



DOI: 10.20103/j.stxb.202203220709

何文强, 陈林, 庞丹波, 曹萌豪, 张雅琪, 李学斌. 枯落物输入改变对森林生态系统土壤理化性质的影响. 生态学报, 2024, 44(4): 1755-1763.

枯落物输入改变对森林生态系统土壤理化性质的影响

何文强^{1,2,3}, 陈林^{1,2,3}, 庞丹波^{1,2,3}, 曹萌豪^{1,2,3}, 张雅琪^{1,2,3}, 李学斌^{1,2,3,*}

1 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

2 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

3 宁夏大学 生态环境学院, 银川 750021

摘要: 枯落物输入改变是影响森林生态系统土壤理化性质的一个重要因素, 探究其对土壤理化性质的影响对了解和保护森林生态系统的稳定性至关重要。为探究森林生态系统土壤理化性质对枯落物输入改变的响应, 对国内外已发表的研究论文中筛选出 712 组有效数据通过 Meta 分析, 从枯落物输入改变、气候、海拔、林分类型、处理年限等因素揭示枯落物输入对土壤理化性质的影响程度。研究结果表明: 枯落物添加使土壤 pH 降低 2.22%; 土壤含水量、有机碳、全氮、铵态氮分别提高 3.99%、15.9%、9.82% 和 16.52%; 枯落物去除使土壤含水量、pH、有机碳、全氮、C/N、铵态氮分别降低 8.16%、4.02%、6.47%、5.09%、10.55% 和 8.86%。枯落物输入改变对土壤理化性质的影响还受到气候、海拔、林分类型、处理年限等因素的调控。在枯落物输入改变条件下, 气候、海拔、林分类型、处理年限等因素对土壤含水量、有机碳、全氮、铵态氮均有显著的促进作用; 海拔对土壤 pH 产生了显著的促进作用, 而林分类型对土壤 pH 产生了抑制作用。同时得出枯落物输入改变条件下, 年均温是土壤 pH 的主要调控因子, 年均降水量是土壤含水量的主要调控因子; 海拔是土壤有机碳、全氮、铵态氮的主要调控因子。枯落物输入改变后土壤含水量、pH、有机碳、全氮、铵态氮均显著发生变化, 而枯落物输入改变对土壤理化性质影响的程度除了受到枯落物输入改变的调控, 还受到气候、海拔、林分类型、处理年限等因素的影响。研究结果对深入理解土壤理化性质对枯落物输入差异化响应的驱动因素有一定的理论意义。

关键词: 枯落物输入; 森林生态系统; 土壤理化性质; Meta 分析

土壤是森林生态系统的重要组成成分, 其理化性质决定着植物群落的类型、分布和动态, 同时植物群落又反作用于土壤, 改善其生境条件, 使群落得以发展^[1]。而土壤肥力直接影响着植物的生长发育, 通过分析土壤理化性质, 进而可以了解土壤肥力情况^[2]。森林枯落物作为联系陆地生态系统地上和地下部分物质和能量交换的重要“纽带”, 其在陆地生态系统养分循环中扮演着举足轻重的作用^[3]。森林枯落物的输入一方面为土壤微生物提供了物质基础, 另一方面缓解了土壤微环境的剧烈变动, 同时也改变了土壤的理化性质^[3]。再者, 森林枯落物作为生态系统的重要组成部分, 不仅会影响土壤养分周转^[4], 在维持土壤肥力、涵养森林水源、维系生物多样性等方面也发挥着关键的作用^[5]。因此, 研究森林枯落物输入改变对土壤理化性质的影响对了解和保护森林生态系统的稳定性及其对土壤养分循环的影响有着重要意义。

目前, 国内对枯落物输入量对森林生态系统土壤理化性质影响研究陆续增多, 枯落物的输入改变对土壤 pH、含水量、有机碳、全氮、可溶性有机碳、铵态氮、硝态氮等理化性质都会产生一定的影响。Dai^[6]的研究表明, 枯落物的去除和添加都增加了土壤 pH。付淑月等人^[7]研究发现短期去除枯落物有利于土壤有机碳的积

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31960359, 32201631); 宁夏重点研发计划项目 (2021BEG02005, 2022BSB03069)

收稿日期: 2022-03-22; **网络出版日期:** 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

累,而枯落物添加处理则对其无影响。李常准^[8]、刘仁等人^[9]研究发现,凋落物添加对土壤总有机碳影响显著,而去除和添加凋落物处理对土壤全氮影响不显著。彭琳等人^[10]研究发现,去除凋落物后,土壤有机碳含量明显减少,并且去除量越大,有机碳含量的减少也越大。阮超越等人^[11]最新研究发现,添加凋落物后铵态氮、硝态氮相对于对照均显著降低,而土壤有机碳、可溶性有机碳均未发生显著性的变化;而卢胜旭等人^[12]研究发现,与去除凋落物相比,凋落物添加后土壤铵态氮、硝态氮、全氮以及有效磷含量分别显著增加 30.30%、49.66%、12.77%和 13.90%。尽管已有大量的研究,但这些研究主要是从点位尺度上进行的,研究结果往往受到枯落物输入改变、气候条件、林分类型、土壤类型以及处理时间长短等因素的调控而导致差异,因而亟待通过整合分析综合反映枯落物输入改变对我国整个森林生态系统土壤理化性质的影响,进而深入理解导致土壤理化属性对枯落物输入差异化响应的驱动因素。

基于此,本文利用国内外发表的 40 篇研究论文共 712 组有效数据,通过 Meta 分析来揭示枯落物输入改变对土壤理化性质的影响,同时从枯落物输入改变、气候、海拔、林分类型、处理年限等因素来揭示枯落物输入改变对土壤理化性质的影响程度,为我国森林生态系统土壤理化性质的研究提供一定的理论依据,同时也为全球变化背景下能量流动和养分循环提供参考。

