#### DOI: 10.20103/j.stxb.202405131083

邓旭,王丽娜,周莹,张泽凌,路浩,唐亚坤.模拟大气沉降氮在陆地生态系统中的留存及其影响因素.生态学报,2025,45(3):1077-1089. Deng X, Wang L N, Zhou Y, Zhang Z L, Lu H, Tang Y K.Modeling the retention of atmospheric deposited nitrogen and influencing factors in terrestrial vegetation ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3):1077-1089.

# 模拟大气沉降氮在陆地生态系统中的留存及其影响 因素

邓 旭1,王丽娜1,周 莹2,张泽凌3,路 浩2,唐亚坤2,3,4,\*

1 西北农林科技大学林学院,杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,杨凌 712100

3 中国科学院水水土保持研究所,杨凌 712100

4 西北农林科技大学水土保持研究所,杨凌 712100

摘要:大气氮沉降对陆地生态系统的影响取决于氮在生态系统中的留存量。探明生态系统的氮留存作用对预测全球变化背景下生态系统氮循环具有重要意义,但植物、土壤和生态系统氮留存的影响因素仍不清楚。通过文献搜集对 58 个野外<sup>15</sup>N 同位素示踪研究的 305 组观测结果进行综合分析。结果表明:生态系统氮回收率(<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>)为(56.3±1.39)%,且土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>(40.1±1.17)%显著高于植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>(16.2±0.89)%(P<0.001)。年均温度、年降水量、土壤有机碳、总氮和碳氮比的增加显著增加植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>,但土壤 pH、施氮量和施氮持续时间的增加却显著降低植物和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>(P<0.05)。上述因素解释了生态系统、植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的最主要因素(P<0.001),年降水量和年均温度构成的气候因素显著影响生态系统、植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>。研究结果对阐明陆地生态系统氮循环过程,以及维持生态系统的稳定性具有重要意义。

关键词:大气氮沉降;氮循环;生态系统;氮留存;结构方程模型

# Modeling the retention of atmospheric deposited nitrogen and influencing factors in terrestrial vegetation ecosystems

DENG Xu<sup>1</sup>, WANG Lina<sup>1</sup>, ZHOU Ying<sup>2</sup>, ZHANG Zeling<sup>3</sup>, LU Hao<sup>2</sup>, TANG Yakun<sup>2,3,4,\*</sup>

1 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of and Water Resources, Yangling 712100, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract:** The response of terrestrial ecosystems to atmospheric nitrogen deposition is determined by nitrogen retention in ecosystems. Understanding the role of ecosystem nitrogen retention is essential for predicting ecosystem nitrogen cycling in context of global change. However, the drivers of nitrogen retention in plants, soils and ecosystems remain unclear. In this study, we conducted a comprehensive analysis of 305 observations from 58 field sites ultilized <sup>15</sup>N isotope tracing studies. The results showed that the percent of <sup>15</sup>N recovery (<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>) of the ecosystems was ( $56.3\pm1.39$ )%, and the <sup>15</sup>N<sub>ree</sub> for soils ( $40.1\pm1.17$ )% was significantly higher than that for plants ( $16.2\pm0.89$ )% (P<0.001). Increased in the mean annual temperature, mean annual precipitation, soil organic carbon (C) content, total nitrogen (N) content, and C:N ratio

基金项目:国家自然科学基金(41977425)

收稿日期:2024-05-13; 网络出版日期:2024-10-21

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yktang@ nwsuaf.edu.cn

significantly increased plants, soils, and ecosystems  ${}^{15}N_{rec}$ , while increased in soil pH, N application rate, and N application duration time significantly decreased plants and ecosystems  ${}^{15}N_{rec}$  (P < 0.05). The above factors explained 65.0%, 61.0%, and 64.0% of the ecosystems, plants, and soils  ${}^{15}N_{rec}$ . Mean annual precipitation was a pivotal factor affecting ecosystems, plants and soils  ${}^{15}N_{rec}$  (P < 0.001). The climatic factors composed by mean annual precipitation and mean annual temperature significantly influenced ecosystems, plants and soils  ${}^{15}N_{rec}$ . The results of the study can be essential for elucidating the nitrogen cycling in terrestrial ecosystems as well as maintaining the stability of ecosystems.

Key Words: atmospheric nitrogen deposition; nitrogen cycle; ecosystem; nitrogen retention; structural equation model

氮是调控陆地生态系统初级生产力和维持生态系统平衡的关键元素之一<sup>[1]</sup>。工业革命以来,化石燃料 燃烧、肥料施用和畜牧业等人类活动向大气中排放大量活性氮,改变了全球氮循环,并影响陆地生态系统功 能<sup>[2-3]</sup>。大气氮沉降有助于减弱氮匮乏地区的氮限制促进植物对氮的吸收利用,同时影响土壤氮转换速 率<sup>[4]</sup>,进而提高生态系统的初级生产力<sup>[5]</sup>。然而,外界的氮输入量超过生物和非生物可承受和利用的能力 时,可能导致土壤酸化并降低生物多样性,进而影响生态系统的稳定性<sup>[6-8]</sup>。陆地生态系统对氮沉降的响应 程度取决于氮在生态系统中的留存量<sup>[9-12]</sup>。因此,研究大气沉降氮在陆地生态系统中的留存机制,有助于更 好地维持生态系统的稳定性。

无机氮是大气沉降氮的主要成分<sup>[13]</sup>,沉降的无机氮在生态系统中的留存主要在植物和土壤中完成的<sup>[14]</sup>。植物通过根系表面吸收土壤无机氮维持其正常的生长发育。铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)是植物从 土壤中吸收氮的主要形式,进而被吸收利用<sup>[15]</sup>;土壤中无机氮的留存主要包括微生物和非生物的固定作用。 微生物对无机氮的固持主要是将土壤中的无机氮转化为微生物生物量氮,随后重新矿化或转化为稳定的有机 氮<sup>[16]</sup>;土壤非生物对无机氮的固定是通过与土壤有机组分发生反应或被矿质粘土吸附<sup>[17]</sup>。

