

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.01.017

## 氮沉降对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

杨长青<sup>1</sup>,朱艳<sup>2</sup>,蔡卫红<sup>1</sup>,张林<sup>1</sup>

(1. 四川省林业调查规划院,四川成都 610081;2. 广安市广安区住房和城乡建设局,四川广安 638000)

**摘要:**氮沉降可能改变森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量,已有研究结果对氮沉降作用的方向和强度上具有很大的不确定性。通过整合已有模拟氮沉降的野外监测数据,评估了氮沉降对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响。结果表明,氮沉降平均降低了中国土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 8.7%,且这种影响对次生林和人工林影响较大,而对原始林影响较小。同时,氮沉降对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响对阔叶林、针叶林和针阔混交林均无显著影响,但显著降低了竹林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 36%。施加 >100 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup> 时才会对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量造成显著降低,且施加硝酸铵的降低大于尿素。氮沉降的这种影响主要是由于过多的氮抑制了土壤微生物活性造成的。

**关键词:**氮沉降;CO<sub>2</sub> 通量;森林土壤

中图分类号:Q148;S714.5

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2018)01-0082-05

## Effects of Nitrogen Deposition on CO<sub>2</sub> Fluxes of Forest Soils in China

YANG Chang-qing<sup>1</sup> ZHU yan<sup>2</sup> CAI Wei-hong<sup>1</sup> ZHANG lin<sup>1</sup>

(1. Sichuan Forest Inventory and Plan Institute, Chengdu 610081, China;

2 Housing and Urban-Rural Construction Bureau of Guang'an District, Guang'an 638000, China)

**Abstract:** Nitrogen (N) deposition could change CO<sub>2</sub> efflux in forest soils, but current experimental results showed a high uncertainty in the direction and magnitude of the effect of N deposition. By combining the *in situ* monitoring results of N deposition experiments that were conducted in China, the effects of N deposition were assessed on CO<sub>2</sub> efflux in forest soils at national scale. The results showed that N deposition significantly declined 8.7% of the CO<sub>2</sub> efflux in forest soils in China, and this influence was greater for secondary forests and plantations than that for primary forests. Moreover, N deposition had no significant effects on soil CO<sub>2</sub> efflux in broad-leaved, needle and mixed forests, but significantly decreased the CO<sub>2</sub> efflux in bamboo soils by 36%. However, this influence was significant only when the dose of N fertilization was more than 100 kg N · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>, and the effect of ammonium nitrate was greater than urea. The decline in CO<sub>2</sub> efflux in forest soils was due to the decrease of soil microbial activity induced by fertilized N.

**Key words:** Nitrogen deposition, CO<sub>2</sub> efflux, Forest soil

在过去几十年,由于大量化石燃料的燃烧和人类农业施肥的增加<sup>[1]</sup>,导致大气中过多的氮通过沉降的方式进入地表<sup>[2]</sup>,改变了土壤碳循环<sup>[3]</sup>。土壤中根系和微生物呼吸向大气中排放 CO<sub>2</sub> 是森林生

态系统碳循环的关键环节之一<sup>[4]</sup>,并可能受到大气氮沉降的影响。各国科学家在全球范围内开展了大量模拟氮沉降实验<sup>[5]</sup>,已有研究结果表明,模拟氮沉降既可能增加<sup>[6]</sup>也可能减少<sup>[7]</sup>森林土壤 CO<sub>2</sub> 通

收稿日期:2017-10-11

作者简介:杨长青(1986-),男,四川苍溪人,工程师,硕士,主要从事林业调查规划、森林生态研究工作。

量,说明氮沉降的这种作用在方向和作用强度上都具有很大的不确定性。

通过野外模拟氮沉降对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响的实验数据,综合评估了氮沉降对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的可能影响,并分析了造成这种影响的潜在因素,如土壤氮循环、微生物活性等。考虑到不同森林类型、不同施氮方式可能造成的影响,分别探讨了氮沉降对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响在不同森林类型之间的差异,以期为气候变化背景下森林可持续经营管理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据筛选标准

