

基于 Meta-analysis 的土壤氮素对采伐的响应研究

秦倩倩, 王海燕*

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 研究采伐影响下土壤氮素的变化规律, 探究森林合理的采伐强度, 维持森林资源的可持续性。[方法] 通过 Review Manager 5.3 软件, 以标准化均数差 (SMD) 作为衡量效应尺度的统计学指标, 对搜集到的 1983—2017 年初有关采伐对土壤氮素影响的 31 篇文献数据进行了 Meta 分析。[结果] 采伐可有效降低土壤全氮含量 [SMD = -0.55 (95% CI, -1.04 ~ -0.07) < 0], 显著增加土壤铵态氮和硝态氮含量 [SMD = 0.99 (95% CI, 0.51 ~ 1.47) > 0; SMD = 2.34 (95% CI, 0.49 ~ 4.19) > 0], 而对土壤水解性氮含量影响不明显 [SMD = -0.30 (95% CI, -1.06 ~ 0.47)]。土壤氮素变化因采伐强度不同而异, 皆伐对其影响较大。[结论] 森林采伐时, 在相同林型研究成果的基础上, 合理控制采伐强度, 减少高强度择伐, 积极推广低强度择伐, 避免皆伐。

关键词: 采伐强度; 全氮; 有效氮; Meta 分析

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)04-0090-08

Response of Soil Nitrogen to Cutting Intensity Based on Meta-analysis

QIN Qian-qian, WANG Hai-yan

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To investigate the rational cutting intensity and maintain forest resource sustainability by studying the soil nitrogen change after cutting. [Method] Standard mean difference (SMD) was applied as a statistical index to measure the effect scale using Review Manager 5.3. The papers published during 1983 to early 2017 were used to study the effects of cutting on soil nitrogen by meta analysis. [Result] Cutting effectively decreased soil total nitrogen content [SMD = -0.55 (95% confidence interval (CI), -1.04 - -0.07) < 0], and increased soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N content significantly [SMD = 0.99 (95% CI, 0.51 - 1.47) > 0; SMD = 2.34 (95% CI, 0.49 - 4.19) > 0], but had no significant effect on soil alkaline hydrolysis nitrogen content [SMD = -0.30 (95% CI, -1.06 - 0.47)]. The change of soil nitrogen varied with cutting intensity, and clear cutting had a greater effect on it. [Conclusion] The results of the study suggest that cutting intensity should be reasonably controlled, it is needed to reduce high-intensity selective cutting, promote low-intensity selective cutting and avoid clear cutting.

Keywords: cutting; total nitrogen; available nitrogen; meta-analysis

氮是植物生长发育所必需的大量营养元素, 是植物从土壤中吸收量最多的矿质元素, 也是最易通过淋溶或挥发从森林土壤中损失的元素^[1-2]。森林采伐改变了土壤结构及各种环境因子, 土壤氮素也

必然发生变化^[3]。Hassett 等^[4]研究发现, 由于伐后微生物量减少, 土壤氮转换速率降低, 皆伐降低了土壤氮循环; Anna 等^[5]对欧洲赤松 (*Pinus sylvestris* L.) 进行研究, 结果表明, 皆伐样地土壤全氮含量比

收稿日期: 2017-08-25

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0504002)

作者简介: 秦倩倩(1995—), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生。研究方向: 土壤学、植物营养生态学。E-mail: qinqianqian19@163.com

* 通讯作者: 王海燕(1972—), 女, 湖北浠水人, 博士, 副教授。研究方向: 土壤学、植物营养学。E-mail: haiyanwang72@aliyun.com

择伐样地低;Foote 等^[6]发现,皆伐后土壤全氮含量显著下降;Olsson^[7]发现,皆伐后 15~16 年欧洲云杉(*Picea abies* (L.) Karst.)林表层物质总氮库下降 13%~22%;刘美爽等^[8]发现,择伐干扰导致水解性氮含量增加;也有研究表明,伐后 3 年内,加大采伐强度使凋落物减少,采伐剩余物增多,提高了林下植被多样性,综合作用的结果使土壤氮素变化不大^[9]。择伐对土壤全氮的影响较小,而皆伐对其影响显著^[10-11]。采伐活动显然影响了土壤氮素循环,但研究结果并不一致,需要进一步的综合分析。

Meta 分析(Meta-analysis)是对围绕相同目的展开的众多独立研究结果进行整合、定量分析,综合评价得到更为一般结论的统计方法^[12]。Meta 分析最早出现于 1904 年,1920 年 Fisher 提出“合并 P 值”的思想^[13];随后研究人员 Glass^[14]基于 Beecher^[15]提出的理论,又提出了“合并统计量”;1991 年,生态学家 Jarvinen^[16]成功地将 Meta-analysis 引入到生态学中,将 Meta 分析推向农业相关学科;1998 年,彭少麟等^[17]首次将 Meta 分析引入国内生态学领域;2009 年,郭明等^[18]进一步介绍了 Meta-analysis 的发展。近年来,国内生态学领域有关 Meta 分析的论文发表数目呈增长趋势,但与国际相比还有一定差距。目前,Meta 分析在土壤生态学方面已有应用,但还未见森林经营措施对土壤养分循环影响的应用研究。本文基于 Meta 分析方法,综合分析了采伐对土壤氮素循环的影响效应,为科学开展森林经营提供指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源与筛选