1 研究方法

1.1 数据获取

该研究利用中国知网和 Web of Science 等中英文数据库对已发表的文章进行搜索,搜索关键词为凋落物输入、枯落物输入 & 土壤有机碳、土壤理化性质、土壤养分和 Litter input & Soil organic carbon、Soil physical properties、Chemical properties、Soil nutrients。通过对文献的研究目的、研究方法和研究结果进行分析,避免在数据搜集与取舍过程中出现遗漏和偏差,将检索到的文献按照以下标准进行筛选:

- (1) 实验数据是基于中国森林生态系统枯落物输入改变处理的野外控制实验;
- (2) 实验必须设有处理组 and 对照组,并且设有枯落物添加 (DL) 枯落物去除 (NL) 和对照 (CK) 三种处理;
- (3) 所选变量的均值、标准差和样本量均可从相关文献中获得或计算得到;

所有原始数据都是从出版物的文本、表格、图表和附录中提取的。当数据以图片方式呈现时,使用 GetData 2.0 软件获取数字数据,文献汇总具体指标如下:

土壤理化性质包括:土壤 pH、土壤含水量 (SWC);土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、可溶性有机碳 (DOC)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、土壤 C/N。同时记录试验样点位置信息经度 (Longitude)、纬度 (Latitude)、海拔 (Altitude) 以及气象因子年平均温度 (MAT)、年均降雨量 (MAP)。

最终筛选了 40 篇文献共 712 组数据进行 Meta 分析。如果所选参考文献中没有给出实验点的年平均降水量 (MAP) 和年均温 (MAT) 信息时,根据实验点的经纬坐标信息,通过全球气候数据库直接进行查询获得^[13]。同时,结合本次 Meta 分析的需要,参照张彦军等人^[3]的分类标准将年平均降雨量分为“<600mm”、“600—1200mm”、“>1200mm”三个梯度;将年平均气温分为“<12℃”、“12—16℃”、“>16℃”三个梯度;将海拔分为“<500m”、“500—1000m”、“1000—2500m”三个梯度;将气候带分为亚热带 (SHZ) 和温带 (TZ);将林型分为阔叶林 (BF)、针叶林 (CF)、混交林 (MF);将枯落物处理时间分为“<1 年”、“1—3 年”、“>3 年”三个梯度。

1.2 数据分析

标准差是 Meta 分析的一个重要输入参数,被用来计算各研究的权重,当文献指标中含有标准差时直接摘录;对于仅提供标准误的数据,将其可转换为标准差^[14],其转化公式如下:

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

式中,SD 为标准差,SE 为标准误,n 为试验重复数。

利用响应比 ($\ln R$)^[15] 表示相关参数对枯落物处理的响应程度,公式如下:

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中, X_t 和 X_c 分别为实验组和对照组的平均值。如果 $\ln R > 0$, 说明枯落物输入改变对所选参数产生了正效应; 如果 $\ln R < 0$, 说明枯落物输入改变对所选参数产生了负效应; 如果 $\ln R = 0$ 说明枯落物输入改变并未引起实验组和对照组参数之间的差异。

方差(v)通过以下公式计算得到:

$$V = \frac{S_t^2}{n_t X_t^2} + \frac{S_c^2}{n_c X_c^2} \quad (3)$$

式中, S_c 、 S_t 分别为处理组和对照组所选变量的标准差, n_t 和 n_c 和分别为处理组和对照组的样本量。

非参数加权函数被用于对个体研究进行加权^[15-16]。对于每项研究, 加权因子 w 计算为合并方差的倒数 ($1/v$)。

$$w = \frac{1}{v} \quad (4)$$

$\ln R'$ (effect size) 作为非参数权重加权之后的效应值:

$$\ln R' = w \times \ln R \quad (5)$$

为方便进行分析和解释, 通过下面公式将加权平均效应值 ($\ln R''$) 及其相应的置信区间 (CI) 转化为改变的百分比:

$$\text{Effect size} = (e^{\ln R''} - 1) \times 100\% \quad (6)$$

所有相关计算都在 MetaWin 2.1 software package 中给出。选择该软件的随机效应模型计算平均加权之后的效应值和 95% 置信区间, 如果 95% 的置信区间不与零重叠, 凋落物处理显著影响观察变量 ($P < 0.05$)。如果 95% 的置信区间全部大于 0, 则说明枯落物输入显著增加了土壤理化性质, 反之则减少 ($P < 0.05$)。

本研究利用 R studio 软件“ggplot 2”程序包制作森林图, 利用 SPSS 21.0 进行逐步回归分析 (Stepwise Regression analysis) 分析了年均温、年均降水量和海拔等因子对土壤理化性质的影响。

2 结果与分析

2.1 枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

与对照相比 (图 1), 枯落物添加后, 土壤含水量显著提高 3.99% ($P < 0.05$), 土壤 pH 显著降低 2.22% ($P < 0.05$), 土壤有机碳显著提高 15.9% ($P < 0.05$), 全氮显著提高 9.82% ($P < 0.05$), C/N 显著提高 10.23% ($P < 0.05$), 铵态氮显著提高 16.52% ($P < 0.05$)。枯落物去除后, 土壤含水量显著降低 8.16% ($P < 0.05$), 土壤 pH 显著降低 4.02% ($P < 0.05$), 土壤有机碳显著降低 6.47% ($P < 0.05$), 全氮显著降低 5.09% ($P < 0.05$), C/N 显著降低 10.55% ($P < 0.05$), 土壤铵态氮显著降低 8.86% ($P < 0.05$)。枯落物输入改变对土壤可溶性有机碳、硝态氮均没有显著影响。

