

# 模拟氮沉降对油松幼苗土壤可溶性氮含量及 有机物官能团特征的影响

何俐蓉<sup>1</sup>, 梁楚涛<sup>2</sup>, 辛奇<sup>1</sup>, 薛蕙<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为研究氮沉降对黄土丘陵区林地土壤可溶性氮及可溶性有机物官能团特征的影响,设置 6 个不同施氮水平 0, 2.8, 5.6, 11.2, 22.4, 44.8 gN/(m<sup>2</sup>·a) 的盆栽油松,连续培养五年,对油松根际、非根际可溶性氮及其组分进行了研究。结果表明:氮添加会显著增加土壤可溶性总氮、可溶性无机氮和可溶性有机氮含量、可溶性有机氮占可溶性氮的比重随氮沉降的增加而成倍增加,可溶性氮及其组分均未表现出明显的根际效应。与此同时,通过不同紫外特征的研究,发现较低和较高水平氮沉降均能增加根际土水溶性有机物中芳香族化合物的积累,非根际土则无明显差异,说明氮沉降与植物的共同作用改变了土壤水溶性有机物结构。

**关键词:**氮沉降;热水浸提有机物;氮组分;官能团特征;根际

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0036-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20180717.001

## Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Soluble Nitrogen Content and Organic Functional Group Characteristics of *Pinus tabulaeformis*

HE Lirong<sup>1</sup>, LIANG Chutao<sup>2</sup>, XIN Qi<sup>1</sup>, XUE Sha<sup>1,2</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To study the effects of nitrogen deposition on the functional characteristics of soil soluble nitrogen and soluble organic matter on the Loess Plateau, 6 nitrogen levels 0, 2.8, 5.6, 11.2, 22.4 and 44.8 gN/(m<sup>2</sup>·a) potted pine were set, continuous cultivation lasted for five years. Nitrogen addition significantly increased soil water soluble total nitrogen, water soluble inorganic nitrogen and water soluble organic nitrogen content, the proportion of soluble organic nitrogen to soluble nitrogen increased exponentially with the increase of nitrogen deposition. The soluble nitrogen and its components showed no obvious rhizosphere effects. At the same time, it was found that the lower and higher levels of nitrogen deposition increased the accumulation of aromatic compounds of soil water soluble organic matter in the rhizosphere, but could not make the difference in non rhizosphere soil. Nitrogen deposition can increase the content of nitrogen in soil which can be dissolved in water. The effect of plant root system on this trend is not significant. *Pinus tabulaeformis* can hardly change the effect of nitrogen deposition on the content of active nitrogen in soil. The combined effects of nitrogen deposition and *Pinus tabulaeformis* can increase the aromatic functional groups of the water soluble organic compounds in the rhizosphere.

**Keywords:** nitrogen deposition; water soluble organic matter; nitrogen component; functional group characteristic; rhizosphere

收稿日期:2017-11-20

修回日期:2018-03-19

资助项目:十三五国家重点研发计划(2016YFC0501707);国家自然科学基金资助项目(41671513);中科院西部青年学者项目(XAB2015A05)

第一作者:何俐蓉(1991—),女,陕西榆林人,在读硕士,主要研究方向为流域生态学。156144982@qq.com

通信作者:薛蕙(1978—),男,陕西西安人,研究员,主要从事土壤微生物和生态修复研究。E-mail:xuesha100@163.com

随着工业的发展,全球氮沉降量不断升高,美国、中国和欧洲是氮沉降的主要发生区域<sup>[1-4]</sup>。过高的氮沉降造成了一系列环境问题,如土壤酸化、森林生态系统氮饱和、生物多样性改变等<sup>[5]</sup>。

氮沉降对土壤中氮素组成影响因氮沉降强度、时间、生态系统类型而有所不同<sup>[6-7]</sup>。水溶性氮是土壤中可以生物直接吸收利用的物质,其中,水溶性无机氮(W<sub>SIN</sub>)是植物吸收氮素的主要形式<sup>[8]</sup>,而水溶性有机氮(W<sub>SON</sub>)是微生物利用氮素的主要形式<sup>[9]</sup>,也是氮素淋溶的主要形式<sup>[10]</sup>。植物根际是影响土壤中氮素分布的另一重要因素,硝态氮向根际迁移主要依赖质流,铵态氮向根际迁移主要依赖扩散,因而硝态氮容易表现出根际富集,而铵态氮容易表现出根际亏缺。因此,对氮沉降下可溶性氮含量及其根际效应的研究,是揭示氮沉降对林地土壤氮素循环影响的关键。

