

## 摘要

土壤碳、氮循环相互耦合，是森林生态系统能量交换和物质循环的核心，土壤呼吸又是陆地生态系统中仅次于植物光合作用的碳通量，是调控生态系统碳循环的关键过程。近 150 年来，随着工业化的快速发展、化石燃料的燃烧、农牧业生产导致的含氮化合物排放量迅速增加，这些氮以干沉降、湿沉降的形式降落到森林生态系统中，对森林土壤碳、氮动态产生深远影响，使氮沉降成为近代影响森林土壤碳、氮库的另一个重要因素。近年来由于快速城市化进程的影响，城市森林氮沉降量远高于天然林，较高的氮沉降量可能导致其土壤养分元素化学计量失衡及多数城市土壤受“氮限制”影响，因此，城市森林土壤对氮沉降增加的响应可能更为敏感。迄今，国内外关于氮沉降对城乡梯度上森林土壤碳、氮库影响的研究和认识还十分有限，亟待加强城市化进程中氮沉降对城乡森林生态系统土壤碳、氮库及碳循环影响方面的研究，这对完善森林生态系统碳循环理论具有重要的理论研究意义。

因此，本研究拟以已建立的典型城乡梯度森林样地为研究平台，通过模拟氮沉降（对照-CK： $0 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ；低氮添加-LN： $50 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ；高氮添加-HN： $100 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ）实验，测定氮沉降后土壤碳、氮含量（土壤全碳、全氮及其活性组分）及碳输出（土壤呼吸速率和异养呼吸速率）等的变化，探讨持续 4 年氮添加如何影响城乡梯度森林生态系统碳、氮库及土壤呼吸。主要研究结果如下：

（1）氮添加第 4 年，城乡梯度森林土壤有机碳及其活性碳组分（溶解性有机碳，DOC；微生物生物量碳，MBC）呈现明显城乡梯度变化且随土层加深呈现下降趋势。城乡梯度森林土壤碳储量表现为近郊森林>远郊森林>乡村森林。氮添加显著增加了乡村森林有机碳及其活性组分含量。

（2）氮添加第 4 年，城乡梯度上森林土壤全氮与有机碳含量遵循相似变化趋势且随氮添加时间增加而增加，其活性氮组分（溶解性有机氮，DON；微生物生物量氮，MBN）和 C/N 均随土壤加深而降低。土壤氮储量及活性氮组分含量表现为近郊森林>远郊森林>乡村森林。氮添加增加了乡村森林土壤全氮及其活性氮组分含量。

（3）氮添加第 4 年，氮添加对城乡梯度森林上土壤呼吸及其组分影响不同。氮添加对近郊森林和远郊森林土壤总呼吸和异养呼吸呈抑制作用；对乡村森林异养呼吸呈显著促进作用。

（4）与氮添加初期相比，持续氮添加 4 年后，城乡梯度森林土壤有机碳和全氮含量增加，表明氮添加利于碳、氮储量的积累。持续氮添加显著提高乡村森林土壤 DOC 含量，而降低土壤 MBC 和 MBN 含量。研究同时表明，持续 4 年氮添加降低了

土壤 pH 值，进而抑制了城乡梯度上森林土壤总呼吸。氮沉降对近郊森林和远郊森林异养呼吸产生抑制作用，对乡村森林自养呼吸产生抑制作用。

综上，本研究的相关结果表明森林土壤碳、氮及其活性组分体现显著城乡梯度差异，且氮沉降对森林土壤碳、氮库及土壤呼吸均具有显著影响，进而影响森林生态系统养分循环。本研究对阐明氮沉降增加背景下城乡梯度森林土壤碳氮养分循环过程提供科学依据，并为氮沉降增加背景下城市化进程的生态风险评估提供理论支撑。

