

整合分析(Meta-analysis)方法及其在全球变化中的应用研究

雷相东^{①②} 彭长辉^{②③*} 田大伦^④ 孙剑峰^②

(① 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; ② ECO-MCS Lab, Institute of Environment Sciences, University of Quebec at Montreal (UQAM), Montreal, H3C 3P8, Canada; ③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ④ 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004. * 联系人, E-mail: peng.changhui@uqam.ca)

摘要 整合分析是一种专门对单个研究进行统计综合、找出普遍结论并发现差异的定量研究方法。自 20 世纪 90 年代初引入生态和进化生物学以来, 得到了迅速的发展。随着对全球变化问题的日益关注, 近年来该方法在全球气候变化研究中也开始得到广泛的应用。介绍了整合分析方法的原理、步骤和优缺点, 并综述了其在气候变化研究中的应用, 包括生态系统对 CO₂ 浓度升高和全球变暖的响应、生态系统对 O₃ 的响应、土地利用和管理对气候变化的影响及干扰对生态系统生物地球化学循环的影响等方面。尽管整合分析存在一些不足和风险, 但仍然优于传统的文献综述方法。整合分析中的一些方法如累计整合分析、敏感性分析等仍未在全球气候变化中得到应用; 需要定期对某一主题的整合分析进行更新; 全球气候变化研究中尤其要重视交互作用的影响和长期实验。因此, 整合分析在全球气候变化研究中仍有很大潜力, 它能在更大的时空尺度上回答单个研究无法完全回答的问题。中国科研工作者在气候变化方面进行了大量的实验, 建立了研究和观测网络, 积累了大量的原始数据和实验结果, 迫切需要应用整合分析将这些研究进行集成, 从而为政府部门应对气候变化的决策提供科学依据。可以预料整合分析将在中国的全球气候变化研究中得到更多的应用和发展。

关键词 整合分析 全球气候变化

气候变化问题是可持续发展所面临的巨大挑战中的一部分。全球平均温度在过去 100 年增高了约 0.6°C 并且将继续升高; CO₂ 浓度与工业革命前相比增加了 38%, 本世纪末将达 700 μmol/mol^[1]。最近 50 年来观察到的变暖现象很可能是由于人类活动造成的, 而且 21 世纪人类活动将继续改变大气组成。气候变化有改变生态系统结构(如植物高度和物种组成)和功能(如光合和呼吸作用、碳同化和生物地球化学循环)的潜力, 而生态系统的改变又通过一些反馈机制影响全球变化, 全球变化又影响人类的活动, 从而改变生态系统和气候变化的反馈机制。气候变化、人类活动和生态系统的反应方面的研究一直是一个热点和重大问题。但气候变化对生态系统的直接和间接影响极其复杂并有着巨大的时空变异性^[2]。不同的单个研究对气候变暖和人类活动的影响结论差异很大。尤其是当评估气候变化的影响时, 全球尺度的变化及反应比单个研究要重要得多^[3,4]。因此, 需要充分利用这些单个研究的数据并进行整合, 从而找到普遍的结论并发现差异。整合分析(Meta-analysis)正是这样一种专门对单个研究进行统计综合的技术

^[5], 且已经发展成为一种研究方法^[6]。

自 Glass^[7]首次提出 Meta-analysis 这一术语以来, 该方法在心理学、社会学、教育学、经济学、医学领域获得了充分的应用和发展, 并从 20 世纪 90 年代初引入生态学和进化生物学^[8]。Gurevitch 和 Hedges^[9]、Arnqvist 和 Wooster^[10]较早对整合分析在生态学和进化生物学中的应用进行了介绍和评述。1999 年《Ecology》杂志组织发表了整合分析在生态学中应用的专题, 系统地介绍了 Meta-analysis 在生态学中的应用实例、前景及存在的问题^[11]。1993 年赵宁等^[12]首次把它介绍进了中国医学界。目前这一方法已在医学领域得到广泛的应用, 主要应用于处理和对照实验的综合分析中, 判断处理的平均效应及影响强度和不同独立研究结果的变异性, 其结果可以用图表形式直观地进行表现。彭少麟等^[13]首次把这一方法引入了中国生态学界, 并对近年来生态学与医学中的整合分析进行了系统评述^[14]。