本研究从中国 CNKI 学术总库、Springer Link 等数据库中通过检索“采伐”、“氮”等关键词搜索了 1983—2017 年初正式刊物上发表的中英文文献。文献筛选标准为:(1)文献的数据资料里至少包含一种采伐强度处理对土壤氮素的影响;(2)文献的数据资料里必须具有实验组和对照组;(3)文献资料的数据应是具体的数值(如以图表方式表征的数据,则通过 Engauge Digitizer 软件对图表进行转化),数据包含平均值和标准差或者标准误;(4)具有重复报道的数据值选用其中一种;(5)试验具有明确的重复数。根据选取标准,共收集有关采伐对土壤氮素影响的文献 117 篇,对所收集的文献进行质量评估,剔除信息不完整的文献,最后确定纳入分析的

文献共 31 篇(表 1)。

1.2 数据分析

由于土壤氮素的数据值为计量型资料,所以在 Meta 分析软件 Review Manager 5.3 中选择连续类型,数据录入时输入平均数、标准差及样本量进行分析,若文献提供的数据是标准误(SE),标准差(SD)可通过式(1)转换:

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

式(1)中: N 为样本数。统计分析设定置信区间(CI)为 95%,采用标准化均数差(SMD)作为效应统计指标,其计算公式为:

$$SMD = \frac{\bar{X}_E - \bar{X}_C}{S} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{(N_E - 1)SD_E^2 + (N_C - 1)SD_C^2}{N_E + N_C - 2}} \quad (3)$$

式(2~3)中: \bar{X}_E 、 \bar{X}_C 分别是各独立研究实验组和对照组的平均值; SD_E 、 SD_C 分别是实验组和对照组的标准差; N_E 、 N_C 分别为实验组和对照组的样本数; S 为总的标准差。

效应值 SMD 的方差 V_D 计算模型为:

$$V_D = \frac{N_C + N_E}{N_C N_E} + \frac{SMD^2}{2(N_C + N_E)} \quad (4)$$

合并分析效应值前,通常采用卡方 Q 检验和 I^2 统计量进行异质性检验,计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^k W_i r_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^k W_i r_i\right)^2}{\sum_{i=1}^k W_i} \quad (5)$$

$$W_i = \frac{1}{V_i} \quad (6)$$

$$I^2 = \frac{Q - (k - 1)}{Q} \times 100\% \quad (7)$$

式(4~7)中: r_i 为第 i 项研究的效应值; W_i 为第 i 项研究的权重; V_i 为是第 i 项研究的方差; k 为研究个数。若纳入的各研究结果无异质性,即 $P > 0.1$ 、 $I^2 < 50\%$ 时,采用固定效应模型(Fixed effect model)进行分析,反之则采用随机效应模型(Random effect model)^[50]。合并效应值(ES)固定效应模型计算公式为:

$$ES = \frac{\sum_{i=1}^k W_i r_i}{\sum_{i=1}^k W_i} \quad (8)$$

随机效应模型计算公式为:

