

不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷数据库 (v1.0)

孟丽军^{1,2,3}, 许增美慧^{1,2,3}, 高佳凯^{1,2,3}, 吴姗姗^{1,2,3}, 张鑫^{1,2,3}, 多勇昊^{1,2,3},
宋凌宇^{1,2,3}, 石兆勇^{1,2,3*}

- 1 河南科技大学 农学院, 河南 洛阳
- 2 河南省乡村人居环境工程中心, 河南 洛阳
- 3 洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室, 河南 洛阳

孟丽军, 许增美慧, 高佳凯, 吴姗姗, 张鑫, 多勇昊, 宋凌宇, 石兆勇. 不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷数据库 (v1.0)[J]. 微生物学报, 2026, 66(5): 2547-2556.

MENG Lijun, XU Zengmeihui, GAO Jiakai, WU Shanwei, ZHANG Xin, DUO Yonghao, SONG Lingyu, SHI Zhaoyong. Database of critical loads of nitrogen deposition for herbaceous plants under forests of different mycorrhizal types (v1.0)[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2026, 66(5): 2547-2556.

摘要: 氮沉降是影响全球森林生态系统结构与功能的重要驱动因子, 当其超过生态系统临界负荷(critical load, CL)时会显著改变林下草本植物的物种多样性与丰度。本研究旨在从丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)、外生菌根(ectomycorrhiza, ECM)及丛枝菌根和外生菌根混合型(AM+ECM)这3种类型出发, 系统整合林下草本植物对氮沉降的临界负荷数据并建立数据库。通过比较2类森林草本对氮输入的响应差异, 为评估氮沉降对森林微生物-植物系统的影响提供科学依据。基于已发表文献及Wilkins等构建的全球氮沉降临界负荷数据库, 经系统收集、筛选与标准化处理, 构建了“不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷数据库(v1.0)”。所有临界负荷值均采用统一的阈值指示类群分析法(threshold indicator taxa analysis, TITAN)计算, 并经过严格的质控流程, 包括菌根类型交叉验证、异常值处理与数据标准化。本数据库共收录了3 592条标准化记录。核心数据表包含以下字段: 草本植物物种拉丁名、所属森林联盟、菌根类型(AM、ECM、AM+ECM)、基于TITAN方法计算的物种水平临界负荷值(zenv.cp)及其自助法不确定性区间(0.05、0.1、0.5、0.9、0.95分位数)、响应方向(丰度增加/减少)、纯度与可靠性指标、群落水平变化点(community-level change points, CCP)以及环境因子等元数据。数据覆盖AM、ECM、AM+ECM 3种主要菌根类型, 以及禾本科与非禾本科草本植物功能群。本数据库是首个聚焦于“菌根类型-草

资助项目: 中原科技创新领军人才项目(254200510006); 国家自然科学基金(32171620); 河南省科技攻关项目(252102320074, 252102110191)

This work was supported by the Central Plains Science and Technology Innovation Leading Talents Program (254200510006), the National Natural Science Foundation of China (32171620), and the Scientific and Technological Research Project of Henan Province (252102320074, 252102110191).

*Corresponding author. E-mail: shizy1116@126.com

Received: 2025-11-27; Accepted: 2026-01-19; Published online: 2026-01-28

本植物-氮沉降临界负荷”关系的大规模、标准化数据集。其规范的结构、透明的元数据与严格的质量控制，使其能够可靠地支持关于氮沉降生态风险评估、菌根功能比较、生态模型参数化及生物多样性保护策略制定等方面的后续研究与应用。

关键词：菌根类型；草本植物；氮沉降；临界负荷；阈值指示类群分析法；数据库

Database of critical loads of nitrogen deposition for herbaceous plants under forests of different mycorrhizal types (v1.0)

MENG Lijun^{1,2,3}, XU Zengmeihui^{1,2,3}, GAO Jiakai^{1,2,3}, WU Shanwei^{1,2,3}, ZHANG Xin^{1,2,3}, DUO Yonghao^{1,2,3}, SONG Lingyu^{1,2,3}, SHI Zhaoyong^{1,2,3*}

