

天然草原植物根系凋落物分解研究进展

刘洋¹, 李豫悦¹, 马玉荣¹, 杨鑫^{1,2,*} (1. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏银川 750021)

摘要 植物凋落物分解是草原生态系统养分循环的关键过程, 是天然草原土壤碳(carbon, C)、氮(nitrogen, N)固持的重要来源。根系凋落物是植物凋落物的主要组成部分, 其分解过程是有机质和养分输入土壤的主要途径之一。从根系凋落物自身特性、非生物因子(温度、降雨与土壤养分)、生物因子(土壤动物、土壤微生物与土壤酶活性)等三个方面, 系统总结了草原植物根系凋落物分解过程及相关机理。在分析现有研究的基础上, 探讨了根系凋落物分解的研究内容、试验方法进展和不足, 并对未来草原植物根系凋落物分解研究方向进行了展望, 以期为进一步理解植物根系凋落物分解的地下过程提供参考。

关键词 土壤温度; 降雨; 土壤湿度; 土壤动物; 土壤微生物; 土壤酶

中图分类号 S812 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)08-0018-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.08.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress of Plant Root Litter Decomposition in Natural Grassland

LIU Yang, LI Yu-yue, MA Yu-rong et al (School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract Litter deposition is a key process for element cycle and the fundamental resource of soil carbon (C) and nitrogen (N) sequestration in grassland ecosystem. Plant root litter is an important part of plant litter, and its deposition process is the pathway of organic matter and nutrients return to soil. This review summarizes the processes and mechanisms of plant root litter from root quality, abiotic factors (temperature, annual precipitation and soil nutrient) and biotic factors (soil animal, soil microorganism and soil enzyme). Based on the current studies, we discuss the research contents and methods, and propose the future direction for plant root litter deposition in natural grassland ecosystem. Our review will deeply understand the belowground process for litter decomposition in natural grassland ecosystem.

Key words Soil temperature; Precipitation; Soil moisture; Soil animals; Soil microbes; Soil enzymes

根系是植物养分吸收和支持固着的营养器官, 是陆地生态系统中植物与土壤联系最为紧密的部分^[1-2]。植物根系生物量的动态变化, 能够强烈影响草原地上、地下净初级生产力形成及生态系统养分循环^[3-4]。以多年生植物占优势的天然草原, 植物根系死亡及其凋落物的分解过程, 能够参与土壤有机碳形成以及养分向土壤的归还过程^[5-7]。

在天然草原生态系统, 植物向地下分配的生物量超过地上生物量的3倍^[8], 植物根系凋落物产量超过全年凋落物产量的30%^[9]。此外, 相较于地上凋落物, 根系凋落物因自身性质, 以及其与土壤紧密接触的特点, 根系凋落物中的C更易被土壤固持^[10]。森林生态系统的试验证据表明, 植物根系凋落物分解所归还的C、N及其他中微量元素超过地上凋落物^[11]。依据Bradford等^[12]提出的凋落物分解“三角模型”, 凋落物分解过程受自身特性、非生物因子和生物因子的共同作用(图1)。在生态系统水平, 凋落物分解主要受到温度、降雨等非生物因子的影响^[13]; 而在植物群落水平, 凋落物分解过程受到凋落物自身特性、分解者和微环境的共同作用^[6, 14-16]。

目前, 已有大量研究关注地上凋落物分解过程对天然草原C、N循环的影响, 也有研究系统梳理和总结了地上凋落物分解的地上—地下过程^[5, 8, 17-18]。然而, 关于根系凋落物分解过程参与天然草原元素循环的研究报道, 系统整理还十分有限。因此, 该研究通过对国内外相关研究进行全面分析

和梳理, 综述天然草原根系凋落物分解过程的影响因子及相关作用机理, 解析当前根系凋落物分解的主要研究方向和试验方法, 分析研究不足, 并展望未来研究方向, 旨在为深入理解根系凋落物分解参与草地生态系统养分循环的过程和机理提供理论参考。