表1 国内外31篇研究文献

Table 1 The summary of 31 research literatures home and abroad

编号 ID	文献来源 Reference	实验地点 Sites	树种/林分类型 Tree species/ forest type	采伐强度 Treatments	取样时间 Time
1	安静等 ^[19]	黑龙江省帽儿山	兴安落叶松人工林	皆伐	伐后5年
2	于海群等 ^[20]	北京延庆北低山	油松人工林	间伐49.2%	伐后3年
3	赵宇 ^[21]	山西省关帝山林区	华北落叶松人工林	间伐34.7%	—
4	刘夏等 ^[22]	黑龙江省永青林场	兴安落叶松沼泽	择伐、皆伐	伐后3年
5	李旭等 ^[23]	吉林省金沟岭林场	长白落叶松云冷杉林	间伐40%	伐后25年
6	郭剑芬 ^[24]	福建省异州林业采育场	杉木林、栲树林	皆伐	伐后2个月
7	凌威等 ^[25]	福建省将乐林场	杉木人工林	皆伐	伐后3个月
8	谷会岩 ^[26]	黑龙江省塔河林业局	兴安落叶松天然林	择伐30%	伐后35年
9	杨秀云等 ^[27]	山西省吕梁山脉庞泉沟	华北落叶松林	间伐20%	伐后10年
10	谷加存 ^[28]	黑龙江省帽儿山林场	天然次生林	50%采伐	伐后2~3年
11	柴红霞 ^[29]	湖南省桃子冲林场	杉木人工林	皆伐	伐后3年
12	庞学勇等 ^[30]	四川省青藏高原东部	白云杉人工林	皆伐	伐后10年
13	周新年等 ^[31]	福建省大源林场	马尾松天然林	择伐67.5%	伐后15年
14	周莉等 ^[32]	吉林省红石林场	阔叶红松林	择伐	伐后15年
15	龙涛 ^[33]	大青山试验场	马尾松人工林	—	伐后2个月
16	范士超等 ^[34]	河北省景县实验站	杨农复合系统	间伐	伐后1年
17	徐庆祥等 ^[35]	黑龙江省大兴安岭林区	兴安落叶松天然林	间伐38%	伐后2年
18	方晰等 ^[36]	湖南省会同定位观测站	杉木人工林	皆伐	伐后28年
19	丁晓东等 ^[37]	河北省塞罕坝机械林场	华北落叶松人工林	间伐50%	伐后6年
20	马长顺等 ^[38]	黑龙江省小兴安岭林区	人工用材林	20%采伐	—
21	王成等 ^[39]	四川省九寨沟保护区	云杉人工林	低强度疏伐	伐后1年
22	Kurth等 ^[40]	芬兰安亚朗科斯基	挪威云杉林	皆伐	伐后5年
23	Bradley等 ^[41]	加拿大不列颠哥伦比亚	铁杉、冷杉林	间伐	伐后4年
24	Schmidt等 ^[42]	美国渥太华国家森林	白杨林	皆伐	伐后10年
25	Adamczyk等 ^[43]	加拿大怀特考特森林	云杉白杨混交林	皆伐	伐后2年
26	Ellis等 ^[44]	塔斯马尼亚南部比顿河	桉树混交林	—	伐后1年
27	Knight ^[45]	英国布鲁克试验林	红皮云杉阔叶林	皆伐	伐后8年
28	Coulombe等 ^[46]	加拿大阿巴拉契亚山脉	香脂冷杉混交林	间伐	伐后1年
29	Johnson ^[47]	华盛顿福尔里弗研究区	道格拉斯冷杉人工林	皆伐	伐后30年
30	Piirainen等 ^[48]	芬兰东部	挪威云杉混交林	皆伐	伐后3年
31	Prescott ^[49]	温哥华岛坎贝尔河	西部铁杉林	渐伐	伐后2年

$$ES = \frac{\sum_{i=1}^k W_i * r_i}{\sum_{i=1}^k W_i * } \quad (9)$$

$$W_i * = D + \frac{1}{W_i} \quad (10)$$

$$D = \frac{Q - (k - 1)}{\left(\sum_{i=1}^k W_i - \frac{\sum_{i=1}^k W_i^2}{\sum_{i=1}^k W_i} \right)} \quad (11)$$

式(8~11)中: D 为第 i 项研究组内取样方差和各研究组间方差估计值; $W_i *$ 为 W_i 转换值。结合效应值的95%置信区间计算公式为:

$$95\% CI = ES + t_{0.05} SE \quad (12)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{W_i}} \quad (13)$$

式(12~13)中: SE 为结合效应值的标准误。当合并效应值 $ES > 0$ 时,说明采伐对土壤氮含量有增加效应;反之有降低效应。如果该分析结果的结合效应值置信区间与0重叠,表明采伐对土壤氮的影响未达到统计学显著水平($P > 0.05$);反之则有统计学差异。

Review Manager 5.3 软件采用倒漏斗图和森林图来表示 Meta 分析的结果。漏斗图是根据每个研究的效应值(x 轴)与精确度(y 轴,通常用效应值的标准误(SE)来表示)做出的散点图,中间虚线是合并效应值的延长线。样本量越大,效应值越准确,所以,小样本研究的效应值散落分布在底部,而大样本研究的效应值相对集中地分布在中部或顶部,在没

有偏倚的情况下,呈现对称的倒漏斗状,如果存在偏倚,就会出现图形缺角。森林图是以横坐标刻度为0的垂直线($SMD = 0$)为中心线,如果横线或菱形与中间的垂直线相交,则表明不同处理之间的差异无统计学意义;每一条横线中间的灰色小正方形表示每个研究的效应值,以平行于 x 轴的线段宽度反映置信区间,CI 是真值可能存在的范围,横线的长度越长,表明样本量越小,效应值的误差较大;最下方的黑色菱形代表多个研究文献的综合效应结果。异质性检验(Test for heterogeneity)用以判断原始文献质量的异质性和纳入分析的各研究结果的一致性或趋向性。

