

王锦旗,宋玉芝,黄 进. 大气氮沉降对流域总贡献量估算方法研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(11):246-250.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.11.048

# 大气氮沉降对流域总贡献量估算方法研究

王锦旗,宋玉芝,黄 进

(南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044)

**摘要:**估算整个流域集水区大气氮沉降对流域水体氮素的贡献量,对研究大气氮沉降对水体的影响有着十分重要的意义。因此,将流域集水分成4个片区(水域部分、农田区域、建设用地、植被区域)进行计算。对4个区域内大气氮沉降被吸收、转换方式进行不同方式的计算,其中水域部分可直接吸收大气氮沉降,在农田及植被区域,大气氮沉降经过吸收后排出农田、植被系统,在城市建设用地中除去城市绿地吸收部分外,大气氮沉降可进入流域水体。通过划分不同片区,可较为准确地估算出最终进入流域水体的大气氮沉降量,为研究流域氮输入情况提供重要理论依据。

**关键词:**氮沉降;流域;集水区;水域;农田;植被;建设用地

**中图分类号:** S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)11-0246-04

随着人类活动的加剧,化石燃料使用量、化学肥料施加量逐渐增加,释放到大气中的氮随之增加,大气氮沉降量也逐渐增加,大气氮沉降会对农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统等产生影响<sup>[1-3]</sup>。早在20世纪70年代,科研人员就发现,大气氮沉降除了对陆生生态系统产生重要影响外,对水生生态系统也有重要影响<sup>[4]</sup>,即可影响水质、使水体酸化、加剧水体富营养化<sup>[2]</sup>。因此,估算大气氮沉降对水体氮素的贡献量就成为了研究水体氮输入的重要领域。1982年,Chan等对美国安大略湖1969—1978年大气沉降物(包括氮沉降量)进行了估算<sup>[5]</sup>,此后,国内外对大气氮沉降通量进行了大量估算研究。2004年,王小治等对太湖流域氮沉降量进行了估算<sup>[6]</sup>。随后关于湖泊氮沉降量的研究逐渐开展起来。这些研究大部分集中在对湖泊水面部分氮沉降的估算上,没有将整个集水区计算在内,而湖泊集水区面积往往远大于湖泊水面面积。以太湖流域为例,太湖流域面积达3.69万km<sup>2</sup>,太湖水面面积仅2338km<sup>2</sup>,仅占流域面积的6.3%。因此,估算整个集水区的氮沉降量对水体的影响,对研究大气氮沉降对水体尤其是湖泊的氮输入影响十分重要。

## 1 流域集水区划分方式

由于流域不同区域对大气氮沉降吸收转换量不同,使最终进入流域水体中的氮沉降也存在明显差异。其中,水面部分可直接接受大气氮沉降,农田区域吸收大气氮沉降后将其排出农田系统,而城市建设用地对大气氮沉降的吸收转换较少,除城市绿地对大气氮沉降有吸收外,其余部分氮沉降可进入流域水体;在植被区域,植被及土壤对大气氮沉降均有吸收及转化,植被对氮的吸收量越多,最终进入集水区水体内的氮越少,所以要充分考虑不同区域对大气氮沉降的吸收转换量。因此,可以将流域集水分成4个片区,即流域水域部分(如湖泊水面部分)、农田、建设用地、植被区域。大气氮沉降最终进入流域水体的量根据这4个区域进行估算。

## 2 进入水体氮沉降量估算

### 2.1 流域氮沉降总量( $N_{\text{total}}$ )测定及估算

$N_{\text{total}}$ 可以根据生态环境部公布的GB/T 15265—94《环境空气 降尘的测定 重量法》进行测定<sup>[7]</sup>,也可以根据流域内各环境监测站监测的酸雨离子成分数据进行估算。可将大气氮沉降分为2个部分,即湿沉降与干沉降进行估算。干、湿沉降量估算方法很多,如替代面法、差减法、推算法、微气象法等<sup>[8]</sup>。目前我国最常用的干沉降量估算是推算法,通过测定含氮物质浓度以及氮沉降速率间接估算,公式如下:

收稿日期:2019-07-10

基金项目:教育部人文社会科学研究一般项目(编号:15YJCZH167)。

作者简介:王锦旗(1976—),男,江苏淮安人,博士,副教授,主要从事大气环境因子对水生生态系统的影响相关研究。E-mail:w\_j-q@sina.com。

$$F_d = C_a \times V_d \quad (1)$$

式中:  $F_d$  为大气氮素干沉降通量,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $C_a$  为气体、气溶胶粒子的氮素浓度,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 可通过观测测定;  $V_d$  为干沉降速率,  $\text{m} \cdot \text{s}$ 。