**关键词：**氮沉降；城乡梯度森林；土壤碳氮；土壤呼吸；土壤理化性质

# ABSTRACT

Soil carbon and nitrogen cycle process is the core of energy exchange and material cycling in forest ecosystem, and soil carbon and nitrogen storage and cycling are coupled with each other. Soil respiration, in turn, is the second most important carbon flux in terrestrial ecosystems after plant photosynthesis, and is a key process regulating the ecosystem carbon cycle. In the last 150 years, with the rapid development of industrialisation, the burning of fossil fuels and the rapid increase in emissions of nitrogenous compounds due to agricultural and livestock production, this nitrogen has landed in forest ecosystems in the form of dry deposition and wet deposition, with far-reaching effects on forest soil carbon and nitrogen dynamics, making nitrogen deposition another important factor affecting forest soil carbon pool and nitrogen pool in recent times. In recent years, due to rapid urbanisation, nitrogen deposition in urban forests has been much higher than in natural forests, and higher nitrogen deposition may lead to imbalances in soil nutrient stoichiometry and 'nitrogen limitation' in most urban soils, so urban forest soils may be more sensitive to increased nitrogen deposition. To date, research and understanding of the effects of nitrogen deposition on soil carbon pool and nitrogen pool in urban-rural gradient forests at home and abroad are still very limited, and there is an urgent need to strengthen research on the effects of nitrogen deposition on soil carbon pool and nitrogen pool and carbon cycle in urban and rural forest ecosystems during urbanization, which is of great theoretical research significance to improve the theory of carbon cycling in forest ecosystems.

Therefore, in this study, we propose to use the established typical urban-rural gradient forest sample plots as a research platform to measure the changes of soil carbon, nitrogen content (Total soil carbon, total nitrogen and its active fraction) and carbon output (Soil respiration rate and heterotrophic respiration rate) after nitrogen deposition through simulated nitrogen deposition (Control-CK:  $0 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ; Low nitrogen added-LN:  $50 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ; High nitrogen added-HN:  $100 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) experiments, and to explore how the sustained four-year nitrogen addition affects the carbon pool and nitrogen pool and soil respiration of urban-rural gradient forest ecosystems. The main findings are as follows:

(1) In the fourth year of nitrogen addition, soil organic carbon and its active carbon fraction (dissolved organic carbon (DOC); microbial biomass carbon (MBC)) showed a clear urban-rural gradient pattern and a downward trend as the soil layer deepens. Soil carbon

storage in forests along the urban-rural gradient showed that urban forest > suburban forest > rural forest. Nitrogen addition significantly increased the content of organic carbon and its active fraction in rural forest.

(2) In the fourth year of nitrogen addition, the total nitrogen and organic carbon content of forest soils on the urban-rural gradient followed similar trends and increased with time of nitrogen addition, while their active nitrogen fraction(dissolved organic nitrogen (DON); microbial biomass nitrogen (MBN)) and C/N decreased with soil deepened. Soil nitrogen storage and active nitrogen fractions in forests on an urban-rural gradient showed that urban forest > suburban forest > rural forest. Nitrogen addition increased the content of total nitrogen and its active nitrogen fraction in rural forest soil.

(3) The effect of nitrogen addition on soil respiration and its components on forests on urban and rural gradients differed in the fourth year of nitrogen addition. Nitrogen addition inhibited total soil respiration respiration and heterotrophic respiration in urban and suburban forests; it significantly promoted heterotrophic respiration in rural forest.

(4) The organic carbon and total nitrogen content of forest soils on the urban-rural gradient increased after four years of continuous nitrogen addition compared to the initial nitrogen addition, indicated that nitrogen addition facilitated the accumulation of carbon and nitrogen storage. Continuous nitrogen addition significantly increased DOC content and decreased soil MBC and MBN content in rural forest soil. The study also showed that continuous nitrogen addition for four years reduced soil pH, which in turn inhibited total forest soil respiration on the urban-rural gradient. Nitrogen deposition inhibited heterotrophic respiration in urban and suburban forests, and inhibited autotrophic respiration in rural forest.

In summary, the results of this study showed that forest soil carbon, nitrogen and their active fractions show significant urban-rural gradients, and that nitrogen deposition has a significant impact on forest soil carbon and nitrogen pools and soil respiration, which in turn affects nutrient cycling in forest ecosystems. This study provided a scientific basis for elucidating the process of carbon and nitrogen nutrient cycling in forest soils along the urban-rural gradient in the context of increasing nitrogen deposition, and provided theoretical support for ecological risk assessment of urbanization processes in the context of increasing nitrogen deposition.