2 结果与分析

2.1 采伐对土壤全氮含量的影响

本次分析的结果呈现倒漏斗趋势,较对称地分布在平均效应值的两侧,可以看出入选文献的发表偏倚不大(图1),表明合并结果具有可靠性。

土壤全氮代表着土壤氮素的总贮量和供氮潜力。从森林图(图2)可看出:国内研究大多 CI 横线较长,而国外 CI 横线普遍较短,表明其效应值的误

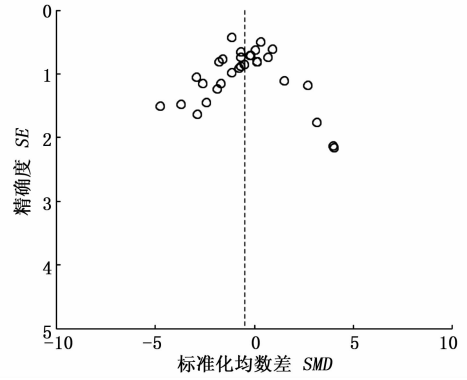


图1 倒漏斗图($N = 31$)

Fig.1 Funnel plot ($N = 31$)

差较小;凌威等研究结果权重(Weight = 1.1%)最低;Ellis 等研究结果准确性较好(Weight > 5.0%);柴红霞、赵宇等多组研究的结果无统计学意义,原因可能是样本量较小或是标准差较大,但通过纳入 Meta 分析扩大研究的样本量,会影响合并效应,对最终结果是有意义的;综合效应值 $SMD = -0.55$ (95% CI, $-1.04 \sim -0.07$) < 0,黑色菱形也完全位于中心垂直线的左侧,由此得出采伐可有效降低土壤全氮含量的结论。

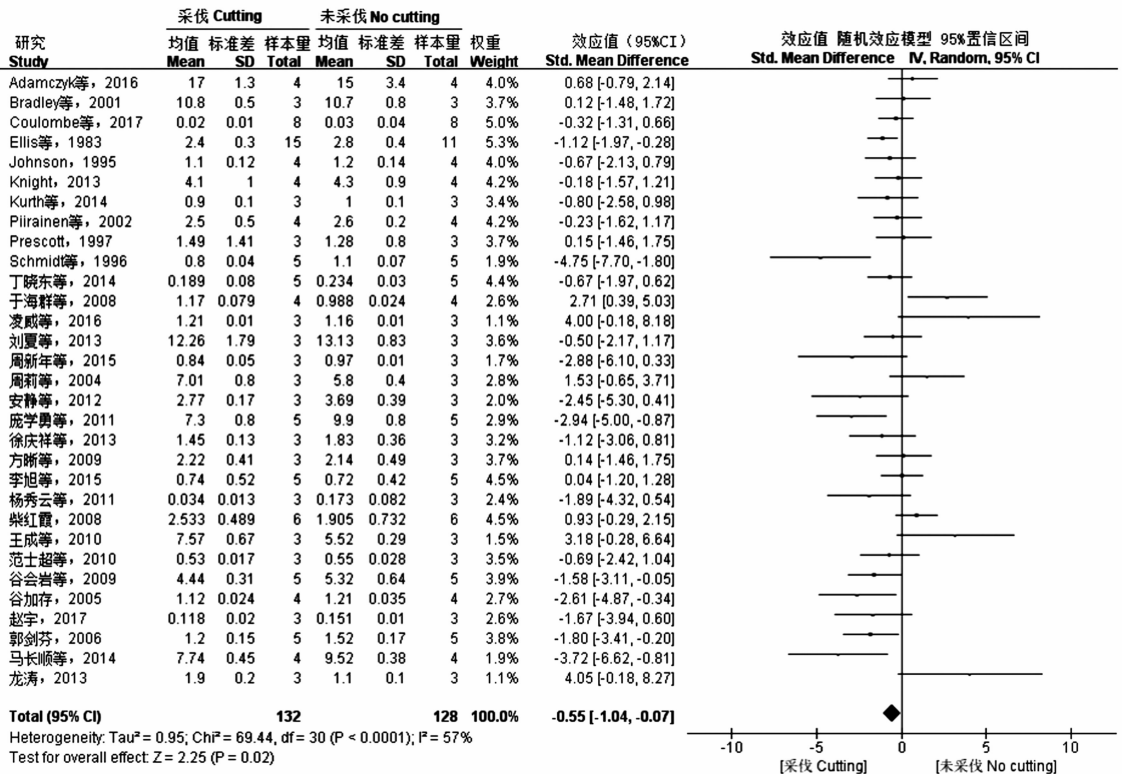


图2 采伐对土壤全氮含量影响的 Meta 分析($N = 31$)

Fig.2 Meta analysis of the effects of cutting on soil total nitrogen content ($N = 31$)