1 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan, China

2 Henan Rural Human Settlement Environment Engineering Center, Luoyang, Henan, China

3 Luoyang Key Laboratory of Symbiotic Microorganisms and Green Development, Luoyang, Henan, China

Abstract: Nitrogen deposition is a major driver shaping the structures and functions of forest ecosystems worldwide. When nitrogen inputs exceed ecosystem critical loads (CLs), significant changes in the diversity and abundance of understory herbaceous plants can occur. This study aims to systematically compile and integrate critical load data for understory herbaceous plants in response to nitrogen deposition across three mycorrhizal types: arbuscular mycorrhiza (AM), ectomycorrhiza (ECM), and mixed arbuscular-ectomycorrhizal forests (AM+ECM), in forests. By establishing a dedicated and standardized database, this work facilitates comparisons of herbaceous plant responses to nitrogen inputs among different mycorrhizal types in forests and provides a scientific basis for assessing the impacts of nitrogen deposition on forest microbe-plant systems. On the basis of the published literature and the global nitrogen deposition critical load database developed by Wilkins et al., relevant data were systematically collected, screened, and standardized to construct the Database of Critical Loads of Nitrogen Deposition for Understory Herbaceous Plants across Different Mycorrhizal Types in Forests. All critical load values were consistently derived *via* the threshold indicator taxa analysis (TITAN) method. A rigorous quality control workflow was applied, including cross-validation of mycorrhizal types, outlier detection and treatment, and data standardization. The database contains 3 592 standardized records. The core data table includes the following fields: Latin name of herbaceous plant species, forest alliance, mycorrhizal types (AM, ECM, or AM+ECM), species-level critical load values (zenv.cp) estimated by TITAN with corresponding bootstrap uncertainty intervals (5th, 10th, 50th, 90th, and 95th percentiles), response direction (increase or decrease in abundance), purity and reliability metrics, community-level change points (CCP), and associated environmental metadata. The database covers the three major mycorrhizal types as well as graminoid and non-graminoid herbaceous functional groups in forests. This database represents the first large-scale, standardized database explicitly focusing on the relationships among mycorrhizal types, understory herbaceous plants, and nitrogen deposition critical loads in forests. Its standardized structure, transparent metadata, and stringent quality control procedures ensure its reliability for future research and applications,

including nitrogen deposition risk assessment, comparative analyses of mycorrhizal functions, ecological model parameterization, and the formulation of biodiversity conservation strategies.

Keywords: mycorrhizal types; herbaceous plants; nitrogen deposition; critical load; threshold indicator taxa analysis (TITAN); database

数据库基本信息简介

Dataset profile

数据集名称	不同菌根类型下森林草本植物氮沉降临界负荷数据库(v1.0)
Dataset name	Database of critical loads of nitrogen deposition for herbaceous plants under forests of different mycorrhizal types (v1.0)
数据集作者	孟丽军, 许增美慧, 高佳凯, 吴姗姗, 张鑫, 多勇昊, 宋凌宇, 石兆勇
Dataset authors	MENG Lijun, XU Zengmeihui, GAO Jiakai, WU Shanwei, ZHANG Xin, DUO Yonghao, SONG Lingyu, SHI Zhaoyong
数据内容简介	本数据集包含6个工作表, 分别为说明文档(readme)、元数据说明(metadata)、核心数据表(Data-编辑菌根类型及Sheet2-Sheet4。其中核心数据表共3 592条记录, 涵盖物种拉丁名、森林联盟、菌根类型、基于阈值指示类群分析法(threshold indicator taxa analysis, TITAN)方法计算的物种临界负荷值及其分位数不确定性区间、丰度响应方向、纯度与可靠性指标、群落水平变化点(community-level change points, CCP)等信息。数据覆盖丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)、外生菌根(ectomycorrhiza, ECM)、混合型菌根(AM+ECM) 3种主要类型, 同时包含禾本科与非禾本科草本功能类群
Dataset content introduction	This dataset consists of six worksheets: readme, metadata, the core data table (Data - Mycorrhizal Types), and Sheet2 to Sheet4. The core data table contains 3 592 records, covering species Latin name, forest alliance, mycorrhizal type, species critical load values calculated using the TITAN method along with their quantile-based uncertainty intervals, abundance response direction, purity and reliability indices, and (community-level change points, CCP). The data cover three main mycorrhizal types: arbuscular mycorrhiza (AM), ectomycorrhiza (ECM), and mixed mycorrhiza (AM+ECM), as well as grass and non-grass herb functional groups
数据产生时间	数据采集时间涵盖1989-2012及以后
Data generation time	The dataset covers the period from 1989 to 2012 and beyond
数据量和数据格式	数据量1.1 MB, 数据格式为*.xlsx
Data volume and format	The dataset size is 1.1 MB, and the data are provided in *.xlsx format
数据集存储地址	已通过 Science DB 数据平台开放获取, 关联 DOI:10.57760/sciencedb.32699 (用户可通过该 DOI 直接检索下载完整数据集)
Dataset storage address	The dataset is openly accessible through the Science DB data platform and is associated with DOI: 10.57760/sciencedb.32699. Users can directly search and download the complete dataset via this DOI
数据引用格式	1. 中文引用格式: 孟丽军, 许增美慧, 高佳凯, 吴姗姗, 张鑫, 多勇昊, 宋凌宇, 石兆勇. 不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷数据库(v1.0)[DB/OL]. Science DB, 202X. 10.57760/sciencedb.32699. 2. 英文引用格式: MENG LJ, XU ZMH, GAO JK, WU SW, ZHANG X, DUO YH, SONG LY, SHI ZY. A database of critical loads of nitrogen deposition for understory herbaceous plants across different forest mycorrhizal types (v1.0)[DB]. Science DB, 202X. 10.57760/sciencedb.32699. (注: “202X”需根据数据集实际发布年份补充)
Dataset citation format	1. Chinese citation format: MENG Lijun, XU Zengmeihui, GAO Jiakai, WU Shanwei, ZHANG Xin, DUO Yonghao, SONG Lingyu, SHI Zhaoyong. A database of critical loads of nitrogen deposition for understory herbaceous plants across different mycorrhizal types in forests (v1.0) [DB/OL]. Science DB, 202X. DOI: 10.57760/sciencedb.32699 2. English citation format: MENG LJ, XU ZMH, GAO JK, WU SW, ZHANG X, DUO YH, SONG LY, SHI ZY. A database of critical loads of nitrogen deposition for understory herbaceous plants across different mycorrhizal types in forests (v1.0)[DB]. Science DB, 202X. DOI: 10.57760/sciencedb.32699. (Note: “202X” should be replaced with the actual release year of the dataset)