<sup>15</sup>N 稳定同位素示踪技术能够追踪生态系统中不同组分的外源氮,以及确定不同时间尺度的氮留存能力<sup>[18]</sup>,即通过追踪<sup>15</sup>N 在生态系统不同组分中的回收率(<sup>15</sup>N recovery,<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>)来表示氮的留存状态<sup>[19]</sup>。生态系统的氮留存受气候、土壤性质、施氮量、施氮持续时间和施氮形式等因素的影响<sup>[10]</sup>。降水在生态系统的氮留存中发挥着重要作用,适宜的降水通过影响植物光合、呼吸等重要的生命代谢活动促进植物的生产力,进而影响植物对氮的吸收利用<sup>[20]</sup>。也有研究表明降水可以促进土壤微生物的生长和团聚体的形成,从而影响土壤氮的留存<sup>[21]</sup>。此外,增温通过增加植物<sup>[22]</sup>和土壤微生物<sup>[23]</sup>的代谢能力,提高植物和微生物的氮吸收利用能力,进而促进氮的留存。土壤有机碳能够促进土壤微生物的产生,并提高微生物对无机氮的需求,提高土壤氮的留存<sup>[24]</sup>。也有研究表明,在一定土壤总氮含量范围内,高的土壤总氮含量能够通过促进植物根系的生长提高氮的留存<sup>[24]</sup>。也有研究表明,在一定土壤总氮含量范围内,高的土壤总氮含量能够通过促进植物根系的生长提高氮的留存<sup>[25-26]</sup>。另外,由于施氮量<sup>[27]</sup>和施氮持续时间<sup>[28]</sup>的增加导致气体挥发和淋溶的增加,不利于生态系统氮的留存。然而,上述因素对植物、土壤和生态系统氮留存的影响程度并不明确。因此,需要进一步量化气候、土壤、施氮量、施氮持续时间和施氮形式等因素如何影响生态系统不同组分中氮的留存,对明确生态系统氮循环过程具有重要意义。

本研究通过搜集植物、土壤和生态系统氮留存的实验数据,探究植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的差异,分析植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>与年均温度(Mean annual temperature, MAT)、年降水量(Mean annual precipitation, MAP)、土壤 pH、土壤总氮含量(Soil total nitrogen content, TN)、土壤有机碳含量(Soil organic carbon content, SOC)、土壤碳氮比(Soil C:N ratio, C:N)、施氮量和施氮持续时间之间的关系,量化上述因素对植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的影响程度。以期为保持生态系统的稳定性和适应性管理提供科学依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 数据来源和收集

本研究通过 Web of Science (http://apps.webofknowledge.com)和中国国家知识基础数据库(http://www.

Graph Digitizer (version 2.20)提取。



图 1 页笛仔奴据的杆地分布图 Fig.1 Distribution of experiment sites of nitrogen retention data

基于以上标准,从文献中提取的数据信息包括:气候因素(MAT、MAP)、土壤性质(SOC、TN、C:N和pH)、 生态系统类型(森林、灌木、草地和苔原)和施氮实验因素(施氮形式(<sup>15</sup>NH<sup>+</sup><sub>4</sub>,<sup>15</sup>NO<sup>-</sup><sub>3</sub>和<sup>15</sup>NH<sup>415</sup>NO<sub>3</sub>)、施氮量和 施氮持续时间),以及植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>。对于未提供气候或土壤数据的观测结果,使用 WorldClim 数据库(http://www.worldclim.org/)和 SoilGrids 数据库(https://www.isric.org/explore/soilgrids)补充。 **1.2** 生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的计算

本研究通过<sup>15</sup>N示踪剂在生态系统各组分中的回收百分比量化生态系统<sup>15</sup>N...<sup>[29]</sup>。

$$\operatorname{atom} \%^{15} \mathrm{N} = \frac{R_{\mathrm{sample}}}{R_{\mathrm{sample}} + 1} \times 100\%$$
(1)

$$^{15}N_{rec} = \frac{(\operatorname{atom}\%^{15}N_{sample} - \operatorname{atom}\%^{15}N_{reference}) \times N_{pool}}{(\operatorname{atom}\%^{15}N_{reference} - \operatorname{atom}\%^{15}N_{reference}) \times N_{tracer}} \times 100\%$$
(2)

式中,  $R_{sample}$ 和  $R_{standard}$ 分别为样品和标准物质中的<sup>15</sup> N/<sup>14</sup> N 比率,  $R_{standard}$ 采用大气中 N<sub>2</sub>的<sup>15</sup> N/<sup>14</sup> N 比率值 (0.36765%)<sup>[30]</sup>;<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>代表被留存在生态系统内部不同氮库中的<sup>15</sup> N 量占所施加的<sup>15</sup> N 总量的比例(%); atom%<sup>15</sup> N<sub>sample</sub>为标记生态系统的<sup>15</sup> N 原子百分比; atom%<sup>15</sup> N<sub>reference</sub>为对照生态系统的<sup>15</sup> N 原子百分比; atom%<sup>15</sup> N<sub>tracer</sub>为示踪剂的<sup>15</sup> N 原子百分比; N<sub>pool</sub>为生态系统各组分的氮库, N<sub>tracer</sub>为标记的<sup>15</sup> N 总质量。本研究获取的数据中部分<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>结果大于 100%, 可能是由于施氮量和大气沉降氮的补充导致 N<sub>pool</sub>增大, 以及分析时产生的误差导致的<sup>[31-36]</sup>。

1.3 统计分析

本研究采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验生态系统中植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>的差异。使用一元和多元线性回归分析 MAT、MAP、SOC、TN、C:N、pH、施氮量和施氮持续时间对植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>的影响。此外,为了进一步探讨生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>对各因素响应的机制,采用分段式结构方程模型(piecewiseSEM)量化各