值得注意的是, 国际上整合分析在生态学中的应用已经得到了迅速的发展。近年来在全球变化大尺度生态学研究中也越来越多地应用整合分析, 尤

其是在研究陆地生态系统对全球变暖和大气中CO₂浓度倍增的响应等全球变化的热点问题中表现出很高的应用价值。但整合分析在中国生态学领域的实际应用尤其是在全球气候变化研究中的应用很少^[15,16]。本文介绍了整合分析方法,并对其在全球气候变化中的应用进行了述评,提出了将来的发展方向和应用前景。

1 整合分析方法

1.1 原理及步骤

在科学研究中,对于同一问题的大量试验,其研究结果也常常千差万别。需要将这些信息进行综合,得到更一般的结论,并发现差异及原因,指出将来研究的方向。整合分析正是这样一种方法。“Meta-analysis”一词最早由Glass^[7]在1976年研究心理治疗的功效时提出,定义为“以综合一系列单个研究结果为目的的统计分析”。现在一般认为,它是整合一系列独立的但有相关的假设的研究结果的定量统计方法。“Meta”一词源自希腊语,具有“在之后”的意思。中文对Meta-analysis的翻译多种多样,如“综合分析”、“整合分析”、“汇后分析”、“荟萃分析”、“二度分析”、“二次分析”、“超分析”、“共分析”、“再分析”等等。在生态学领域,多采用“整合分析”。传统的定性综合分析受主观判断、偏爱的影响,而整合分析把各个单个研究的结果综合起来,通过统计学处理得到一个总的结论,并且能够找出单个研究间的差异和原因,从而达到定量综述的目的,因而也被称为“分析的分析”。

像一般的科学研究一样,进行整合分析的基本

步骤包括提出问题、收集和评价数据、分析数据和得出结论。具体包括以下步骤(图1)^[5,6,17]。(1) 提出研究问题或假设。例如温度升高如何影响树木的生长?(2) 收集与研究问题相关的文献。为了减少出版偏见,需要通过各种途径来最大可能地收集已发表的和未发表的文献(包括期刊论文、会议论文、摘要、学位论文、研究报告等等),并制定文献纳入的标准,对纳入的文献进行质量评价。(3) 整理数据并分类。从符合要求的文献中摘录用于整合分析的数据信息,可以设计专用表格记录,一般包括基本信息、研究方法、测定结果、出版物类型等内容。(4) 选择合适的效应值和分析模型并进行计算。“效应值”(effect size)是整合分析中的一个核心概念。为了使单个研究的结果具有可比性及取平均,采用效应值来将研究结果标准化,它反映单个研究的效应大小。应根据文献中数据选择不同的效应值指标^[5,8,17]。如反应比 $R = X_e/X_c$ 适合于提供了平均值、样本大小和标准差的研究(X_e , X_c 分别为处理和对照的平均值)。检验纳入研究的异质性(一般采用卡方检验),根据异质性检验结果选择模型进行统计分析,包括固定效应模型、随机效应模型和混合模型。(5) 综合分析和解释。将单个研究的效应值进行合并(如加权,通常大样本的研究给予较多的权重),得到总平均效应值及置信区间,它表明影响的强度和大小,常常用一张非常直观的森林图(forest plot)来说明(图2)。讨论异质性的来源及其对效应合并值的影响。如果一些因素对纳入研究的结果有较大影响,则应考虑做亚组分析,如不同年龄的森林、不同的生态系统类型等。可通过亚组分析,进一步了解不同条件下的整合分析结果,使研究结果