采用中国引文数据库(www.cnki.net)检索发表

于2017年7月之前在中国森林开展的土壤—大气 CO<sub>2</sub> 通量数据。检索词为“氮沉降”(或“氮沉降”)、“CO<sub>2</sub>”(或“土壤呼吸”)和“森林土壤”,文献类型为期刊论文,仅收集野外原位监测数据,排除实验室培养实验。所有数据只控制一个变量,即有、无氮沉降(对照和氮沉降),其他条件与当地环境条件一致且无其他处理。所有数据须可从文中直接提取出样本量、平均值和标准差(或标准误)。如数据以图的形式体现,则用 Engauge Digitizer 4.1 软件(Free Software Foundation Inc., Boston, MA, USA)提取。同时提取样地地理位置(经纬度)、海拔、年均温和年降水量,如不能从该文直接提取,则从在该样地开展实验的其他文献中提取。筛选出21篇文献<sup>[8-28]</sup>中提取数据414条(见表1)。

表1 样地概况

文献	样地	纬度 (°N)	经度 (°E)	年均温 (°C)	年降水量 (mm)	海拔 (m)	施氮水平 (kg N·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
莫江明等,2005	广东鼎湖山	23.17	112.55	21.4	1927	250	50,100,150
邓琦等,2009	广东华南植物园	23.18	113.35	21.5	1700	38	100
李仁洪等,2010	四川雅安老板山	30.13	103.00	16.1	1772	660	50,150,300
涂利华等,2010	四川洪雅县柳江镇	30.58	103.63	14.0	1490	523	50,150,300
涂利华等,2011	四川洪雅县柳江镇	30.58	103.63	14.0	1490	523	50,150,300
温都如娜等,2012	内蒙古大兴安岭	50.33	121.74	-5.4	450	826	10,20,40
李伟等,2013	吉林长白山	41.70	127.63	2.1	745	964	50
郑威等,2013	湖南森林植物园	28.10	113.02	17.2	1422	46	50,150,300
黄石德等,2014	福建长汀县河田镇	25.55	116.30	17.5	1737	262	60,240
李化山等 a,2014	山西太岳山	36.52	112.02	6.2	662	1500	50,100,150
李化山等 b,2014	山西太岳山	36.52	112.02	6.2	662	1500	50,100,150
李睿达等,2014	广西东门林场	22.28	107.25	21.0	1100	162	32,64,128
孙素琪等,2014	重庆缙云山	29.68	106.28	13.6	1612	364	50,100,150
向元彬等,2014	四川雅安老板山	29.97	102.98	16.1	1772	580	50,100,150
彭勇等,2015	四川瓦屋山	29.54	103.26	10.0	2323	1600	50,150
全权等,2015	北京东灵山	39.95	115.42	11.0	639	1330	100
张方月等,2015	湖南会同	26.85	109.43	16.8	1100	420	100
曾青苹等,2016	重庆缙云山	29.75	106.37	13.6	1162	350	200,400,600
高伟峰等,2016	黑龙江凉水自然保护区	47.19	128.89	-0.3	373	345	30,60,120
张娇等,2016	黑龙江帽儿山	45.35	127.50	2.7	600	300	50,100,150
赵欣然等,2016	内蒙古科尔沁大清沟	42.97	122.35	6.4	450	260	100

### 1.2 分类标准

为了解不同森林类型、气候带、植物功能类型、优势树种、施氮方式和水平对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响,将森林类型分为原始林、次生林和人工林,气候带分为热带、亚热带和温带,植物功能类型分为阔叶林、针叶林、针阔混交林和竹林,优势树种分为常绿和落叶树种,施氮方式分为硝酸铵和尿素,施氮水平分为 <50、50~100、100~200、200~300 和 >300 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

### 1.3 数据计算与分析

采用效应值(Response ratio, lnR)衡量氮沉降对

森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响。该值为处理组(施氮)与对照组(不施氮)之商的自然对数,计算如下:

$$\ln R = \ln(X_t/X_c)$$

式中,  $X_t$  和  $X_c$  分别为处理组(施氮)与对照组(不施氮)土壤 CO<sub>2</sub> 通量的平均值。

效应值的频率分布应服从正态分布,且满足高斯(Gauss)方程( $R^2 = 0.67, P < 0.001$ ; 见图1)。为减小误差,对满足某一分类标准的所有效应值进行加权得到加权的效应值(weighted response ratio, lnRR)和95%置信区间(95% confidence intervals, CI)。考虑到某些分类标准中样本量较小,采用重