氮沉降已成为影响全球森林生态系统结构与功能的重要环境变化因子^[1-2]。近几十年来,由于化石燃料燃烧、农业施肥和工业排放持续增加,反应性氮释放量显著上升^[3-4],致使多个区域的氮沉降水平超过自然生态系统的环境承载能力^[5-6]。大量研究表明,当氮沉降超过植物群落的临界负荷(critical load, CL)时森林下层草本植物的物种组成、物种丰富度和功能结构将发生显著改变^[7-8],进而影响森林生态系统的稳定性与生物多样性维持^[9-10]。因此,准确量化草本植物对氮沉降的响应阈值,为理解氮沉降生态风险、支撑区域尺度氮管理与生态保护决策提供了重要基础。

菌根类型是影响森林生态过程的关键生物因子之一^[11-12]。丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)、外生菌根(ectomycorrhiza, ECM)及丛枝菌根和外生菌根混合型(AM+ECM)等不同菌根类型在土壤养分循环、氮素获取策略、有机质分解过程和植物-微生物互作等方面存在显著差异^[13-14]。越来越多的研究表明,森林主导树种的菌根类型能够深刻调节下层草本植物对氮沉降的敏感性^[15-16]。例如,ECM森林通常具有较强的有机氮利用能力,其下层草本植物的氮吸收可能受氮形态限制^[17-18];而AM森林主要依赖无机氮,草本层植物可能更易受到氮富营养化影响^[19-20]。然而,目前尚缺乏系统整合“菌根类型(AM、ECM、AM+ECM)-草本植物-氮沉降临界负荷”三者之间关系的大规模数据集,这限制了在区域或全球尺度上开展跨生态系统的比较研究。

临界负荷的计算通常依赖于植物群落沿环境梯度的响应模型。近年来,基于阈值指示类群分析法(threshold indicator taxa analysis, TITAN)被广泛应用于识别生物群落的环境阈值,尤其适用于存在显著“拐点”或非线性响应的情形^[16,21]。与传统线性模型或经验阈值方法相比,TITAN能够同时识别物种层级和群落层级的变化点,并提供阈值的不确定性区间以及纯度和

可靠性等统计指标,从而提高阈值识别结果的稳健性。然而,目前仍缺乏将基于TITAN方法获得的阈值结果进行系统整合,并从菌根类型角度加以分类整理的数据资源。

为填补这一数据缺口,本研究基于全球已发表文献、Wilkins等^[7]提供的经典氮沉降数据集和相关辅助数据,建立了“森林不同菌根类型下草本植物氮沉降临界负荷数据库(v1.0)”。该数据库共包含3 592条记录,涵盖草本植物物种信息、功能群分类、森林菌根类型、基于TITAN计算的临界负荷值及其不确定性区间、环境变量和质量控制指标。本数据库弥补了不同菌根类型森林下草本植物氮响应数据的不足,为开展氮沉降生态风险评估、生物多样性保护和氮管理提供了重要的基础数据。

本研究的数据集为未来跨生态系统比较研究、氮沉降实验结果整合、机制建模与政策评估提供了可重复、可扩展的基础资源,可为森林生态系统的氮管理与生物多样性保护提供科学依据。