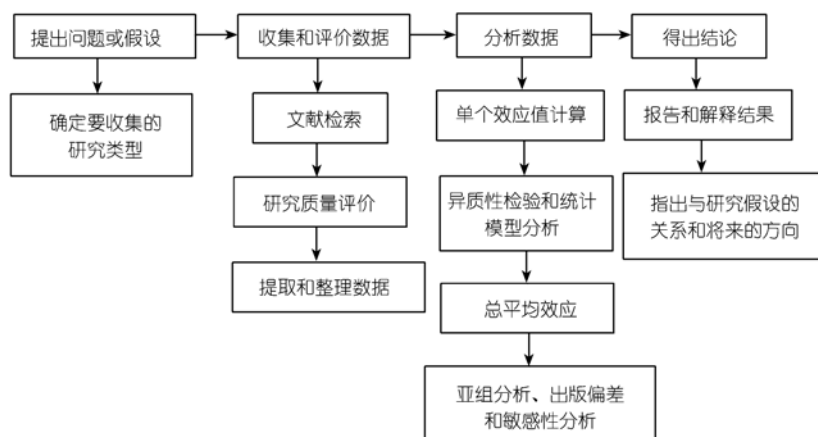


图1 整合分析的基本步骤

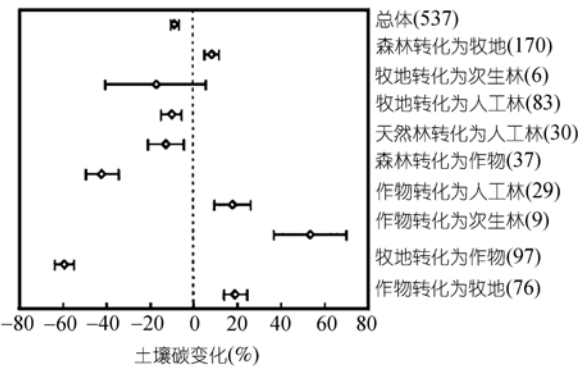


图 2 土地利用变化引起的土壤碳变化效应值及区间 (引自Guo等 [18])

更具针对性. 此外还要讨论各种出版偏见的识别和控制, 并进行敏感性分析等.

1.2 优势与不足

作为一种新的定量综合方法, 对它的争论也在一直进行着 [9,19,20]. 传统的数据综合分析属于叙述性综合法. 它虽然允许作者评价流行技术, 提出有争议的学术问题, 阐述作者的学术观点, 并对未来的研究方向和前景进行展望. 但在很大程度上它是主观的, 不能像整合分析那样提供定量的信息, 很难回答一些复杂的问题, 如 [8]: 总体效应是多少? 是否显著? 什么原因导致单个研究间效应的不一致? 整合分析的优势主要包括 [17,21]: 将同类研究结果进行定量综合, 能达到增大样本量, 改进和提高统计学检验功效的目的; 能最大限度地减少偏差, 定量估计研究效应的平均水平, 保证综述结论的客观性、真实性和可靠性, 对有争议甚至互相矛盾的研究结果得出一个较

为明确的结论. 通过整合分析能发现以往研究的不足之处, 揭示单个研究中存在的不确定性, 发现普遍的结论和单个研究间的差异, 提出新的研究课题和研究方向.

尽管如此, 整合分析还存在着一些不足和风险 [17,21], 如出版偏见、文献筛选的主观性、单个研究之间的非独立性等. 其中, 出版偏见是讨论最多的问题. 所谓出版偏见是指由于研究结果对文章的提交、审稿和编辑决定的影响产生的出版偏好 [22,23]. 如统计检验显著的文章更容易被发表. 因此产生了很多方法来检验出版偏见的存在 [24~28]. 当出版偏见存在时, 要谨慎地进行进一步的分析和结果解释 [19].

1.3 应用软件

伴随着整合分析方法的迅速发展和广泛应用, 许多专用软件也应运而生¹⁾. 表 1 列出了一些主要的软件. 除了专用软件外, 一些通用统计软件如 SAS, STAT 也开发了相应的整合分析功能. 其主要区别在于数据输入的格式、包含的效应值类型、统计模型的种类及是否包含累计整合分析、敏感性分析和绘图等方面. 其中 CMA, MetaWin, RevMan 和 Weasyma 均有友好的界面和丰富的功能(计算和绘图), 简单、易用, 包括效应值计算、固定和随机效应统计模型、异质性检验、亚组分析、出版偏见、累计整合分析、Meta 回归等基本功能; 而且 MetaWin 还提供了非参数检验和检验统计量间的转换功能, CMA 还包括了敏感性分析. 根据我们对 Elsevier, Springer 和 Blackwell 在线期刊发表论文的初步统计, 文中提到应用整合分析软件排在前 3 位的是: RevMan(约 270