2.2 不同条件下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

2.2.1 不同气候因素下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

在不同气候带, 土壤含水量和 pH 对枯落物输入改变的响应差异不显著。不同气候因素下, 土壤含水量和 pH 对枯落物输入改变的响应差异显著 (图 2, $P < 0.05$), 以不做任何处理作为对照, 枯落物输入后土壤含水量的增加幅度在不同降雨条件下呈现出大于 1200mm (5.10%) > 600—1200mm (3.70%) > 小于 600mm (3.68%) 的趋势; 而土壤 pH 仅在降水量 600—1200mm 时显著降低; 枯落物输入后土壤含水量的增加幅度在不同年平均气温条件下差异显著, 其增加幅度最高值出现在 12—16℃ 条件下, 高达 5.57%, 最小值出现在 < 12℃ 条件下, 仅为 1.73% (图 2); 而土壤 pH 在小于 12℃ 条件下, 显著增加 1.77%, 在 12—16℃ 条件下却又显著降低 3.72%, 在大于 16℃ 条件下无显著变化。在不同气候带, 枯落物输入能提高土壤有机碳、全氮、铵态氮, 在亚热

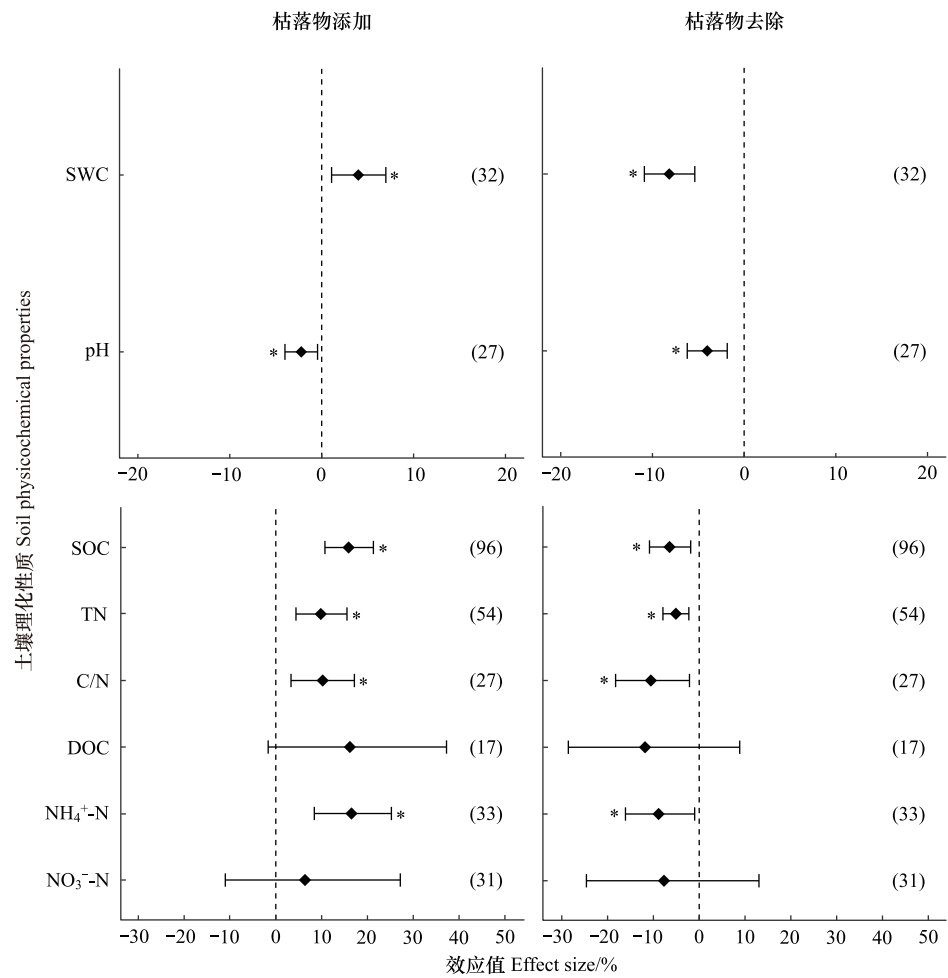


图 1 枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

Fig.1 Effect of altered litter input on soil physicochemical properties

DL: 枯落物添加 Litter addition; NL: 枯落物去除 Litter removal; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; C/N: 碳氮比 Carbon to nitrogen ratio; SWC: 土壤含水量 Soil water content; NH₄⁺-N: 土壤铵态氮 Soil ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 土壤硝态氮 Soil nitrate nitrogen; DOC: 土壤可溶性有机碳 Soil soluble organic carbon; * 代表在 $P < 0.05$ 处差异显著

带条件下最为显著,分别提高 8.25%、5.13%、12.00%;而在温带条件下,仅提高了土壤铵态氮 11.34% (图 2, $P < 0.05$),对土壤含水量、有机碳、全氮、pH、C/N 均未产生显著影响(图 2)。在不同降雨条件下,枯落物输入后土壤有机碳的增加幅度在不同降雨条件下呈现出 600—1200mm (9.10%) > 大于 1200mm (8.37%) > 小于 600mm (4.06%) 的趋势,全氮:600—1200mm (8.54%) > 大于 1200mm (2.91%) > 小于 600mm (1.57%),铵态氮:600—1200mm (14.25%) > 大于 1200mm (11.04%) > 小于 600mm (11.00%),土壤 C/N 只在 600—1200mm 降雨条件下显著降低了 3.73%。枯落物输入后土壤有机碳、全氮、铵态氮的增幅在不同年平均气温条件下差异显著(图 2, $P < 0.05$),其增加幅度最高值出现在 12—16℃ 条件下,分别为 10.13%、8.45%、6.01%,而土壤 C/N 只在年均温小于 12℃ 条件下显著降低了 4.09% (图 2)。