紫外—可见光吸收光谱是最早用于反映水溶性有机物光谱特征的方法<sup>[11]</sup>,研究表明,土壤可溶性有机物紫外—可见光吸收光谱会因植物、土壤类型的差异而呈现出不同<sup>[12]</sup>,因而可以作为土壤有机碳对氮沉降响应的敏感指标。

黄土高原是世界上最大的黄土堆积区和典型的生态脆弱区<sup>[13]</sup>,也是氮素限制区,受氮沉降影响显著。油松(*Pinus tabulaeformis*)作为该地区主要森林树种之一,在该地区森林生态系统对气候变化的响应中起着重要作用<sup>[14]</sup>。目前,氮沉降对黄土高原林地影响的研究,多集中于对成年林地土壤、植被有机碳总量及其组份<sup>[15]</sup>,对氮沉降下黄土高原幼龄植被根际与非根际土壤碳氮活性组分研究较少。因而,本试验以盆栽幼年期油松为研究对象,参考黄土高原氮沉降量,设置多个氮沉降梯度,分析氮添加对油松根际、非根际土壤可溶性氮含量及可溶性有机物紫外特征的影响,以期进一步了解氮沉降对森林土壤物质循环的潜在作用。

## 1 研究区概况

试验地设在中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心试验田。试验所需松树幼苗取自陕西省周至县辛家寨育苗基地(107°38'E,33°40'N)。该区属温带大陆性季风气候。年平均气温 13.2℃,降水量 674.3 mm,日照时数 1 993.7 h,无霜期 225 d。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

2007年3月将油松的种子播种于5 m×10 m的

苗床上培育。2008年3月,将一年生油松幼苗移栽于直径35 cm深度40 cm的PVC试验盆中,采用安塞质地均一的黄绵土作为盆栽用土。

为研究过量N沉降对土壤可溶性氮组分及官能团特征的影响,本研究设置6个处理CK, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, N<sub>4</sub>, N<sub>5</sub>依次为0, 2.8, 5.6, 11.2, 22.4, 44.8 gN/(m<sup>2</sup>·a),该水平从黄土高原当前N沉降强度约2.06 gN/(m<sup>2</sup>·a)到严重过量。采用单因素区组设计,每个处理设置68盆。从2008—2014年,每年的3月底至4月初下雨前将不同N处理的尿素用量溶于10 ml蒸馏水中,并均匀施入试验盆内。

### 2.2 试验方法

2.2.1 取样方法 2014年7月,在每个施氮水平选择有代表性的盆栽六盆,破盆取土。用抖根法区分根际土与非根际土,并用四分法取适量土样,过两毫米筛以除去土壤中残留细根与其他杂质。

2.2.2 可溶性物质提取方法 称取30.00克土样放于塑料瓶中,加去离子水120 ml,盖紧瓶盖,在震荡机中充分震荡1 h, 2 000 r/min离心5 min,上清液用0.45 μm滤膜过滤,所得滤液即为土壤可溶性溶液。将溶液置于4℃冰箱中保存备用。

2.2.3 可溶性有机物测定方法 土壤可溶性有机碳(DOC)采用碳氮分析仪测定。使用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定可溶性总氮(DTN),使用分光光度法测定可溶性硝态氮,采用流动分析仪测定可溶性氨态氮,用可溶性总氮减去可溶性硝态氮与可溶性氨态氮之和即为可溶性有机氮(DON)。UV-1601紫外—可见分光光度计扫描水样在220~700 nm处波长,记录254, 272, 280 nm处的吸光值。分别计算SUVA<sub>254</sub>, SUVA<sub>272</sub>, SUVA<sub>280</sub>。

2.2.4 土壤理化性质测定 土壤有机质(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定、土壤全氮(TN)采用凯氏定氮仪测定<sup>[16]</sup>,测定均做两个重复,结果如表1所示。

