

DOI: 10.5846/stxb201607211485

赵河, 张志铭, 赵勇, 祝忆伟, 杨文卿, 杨喜田. 模拟氮沉降对荆条灌木“肥岛”土壤养分的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6014-6020.

Zhao H, Zhang Z M, Zhao Y, Zhu Y W, Yang W Q, Yang X T. Effects of simulated nitrogen deposition on soil nutrients of *Vitex negundo* L. var. “fertile islands”. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6014-6020.

## 模拟氮沉降对荆条灌木“肥岛”土壤养分的影响

赵 河, 张志铭, 赵 勇\*, 祝忆伟, 杨文卿, 杨喜田

河南农业大学林学院, 郑州 450000

**摘要:** 氮沉降的增加, 可能会对土壤养分造成更为显著的影响, 目前关于大气氮沉降对植物“肥岛”效应中土壤养分的影响鲜有报道。于河南省太行山南麓地区, 以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  为供施氮源, 按土层深度采集土样, 以模拟氮沉降方法 (3 个水平, 无氮 CK、低氮  $2 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  处理、中氮  $12 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  处理和高氮  $24 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  处理), 分析了氮沉降对太行山荆条灌木 (*Vitex negundo* L. var.) “肥岛”土壤中有有机质、全氮和速效磷含量的影响。结果表明: 灌木“肥岛”中全氮和速效磷含量, 总体表现出随氮沉降量增长而增加的趋势; 氮沉降显著增加了土壤表层有机质、氮、磷的含量; 高氮沉降与 CK 相比引起的各土层间养分差异更显著; 随着氮沉降水平的增加, 冠幅内外和土层间养分差异增大, 土壤养分的增长率随之加大; 氮沉降在一定程度内加剧了“肥岛”的富集效应, 且氮沉降量越大, 这种富集效应越显著。这些研究结果可为研究灌木“肥岛”对外源氮的响应机制及保育作用提供参考。

**关键词:** 荆条; 氮沉降; 肥岛; 影响; 土壤养分

## Effects of simulated nitrogen deposition on soil nutrients of *Vitex negundo* L. var. “fertile islands”

ZHAO He, ZHANG Zhiming, ZHAO Yong\*, ZHU Yiwei, YANG Wenqing, YANG Xitian

College of Forestry of He'nan Agriculture University, Zhengzhou 450000, China

**Abstract:** Nitrogen deposition may have a significant effect on soil nutrients; however, research regarding the influence of atmospheric nitrogen deposition on the soil nutrients of the plant “fertile islands” is limited. In this field study, we analyzed the *Vitex negundo* L. var. “fertile islands” distributed in the southern foot of the TaiHang Mountain Range, Henan Province. Simultaneously, ammonium nitrate ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) was selected as the nitrogen source, and soil samples were collected from different soil depths. The research simulated nitrogen deposition (three levels, including a low-nitrogen treatment,  $2 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; secondary-nitrogen treatment,  $12 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; and high-nitrogen treatment,  $24 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) to analyze the impacts on organic matter, total nitrogen, and available phosphorus contents embedded in the “fertile islands”. The results demonstrated that the amount of total nitrogen and available phosphorus contents in “fertile islands” increased with the increase in nitrogen deposition. Organic matter, nitrogen, and phosphorus contents on the soil surface increased obviously with increased nitrogen deposition. Compared with that of the control, the differences in the nutrient contents of soil layers caused by high nitrogen deposition were more obvious. Nutrient differences between the crown and soil layers increased, and the soil nutrients increased with the increase in nitrogen deposition. Nitrogen deposition intensified the “fertile island” aggregation effect to a certain extent, which became more prominent as a result of the increased nitrogen deposition. The results provide a baseline to analyze the response mechanisms and conservation function of nitrogen fertilization in “fertile islands”.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270750)