本数据集名称为“不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷数据库(v1.0)”,数据采集时间涵盖1989–2012年及以后,数据种类涉及草本植物(含草本科、禾本科、马鞭草科),数据集大小为1.1 MB,数据格式为*.xlsx。数据来源方面,部分源数据取自Wilkins全球氮沉降临界负荷数据库^[7]及相关文献。数据集由6个工作表(worksheet)组成,具体如下:1. Readme:包含数据集的说明信息;2. Metadata:对数据中每一列内容进行具体解释的元数据;3. Data-编辑菌根类型,核心数据表,共收录3 592条记录,涵盖物种、菌根类型、临界负荷值、可靠性指标等关键信息;4. Sheet2; 5. Sheet3; 6. Sheet4。

1 数据来源与处理方法

1.1 数据来源

本数据库原始数据主要来源于2个方面:

一是从 Wilkins 全球氮沉降临界负荷数据库^[7]等相关公开数据平台获取草本植物物种在不同森林联盟中的分布及其对氮沉降的相应数据；二是通过检索已发表的中英文文献及数据库，收集报告草本植物与菌根类型关联以及对氮沉降的相应数据。

1.2 菌根类型分类

数据库中的核心变量“菌根类型”，参考 Vargas 等^[22]和石兆勇等^[23]的划分方法，依托菌根类型网站-measurements 进行人工判读与分类。其判定以森林优势树种的菌根共生特征为核心依据：优先通过原始文献明确优势树种，再依据其根系共生形态(AM 的胞内丛枝/泡囊、ECM 的菌套/哈氏网)初步判断类型。对于存疑或缺失的数据，通过全球公认的真菌分类学与功能数据库进行交叉验证，主要包括：使用 FungalRoot 数据库(<https://fungalroot.pl/>)查询植物根际真菌组合；使用 MycoFlor 相关数据库(即全球生物多样性信息网络 GBIF, <https://www.gbif.org/>)核查物种间的共生关联记录；同时参考 Smith 等^[13]的著作。单一优势树种对应 AM/ECM 纯类型，混生优势树种则归为 AM+ECM 型，争议记录以近 5 年文献为准，未明确记录标注为“NA”。

1.3 阈值计算方法

本数据库中的所有氮沉降临界负荷值均使用 TITAN 方法计算得出^[21,24]。TITAN 是一种通过自助法重抽样的阈值识别方法，用于确定物种丰度沿环境梯度发生显著变化的点和响应方向。对于每一个指示物种，计算其环境临界点 [zenv.cp, 单位: kg N/(ha·a)], 即其丰度对氮沉降负荷产生显著响应的阈值位置。通过自助法分位数(如 0.05、0.1、0.5、0.95)提供临界点估计的不确定性范围。变化点的筛选基于纯度(purity)和可靠性(reliability) 2 个统计指标，以确保所报告阈值的稳健性。通常，将 filter!=0 的记录视为符合可靠性和纯度标准的稳健响应。

2 数据样本描述

本数据集集合了禾本科和草本科的物种基础信息、菌根类型、环境响应与阈值信息、数据可靠性及群落变化点信息，具体内容及字段含义见表 1。

3 数据质量控制和评估

为确保数据库中临界负荷及相关生态信息的准确性、可比性和可复现性，本研究从数据来源筛选、菌根类型判定、TITAN 阈值计算一致化、异常值处理及跨研究一致性验证等多个层面开展严格的质量控制。

3.1 文献与样点筛选

为确保数据来源的科学性与一致性，本研究仅纳入满足以下条件的样点或研究：(1) 发表在同行评议期刊或权威数据库中的研究；(2) 具有明确的氮沉降梯度或实验处理浓度；(3) 包含草本植物群落调查数据(物种、丰度或盖度)；(4) 记录森林主导树种或具有可推断的森林类型信息；(5) 具备可用于 TITAN 分析的、丰富度随氮变化的连续数据点。对不满足上述任一条件的样点均予以剔除。例如：无法明确定位于森林生态系统的数据库；丰度记录不足以支撑阈值计算的数据；氮沉降梯度过于狭窄，无法识别变化点的研究；缺少可靠物种鉴定的样本。

通过筛选，共获得 3 592 条符合标准的记录，为确保数据质量奠定了基础可靠性。

3.2 菌根类型分类的交叉验证

森林主导树种的菌根类型对草本植物阈值的生态解释具有关键意义^[24]。为确保判定的一致性，本研究采用以下 3 层验证机制。(1) 数据库交叉查询：使用 Fungal Root (全球权威菌根数据库)^[25]、MycoFlor (植物-菌根匹配系统)^[26]以及国内外菌根类型文献综述(如 Smith 等^[13])。(2) 森林联盟(alliance)校验：对于主导树种不明确的研究通过森林联盟的典型群落种鉴定菌根类型。(3) 冲突数据处理原则：若不同文献对同一树种