**KEYWORDS:** Nitrogen deposition; Urban-rural gradient forest; Soil carbon and nitrogen; Soil respiration; Physical and chemical properties of soil

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究进展 .....	2
1.2.1 土壤碳氮及其储量 .....	2
1.2.2 土壤活性碳氮 .....	3
1.2.3 土壤呼吸 .....	4
1.2.4 大气氮沉降效应 .....	4
1.2.5 城市化与城乡环境梯度 .....	6
1.3 研究内容和目标 .....	8
1.4 拟解决科学问题 .....	9
1.5 技术路线 .....	9
第二章 材料与方法 .....	10
2.1 研究区概况 .....	10
2.2 实验样地设计 .....	11
2.3 实验样品采集及处理 .....	14
2.4 土壤碳氮及各项理化性质指标的测定 .....	14
2.4.1 土壤 pH、容重、含水率、电导率测定方法 .....	14
2.4.2 土壤有机碳、全氮测定方法 .....	14
2.4.3 土壤活性碳氮测定方法 .....	15
2.4.4 土壤无机氮测定方法 .....	15
2.5 土壤呼吸测定 .....	15
2.6 数据处理与分析 .....	15
第三章 结果与分析 .....	17
3.1 氮沉降下城乡梯度森林碳、氮分布特征 .....	17
3.1.1 氮沉降对城乡梯度森林土壤全碳的影响 .....	17
3.1.2 氮沉降对城乡梯度森林土壤全氮的影响 .....	19
3.1.3 土壤碳、氮储量分布特征 .....	21
3.2 氮沉降下城乡梯度森林土壤活性碳、氮的影响 .....	23
3.2.1 氮沉降对城乡梯度森林土壤可溶性有机碳的影响 .....	23
3.2.2 氮沉降对城乡梯度森林土壤可溶性有机氮的影响 .....	23

3.2.3	氮沉降对城乡梯度森林土壤微生物生物量碳的影响 .....	24
3.2.4	氮沉降对城乡梯度森林土壤微生物生物量氮的影响 .....	25
3.3	氮沉降对城乡梯度森林土壤呼吸的影响 .....	26
3.3.1	氮沉降对城乡梯度森林土壤呼吸及其组分特征的影响 .....	26
3.3.2	氮添加下城乡梯度土壤呼吸各组分对土壤总呼吸贡献率变化 .....	28
3.3.3	氮添加下城乡梯度森林土壤呼吸的影响因子 .....	29
3.4	持续施氮下城乡梯度森林土壤碳、氮及土壤呼吸变化特征 .....	31
3.4.1	施氮 4 年前后城乡梯度森林土壤理化性质对比分析 .....	31
3.4.2	施氮 4 年前后城乡梯度森林土壤碳库对比分析 .....	34
3.4.3	施氮 4 年前后城乡梯度森林土壤氮库对比分析 .....	38
3.4.4	施氮 4 年前后城乡梯度森林土壤呼吸对比分析 .....	41
第四章	讨论 .....	42
4.1	氮沉降对城乡梯度森林土壤碳、氮库的影响 .....	42
4.1.1	氮沉降对城乡梯度森林土壤有机碳、全氮的影响 .....	42
4.1.2	氮沉降对城乡梯度森林土壤可溶性有机碳、氮的影响 .....	44
4.1.3	氮沉降对城乡梯度森林土壤微生物生物量碳、氮的影响 .....	45
4.2	氮沉降对城乡梯度森林土壤呼吸的影响 .....	46
4.3	持续施氮对城乡梯度森林碳、氮库及土壤呼吸的影响 .....	47
4.3.1	持续施氮下城乡梯度森林土壤碳、氮库对比分析 .....	47
4.3.2	持续施氮下城乡梯度森林土壤呼吸对比分析 .....	48
第五章	结论与展望 .....	50
5.1	主要结论 .....	50
5.2	未来研究展望 .....	51
参考文献	.....	52
作者简介	.....	63