收稿日期: 2016-07-21; 网络出版日期: 2017-04-25

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

**Key Words:** *Vitex negundo* L. var.; nitrogen deposition; fertile island; interactivity; soil nutrients

人类活动向大气中排放的大量氮化物,使得自然界中氮沉降日益加剧,而外源氮含量的增加将改变土壤养分原始状态,影响植物的生长,对生态系统结构产生较大影响<sup>[1-3]</sup>。近年来,我国陆地生态系统中氮沉降量出现显著升高,区域性的“氮富集”不断出现<sup>[4,5]</sup>。已有研究表明,氮沉降能够影响土壤氮素矿化和硝化速率<sup>[6-8]</sup>,导致林地氮素流失<sup>[9]</sup>;加快土壤溶液系统的酸化速率<sup>[10]</sup>;对森林生态体系中土壤质量和植物根系微生物产生影响<sup>[11-14]</sup>;与此同时,植物“肥岛”效应能够促进生态系统的保持和恢复<sup>[15-17]</sup>,然而目前有关氮沉降增加对植物“肥岛”效应的影响的相关研究较少<sup>[18]</sup>。因此关于植物“肥岛”现象受氮沉降影响的变化机制需要进一步研究。

太行山区是河南省生态环境最为脆弱的地区之一,荆条灌木(*Vitex negundo* L. var.)是太行山地区的重要植被类型,其分布极广,也是区域群落演替的重要阶段,在改善生境和提高植被质量方面具有至关重要的作用。与此同时,灌木荆条群落又具有“肥岛”效应,及土壤养分在单株乔木(灌木)冠幅下产生聚集的现象<sup>[19-21]</sup>,外加氮源可能会改变灌木的“肥岛”效应。因此,本试验拟在人工施氮条件下,通过对该区域荆条灌木“肥岛”方面进行研究,探索不同氮处理对“肥岛”土壤养分的影响,旨在揭示该区域典型植物—荆条灌木在氮变化环境下,其土壤养分结构的变化过程,并为提高林木幼苗的成活率和了解植物对氮素适应策略提供帮助,有利于当地荒山绿化、水土保持等生态系统恢复。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究试验地位于太行山南麓地区,借助于当地国家林业局黄河小浪底森林生态站。试验地区的地理坐标 E112°28′—112°30′, N35°01′—35°03′, 海拔 337—342m。该区气候为暖温带大陆性季风气候, 年均气温 14.3℃, 平均≥5℃的活动积温 50610℃, 年均日照时间 2370.5 h, 年际间变化 1948.5—2602.0 h, 年均日照率 54%, 年际间变幅 44%—50%, 当地山区土壤主要为褐土, 土壤 pH 值 7.0—7.5, 其母岩组成主要为砂岩和页岩。当地主要群落类型以乔木、灌木为主, 其中灌木主要有荆条(*Vitex negundo* L. var.)、酸枣(*Ziziphus jujube*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等; 乔木主要有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等; 草本植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、魁蒿(*Artemisia princeps*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、荩草(*Arthraxon heterophylla*)、地黄(*Rehmannia glutinosa*)等。荆条因其耐土壤干旱和瘠薄的特性, 是当地分布最为广泛的灌木之一。

### 1.2 试验设计与方法

#### 1.2.1 试验设计和样品采集

于 2015 年 3 月, 在太行山南麓地区选择生长情况及立地条件基本一致的 4 株荆条单株, 以每株灌木为中心, 建立 4 个 5m×5m 的样方, 同时为避免灌木间相互干扰, 选取时确保单株荆条距离周围其他灌丛的距离大于 3m。分别于荆条“肥岛”效应范围下的灌木冠幅内(具荆条茎基 60cm 处)和冠幅外(具荆条茎基 190cm 处)各选择 3 处样点, 每个样点作为一次重复, 并在各样点的垂直方向上选取 0—5cm、5—10cm 和 10—20cm 共 3 个土层, 用取土刀在每个样采集 500g 土样。模拟氮沉降中, 氮沉降量依次为无氮沉降(CK)处理、低氮沉降 2gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(LN)处理、中氮沉降 12gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(MN)处理和高氮沉降 24gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(HN)处理。同时采用配置溶液喷施的方式进行施氮(供施氮肥为 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, 纯度 99.5%), 以荆条茎基为中心的 5m×5m 样地内, 将样方所需 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>溶解于清水中, 装入喷雾器, 喷雾器杆置于各样方上方 2m 高度, 来回均匀喷施, 对照(CK)仅喷施等量清水。分别于 3 月、4 月、5 月进行施氮, 共施氮 3 次。采集第 1 次未喷施氮肥前的土壤, 作为施氮前土样, 于 6 月及第 3 次施氮后 30d 再次取土, 作为氮沉降后的土样。