$V_d$  计算公式<sup>[9]</sup>如下:

$$V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1} \quad (2)$$

式中:  $R_a$  代表空气动力学阻力;  $R_b$  代表片流层阻力;  $R_c$  表示表面阻力或者冠层阻力<sup>[9]</sup>。

$V_d$  的数值也可以查阅相关文献获得, 例如, 计算渤海湾地区氮干沉降速率时, 氮取值为  $0.7 \text{ cm/s}$ , 硝酸盐及亚硝酸盐取值为  $0.1 \text{ cm/s}$ <sup>[10]</sup>。

我内最常用的湿沉降量估算方法是降水采集法, 通过测定每次降水中氮沉降通量  $F_w$  ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) 获得, 计算公式<sup>[11]</sup>如下:

$$F_w = \sum_{i=1}^n C_i \times P_i \quad (3)$$

式中:  $C_i$  为监测点每次降水中氮素的平均浓度,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $P_i$  为每次降水量,  $\text{mm}$ 。

因此,

$$N_{\text{total}} = F_d + F_w \quad (4)$$

## 2.2 流域内进入水体的氮沉降量 ( $N_{\text{input1}}$ )

由于流域水域部分 (包括流域内大小湖泊等直接水面) 直接接受大气氮干、湿沉降, 以  $N_{\text{input1}}$  表示直接进入湖泊水面部分氮沉降总量,  $R_1$  = 水域面积/流域总面积。通过水域部分进入水体的氮沉降量计算公式如下:

$$N_{\text{input1}} = R_1 \times N_{\text{total}} \quad (5)$$

## 2.3 农田大气氮沉降进入流域水体的量 ( $N_{\text{input2}}$ )

农田氮输入主要有化学肥料氮输入、人禽畜排泄物氮输入、生物固氮、农田大气氮沉降量; 假设在上述氮输入方式下, 植株对氮是均匀吸收的, 则大气氮沉降除被植物吸收以外, 其余部分均视为通过干、湿沉降方式进入湖泊流域<sup>[12]</sup>。

(1) 化学肥料氮输入是农业生态系统重要的氮输入源之一, 可以用氮肥施用的折纯量代表化肥施用的氮输入量。最终化学肥料氮输入量 ( $N_{\text{fert}}$ ) 计算公式如下:

$$N_{\text{fert}} = \sum_{i=1}^m N_{\text{ferti}} \quad (6)$$

式中:  $N_{\text{ferti}}$  为第  $i$  种施入农田的化学肥料的氮素总量 (折纯后),  $\text{t}$ , 可通过流域内各县 (市) 统计年鉴查询获得。

(2) 人禽畜排泄物氮输入量 ( $N_{\text{exci}}$ )。人禽畜排泄物氮输入主要来自于农业区内农业人口、饲养的

猪牛羊等家禽的排泄物, 农业区内农业人口数量、饲养的家禽种类和数量均可以通过查询当地统计年鉴获得, 人禽畜排泄物的氮素系数已有很多相关研究, 如太湖流域人禽畜排泄物氮素系数见表 1<sup>[12]</sup>。

$$N_{\text{exctotal}} = \sum_{i=1}^m N_{\text{exci}} \quad (7)$$

式中:  $N_{\text{exctotal}}$  为人禽畜排泄物氮输入总量;  $N_{\text{exci}}$  为各种人或禽畜排泄物中氮输入量。

表 1 人及牲畜排泄物氮素系数

种类	排泄物氮素系数
人 [ $\text{kg}/(\text{人} \cdot \text{年})$ ]	4.000
猪 [ $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$ ]	4.510
牛 [ $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$ ]	61.100
羊 [ $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$ ]	2.280
兔 [ $\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{年})$ ]	1.000
家禽 [ $\text{kg}/(\text{只} \cdot \text{年})$ ]	0.275