2.2.2 不同海拔梯度下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

海拔是影响土壤理化性质的重要因素。枯落物输入后土壤含水量和 pH 在不同海拔梯度下差异显著(图 2, $P < 0.05$)。在海拔小于 500m 时、500—1000m 时、1000—2500m 时土壤含水量依次增加了 1.66%、2.71%、7.06%;而土壤 pH 依次增加了 1.52%、5.56%、5.03% (图 2)。枯落物输入后土壤有机碳、全氮、铵态氮在不同海拔梯度下差异显著(图 2, $P < 0.05$),在海拔小于 500m 时、500—1000m 时、1000—2500m 时土壤有机碳依次

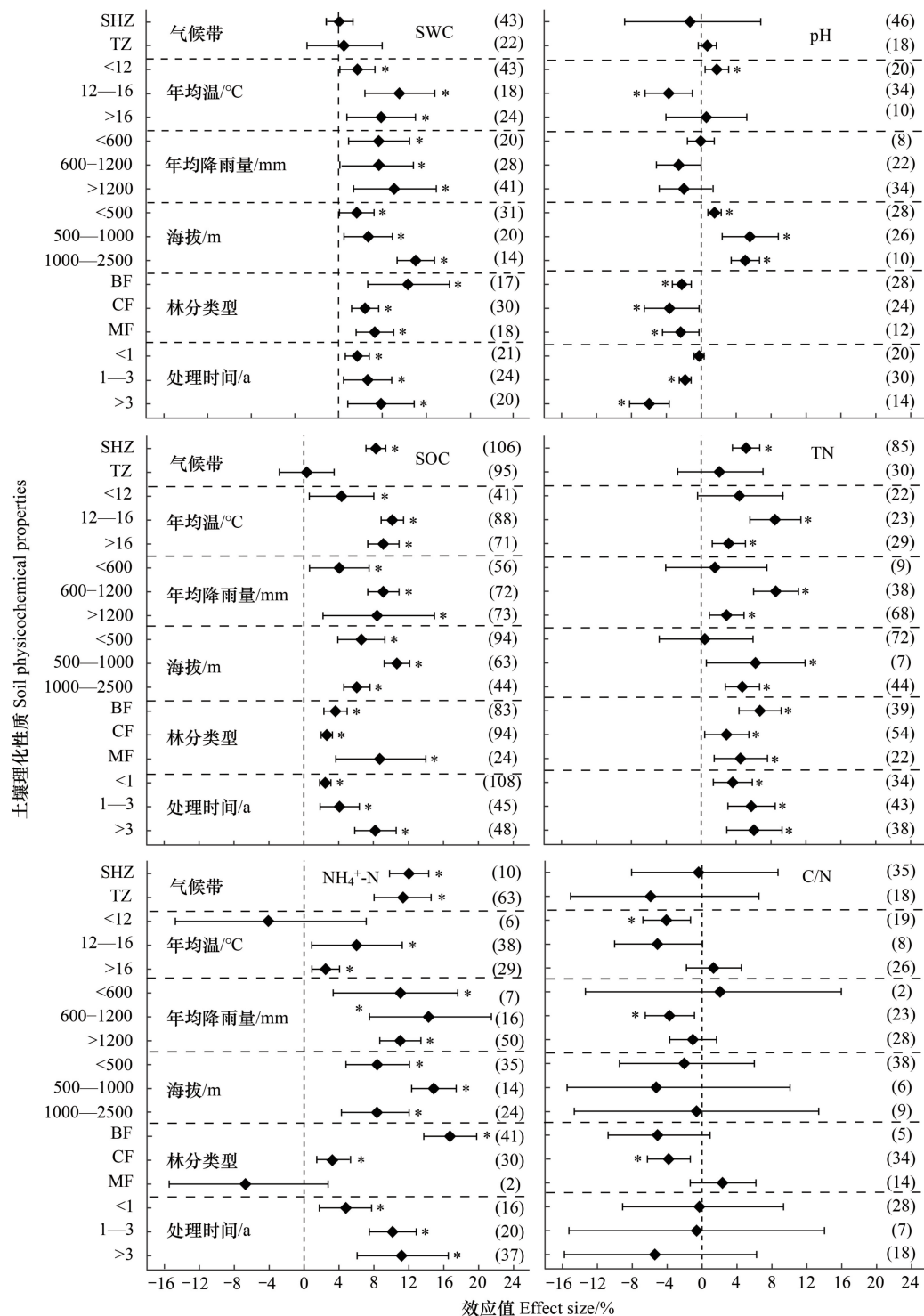


图2 不同气候因素、海拔、林分类型以及处理年限下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

Fig.2 Effects of changes in litter inputs on soil physicochemical properties under different climatic factors, altitudes, forest types and years of treatment

SHZ: 亚热带 Subtropical; TZ: 温带 temperate zone; BF: 阔叶林 Broadleaf forest; CF: 针叶林 Coniferous forest; MF: 混交林 Mixed forests

增加了 6.59%、10.66%、6.07%; 全氮依次增加了 0.42%、6.21%、4.70%; 铵态氮依次增加 8.37%、14.84%、8.34%, 对土壤 C/N 未产生显著影响(图 2)。