表1 本数据集中Data-编辑菌根类型的内容及字段含义

Table 1 Content and field meanings of mycorrhizal types in the dataset

字段名称 Field name	数据类型 Data type	量纲 Unit	说明 Description
Species	字符型	无	记录植物种类的学名,包含草本科、禾本科、马鞭草科
Alliance	字符型	无	记录物种所在的森林联盟
菌根类型	字符型	无	记录物种的菌根类型,包含AM、ECM、AM+ECM
文献	字符型	无	记录与物种菌根类型相关的文献,包含文献作者、年份及文献详细信息,可用于追溯数据来源
菌根类型-汇总	字符型	无	对物种菌根类型的汇总记录
zenv.cp	浮点型	kg N/(ha·a)	基于Z值最大值计算的每个类群(物种)的环境临界点
Freq	整数型	次	联盟内物种出现的数量
Respdir	整数型	无	响应方向,用整数表示,1=减少丰度(decreasing abundance);2=增加丰度(increasing abundance)
0.05	浮点型	kg N/(ha·a)	基于bootstrap replicates的5%变化点量值
0.1	浮点型	kg N/(ha·a)	基于bootstrap replicates的10%变化点量值
0.5	浮点型	kg N/(ha·a)	基于bootstrap replicates的50%变化点量值
0.9	浮点型	kg N/(ha·a)	基于bootstrap replicates的90%变化点量值
0.95	浮点型	kg N/(ha·a)	基于bootstrap replicates的95%变化点量值
Purity	浮点型	%	与观察到的最大组分配相匹配的replicates比例
Reliability	浮点型	%	在随机排列中与Indval分数相等或更大的replicates比例
Filter	整数型	无	过滤器,0=不符合可靠性和/或纯度的标准;1=减少并符合可靠性和纯度的标准;2=增加并符合可靠性和纯度的标准
Indicator	字符型	无	指示器,TRUE=被视为特定联盟的指示物种,False表示否
Invasive	字符型	无	侵略性,True=在美国被视为入侵物种,False表示没有
RFSS	字符型	无	True=该物种被列为美国林务局的地区敏感物种名单,False表示不符合
CCP-decreasing	浮点型	kg N/(ha·a)	群落变化点,基于符合纯度和可靠性标准的减少物种
CCP-increasing	浮点型	kg N/(ha·a)	群落变化点,基于符合纯度和可靠性标准的增加物种

菌根类型认定存在不一致,本研究采取以最新文献为准的原则;若主导树种混合存在,则归类为AM+ECM;对不确定记录标记为“NA”,并在数据库中保留元数据。该过程确保菌根类型分类的全面性和准确性。

3.3 TITAN 阈值计算的参数统一与重复验证

本数据库所有的临界负荷值(zenv.cp)均采用统一的TITAN参数设定,以减少跨研究计算差

异。参数包括:

- bootstrap=1 000
- quant=c (0.05,0.95) (输出不确定性范围)
- minSpl=5 (最低分割点)

并根据TITAN输出的关键指标实施过滤:

- filter≠0 (仅保留稳健物种)

对于所有研究均重新计算阈值,避免引用不同方法导致的系统误差。

此外,对每条计算结果进行人工核查,确

保响应方向与 β 值一致; 如果阈值落在梯度端点, 标记为“不稳定阈值”; 对过度偏离(>3 SD)的阈值再次核算或移除。

3.4 数据标准化与编码规范

所有分类变量经过严格标准化: 物种名统一为拉丁名, 并与 The Plant List 校对; 菌根类型统一为“AM/ECM/AM+ECM”; 功能群(functional group)统一为“Forb/Graminoid/Others”; NA 值、空值、符号误差统一采用标准编码; 各字段单位、精度、数据格式经过一致化处理。该过程确保数据库适用于后续模型、风险评估和跨地区比较研究。

3.5 异常值处理与缺失值标注

对所有字段进行异常值识别: 采用 IQR 和 Z-score 检测潜在异常值; 若异常值可溯源为录入错误, 则删除; 若为生态合理但极端的值, 则保留并在附注中说明。对缺失值(如部分研究缺少环境因子)使用 NA 明确标注, 而不进行插补, 以保持原始数据的真实性。

3.6 数据版本管理与复现性

本数据库采用版本化管理, 当前版本为 v1.0。每次更新均记录: 数据来源变更; 字段调整; 阈值计算版本; 样点新增记录。所有处理流程、函数参数和数据结构已在 Readme 中完整说明, 确保数据的可复现性。

4 数据价值

本数据库系统整合了不同菌根类型森林下草本植物的氮沉降临界负荷信息, 是目前已知首个以“菌根类型-草本植物-氮沉降临界负荷”为核心框架的专业数据集。该数据集覆盖美国 24 个森林群落, 共包含 3 592 条标准化记录, 涵盖 AM、ECM、AM+ECM 混合型 3 种主要菌根类型, 以及禾本科和非禾本科 2 类草本植物功能群。本数据库在科学研究和生态管理中具有重要价值。本数据库已成功支撑相关实证研究^[19], 该研究基于数据库 3 592 条记录, 明确验证了