1 根系凋落物自身特性

1.1 根系凋落物产量 陆地生态系统中, 植物根系产量是有机碳向土壤输入的直接来源^[19]。植物根系产量在不同土层存在明显的垂直分配差异, 森林和草原土壤表层(0~30 cm)的根系生物量占植物根系总生物量的80%以上, 荒漠生态系统中, 土壤表层(0~30 cm)根系生物量约占植物根系总生物量的50%^[19]。来自整合分析(Meta-analysis)的研究结果发现, 全球尺度上草地生态系统中根系凋落物、叶片凋落物、茎凋落物分别占全年凋落物总产量的33%、26%和41%; 且植物细根(根系直径<2 mm)凋落物是植物根系凋落物最主要的贡献者^[9]。此外, 植物细根周转是根系凋落物产量形成的直接驱动因素^[20-21]。细根周转产生的根系凋落物产量能够贡献14%~50%的土壤总输入C量^[22]。以往关于根系凋落物产量的研究多集中于森林生态系统, 草原生态系统的相关研究依然较少。明晰不同草原类型根系凋落物产量的时空变化, 有助于深入理解根系凋落物分解的动态过程。

1.2 根系凋落物质量 凋落物质量通常以凋落物自身含有的碳水化合物量(纤维素、木质素和单宁)与养分含量(如C、N、P及中微量元素等)及其比值来表示^[23]。在微观尺度上, 凋落物质量是影响相对可分解性的主要驱动因素^[24]。相较于叶片凋落物, 根系凋落物分解过程通常受多种营养成分的共同调控, 如凋落物本身的C/N值、木质素含量、木质素/N值共同决定凋落物(叶、茎、根凋落物)的分解速率和可分解

基金项目 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03084); 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)。

作者简介 刘洋(1998—), 女, 宁夏隆德人, 从事草地管理与生态研究。
* 通信作者, 讲师, 博士, 硕士生导师, 从事草地管理与生态研究。

收稿日期 2021-11-11

性^[23-24]。相比森林生态系统细根凋落物,草原植物根系凋落物具有低木质素含量的特征,其根系凋落物更易分解^[16]。试验表明,C/N 较低的凋落物通常具有较高的分解速率,C/N 值较高的凋落物分解速率较为缓慢^[23,25]。此外,当凋落物木质素含量<20%时,凋落物 C/N 值的指示作用将极大削弱^[24,26]。相比于地上凋落物,根系凋落物具有更高的 C/N 值和木质素含量,一般认为其分解速率慢于叶片凋落物^[27-28]。然而,有研究也指出,细根(根直径 < 2 mm)凋落物的分解速率并不总低于叶片凋落物,因为其具有较低的 C/N 值和木质素含量,且能够与土壤微生物密切接触^[29]。以往研究多集中于植物根系凋落物的化学性质,对根系凋落物物理性质的研究还十分缺乏。如植物根系周皮厚度、根系是否具有木栓形成层等都会影响到根系凋落物分解的快慢。目前,多数研究集中在乔木、灌木等森林植物,关于草原植物根系凋落物质量对分解过程的影响仍需要更多试验证据。

1.3 植物种类 植物种类是影响植物根系凋落物分解的驱动因子之一。基于植物种类的根系凋落物分解的试验发现,因草本植物根系的 Ca 含量较高且木质素含量较低,其根系的分解速率明显高于木本植物。赵红梅等^[30]通过比较粗柄

独尾草(*Eremurus inderiensis*)、尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhynchum*)、芦苇(*Phragmites communis*)、花花柴(*Karelinia caspia*)和小果白刺(*Nitraria sibirica*)的根系凋落物的分解过程,发现粗柄独尾草(*E.inderiensis*)分解速率显著高于其他4种植物。李娅芸^[31]通过比较典型植物长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)根系的分解过程,发现长芒草(*S.bungeana*)根系因其初始 N 含量较高,其早期分解速率均高于铁杆蒿(*A.gmelinii*)和百里香(*T.mongolicus*)。最近的整合分析结果发现,植物根系侵染的菌根类型和木质化程度能够准确预测植物细根凋落物的分解速率^[25]。凋落物的质量除受植物种类的影响之外,还受到植物多样性的影响^[32]。当2种以上混合凋落物一起分解时,其分解速率偏离期望分解速率,表现出协同效应(实际分解速率 > 期望分解速率)、拮抗效应(实际分解速率 < 期望分解速率)等非加和效应^[33]。天然草原植物根系在土壤中紧密缠绕在一起,最新的研究结果发现,混合根系凋落物分解过程中 CO₂ 和 N₂O 的排放存在显著的非加和效应;高 C/N 值和低 N、P、K 及纤维素含量共同驱动拮抗效应的产生^[6]。