复采样的方法(499次迭代)以减小偏差。同时,对不同分类标准的效应值进行组间异质性检验。以上分析在 MetaWin 2.0 中完成。如果 95% CI 均没有与加权效应值重叠,则氮沉降处理对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响视为显著 ( $P < 0.05$ )。

加权效应值转换为百分比变化 ( $P, %$ ), 采用以下公式计算:

$$P (%) = (e^{\ln RR} - 1) \times 100$$

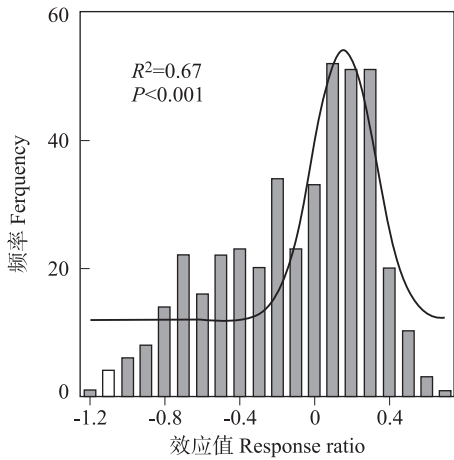


图1 效应值正态分布

## 2 结果与分析

### 2.1 氮沉降对不同森林类型土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

总体上看,氮沉降显著降低了森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 8.7% ( $P < 0.05$ ; 见图 2 和表 2)。氮沉降对森

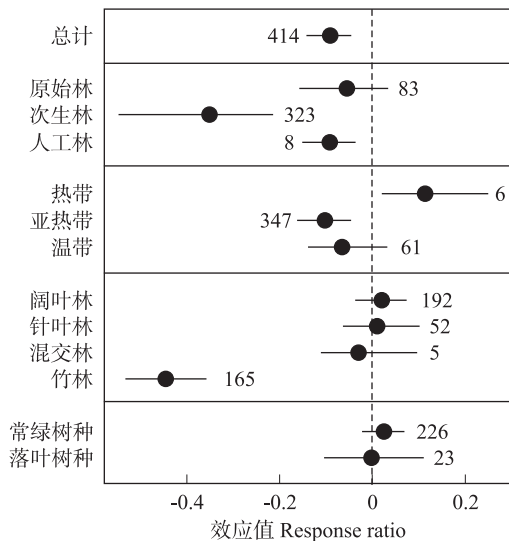


图2 氮沉降对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

注:效应值代表氮沉降的作用强度;正值表示正作用,负值表示负作用。误差线代表 95% 置信区间;误差线穿过效应值为 0 (虚线处)时表示氮沉降作用不显著,没有穿过则表示作用显著 ( $P < 0.05$ )。95% 置信区间上限和下限不等是由于对样本量较小的数据进行重复采样所造成。数值代表样本量。(下同)。

林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响在不同植物功能类型之间存在差异 ( $P < 0.001$ ; 见表 3)。具体来讲,氮沉降对竹林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响较大(降低了 36%),而对阔叶林、针叶林和针阔混交林均无显著影响 ( $P > 0.05$ ; 见表 2)。氮沉降对常绿树种和落叶树种林地也无显著影响 ( $P > 0.05$ )。对不同森林类型而言,氮沉降显著降低了次生林和人工林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 30% 和 8.7% ( $P < 0.05$ ),而对原始林无显著影响。对不同气候带而言,氮沉降显著增加了热带森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量(12.1%),降低了亚热带森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量(9.7%),而对温带森林无显著影响。

表2 氮沉降对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响的百分比变化

分类	类型	百分比变化 (%)	显著性 (P)
总计		-8.72 (0.25)	<0.05
森林类型	原始林	-5.34 (1.11)	
	次生林	-29.54 (7.06)	<0.05
	人工林	-8.74 (0.33)	<0.05
气候带	热带	12.1 (3.8)	<0.05
	亚热带	-9.66 (0.34)	<0.05
	温带	-6.15 (0.98)	
植物功能类型	阔叶林	2.11 (0.42)	
	针叶林	1.08 (1.08)	
	混交林	-2.92 (3.75)	
	竹林	-35.97 (0.67)	<0.05
优势树种	常绿树种	2.54 (0.32)	
	落叶树种	-0.13 (2.19)	

