



DOI: 10.20103/j.stxb.202211283434

何敬慧, 吴福忠, 袁吉, 袁朝祥, 彭艳, 倪祥银, 岳楷. 凋落物硫初始含量特征及其影响因素整合分析. 生态学报, 2023, 43(23): 10006-10012.

## 凋落物硫初始含量特征及其影响因素整合分析

何敬慧<sup>1</sup>, 吴福忠<sup>1,2</sup>, 袁吉<sup>1</sup>, 袁朝祥<sup>1</sup>, 彭艳<sup>1,2</sup>, 倪祥银<sup>1,2</sup>, 岳楷<sup>1,2,\*</sup>

1 福建师范大学地理科学学院、碳中和未来技术学院, 福州 350007

2 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 三明 365002

**摘要:** 硫(S)是植物生长发育不可或缺的营养元素之一,且在凋落物分解过程中起着重要作用,但凋落物硫的初始含量(新鲜凋落物S含量)特征仍不清楚。基于收集自83篇公开发表文献的310个观测值,整合分析了凋落物硫的初始含量特征,同时评估了菌根类型(丛枝菌根、外生菌根与两者都有,即同时含有丛枝菌根和外生菌根)、系统分类(裸子植物与被子植物)、生活型(乔木、灌木与草本植物)、叶型(阔叶与针叶)、土壤性质及气候等因子对其的影响。结果表明:(1)不同类型凋落物初始硫含量差异显著,叶、枝、根、茎、果、树皮和倒木硫含量分别为:2.22 g/kg、0.801 g/kg、0.691 g/kg、1.57 g/kg、1.31 g/kg、0.468 g/kg和0.110 g/kg;(2)灌木植物叶凋落物初始硫含量低于草本植物和禾本植物,而外生菌根植物根凋落物的初始硫含量低于丛枝菌根和同时具有两种菌根的植物;(3)被子植物的叶、枝、根凋落物硫初始含量均高于裸子植物,阔叶树种的叶、枝、根凋落物初始硫含量显著高于针叶树种;(4)最湿月降水量、最暖月最高温以及年均温是枝凋落物初始硫含量的主要调控因子,而最冷月最低温、年均温、土壤总氮是根凋落物的主要驱动因子。研究结果为深入认识硫在凋落物分解及其伴随的物质循环过程中的作用提供了基础数据。

**关键词:** 基质质量;菌根类型;生活型;气候;土壤性质;整合分析

植物凋落物是土壤中碳(C)和养分输入的主要来源,凋落物分解过程促进营养元素的释放和土壤有机质(SOM)的形成,以促进生态系统中陆生植物的生长<sup>[1]</sup>,同时在维持陆地生态系统结构和功能起着重要作用<sup>[2]</sup>。硫作为氮(N)、磷(P)、钾(K)之后的第四大化学营养元素,参与其生物的生长发育和代谢过程,如参与蛋白质、氨基酸和叶绿素形成,控制光合作用中碳水化合物代谢<sup>[3]</sup>,影响植物呼吸作用、酶和脂类的形成和非生物胁迫抗性<sup>[4]</sup>。土壤母质、大气沉降、农业灌溉、施肥、火山活动和微生物分解是硫的重要来源<sup>[5]</sup>。植物体内的硫可分为有机硫和无机硫,有机硫大多以蛋白质和氨基酸的形式存在,无机硫则以硫酸根离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)的形式在细胞中积累,除少部分通过叶片从大气中直接吸收外,主要由根系从土壤中吸收硫酸盐,通过质流、扩散,再通过酸沉降、地表径流和植物吸收等途径参与硫的生物地球化学循环,在植物-土壤系统中,约有95%—98%的硫储存于土壤系统中<sup>[6]</sup>。目前,有关营养元素的研究主要集中在碳、氮、磷的动态变化特征,而陆地生态系统中,凋落物初始硫的含量特征及影响因素尚不清楚。

凋落物初始硫是指新鲜凋落物硫的含量,且凋落物初始硫含量受多种因素控制,如植物性状、菌根组合、气候和土壤性质等。不同的植被类型和植物不同的器官对硫的吸收和利用程度不一样,因而不同性状下凋落物初始硫含量存在较大的异质性<sup>[7]</sup>,植物性状,会因资源条件的差异形成不同的生态对策来获取养分<sup>[8]</sup>,硫在植物中通过根系吸收、凋落物分解进行内部循环,植物根系主要通过吸收植物-土壤间释放的营养离子来