#### 1.2.2 分析方法和数据处理

采用凯氏定氮法对全氮(TN)进行测定; 采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷(AP)含量; 采用重

铬酸钾容量法测定有机质(SOM)<sup>[22]</sup>。采用 Excel 软件制图和 SPSS 17.0 软件进行数据分析。

$$\text{土壤养分增长率} = \frac{\text{施氮后} - \text{施氮前}}{\text{施氮前}} \times 100\%$$

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮沉降水平对荆条“肥岛”土壤养分的影响

#### 2.1.1 全氮

氮沉降后不同氮沉降水平引起的土壤养分显著性差异的分析表明(表 1),荆条“肥岛”土壤养分总体表现出 HN 处理>MN 处理>LN 处理的变化趋势。与 CK 相比较,冠幅内 0—5cm 土层的全氮含量显著高于其他土层,达 1.18g/kg;在 LN 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的全氮含量显著高于冠幅内和冠幅外的 5—20cm 土层,达 1.37g/kg;在 MN 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的全氮含量显著高于冠幅内和冠幅外的 10—20cm 土层,冠幅外 0—5cm 土层显著高于冠幅外 5—20cm 土层;在 HN 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的全氮含量显著高于冠幅内 10—20cm 和冠幅外 5—20cm 土层。表明荆条“肥岛”中冠幅内外和土层深度的全氮含量差异受氮沉降的影响而发生变化。

表 1 不同氮沉降水平下荆条“肥岛”中土壤养分的差异

Table 1 The variations of *Vitex negundo* L. var. "fertile island" soil nutrient by different nitrogen treatment levels

土壤养分 Soil nutrient	采样位置 Sampling location	土层 Soil depth/cm	处理水平 Treatment levels			
			CK	LN	MN	HN
全氮 Total N(g/kg)	冠幅内	0—5	1.18±0.21Ab	1.37±0.16Aab	1.24±0.11Aab	1.71±0.03Aa
		5—10	0.79±0.08Ba	0.77±0.07Ba	1.00±0.05ABa	1.18±0.28ABa
		10—20	0.67±0.04Bb	0.67±0.05Bb	0.74±0.02Bab	0.84±0.06Ba
	冠幅外	0—5	0.74±0.09Ba	1.12±0.23ABa	1.10±0.16Aa	1.15±0.26ABa
		5—10	0.60±0.02Ba	0.79±0.11Ba	0.79±0.05Ba	0.88±0.27Ba
		10—20	0.66±0.07Ba	0.64±0.16Ba	0.70±0.05Ba	0.77±0.03Ba
速效磷 Available P/(mg/kg)	冠幅内	0—5	8.96±1.62Ab	13.88±2.27Aab	18.47±2.85Aa	21.47±3.01Aa
		5—10	3.33±0.73Bc	4.39±0.73Bbc	7.38±0.27Bab	10.06±2.08Ba
		10—20	1.71±0.34Bb	6.12±1.22Bab	4.17±1.38Bb	9.41±2.27Ba
	冠幅外	0—5	2.65±0.52Bb	5.16±0.44Bab	8.33±3.33Bab	10.62±1.79Ba
		5—10	2.09±0.13Bb	4.20±1.08Bab	5.25±1.08Ba	5.32±0.56Ba
		10—20	1.61±0.14Ba	4.19±0.77Ba	3.15±1.58Ba	4.42±0.67Ba
有机质 Organic matter/(g/kg)	冠幅内	0—5	25.25±1.85Ab	26.86±1.96Ab	28.49±2.82Aab	35.38±2.73Aa
		5—10	15.59±1.95Cb	16.23±1.06Cab	20.72±2.97Bab	23.42±2.15BCa
		10—20	13.65±1.50Ca	12.30±1.18CDa	17.47±1.67BCa	11.57±0.10Da
	冠幅外	0—5	22.59±1.40ABa	21.75±1.38Ba	23.29±2.72ABa	26.12±2.45Ba
		5—10	17.20±2.78BCa	12.09±1.04CDa	11.27±0.15Ca	17.85±3.55CDa
		10—20	11.81±1.14Ca	9.53±0.85Da	11.00±1.45Ca	12.65±1.86Da