本分析中涉及的研究区域、林分类型、采伐强度以及实验和统计方法间均存在差异,由 $I^2 > 50\%$ 、 $Q = 69.44$ 和 $P < 0.1$ 可得研究存在统计学异质性,但各研究效应值大多落在垂直线左侧,所以,各研究之间异质性不大,不用做亚组分析寻找异质性来源,本研究改选随机效应模型进行计算,但随机效应模型得到的效应值置信区间较大,难以发现不同采伐处理间的差异。

2.2 采伐对土壤有效氮含量的影响

水解性氮是衡量土壤氮素供应能力的一个较好

的指标。采伐干扰后,水解性氮含量发生变化。图3中龙涛研究得出的水解性氮含量变化所占权重 (Weight = 4.9%) 最小;安静等研究结果准确性最好;凌威、庞学勇等置信区间的横线完全位于垂直线左侧,表明该研究结果有统计学意义;由 $I^2 > 50\%$ 、 $Q = 21.15$ 和 $P < 0.1$ 可以得出,各处理的土壤水解性氮含量变化数据间存在异质性;土壤水解性氮合并效应值 $SMD = -0.30$ (95% CI, $-1.06 \sim 0.47$),菱形与垂直线相交,表明采伐对水解性氮含量的影响无统计学意义。

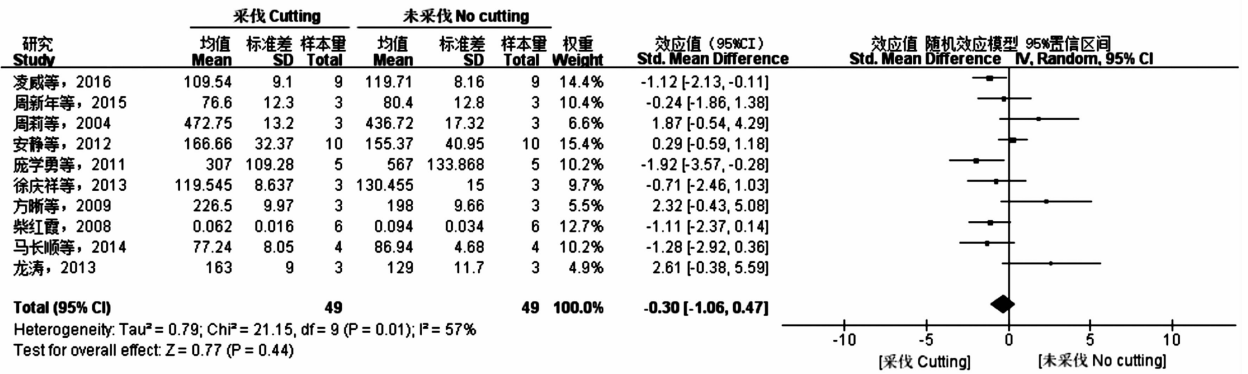


图3 采伐对土壤水解性氮含量影响的 Meta 分析 (N = 10)

Fig. 3 Meta analysis of the effects of cutting on soil alkali hydrolyzable nitrogen content (N = 10)

森林土壤无机态氮主要以铵态氮 (NH₄⁺-N) 和硝态氮 (NO₃⁻-N) 形式存在。对 NH₄⁺-N 分析中,王成等的研究结果权重最小 (Weight = 1.7%),赵宇等研究得出的铵态氮含量变化准确性最好,而谷加存、Adamczyk 等研究结果无统计学意义 (图4);对 NO₃⁻-N 分析中,赵宇的研究结果准确性较差,Ellis 等研究所占权重最大 (Weight = 16.2%),Ellis 等和 Schmidt 等的研究结果具有明显的统计学意义 (图5)。由异质性检验结果得出,各研究结果间无异质

性 ($I^2 < 50\%$; $Q = 9.31$; $P > 0.1$),即选用固定效应模型进行分析;但所得 NO₃⁻-N 含量数据间存在异质性 ($I^2 > 50\%$; $Q = 46.86$; $P < 0.1$),故采用随机效应模型进行计算。NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 效应分析的菱形均完全位于垂直线的右侧 [$SMD = 0.99$ (95% CI, $0.51 \sim 1.47$) > 0 ; $SMD = 2.34$ (95% CI, $0.49 \sim 4.19$) > 0],表明采伐对土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的影响显著,且对 NO₃⁻-N 影响的幅度比 NH₄⁺-N 的大。