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32271633,32201342,32171641);福建省自然科学基金项目(2022J01642)

**收稿日期:** 2022-11-28; **网络出版日期:** 2023-08-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kyleyuechina@163.com

积累植物生长发育所必须的硫元素,而营养离子间的拮抗或促进作用<sup>[9]</sup>,影响植物对硫的吸收,因此,植物特性是影响凋落物初始硫的含量的重要因素。菌根组合可能是影响凋落物初始硫含量的重要因素,菌根真菌主要分为丛枝菌根和外生菌根,丛枝菌根真菌通常清除无机养分,分泌菌根外丝作用于植物膜上附着酶活性来调节寄主植物对凋落物初始硫含量的吸收<sup>[10]</sup>,外生菌根真菌可以分泌大量的氧化酶来降解有机物,使得与外生真菌有关的凋落物养分含量较低<sup>[11]</sup>,此外,菌根组合通过调节土壤特性,影响土壤微生物群落间接影响凋落物初始硫的含量<sup>[12]</sup>。植物各器官凋落物间的分解具有一致性,不同生活型植物的各器官的分解速率存在差异<sup>[13]</sup>,导致凋落物不同器官中硫含量差异较大。此外,气候会直接或间接影响凋落物硫初始含量。气候一方面通过调节植物养分吸收的过程来直接影响凋落物初始硫含量,另一方面,气候通过淋溶和风化过程来决定土壤的发育,进一步间接影响全球范围内不同气候区凋落物初始硫含量。例如,温度会影响土壤内部环境变化,进而影响植物养分吸收过程,改变土壤基质质量<sup>[14]</sup>,降水通过淋溶作用和风化作用加速凋落物中可溶性养分溶解,来调节土壤的化学环境,影响凋落物中养分的含量<sup>[15]</sup>。土壤性质也是驱动凋落物初始硫的重要因素,土壤是植物获取养分的贮存库,是植物生长发育不可或缺的催化剂<sup>[16]</sup>,然而,对于不同的变量是如何影响全球范围内凋落物初始硫的含量,目前仍缺乏足够的研究与认识。

基于此,本研究整合了 83 篇公开发表文献的 310 个观测值,构建数据库,评估凋落物硫初始含量特征。研究目标是:(1)量化全球范围内不同物种和凋落物类型中凋落物初始硫的初始含量;(2)评估植物性状、菌根组合和气候对凋落物硫初始含量的影响,以及探讨潜在的因素。研究假设:(1)不同物种和凋落物类型中凋落物初始硫含量差异显著;(2)凋落物初始硫含量受植物性状、菌根组合和气候的调控。

## 1 研究方法

### 1.1 数据提取与整理

本研究搜索了 2021 年 10 月 20 日之前发表在中国知网、谷歌学术中有关凋落物硫含量的文献,使用的中文的关键词有(“硫”)和(“凋落物”或“植物碎屑”);同时通过 Web of Science,谷歌学术搜索英文关键词为(sulfur OR S) AND (“plant litter” OR “plant detritus”)。纳入本研究分析必须满足以下条件:(1)文章中必须有记录新鲜凋落物硫初始含量特征的图表或文字信息,且必须含有采样地的经纬度等位置信息;(2)文章中必须明确表明凋落物的植物种类和器官类型,同时凋落物有拉丁名且可以在相关数据库中搜索并确定其功能性状;(3)凋落物硫的实验数据必须在自然条件下获取,且排除人为因素的干扰;(4)如果数据来自同一研究地点和同一采样年份且在不同的文章中报道,则数据库只纳入一篇文章。

通过检索,本研究的数据库中包含了 83 篇文献报道的 310 个观测值,包括 256 条叶凋落物、19 条树枝凋落物、14 条根凋落物、10 条倒木凋落物、4 条树皮凋落物、4 条花凋落物和 3 条茎凋落物。根据世界植物在线数据库(<https://wfoflantlist.org/plant-list>)将植物分为裸子植物和被子植物;根据(<https://www.gbif.org/occurrence/search>)将植物菌根分为丛枝菌根真菌、外生菌根真菌和内外生菌根真菌;利用(<http://www.iplant.cn/>)和(<https://www.inaturalist.org/>)来辨别植物生活型及叶形。研究所用的数据直接从选定研究的主要文本、表格、图表和附录中提取。当数据以图形形式报告时,本文使用 Get Data(软版本 2.25;<http://www.getdata-graph-digitizer.com>)提取。