人禽畜粪便还田率较低, 且各地差异较大, 可通过调查确定人禽畜排泄物氮还田系数 ( $r_{\text{exc}}$ ), 例如太湖流域人禽畜排泄物氮输入还田率约为 10%<sup>[12]</sup>。因此实际通过人禽畜排泄物进入农田的氮总量计算公式如下:

$$N_{\text{exc}} = r_{\text{exc}} \times N_{\text{exctotal}} \quad (8)$$

(3) 农作物固氮量 ( $N_{\text{fix}}$ )。各种作物之间的  $N_{\text{fix}}$  差异较大, 可根据当地统计年鉴获得各种主要农作物栽培面积或产量, 并根据各种作物固氮系数, 计算总的农作物固氮量。如太湖流域主要农作物固氮系数见表 2。因此, 农作物固氮量计算公式如下:

$$N_{\text{fix}} = \sum_{i=1}^m N_{\text{fixi}} \quad (9)$$

式中:  $N_{\text{fixi}}$  为第  $i$  种农作物的固氮量。

表 2 主要农作物固氮系数<sup>[12]</sup>

种类	固氮系数 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )
大豆	73.5
花生	144.0
绿肥	150.0
水稻	45.0
其他植物	10.0

(4) 农田大气氮沉降量 ( $N_{\text{dep}}$ )。  $N_{\text{dep}}$  通过下式计算获得:

$$N_{\text{dep}} = R_2 \times N_{\text{total}} \quad (10)$$

式中:  $R_2$  = 农田面积/流域总面积。

(5) 作物吸收氮总量 ( $N_{\text{ass}}$ )。可根据主要农作

物含氮量计算植物氮吸收率,主要农作物产量根据流域内各县(市)统计年鉴获取,主要农作物氮吸收系数可参考表 3。

表 3 主要农作物氮吸收系数

种类	固氮系数(kg/t)
水稻	19 <sup>[12]</sup>
小麦	28 <sup>[12]</sup>
玉米	14 <sup>[12]</sup>
谷物	15~25 <sup>[13]</sup>
豆类	40.8~50 <sup>[13]</sup>
薯类	25 <sup>[13]</sup>
油料	35 <sup>[13]</sup>
棉花	30 <sup>[13]</sup>
蔬菜	3.5 <sup>[13]</sup>

因此,农作物氮吸收量( $N_{\text{ass}}$ )可通过下式计算:

$$N_{\text{ass}} = \sum_{i=1}^m N_{\text{assi}} \quad (11)$$

式中: $N_{\text{assi}}$ 为第  $i$  种农作物氮吸收量。

根据上述计算结果可得,农作物氮吸收率( $r$ )为:

$$r = N_{\text{ass}} / (N_{\text{fert}} + N_{\text{exc}} + N_{\text{fix}} + N_{\text{dep}}) \quad (12)$$

因此则通过该区域大气沉降进入流域的氮量即为:

$$N_{\text{input2}} = [1 - r \times N_{\text{dep}} / (N_{\text{fert}} + N_{\text{exc}} + N_{\text{fix}} + N_{\text{dep}})] \times N_{\text{dep}} \quad (13)$$

很多农业区在农业生产过程中会过量添加化学肥料,因此农作物对大气氮沉降吸收率较低,而绝大部分大气氮沉降直接进入水体。

2.4 城市建设用地氮沉降输入流域水体的量( $N_{\text{input3}}$ )

在城市建设用地中,除城市绿地吸收氮沉降外,其余部分氮沉降均进入流域水体,因此城市用地氮沉降中除去被绿地吸收部分外,其余部分视为进入流域水体的大气氮沉降。

$$N_{\text{input3}} = R_3 \times N_{\text{total}} - \sum_{i=1}^n A_i \times f_{\text{gb}} \quad (14)$$

式中: $R_3$  城市建设用地面积占全流域面积的百分比; $A_i$  为各城市绿地面积; $f_{\text{gb}}$  为绿地对氮的吸收率,kg/hm<sup>2</sup>。

2.5 植被区域大气氮沉降进入流域水体的量( $N_{\text{input4}}$ )