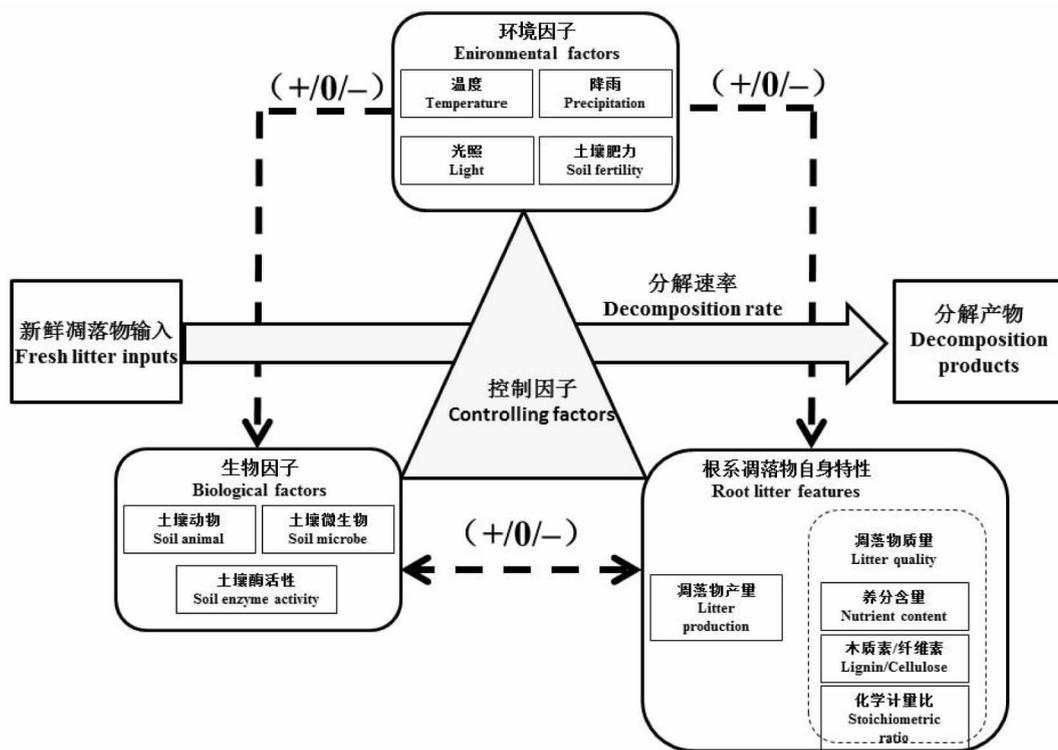


图1 影响凋落物分解的控制因子及其相互关系

Fig.1 Controlling factors affecting litter decomposition and their interactions

2 非生物因子

2.1 温度 温度是草原生态系统物质循环和能量流动的关键非生物因子,通常认为在大尺度上,温度是植物凋落物分解的主要环境因素之一^[34-35]。温度可直接影响土壤微生物及酶的活性,进而作用于植物根系凋落物分解;也可改变根系凋落物的产量和质量,间接影响根系凋落物的可分解性。在一定年均温(mean annual temperature, MAT)范围内,细根

凋落物分解速率随着气温的增加而显著增加^[25]。全球气温升高对草地 C、N 循环的作用过程已成为草地生态学研究中的重要科学问题^[36]。来自全球尺度的整合分析发现,增温趋向于增加植物根系凋落物的分解速率^[35]。然而,当前关于增温作用根系凋落物分解速率的试验证据依然较少。增温背景下,植物根系凋落物分解对草原生态系统 C、N、P 及中微量元素循环的作用机理仍然缺乏深入的研究^[31]。

2.2 降雨 降雨及土壤湿度通过调控植被类型和土壤微生物数量与活性,进而作用于根系凋落物分解^[17,34]。有研究指出,生长季降雨可加快干旱半干旱草地植物根系凋落物的碎裂及水溶性物质的淋溶,加速根系凋落物的质量损失^[17,37]。在湿润草地,土壤的透气性降低,供氧量减少,削弱了好氧型微生物的活性,从而可能导致根系分解速率下降^[38]。研究发现,土壤水分是影响荒漠草原根系凋落物分解速率的最主要因素;分解630 d后,减雨30%处理的凋落物质量残留率显著高于自然降雨和增雨30%处理;此外,与对照(自然降雨)相比,增雨加氮处理下根系凋落物的分解速率最高,凋落物质量残留率最低^[37]。上述研究结果表明,根系凋落物分解可能受到多因子互作的影响。未来预测降雨对根系凋落物分解的作用过程,更应关注降雨与其他非生物(N、P、土壤温度等)与生物因子(土壤微生物、土壤动物、植物种类等)的交互作用^[33,39]。