### 1.2 统计分析

由于茎、树皮、倒木凋落物的样本量太小,因此仅将叶、枝、根凋落物纳入本次分析。本研究中数据的分析在 R 软件(v4.1.2)和 SIMCA 软件(v14.1)中进行。在进行统计分析之前,检查数据方差的正态性,必要时在统计分析之前进行对数转换。运用线性混合模型中的 lmer 函数来评估植物性状、气候、土壤性质对凋落物硫初始含量的影响,同时使用 Tukey 事后检验来比较组织和凋落物性状之间的差异<sup>[17]</sup>。为了进一步评估各因子对凋落物硫初始含量的相对重要性,本研究将数据进行归一化处理,使用 SIMCA 软件进行了基于偏最小二乘法的重要因子模型选择,其中每个预测因子重要性计算为包含它的所有模型的 Akaike 权重之和, Akaike 权

重的截止值设置为 1.0,以区分重要和非重要预测因子<sup>[18]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 凋落物硫初始含量特征

研究结果的分布和样本量大小如图 1 所示。凋落物硫初始含量总体呈现略微偏斜的正态分布,作为植物生长发育必需的营养元素,凋落物硫初始含量极低(图 2)。凋落物硫初始含量会随着植物器官的变化而发生很大的变化,不同器官之间凋落物硫初始含量差异显著,总的来说,凋落物的平均初始硫含量为 1.39 g/kg,所有器官的平均初始硫含量排序依次为叶(2.22g/kg)>茎(1.57g/kg)>果(1.31 g/kg)>枝(0.801 g/kg)>根(0.691 g/kg)>树皮(0.468 g/kg)>倒木(0.110 g/kg)(图 3)。

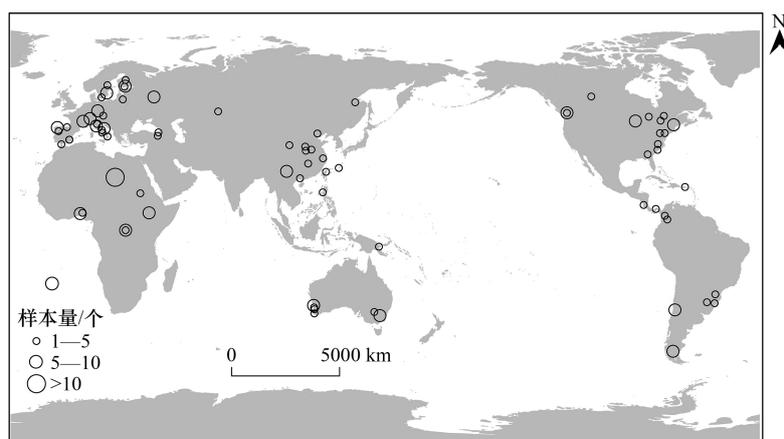


图 1 研究样点在全球的分布图

Fig.1 Global map showing the distribution of observations

在系统分类中,被子植物凋落物硫初始含量要高于裸子植物,对于不同的叶型而言,阔叶树种的初始硫含量显著高于针叶树种。在叶凋落物中,灌木植物的初始硫含量要低于草本植物和禾本植物。在根凋落物中,外生菌根植物的初始硫含量要高于丛枝菌根和内外生菌根的植物(图 4)。

### 2.2 凋落物硫初始含量影响因素

年均温、土壤总磷、最冷月最低温、pH、年降水量和最湿月降水量是叶凋落初始硫含量的主要驱动因子;最湿月降水量、最暖月最高温以及年均温则是枝凋落物初始硫含量的最主要影响因子;最冷月最低温、年均温和土壤总氮是根凋落物初始硫含量的主要驱动因子(图 5)。

## 3 讨论

硫作为植物生长必需的矿质营养元素,在植物的光合作用、酶活性、各种氨基酸、蛋白质的合成中发挥着重要的作用,缺硫会阻碍蛋白质的合成,限制植物的生长,还会使叶绿体发育不良,光合作用受到阻碍<sup>[19]</sup>。本文研究发现,凋落物初始硫含量远少于其他必需营养元素,吴宇等<sup>[20]</sup>研究得出硫是植物生长必需元素中含量最少的,约占植株干重的 0.1%,张苗云等<sup>[21]</sup>研究表明植物体内的硫约占 0.1%—1.5%,这是因为硫在凋落物