## 插图清单

图 1-1	技术路线图.....	9
图 2-1	合肥市 2018 年 8 月及 2022 年 8 月日平均气温与降水量.....	10
图 2-2	近郊森林 (a)、远郊森林 (b) 和乡村森林 (c) 样地.....	12
图 2-3	研究区位图.....	12
图 2-4	样地示意图.....	13
图 3-1	城乡梯度森林不同土层 SOC 含量变化.....	18
图 3-2	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 SOC 含量变化	18
图 3-3	城乡梯度森林不同土层 TN 含量变化.....	19
图 3-4	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 TN 含量变化... 20	20
图 3-5	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 C/N 变化.....	20
图 3-6	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 DOC 含量变化	23
图 3-7	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 DON 含量变化	24
图 3-8	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 MBC 含量变化	25
图 3-9	不同氮添加下 0-10cm(a)、10-20cm(b)土层中城乡梯度森林 MBN 含量变化	25
图 3-10	不同氮添加下城乡梯度森林土壤呼吸(a)及其组分(b) (c)变化 .....	27
图 3-11	不同氮添加下城乡梯度森林土壤呼吸各组分对总呼吸速率的贡献率.....	28
图 3-12	城乡梯度森林土壤呼吸与环境因子的冗余分析 (RDA) .....	29
图 3-13	城乡梯度森林土壤碳、氮与环境因子的冗余分析 (RDA) .....	33
图 3-14	连续 4 年施氮对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤 SOC 含量的影响.	34
图 3-15	连续 4 年氮添加对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤碳储量的影响 ..	35
图 3-16	连续 4 年施氮对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤 DOC 含量的影响	36
图 3-17	连续 4 年施氮对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤 MBC 含量的影响	37
图 3-18	连续 4 年氮添加对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤 TN 含量的影响	38
图 3-19	连续 4 年氮添加对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤氮储量的影响 ..	39
图 3-20	连续 4 年氮添加对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤 DON 含量的影响 .....	39
图 3-21	连续 4 年施氮对城乡梯度森林 0-10 cm、10-20 cm 土壤 MBN 含量的影响	40

## 表格清单

表 2-1	样地基本特征 .....	11
表 3-2	城乡梯度森林不同氮添加下土壤容重 .....	21
表 3-3	城乡梯度森林不同氮添加下土壤碳、氮储量 .....	22
表 3-4	不同梯度森林、氮沉降处理及土层对土壤 $R_s$ 、 $R_h$ 、 $R_a$ 的双因素方差分析	26
表 3-5	城乡梯度森林土壤呼吸的蒙特卡洛检验分析表 .....	30
表 3-6	城乡梯度森林土壤呼吸的 RDA 特征参数表 .....	31
表 3-7	城乡梯度森林土壤理化性质在氮添加 4 年前后对比 .....	32
表 3-8	城乡梯度森林土壤呼吸及其组分氮添加 4 年前后对比 .....	41

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景和意义

工业革命以来，人类活动导致大气氮沉降剧增，活性氮（Nr）快速积累，当前已超过自然固氮总量<sup>[1]</sup>。据估计，到 2030 年，全球氮沉降将比 2000 年增加 50 %以上，且大部分氮将沉积在陆地生态系统中<sup>[2]</sup>。氮沉降作为生态系统养分的重要来源，会对生态系统产生深远影响。其驱动的土壤碳氮耦合循环已成为全球变化生态学研究的前沿及热点问题之一<sup>[3]</sup>。

氮沉降对森林生态系统的生态效益主要表现为两个方面：（1）正效应：对于森林而言，氮元素为生长限制性元素，外源氮的输入会增加土壤有效氮水平，因而可以提高叶片光合速率、加速植物生长、提高生态系统碳吸收<sup>[4]</sup>。此外，氮沉降还能抑制微生物对土壤碳的分解、降低生态系统碳释放速率、增加土壤碳汇<sup>[5]</sup>。但也有研究认为，氮沉降的生态效应取决于氮的化学形态、生态系统自身状况及植物生理特性等，也就是说氮沉降的施肥效应仍不确定<sup>[6, 7]</sup>；（2）负效应：过量氮沉降对森林生态系统具有明显的负效应<sup>[8, 9]</sup>，主要表现为土壤酸化及养分失衡、镁离子和钙离子淋失加剧、物种多样性丧失、有害离子富集、植物抗逆性降低，不利于碳积累。