因素对<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的直接和间接影响<sup>[37]</sup>。首先,构建一个同时考虑气候因素(MAT 和 MAP)、土壤性质(SOC、TN、 C:N和 pH)、生态系统类型(森林、草地和苔原)和施氮实验因素(施氮量、施氮持续时间和施氮形式(<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>4</sup>、 <sup>15</sup>NO<sub>3</sub>和<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>15</sup>NO<sub>3</sub>))的模型。其次,将采样点作为随机因素,使用 piecewiseSEM 量化各因素对生态系统氮留 存的影响程度。使用 R 软件中"piecewiseSEM"、"nlme"和"lme4"包进行上述分析<sup>[38]</sup>,并使用 Fisher's C 检验 判断模型的结果。根据路径显著性(P<0.05)和模型优度( $0 \le$ Fisher's C/ $df \le 2,0.05 < P \le 1.00$ )对模型进行逐 步修正<sup>[39]</sup>。所有分析均在 R 软件(version 4.2.3)中进行,并使用 Origin 2023b 绘图。

#### 2 结果与分析

2.1 生态系统中植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的差异

生态系统中植物和土壤之间的<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>存在显著差异(图 2)。生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>平均值为(56.3±1.39)%,植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>平均值为(16.2±0.89)%且显著低于土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的(40.1±1.17)%(P<0.001)。植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>最大值为 100%,103%和 128%,最小值为 0.09%,1.39%和 4.31%。植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的变化最大(CV=0.94%), 土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的变化较低(CV 分别为 0.50%和 0.42%)(表 1)。

Table 1     Change of <sup>15</sup> N <sub>rec</sub> in plants, soils and ecosystems					
<sup>15</sup> N <sub>rec</sub> 组分	平均值±标准误	最大值	最小值	变异系数	
$^{15}\mathrm{N}_{\mathrm{rec}}$ compartments	Mean±SE	Maximum	Minimum	Coefficient of variation/%	
植物 <sup>15</sup> N回收率 Plants <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>	16.2±0.89	100	0.09	0.94	
土壤 <sup>15</sup> N回收率 Soils <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>	40.1±1.17	103	1.39	0.50	
生态系统 <sup>15</sup> N 回收率 Ecosystems <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>	56.3±1.39	128	4.31	0.42	

表1 植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的变化

## 2.2 植物、土壤和生态系统氮留存与气候、土壤、施氮 实验因素的关系

在全球尺度上,年平均温度( $R^2$ =0.05)和年降水量 ( $R^2$ =0.31)与生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>呈显著正相关关系(P < 0.001,图3)。土壤性质因素与生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>显著相 关,土壤有机碳含量( $R^2$ =0.16)、土壤总氮含量( $R^2$ = 0.06)和土壤碳氮比( $R^2$ =0.08)与生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>呈显著 正相关关系,但土壤 pH ( $R^2$ =0.08)与生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>呈 显著负相关关系。施氮量( $R^2$ =0.08)和施氮持续时间 ( $R^2$ =0.02)与生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>呈显著负相关关系(P < 0.05,图3)。

年降水量( $R^2 = 0.08$ )、土壤有机碳含量( $R^2 = 0.29$ )、土壤总氮含量( $R^2 = 0.11$ )和土壤碳氮比( $R^2 = 0.03$ )与植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>呈显著正相关关系,但土壤 pH( $R^2 = 0.03$ )、施氮量( $R^2 = 0.02$ )和施氮持续时间( $R^2 = 0.02$ )与植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>呈显著负相关关系(P < 0.05,图4)。年平



图 2 植物、土壤和生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>的显著性分析



图中的数据节点依次为下限、下四分位数、中位数、上四分位数和 上限,长横线代表平均值,圆圈为数据点;\*\*\*, P<0.001

均温度( $R^2 = 0.06$ )、年降水量( $R^2 = 0.19$ )、土壤有机碳含量( $R^2 = 0.02$ )、土壤总氮含量( $R^2 = 0.02$ )和土壤碳氮 比( $R^2 = 0.06$ )与土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>呈显著正相关关系,但土壤 pH ( $R^2 = 0.04$ )和施氮量( $R^2 = 0.05$ )与土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>呈显著 负相关关系(P < 0.05,图4)。





#### Fig.3 Relationships between climate, soil, nitrogen application experimental factors and ecosystems <sup>15</sup>N<sub>rec</sub>

N-rate: 施氮量 Nitrogen application rate; N-time: 施氮持续时间 Nitrogen application duration time; \*, P<0.05; \*\*\*, P<0.001

http://www.ecologica.cn





Fig.4 Relationships between climate, soil, nitrogen application experimental factors and plants soils  $^{15}N_{rec}$ 

绿色和棕色分别代表植物和土壤; N-rate: 施氮量 Nitrogen application rate; N-time: 施氮持续时间 Nitrogen application duration time; \*, P< 0.05; \*\*\*, P<0.01; \*\*\*, P<0.001

通过多元回归分析表明,年降雨量、土壤总氮含量、碳氮比、施氮量和施氮持续时间对生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>有显 著影响。土壤有机碳含量和施氮持续时间对植物<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>有显著影响,年降雨量、土壤有机碳含量、碳氮比和施 氮量对土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>有显著影响(P<0.05,表2)。