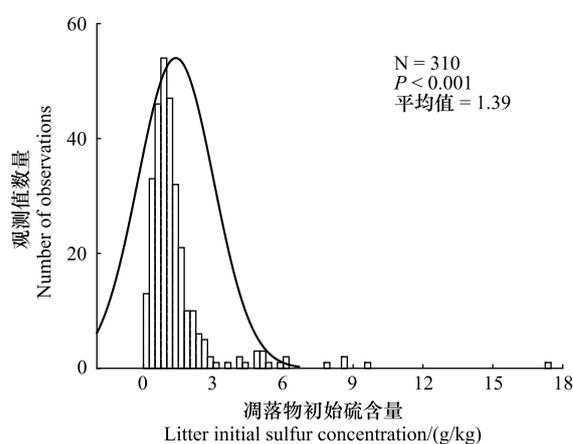


图 2 凋落物初始硫含量观测值数量分布图

Fig.2 Distribution of number of observations for litter initial sulfur concentration

N 表示凋落物的数量

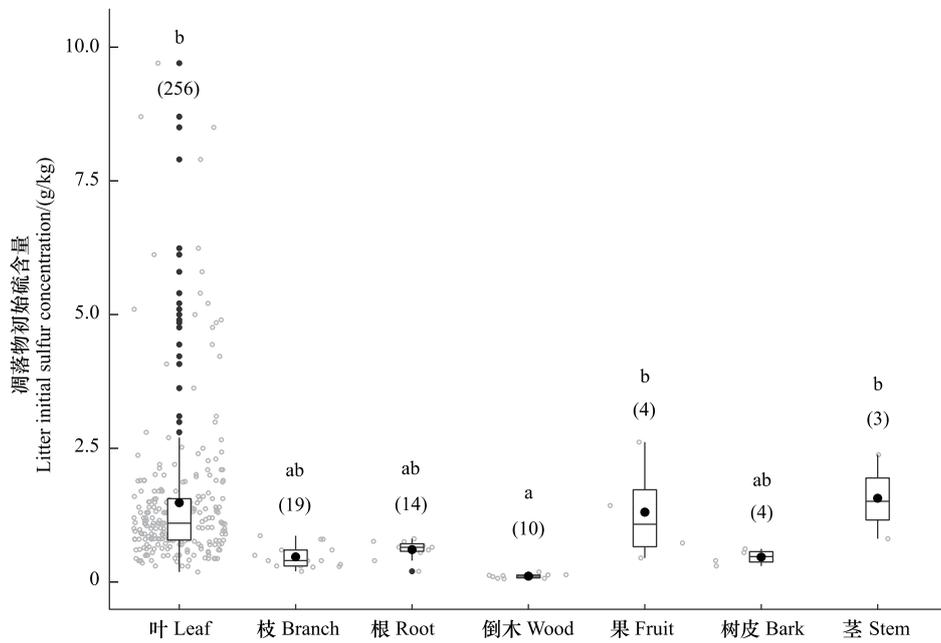


图 3 不同类型凋落物初始硫含量特征

Fig.3 Characteristics of sulfur concentration in different types of plant litter

括号数字表示观测值个数,实心圆点表示平均值,字母表示不同类型凋落物硫含量差异显著 ( $P < 0.05$ )