森林是陆地生态系统重要碳库，森林碳库主要储存于植被和土壤中，其中土壤碳库约是植被碳库的 2 倍，是大气碳库的 3 倍<sup>[10]</sup>。土壤碳库包含不同形态的碳，由于其化学组成、降解难易程度以及转化速率等方面的不同，对外界环境变化的响应存在差异。其中，土壤有机碳（Soil organic carbon, SOC）直接参与土壤生物化学转化过程，是土壤养分循环的动力。SOC 中一部分碳对相关环境变化非常敏感<sup>[11]</sup>，这部分有机碳被称为活性碳库，其中包括可溶性有机碳（Dissolved organic carbon, DOC）、微生物生物量碳（Microbial biomass carbon, MBC）等。长期以来，国内外在氮沉降与土壤碳、氮库研究方面开展了大量卓有成效的工作，但其结果仍然存在争议<sup>[12]</sup>。前人综述了氮沉降对城市土壤碳库的影响途径，并预测城市氮沉降可能会导致城市森林土壤碳、氮流失<sup>[13]</sup>。还有研究运用氮沉降梯度法研究了城乡环境梯度下森林土壤碳储量与土壤氮含量的关系<sup>[14]</sup>，但该研究未消除非实验因素的干扰（如，环境梯度下不同样地间海拔、气候、树种组成、氮沉降背景及土地利用历史等），其研究结果存在一定的质疑。与此同时，由于碳、氮过程之间的紧密耦合，使得氮沉降对森林生态系统中氮储量产生明显影响，土壤碳、氮库及其储量在维持和调控土壤生态系统能量和物质循

环过程中起着关键作用<sup>[15]</sup>。因此,氮沉降对土壤碳、氮库的影响有待进一步分析研究。

虽然目前已有较多森林碳循环相关研究,但大多集中在单一区域,仍不清楚碳循环的响应是否存在空间异质性<sup>[16]</sup>。另一方面,随着城市化发展,城市与乡村环境属性差异扩大,城市化对城市森林生态环境的影响日益受到关注<sup>[17]</sup>。城-乡梯度环境界面能够直观对比分析城市化对森林生态系统生态过程,已成为学术界普遍公认的有效方法。目前关于氮沉降驱动的森林生态系统碳、氮库及城乡梯度环境格局还存在很大的不确定性。定量研究城市环境对森林生态系统的影响及其驱动机制,为深入了解全球环境变化对森林生态系统的影响提供重要参考。然而,受限于有限的地面控制实验且缺乏对城市环境中气候与人类活动等数据的有效整合,人们对于城市化如何间接影响森林生态系统的认识仍然不够充分。在上述背景下,基于城乡环境梯度开展森林土壤碳、氮研究对完善森林生态系统碳、氮循环理论具有重要的理论研究意义;而且对于评估城市森林土壤碳固持潜力,实现森林可持续经营具有重要的实际应用价值。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 土壤碳氮及其储量

碳、氮是维持森林生态系统结构、功能和稳定的重要元素。森林作为碳、氮循环的重要库,储存约 80% 的地表有机碳和 40% 的地下有机碳<sup>[15]</sup>。森林碳库是由土壤有机质、植被地下及地上生物量、凋落物和粗木质残体等组成,其中土壤碳库是主要的碳库<sup>[18]</sup>。同时,森林陆地生态系统碳储量与 SOC 的动态变化密切相关<sup>[19]</sup>。SOC 是土壤碳固存的主要组成部分,在维持生态系统功能中起着关键作用<sup>[20]</sup>。从机理上来说,SOC 含量受到有机物(主要指植物凋落物和微生物残留物)的碳输入和微生物分解过程中的碳输出(主要以 CO<sub>2</sub> 和 DOC 的形式)的影响<sup>[21]</sup>。森林土壤中碳转化的来源主要是通过植物的光合作用所固定的 CO<sub>2</sub>,随后约 30%-60% 通过凋落物、根系、根系分泌物或动植物残体的形式进入土壤,进入土壤中的碳通过土壤总呼吸(Soil respiration, Rs)作用将 CO<sub>2</sub> 还原到大气中,其中, Rs 释放的 CO<sub>2</sub> 也是大气中 CO<sub>2</sub> 的主要来源。