表 2 气候、土壤和施氮实验因素对生态系统、植物和土壤 <sup>15</sup> N <sub>rec</sub> 的多元回归分析
--

Table 2 Multiple regression analysis of ecosystems, plants and soils ${}^{13}N_{rec}$ by climate, soil and nitrogen application experimental factors						
变量	生态系统 <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>	植物 <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>	土壤 <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>			
Variable	Ecosystems ${\rm ^{15}N_{rec}}$	Plants <sup>15</sup> N <sub>rec</sub>	Soils $^{15}\mathrm{N}_{\mathrm{rec}}$			
常数项	32.4±10.1 **	9.14±6.61	19.7±9.40 *			
年平均温度 MAT (X <sub>1</sub> )	$0.28 \pm 0.27$	$0.08 \pm 0.19$	$0.10 \pm 0.27$			
年降雨量 MAP (X <sub>2</sub> )	0.01±0.003 ***	$0.01 \pm 0.002$	0.01±0.003 **			
土壤有机碳 SOC (X <sub>3</sub> )	$0.94 \pm 0.53$	2.07±0.35***	1.11±0.50*			
土壤总氮 TN (X <sub>4</sub> )	19.7±9.02*	$8.04 \pm 5.87$	11.6±8.35			
土壤碳氮比 C:N (X5)	$0.96 \pm 0.22$ ***	$0.20 \pm 0.15$	0.88±0.21 ***			
土壤 pH Soil pH (X <sub>6</sub> )	$-0.74 \pm 1.13$	$-0.67 \pm 0.74$	$-0.20 \pm 1.05$			
施氮量 N-rate (X <sub>7</sub> )	$-0.07 \pm 0.02$ ***	$-0.02 \pm 0.01$	$-0.05\pm0.02$ *			
施氮持续时间 N-time (X <sub>8</sub> )	$-0.01\pm0.004$ *	$-0.01\pm0.001$ *	$-0.001 \pm 0.001$			
件太交给 $^{15}$ N V - 22 4+0 28 V +0 01 V +0 04 V +10 7 V +0 06 V -0 74 V -0 07 V -0 01 V $P^2$ -0 22 ***						

生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>:Y=32.4+0.28X<sub>1</sub>+0.01X<sub>2</sub>+0.94X<sub>3</sub>+19.7X<sub>4</sub>+0.96X<sub>5</sub>-0.74X<sub>6</sub>-0.07X<sub>7</sub>-0.01X<sub>8</sub>,  $R^2$ =0.33\*\*\*。

植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>: Y=9.14+0.08X<sub>1</sub>+0.01X<sub>2</sub>+2.07X<sub>3</sub>+8.04X<sub>4</sub>+0.20X<sub>5</sub>-0.67X<sub>6</sub>-0.02X<sub>7</sub>-0.01X<sub>8</sub>,  $R^2$ =0.30\*\*\*。

表中数值为回归系数±标准误; N-rate: 施氮量 Nitrogen application rate; N-time: 施氮持续时间 Nitrogen application duration time; \* P<0.05, \*\* P<0.01, \*\*\* P<0.001

2.3 气候、土壤、施氮实验因素影响植物、土壤和生态系统氮留存的路径分析

本研究使用 piecewiseSEM 量化气候、土壤、施氮实验因素与生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>间的作用关系。各因素共同解释了生态系统<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>变化的 65.0%(图 5),直接标准效应值由大到小分别为年降水量(0.47)、土壤有机碳含量(0.29)、施氮形式(0.25)、施氮持续时间(-0.19)、施氮量(-0.16)、碳氮比(0.15)、pH(-0.14)、年平均温度(-0.04)和土壤总氮含量(0.02)。年均温度和年降水量构成的气候因素的总标准效应值最高(0.29),施氮实验因素次之(0.27)。

此外,各因素对植物<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>变化的解释率为 61.0%(图 6),直接标准效应值由大到小分别为年降水量 (0.38)、施氮形式(0.32)、年平均温度(-0.26)、土壤有机碳含量(0.18)、施氮量(-0.13)、pH(-0.11)、土壤总 氮含量(0.09)、碳氮比(0.08)和施氮持续时间(-0.02)。气候因素的总标准效应值最高(0.32),施氮实验因素 次之(0.27)。土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的路径模型可解释其变化的 64.0%(图 7),纳入模型各因素直接标准效应值由大到小 分别为年降水量(0.26)、施氮形式(0.22)、土壤有机碳含量(0.18)、施氮持续时间(-0.17)、碳氮比(0.16)、年 平均温度(0.15)、pH(-0.08)、施氮量(-0.06)和土壤总氮含量(-0.04),其中气候因素的总标准效应值最高 (0.27),施氮实验因素次之(0.26)。

#### 3 讨论

3.1 生态系统中植物和土壤氮留存的差异

生态系统的<sup>15</sup>N 主要留存在土壤中,显著大于植物<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>,表明土壤是生态系统最大的氮库,这与先前的氮 留存研究一致<sup>[29,33,40–41]</sup>。Kuzyakov 和 Xu<sup>[42]</sup>认为植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>的差异是植物和微生物对氮的竞争程度不 同导致的。在土壤氮限制的地区,植物对氮的竞争力可能低于微生物,外源氮主要通过微生物的固持被留 存<sup>[42]</sup>。此外,氮的淋溶作用导致氮向更深层土壤中移动,提高了植物获取氮源的难度<sup>[43]</sup>。外源氮主要留存 在土壤,可能归因于氮进入土壤有机质中与有机质的非生物反应,进而避免氮的淋失<sup>[44]</sup>。研究结果表明,植 物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>的变化较大(表1)。由于实验数据的区域尺度较大,在高纬度地区的苔原生态系统 中,永久冻土层阻止氮淋滤到更深层土壤,减少了氮的损失<sup>[45]</sup>,导致苔原生态系统的<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>水平较高。但是,土 壤养分匮乏地区的草地生态系统中,植物和微生物的生物同化潜力较低,导致草地生态系统的<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>水平



图 5 环境和施氮实验因素对生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的影响途径

**Fig.5** Pathways of environmental and nitrogen application experimental factors impacting the influence of ecosystems <sup>15</sup>N<sub>rec</sub> 实线箭头表示显著效应,虚线箭头表示无显著效应; N-form: 施氮形式 Nitrogen application form; N-rate: 施氮量 Nitrogen application rate; N-time: 施氮持续时间 Nitrogen application duration time; \* *P*<0.05, \*\* *P*<0.01, \*\*\* *P*<0.001