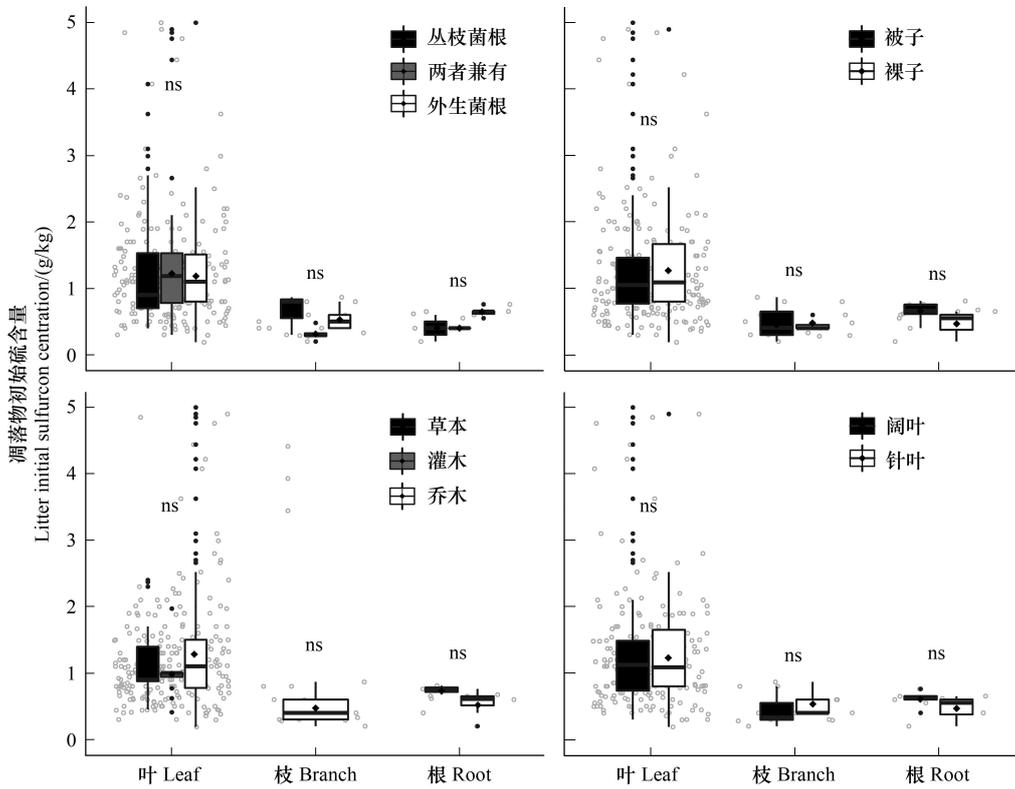


图 4 菌根类型、系统分类、生活型、叶型对不同类型凋落物硫含量的影响

Fig.4 Effects of mycorrhizal association, taxonomic division, life form, and leaf type on sulfur concentrations among different litter types

图中空心圆点表示观测值,菱形表示平均值,ns 表示不同类型凋落物硫含量差异不显著

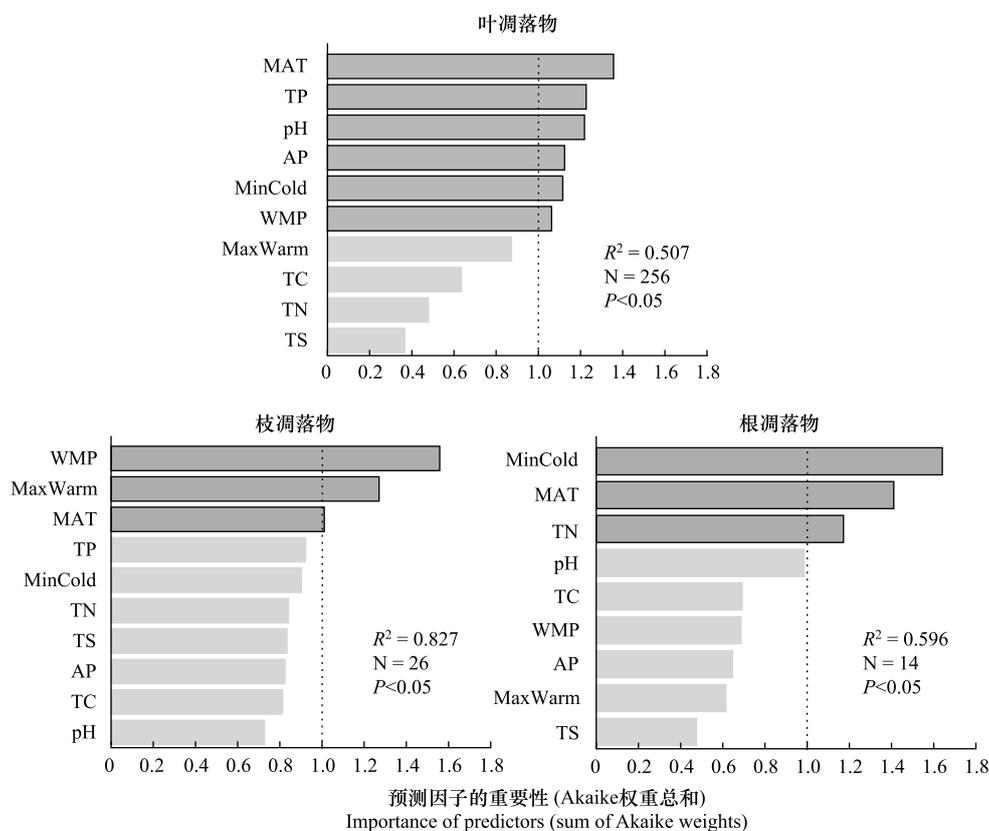


图5 不同影响因子对凋落物硫含量的相对重要性

Fig.5 Relative importance of different influencing factors for litter initial sulfur concentration

