量有何变化,进一步探讨氮素空间变化,为该地区森

林土壤氮素循环和水源涵养林可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于祁连山东段的甘肃省武威市天祝藏族自治县西北部,位于 $102^{\circ}01' - 102^{\circ}51'E$, $37^{\circ}16' - 37^{\circ}45'N$,属高寒半湿润气候。林区年平均气温 1.8°C , 1 月份平均气温 -10.9°C ,极端最高气温 28.5°C ,极端最低气温 -27.8°C ,平均温差 26.4°C 。年降水量约 400 mm,雨量主要集中分布在 5—9 月,占全年降水量的 76%,年蒸发量 1 234.8 mm,无霜期 110 d^[21-22]。该区土壤具有明显的山地特征,随海拔升高表现为明显的垂直分布特征,即山地灰钙土、山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土,其中,山地灰褐土和亚高山草甸土是该区植被生长较好的土壤。该区植被分布主要有青海云杉、祁连圆柏、高山湿性灌丛、中低山干性灌丛,垂直分布梯度明显。青海云杉林主要分布在海拔 2 500~3 200 m 的阴坡、半阴坡,林区土壤为山地灰褐土,有轻微的水土流失,林下苔藓、草本和灌丛植被分布较少,草本层优势种主要有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*),苔草(*Carex tristachya*),蕨生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)等。灌丛层优势种主要有吉拉柳(*Saix gilashaniea*),金露梅(*Potentilla fruticosa*),高山绣线菊(*Spiraea alpina*)等。

表 1 祁连山哈溪林区土壤氮野外培养点参数概况

培养点	海拔/m	东经	北纬	坡度	坡向	土壤类型	林下植被
1	2550	102°33'9.3"	37°28'8.4"	28°	220°	森林灰褐土	藓类云杉林,零星分布有苔草、马先蒿等草本植物
2	2600	102°32'53.2"	37°28'7.0"	16°	47°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有苔藓
3	2650	102°32'33.1"	37°28'16.2"	18°	350°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有小灌木
4	2700	102°32'15.7"	37°28'16.2"	15°	25°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有小灌木
5	2750	102°32'11.4"	37°28'13.2"	13°	10°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有小灌木
6	2800	102°32'6.3"	37°28'8.6"	18°	45°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有小灌木
7	2850	102°31'51.5"	37°28'28.3"	18°	45°	森林灰褐土	藓类云杉林,零星分布有苔草、马先蒿等草本植物
8	2900	102°31'38.5"	37°28'23.5"	15°	20°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有小灌木
9	2950	102°31'18.3"	37°28'16.1"	27°	315°	森林灰褐土	草类云杉林,零星分布有小灌木
10	3000	102°31'6.5"	37°28'8.6"	20°	320°	森林灰褐土	灌木、藓类云杉林,以灌木为主
11	3000 草地	102°31'6.2"	37°28'8.1"	8°	350°	栗钙土	草本为主,伴生沙棘
12	3000 灌丛	102°31'6.0"	37°28'7.4"	6°	340°	高山草甸土	以金露梅为主,伴生有银露梅、鬼箭锦鸡儿
13	3000 云杉	102°31'5.8"	37°28'6.4"	12°	320°	森林灰褐土	藓类云杉林,伴生有草本

1.2 试验设计

在祁连山东段哈溪林场森林分布典型区域沿海拔梯度和植被类型布设 13 个土壤氮培养点,包括 10 个不同海拔青海云杉林土壤氮培养点,3 个不同植被(草地、灌丛、青海云杉)土壤氮培养点,最低海拔为

2 550 m,最高海拔为 3 000 m,50 m 为一个高程点,调查每个海拔梯度培养点的坡度、坡向及植被情况。土壤氮野外培养从 2013 年 6 月初开始到 2014 年 6 月底结束,采用封埋管法^[7]对土壤进行为期 1 a 的培养。每个海拔梯度一次相邻取 11 管(PVC 管内径