### 较低[10]。

3.2 环境和施氮实验因素对植物、土壤和生态系统氮留存的影响

在全球尺度上,气候、土壤性质和施氮实验因素显著影响生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>。其中,年降水量对生态系统、植物和土壤<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的影响最为重要,直接标准效应值分别为0.47,0.38,0.26。在适宜降水范围内降水量的增加能够促进植物生产力和生物量,进而提高植物对氮的吸收利用<sup>[46]</sup>。其次,降水有利于土壤团聚体形成<sup>[47]</sup>,微团聚体和大团聚体有助于土壤和植物对无机氮的留存<sup>[48]</sup>。同时,团聚体的形成能够增强土壤保持土壤水分和提供土壤氧气的能力,进而提高土壤微生物的活性并促进其对无机氮的固持<sup>[49]</sup>。此外,高的降水量能够通过增强土壤基质的有效性<sup>[50]</sup>,进而增加土壤微生物的生物量并提高土壤氮的留存<sup>[51]</sup>。研究结果表明生态系统<sup>55</sup>N<sub>rec</sub>与年均温度呈显著正相关关系。一方面温度通过影响植物根瘤菌活动<sup>[52]</sup>、植物的生长和新陈代谢,促进根物对氮的吸收<sup>[53]</sup>;另一方面,在一定温度范围内土壤微生物代谢活性随温度的增加而增加,促进土壤氮的留存<sup>[54]</sup>。此外,升温通过提高土壤和凋落物分解速率有助于增加土壤微生物生物量,进而间接促进微生物对氮的固持<sup>[55]</sup>。微生物对氮的固持能够减少土壤氮循环过程中通过气体排放或淋滤导致的氮损失<sup>[10]</sup>,从而促进生态系统氮的留存。

与 Li<sup>[21]</sup>等和 Elrys<sup>[56]</sup>等的结果类似,本研究发现土壤总氮含量、土壤有机碳含量和土壤碳氮比与生态系



图 6 环境和施氮实验因素对植物<sup>15</sup> N<sub>rec</sub>的影响途径

# **Fig.6** Pathways of environmental and nitrogen application experimental factors impacting the influence of plants <sup>15</sup>N<sub>rec</sub> 实线箭头表示显著效应,虚线箭头表示无显著效应; N-form: 施氮形式 Nitrogen application form; N-rate: 施氮量 Nitrogen application rate; N-time: 施氮持续时间 Nitrogen application duration time; \* P<0.05, \*\* P<0.01, \*\*\* P<0.001

统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>呈显著正相关(P<0.001)。土壤总氮含量的增加能够促进微生物的活性并提供微生物固持氮的基 质<sup>[57]</sup>,促进土壤氮的留存<sup>[21]</sup>。生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>与土壤有机碳含量之间的正相关关系,表明土壤微生物对氮的 固持也受土壤有机碳驱动。微生物的生物量通常与土壤有机碳含量和土壤碳氮比呈正相关<sup>[58]</sup>,微生物在分 解高碳氮比的有机物时,植物残留有机物中的氮不能满足微生物生长的氮需求。因此,微生物需要固持更多 的无机氮转化成生物质供自身生长需求<sup>[59]</sup>。此外,高的土壤 C:N 可以促进微生物氮的固持,减少净硝化作 用,有助于同化更多的无机氮<sup>[17]</sup>。土壤 pH 显著影响生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>,主要是由于土壤 pH 对土壤微生物的硝 化活性有重要影响<sup>[60]</sup>。较低的土壤 pH 会阻止土壤有机质的分解,抑制土壤氮的硝化作用,从而减少土壤氮 以 NO<sub>3</sub> 的形式淋溶<sup>[61]</sup>。pH 的增高通常增加土壤氮硝化速率<sup>[60]</sup>,进而加剧土壤氮以 NO<sub>3</sub> 的形式淋溶,不利 于生态系统氮的留存。此外,在 pH 值较高的地区,土壤酶活性也随之降低,如土壤 pH 从 4.0 增加到 9.0 时, 地中海地区土壤中的脲酶和 β-N-乙酰氨基葡萄糖酶活性受到抑制<sup>[62]</sup>,降低了土壤对无机氮的留存能力。

施氮形式也能够显著影响生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>。在生态系统中,<sup>15</sup>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>比<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>15</sup>NO<sub>3</sub>的<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>相对更小。可能由于<sup>15</sup>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在反硝化或挥发过程中更容易发生淋溶或气体损失<sup>[10]</sup>,而<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的硝化作用导致土壤酸化, 有利于植物对<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的吸收利用<sup>[63,64]</sup>。此外,<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>优先被土壤微生物固持或结合在土壤的阳离子交换位

1085





Fig.7 Pathways of environmental and nitrogen application experimental factors impacting the influence of soils <sup>15</sup>N<sub>rec</sub> 实线箭头表示显著效应,虚线箭头表示无显著效应; N-form: 施氮形式 Nitrogen application form; N-rate: 施氮量 Nitrogen application rate; Ntime: 施氮持续时间 Nitrogen application duration time; \* P<0.05, \*\* P<0.01, \*\*\* P<0.001</p>

点<sup>[11]</sup>,进一步减少了<sup>15</sup>NH<sub>4</sub> 的损失。随着施氮量和施氮持续时间增加,生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>显著下降。一方面,施 加的氮超过了生态系统的需求量时会产生生态系统"氮饱和"现象,导致植物和土壤无法有效地吸收和利用 额外的氮,从而降低<sup>15</sup>N<sub>rec</sub><sup>[65]</sup>。另一方面,过量的沉降氮可改变土壤氮的有效性,减少土壤微生物生物量,从而 降低土壤氮的留存<sup>[66]</sup>。Cui<sup>[27]</sup>等的实验结果表明适量的施氮量能够促进植物的生长和生物量的积累,高施 氮量则抑制植物生长和生物量积累。另外,随着施氮量<sup>[67]</sup>和施氮持续时间<sup>[68]</sup>的增加,气体挥发、径流流失和 地下淋溶等过程<sup>[69]</sup>也会加剧氮的损失,从而降低了生态系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>。Raciti<sup>[70]</sup>等的<sup>15</sup>N标记实验结果表明生态 系统<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>随着施氮持续时间的增加而减少。