当某一流域内土壤与植被对大气氮沉降的吸收达到饱和时,会将多余的氮排出。那么,在估算流域植被区域输入水体的氮沉降时,必须考虑各种

土壤类型的氮饱和临界点,当某一生态系统内部原有氮源总量与外部输入的氮源总量之和超过该系统各种生物、化学、物理机制的吸收能力时,就会对该系统产生危害,此时的临界点就是氮饱和临界点。因此,在估算某一流域经植被后进入水体的大气氮沉降量时,必须先估算这部分区域大气氮沉降是否超过其氮沉降临界负荷,若超过,则视超出部分进入水体,若未超过,即视为全部被植被吸收利用<sup>[11,14]</sup>。目前国内外在大气氮沉降临界负荷估算方面应用较为广泛的估算方法为 SMB(simple mass balance)法,基本方程为:

$$CL_N = N_i + N_{\text{up}} + N_{\text{de}} + N_{\text{le,crit}} \quad (15)$$

式中: $CL_N$  为氮沉降临界负荷; $N_i$  为土壤中氮的矿化速率; $N_{\text{up}}$  为不同植被对氮的吸收速率; $N_{\text{de}}$  为氮反硝化速率; $N_{\text{le,crit}}$  为临界氮淋溶速率<sup>[15]</sup>。其中植被类型及土壤类型数据可通过各流域土壤类型图及植被分布图获取。

(1)土壤中氮的矿化速率可通过如下计算:

$$N_i = \frac{Cd}{t} \quad (16)$$

式中: $C$  为土壤的含氮量; $d$  为土壤厚度; $t$  为土壤形成时间。我国不同区域土壤矿化速率 [ $N_i$ , kmol/(hm<sup>2</sup>·年)]也可参考文献[15]确定。

(2) $N_{\text{up}}$  为不同植被对氮的吸收速率,我国不同区域各主要植被类型对氮的吸收速率可参考文献[16]确定。

(3) $N_{\text{de}}$  为氮反硝化速率,由于反硝化速率与氮净输入呈线性关系<sup>[17]</sup>,因此, $N_{\text{de}}$  计算公式<sup>[15,17]</sup>如下:

$$N_{\text{de}} = \begin{cases} f_{\text{de}}(N_{\text{d}} - N_i - N_{\text{up}}) & N_{\text{d}} > N_i + N_{\text{up}} \\ 0 & N_{\text{d}} \leq N_i + N_{\text{up}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $f_{\text{de}}$  为反硝化率<sup>[18-19]</sup>; $N_{\text{d}}$  为植被区域氮沉降量,根据区域氮总沉降量计算得到,计算公式如下:

$$N_{\text{d}} = R_4 \times N_{\text{total}} \quad (18)$$

式中: $R_4$  为植被区面积占全流域面积的百分比。 $N_{\text{de}}$ 在排水较好的植被覆盖区,可忽略<sup>[15]</sup>。根据上述计算,公式(15)可简化<sup>[15]</sup>为:

$$CL_N = N_t + N_{\text{up}} + \frac{N_{\text{le,crit}}}{1 - f_{\text{de}}} \quad (19)$$

(4) $N_{\text{le,crit}}$  计算公式如下:

$$N_{\text{le,crit}} = Q \times [N]_{\text{crit}} \quad (20)$$

式中: $Q$  为径流量; $[N]_{\text{crit}}$  为临界氮淋溶浓度;以保护地下水为考虑目标时, $[N]_{\text{crit}}$  一般取值

为 25 mg/L<sup>[20]</sup>。

因此,当植被区域的氮沉降量大于临界负荷折算的沉降量时,超出部分可视为进入流域水体的氮沉降量,当植被区域的氮沉降量小于临界负荷折算的沉降量时,可视为 0。

$$N_{\text{input}4} = \begin{cases} N_d - CL_N \times A_f & N_d > CL_N \times A_f \\ 0 & N_d \leq CL_N \times A_f \end{cases} \quad (21)$$

式中: $A_f$  为植被区面积。

因此,最终大气氮沉降对流域氮素水体的贡献量计算公式为:

$$N_{\text{input}} = N_{\text{input}1} + N_{\text{input}2} + N_{\text{input}3} + N_{\text{input}4} \quad (22)$$

### 3 不确定性分析

由于在大气氮沉降对水体氮素贡献量的估算中,涉及的数据参数较多,因此数据完整性将决定估算的准确性。

(1)由于下垫面性质对大气氮沉降影响较大,尤其是干沉降部分,若想得到较为精细化的结果,必须将水域部分、农田区域、植被区域及城市建设用地的大气氮沉降量进行分别计算。

(2)各地农田对大气氮的吸收量存在一定差异。例如,太湖流域农田对大气氮沉降的吸收量较少,因此汇入流域水体的氮沉降量较大,而西南地区很多湖泊流域未超出吸收量<sup>[21]</sup>。在农田对大气氮沉降的吸收方面,本研究假设在各种氮输入途径中,农作物均匀吸收氮,实际上农作物会优先选择易吸收的氮,而大气氮沉降是否能与其他形式氮输入被作物均匀吸收,还需进一步研究。另外,人禽畜排泄物还田率差异性较大,即使在同一流域内,各地差异也较大,需要加大调研力度,才可使准确性提高。