表 1 Meta-analysis 主要软件

软件名称	网址	说明
Comprehensive meta-analysis(CMA)	http://www.meta-analysis.com/	商业软件/Windows
MetaWin	http://www.metawinsoft.com	商业软件/Windows
DSTAT	http://www.erlbaum.com	商业软件/Dos
Weasyma	http://www.weasyma.com/	商业软件/Windows
Review Manager(RevMan)	http://www.cc-ims.net/RevMan/	免费软件/Windows
Meta-DiSc	http://www.hrc.es/investigacion/metadisc_en.htm	免费软件/Windows
Meta	http://userpage.fu-berlin.de/~health/meta_e.htm	免费软件/Dos
EasyMA	http://www.spc.univ-lyon1.fr/easyma.dos/	免费软件/Dos
MetaTest	http://www.medepi.net/meta/MetaTest.html	免费软件/Dos
Meta calculator	http://www.lyonsmorris.com/lyons/metaAnalysis/index.cfm	免费在线计算
SAS/S-plus/STAT/SPSS	http://www.sas.com, http://www.insightful.com/, http://www.stata.com, http://www.spss.com	通用软件具有整合分析功能

1) <http://www.um.es/facpsi/metaanalysis/software.php>

篇)、MetaWin(80篇)和DSTAT(约60篇)。

2 整合分析在全球气候变化中的应用

自从Curtis^[29]首次将整合分析引入全球气候变化研究以来,这一方法在该领域得到了迅速的发展。图3显示了近年来发表的应用整合分析进行全球气候变化方面的研究论文数量,可以看出,应用整合分析进行气候变化研究大体呈增加趋势。主要包括以下几个方面:

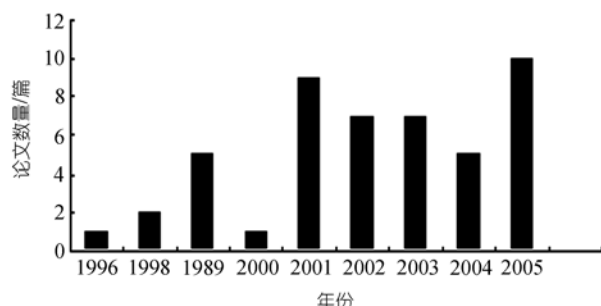


图3 1996年以来发表的全球气候变化的整合分析论文数量

2.1 生态系统对CO₂浓度升高的响应

CO₂浓度升高和全球变暖已成为一个基本事实。CO₂不仅是温室效应的一个主要气体,而且还是光合作用、植物生长和生态系统生产力的一个主要因素。CO₂浓度增加引起温度升高,从而改变陆地生态系统的碳循环。生态系统对不同CO₂浓度升高的反应对全球碳循环极为重要^[30,31],因此成为生态学界关注的一个重大问题。应用整合分析研究生态系统对CO₂浓度升高的响应主要包括一些生态学过程及关系,前者如植物的光合和呼吸,生长和竞争,生产力,叶片气体交换和传导,土壤呼吸,土壤碳氮累计等过程;后者如光环境和生长间的关系,光合作用和叶片氮间的关系等。

CO₂浓度升高对植物生长的影响大体为显著的正效应。Curtis和Wang^[32]对500多个研究的整合分析表明,植物总生物量显著增加28.8%,但受环境胁迫因子的影响较大,而不同类型和CO₂暴露时间的影响较小。Wand等^[33]采用混合效应模型对野生C₃和C₄植物对CO₂浓度升高的反应进行了整合分析,发现C₃和C₄植物的总生物量都显著增加,分别为33%和44%。但它们的形态发展有所不同,前者产生了更多的幼芽,叶面积增加较少;而后者叶面积增加较多,幼芽数较少。叶片的气孔导度显著减少,水利用效率显著增加,C同化率也都较高。研究说明对基于不同