为 5 cm, 长为 40 cm) 土壤, 1 管立即带回实验室分析测定全氮、铵态氮、硝态氮等, 结果作为初始值; 1 管继续在原来位置培养, 其余 9 管分别移植在其他海拔梯度培养点进行培养。具体操作为: 2 550 m 海拔上取 11 管, 1 管带回实验室分析, 1 管放在原来位置继续培养, 1 管移植在 2 600 m, 1 管移植在 2 650 m, 1 管移植在 2 700 m, 1 管移植在 2 750 m, 1 管移植在 2 800 m, 1 管移植在 2 850 m, 1 管移植在 2 900 m, 1 管移植在 2 950 m, 最后 1 管移植在 3 000 m; 其他海拔梯度具体操作和 2 550 m 处操作一致。另外, 在海拔 2 500 m 处选择一个青海云杉林培养点, 一个草地培养点, 一个灌丛培养点, 每个植被类型培养点取 3 管土壤, 1 管带回实验室分析, 结果作为初始值; 其余两管分别移植到另外两个植被类型培养点进行为期一年的培养, 培养结束后测其土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量。具体为: 青海云杉培养点取 3 管土壤, 1 管带回实验室, 1 管移植到草地培养点进行培养, 1 管移植到灌丛培养点进行培养; 草地培养点取 3 管土壤, 1 管带回实验室, 1 管移植到青海云杉培养点进行培养, 1 管移植到灌丛培养点进行培养; 灌丛培养点取 3 管土壤, 1 管带回实验室, 1 管移植到青海云杉培养点进行培养, 1 管移植到草地培养点进行培养。

1.3 样品采集与分析

取样时, 先把 PVC 管垂直打入土中(以土壤装满 PVC 管为准), 然后小心取出装满土样的 PVC 管(以免土样从管的底部漏出), 再把 PVC 管顶部与底部分别用尼龙网和塑料布封住, 这样既可以防止 PVC 管中的土壤接纳降水, 又可以防止管内的氮素向外流失, 编号后放回原处。培养结束后将样品及时带回实验室进行冷藏并分析处理。分别测定其铵态氮、硝态氮、全氮。采用 2 N 氯化钾—氧化镁—还原蒸馏法测定土壤中铵态氮和硝态氮, 用半微量开氏法测定土壤全氮。另外, 采用土壤剖面机械分层法, 对土壤进行了分层: 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm, 40—60 cm, 在试验期间用针式土壤温度记录仪对土壤温度进行了观测, 并对每层土壤水分和土壤容重利用 100 体积环刀法进行取样测定, 所有的测定因子均设置两个重复。

2 结果与分析

2.1 培养前后各海拔土壤氮的对比

由图 1 可知, 培养前海拔 2 900 m 土壤 TN 含量最高, 海拔 2 650 m 土壤 TN 含量最低; 培养后海拔 2 900 m 土壤 TN 含量依然最高, 海拔 2 750 m 土壤 TN 含量最低。海拔 2 650 m 培养后土壤 TN 含量略大于培养前土壤 TN, 海拔 2 900 m 培养前后土壤 TN 含量相等, 其余各海拔土壤 TN 含量培养后均略小