2.2.3 不同林分类型下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

枯落物输入后土壤理化性质的改变会因林分类型的不同产生显著差异(图 2, $P<0.05$),在阔叶林林分下,土壤含水量显著增加 6.5%、在针叶林林分下增加 2.42%,在混交林林分下增加 3.31%;而土壤 pH 在阔叶林下显著减少 2.23%,在针叶林下显著减少 3.63%,在混交林下显著减少 2.36%。而在阔叶林林分下,土壤有机碳显著增加 9.01%、全氮显著增加 6.72%、铵态氮显著增加 16.70%;在针叶林林分下,土壤有机碳显著增加 2.63%、全氮显著增加 2.90%、铵态氮显著增加 3.23%;在混交林林分下,土壤有机碳显著增加 8.69%、全氮显著增加 4.49%、铵态氮显著增加 4.79%,而土壤 C/N 只在针叶林林分下显著降低了 3.83%(图 2, $P<0.05$)。

2.2.4 不同处理年限下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

枯落物输入改变处理的时间也是土壤理化性质的重要影响因子。枯落物输入后土壤含水量的变化随着处理时间的增加而显著增加(图 2, $P<0.05$),表现为小于 1 年(1.71%)<1—3 年(2.66%)<大于 3 年(3.89%);而土壤 pH 以处理时间大于 3 年的变化最大,显著降低了 5.96%,在处理 1—3 年间显著降低 1.84% ($P<0.05$),处理小于 1 年的条件下无显著变化。土壤有机碳随着处理时间的增加显著增加,增幅依次为 2.46%、4.09%、8.18%,全氮为 3.60%、5.73%、6.05%;铵态氮为 4.79%、10.13%、11.17%(图 2, $P<0.05$),而对土壤 C/N 未产生显著影响(图 2)。

2.3 土壤理化性质的影响要素分析

逐步回归分析结果显示:枯落物输入改变对土壤 pH 变化的影响因子中,年均温为主要影响因子,其解释度为 10.6% ($P<0.01$);年均降水量是枯落物输入改变对土壤含水量变化的主要影响因子,其解释度为 26.3% ($P<0.01$);海拔为枯落物输入改变对土壤有机碳、全氮、铵态氮变化的主要影响因子,其解释度为 28.5% ($P<0.05$)、39.8%、27.4%(表 1, $P<0.01$)。

表 1 年均温、年均降水量和海拔与土壤理化性质的逐步回归分析

Table 1 Stepwise regression analysis of MAT, MAP and altitude and soil physical and chemical properties

指标 Index	进入变量 Enter variable	移除变量 Remove variable	标准化系数 Standardization coefficient	样本数 n Number of samples n	解释度 R^2 Explainability R^2	P
pH	MAT	MAP、海拔	-0.350	69	0.106	0.008 **
SWC	MAP	MAT、海拔	-0.543	67	0.263	0.006 **
SOC	海拔	MAP、MAT	0.175	203	0.285	0.021 *
TN	海拔	MAP、MAT	-0.634	116	0.398	0.000 ***
NH ₄ ⁺ -N	海拔	MAP、MAT	-0.534	74	0.274	0.004 **
C/N	N					

N 代表无变量进入方程; * 代表在 $P<0.05$ 处差异显著, ** 代表在 $P<0.01$ 处差异显著, *** 代表在 $P<0.001$ 处差异极显著; MAT: 年均温 Mean annual temperature; MAP: 年均降雨量 Mean annual precipitation; SWC: 土壤含水量 Soil water content; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; NH₄⁺-N: 土壤铵态氮 Soil ammonium nitrogen; C/N: 碳氮比 Carbon to nitrogen ratio

3 讨论

3.1 枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

土壤 pH 是影响土壤养分有效性和化学物质转变的重要因素,直接影响土壤养分的存在状态、转化和有效性。土壤含水量则对土壤营养元素的流动以及枯落物的分解速率具有直接影响^[17]。本研究发现枯落物添加和去除均显著降低了土壤 pH,这与张林^[18]、吴君君等人^[19]的研究结果一致,与 Dai^[6]的研究结果相反,可能是因为去除地上枯落物能够通过减少可交换阳离子的供应,使土壤 pH 降低;而在枯落物添加处理下微生物在分解有机质的过程中产生有机酸,可能也导致土壤 pH 降低,同时,由于枯落物的输入土壤中的氮素含量增加进而会增加土壤中铵态氮、硝态氮,植物吸收 NH₄⁺ 后根际会向土壤中释放 H⁺ 导致土壤酸化,NO₃⁻ 在淋失的过程中由于电荷平衡会导致土壤中的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺ 等盐基离子流失,使可交换阳基离子 Al³⁺、Mn²⁺ 的