光合作用机理的植物随着CO₂浓度升高,C₄植物在某些地区将失去其竞争优势的预测,为时过早。郑凤英等^[16]对84篇文献有关植物对大气CO₂浓度倍增响应进行整合分析发现,环境因素(土壤水分亏缺、土壤低氮、高温和高浓度O₃)显著地影响植物对高CO₂浓度的响应。无任何胁迫时,C₃植物的总生物量增加了30.01%。Kersters^[34]按耐阴性来分组将树木生长对CO₂浓度升高的反应进行了分析,发现总的来说,相对耐荫的树种随CO₂浓度升高,其相对生长率增加较多。Poorter等^[35]对单个植物的生长和竞争对CO₂浓度升高的反应进行了整合分析,发现生物量的增加率在不同物种或实验间变化很大,但大小变化是一重要的因素;速生的草本C₃植物较慢生的草本C₃植物和C₄植物反应更强烈;CAM植物和木本植物表现中度反应;而在竞争环境中表现则不同。因此,单个植物的生物量增加率不能用来预测竞争环境中的植物生长。

Medlyn等^[36]总结了欧洲森林的15个光合作用实验的模型参数,并检验CO₂浓度升高对这些参数的影响,表明它对光合作用率的提高十分显著。但光合作用率对CO₂浓度升高的适应性表现为比正常环境下减少10%~20%。尤其是不同功能组(针、阔叶)、长期实验与短期实验、成熟木与幼苗幼树间的气孔对CO₂浓度升高的反应存在差异。Ainsworth等^[37]首次用整合分析对单个作物(大豆)的包括生理、生长和收获的变量进行了分析。发现固氮植物的光合作用对CO₂的响应要高,但光合适应性较低;当考虑植物大小和个体发生学时,生物量在器官间的分配不会受到CO₂浓度升高的影响;这与以前研究结论一致。但发现盆栽实验中盆的大小显著影响C同化的反应,这与通常的结论有所不同。从而说明了野外实验对研究植物对全球变化的反应十分重要。虽然关于CO₂浓度升高对植物的影响的实验为植物的生理反应提供了基础,但大多数都来自于控制环境下的物种试验。利用这种封闭系统研究CO₂浓度升高对植物的影响有很多严重的潜在局限,如扩大了光合和产量的适应性^[38],而FACE实验能够研究自然条件下CO₂浓度升高对植物和生态系统的影响。Ainsworth和Long^[39]用整合分析对四大洲12个大尺度的FACE实验(475~600 μL/L)进行了分析。结果证明了以前温室试验条件下的一些结论:光饱和碳吸收、日C同化、生长和地上产量都增加。但也发现了不同的结论,如发现树木比草本

植物对 CO_2 更加敏感;谷类作物产量的增加比以前的温室实验要少得多等.该研究为生活在乡土环境和田间的作物对 CO_2 的反应提供了最合理的估计.类似的研究还有Long等^[40],结果为光饱和 C_3 植物光饱和和光合作用率增加了34%,产量增加了20%;但核酮糖-1,5-二磷酸的再生能力没有变化且对光合作用率没有影响,这与温室实验的结论不同.

在生态系统的C、N变化方面,Luo等^[41]对植物中的C、N过程对 CO_2 浓度升高的反应整合分析发现:与对照相比, CO_2 浓度升高下植物的枝、根和整个植物中的C库分别增加了22.4%,31.6%和23%,N库分别增加了4.6%,10%和10.2%.这种 CO_2 引起的C、N库大小变化在不同 CO_2 设备、生态系统类型和N的处理间的巨大变异是由于不同的C、N过程对 CO_2 浓度升高的响应不同.因此,在预测C累积时,需要将不同的C、N循环和相互作用机制一起考虑.

叶气孔对环境的反应及对光合和呼吸的控制是植物生长的一个关键变量^[42].一般认为, CO_2 浓度增加会导致气孔导度降低,且变化很大.Curtis等^[32]的整合分析结果表明, CO_2 浓度升高,气孔导度下降11%,但不显著.Medlyn等^[43]用欧洲13个野外长期试验进行了整合分析,发现气孔导度显著地减少了21%,幼龄比老龄树木、阔叶比针叶、水分限制型树木比养分限制型树木的反应要强,但没有发现气孔导度对 CO_2 浓度的适应性.结合Curtis等^[32]的数据Medlyn等^[43]进一步分析发现,盆栽和根自由生长下树木气孔导度反应的差异并不显著,但短期和长期实验的结果差异显著,短期实验(小于1年)气孔导度无显著变化,而长期(1年以上)则显著减少23%.与早期的研究相比^[36],长期实验的结果有更好的一致性.因此长期的研究十分重要.郑凤英等^[16]、Ainsworth和Long^[39]及Long等^[40]的FACE试验的整合分析也证明叶面积和气孔导度下降.