于培养前土壤 TN, 但是差别不显著。由图 2 可知, 培养前海拔 2 950 m 处 NH_4^+-N 含量最大, 海拔 2 650 m 处 NH_4^+-N 含量最小, 培养后各海拔梯度 NH_4^+-N 含量均下降且培养后的 NH_4^+-N 含量差别不大。各海拔培养后土壤 NH_4^+-N 含量较培养前下降趋势极显著, 这与王斌等^[7]研究结果是一致的。由图 3 可知, 培养前海拔 2 950 m 处 NO_3^--N 含量最高, 海拔 2 650 m 处 NO_3^--N 含量最低, 培养后各海拔梯度 NO_3^--N 含量均下降且培养后的 NO_3^--N 含量差别不大。不同海拔土壤 NO_3^--N 含量培养后下降也极显著。培养后 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量较培养前下降极显著, 这是因为采用封顶埋管法后, 管内氧气含量不断减少, 致使厌氧型的反硝化细菌数量增多, 反硝化细菌的反硝化作用加强, 导致硝态氮含量下降, 反过来又促进了铵态氮的硝化作用, 导致铵态氮含量也下降; 封管培养后管内与外部环境隔离, 避免或减小了与外部环境间的水热交换, 受光、热、水、气的影响减弱, 因此, 氮素循环主要是由管内的微环境条件决定的^[11]。另外, 培养前的 TN 含量、 NH_4^+-N 含量和培养后的 TN 含量、 NH_4^+-N 含量呈正相关关系, 培养前的 NO_3^--N 含量和培养后的 NO_3^--N 含量总体上呈负相关关系。

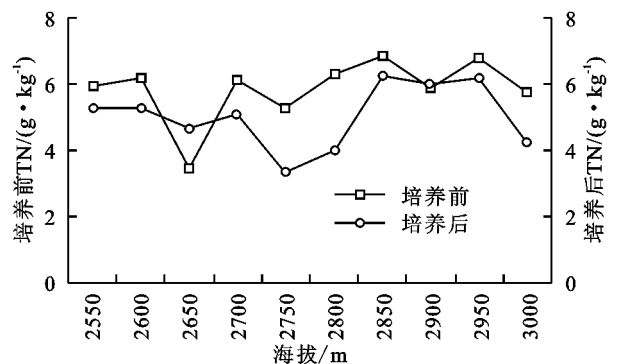


图1 不同海拔培养前后土壤 TN 含量变化

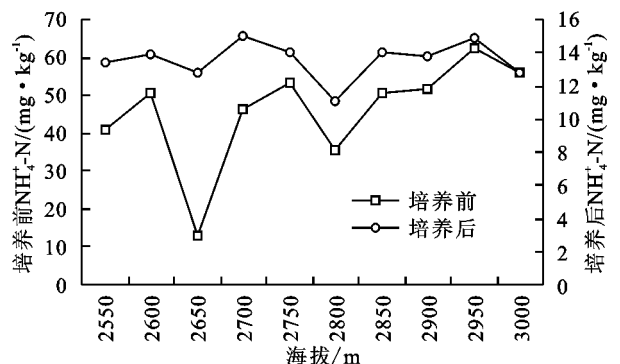


图2 不同海拔培养前后土壤 NH_4^+-N 含量变化

2.2 培养前后各植被类型土壤氮的对比

由图 4 可知, 培养前青海云杉土壤 TN 含量较高, 草地、灌丛二者土壤 TN 含量较低且相差不大。培养前 3 种植被类型的土壤 TN 含量差异极显著, 培养后不同植被类型土壤 TN 含量均升高并且培养后土壤 TN,

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量趋于一致。由图 5 可知,培养前青海云杉土壤 NH_4^+-N 含量较高,草地、灌丛二者土壤 NH_4^+-N 含量较低且相差不大。培养前 3 种植被类型的土壤 NH_4^+-N 含量相差很大,培养后不同植被类型土壤 NH_4^+-N 含量均升高且培养后土壤 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量趋于一致。图 6 表明,培养前青海云杉土壤 NO_3^--N 含量较高,草地、灌丛二者土壤 NO_3^--N 含量较低且相差不大。草地和灌丛土壤 TN 含量升高极显著,这是因为草地和灌丛土壤的温度较青海云杉土壤温度要高,有利于微生物活动,进而更多地将单质 N 转化为铵氮,增加了土壤 TN 含量。培养后云杉土壤 NH_4^+-N 含量下降,草地和灌丛土壤 NH_4^+-N 含量升高,这是因为青海云杉林土壤水分较高,有利于铵态氮的硝化作用,而草地和灌丛土壤温度较高,水分蒸发快,硝化受到抑制^[7,14,17]。培养后,3 种植被类型的土壤 NO_3^--N 含量均下降,这是因为 PVC 管封顶前后 3 种植被类型的土壤 NO_3^--N 含量差别很明显,培养后不同植被类型土壤 NO_3^--N 含量均下降且培养后土壤 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量趋于一致。培养后云杉土壤 TN 含量升高,土壤温度比培养前温度高,管内空气相对较少,有利于反硝化作用的进行,所以培养后 NO_3^--N 含量会下降。