注:括号内为标准误。 $P < 0.05$  代表差异显著。

表3 氮沉降对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响差异

分类	类型	异质性	显著性
森林类型	原始林、次生林、人工林	104.8	0.14
气候带	热带、亚热带、温带	29.6	0.57
植物功能类型	阔叶林、针叶林、混交林、竹林	1811.8	<0.001
优势树种	常绿树种、落叶树种	5.7	0.60
施氮种类	硝酸铵、尿素	6.5	0.61
施氮水平 (kg N·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	< 50, 50 ~ 100, 100 ~ 200, 200 ~ 300, > 300	330.8	0.012

注:加粗的显著性水平表示氮沉降对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响在不同类型间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 施氮方式和水平对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

不同施氮种类(硝酸铵或尿素)对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量无显著影响 ( $P = 0.61$ ), 但不同施氮水平有显著影响 ( $P = 0.012$ ; 见表 4)。施加硝酸铵显著降低了森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 8.9% ( $P < 0.05$ ) 而施加尿素则无显著影响(见图 3)。施加  $< 100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  的氮肥对森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量无显著影响, 但施加  $> 100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  的氮肥显著降低了森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量(4.7% ~ 19%; 见表 4)。

表 4 施氮方式和水平对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响的百分比变化

分类	类型	百分比变化(%)	显著性 (P)
施肥方式	硝酸铵	-8.87 (0.27)	<0.05
	尿素	-0.97 (3.24)	
施肥水平 (kg N·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	<50	-5.07 (0.58)	<0.05
	50~100	0.89 (1.63)	
	100~200	-14.23 (0.8)	
	200~300	-19.12 (1.46)	
	>300	-4.74 (1.08)	

注:括号内为标准误。P<0.05 代表差异显著。

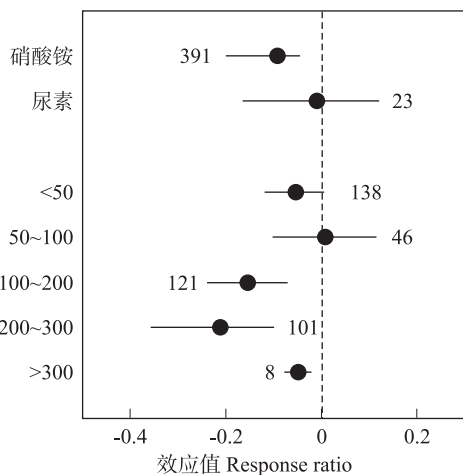


图 3 不同施氮方式和水平对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

### 2.3 氮沉降对森林土壤无机氮、微生物量和酶活性的影响

氮沉降显著增加了森林土壤铵态氮和硝态氮浓度的 4.4 和 5.7 倍 ( $P < 0.05$ ; 见表 5), 显著增加了森林土壤微生物生物量碳 (13.8%) 而降低了微生物生物量氮 (13.2%), 显著降低了土壤磷酸酶活性 (14%,  $P < 0.05$ ), 但对脲酶无显著影响 ( $P > 0.05$ ; 见图 4)。

表 5 氮沉降对中国森林土壤无机氮、微生物生物量和酶活性影响的百分比变化

分类	类型	百分比变化(%)	显著性 (P)
无机氮	铵态氮	444.28 (44.29)	<0.05
	硝态氮	573.35 (52.88)	
微生物生物量	微生物生物量碳	13.79 (0.53)	<0.05
	微生物生物量氮	-13.23 (3.05)	
酶活性	脲酶	32.63 (7.07)	<0.05
	磷酸酶	-14.38 (1.85)	