大写字母代表同列 5%显著水平;小写字母代表同行 5%显著水平( $P<0.05$ )

#### 2.1.2 速效磷

在 CK 处理、LN 处理、MN 处理和 HN 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的速效磷含量均显著高于其他土层,依次达到 8.96、13.88、18.47 和 21.47mg/kg。HN 处理在冠幅内 0—5cm 土层显著高于冠幅内外其他土层;MN 处理在冠幅内 0—10cm 土层和冠幅外 5—10cm 土层的速效磷含量显著高于 CK;LN 处理在各采样点相对于 CK 均无显著性差异。表明随着氮沉降量的增加,氮沉降对土壤速效磷含量影响逐渐加大。

#### 2.1.3 有机质

在 CK 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的有机质含量最高,达 25.25g/kg,其次是冠幅外 0—5cm 土层;在 LN

处理中,冠幅内 0—5cm 土层的有机质含量显著高于其他冠幅内外土层,达 26.86g/kg;在 MN 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的有机质含量最高,达 28.49g/kg;在 HN 处理中,冠幅内 0—5cm 土层的有机质含量显著高于其他冠幅内外土层,达 35.38g/kg,同时 HN 处理在冠幅内 0—5cm 和 5—10cm 土层显著高于 CK。表明氮沉降能够影响荆条“肥岛”土壤有机质含量。

## 2.2 模拟氮沉降下荆条“肥岛”冠幅内外的 0—20cm 土层养分均值的变化

由图 1 可知,荆条“肥岛”0—20cm 土层养分均值,均为冠幅内高于冠幅外;荆条“肥岛”冠幅内土壤全氮、速效磷和有机质含量总体表现出随氮沉降量增长而增加的趋势。其中土壤中的全氮和速效磷含量方面,均表现出随氮沉降量的增加,冠幅内外的差异逐渐加大;有机质含量方面,冠幅内表现出随氮沉降增长而增长,冠幅外则出现先下降后增长的趋势。这反映出土壤全氮、速效磷和有机质向冠幅内富集,氮沉降加剧了灌木“肥岛”效应。