本研究采用结构方程模型量化了环境和施氮实验因素对生态系统氮留存的影响。由于筛选符合模型标准的数据后,部分生态系统类型的样本量较少,导致模型中生态系统类型因素对<sup>15</sup>N<sub>rec</sub>的影响不显著。另外,本研究的模型分析中因样本量不足剔除了一些潜在因素,并且未考虑到未来气候变化(气温和降水模式变化)等因素的影响<sup>[71-72]</sup>。因此,未来研究需要增加样本数量并考虑更多上述因素,以便更全面地揭示植物、土壤和生态系统氮留存的影响因素。

#### 4 结论

本研究通过对氮留存的实验数据的整合分析,结果发现,生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>平均值为(56.3±1.39)%,植物<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>和土壤<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>分别占生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>的 28.8%,71.2%,其余部分氮可能通过气体挥发和地下淋溶等途径损失。年平均气温、年降水量、土壤有机碳、总氮和碳氮比与植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>呈显著正相关,而土壤pH、施氮量和施氮持续时间与植物和生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>呈显著负相关。此外,年降水量是植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>最重要的影响因素,年降水量和年均温度构成的气候因素显著影响了植物、土壤和生态系统<sup>15</sup>N<sub>ree</sub>。与气候因素相比,土壤因素(土壤有机碳、总氮、碳氮比和土壤 pH)和施氮实验因素(施氮持续时间和施氮形式)的作用较小。研究结果表明植物、土壤和生态系统的氮留存更依赖于气候因素的变化。本研究强调了环境及施氮实验因素对生态系统氮留存的重要作用,有助于阐明影响生态系统氮留存的机制并量化影响程度,以更好地预测全球变化下生态系统氮留存的变化。

#### 参考文献(References):

- [1] Jia Z, Li P, Wu Y T, Chang P F, Deng M F, Liang L Y, Yang S, Wang C Z, Wang B, Yang L, Wang X, Wang Z H, Peng Z Y, Guo L L, Ahirwal J, Liu W X, Liu L L. Deepened snow loosens temporal coupling between plant and microbial N utilization and induces ecosystem N losses. Global Change Biology, 2022, 28(15): 4655-4667.
- [2] Norgbey E, Murava R T, Rajasekar A, Huang Q, Zhou J, Robinson S. Effects of anthropogenic nitrogen additions and elevated CO<sub>2</sub> on microbial community, carbon and nitrogen content in a replicated wetland. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194(8): 575.
- [3] Stevens C J. Nitrogen in the environment. Science, 2019, 363(6427): 578-580.
- [4] Xia J Y, Wan S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition. The New Phytologist, 2008, 179(2): 428-439.
- 5 ] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. Ecology, 2008, 89(2): 371-379.
- [6] Du E Z, Fenn M E, De Vries W, Ok Y S. Atmospheric nitrogen deposition to global forests: status, impacts and management options. Environmental Pollution, 2019, 250: 1044-1048.
- [7] Yang Y H, Ji C J, Ma W H, Wang S F, Wang S P, Han W X, Mohammat A, Robinson D, Smith P. Significant soil acidification across Northern China's grasslands during 1980s—2000s. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2292-2300.
- [8] Zhang Y H, Loreau M, Lü X T, He N P, Zhang G M, Han X G. Nitrogen enrichment weakens ecosystem stability through decreased species asynchrony and population stability in a temperate grassland. Global Change Biology, 2016, 22(4): 1445-1455.
- [9] Wang A, Zhu W X, Gundersen P, Phillips O L, Chen D X, Fang Y T. Fates of atmospheric deposited nitrogen in an Asian tropical primary forest. Forest Ecology and Management, 2018, 411: 213-222.
- [10] Templer P H, Mack M C, Chapin III F S, Christenson L M, Compton J E, Crook H D, Currie W S, Curtis C J, Dail D B, D'Antonio C M, Emmett B A, Epstein H E, Goodale C L, Gundersen P, Hobbie S E, Holland K, Hooper D U, Hungate B A, Lamontagne S, Nadelhoffer K J, Osenberg C W, Perakis S S, Schleppi P, Schimel J, Schmidt I K, Sommerkorn M, Spoelstra J, Tietema A, Wessel W W, Zak D R. Sinks for nitrogen inputs in terrestrial ecosystems: a meta-analysis of <sup>15</sup>N tracer field studies. Ecology, 2012, 93(8): 1816-1829.
- [11] Wang A, Chen D X, Phillips O L, Gundersen P, Zhou X L, Gurmesa G A, Li S L, Zhu W X, Hobbie E A, Wang X Y, Fang Y T. Dynamics and multi-annual fate of atmospherically deposited nitrogen in montane tropical forests. Global Change Biology, 2021, 27(10): 2076-2087.
- [12] 王斌,王汝振,李甜,张玉革,姜勇.大气沉降氮在土壤-植物系统中的留存机制.生态学杂志, 2023, 42(2):463-470.
- [13] Yu G R, Jia Y L, He N P, Zhu J X, Chen Z, Wang Q F, Piao S L, Liu X J, He H L, Guo X B, Wen Z, Li P, Ding G A, Goulding K. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. Nature Geoscience, 2019, 12: 424-429.
- [14] Conrad-Rooney E, Gewirtzman J, Pappas Y, Pasquarella V J, Hutyra L R, Templer P H. Atmospheric wet deposition in urban and suburban sites across the United States. Atmospheric Environment, 2023, 305; 119783.
- [15] Xu G H, Fan X R, Miller A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. Annual Review of Plant Biology, 2012, 63: 153-182.
- [16] Tahovská K, Kaňa J, Bárta J, Oulehle F, Richter A, Šantručková H. Microbial N immobilization is of great importance in acidified mountain spruce forest soils. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 59: 58-71.
- [17] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 土壤中无机氮的微生物同化和非生物固定作用研究进展. 土壤学报, 2012, 49(5): 1030-1036.
- [18] Currie W S, Nadelhoffer K J. Original articles: dynamic redistribution of isotopically labeled cohorts of nitrogen inputs in two temperate forests. Ecosystems, 1999, 2(1): 4-18.
- [19] 肖良建. 造林树种对生态系统氮保留的影响及其相关机制[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [20] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.