浓度大量增加,同样会导致土壤酸化,进而导致 pH 降低^[20]。而枯落物添加处理可以显著提高土壤含水量,这与覃志伟^[21]的研究结果一致,可能是因为枯落物减缓地表径流和冲刷量、阻滞径流速度和抑制土壤蒸发效应,从而导致土壤含水量增加。相反,枯落物去除降低了土壤含水量,这与付淑月^[7]的研究结果一致,可能是因为去除枯落物后,枯落物水源涵养能力降低,降水在雨后不能够入渗到土层中,水土流失严重,进而导致土壤含水量降低^[22]。而枯落物添加显著提高了土壤有机碳、全氮、铵态氮含量,这与 Liu^[23]、Wang 等人^[24]研究结果一致,这是因为:(1)枯落物添加导致土壤有机质含量增加,促进土壤微生物的大量繁殖,土壤微生物活性增强,促进了枯落物的分解同时也促进了土壤铵化作用的进行,同时枯落物分解产生的 N 进入土壤,对土壤进行了氮素的补充,进而使得土壤有机碳、全氮、铵态氮含量均显著提高;(2)枯落物通过淋溶而使得一部分养分转移到土壤中,导致土壤有机碳、全氮以及铵态氮含量增加^[25]。枯落物去除导致土壤有机碳、全氮以及铵态氮含量显著降低($P<0.05$),主要是因为枯落物去除后,枯落物中的微生物量减少,导致枯落物分解缓慢,养分归还速率大大降低,其次是因为去除枯落物后,枯落物的水源涵养能力降低,增加的地表径流可能会带走一小部分土壤养分,导致土壤有机碳含量、全氮以及铵态氮含量减少^[8]。但是本次研究结果发现,枯落物输入改变对土壤可溶性有机碳并没有产生显著影响,这与前人魏翠翠^[26]和 Xu 等人^[27]的研究结果类似,原因可能是在枯落物处理下,枯落物下层的植物根系参与了土壤可溶性有机碳含量变化的调控,导致土壤可溶性有机碳含量变化不显著^[28],这也进一步表明枯落物输入变化对土壤可溶性碳等养分可利用的影响可能需要更长期的实验结果来检验^[29]。

3.2 不同条件下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响

3.2.1 不同气候因素下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响分析

气候变化会引发温度以及降水变化,这些变化都有可能直接或间间接影响森林枯落物的分解,进而影响土壤养分的有效性^[30]。在不同的研究区域,由于气候因素的影响,枯落物输入改变对土壤理化性质的影响也不同。本次 Meta 分析结果表明,土壤含水量增幅随年均降水量的增加而增加,随年均温的升高先增加后减小;土壤 pH 只受到了年均温的影响,且随年均温的升高,枯落物输入改变对土壤 pH 先产生了正效应,后转变为了负效应,年均降水量对其无影响;土壤有机碳、全氮、铵态氮增幅随年均温、年均降水量增加先增加后减小。这主要因为随着年平均温度的上升,气候变暖可以提高生态系统初级生产力,增加光合产物的积累,直接促进了枯落物的生产过程^[31]。同时土壤微生物以及酶活性对温度的敏感性较高,适当的温度会增加它们的活性,进而促进枯落物的分解以及养分释放^[32]。而随着年均降水量的提高,一定的降水会促进枯落物的淋溶,进而影响枯落物的养分归还,最终影响土壤含水量、有机碳、全氮以及铵态氮^[33],其次,随着水分的增加会增加土壤中有机的含量,会增加土壤动物和微生物的数量和丰富度,同时也会促进植物的生长,由于土壤酶的主要来源为土壤动物、微生物以及根系的分泌物,因而土壤酶活性增加,促进了枯落物中养分向土壤转移,进而影响土壤理化性质^[34]。

3.2.2 不同海拔梯度下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响分析

海拔对土壤理化性质的影响不容忽视,不同研究区由于海拔的不同,进而影响枯落物的分解并最终影响到土壤的理化性质,海拔梯度(尤其较大海拔梯度)控制着地区的气候类型^[3,35]。Meta 分析结果表明,海拔对土壤理化性质影响显著,并且是改变土壤有机碳、全氮、铵态氮的主要影响因子。随着海拔的上升,土壤含水量显著增加,而土壤 pH、有机碳、全氮、铵态氮增幅呈现出先增加后减小的趋势;这主要是因为随着海拔的上升,降水随着海拔的升高而增加,进而土壤含水量增加;同时随着海拔升高,土壤微生物群落多样性升高^[36],而土壤微生物是枯落物分解的主要驱动因素,因而会促进枯落物的分解,进而使得枯落物中的养分在土壤中大量积累,导致土壤有机碳、全氮和铵态氮的含量增加,同时由于枯落物分解产生的大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进入土壤中,导致土壤 pH 显著增加^[20],这与肖涵冉等人^[5]的研究结果一致。随着海拔的升高,土壤脲酶和蔗糖酶活性呈递减趋势,表明低海拔地区的碳氮转化速率高,高海拔地区的碳氮转化速率低,更利于有机碳和全氮的积累,进而导致土壤有机碳、全氮含量增加^[37]。

3.2.3 不同林分类型下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响分析

不同林分类型对土壤理化性质也产生了显著差异。Meta 分析结果表明:不同林分类型下枯落物输入后对土壤含水量、有机碳、全氮、铵态氮均产生了显著正效应,其增幅均表现为阔叶林>混交林>针叶林,而对土壤 pH 产生了负效应,且减幅表现为针叶林>混交林>阔叶林。主要是因为在不同的研究区,由于植被类型不同,枯落物输入处理对土壤理化性质的影响也不同。阔叶林以及针阔混交林树种组成多样且林分密度大,相比较于针叶树种,阔叶树种的叶面积和质量远大于针叶树种,因此枯落物量要显著高于针叶树种,进而枯落物分解产生的养分要高于针叶林^[38]。其次是因为针叶林枯落物表面含有大多的油脂类物质,吸水性差,其水源涵养能力要显著低于阔叶林^[39],因而含水量低,而阔叶林和混交林枯落物由于水源涵养能力强,可以保育水土,使得大量土壤养分不会流失^[40]。同时,与阔叶林相比,针叶树种的叶片厚革质,角质层发达,含有较多的难分解成分(纤维素、木质素和单宁等),C/N 较高^[41],不利于淋溶作用、微生物分解和土壤动物的机械破碎等作用的发生,而阔叶树种枯落物的难分解成分相对较低,一般认为其分解速率高于针叶树种^[42],因此针叶林枯落物分解相对缓慢,土壤有机碳、全氮以及铵态氮的增幅相较于阔叶林和混交林要小。同时又因为枯落物在分解过程中会产生大量的 H^+ ,因而土壤 pH 显著降低,其次,由于针叶林土壤本身较高的腐殖化程度,以及针叶枯落物分解缓慢且易产生酸性物质,所以导致土壤 pH 显著降低^[43]。