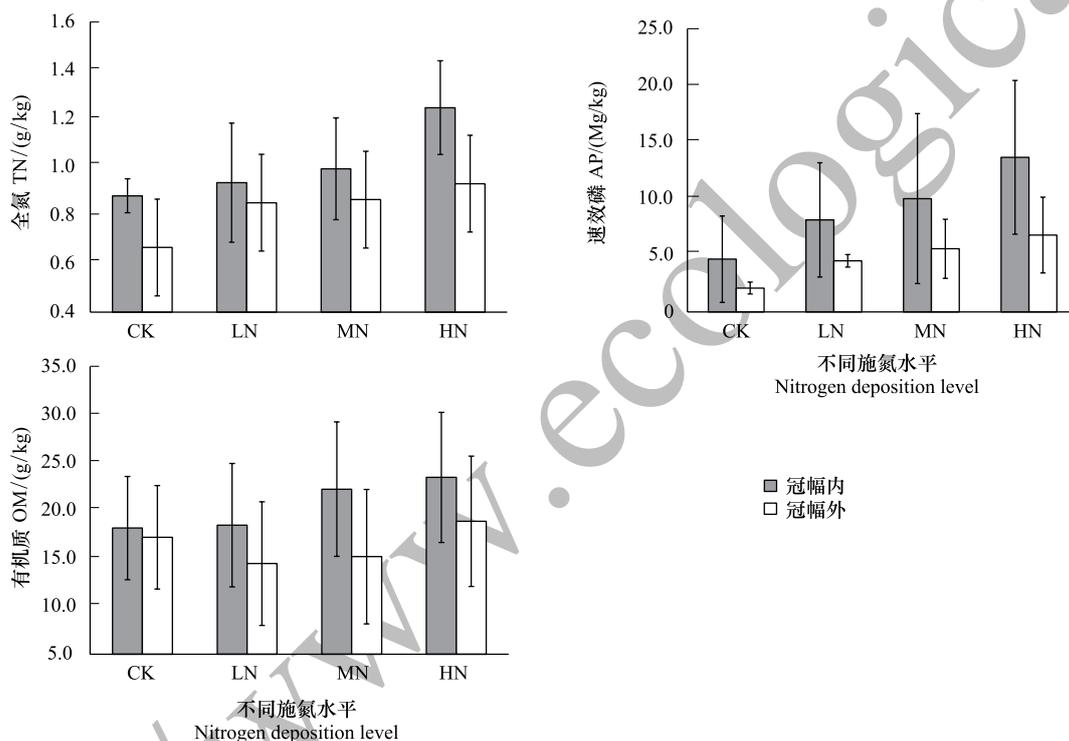


图 1 荆条“肥岛”0—20cm 土层养分均值的变化

Fig.1 The variation of *Vitex negundo* L. var. "fertile island" soil nutrient in 0—20 cm soil layer

## 2.3 模拟氮沉降前后荆条“肥岛”中土壤养分增长率

从增长率总体来看,氮沉降明显增加了土壤表层有机质、氮、磷的含量(图 2)。氮沉降增加了荆条“肥岛”中土壤全氮含量,通过对氮沉降后不同取样点的全氮含量与氮沉降前比较分析,其中 HN 处理后在冠幅内的 0—5cm 土层的全氮增长最多,增长率达到 51.88%;MN 处理后在冠幅内 5—10cm 和冠幅外的 5—10cm 土层全氮增长较多,达 28.82% 和 27.78%。结果显示全氮增长率,基本呈现冠幅内高于冠幅外,土壤表层 0—5cm 高于 5—20cm 土层的规律,表明氮沉降处理在一定程度上加剧了灌木“肥岛”对土壤全氮的富集。

荆条“肥岛”中土壤速效磷含量受氮沉降影响均有增长(图 3)。HN 处理引起的土壤速效磷增长率较大。在冠幅内外的 0—5cm 土层增长率较高,增长率依次达到 62.94%、55.74%,增长率最大值出现在冠幅内 10—20cm 土层,达 71.79%;LN 处理后在冠幅外的 5—10cm 和 10—20cm 土层的速效磷增长较多,依次达到 30.63%、39.58%。结果显示,在速效磷方面,冠幅内的增长率总体略高于冠幅外,且随氮沉降量的增加冠幅内外差异逐渐加大,土壤速效磷向冠幅内富集的效应越强。

由图 4 可知,氮沉降增加了荆条“肥岛”中土壤有机质含量,HN 处理在冠幅内外 0—10cm 土层均表现为

最高的增长率,在冠幅内 0—5cm 土层增长率最高,达 33.22%;MN 处理在冠幅内外的 10—20cm 土层出现较高的增长率,达 19.78%和 14.97%。结果表明,氮沉降对土壤表层 0—5cm 的有机质含量影响较 5—20cm 土层高,土壤浅层有机质含量更容易受到氮沉降的影响。