(3)SMB 法主要用于估算临界负荷,本研究使用时由于涉及参数较多,难免存在资料缺乏及不全的情况,除此之外,估算假设情境与实际情况有差异。

### 4 结论

将流域集水区划分为不同片区进行估算,能充分考虑全流域大气氮沉降对水体氮素的影响,对于分析大气氮沉降对水体的影响,尤其湖泊氮素来源具有重要作用。

将流域集水分成水域部分、农田区域、建设

用地、植被区域 4 个片区计算大气氮沉降量;其中,水域部分可直接接受大气氮沉降,农田部分由于人为耕种影响,大气沉降除少量被农作物吸收外,绝大部分进入流域水体,城市建设用地氮沉降扣除城市绿地吸收部分,绝大部分也可进入流域水体。植被区域氮沉降除去部分被植被吸收和土壤转化外,其余部分会排出系统,进入流域水体。

### 参考文献:

- [1] 谢迎新,张淑利,冯伟,等. 大气氮素沉降研究进展[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):897-904.
- [2] Lepori F, Keck F. Effects of atmospheric nitrogen deposition on remote freshwater ecosystems[J]. Ambio,2012,41(3):235-246.
- [3] 胡正华,张寒,陈书涛,等. 氮沉降对林带土壤  $N_2O$  和  $CH_4$  通量的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(6):892-897.
- [4] Porter E M, Bowman W D, Clark C M, et al. Interactive effects of anthropogenic nitrogen enrichment and climate change on terrestrial and aquatic biodiversity[J]. Biogeochemistry,2013,114(1/2/3):93-120.
- [5] Chan C H, Kuntz K W. Lake Ontario atmospheric deposition 1969—1978[J]. Water, Air, and Soil Pollution,1982,18(1/2/3):83-99.
- [6] 王小治,朱建国,高人,等. 太湖地区氮素湿沉降动态及生态学意义:以常熟生态站为例[J]. 应用生态学报,2004,15(9):1616-1620.
- [7] Zhai S J, Yang L Y, Hu W P. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in northern lake Taihu, China[J]. Environmental Management, 2009,44(3):542-551.
- [8] 宋欢欢,姜春明,宇万太. 大气氮沉降的基本特征与监测方法[J]. 应用生态学报,2014,25(2):599-610.
- [9] 骆晓声,石伟琦,鲁丽,等. 我国雷州半岛典型农田大气氮沉降研究[J]. 生态学报,2014,34(19):5541-5548.
- [10] 杨正先,于丽敏,张志锋,等. 渤海大气氮沉降通量初步研究[C]//环境污染与公共健康国际会议论文集. 北京:美国科研出版社,2012:72-75.
- [11] 盛文萍,于贵瑞,方华军,等. 大气氮沉降通量观测方法[J]. 生态学杂志,2010,29(8):1671-1678.
- [12] 张欢,李恒鹏,李新艳,等. 太湖流域典型农业区氮平衡时间变化特征及驱动因素[J]. 土壤通报,2014,45(5):1119-1129.
- [13] 许朋柱,秦伯强,香宝,等. 区域农业用地营养盐剩余量的长期变化研究[J]. 地理科学,2006,26(6):668-673.
- [14] 刘超明,唐美庆,马坤,等. 北京地区典型落叶阔叶乔木叶片含氮量和  $\delta^{15}N$  值对大气氮沉降的响应[J]. 生态学报,2017,37(7):2334-2341.
- [15] 郝吉明,齐超龙,段雷,等. 用 SMB 法确定中国土壤的营养氮沉降临界负荷[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003,43(6):849-853.