注:括号内为标准误。P<0.05 代表差异显著。

## 3 讨论

### 3.1 氮沉降对中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响

大气中过多的氮通过干、湿沉降的方式进入森

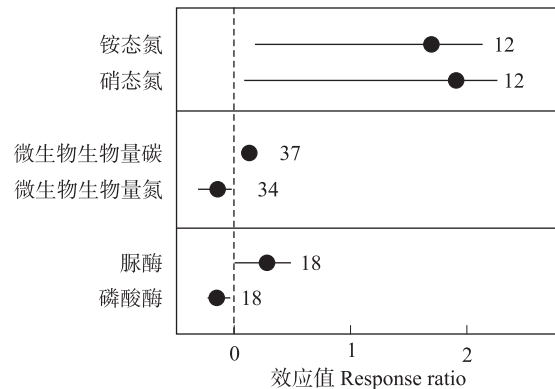


图 4 氮沉降对中国森林土壤无机氮、微生物生物量和酶活性的影响

林土壤<sup>[2]</sup>, 抑制微生物活性<sup>[29]</sup>, 进而降低土壤有机质分解和 CO<sub>2</sub> 排放、提高土壤碳库贮量<sup>[30]</sup>。通过整理目前野外测定的中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的氮沉降实验, 平均降低了中国森林土壤 CO<sub>2</sub> 通量的 8.7% (见表 2)。这与 Liu 和 Greaver<sup>[5]</sup> 的研究结果 (降低 8%) 非常接近, 但这一结果远远高于 Zhou 等<sup>[31]</sup> 的评估 (1.44%)。

氮沉降对不同林地土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响存在差异。如氮沉降对天然原始林的影响较小, 而对次生林和人工林的影响较大, 对针、阔叶林的影响较小而对竹林的影响较大 (见图 2), 这表明天然林内较为稳定的立地条件能有效缓冲氮沉降对土壤结构、养分循环和微生物的冲击, 能更好地维持自身结构的稳定性。

另外, 不同施氮方式和水平也存在较大差异。土壤中无机氮的直接输入会快速被植物根系和土壤微生物吸收、利用, 因此其作用比有机氮沉降更为快速且影响更大 (见图 3)。相反, 施加有机氮对土壤结构、微生物有较好的保护作用<sup>[32]</sup>。

### 3.2 氮沉降对森林土壤氮循环和微生物活性的影响

大量研究表明, 氮沉降降低土壤中参与氮循环相关微生物的丰度和多样性<sup>[33]</sup>, 减缓土壤养分循环<sup>[34]</sup>。但另一方面, 氮沉降 (尤其是无机氮的添加) 很大程度上直接增加了土壤铵态氮和硝态氮浓度, 如 Zak 等<sup>[35]</sup> 发现氮沉降增加了土壤硝态氮浓度的 2.9 倍。Lu 等<sup>[36]</sup> 也发现, 在大尺度平均水平上, 氮沉降分别增加了土壤铵态氮和硝态氮浓度的 4.3 倍和 47%。这表明土壤中过多的氮极大地促进植物生长<sup>[37]</sup>, 而土壤中原有的氮循环受到抑制, 进而破坏原有生态系统的稳定性。