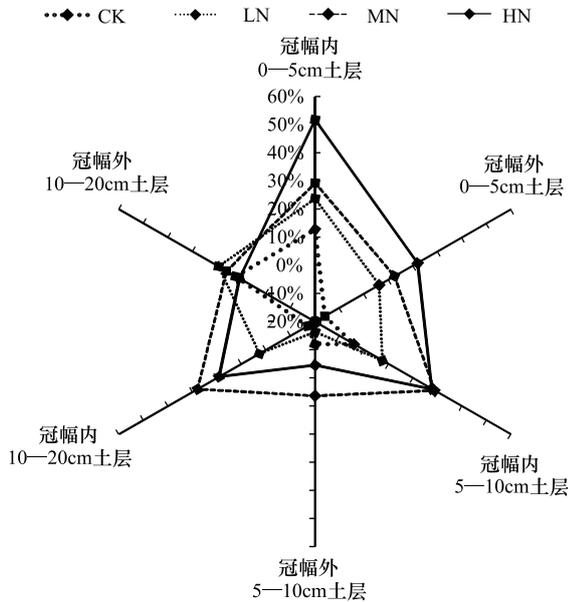


图 2 氮沉降影响下土壤全氮增长率

Fig.2 The growth percentage of total nitrogen under the nitrogen deposition

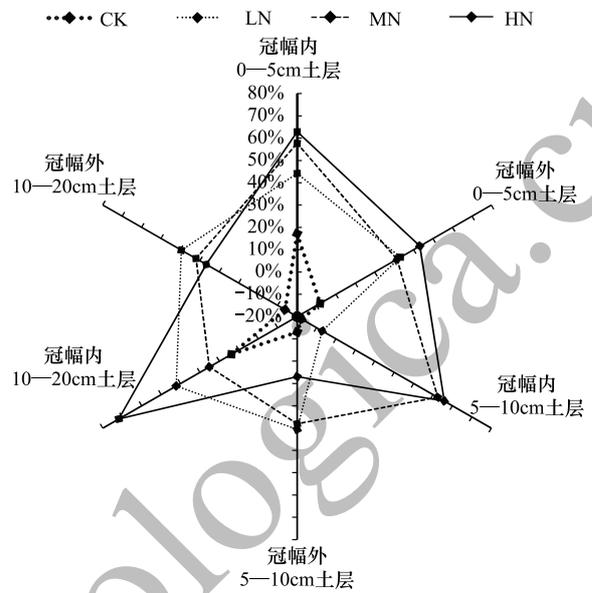


图 3 氮沉降影响下土壤速效磷增长率

Fig.3 The growth percentage of available phosphorus under the nitrogen deposition

### 3 讨论与结论

研究发现,在模拟氮沉降后,土壤养分出现差异性变化,荆条“肥岛”冠幅内外土壤养分含量,总体表现出随氮沉降量增长而增加的趋势;相比 CK 处理,HN 处理相对于其他处理对土壤养分的改变更加明显,引起的冠幅内外和不同土层间养分差异更为显著,这与莫江明等人<sup>[23]</sup>的研究,模拟氮沉降中氮的增加使得生态系统中氮循环得到改变,使得土壤的矿化速率随着氮沉降量的增加而加快的结果相一致。另一方面,模拟氮沉降后土壤各养分较高的增长率,主要出现于 HN 和 MN 处理的现象,这可能是由于模拟氮沉降会改变土壤中离子的数量,其与土壤氮沉降量呈正相关,及随氮沉降水平增高,土壤离子数量越高,土壤养分增长率因此较高<sup>[24]</sup>。

在土壤养分空间比较方面,氮沉降前后荆条灌木冠幅内的养分含量总体要高于灌木冠幅外,土壤全氮、速效磷和有机质也总体表现出由表层向深层递减的规律,这与前人<sup>[25-26]</sup>关于“肥岛”的研究相一致,这是荆条灌木为适应干旱半干旱环境,吸收更多养分根系生长引起的“肥岛”效应养分富集现象<sup>[27-29]</sup>。不同氮沉降处