氮素是植物生长发育所必需的营养元素之一。土壤的供氮能力影响生态系统生产力。因此,氮通常对陆地生态系统中生物生长起制约作用。森林面积占陆地总面积的 30%,含氮量占植被和土壤总氮量的 50% 以上<sup>[22]</sup>。因此,森林氮库的微小波动可显著影响区域和全球氮循环。土壤氮的动态变化是影响森林生态系统固碳的主要因素<sup>[23]</sup>。土壤中的全氮(Total nitrogen, TN)含量主要受氮输入(主要是通过氮沉降、生物固氮和凋落物氮归还)和氮输出(主要是通过植物氮吸收、气态氮损失和氮淋失)控制。

土壤中氮主要以有机氮 (Soil organic nitrogen, SON) 和无机氮 (Soil inorganic nitrogen, SIN) 的形式存在。其中, SIN 主要以铵态氮 (Ammonium nitrogen,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 和硝态氮 (Nitrate nitrogen,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) 形式存在, 占比不足 1%, 可被植物直接吸收利用。SON 是土壤中最主要的氮素形态, 其含量主要取决于森林凋落物产量。不同形式氮的组成主要是由同时发生的土壤氮转化过程 (矿化率-固定化周转率), 特别是由土壤氮矿化、硝化作用和  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  的固定化速率决定。作为氮汇来说, 土壤微生物驱动的氮转化过程, 一方面能够为其提供生物直接利用的氮素, 另一方面也能够对森林生态系统氮损失量 (气态氮排放、土壤氮淋溶) 进行直接调控, 进而改变土壤氮素的留存。土壤氮转化与循环是森林生态系统氮循环中最活跃的过程, 氮以活性矿物的形式输入土壤仅数小时至数天, 就被固定在土壤有机分子中<sup>[24]</sup>。因此, 氮在土壤有机质 (Soil organic matter, SOM) 中的储存是迅速的。同时, 氮储量也被认为是衡量土壤质量和表征土壤固碳潜力的重要指标。

### 1.2.2 土壤活性碳氮

土壤活性碳、氮是土壤碳、氮循环过程中最活跃的组分, 常被用作土壤质量和环境变化的评价指标。其在土壤中容易被氧化和矿化, 周转时间短, 因此受到植物或微生物的强烈影响<sup>[25]</sup>。土壤活性碳、氮直接参与土壤生化过程, 是土壤养分循环的动力, 对环境变化十分敏感<sup>[26]</sup>。虽然只占土壤碳、氮库的一小部分, 但能反映之前的环境条件对土壤产生的微小影响<sup>[27]</sup>, 因此被广泛用作土壤质量的敏感指标以探究对全球碳、氮库的重要影响。

土壤 DOC 和可溶性有机氮 (Dissolves organic nitrogen, DON) 分别指土壤溶液中溶解性有机碳和氮经过水、盐等浸提剂获得的组分<sup>[28, 29]</sup>, 具有易流动、及分解、生物活性较高等特点, 是 SOC 中不稳定成分。其来源主要是凋落物和细根残体的分解、根系分泌物的分泌和周转、微生物代谢产物、腐殖质分解及大气氮沉降<sup>[30]</sup>。其中, DOC 调控土壤碳有效性, 可直接作为碳源被微生物利用从而影响其活性<sup>[31]</sup>, 并能够通过物理迁移和化学转化在土壤碳循环中起关键作用<sup>[32]</sup>。此外, 微生物代谢产物是土壤中 DOC 的重要组成部分<sup>[33]</sup>。DON 是土壤氮素转化的重要中间产物, 影响土壤养分有效性和流动性, 是土壤微生物的不稳定氮源<sup>[33]</sup>, 且显示出高于土壤 DOC 的敏感性值<sup>[34]</sup>。土壤 MBC 是土壤中易于利用的养分库及有机物分解和氮矿化的动力, 对控制碳和养分流动起重要作用<sup>[35]</sup>, 同样, 作为有机态氮中最活跃的组分, 土壤微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 也是土壤有机-无机态氮转化关键环节之一, 在调节土壤碳、氮库动态方面也起着至关重要的作用。而且土壤 MBC 和 MBN 含量对土壤资源有效性高度敏感<sup>[36]</sup>, 可以很好地反映生态系统对氮添加的响应。可见, 土壤