截止值设为 1.0, 来探索最重要的预测因子, 虚线是截止线; MAT: 年均温; MaxWarm: 最热月最高温; MinCold: 最冷月最低温; AP: 年降雨量; WMP: 最湿月降雨量; pH: pH(H<sub>2</sub>O); TC: 土壤总碳; TN: 土壤总氮; TP: 土壤总磷; TS: 土壤总硫

体内是稳定的, 且在凋落物在凋落之前完成了养分的内转移和重吸收, 使得凋落物体内的一部分硫返还到植物体, 从而减少植物体内硫的损失。

不同植物组织的凋落物初始硫含量在全球范围内存在显著差异, 由图 1 可以看出, 凋落物初始硫含量集中分布在欧洲西部、亚洲东部以及北美洲东岸, 探究其原因可知, 自工业革命开始, 这些地区由于工业发达, 过量燃烧化石燃料, 金属冶炼以及土地利用变化等人类活动使得大气中 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 含量升高, 凋落叶作为植物敏感器官, 对外部环境变化尤为敏感, SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 通过叶片气孔进入植物体内, 硫在一定程度上破坏了天然硫的分布, 从而导致凋落物初始硫含量密集分布在这些地区, 不同地区分布情况还与植物组织不同的植物特性和营养获取策略相关<sup>[22]</sup>。

不同植物、植物不同的器官对于硫元素的吸收、积累和富集存在差异, 本文发现叶凋落物硫的初始含量显著高于根凋落物与枝凋落物, 黎磊等<sup>[23]</sup>提出, 根被称为植物营养元素的“集散库”, 是营养元素的供给器官, 根系主要从土壤中吸收硫酸盐来保证植物正常的发育, 随后将其吸收的硫元素通过茎转运给新陈代谢最为旺盛的叶片, 来用于促进叶绿素和蛋白质的合成, 随着植物的生长, 将营养元素转运到植物的地上部分<sup>[24]</sup>, 植物为了适应环境的胁迫性, 需要协同地上和地下的功能性状来更好的获取和分配有限资源, 其中叶的生长依赖于根系土壤资源的输送, 而根的生长又取决于叶片光合产物的分配<sup>[25]</sup>, 刘思等<sup>[26]</sup>的研究可证实, 叶片对硫的吸收与积累能力呈现出较高的相关性, 同时叶片要比其他器官更为敏感; 被子植物的初始硫含量高于裸子植物, 这可能是两个分类群之间不同的植物特性和矿物养分分配间的差异造成的<sup>[1]</sup>。阔叶树种初始硫含量要高于针叶树种, 因为针、阔叶都具有养分重吸收的特点, 而针叶树种的养分重吸收率大于阔叶树种<sup>[28]</sup>。在叶

凋落物和枝凋落物中,草本植物初始硫含量要高于灌木植物,因为快速生长的短寿命草本植物中的矿物养分含量高于长寿灌木植物。因此,不同生命形式和不同叶型凋落物初始硫含量的差异也反映了植物群之间营养生存策略的复杂性和差异性<sup>[29]</sup>,这也更好地解释了植物性状对凋落物初始硫含量的影响。

丛枝菌根真菌植物中叶和枝凋落物初始硫含量高于外生菌根植物中根凋落物初始硫含量,菌根通过与植物根系形成互惠共生体,使得植物能够最大程度的获取土壤硫素,但两者的作用方式和吸收矿质营养元素的能力有所差异<sup>[30]</sup>,丛枝菌根真菌水解和氧化能力有限,主要帮助植物从土壤中获得游离的氨基酸和无机养分,而外生菌根通过产生大量的胞外酶和水解酶来分解有机质并直接获取有机硫(如几丁质、蛋白质和氨基酸等)来供给植物<sup>[31]</sup>;不同菌根类型自身的功能性状也是影响凋落物初始硫含量的重要因素,外生菌根中凋落物中凋落物质量低,且丛枝菌根真菌中含有大量自由的腐生物,使得含有丛枝菌根凋落物的分解速率更快<sup>[32]</sup>;此外,菌根组合通过调节土壤特性间接影响凋落物初始硫含量,丛枝菌根真菌通过影响土壤团聚体之间的水分状况,导致不同微生物群落的数量和组成不同,从而影响凋落物的分解速率<sup>[12]</sup>。