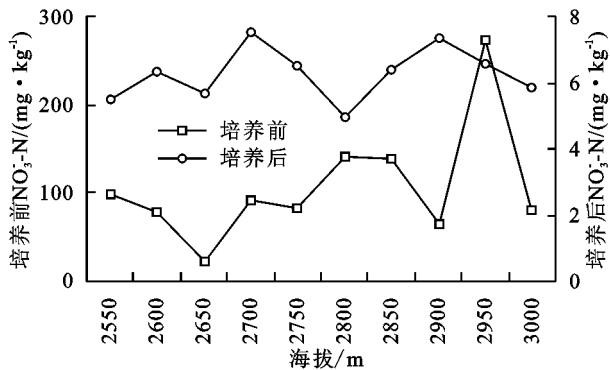


图3 不同海拔培养前后土壤 NO_3^--N 含量变化

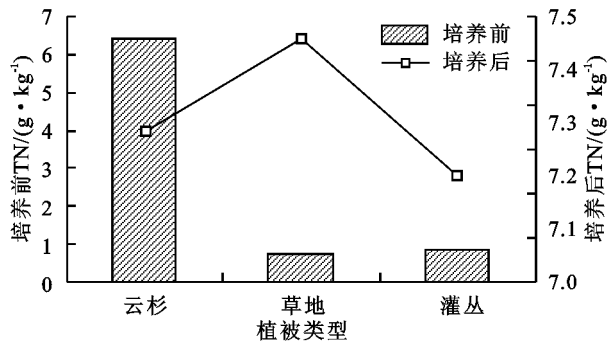


图4 不同植被类型培养前后土壤 TN 含量

2.3 原位培养土壤氮与移植培养后各海拔土壤氮的对比分析

图7,图8和图9是把各海拔原位培养的土壤 TN 、

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量和把每个海拔土壤移植到其他海拔培养后的 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量进行比较。由图7可知,海拔 2 700 m、2 750 m、2 850 m 以及 3 000 m 的土壤移植到其他海拔培养后的 TN 含量比在原地培养的 TN 含量有明显升高,其他海拔原位培养的 TN 含量和移植后培养的 TN 含量无显著差异。图8和图9表明原位培养 NH_4^+-N 含量和 NO_3^--N 含量与每个海拔移植到其他海拔培养后的 NH_4^+-N 含量和 NO_3^--N 含量没有明显差异。