综上所述,氮沉降抑制森林土壤微生物活性,降低土壤呼吸进而减小土壤 CO<sub>2</sub> 通量。但这种影响在不同森林中具有差异,如对原始林的影响较小而对退化的次生林、人工林及竹林影响较大,这对森林经营管理提供了重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Schlesinger W H. On the fate of anthropogenic nitrogen [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(1): 203 ~ 208.
- [2] Likens G E, Bormann F H. Acid rain: a serious regional environmental problem [J]. Science, 1974, 184 (4142): 1176 ~ 1179.
- [3] Lu M, Zhou X, Yang Q et al. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: a meta - analysis [J]. Ecology, 2013, 94 (3): 726 ~ 738.
- [4] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 2006, 440 (7081): 165 ~ 173.
- [5] Liu L, Greaver T L. 2010. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment [J]. Ecology Letters, 13 (7): 819 ~ 828.
- [6] 刘盛梅,姜清成,李芸. 华西雨屏区巨桉中龄林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应 [J]. 四川林业科技, 2010, 31(3): 60 ~ 64.
- [7] Mo J, Zhang W, Zhu W, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. Global Change Biology, 2008, 14, (2): 403 ~ 412.
- [8] 莫江明,方运霆,徐国良,等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO<sub>2</sub> 排放和 CH<sub>4</sub> 吸收对模拟 N 沉降的短期响应 [J]. 生态学报, 2005, 25(4): 682 ~ 690.
- [9] 邓琦,周国逸,刘菊秀,等. CO<sub>2</sub> 浓度倍增高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1023 ~ 1033.
- [10] 李仁洪,涂利华,胡庭兴,等. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1649 ~ 1655.
- [11] 涂利华,胡庭兴,张健,等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2472 ~ 2478.
- [12] 涂利华,戴洪忠,胡庭兴,等. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 829 ~ 836.
- [13] 温都如娜,方华军,于贵瑞,等. 模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO<sub>2</sub> 排放的初期影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2185 ~ 2195.
- [14] 李伟,白娥,李善龙,等. 施氮和降水格局改变对土壤 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1947 ~ 1958.
- [15] 郑威,闫文德,王光军,等. 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3425 ~ 3433.
- [16] 黄石德,李建民,叶功富,等. 板栗林土壤不同组分呼吸对氮沉降的响应 [J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(3): 95 ~ 100.
- [17] 李化山,汪金松,刘星,等. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应 [J]. 环境科学学报, 2014a, 34(1): 238 ~ 249.
- [18] 李化山,王金松,赵秀海,等. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响 [J]. 生态学杂志, 2014b, 33(4): 857 ~ 866.
- [19] 李睿达,张凯,苏丹,等. 施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3903 ~ 3910.
- [20] 孙素琪,王玉杰,王云琦,等. 缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的影响 [J]. 林业科学, 2014, 50(1): 1 ~ 8.
- [21] 向元彬,黄从德,胡庭兴,等. 华西雨屏区巨桉人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应 [J]. 林业科学, 2014, 50(1): 21 ~ 26.
- [22] 彭勇,陈刚,陈冠陶,等. 模拟氮沉降对瓦屋山常绿阔叶次生林土壤呼吸的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(4): 733 ~ 739.
- [23] 全权,张震,何念鹏,等. 短期氮沉降对东灵山三种森林土壤呼吸的影响 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 797 ~ 804.
- [24] 张方月,王清奎,于小军. CO<sub>2</sub> 浓度升高和 N 沉降对中亚热带森林土壤呼吸的短期影响 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1638 ~ 1643.
- [25] 曾清苹,何丙辉,李源,等. 模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3971 ~ 3978.
- [26] 高伟峰,史宝库,金光泽. 模拟氮沉降对典型阔叶红松林土壤呼吸的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 8 ~ 14.
- [27] 张妍,郝龙飞,王庆成,等. 模拟氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸的影响 [J]. 植物研究, 2016, 36(4): 596 ~ 604.
- [28] 赵欣然,赵琼,王巍巍,等. 氮沉降及凋落物管理对樟子松人工林土壤理化性质的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2699 ~ 2706.
- [29] Jian S, Li J, Chen J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a meta - analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 32 ~ 43.
- [30] Lu M, Zhou X, Luo Y, et al. Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta - analysis [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 140(1 - 2): 234 ~ 244.
- [31] Zhou L, Zhou X, Zhang B, et al. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: a meta - analysis [J]. Global Change Biology, 2014, 20(7): 2332 ~ 2343.
- [32] Xia L, Lam S K, Yan X, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 51(13): 7450 ~ 7457.
- [33] Elsenlord S D, Freedman Z, Zak D R, et al. Microbial mechanisms mediating increased soil C storage under elevated atmospheric N deposition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(4): 1191 ~ 1199.
- [34] Aber J D, Goodale C L, Ollinger S V, et al. Is nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeastern forests? [J]. Bioscience, 2003, 53(4): 375 ~ 389.
- [35] Zak D R, Holmes W E, Burton A J, et al. Simulated atmospheric NO<sub>3</sub><sup>-</sup> deposition increases soil organic matter by slowing decomposition [J]. Ecological Applications, 2008, 18(8): 2016 ~ 2027.
- [36] Lu M, Yang Y, Luo Y, et al. Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a meta - analysis [J]. New Phytologist, 2011, 189(4): 1040 ~ 1050.
- [37] Xia J, Wan S. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition [J]. New Phytologist, 2008, 179(2): 428 ~ 439.