## 3 结果与分析

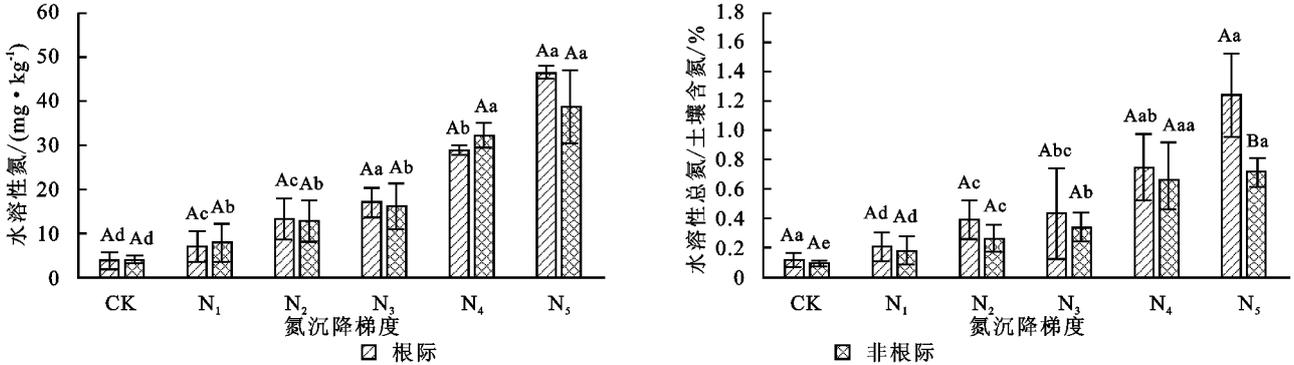
### 3.1 模拟氮沉降对油松根际非根际可溶性氮(DTN)的影响

如图1所示,DTN沉降的增加而增加,根际从4 mg/kg上升到45 mg/kg,非根际从4 mg/kg上升到40 mg/kg,根际与非根际无显著差异。与此同时,DTN在土壤氮中的比例也随氮沉降的增加而增加,根际DTN/TN表现为根际高于非根际,并在N<sub>4</sub>, N<sub>5</sub>水平达到显著。

表 1 不同氮沉降水平下土壤碳、氮含量

处理	有机碳 SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )		全氮 TN/(g·kg <sup>-1</sup> )		硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )		铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际	根际	非根际
CK	6.072a	3.71ab	0.453b	0.34a	1.912e	5.59de	6.052a	2.09a
N <sub>1</sub>	6.154a	3.57ab	0.439b	0.34ab	2.375de	6.39e	5.928a	2.16a
N <sub>2</sub>	6.525a	3.30a	0.481b	0.34a	2.955cd	4.68cd	3.592b	3.02ab
N <sub>3</sub>	5.898a	3.74ab	0.480b	0.38c	3.565c	3.48bc	3.630b	3.85b
N <sub>4</sub>	5.895a	3.72ab	0.478b	0.38c	4.608b	2.66ab	2.843b	5.10c
N <sub>5</sub>	6.492a	3.83b	0.540a	0.38bc	5.890a	2.09a	2.273b	6.09c

注:字母不同代表有显著性差异,例如 ab 和 cd,字母不同,有显著差异。



注:不同大写字母表示同一施氮水平下,根际与非根际差异显著。不同小写字母表示不同施氮水平下,根际或非根际的差异显著性,下同。

图 1 氮沉降对可溶性氮的影响

### 3.2 模拟氮沉降对油松根际非根际可溶性氮组分的影响

可溶性硝态氮(D-NO<sub>3</sub>)随氮沉降的增加而增加,可溶性铵态氮(D-NH<sub>4</sub>)在较高的氮沉降水平(高于N<sub>2</sub>水平)根际和非根际出现显著差异,但 D-NH<sub>4</sub> 并