气候等环境因素强烈相互作用,影响矿质营养元素的吸收和利用。温度变化会影响不同器官间矿质营养元素的分配,温度升高可以促进土壤养分的矿化过程,使得土壤中难溶的养分在微生物的作用下转化成植物可吸收利用的养分,提高养分的吸收和储存<sup>[33]</sup>;而低温影响水黏性和膜渗透性,抑制植物的代谢过程和光合作用,进而抑制了根系和土壤微生物的活性<sup>[34]</sup>,进而限制了植物对矿质营养元素的吸收;温度条件(最暖月最高温、最冷月最低温以及年均温)在本研究中影响积极。水分条件对植物的生长发育更为复杂,降水直接影响土壤的酸碱条件,进而影响微生物的活性和根系吸收矿质营养元素的效率和植物中矿质营养养分的运输和分布<sup>[35]</sup>,此外土壤中矿物元素的积累将随着降水量的增加而迅速减少,会导致植物的营养限制,在此次研究中降雨量是调控凋落物初始硫的重要因子。

尽管本研究清楚的揭示了凋落物初始硫含量及驱动因素,但仍有一些不确定的问题和知识亟待解决,尤其是不同凋落物类型之间的样本量差异很大,重点在于叶凋落物,这则限制了对其他凋落物类型对凋落物硫含量的可靠结果的影响。

#### 4 结论

综上所述,不同类型凋落物硫初始含量差异显著,叶、枝、根、茎、果、树皮和倒木硫含量分别为:2.22 g/kg、1.57 g/kg、1.39 g/kg、0.801 g/kg、0.691 g/kg、0.468 g/kg 和 0.110 g/kg;灌木植物叶凋落物初始硫含量要低于草本植物和禾本植物,而外生菌根植物根凋落物初始硫含量要低于丛枝菌根和两者兼有的植物;被子植物的叶、枝、根凋落物初始硫含量均高于裸子植物,阔叶树种的叶、枝、根凋落物硫初始含量显著高于针叶树种;年均温、土壤总磷、pH、年降雨量、最冷月最低温以及最湿月降雨量是叶凋落物初始硫含量的主要影响因子,最湿月降雨量、最暖月最高温以及年均温是根凋落物初始硫含量的主要调控因子,最冷月最低温、年均温、土壤总氮和 pH 是驱动枝凋落物的主要驱动因子。本研究旨在探索全球凋落物初始硫含量特征,评估影响凋落物初始硫含量的驱动因子,来更好地理解硫在植物养分循环过程中的作用提供一定的数据支持。

#### 参考文献(References):

- [1] Berg B, McClaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 4th. edition ed. Springer Nature, Cham, Switzerland, 2020.
- [2] 贾丙瑞. 凋落物分解及其影响机制. *植物生态学报*, 2019, 43(8): 648-657.
- [3] 何涛, 孙志高, 李家兵, 高会, 范爱连. 闽江河口芦苇与短叶茆空间扩展植物-土壤系统硫含量变化特征. *生态学报*, 2018, 38(5): 1607-1618.
- [4] Zhao W Z, Xiao C W, Li M X, Xu L, He N P. Variation and adaptation in leaf sulfur content across China. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15(4): 743-755.
- [5] 罗曼琳, 窦添元, 向秋洁, 胡翔宇, 木志坚. 重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 287-297.
- [6] 李新华, 刘景双, 孙志高. 三江平原小叶樟湿地植物-土壤系统中硫素分布及季节变化动态. *土壤通报*, 2007, 38(1): 85-88.