2.3 土壤养分富集 工业革命以来,土壤养分富集已成为全球变化研究领域重要的科学问题^[40-42]。土壤养分对凋落物分解的作用过程多集中于模拟施N对凋落物分解动态的影响^[3,41-42]。前期的研究多集中于施N对凋落物分解动态一级动力学的影响^[42-43],或者仅关注分解后期凋落物剩余量变化^[42],缺乏对凋落物分解过程的动态描述^[44]。Dong等^[16]通过比较添加N肥时羊草(*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)和细叶韭(*Allium tenuissimum*)的根系凋落物动态变化,发现添加N能够显著促进所有物种根系凋落物的分解速率;此外,相比于无机N添加,有机N与无机N组合添加更能促进根系凋落物的分解速率。其潜在机制是N肥补充低N土壤中分解者的N需求,提升分解者的活性,进而可能促进根系凋落物分解^[16]。此外,有研究也发现,高N添加能够抑制典型草原^[3]、荒漠草原^[37]根系凋落物分解速率,其机制包括过量的N输入与木质素分解的中间产物结合,形成难分解的化合物;过量N输入能够改变土壤微生物群落组成,造成分解木质素的白腐菌(*Phanerochaete chrysosporium*)相对多度下降^[37,45]。

3 生物因子

3.1 土壤动物 土壤动物是构成土壤生物的重要部分,如螨类、跳虫、蚯蚓和线虫等,在草原生态系统凋落物的分解过程中也发挥着重要作用^[46-47]。土壤动物的作用主要表现在两个方面:一方面,直接通过对新鲜根系凋落物进行混合、湿润、破碎、咀嚼和取食,剩余凋落物进而被细菌、真菌侵入,进而加速土壤微生物对根系凋落物的分解^[38];另一方面,土壤动物通过穿梭、掘穴,间接改变土壤的物理特征,调控土壤微生物群落组成和凋落物分解相关微生物的多度,间接作用根系凋落物的分解过程^[48]。Xin等^[49]也发现,根系凋落物残留率、根系凋落物分解速率与土壤动物种群密度呈负相关和正相关关系。根系凋落物分解过程是由多种土壤动物共同作用的结果,土壤动物种类(螨类、跳虫、蚯蚓)对根系凋落物分解的交互作用还需要进一步深入研究。

3.2 土壤微生物 土壤微生物包括放线菌、细菌、真菌等是植物根系凋落物的主要分解者^[50]。植物凋落物分解的主要过程是土壤微生物介导的生物化学过程^[17]。真菌和细菌分泌各种分解酶,进而驱动根系凋落物中大分子物质的分解过程^[17]。在陆地生态系统中,执行凋落物分解功能的土壤微生物存在明显的不同,森林生态系统多以担子菌门(Basidiomycota)占优势,而草原生态系统以子囊菌门(Ascomycota)和球囊霉门(Glomeromycota)占优势^[51]。以往研究多关注土壤微生物对植物凋落物分解的直接作用,最近的研究发现丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)也能够间接参与植物凋落物的分解过程。其潜在机理包括:①AMF通过改变土壤微生物群落组成,进而对凋落物分解产生影响^[52-53]。②AMF通过吸收土壤中铵态($\text{NH}_4^+ - \text{N}$),进而改变土壤中有效N水平,间接影响分解者在凋落物分解过程中的N需求^[54]。AMF作为一种与植物形成“共生关系”的微生物,对植物养分吸收及凋落物质量存在重要影响,然而,AMF是否能参与叶片和根系凋落物分解,其具体过程和机制仍存在较大争议,亟待更多试验证据。

3.3 土壤酶活性 草地生态系统中,土壤酶多来自土壤微生物的分泌,土壤酶活性能直接影响植物凋落物分解速率的快慢^[55]。参与植物根系凋落物分解过程的酶类,主要包含纤维素分解酶类、木质素分解酶类、磷酸酶类和蛋白水解酶类,且以木质素分解酶类和纤维素分解酶类为主^[56]。研究发现,根系凋落物分解后期因剩余凋落物木质素含量较高,过氧化物酶和多酚氧化酶含量迅速上升,驱动根系凋落物的分解过程^[57]。此外,土壤酶活性还会受到土壤pH、温度及养分有效性等非生物因子的调节^[57]。因此,在深入理解根系凋落物分解动态过程时,需要综合考虑各种生物、非生物因子的影响。