未随氮沉降的增加而出现规律性变化,可溶性无机氮(DIN)和可溶性有机氮(DON)均随氮沉降增加而增加。

可溶性硝态氮、可溶性无机氮和可溶性有机氮均未表现出根际和非根际的显著差异(图 2)。

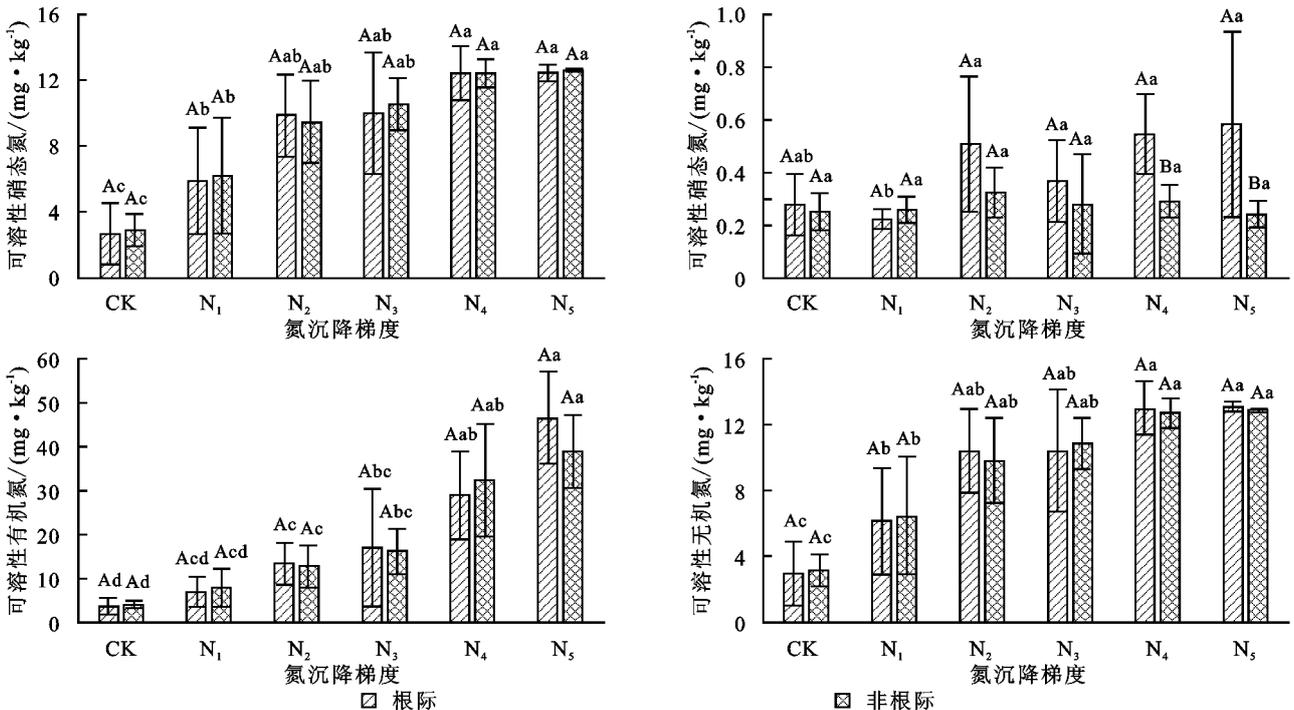


图 2 氮沉降对可溶性氮组分的影响

### 3.3 模拟氮沉降对紫外特征值的影响

三组特征值随氮沉降的增加表现出一致的变化规

律,在 N<sub>1</sub> 时增加,N<sub>2</sub>,N<sub>3</sub> 时下降,N<sub>4</sub>,N<sub>5</sub> 时随氮沉降增加而上升,而非根际的三组特征值,均表现出较高的氮