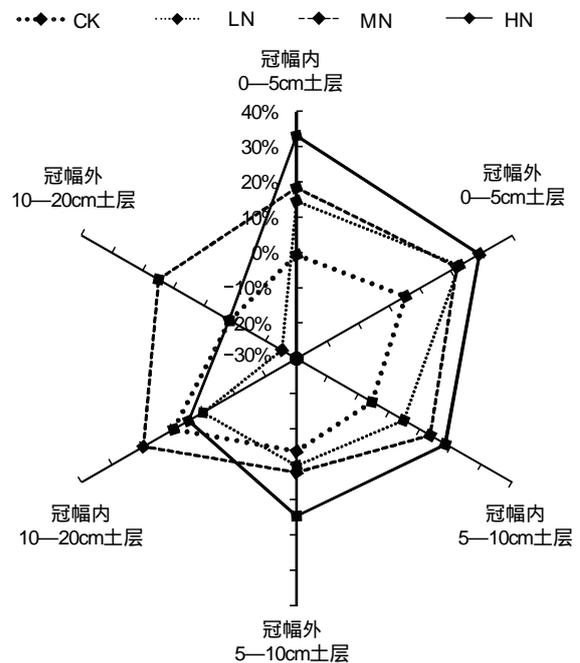


图 4 氮沉降影响下土壤有机质增长率

Fig.4 The growth percentage of organic matter under the nitrogen deposition

理后,通过土壤养分空间比较发现土壤养分变化幅度各有不同,总体表现为,随着氮沉降水平的增加,冠幅内外和土层间养分差异增大,这是由于在灌木“肥岛”作用下土壤养分发生迁移,而灌木下不同位置的养分迁移速率不同引起的<sup>[30]</sup>。结果证实在一定的范围内氮沉降显著增加了“肥岛”效应。