4 展望

根系凋落物分解过程受物理、化学、生物等多方面过程的影响,是一个十分复杂的生态过程。虽然对根系凋落物分解的影响因素开展了大量细致、深入的研究,但仍存在一些科学问题需要关注和解答。

4.1 生物因子与非生物因子对根系凋落物分解的交互效应 以往根系凋落物分解过程的研究报道多集中于植物多样性、全球变化因子(降水、温度和大气N沉降)、土壤动物和土壤微生物等单因子对植物根系凋落物分解的影响。由于植物根系凋落物分解过程是多因子共同作用的结果,未来关于多因子互作效应(加和效应与非加和效应)在根系凋落物分解过程中的作用研究有待加强。开展土壤动物与土壤微生物互作、土壤微生物与环境因子互作对根系凋落物进行解的影响,有助于进一步量化生物因子与非生物因子对根系凋落物分解的相对作用^[17]。

4.2 土壤生物因子作用于根系凋落物分解的具体过程 土壤动物和土壤微生物作为植物根系凋落物分解的主要土壤生物因子,在植物凋落物分解过程中作用的具体过程尚不明确。由于自然系统具有高度的变异性和复杂性,为具体量化

土壤动物与微生物参与植物凋落物降解的作用过程带来一定困难。稳定同位素技术作为一种研究物质循环的方法,逐渐受到生态学家的关注。开展¹³C、¹⁵N等稳定同位素标记的根系凋落物分解试验,有助于进一步解析土壤动物与土壤微生物在凋落物分解中的具体过程。

4.3 非生长季中根系凋落物的分解过程 天然草原季节动态过程中,非生长季占据全年较大比例。多数研究集中于草原生长季根系凋落物的分解过程,对非生长季根系分解动态仍关注较少。非生长季低温、少雨的特性可能会影响分解者的组成和活性^[58]。对非生长季根系凋落物分解进行研究,有助于全面理解自然生态系统地下凋落物的分解过程,量化根系凋落物分解在参与生态系统C、N及中、微量元素循环中的作用。