AM+ECM 型森林草本植物氮沉降临界负荷最高[9.28 kg N/(ha·a)]、AM 型最低[7.19 kg N/(ha·a)]”的核心规律, 且揭示了菌根类型通过生态位分化、凋落物氮含量调控临界负荷的机制, 充分证明了本数据库在生态机制研究中的可靠性与实用性。该数据涵盖 1989–2012 年长期监测数据, 可支撑“氮沉降效应全球规律”“气候、土壤因子对阈值的调控作用”等大尺度研究, 为高水平论文发表提供数据基础。

4.1 填补了全球尺度上菌根类型与草本植物氮响应数据的空缺

以往研究多集中于单一生态系统或区域(如欧洲草地、北美森林), 或者少数优势物种或特定功能群, 且临界负荷的计算方法不统一, 相关数据零散分布, 难以开展跨研究和跨生态系统的比较。本数据库通过以下特征实现高效对比分析, 解决了现有数据分散、比较方法不明确的问题。分类维度清晰: 按菌根类型(AM、ECM、AM+ECM)、植物功能群(禾本科、非禾本科)、响应方向(丰度增加、丰度降低)精准划分, 用户可直接通过“菌根类型”“respdir”字段筛选数据, 开展“不同菌根类型阈值差异”“功能群响应一致性”等核心对比; 关键参数完整: 每条记录均包含物种水平临界负荷值(zenv.cp)、群落水平变化点(CCP-decreasing/increasing)、不确定性区间(0.05–0.95 分位数)及可靠性指标(purity、reliability), 可通过统计分析(如单因素方差分析)量化不同森林类型的氮承载能力差异; 数据标准化统一: 所有阈值均采用 TITAN 方法统一计算(bootstrap=1 000、minSplt=5), 物种名、菌根类型等分类变量经 The Plant List、FungalRoot 等权威数据库校对, 确保跨区域、跨研究数据的可比性。整合 3 592 条记录, 覆盖 AM、ECM、AM+ECM 3 种主要菌根类型, 并使用统一 TITAN 参数重新计算所有阈值, 使得跨生态系统的比较成为可能。本研究通过统一阈值计算方法、严格的菌根类型交叉验证

及标准化处理,首次量化了不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷的差异规律(AM+ECM>ECM>AM),为相关生态机制研究提供了标准化数据支撑,而非单纯的数据集整合。

4.2 为氮沉降风险评估提供统一且可复现的阈值标准

临界负荷是制定氮管理政策的关键科学依据。本数据库不仅可用于各国或区域氮沉降超载评估,还可用于草本层多样性丧失的早期预警,对氮输入政策、排放控制政策的风险评估与模拟,生态保护区的科学评估与监测规划,尤其是不同菌根类型森林间的比较,可为生态分区管理提供更细致的科学证据。

4.3 为检验“菌根类型调控氮沉降敏感性”提供关键数据支撑

菌根类型是森林氮循环的关键驱动因素,但其对草本植物临界负荷的影响一直缺乏系统化的数据支持。本数据库的显著价值在于可直接用于验证“菌根类型-生态位分化-氮阈值”“C:N:P 化学计量平衡-氮耐受能力”等核心假说;可直接比较 AM、ECM、AM+ECM 森林下草本植物 CL 的差异;还可用于检验 ECM 森林是否具有更高的氮阈值、AM 森林草本是否更易受到氮沉降影响、AM+ECM 森林是否具有“中间型”或“协同/抵消型”效应。该数据将为生态理论验证提供关键的跨系统证据。

4.4 支持生态建模、情景模拟与大尺度分析

本数据库可直接用于生态系统模型(如 ForSAFE、PNET、CENTURY)的参数化与校准,还可用于氮沉降情景模拟(未来 N 输入变化),用于全球变化模型中的生物多样性风险模块,并可作为 Remote sensing-based biodiversity modeling 的训练数据,其标准化字段结构(物种、菌根类型、功能群、阈值、不确定性)使其便于集成至模型研究。

4.5 为跨研究整合、元分析与大样本比较提供基础数据

由于本数据库整合了跨区域、跨森林类型的大样本数据,具有显著的元分析价值,可以检验氮沉降效应的全球性规律,量化环境梯度(气候、土壤性质)如何改变 CL,探索功能群差异(草本科 vs. 非草本科),并评估物种水平和群落水平阈值的异同,为未来发表高水平元分析论文提供强有力的数据支撑。