- [22] Fujita K, Ofosu-Budu K G, Ogata S. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. Plant and Soil, 1992, 141(1): 155-175.
- [23] Xu X F, Schimel J P, Janssens I A, Song X, Song C C, Yu G R, Sinsabaugh R L, Tang D D, Zhang X C, Thornton P E. Global pattern and controls of soil microbial metabolic quotient. Ecological Monographs, 2017, 87(3): 429-441.
- [24] Cheng Y, Wang J, Wang J Y, Chang S X, Wang S Q. The quality and quantity of exogenous organic carbon input control microbial NO<sub>3</sub> immobilization: a meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 357-363.
- [25] Paynel F, Lesuffleur F, Bigot J, Diquélou S, Cliquet J B. A study of <sup>15</sup>N transfer between legumes and grasses. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28(2); 281-290.
- [26] Høgh-Jensen H, Schjoerring J K. Interactions between nitrogen, phosphorus and potassium determine growth and N<sub>2</sub>-fixation in white clover and ryegrass leys. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(3): 327-338.
- [27] Cui X Q, Yue P, Wu W C, Gong Y M, Li K H, Misselbrook T, Goulding K, Liu X J. The growth and N retention of two annual desert plants varied under different nitrogen deposition rates. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 356.
- [28] Morier I, Schleppi P, Saurer M, Providoli I, Guenat C. Retention and hydrolysable fraction of atmospherically deposited nitrogen in two contrasting forest soils in Switzerland. European Journal of Soil Science, 2010, 61(2): 197-206.
- [29] Providoli I, Bugmann H, Siegwolf R, Buchmann N, Schleppi P. Pathways and dynamics of <sup>15</sup>NO<sub>3</sub> and <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> applied in a mountain *Picea abies* forest and in a nearby meadow in central Switzerland. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7): 1645-1657.
- [30] Mariotti A. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural <sup>15</sup>N abundance measurements. Nature, 1983, 303: 685-687.
- [31] Nadelhoffer K J, Fry B, Downs M R. Sinks for <sup>15</sup>N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. Ecological Applications, 1999, 9 (1): 72-86.
- [32] Buchmann N, Gebauer G, Schulze E D. Partitioning of <sup>15</sup>N-labeled ammonium and nitrate among soil, litter, below- and above-ground biomass of trees and understory in a 15-year-old *Picea abies* plantation. Biogeochemistry, 1996, 33(1): 1-23.
- [33] Morier I, Guenat C, Siegwolf R, Védy J C, Schleppi P. Dynamics of atmospheric nitrogen deposition in a temperate calcareous forest soil. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(6): 2012-2021.
- [34] Curtis C J, Emmett B A, Grant H, Kernan M, Reynolds B, Shilland E. Nitrogen saturation in UK moorlands: the critical role of bryophytes and lichens in determining retention of atmospheric N deposition. Journal of Applied Ecology, 2005, 42(3): 507-517.
- [35] Da Ros L, Rodeghiero M, Goodale C L, Trafoier G, Panzacchi P, Giammarchi F, Tonon G, Ventura M. Canopy <sup>15</sup>N fertilization increases shortterm plant N retention compared to ground fertilization in an oak forest. Forest Ecology and Management, 2023, 539: 121001.
- [36] Drake D C, Naiman I R, Bechtold J S. Fate of nitrogen in riparian forest soils and trees: an <sup>15</sup>N tracer study simulating salmon decay. Ecology, 2006, 87(5): 1256-1266.
- [37] Tian P, Liu S G, Zhao X C, Sun Z L, Yao X, Niu S L, Crowther T W, Wang Q K. Past climate conditions predict the influence of nitrogen enrichment on the temperature sensitivity of soil respiration. Communications Earth & Environment, 2021, 2: 251.
- [38] Lefcheck J S. piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. Methods in Ecology and Evolution, 2016, 7(5): 573-579.
- [39] 石亚飞, 石善恒, 黄晓敏. 基于 R 的结构方程模型在生态学中的应用. 生态学杂志, 2022, 41(5): 1015-1023.
- [40] Huang J S, Deng M F, Jia Z, Yang S, Yang L, Pan S N, Chang P F, Liu C, Liu L L. Influences of plant traits on the retention and redistribution of bioavailable nitrogen within the plant-soil system. Geoderma, 2023, 432: 116380.
- [41] Li S L, Gurmesa G A, Zhu W X, Gundersen P, Zhang S S, Xi D, Huang S N, Wang A, Zhu F F, Jiang Y, Zhu J J, Fang Y T. Fate of atmospherically deposited NH<sup>+</sup><sub>4</sub> and NO<sup>-</sup><sub>3</sub> in two temperate forests in China: temporal pattern and redistribution. Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America, 2019, 29(6): e01920.
- [42] Kuzyakov Y, Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. The New Phytologist, 2013, 198(3): 656-669.
- [43] Xiang X M, De K J, Lin W S, Feng T X, Li F, Wei X J, Wang W. Different fates and retention of deposited NH<sup>+</sup><sub>4</sub> and NO<sup>-</sup><sub>3</sub> in the alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau. Ecological Indicators, 2024, 158: 111415.
- [44] Liu J, Peng B, Xia Z W, Sun J F, Gao D C, Dai W W, Jiang P, Bai E. Different fates of deposited NH<sup>+</sup><sub>4</sub> and NO<sup>-</sup><sub>3</sub> in a temperate forest in Northeast China: a <sup>15</sup>N tracer study. Global Change Biology, 2017, 23(6): 2441-2449.
- [45] Ackermann S, Amelung W, Löffler J. Additional nitrogen in arctic-alpine soils and plants—a pilot study with <sup>15</sup>NO<sub>3</sub> and <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fertilization along an elevation gradient. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178(6): 861-867.
- [46] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luyssaert S, Margolis H, Oleson K W, Roupsard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward F I, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. Science, 2010, 329(5993): 834-838.
- [47] 王婷,李建平,张翼,井乐,张茹.不同降水下天然草地土壤水稳定性团聚体分布特征.草业科学,2019,36(08):1935-1943.
- [48] Gunina A, Kuzyakov Y. Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: implications from <sup>13</sup>C natural abundance. Soil

Biology and Biochemistry, 2014, 71: 95-104.