参考文献

- [1] SWIFT M J, HEAL O W, ANDERSON J M. Decomposition in terrestrial ecosystems. *Studies in ecology*: Vol 5 [M]. Berkeley: University of California Press, 1979.
- [2] 杨轩, 李娅芸, 安韶山, 等. 宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2741-2751.
- [3] 魏琳, 程积民, 井光花, 等. 黄土高原天然草地 3 种优势物种细根分解及养分释放对模拟氮沉降的响应 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 252-258.
- [4] 杨轩. 宁南山区典型植物根系生产力及根系分解对土壤有机碳和养分的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [5] 魏琳. 氮添加和刈割对黄土高原天然草地生态系统地下碳循环关键过程的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2017.
- [6] MAN J, TANG B, XING W, et al. Root litter diversity and functional identity regulate soil carbon and nitrogen cycling in a typical steppe [J/OL]. *Soil biology and biochemistry*, 2020, 141 [2021-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107688>.
- [7] SUN T, DONG L, WANG Z, et al. Effects of long-term nitrogen deposition on fine root decomposition and its extracellular enzyme activities in temperate forests [J]. *Soil biology and biochemistry*, 2016, 93: 50-59.
- [8] 韩兴国, 李凌浩. 内蒙古草地生态系统维持机理 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
- [9] FRESCHET G T, CORNWELL W K, WARDLE D A, et al. Linking litter decomposition of above- and below-ground organs to plant-soil feedbacks worldwide [J]. *Journal of ecology*, 2013, 101(4): 943-952.
- [10] SOKOL N W, BRADFORD M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input [J]. *Nature geoscience*, 2019, 12(1): 46-53.
- [11] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力 [J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1719-1730.
- [12] BRADFORD M A, BERG B, MAYNARD D S, et al. Understanding the dominant controls on litter decomposition [J]. *Journal of ecology*, 2016, 104(1): 229-238.
- [13] FRESCHET G T, VALVERDE-BARRANTES O J, TUCKER C M, et al. Climate, soil and plant functional types as drivers of global fine-root trait variation [J]. *Journal of ecology*, 2017, 105(5): 1182-1196.
- [14] LIN D M, DOU P P, YANG G R, et al. Home-field advantage of litter decomposition differs between leaves and fine roots [J]. *New phytologist*, 2020, 227(4): 995-1000.
- [15] JIANG L, KOU L, LI S G. Decomposition of leaf mixtures and absorptive-root mixtures synchronously changes with deposition of nitrogen and phosphorus [J/OL]. *Soil biology and biochemistry*, 2019, 138 [2021-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107602>.
- [16] DONG L, BERG B, SUN T, et al. Response of fine root decomposition to different forms of N deposition in a temperate grassland [J/OL]. *Soil biology and biochemistry*, 2020, 147 [2021-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107845>.
- [17] 杨丽丽, 龚吉蕊, 刘敏, 等. 氮沉降对草地凋落物分解的影响研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2017, 41(8): 894-913.
- [18] 肖玖金, 赵波, 周开伦, 等. 野青茅根系和叶分解过程中土壤动物群落特征 [J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(5): 1179-1184.
- [19] JACKSON R B, CANADELL J, EHLERINGER J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [20] 吴伊波, 车荣晓, 马双, 等. 高寒草甸植被细根生产和周转的比较研究 [J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3529-3537.
- [21] 胡琪娟, 王霖娇, 盛茂银. 植物细根生产和周转研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2019, 32(2): 29-34.
- [22] VOGT K A, GRIER C C, VOGT D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests [J]. *Advances in ecological research*, 1986, 15: 303-377.
- [23] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展 [J]. *草业科学*, 2010, 27(8): 44-51.
- [24] 王雅婷, 卢剑波. 陆地生态系统凋落物分解及影响因子的研究进展 [J]. *科技通报*, 2017, 33(10): 1-10.
- [25] SEE C R, MCCORMACK M L, HOBBI E S, et al. Global patterns in fine root decomposition: Climate, chemistry, mycorrhizal association and woodiness [J]. *Ecology letters*, 2019, 22(6): 946-953.
- [26] MORETTO A S, DISTEL R A, DIDONÉ N G. Decomposition and nutrient dynamic of leaf litter and roots from palatable and unpalatable grasses in a semi-arid grassland [J]. *Applied soil ecology*, 2001, 18(1): 31-37.
- [27] HANSSON K, KLEJA D B, KALBITZ K, et al. Amounts of carbon mineralised and leached as DOC during decomposition of Norway spruce needles and fine roots [J]. *Soil biology and biochemistry*, 2010, 42(2): 178-185.
- [28] 张彩虹. 呼伦贝尔草甸草原主要优势植物地上部凋落物和根系组织分解过程及其控制机制 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [29] HOBBI E S, OLEKSYN J, EISENSTAT D M, et al. Fine root decomposition rates do not mirror those of leaf litter among temperate tree species [J]. *Oecologia*, 2010, 162(2): 505-513.
- [30] 赵红梅, 黄刚, 马健, 等. 典型荒漠植物凋落物分解及养分动态研究 [J]. *干旱区研究*, 2012, 29(4): 628-634.
- [31] 李娅芸. 宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分和微生物多样性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [32] PORRE R J, VAN DER WERF W, DE DEYN G B, et al. Is litter decomposition enhanced in species mixtures? A meta-analysis [J/OL]. *Soil biology & biochemistry*, 2020, 145 [2021-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107791>.
- [33] XIAO W Y, CHEN C, CHEN X L, et al. Functional and phylogenetic diversity promote litter decomposition across terrestrial ecosystems [J]. *Global ecology and biogeography*, 2020, 29(12): 2261-2272.
- [34] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3300-3310.
- [35] WU Q Q, YUE K, WANG X C, et al. Differential responses of litter decomposition to warming, elevated CO₂, and changed precipitation regime [J]. *Plant and soil*, 2020, 455(1/2): 155-169.
- [36] 徐振锋, 尹华军, 赵春章, 等. 陆地生态系统凋落物分解对全球气候变暖的响应 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1208-1219.
- [37] 叶贺, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 水氮控制对短花针茅荒漠草原根系分解的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(5): 1169-1175.
- [38] CAI A D, LIANG G P, YANG W, et al. Patterns and driving factors of litter decomposition across Chinese terrestrial ecosystems [J/OL]. *Journal of cleaner production*, 2021, 278 [2021-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123964>.
- [39] GARCÍA-PALACIOS P, MAESTRE F T, KATTGE J, et al. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes [J]. *Ecology letters*, 2013, 16(8): 1045-1053.
- [40] KNORR M, FREY S D, CURTIS P S. Nitrogen additions and litter decomposition: A meta-analysis [J]. *Ecology*, 2005, 86(12): 3252-3257.
- [41] LIU J, WU N N, WANG H, et al. Nitrogen addition affects chemical compositions of plant tissues, litter and soil organic matter [J]. *Ecology*, 2016, 97(7): 1796-1806.
- [42] ZHANG T A, LUO Y Q, CHEN H Y H, et al. Responses of litter decomposition and nutrient release to N addition: A meta-analysis of terrestrial ecosystems [J]. *Applied soil ecology*, 2018, 128(4): 35-42.
- [43] JANSSENS I A, DIELEMAN W, LUYSSAERT S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition [J]. *Nature geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.