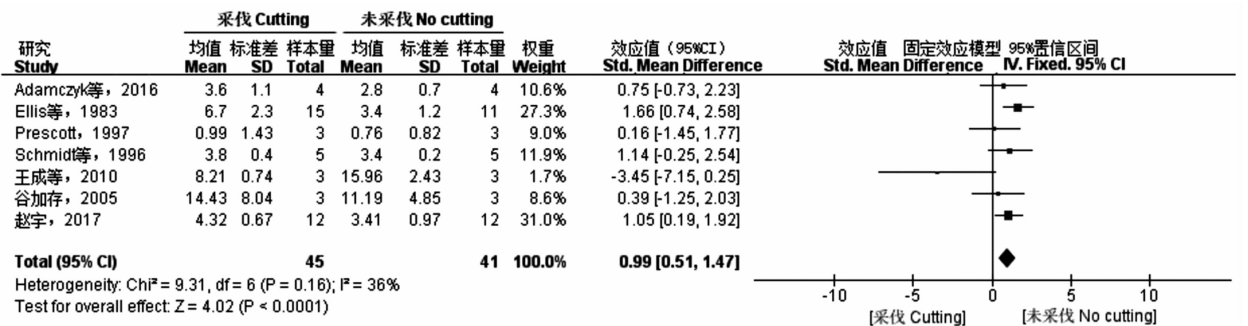
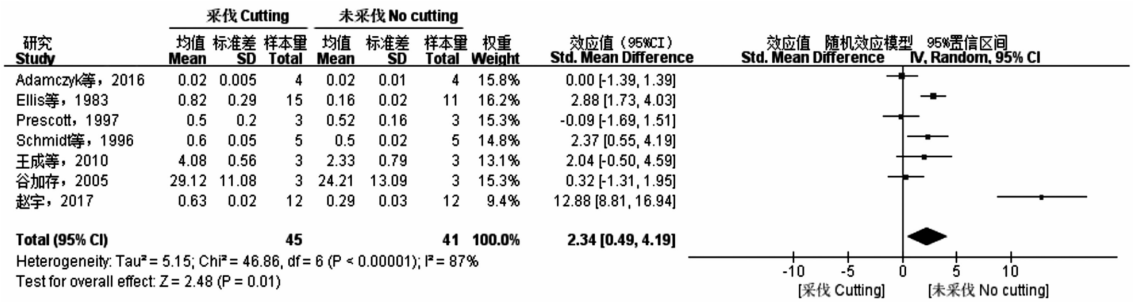


图4 采伐对土壤铵态氮含量影响的 Meta 分析 (N = 7)

Fig. 4 Meta analysis of the effects of cutting on soil ammonium nitrogen content (N = 7)

图5 采伐对土壤硝态氮含量影响的 Meta 分析 ($N=7$)Fig. 5 Meta analysis of the effects of cutting on soil nitrate nitrogen content ($N=7$)

3 讨论

氮是森林生态系统植物生长的限制性元素^[51]。森林采伐对土壤氮素循环的影响因地区、树种、采伐强度等的差异而不同。采伐能有效降低土壤全氮含量,这可能是因为采伐干扰破坏了森林原有的生态平衡,短期内使得林下生物多样性减少,凋落物分解变慢,导致土壤有机质含量减少。由于土壤全氮含量与土壤有机质含量呈一定的正相关关系,必然引起伐后土壤全氮含量下降。此外,采伐强度过大、水土流失严重等也会导致全氮含量迅速减少^[52];而由于伐后林地光照充足,地表温度升高,凋落物快速分解,土壤微生物数量增加,酶活性增强,必然提高了伐后初期土壤氮素的循环速率,从而引起土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的增加,且 NO_3^- -N 增加的幅度比 NH_4^+ -N 的大;采伐干扰对土壤水解性氮含量影响不明显。此前,Johnson 等^[53]也基于 Meta-analysis 得出森林采伐较少甚至不影响土壤氮的结论。由于水解性氮反映土壤近期的供氮能力,随时间变化较快,而多组研究间取样的伐后年限(2个月至28年不等)存在差异,土壤水解性氮含量在采伐后森林土壤氮素循环中的研究意义不大。

Meta-analysis 具有坚实的统计学基础,能科学地进行多种处理效应的综合定量分析,与传统综述方法相比有显著优势,它能解决独立研究存在的问题,揭示单个研究的不确定性,使结果更加可信和客观^[54-55]。近年来,Review Manager 软件在土壤生态领域的应用为该领域的实践和科研提供了新的理论和方法,但由于 Meta 分析属于描述性二次分析,仍存在混杂偏倚、文献报道偏倚以及分析方法本身的一些缺点^[56]。本研究基于该方法得到了合理的结论,今后的科研和实践中,在合理应用此方法的基础上,可以继续探讨土壤其他元素对采伐的响应。

4 结论

通过 Review Manager 5.3 软件,对 31 篇有关采伐强度对土壤氮素影响的文献进行了 Meta 分析得出:采伐可有效降低土壤全氮含量,显著增加土壤铵态氮和硝态氮含量,而对土壤水解性氮含量影响不明显,其中,采伐强度不同,土壤全氮含量降低幅度不等(下降约 10%~40%),且伐后 10 年未能恢复,因此,存在氮素流失的可能性;土壤无机态氮含量变化和全氮正好相反,尽管伐后土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量均明显增加,利于提高土壤肥力以及促进林木生长,这种增加趋势也只表现在伐后 2~3 年;不同采伐强度对比分析得出,皆伐对土壤氮素影响较大。因此,建议森林采伐时,在相同林型研究成果的基础上,合理控制采伐强度,减少高强度择伐,积极推广低强度择伐,避免皆伐。