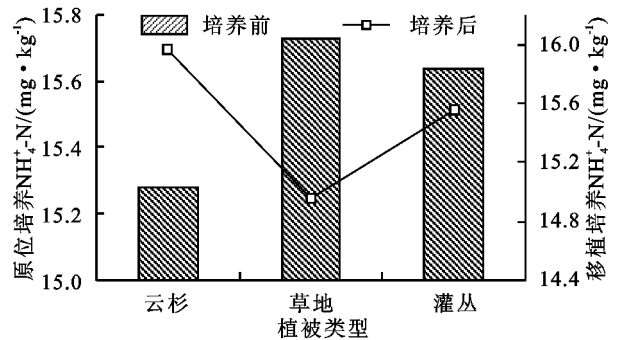


图5 不同植被类型培养前后土壤 NH_4^+-N 含量

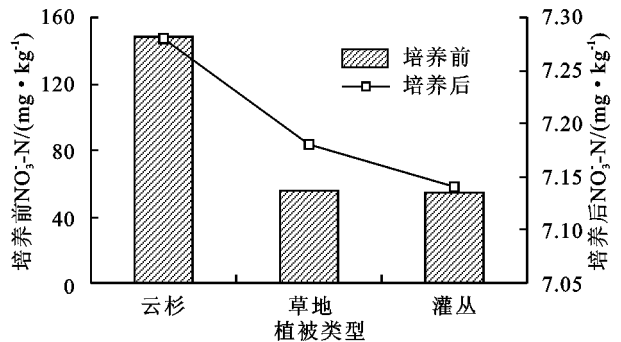


图6 不同植被类型培养前后土壤 NO_3^--N 含量

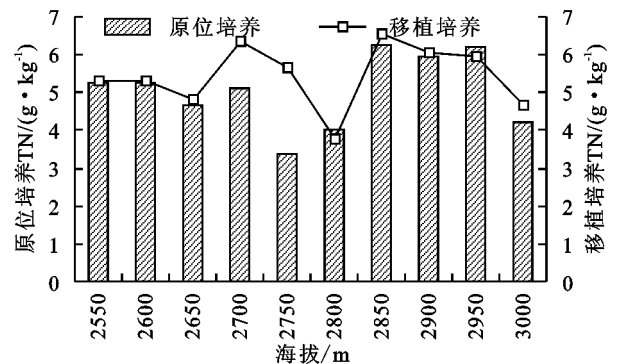


图7 原位培养 TN 含量与移植到其他海拔培养后 TN 含量关系

2.4 原位土壤氮与移植培养后各植被类型土壤氮的对比分析

图10—12是各植被类型土壤原位培养的 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量和把每个植被类型土壤移植到其他植被类型培养后的 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量进行比较。从图10看出,青海云杉和灌丛土壤移植到其他植被类型培养后的 TN 含量比在原地培养的 TN 含量有明显升高,草地土壤移植到其他植被类型

培养后的 TN 含量和在原位培养的 TN 含量相比下降很明显。图 11 表明,青海云杉土壤移植到其他植被类型培养后的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比在原位培养的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显升高,草地和灌丛土壤移植到其他植被类型培养后的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和在原位培养的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量相比下降很明显。图 12 中,青海云杉原位培养土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于将青海云杉土壤移植到草地和灌丛林培养后的含量,草地原位培养土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于将草地土壤移植到青海云杉林和灌丛林培养后的含量,而灌丛林原位培养的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量也低于将灌丛林移植到青海云杉林和草地培养后的含量。不同植被类型土壤相互移植培养后土壤 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均表现出了明显的变化,说明植被类型对土壤氮的影响很明显。

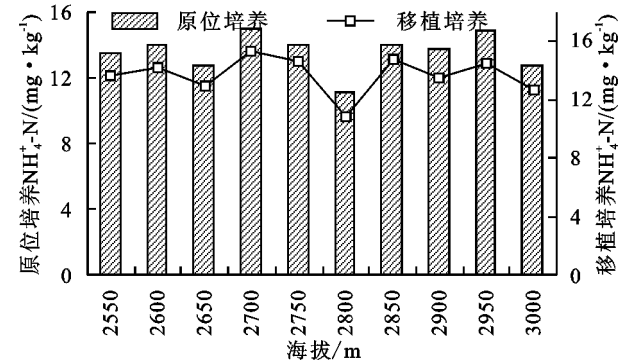


图 8 原位培养 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与移植到其他海拔培养后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量关系

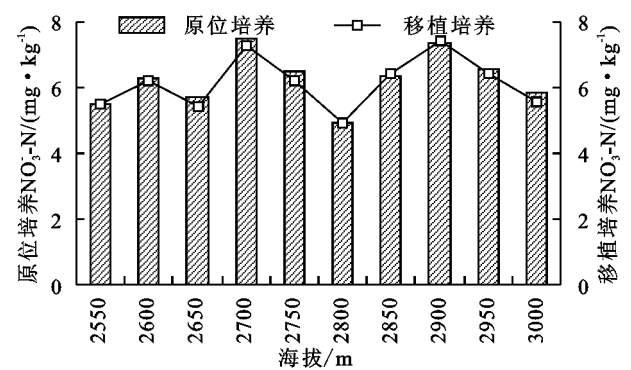


图 9 原位培养 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与移植到其他海拔培养后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量关系