- [ 7 ] 孙万龙, 孙志高, 牟晓杰, 王玲玲. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤磷、硫的分布特征. 水土保持通报, 2010, 30(4): 104-109.
- [ 8 ] 向绣立, 韦秋莉. 全球变化背景下森林凋落物分解研究进展. 绿色科技, 2014(11): 24-26.
- [ 9 ] Zhao Y W, Xiao X, Bi D M, Hu F. Effects of sulfur fertilization on soybean root and leaf traits, and soil microbial activity. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(3): 473-483.
- [ 10 ] 孙子欣, 蔡柏岩. AMF 促进植物吸收矿质元素的生理机制及对土壤硫素的影响. 中国农学通报, 2020, 36(32): 49-54.
- [ 11 ] 段嘉靖, 张勇, 郝龙飞, 王庆成, 剡丽梅, 何瑞雪. 丛枝菌根真菌和外生菌根真菌对凋落物分解的影响机制. 世界林业研究, 2022, 35(2): 21-27.
- [ 12 ] 王茜, 王强, 王晓娟, 张亮, 金樑. 丛枝菌根网络的生态学功能研究进展. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2192-2202.
- [ 13 ] 刘森, 梁正伟. 草地生态系统硫循环研究进展. 华北农学报, 2009, 24(S2): 257-262.
- [ 14 ] 王进. 土壤基质与凋落物分解互作效应的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [ 15 ] 王凡, 朱云集, 路玲. 土壤中的硫素及其转化研究综述. 中国农学通报, 2007, 23(5): 249-253.
- [ 16 ] Ge X G, Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, Geng X S, Tan B W. Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 102-108.
- [ 17 ] Yang Q, Yue K, Wu F Z, Heděnc P, Ni X Y, Yuan J, Yu J M, Peng Y. Global patterns and drivers of initial plant litter ash concentration. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154702.
- [ 18 ] Yue K, De Frenne P, Fornara D A, Van Meerbeek K, Li W, Peng X, Ni X Y, Peng Y, Wu F Z, Yang Y S, Peñuelas J. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs. *Global Change Biology*, 2021, 27(14): 3350-3357.
- [ 19 ] 王庆仁, 林葆. 硫胁迫对油菜超微结构及超细胞水平硫分布的影响. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 47-50.
- [ 20 ] 吴宇, 高蕾, 曹民杰, 向成斌. 植物硫营养代谢、调控与生物学功能. 植物学通报, 2007, 42(6): 735-761.
- [ 21 ] 张苗云, 王世杰, 马国强. 植物硫同位素与大气环境变化. 同位素, 2010, 23(1): 59-63.
- [ 22 ] Pietsch K A, Ogle K, Cornelissen J H C, Cornwell W K, Bonisch G, Graine J M, Jackson B G, Kattge J, Peltzer D A, Penuelas J, Reich P B, Wardle D A, Weedon J T, Wright I J, Zanne A E, Wirth C. Global relationship of wood and leaf litter decomposability: the role of functional traits within and across plant organs. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(9): 1046-1057.
- [ 23 ] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 密度制约决定的植物生物量分配格局. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1579-1589.
- [ 24 ] 曾阿莹. 互花米草入侵对闽江河口湿地植物-土壤系统硫循环的影响研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [ 25 ] Baraloto C, Timothy Paine C E, Poorte L, Beauchene J, Bonal D, Domenach A M, Hérault B, Patiño S, Roggy J C Chave J, Decoupled leaf and stem economics in rain forest trees. *Ecology Letters*, 2010, 13(11): 1338-1357.
- [ 26 ] 刘思, 黎兆海, 陆先杰, 史艳财. 广西柳州市主城区主要绿化植物叶片的全硫氮含量特征. 广西科学院学报, 2021, 37(2): 144-151.
- [ 27 ] 郭鸿蓉, 吴福忠, 倪祥银, 熊德成, 魏文涛, 吴若冰, 朱玲, 胥超. 中亚热带次生林和人工林凋落枝水溶性碳氮磷动态特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5175-5183.
- [ 28 ] Mueller K E, Diefendorf A F, Freeman K H, Eissenstat D M. Appraising the roles of nutrient availability, global change, and functional traits during the angiosperm rise to dominance. *Ecology Letters*, 2010, 13(5): E1-E6.
- [ 29 ] 何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 徐丽, 于贵瑞. 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落. 生态学报, 2018, 38(19): 6787-6796.
- [ 30 ] 李新华, 刘景双, 杨继松. 三江平原小叶章湿地枯落物和根分解及其硫元素释放动态. 湿地科学, 2007, 5(1): 76-82.
- [ 31 ] van der Heijden M G A, Martin F M, Selosse M A, Sanders I R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *The New Phytologist*, 2015, 205(4): 1406-1423.
- [ 32 ] Read D J, Perez-Moreno J. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems—a journey towards relevance? *The New Phytologist*, 2003, 157(3): 475-492.
- [ 33 ] Phillips R P, Brzostek E, Midgley M G. The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests *The New Phytologist*, 2013, 199(1): 41-51.
- [ 34 ] 王越颀. 鄱阳湖湿地硫的分布特征及其影响因素研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [ 35 ] 余明, 刘效东, 薛立. 温度和降水对森林生物量分配的影响研究进展. 生态科学, 2021, 40(2): 204-209.
- [ 36 ] 何涛, 孙志高, 李家兵, 高会, 王华, 王杰, 陈冰冰. 闽江河口互花米草与短叶荳蔻湿地土壤无机硫形态分布特征及其影响因素. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4747-4756.