参考文献:

- [1] Ingstedt T. Plant growth in relation to nitrogen supply[J]. Ecological Bulletins, 1981, 33(303):268-271.
- [2] Chapin F S, Vitousek P M, Cleve K V. The nature of nutrient limitation in plant communities[J]. American Naturalist, 1986, 127(1):48-58.
- [3] 陈绍栓,陈淑容,马祥庆. 次生阔叶林不同更新方式对林分组成及土壤肥力的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(6):113-117.
- [4] Hassett J E, Zak D R. Aspen harvest intensity decreases microbial biomass, extracellular enzyme activity, and soil nitrogen cycling[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(1):227-235.
- [5] Anna S, Pekka T, Mikko K, et al. Whole-tree harvesting at clear-felling: Impact on soil chemistry, needle nutrient concentrations and growth of Scots pine[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2010, 25(2):148-156.
- [6] Foote J A, Boutton T W, Scott D A. Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management[J]. Forest Ecology & Management, 2015, 355:48-57.
- [7] Olsson B A, Staaf H, Lundkvist H, et al. Carbon and nitrogen in

- coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity[J]. *Forest Ecology & Management*, 1996, 82(1-3):19-32.
- [8] 刘美英,董希斌,郭辉,等.小兴安岭低质林采伐改造后土壤理化性质变化分析[J].*东北林业大学学报*,2010,38(10):36-40.
- [9] 张 决,宋启亮,董希斌.不同采伐强度改造对小兴安岭低质林土壤理化性质的影响[J].*东北林业大学学报*,2011,39(11):22-24.
- [10] 满秀玲,屈宜春.森林采伐与造林对土壤化学性质的影响[J].*东北林业大学学报*,1998,26(4):14-16.
- [11] 许忠学,张澄清.不同采伐方式对林地土壤养分的影响[J].*吉林林学院学报*,1996(2):109-115.
- [12] 赵 宁,俞顺章. Meta-analysis 方法与应用[J]. *肿瘤*, 1995(s1):136-137.
- [13] Simpson R J S, Pearson K. Report on certain enteric fever inoculation statistics[J]. *British Medical Journal*, 1904, 2(2288):1243-6.
- [14] Glass G V. Primary, secondary and meta analysis of research[J]. *Education Research*, 1976, 6:3-8.
- [15] Beecher W J. Late-pleistocene isolation in salt-marsh sparrows[J]. *Ecology*, 1955, 36(1):23-28.
- [16] Jarvinen A. A meta-analytic study of the effects of female age on laying-date and clutch-size in the Great Tit *Parus major*, and the Pied Flycatcher *Ficedula hypoleuca*[J]. *Ibis*, 1991, 133(1):62-67.
- [17] 彭少麟,唐小焱. Meta 分析及其在生态学上的应用[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(5):75-79.
- [18] 郭 明,李 新. Meta 分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(5):911-919.
- [19] 安 静,王文杰,王洪岩,等. 人工林皆伐对土壤碳及相关理化性质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(9):57-62.
- [20] 于海群,刘 勇,李国雷,等. 油松幼龄人工林土壤质量对间伐强度的响应[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3):65-70.
- [21] 赵 宇. 不同间伐强度对华北落叶松人工林土壤氮素含量的影响[J]. *山西林业科技*, 2017, 46(1):25-27.
- [22] 刘 夏,牟长城,谭稳稳. 采伐对小兴安岭落叶松森林沼泽土壤氮含量和氮密度的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6):1408-1413.
- [23] 李 旭,王海燕,杨晓娟,等. 东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度土壤肥力研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(2):1-7.
- [24] 郭剑芬. 皆伐火烧对杉木林和栲树林碳、氮动态的影响[D]. 厦门:厦门大学,2006.
- [25] 凌 威,王新杰,刘 乐,等. 皆伐与不同迹地清理方式对杉木土壤化学性质的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(4):48-53.
- [26] 谷会岩,金靖博,陈祥伟,等. 采伐干扰对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的影响[J]. *土壤通报*, 2009(2):272-275.
- [27] 杨秀云,韩有志,宁 鹏,等. 采伐干扰对华北落叶松林下土壤水分、pH 和全氮空间变异的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2):356-365.
- [28] 谷加存. 采伐干扰对次生林土壤水分、温度和养分空间异质性的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2005.
- [29] 柴红霞. 杉木林采伐对土壤养分的影响及采伐剩余物的养分贡献[D]. 长沙:中南林业科技大学,2008.
- [30] Pang X Y, Bao W K, Wu N. The effects of clear-felling subalpine coniferous forests on soil physical and chemical properties in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Soil Use & Management*, 2011, 27(2):213-220.
- [31] Zhou X N, Zhou Y, Zhou C, *et al.* Effects of cutting intensity on soil physical and chemical properties in a mixed natural forest in southeastern China[J]. *Forests*, 2015, 6(12):4495-4509.
- [32] 周 莉,代力民,谷会岩,等. 长白山阔叶红松林采伐迹地土壤养分含量动态研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10):1771-1775.
- [33] 龙 涛. 采伐和炼山对马尾松林地土壤养分和土壤微生物多样性的影响[D]. 南宁:广西大学,2013.
- [34] 范士超,张海林,黄光辉,等. 不同间伐模式下杨农复合系统土壤养分垂直分布特征[J]. *华北农学报*, 2010, 25(s2):236-241.
- [35] 徐庆祥,卫 星,王庆成,等. 抚育间伐对兴安落叶松天然林生长和土壤理化性质的影响[J]. *森林工程*, 2013, 29(3):6-9.
- [36] 方 晰,田大伦,秦国宣,等. 杉木林采伐迹地连栽和撂荒对林地土壤养分与酶活性的影响[J]. *林业科学*, 2009, 45(12):65-71.
- [37] 丁晓东,马香丽,高 敏,等. 间伐对华北落叶松人工林凋落物和土壤理化性质的影响研究[J]. *河北林果研究*, 2014(4):351-355.
- [38] 马长顺,王雨朦. 不同经营方式对人工林土壤化学性质的影响[J]. *森林工程*, 2014, 30(1):30-35.
- [39] 王 成,庞学勇,包维楷. 低强度林窗式疏伐对云杉人工纯林地表微气候和土壤养分的短期影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(3):541-548.
- [40] Kurth V J, D'Amato A W, Palik B J, *et al.* Fifteen-year patterns of soil carbon and nitrogen following biomass harvesting[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(2):624.
- [41] Bradley R L, Titus B D, Hogg K. Does shelterwood harvesting have less impact on forest floor nutrient availability and microbial properties than clearcutting? [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2001, 34(3):162-169.
- [42] Schmidt M G, Macdonald S E, Rothwell R L. Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76(4):531-540.
- [43] Adamczyk S, Kitunen V, Lindroos A J, *et al.* Soil carbon and nitrogen cycling processes and composition of terpenes five years after clear-cutting a Norway spruce stand: Effects of logging residues [J]. *Forest Ecology & Management*, 2016, 381:318-326.
- [44] Ellis R C, Graley A M. Gains and losses in soil nutrients associated with harvesting and burning eucalypt rainforest[J]. *Plant & Soil*, 1983, 74(3):437-450.