本试验结果表明,氮沉降前后,在荆条“肥岛”作用下土壤养分均呈现由表层向深层递减;冠幅内总体高于冠幅外的空间变化特征;荆条“肥岛”中土壤养分含量,在一定范围内有随氮沉降量增长而增加的规律;相比较其他土层,土壤表层有机质、氮、磷的含量受氮沉降影响显著增加;土壤养分增长率受氮沉降水平的影响,随着氮沉降量的增加,土壤各全氮和速效磷的增长率也随之加大;比较于冠幅外,氮沉降对冠幅内影响更为显著,氮沉降处理使冠幅内外养分差异更加显著;氮沉降加剧了荆条灌木的“肥岛”的养分富集效应。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: Consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 113-119.
- [ 2 ] Flechard C R, Ambus P, Skiba U, Rees R M, Hensen A, van Amstel A, van Dasselaar A V D P, Soussana J F, Jones M, Clifton-Brown J, Raschi A, Horvath L, Neftel A, Jocher M, Ammann C, Leifeld J, Fuhrer J, Calanca P, Thalman E, Pilegaard K, Marco C D, Campbell C, Nemitz E, Hargreaves K J, Levy P E, Ball B C, Jones S K, van de Bulk W C M, Groot T, Blom M, Domingues R, Kasper G, Allard V, Ceschia E, Cellier P, Laville P. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 121(1/2): 135-152.
- [ 3 ] Bozzolo F H, Lipson D A. Differential responses of native and exotic coastal sage scrub plant species to N additions and the soil microbial community. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 37-51.
- [ 4 ] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 205-218.
- [ 5 ] 崔键, 周静, 杨浩, 何园球. 我国红壤区大气氮沉降及其农田生态环境效应. *土壤*, 2015, 47(2): 245-251.
- [ 6 ] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 517-527.
- [ 7 ] Gundersen P, Emmett B A, Kj naas O J, Koopmans C J, Tietema A. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1/3): 37-55.
- [ 8 ] Egerton-Warburton L M, Allen E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient. *Ecological Applications*, 2008, 10(2): 484-496.
- [ 9 ] Aber J D. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: current theory, remaining questions and recent advances // Horst W J, B rkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer W B, Goldbach H, Merbach W, Olf H W, R mheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schenk M K, Wir n N V, eds. *Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium*. Netherlands: Springer, 2002: 179-188.
- [ 10 ] Treseder K K, Vitousek P M. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of n and p in hawaiian rain forests. *Ecology*, 2001, 82(4): 946-954.
- [ 11 ] Zechmeister-Boltenstern S, Michel K, Pfeffer M. Soil microbial community structure in European forests in relation to forest type and atmospheric nitrogen deposition. *Plant and Soil*, 2011, 343(1/2): 37-50.
- [ 12 ] Diepen L T A V, Lilleskov E A, Pregitzer K S, Miller R M. Simulated Nitrogen Deposition Causes a Decline of Intra- and Extraradical Abundance of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Changes in Microbial Community Structure in Northern Hardwood Forests. *Ecosystems*, 2010, 13(5): 683-695.
- [ 13 ] Salm C V D, Groeneweg B J, Boxman A W. Modelling the response of soil and soil solution chemistry upon roofing a forest in an area with high nitrogen deposition. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1998, 2: 451-471.
- [ 14 ] 陈立新, 段文标. 模拟氮沉降对温带典型森林土壤有效氮形态和含量的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2005-2012.
- [ 15 ] Mudrak E L, Schafer J L, Fuentes-Ramirez A, Holzapfel C, Moloney K A. Predictive modeling of spatial patterns of soil nutrients related to fertility islands. *Landscape Ecology*, 2014, 29(3): 491-505.
- [ 16 ] Zhang P J, Yang J, Zhao L Q, Bao S L, Song B Y. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 79-90.
- [ 17 ] Bolling J D, Walker L R. Fertile island development around perennial shrubs across a Mojave Desert chronosequence. *Western North American Naturalist*, 2002, 62(1): 88-100.

- [18] 赵勇, 樊巍, 范国强. 小浪底低山丘陵区植物 N 素吸收特征及其与土壤因子的关系. 中国水土保持科学, 2006, 4(6): 81-87.
- [19] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 魏冰. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展. 草业学报, 2015, 24(4): 201-207.
- [20] Dunkerley D. Hydrologic effects of dryland shrubs: defining the spatial extent of modified soil water uptake rates at an Australian desert site. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(2): 159-172.
- [21] Eldridge D J, Robson A D. Bladeploughing and exclosure influence soil properties in a semi-arid Australian woodland. *Journal of Range Management*, 1997, 50(2): 191-198.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-97.
- [23] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [24] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. *Science*, 1989, 244(4906): 776-783.
- [25] Reynolds J F, Virginia R A, Kemp P R, de Soya A G, Tremmel D C. Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecological Monographs*, 1999, 69(1): 69-106.
- [26] 赵哈林, 苏永中, 张华, 赵丽娅, 周瑞莲. 灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响. 中国沙漠, 2007, 27(3): 385-390.
- [27] Hirobe M, Ohte N, Karasawa N, Zhang G S, Wang L H, Yoshikawa K. Plant species effect on the spatial patterns of soil properties in the Mu-us desert ecosystem, Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, 2001, 234(2): 195-205.
- [28] Turpault M P, Utérano C, Boudot J P, Ranger J. Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase of the rhizosphere and its solution chemistry. *Plant and Soil*, 2005, 275(1/2): 327-336.
- [29] 董利苹, 曹靖, 李先婷, 代立兰, 苏怡兵. 不同耐盐植物根际土壤盐分的动态变化. 生态学报, 2011, 31(10): 2813-2821.
- [30] 陈广生, 曾德慧, 陈伏生, 范志平, 耿海东. 干旱和半干旱地区灌木下土壤“肥岛”研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2295-2300.