中各形态碳、氮之间存在密切联系，研究土壤活性碳、氮对于森林系统生产力和碳循环具有重要意义。

### 1.2.3 土壤呼吸

$R_s$  是土壤中的植物根系、食碎屑动物、真菌和细菌等进行新陈代谢活动，消耗有机物，产生  $CO_2$  的过程。在碳循环过程中， $R_s$  占陆地生态系统呼吸的 60%-90%，是陆地上仅次于植被光合作用的第二大碳流通途径<sup>[37]</sup>，因此， $R_s$  的微小变化也会显著影响大气中  $CO_2$  浓度和土壤碳的累积速率，进而加剧或减缓全球气候变暖。在森林生态系统中， $R_s$  是地-气系统碳交换的重要流通途径。

$R_s$  引起的土壤碳流失是 SOC 降解和稳定的重要指标<sup>[38]</sup>。作为土壤碳输出的主要形式， $R_s$  通常包含两个主要过程，分别为根系自养呼吸 (Autotrophic respiration,  $R_a$ ) 和微生物分解 SOC 产生的异养呼吸 (Heterotrophic respiration,  $R_h$ )。前者输出的碳来源于植物根系，与 SOC 并无直接关联，而且对 SOC 影响较小。后者输出的碳占到  $R_s$  总量的 60%，达到 60-80  $Pg/a$ <sup>[39]</sup>。量化  $R_s$  的各个组分对于更好的理解调节  $R_s$  的潜在过程和确保土壤碳储量的可靠预测至关重要<sup>[40]</sup>。土壤  $R_a$  和  $R_h$  的时空变化受到许多非生物和生物因素调控，如土壤温度和湿度、碳底物质量和数量以及养分有效性等<sup>[41]</sup>。并且这些非生物因子和生物因子随时间变化， $R_a$  和  $R_h$  对这些因子的不同响应很可能导致其对  $R_s$  贡献的变化。因此，我们很难对  $R_s$  组分获得广泛而深入的了解。

### 1.2.4 大气氮沉降

氮沉降 (Atmospheric Nitrogen Deposition) 指大气中的氮元素以含氮化合物 ( $NH_x$ ,  $NO_x$ ) 的形式降落到地表的过程，根据氮元素降落方式的不同分为通过降尘方式实现的干沉降和通过降水形式实现的湿沉降。氮沉降来源主要分为自然输入和人为输入，自然输入包括高能固氮 (闪电)、生物固氮；人为输入包括化石燃料燃烧、毁林、农业化肥使用和汽车尾气排放等。

在过去一个世纪，工业化和城市化的快速发展使人类活动产生的  $N_r$  量超过自然固定量，导致全球范围内氮循环增加一倍多<sup>[1, 42]</sup>。从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初，中国大气氮沉降以  $8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  的速度从  $13.2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  增加到  $21.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ <sup>[43]</sup>，成为世界上  $NO_x$  和  $NH_3$  排放量最大的国家，也是氮沉降速率最高的国家之一<sup>[44]</sup>。大量研究表明  $N_r$  增加会导致大气  $N_r$  污染和氮沉降加剧，从而对生态系统产生负面影响。森林作为面积最大的陆地生态系统，受氮沉降影响最为显著<sup>[45]</sup>。在森林生态系统中，氮沉降导致土壤养分 (如氮和磷) 失衡<sup>[46]</sup>，碳、氮动态变化<sup>[47]</sup>，碳固存变化<sup>[48]</sup>、 $NO_3^-$ -N 淋溶增加<sup>[49, 50]</sup>、气态氮排放增加<sup>[49, 51]</sup>以及易受高养分有效性影响的植物种类减少<sup>[52]</sup>。此外，氮沉降被认为是造成本世纪生物多样性丧失的第三大驱动力<sup>[53, 54]</sup>。然

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/006214225125010150>