方明,李洁,赖欣,等. 短期生物炭刺激对红壤和潮土微生物群落的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(11):250-258.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.11.049

# 短期生物炭刺激对红壤和潮土微生物群落的影响

方明<sup>1,2</sup>, 李洁<sup>1</sup>, 赖欣<sup>1</sup>, 王知文<sup>1,3</sup>, 张贵龙<sup>1</sup>, 姜淑苓<sup>2</sup>

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 中国农业科学院果树研究所, 辽宁兴城 125100;

3. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要:**通过施用不同质量比的生物炭(0.5%、1.0%、2.0%、4.0%), 研究生物炭施用对红壤和潮土微生物群落结构的影响。通过土柱培养试验, 采用磷脂脂肪酸法测定不同处理土壤微生物的群落结构。添加 1.0%、2.0%、4.0% 生物炭处理与添加 0.5% 生物炭处理相比, 潮土细菌 PLFAs 含量增加了 9.5%~56.7%; 添加 0.5% 和 1.0% 生物炭细菌的磷脂脂肪酸(PLFAs) 含量分别显著降低了 33.7%、27.3%; 添加 0.5%、2.0%、4.0% 生物炭处理的革兰氏阴性细菌 PLFAs 的含量与单施氮肥处理相比显著下降了 27.6%~48.8%, 生物炭施用对真菌、放线菌、革兰氏阳性细菌、真菌 PLFAs 含量和细菌 PLFAs 含量的比值(真/细)和总 PLFAs 含量总体没有显著影响。生物炭施用对红壤的微生物 PLFAs 含量没有显著影响。在添加生物炭的处理中, 生物炭施用量的增加使饱和脂肪酸含量/不饱和脂肪酸含量有降低的趋势。通过比值分析、多样性分析和主成分分析可知, 短期生物炭刺激对红壤和潮土的微生物群落结构没有显著影响, 2 种土壤微生物生态位未产生分化。

**关键词:**生物炭; 红壤; 潮土; 土壤微生物; PLFAs; 群落结构; 主成分分析

**中图分类号:** S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)11-0250-09

菜地土壤的氮肥施用量大, 大量的氮素盈余造成了地下水污染、土壤酸化、温室气体大量排放等严重的环境问题<sup>[1]</sup>。生物炭作为一种性质稳定的生物质材料, 其比表面积和孔隙度较大, 含碳量较高, 这些性质决定了生物炭具有较高的吸附性、稳定性和养分含量<sup>[2]</sup>。生物炭能够提高土壤 pH 值、土壤的透气透水性以及固持土壤中的养分等, 减少氮素流失, 提高作物的氮素利用效率。土壤微生物

作为土壤生态系统中的重要组成部分, 是土壤氮素循环和转化的重要驱动力, 通过分析土壤微生物的变化情况来探讨生物炭对土壤生态系统的作用, 是研究生物炭施用益处和风险的途径之一。

有研究表明, 向土壤中添加生物炭后, 能够改变土壤细菌、真菌和古菌的群落组成<sup>[3-4]</sup>, 向黑土中添加生物炭后, 土壤细菌阿尔法多样性(alpha diversity) 增加<sup>[5]</sup>。姚钦利用变性梯度凝胶电泳(DGGE)法分析了亚马逊黑土和未改造土壤的细菌和古菌的群落结构, 结果表明, 富含生物炭的亚马逊黑土土壤细菌和古菌的群落结构与相邻未改造土存在显著差异<sup>[6]</sup>。PLFAs 是细胞膜上的磷脂脂肪酸, 其种类的不同可以标记出不同的微生物类群, 被广泛应用于土壤微生物学研究中。Bamminger 等通过 37 d 的培养试验发现, 添加生物炭能显著提高

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程。

作者简介: 方明(1992—), 男, 黑龙江佳木斯人, 硕士, 主要从事生物炭对土壤碳氮养分循环影响的研究。E-mail: fangmingzhxy@163.com。

通信作者: 张贵龙, 博士, 副研究员, 主要从事土壤碳氮循环研究, E-mail: zhangguilong@caas.cn; 姜淑苓, 硕士, 研究员, 主要从事果树学研究, E-mail: jshuling@163.com。

[16] 段雷, 黄永梅, 郝吉明, 等. 中国植被对氮和盐基阳离子吸收速率及其在土壤酸化中的作用[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 68-74.

[17] de Vries W, Posch M, Reinds G J, et al. Critical loads and their exceedance on forest soils in Europe [R]. The Netherlands: Wageningen, 1992.

[18] Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt). UN ECE - Convention on long - range transboundary air pollution - task force

on reactive nitrogen [R/OL]. (2011-08) [2019-01-01] <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4207.pdf>.

[19] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1987.

[20] 段雷. 中国酸沉降临界负荷区划研究[M]. 北京: 清华大学, 2000.

[21] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 等. 中国主要湖泊营养氮沉降临界负荷的研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(1): 54-58.