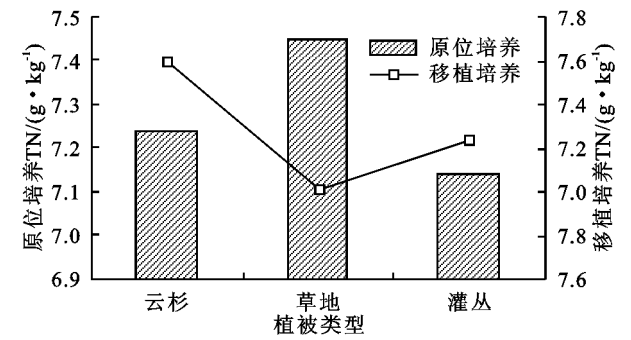


图 10 不同植被类型原位培养 TN 含量和移植培养后 TN 含量关系

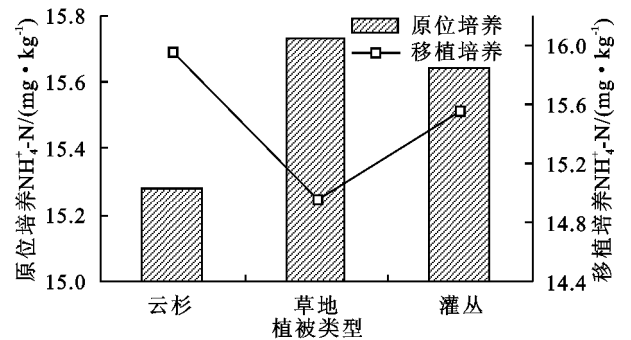


图 11 不同植被类型原位培养 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和移植培养后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量关系

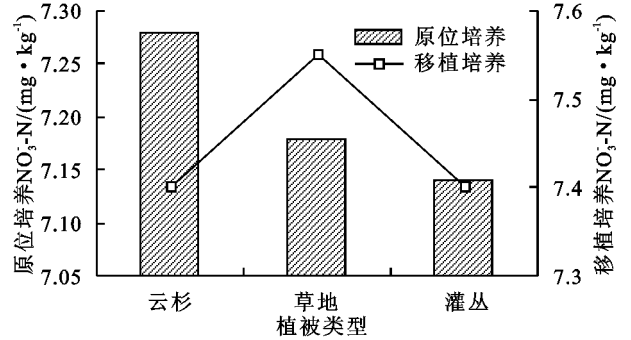


图 12 不同植被类型原位培养 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量和移植培养后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量关系

3 结论

(1) 本试验采用封顶埋管法对祁连山东段哈溪林区土壤氮含量进行研究,这是因为在众多方法中封顶埋管法能避免降雨淋溶的影响,保持原有的土壤水分动态和土壤结构,操作简单、成本低,而且精度较高,能给土壤氮净矿化可靠估计^[7]。但由于研究地区山地土壤根系、石砾较多,埋管时 PVC 管容易破碎,因此为了提高试验的准确性,获得可靠数据,本方法在培养管的取材方面有待进一步改进。

(3) 土壤养分在海拔上的变化受地质地貌特征、山体隆起高度、气候、植被等因素的综合影响,导致垂直带上存在差异性^[11,17]。本试验得出:(1)海拔梯度上,青海云杉林土壤培养前的 TN 含量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和培养后的 TN 含量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈正相关关系,培养前的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量和培养后的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量总体上呈负相关关系;移植培养表明,培养后的青海云杉林土壤 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与培养地点(温度、水分、土壤容重等)没有很大关系,这可能是因为 PVC 培养管条件下水分、温度等条件一致,微环境条件更加均一,使得土壤氮含量变化不大,这里还有待进一步的研究。(2)对于植被类型而言,培养前后青海云杉林、草地、灌丛土壤 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化较大,青海云杉林土壤氮含量明显高于草地