沉降水平( $N_3, N_4, N_5$ )高于较低的氮沉降水平(CK,  $N_1, N_2$ )。三组特征值根际均高于非根际(图 3)。

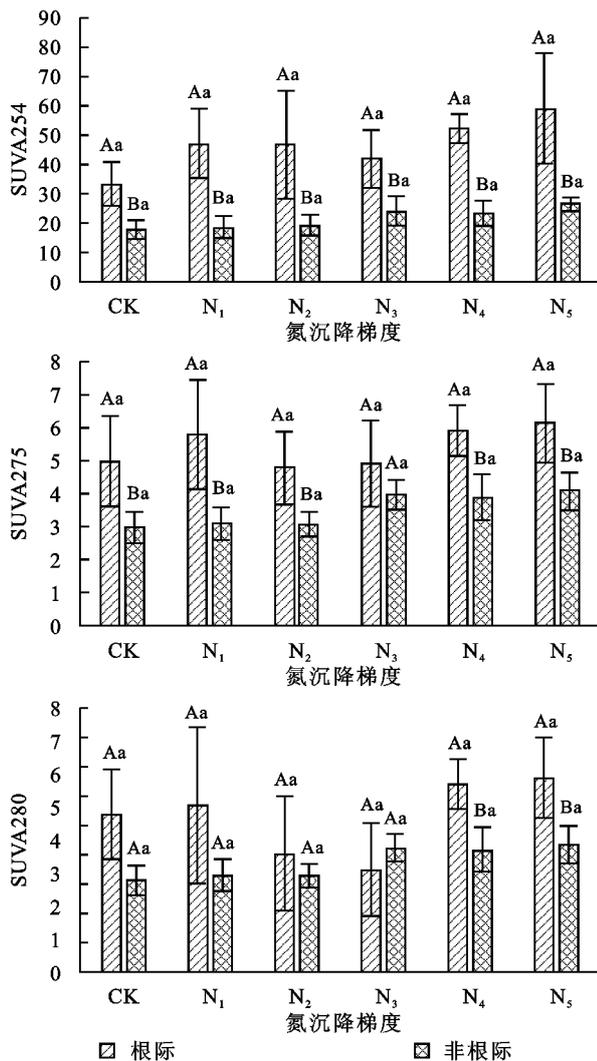


图 3 氮沉降对紫外特征值的影响

## 4 讨论

可溶性物质是土壤肥力的重要来源<sup>[17]</sup>,也是土壤养分参与生态系统物质循环的主要形式。氮沉降可以增加土壤有效氮含量<sup>[18-19]</sup>,本试验中,可溶性有机氮、可溶性无机氮、可溶性硝态氮、可溶性总氮均随氮沉降的增加而升高,仅可溶性铵态氮含量未发生规律性变化,这可能是因为可溶性铵态氮含量极少,容易受其他因素如植物吸收的影响。许多研究表明,氮沉降可以增加速效氮在土壤全氮中的比重<sup>[20]</sup>,这与本试验的研究结果一致。可溶性总氮及其组分可以随土壤水分迁移均匀分散到土壤中,因而并未表现出明显的根际与非根际的显著差异,但是根际活跃的微生物可以促进不可溶氮组分的分解,因而根际可溶性氮占总氮比例高于非根际。

已有的一些研究表明,氮沉降可以增加氮缺乏地区

森林生态系统碳汇能力<sup>[21-22]</sup>,一定水平的氮沉降可以增加森林土壤碳汇<sup>[23]</sup>,过高的氮沉降会导致森林植被退化。幼年期油松在生长过程中未产生大量的枯落物,植被—土壤系统碳循环并不完整,因此本研究中可溶性有机物的光谱差异主要受根系分泌物和土壤微生物活动影响。254 nm 单位吸光度(SUVA<sub>254</sub>)与可溶性有机物芳香性显著正相关( $R^2 = 0.84$ ),与分子量大小呈显著正相关( $R^2 = 0.77$ )<sup>[24]</sup>,275 nm 的单位吸光度与芳香性所占比例呈显著正相关,相关性高 0.937<sup>[25]</sup>。280 nm 的单位吸光度变化能够准确评价 DOC 中可矿化分解部分所占比例(显著负相关, $R^2 = 0.90$ )和芳香性部分(显著正相关, $R^2 = 0.91$ )<sup>[26]</sup>。SUVA<sub>254</sub>, SUVA<sub>275</sub>, SUVA<sub>280</sub> 均表现出明显的根际与非根际差异,说明植物根际有机质芳香性高于非根际,同时, $N_1, N_4, N_5$  水平下 SUVA 指数均高于未施氮处理,但  $N_2$  与  $N_3$  低于  $N_0$ ,说明一定水平的氮沉降可以促进土壤芳香族化合物的积累,较高水平的氮沉降不利于芳香族化合物积累,过高氮沉降下芳香族化合物又会积累,这可能与芳香族化合物种类繁多,不同施氮水平下不同芳香族化合物的产生与分解存在差异有关。芳香化程度越高,微生物越难利用<sup>[27]</sup>,本试验的结果或许是由于较低的氮沉降增加了土壤中微生物的活性,使得有机物分解加快,因而产生了较多的芳香族化合物,过高的氮被植物吸收以后直接分泌出大量芳香族化合物。

就全球范围来看,大气氮沉降的平均值为  $0.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[28]</sup>,工业化的发展将会促使中国等新兴经济体氮排放进一步增加。就目前而言,黄土高原氮沉降量约  $2.06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 有利于该地区活性有机氮的增加,同时,还可以促进土壤芳香族化合物的积累,促进森林土壤成熟<sup>[29]</sup>。但是,黄土高原土质松散,受侵蚀影响较大,氮沉降促进森林生态系统可溶性氮的增加,很可能间接导致更多的可溶性氮通过淋溶等过程进入河流、湖泊<sup>[30]</sup>,加剧富营养化,需要进一步关注。