3.2.4 不同处理年限下枯落物输入改变对土壤理化性质的影响分析

DIRT 实验中,枯落物输入改变处理年限的长短对实验结果有显著的影响,不同研究由于枯落物输入改变处理的时间不同,其对土壤理化性质的影响也不同。Meta 分析结果表明:在不同处理年限下,枯落物输入改变对土壤含水量、有机碳、全氮、铵态氮均产生了显著的正效应,其增幅随处理年限的增加而增加。这主要是因为随着枯落物输入改变处理时间的增加,枯落物不能及时分解,导致枯落物蓄积量增大,枯落物水源涵养功能较好,更多的水分渗入到土壤中,导致土壤含水量增大^[22],同时,由于枯落物的不断积累,加剧了土壤养分酸性淋溶的过程,使土壤 pH 逐渐降低^[37]。并且随着枯落物输入改变处理时间的增加,枯落物通过自身的分解直接增加生态系统中养分的输入,提高了土壤养分的可利用性^[44],另一方面主要通过对土壤微环境条件的调控进而间接影响土壤中的养分含量^[45],同时枯落物输入改变也会影响增加土壤呼吸^[3],通过影响土壤呼吸进而影响枯落物分解对土壤有机碳、全氮以及铵态氮的贡献^[23],使得养分在土壤中不断积累,土壤有机碳、全氮以及铵态氮的含量显著增加。

4 结论

枯落物输入改变对土壤含水量、有机碳、全氮、C/N、铵态氮等理化性质均产生了显著的影响,对可溶性有机碳和硝态氮均没有显著影响。枯落物添加后土壤含水量、有机碳、全氮、铵态氮均显著增加,枯落物去除后土壤含水量、有机碳、C/N、铵态氮均显著降低。枯落物输入改变对土壤属性影响的程度除了受到枯落物输入改变自身的调控,还受到气候、林分类型、海拔以及处理年限等因素的影响。本研究结果对深入理解土壤理化属性对枯落物输入差异化响应的驱动因素有一定的理论意义,同时对了解和保护森林生态系统的稳定性及其对土壤养分循环的影响有着重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 金章利,刘高鹏,周明涛,许文年.喀斯特山地草地群落多样性海拔特征及土壤理化性质特征.生态环境学报,2019,28(4):661-668.
- [2] 郑鸾.茂兰不同地形木本植物功能群群落特征与土壤理化性质研究[D].贵阳:贵州师范大学,2020.
- [3] 张彦军,党水纳,任媛媛,梁婷,郁科科,邹俊亮,刘方.基于 Meta 分析的土壤呼吸对凋落物输入响应.生态环境学报,2020,29(3):447-456.
- [4] 黄彩凤,梁晶晶,张燕林,周垂帆.森林凋落物特性及对土壤生态功能影响研究进展.世界林业研究,2021,34(4):20-25.
- [5] 肖晗冉.氮添加与凋落物处理对苏北杨树人工林土壤动物群落结构的影响[D].南京:南京林业大学,2017.
- [6] Dai W W, Peng B, Liu J, Wang C, Wang X, Jiang P, Bai E. Four years of litter input manipulation changes soil microbial characteristics in a temperate mixed forest. Biogeochemistry, 2021, 154(2): 371-383.
- [7] 付淑月,王天秀,张清月,杨改河.刺槐林凋落物输入量变化对土壤有机碳的影响.西北农林科技大学学报:自然科学版,2021,49(6):18-26.