- [45] Knight E J. Harvest intensity and competing vegetation control have little effect on soil carbon and nitrogen pools in a Pacific Northwest Douglas-fir plantation[D]. Washington; University of Washington, 2013.
- [46] Coulombe D, Sirois L, Paré D. Effect of harvest gap formation and thinning on soil nitrogen cycling[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2016, 47(3):308–318.
- [47] Johnson C E. Soil nitrogen status 8 years after whole-tree clear-cutting[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1995, 25(8):1346–1355.
- [48] Piirainen S, Finér L, Mannerkoski H, *et al.* Effects of forest clear-cutting on the carbon and nitrogen fluxes through podzolic soil horizons[J]. Plant & Soil, 2002, 239(2):301–311.
- [49] Prescott C E. Effects of clearcutting and alternative silvicultural systems on rates of decomposition and nitrogen mineralization in a coastal montane coniferous forest[J]. Forest Ecology & Management, 1997, 95(3):253–260.
- [50] 刘关键, 吴泰相, 康德英. Meta-分析中的统计学过程[J]. 中国组织工程研究, 2003, 7(4):538–539.
- [51] 郑丽凤, 周新年, 巫志龙, 等. 天然林不同强度采伐10a后林地土壤理化性质分析[J]. 林业科学研究, 2008, 21(1):106–109.
- [52] Fisher R F, Binkley D, Fisher R F, *et al.* Ecology and management of forest soils[J]. Soil Science, 2012, 145(2):73–74.
- [53] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. [J]. Forest Ecology & Management, 2001, 140(2–3):227–238.
- [54] Tonelli M R. The limits of evidence based medicine[J]. Respire Care, 2001, 46(12):1435–1440.
- [55] Brett M T. Meta-analysis in ecology[J]. Bulletin of the Ecological Society of America, 1997, 78(1):92–94.
- [56] 谢军飞, 许蕊. 长期施用化肥对土壤有机碳含量影响的Meta分析[J]. 土壤通报, 2014, 45(2):427–431.

(责任编辑:徐玉秀)