和灌丛土壤氮含量,草地和灌丛土壤氮含量也有差别;说明植被类型对土壤氮含量的影响。这主要是因为青海云杉林下植被丰富,有草本也有灌丛,造成青海云杉林下堆积很厚的枯落物,而枯枝落叶层对土壤养分的贡献很大;相反,由于草地和灌丛林地土壤植被稀疏,枯枝落叶较少,且草地和灌丛一般在阳坡,接收的太阳辐射相对较多,土壤含水量比青海云杉林低,再加上放牧影响,导致了轻微的水土流失,进而有一部分养分也随之流失,最终造成草地和林地土壤氮含量较青海云杉林地土壤氮含量低。

(3) 对不同海拔土壤移植到其他海拔培养后土壤氮含量的研究发现,在原来位置培养后的土壤氮含量和移植到其他海拔培养后的土壤氮含量并没有发生明显变化,而没有进行培养的土壤氮含量和培养后的土壤氮含量有明显差异,这表明我们以后应将研究重点集中在探索新的培养方法上面,从而更全面地了解森林土壤氮循环的机理机制,为森林可持续经营提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王启基,李世雄,王文颖,等. 江河源区高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸植物和土壤碳、氮储量对覆被变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 885-894.
- [2] 赵哈林,李玉强,周瑞莲. 沙漠化对科尔沁沙质草地生态系统碳氮储量的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2412-2417.
- [3] 张春华,王宗明,任春颖,等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮储量的空间特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 631-639.
- [4] Jones A G, Power S A. Field-scale evaluation of effects of nitrogen deposition on the functioning of heathland ecosystems[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(2): 331-342.
- [5] 殷睿,徐振锋,吴福忠,等. 川西亚高山不同海拔3种森林群落土壤氮转化的季节动态[J]. 林业科学, 2014, 50(7): 1-7.
- [6] 王丽芹,齐玉春,董云社,等. 冻融作用对陆地生态系统氮循环关键过程的影响效应及其机制[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 1-14.
- [7] 王斌,陈亚明,周志宇. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤氮素矿化作用的研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 483-490.
- [8] 柳维扬,高艳红,王家强,等. 水分因素对绿洲荒漠过渡带土壤氮矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 89-94.
- [9] 张树兰,杨学云,吕殿青,等. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2147-2153.
- [10] 张春娜,延晓冬,杨剑虹. 中国森林土壤氮储量估算[J]. 西南农业大学学报:自然科学版, 2004, 26(5): 572-575, 579.
- [11] 傅华,裴世芳,张洪荣. 贺兰山西坡不同海拔梯度草地土壤氮特征[J]. 草业学报, 2005, 14(6): 50-56.
- [12] 吴建国,韩梅,苒伟,等. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 39-46.
- [13] 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.
- [14] 傅民杰,王传宽,王颖,等. 四种温带森林土壤氮矿化与硝化时空格局[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3747-3758.
- [15] Seo K W, Heo S J, Son Y, et al. Soil moisture condition and soil nitrogen dynamics in a pure *Alnus japonica* forest in Korea[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2011, 7(1): 93-99.
- [16] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [17] 刘少冲,段文标. 红松阔叶混交林林隙土壤养分的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 142-146.
- [18] 杨秀清,韩有志,李乐,等. 华北山地典型天然次生林土壤氮素空间异质性对落叶松幼苗更新的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4656-4664.
- [19] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- [20] 杨文,周脚根,王美慧,等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 133-141.
- [21] 赵维俊,刘贤德,车宗玺,等. 祁连山东段青海云杉林土壤有效氮研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 99-102.
- [22] 车宗玺,刘贤德,车宗奇,等. 祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 164-169.