## 5 结论

氮沉降可以增加土壤中可溶性氮含量,具体表现为可溶性无机氮和可溶性有机氮均随氮沉降量的增加而增加,但可溶性氨态氮含量没有明显的规律性变化;土壤中可溶性氮占总氮的比重随氮沉降的增加而增加;模拟氮沉降增加了土壤可溶性有机氮占可溶性氮的比重。以上现象均未表现出明显的根际效应,植物对持续氮沉降下土壤可溶性氮含量的影响有限。较低的氮沉降和较高的氮沉降都将增加根际土壤可溶性有机物中芳香族化合物的比例,氮沉降与根际的共同作用促进了较低和较高氮沉降水平下芳香族化合物的积累。

## 参考文献:

- [1] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2007,10(12):1135-1142.
- [2] Fang Y, Yoh M, Koba K, et al. Nitrogen deposition and forest nitrogen cycling along an urban-rural transect in southern China[J]. *Global Change Biology*, 2011,17(2):872-885.
- [3] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world:200 years of change[J]. *Ambio:A Journal of the Human Environment*, 2002,31(2):64-71.
- [4] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils:a review [J]. *Soil Science*, 2000,165(4):277-304.
- [5] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. *Science*, 2004,303(5665):1876-1879.
- [6] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究[J]. *植物生态学报*, 1997,21(4):335-341.
- [7] 方运霆, 莫江明, 周国逸, 等. 南亚热带森林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应[J]. *生态学报*, 2004,24(11):2353-2359.
- [8] Blumfield T J, Xu Z H, Prasolova N V, et al. Effect of overlying windrowed harvest residues on soil carbon and nitrogen in hoop pine plantations of subtropical Australia [J]. *J. Soils Sediments*, 2006,6(4):243-248.
- [9] Jensen L S, Mueller T, Magid J, et al. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997,29(7):1043-1055.
- [10] Qualls R G, Haines B L, Swank W T. Fluxes of Dissolved Organic Nutrients and Humic Substances in a Deciduous Forest[J]. *Ecology*, 1991,72(1):254-266.
- [11] Artinger R, Buckau G, Geyer S, et al. Characterization of groundwater humic substances:influence of sedimentary organic carbon[J]. *Applied Geochemistry*, 2000,15(1):97-116.
- [12] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北荒漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016,36(1):220-225.
- [13] Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(12):6165-6171.
- [14] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征[J]. *植物生态学报*, 2002,26(3):339-345.
- [15] Zhao B Q, Li X Y, Li X P, et al. Long-term fertilizer experiment network in China:crop yields and soil nutrient trends[J]. *Agronomy Journal*, 2010,102(1):216-230.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [17] Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(12):6165-6171.
- [18] Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests:a synthesis of NITREX data[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998,101(1):37-55.
- [19] Prescott C E, Corbin J P, Parkinson D. Immobilization and availability of N and P in the forest floors of fertilized Rocky Mountain coniferous forests[J]. *Plant and Soil*, 1992,143(1):1-10.
- [20] 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[J]. *应用生态学报*, 2011,22(8):2005-2012.
- [21] Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(12):6165-6171.
- [22] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2011,32(5):1407-1414.
- [23] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J]. *植物生态学报*, 2007,31(2):205-218.
- [24] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997,337(2):133-149.
- [25] Traina S J, Novak J, Smeck N E. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990,19(1):151-153.
- [26] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. *Geoderma*, 2003,113(3/4):273-291.
- [27] 何冬梅. 不同土地利用方式土壤有机碳结构及矿化特征[D]. 南京:南京林业大学, 2014.
- [28] 李欠欠, 汤利. 大气氮沉降的研究进展[J]. *云南农业大学学报:自然科学版*, 2010,25(6):889-894.
- [29] 刘翥, 杨玉盛, 司友涛, 等. 植被恢复对侵蚀红壤可溶性有机质含量及光谱学特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2014,38(11):1174-1183.
- [30] 闫聪微, 马红亮, 高人, 等. 模拟氮沉降对中亚热带森林土壤中可溶性氮含量的影响[J]. *环境科学研究*, 2012,25(6):678-684.