4.6 为森林管理、恢复规划和政策制定提供参考依据

森林下层草本植物对氮沉降高度敏感,被视为生态系统健康的重要指标。本数据库可为管理与决策提供:不同菌根类型森林的氮沉降承载能力;生态修复区域的氮输入上限;敏感物种监测清单;适合的草本恢复策略(根据阈值差异)。对森林保护区管理、碳汇林建设及区域生态红线制定具有现实价值。

4.7 数据透明、结构规范、便于复用与扩展

本数据库具有统一的数据结构、严格的元数据(metadata)、完整的字段说明、清晰的质量控制流程、可扩展的版本化管理,便于全球研究人员复用分析,也便于未来的持续更新(v2.0、v3.0)。

5 数据使用方法和建议

数据集以 .xlsx 格式存储,用户可使用 Microsoft Excel、R、Python 等常用软件打开和处理。用户可根据研究目的,重点关注 zenv.cp (物种临界点)、CCP_decreasing/increasing (群落临界点)以及菌根类型等字段,进行组间比较、回归分析或 meta 分析。在利用临界点时,建议同时考虑其置信区间(如 0.05–0.95)以反映估计值的变异性。在解释不同菌根类型森林的阈值差异时应综合考虑其他潜在共变量(如土壤类型、气候背景)的影响。

6 数据(集)可用性声明

本研究构建的“不同菌根类型森林下草本植物氮沉降临界负荷数据库(v1.0)”以 Microsoft Excel (*.xlsx)格式存储, 数据量为 1.1 MB, 包含 Readme、Metadata、Data- 编辑菌根类型、Sheet2、Sheet3、Sheet4 共 6 个工作表, 核心数据表(Data-编辑菌根类型)涵盖物种拉丁名、森林联盟、菌根类型、临界负荷值(zenv.cp)、不确定性区间(0.05、0.1、0.5、0.9、0.95 分位数)、响应方向、纯度、可靠性、过滤器等关键字段。数据集原始数据来源于 Wilkins 全球氮沉降临界负荷数据库及同行评议期刊发表的中英文文献, 所有数据均经过严格的质量控制与标准化处理。

获取方式: 本数据库已通过 Science DB 数据平台关联 DOI (10.57760/sciencedb.32699)开放获取, 用户可通过该 DOI 直接检索下载完整数据集, 包含上述 6 个工作表及详细使用说明, 替代原文“相关数据服务平台”表述(DOI 为永久访问标识, 符合学术数据共享规范)。

数据集采用版本化管理(当前版本 v1.0), 后续将根据新数据补充与方法优化进行更新, 确保数据的时效性与扩展性。

作者贡献声明

孟丽军: 数据处理、数据分析、制作图表和稿件撰写; 许增美慧: 参与研究思路梳理及稿件内容优化; 高佳凯: 参与数据处理方法调试及稿件格式调整; 吴姗姗: 参与数据清洗校验及稿件细节补充; 张鑫: 参与数据标准化处理及图表格式优化; 多勇昊: 参与数据质量控制及参考文献核对; 宋凌宇: 参与数据可视化辅助及术语表述规范; 石兆勇: 主持研究选题, 指导研究框架设计, 审核研究内容并审定稿件。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] Luo XZ, Kuang YW, Wen DZ, Lambers H, Elrys AS, Chen MH, Xiang P, Cai HY, Liu N, Hou EQ, Zhang LL. Long-term atmospheric nitrogen deposition enhances forest production by suppressing microbial competition for phosphorus[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(6): e70264.
- [2] Du EZ, Fenn ME, de Vries W, Ok YS. Atmospheric nitrogen deposition to global forests: status, impacts and management options[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 1044-1048.
- [3] 汪文强, 赵长明, 张新芳, 陈玉莹, 刘勇勤. 三极冰川冰尘微生物及其介导的碳氮生物地球化学循环研究进展[J]. *微生物学报*, 2022, 62(6): 2136-2149. Wang WQ, Zhao CM, Zhang XF, Chen YY, Liu YQ. Research progress of cryoconite microorganisms and biogeochemical cycling of carbon and nitrogen driven by cryoconite in tripolar glaciers[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(6): 2136-2149 (in Chinese).
- [4] Zhu JX, Jia YL, Yu GR, Wang QF, He NP, Chen Z, He HL, Zhu XJ, Li P, Zhang FS, Liu XJ, Goulding K, Fowler D, Vitousek P. Changing patterns of global nitrogen deposition driven by socio-economic development[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 46.
- [5] Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW, Bekunda M, Cai ZC, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [6] Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW, Cowling EB, Cosby BJ. The nitrogen cascade[J]. *BioScience*, 2003, 53(4): 341.
- [7] Wilkins K, Clark C, Aherne J. Ecological thresholds under atmospheric nitrogen deposition for 1 200 herbaceous species and 24 communities across the United States[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(7): 2381-2395.
- [8] Gilliam FS, Welch NT, Phillips AH, Billmyer JH, Peterjohn WT, Fowler ZK, Walter CA, Burnham MB, May JD, Adams MB. Twenty-five-year response of the herbaceous layer of a temperate hardwood forest to elevated nitrogen deposition[J]. *Ecosphere*, 2016, 7(4): e01250.
- [9] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman JW, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, de Vries W. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [10] Nilsson J, Grennfelt P. Critical loads for sulphur and nitrogen[C]. *Air Pollution and Ecosystems: Proceedings of an International Symposium*, Grenoble, France, 1987: 85-91.
- [11] Phillips RP, Brzostek E, Midgley MG. The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests[J]. *The New Phytologist*, 2013, 199(1): 41-51.
- [12] Jiang F, Lutz JA, Guo QX, Hao ZQ, Wang XG, Gilbert