- [25] 杨家宝.激光诱导击穿光谱在土壤重金属检测上的应用[J].环境与发
展,2020,32(6):79-80.
- [26] 张琨,徐宗伟,陈传松,等.激光诱导击穿光谱在疾病诊断中的应用前
景[J].光谱学与光谱分析,2021,41(6):1961-1965.
- [27] 林晓梅,曹玉莹,赵上勇,等.激光诱导击穿光谱技术对土壤中重金属
元素 Cr 的定量分析[J].光谱学与光谱分析,2021,41(3):875-879.
- [28] 李红莲,康沙沙,谢红杰,等.土壤中 Pb、Cr 元素激光诱导击穿光谱技
术定量分析[J].光电子·激光,2020,31(10):1036-1043.
- [29] 张子仪,冯建远,郭旋,等.电化学分析电极的应用研究进展[J].化工
设计通讯,2020,46(8):186-187.
- [30] CUI L, WU J, JU H X. Electrochemical sensing of heavy metal ions with
inorganic, organic and bio-materials[J]. Biosensors and bioelectronics,
2015,63:276-286.
- [31] BANSOD B, KUMAR T, THAKUR R, et al. A review on various electro-
chemical techniques for heavy metal ions detection with different sensing
platforms[J]. Biosensors and bioelectronics, 2017,94:443-455.
- [32] 利健文,黄象金,韦寿莲,壳聚糖-超高纯单壁碳纳米管修饰电极检测
Pb²⁺[J].化学研究与应用,2020,32(5):813-818.
- [33] 陈瑶,文丹.新型气凝胶在电分析传感领域的应用研究进展[J].分析
化学,2021,49(6):922-930.
- [34] 陈秀梅,黄俐,王敏敏.碱性消解-伏安极谱法测定土壤中六价铬[J].
环境监控与预警,2015,7(4):34-36.
- [35] HYNINEN A, VIRTA M. Whole-cell bioreporters for the detection of
bioavailable metals[J]. Advances in biochemical engineering/ biotech-
nology, 2010,118:31-63.
- [36] 高一娜,陈福海,栾慧,等.农业土壤重金属含量检测方法研究进展
[J].黑龙江农业科学,2018(1):102-105,109.
- [37] 王明华,赵二芳,李杜娟.检测重金属离子生物传感器的研究进展[J].
生物技术通报,2013(10):46-51.
- [38] NAIK S, JUJJAVARAPU S E. Self-powered and reusable microbial fuel
cell biosensor for toxicity detection in heavy metal polluted water[J/OL].
Journal of environmental chemical engineering,2021,9(7/8)[2021-03-
17].https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105318.
- [39] SCIUTO E L, PETRALIA S, VAN DER MEER J R, et al. Miniaturized
electrochemical biosensor based on whole-cell for heavy metal ions detec-
tion in water[J]. Biotechnology and bioengineering,2021,118(4):1456-
- 1465.
- [40] JI Y Y, GUAN F F, ZHOU X, et al. Construction of a mApple-D6A3-
mediated biosensor for detection of heavy metal ions[J]. AMB express,
2020,10(1):213-221.
- [41] HAO S B, HUANG H C, MA Y Y, et al. Sensitive characterizations of
natural dolomite by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Optics com-
munications, 2020,456:524-529.
- [42] 武帅,屈浩,徐昊,等.太赫兹技术应用进展[J].电子技术应用,2019,45
(7):3-7,18.
- [43] 周宝宣,袁琦.土壤重金属检测技术研究现状及发展趋势[J].应用化
工,2015,44(1):131-138,145.
- [44] 李帅帅,罗慧,卢伟.基于太赫兹光谱的水体重金属检测[J].南京农业
大学学报,2021,44(5):895-902.
- [45] 燕芳,邹粮徽,王志春.太赫兹时域光谱技术的重金属离子吸附检测方
法研究[J].光谱学与光谱分析,2018,38(4):1044-1048.
- [46] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental magnetism[M].London:
Allen & Unwin, 1986.
- [47] 周洪英.徐州城市表层土壤重金属污染特征与环境磁学响应[D].徐
州:中国矿业大学,2016.
- [48] NGUYEN THI THU HIEN.基于地球化学和环境磁学特征的越南红河
沉积物重金属污染研究[D].上海:华东师范大学,2016.
- [49] LI X L, YANG Y, YANG J X, et al. Rapid diagnosis of heavy metal pol-
lution in lake sediments based on environmental magnetism and machine
learning[J/OL]. Journal of hazardous materials,2021,416[2021-03-17].
https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126163.
- [50] 刘彦平,罗晴,程和发.高光谱遥感技术在土壤重金属含量测定领域的
应用与发展[J].农业环境科学学报,2020,39(12):2699-2709.
- [51] 郭学飞,曹颖,焦润成,等.土壤重金属污染高光谱遥感监测方法综述
[J].城市地质,2020,15(3):320-326.
- [52] 钱家伟,刘晓青,张静静,等.张家港市农田土壤重金属含量高光谱遥
感监测模型构建[J].浙江农业学报,2020,32(8):1437-1445.
- [53] 阿依努尔·麦提努日,麦提吐尔逊·艾则孜,麦尔哈巴·图尔贡,
等.吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属铅含量高光谱估算[J].遥感技术与
应用,2021,36(2):362-371.
- [54] 陈红艳.土壤主要养分含量的高光谱估测研究[D].泰安:山东农业大
学,2012.