- [8] 李常准, 陈立新, 段文标, 李少然, 李亦菲, 于颖颖, 朱佳慧, 赵戈榕. 凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 100-109.
- [9] 刘仁, 陈伏生, 方向民, 万松泽, 卜文圣, 王辉民, 李建军. 凋落物添加和移除对杉木人工林土壤水解酶活性及其化学计量比的影响. 生态学报, 2020, 40(16): 5739-5750.
- [10] 彭琳, 王晓君, 黄从德, 李开志. 凋落物输入改变对慈竹林土壤有机碳的影响. 水土保持通报, 2014, 34(1): 129-132.
- [11] 阮超越, 刘小飞, 吕茂奎, 李晓杰, 付作琴, 任寅榜, 黄俊, 谢锦升. 杉木人工林凋落物添加与去除对土壤碳氮及酶活性的影响. 土壤学报, 2020, 57(4): 954-962.
- [12] 卢胜旭, 许恩兰, 吴东梅, 陆宇明, 郭剑芬, 杨玉盛. 米槠人工林土壤微生物群落组成对凋落物输入的响应. 森林与环境学报, 2020, 40(1): 16-23.
- [13] 周贵尧, 吴沿友. 放牧对草原生态系统不同气候区碳库影响的 Meta 分析. 草业学报, 2016, 25(10): 1-10.
- [14] Sun Z L, Liu S G, Zhang T A, Zhao X C, Chen S, Wang Q K. Priming of soil organic carbon decomposition induced by exogenous organic carbon input: a meta-analysis. Plant and Soil, 2019, 443(1): 463-471.
- [15] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [16] Bai E, Li S L, Xu W H, Li W, Dai W W, Jiang P. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics. New Phytologist, 2013, 199(2): 441-451.
- [17] 张磊, 贾淑娟, 李啸灵, 陆宇明, 刘小飞, 郭剑芬. 凋落物和根系输入对亚热带米槠天然林土壤有机碳组分的影响. 水土保持学报, 2021, 35(3): 244-251.
- [18] 张林, 李茂, 徐俊, 田地, 张驰, 徐小牛. 模拟氮沉降对甜槠林分凋落物及主要养分归还量的影响. 土壤通报, 2015, 46(3): 648-655.
- [19] 吴君君. 人工针叶林生态系统凋落物输入调控对土壤有机碳动态和稳定性的影响[D]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2017.
- [20] 吕思扬, 宋思意, 黎蕴洁, 仲琦, 马伟, 涂利华. 氮添加和凋落物增减对华西雨屏区常绿阔叶林土壤团聚体及其碳氮的影响. 水土保持学报, 2022, 36(1): 277-287.
- [21] 覃志伟, 周晓果, 温远光, 朱宏光, 李海燕, 阮友维, 蔡道雄, 贾宏炎, 黄雪蔓, 尤业明. 去除和添加凋落物对马尾松×红锥混交林土壤呼吸的影响. 广西科学, 2019, 26(2): 199-206.
- [22] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [23] Liu R, Zhang Y, Hu X F, Wan S Z, Wang H M, Liang C, Chen F S. Litter manipulation effects on microbial communities and enzymatic activities vary with soil depth in a subtropical Chinese fir plantation. Forest Ecology and Management, 2021, 480: 118641.
- [24] Wang Y, Zhang C, Zhang G N, Wang L Z, Gao Y, Wang X L, Liu B, Zhao X Y, Mei H P. Carbon input manipulations affecting microbial carbon metabolism in temperate forest soils-A comparative study between broadleaf and coniferous plantations. Geoderma, 2019, 355: 113914.
- [25] 张婷, 代群威, 邓远明, 李琼芳, 董发勤, Bowen Li, Bruce W.Fouke, 李相邑. 九寨沟优势植物凋落物叶片淋溶的碳氮磷释放特征. 中国岩溶, 2021, 40(1): 133-139.
- [26] 魏翠翠, 刘小飞, 林成芳, 李先锋, 李艳, 郑裕雄. 凋落物输入改变对亚热带两种米槠次生林土壤酶活性的影响. 植物生态学报, 2018, 42(6): 692-702.
- [27] Xu S, Liu L L, Sayer E J. Variability of above-ground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments. Biogeosciences, 2013, 10(11): 7423-7433.
- [28] Lyu M K, Li X J, Xie J S, Homyak P M, Ukonmaanaho L, Yang Z J, Liu X F, Ruan C Y, Yang Y S. Root-microbial interaction accelerates soil nitrogen depletion but not soil carbon after increasing litter inputs to a coniferous forest. Plant and Soil, 2019, 444(1): 153-164.
- [29] Wang X, Xu Z W, Lü X T, Wang R Z, Cai J P, Yang S, Li M H, Jiang Y. Responses of litter decomposition and nutrient release rate to water and nitrogen addition differed among three plant species dominated in a semi-arid grassland. Plant and Soil, 2017, 418(1): 241-253.
- [30] Wu Q Q, Yue K, Wang X C, Ma Y D, Li Y. Differential responses of litter decomposition to warming, elevated CO₂, and changed precipitation regime. Plant and Soil, 2020, 455(1): 155-169.
- [31] 马志良, 赵文强. 植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(1): 270-281.
- [32] 秦纪洪, 张文宣, 王琴, 孙辉. 亚高山森林土壤酶活性的温度敏感性特征. 土壤学报, 2013, 50(6): 1241-1245.
- [33] 张成富, 赵庆霞, 蔡银美, 李昕颖, 何腾兵. 凋落物输入对根系分泌物碳输入及土壤氮的影响. 森林与环境学报, 2021, 41(3): 263-271.
- [34] 李佩擎. 林下植被去除和凋落物添加对杉木林土壤关键生态过程的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
- [35] Körner C. The use of 'altitude' in ecological research. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(11): 569-574.
- [36] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 刘金福, 方长旬, 张志兴, 吴林坤, 陈婷. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物 PLFA 分析. 林业科学, 2014, 50(7): 105-112.
- [37] 宋贤冲, 陈晓鸣, 郭丽梅, 邓小军, 赵连生, 曹继钊. 猫儿山不同海拔典型植被带土壤酶活性变化特征. 基因组学与应用生物学, 2016, 35(12): 3545-3551.
- [38] 王微, 伍小刚, 胡凯, 陶建平. 凋落物输入对中亚热带不同森林细根生物量及分布的影响. 生态学报, 2016, 36(11): 3391-3401.
- [39] Kim J K, Onda Y C, Kim M S, Yang D Y. Plot-scale study of surface runoff on well-covered forest floors under different canopy species. Quaternary International, 2014, 344: 75-85.
- [40] 孙欧文, 蔡建国, 吴家森, 葛宏立. 浙江省典型森林类型枯落物及林下土壤水文特性. 水土保持研究, 2019, 26(1): 118-123.
- [41] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响. 生态学报, 2005, 25(10): 2662-2668.
- [42] 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.
- [43] 卫芯宇, 倪祥银, 湛亚, 陈子豪, 杨玉莲, 吴福忠. 三种不同类型亚高山森林凋落物输入对土壤腐殖化的影响. 生态学报, 2021, 41(20): 8266-8275.
- [44] Bansal S, Sheley R L, Blank B, Vasquez E A. Plant litter effects on soil nutrient availability and vegetation dynamics: changes that occur when annual grasses invade shrub-steppe communities. Plant Ecology, 2014, 215(3): 367-378.
- [45] Deutsch E S, Bork E W, Willms W D. Soil moisture and plant growth responses to litter and defoliation impacts in Parkland grasslands. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 135(1/2): 1-8.