- GS, Mao ZK, Orwig DA, Parker GG, Sang WG, Liu YK, Tian SY, Cadotte MW, Jin GZ. Mycorrhizal type influences plant density dependence and species richness across 15 temperate forests[J]. *Ecology*, 2021, 102(3): e03259.
- [13] SMITH SE, READ DJ. *Mycorrhizal Symbiosis*[M]. 3rd. San Diego, CA: Academic Press, 2008: 30.
- [14] 石兆勇, 刘德鸿, 王发园, 丁效东. 菌根类型对森林树木净初级生产力的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 404-408.
Shi ZY, Liu DH, Wang FY, Ding XD. Effect of mycorrhizal strategy on net primary productivity of trees in global forest ecosystem[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(3): 404-408 (in Chinese).
- [15] Averill C, Turner BL, Finzi AC. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage[J]. *Nature*, 2014, 505(7484): 543-545.
- [16] Lin GG, McCormack ML, Ma CG, Guo DL. Similar below-ground carbon cycling dynamics but contrasting modes of nitrogen cycling between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal forests[J]. *The New Phytologist*, 2017, 213(3): 1440-1451.
- [17] Tunlid A, Floudas D, OP de Beeck M, Wang T, Persson P. Decomposition of soil organic matter by ectomycorrhizal fungi: Mechanisms and consequences for organic nitrogen uptake and soil carbon stabilization[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2022, 5: 934409.
- [18] 高旭硕, 王震, 石兆勇. 菌根类型对森林草本植物群落物种丰富度的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1251-1259.
Gao XS, Wang Z, Shi ZY. Effects of mycorrhizal types on herbaceous species richness in forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(5): 1251-1259 (in Chinese).
- [19] 许增美慧, 石兆勇, 王浩, 李琰, 马路平, 张梦歌, 吴姗姗, 高佳凯, 王双双. 森林菌根类型对林下草本植物响应氮沉降的影响[J]. *微生物学报*, 2025, 65(11): 4877-4888.
Xu ZMH, Shi ZY, Wang H, Li Y, Ma LP, Zhang MG, Wu SW, Gao JK, Wang SS. Effects of forest mycorrhizal types on responses of understory herbaceous plants to nitrogen deposition[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(11): 4877-4888 (in Chinese).
- [20] Mcdonough AM, Watmough SA. Impacts of nitrogen deposition on herbaceous ground flora and epiphytic foliose lichen species in southern Ontario hardwood forests[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 196: 78-88.
- [21] Baker ME, King RS. A new method for detecting and interpreting biodiversity and ecological community thresholds[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2010, 1(1): 25-37.
- [22] Vargas R, Baldocchi DD, Querejeta JI, Curtis PS, Hasselquist NJ, Janssens IA, Allen MF, Montagnani L. Ecosystem CO₂ fluxes of arbuscular and ectomycorrhizal dominated vegetation types are differentially influenced by precipitation and temperature[J]. *The New Phytologist*, 2010, 185(1): 226-236.
- [23] 石兆勇, 张凯, 苗艳芳, 王发园. 不同菌根类型森林净初级生产力对降水的响应[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 14-19.
Shi ZY, Zhang K, Miao YF, Wang FY. Responses of net primary productivity to precipitation in forests dominated by different mycorrhizal types[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(1): 14-19 (in Chinese).
- [24] Wilkins K, Aherne J, Bleasdale A. Vegetation community change points suggest that critical loads of nutrient nitrogen may be too high[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 324-331.
- [25] Soudzilovskaia NA, Vaessen S, Barcelo M, He JH, Rahimlou S, Abarenkov K, Brundrett MC, Gomes SIF, Mercx V, Tedersoo L. FungalRoot: global online database of plant mycorrhizal associations[J]. *The New Phytologist*, 2020, 227(3): 955-966.
- [26] Brundrett MC. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis[J]. *Plant and Soil*, 2009, 320(1): 37-77.