(上接第 21 页)

- [44] GILL A L, SCHILLING J, HOBBI S E. Experimental nitrogen fertilisation
globally accelerates, then slows decomposition of leaf litter[J]. Ecology
letters, 2021,24(4):802-811.
- [45] ALLISON S D, HANSON C A, TRESEDER K K. Nitrogen fertilization
reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal e-
cosystems[J]. Soil biology and biochemistry, 2007,39(8):1878-1887.
- [46] HANDA I T, AERTS R, BERENDSE F, et al. Consequences of biodiversity
loss for litter decomposition across biomes[J]. Nature, 2014,509(7499):
218-221.
- [47] BARDGETT R D, VAN DER PUTTEN W H. Belowground biodiversity and
ecosystem functioning[J]. Nature, 2014,515(7528):505-511.
- [48] HUANG W, GONZÁLEZ G, ZOU X M. Earthworm abundance and func-
tional group diversity regulate plant litter decay and soil organic carbon
level: A global meta-analysis[J]. Applied soil ecology, 2020,150:1-8.
- [49] XIN W D, YIN X Q, SONG B. Contribution of soil fauna to litter decom-
position in songnen sandy lands in northeastern China[J]. Journal of arid
environments, 2012,77:90-95.
- [50] BAHRAM M, HILDEBRAND F, FORSLUND S K, et al. Structure and
function of the global topsoil microbiome[J]. Nature, 2018,560(7717):
233-237.
- [51] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynam-
ics of soil[J]. Soil biology and biochemistry, 2010,42(3):391-404.
- [52] ZHANG L, XU M G, LIU Y, et al. Carbon and phosphorus exchange may
enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phos-
phate-solubilizing bacterium[J]. New phytologist, 2016,210(3):1022-
1032.
- [53] XU J, LIU S J, SONG S R, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi influence
decomposition and the associated soil microbial community under different
soil phosphorus availability[J]. Soil biology and biochemistry, 2018,120:
181-190.
- [54] VERESOGLOU S D, SEN R, MAMOLOU A P, et al. Plant species identity
and arbuscular mycorrhizal status modulate potential nitrification rates in
nitrogen-limited grassland soils[J]. Journal of ecology 2011,99(6):1339-
1349.
- [55] 杨林.凋落物分解中酶活性影响因素研究[J].生物化工,2020,6(5):
151-153.
- [56] 路锦,张筱,黄樱,等.氮沉降对森林凋落物分解过程中土壤酶和微生
物影响的研究进展[J].湖南生态科学学报,2020,7(4):54-61.
- [57] 许子君,万晓华,梁艺凡,等.根系在凋落物层生长对凋落叶分解及酶
活性的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):31-38.
- [58] 夏磊,吴福忠,杨万勤,等.川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物
对红桦凋落物质量损失的贡献[J].应用生态学报,2012,23(2):301-
306.