- [49] Ishak L, McHenry M T, Brown P H. Soil compaction and its effects on soil microbial communities in *Capsicum* growing soil. Acta Horticulturae, 2016(1123): 123-130.
- [50] Zhao Y Y, Ding Y, Hou X Y, Li F Y, Han W J, Yun X J. Effects of temperature and grazing on soil organic carbon storage in grasslands along the Eurasian steppe eastern transect. PLoS One, 2017, 12(10): e0186980.
- [51] Nicola L, Bååth E. The effect of temperature and moisture on lag phase length of bacterial growth in soil after substrate addition. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 137: 107563.
- [52] 熊德成,黄锦学,杨智杰,陈光水,谢锦升,杨玉盛. 增温对杉木幼树细根分泌物的影响研究初报. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11 (4): 85-88, 92.
- [53] Kaiser C, Kilburn M R, Clode P L, Fuchslueger L, Koranda M, Cliff J B, Solaiman Z M, Murphy D V. Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes; mycorrhizal pathway vs direct root exudation. The New Phytologist, 2015, 205(4): 1537-1551.
- [54] Li X B, Li Z A, Zhang X D, Xia L L, Zhang W X, Ma Q Q, He H B. Disentangling immobilization of nitrate by fungi and bacteria in soil to plant residue amendment. Geoderma, 2020, 374: 114450.
- [55] Xu W F, Yuan W P. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to experimental warming: a meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 265-274.
- [56] Elrys A S, Chen Z X, Wang J, Uwiragiye Y, Helmy A M, Desoky E S M, Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C, Müller C. Global patterns of soil gross immobilization of ammonium and nitrate in terrestrial ecosystems. Global Change Biology, 2022, 28(14): 4472-4488.
- [57] 刘欣,黄运湘,袁红,潘复静,何寻阳,张伟,王克林. 植被类型与坡位对喀斯特土壤氮转化速率的影响. 生态学报, 2016, 36(9): 2578-2587.
- [58] Li X B, He H B, Zhang X D, Yan X Y, Six J, Cai Z C, Barthel M, Zhang J B, Necpalova M, Ma Q Q, Li Z A. Distinct responses of soil fungal and bacterial nitrate immobilization to land conversion from forest to agriculture. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 134: 81-89.
- [59] Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea. Nature, 2010, 464(7292): 1178-1181.
- [60] 刘君政,王鹏,肖汉玉,赵君,舒旺.中国陆地生态系统土壤氮矿化速率和硝化速率及影响因素——基于文献数据的统计分析.生态学报,2020,40(12):4207-4218.
- [61] Zhu T B, Zhang J B, Cai Z C, Müller C. The N transformation mechanisms for rapid nitrate accumulation in soils under intensive vegetable cultivation. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(7): 1178-1189.
- [62] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, Ahmed B, Allison S D, Crenshaw C, Contosta A R, Cusack D, Frey S, Gallo M E, Gartner T B, Hobbie S E, Holland K, Keeler B L, Powers J S, Stursova M, Takacs-Vesbach C, Waldrop M P, Wallenstein M D, Zak D R, Zeglin L H. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. Ecology Letters, 2008, 11(11): 1252-1264.
- [63] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 董晓英, 车景, 王超, 时玉, 柳开楼, 沈仁芳. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略. 土壤学报, 2023, 60(5): 1248-1263.
- [64] Zhao X Q, Shen R F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 807.
- [65] Niu S L, Classen A T, Dukes J S, Kardol P, Liu L L, Luo Y Q, Rustad L, Sun J, Tang J W, Templer P H, Thomas R Q, Tian D S, Vicca S, Wang Y P, Xia J Y, Zaehle S. Global patterns and substrate-based mechanisms of the terrestrial nitrogen cycle. Ecology Letters, 2016, 19(6): 697-709.
- [66] Wang C, Liu D W, Bai E. Decreasing soil microbial diversity is associated with decreasing microbial biomass under nitrogen addition. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 126-133.
- [67] 谢丹妮, 仰东星, 段雷. 森林生态系统对大气氮沉降降低的响应. 环境科学, 2023, 44(5): 2681-2693.
- [68] Wang W W, Zhu W X. Soil retention of <sup>15</sup>N in a simulated N deposition study: effects of live plant and soil organic matter content. Plant and Soil, 2012, 351(1): 61-72.
- [69] 杨涵越. 模拟氮沉降对克氏针茅草原 N<sub>2</sub>O 排放及氮去向的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2017.
- [70] Raciti S M, Groffman P M, Fahey T J. Nitrogen retention in urban lawns and forests. Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America, 2008, 18(7): 1615-1626.
- [71] Simpson D, Andersson C, Christensen J H, Engardt M, Geels C, Nyiri A, Posch M, Soares J, Sofiev M, Wind P, Langner J. Impacts of climate and emission changes on nitrogen deposition in Europe: a multi-model study. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(13): 6995-7017.
- [72] Zhang J X, Gao Y, Leung L R, Luo K, Liu H, Lamarque J F, Fan J R, Yao X H, Gao H W, Nagashima T. Impacts of climate change and emissions on atmospheric oxidized nitrogen deposition over East Asia. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(2): 887-900.