叶片暗呼吸对全球碳循环极为重要,多数研究都表明叶片暗呼吸和N都显著减少^[29,32].Wang和Curtis^[44]的研究表明, CO_2 浓度升高时,基于质量的暗呼吸(R_{dm})显著下降18%,但基于面积的暗呼吸(R_{da})显著增加8%;不同组间 CO_2 对 R_{dm} 和 R_{da} 的影响有显著差异,如草本植物的 R_{da} 增加,但木本植物保持不变;证明了叶片暗呼吸对 CO_2 浓度升高的强烈依赖性,整个陆地生态系统通过叶片暗呼吸损失的碳将随着 CO_2 浓度增加而增加.

理解叶面积指数(LAI)对 CO_2 浓度升高的反应也很重要^[45].以前的研究结论并不一致^[46,47].Ainsworth^[37]对大豆的生理、生长和收获整合分析表明,LAI平均增加了18%.但FACE试验的整合分析则认为没有显著的增加^[40].

光合率和叶片N含量的关系是光合作用模型的一个重要部分.Peterson等^[48]用回归模型和整合分析相结合来检验物种的光合率和叶片N含量的关系在群落、植被类型内是否比群落、植被类型间更相似,以及 CO_2 浓度升高对二者关系的影响,发现约半数群落和植被类型内的这种关系在正常 CO_2 浓度下更相似,而不同物种间的光饱和和光合率和叶片N含量的关系在 CO_2 浓度升高时变化很大.

繁殖性状也是预测群落或生态系统对全球气候变化的一个重要特征.Jablonski等^[49]首次对植物繁殖性状的 CO_2 反应进行了整合分析,其目的是计算 CO_2 增加对繁殖数量和质量平均效应,并研究不同研究间 CO_2 效应差异的原因.发现 CO_2 增加导致花增加19%,果实增加18%,种子增加16%,单个种的质量增加4%,种子总质量增加25%,种子N浓度降低14%.种植作物和野生物种的总质量对 CO_2 增加的反应没有差异,但种植作物比野生物种有更多的质量用于繁殖,产生更多的花和种子.豆类的种子N不受 CO_2 增加的影响,但大多数非豆类的种子N则显著减少.结果证明了不同种类、不同功能组间对 CO_2 增加的繁殖响应有重要的差异.作物对 CO_2 增加反应比野生物种更敏感.许多物种的差异及种子N的显著下降对来自自然和农业生态系统的功能具有广泛的意义.

土壤碳在全球碳平衡中有重要的作用.Jastrow等^[50]对不同的土壤类型和环境条件的 CO_2 浓度升高试验的整合分析表明,2~9年内,土壤C有5.6%的增加.Luo等^[41]的研究也发现, CO_2 浓度升高,枯落物和土壤中的C库分别增加了20.6%和5.6%.土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的一个关键部分.土壤各组分呼吸所利用的碳源不同,对土壤呼吸的贡献也有差异,对全球变化的作用也不同.因此,把土壤 CO_2 通量分解为自养和异养部分得到了越来越多的关注^[51,52].Subke等^[53]的整合分析发现随着年土壤 CO_2 通量(R_s)的增加,异养呼吸提供的 CO_2 通量(R_h)的比例下降;北方针叶林的 R_h/R_s 比温带或热带阔叶林显著地高,但温带或热带阔叶林与其他森林类型间无显著差异; R_h/R_s 比随着年龄表现出一致的下降趋势,不

同年龄组间无显著差异;通量分解的时间间隔对比率的影响并不一致.说明树冠中较高的碳同化没有转为生态系统较高的碳沉降,而是通过植物的根快速转移返回大气.

Barnard等^[54]分析了硝化作用、反硝化作用和土壤 N_2O 通量对 CO_2 浓度升高的反应. CO_2 浓度升高对 N_2O 通量的影响不显著,但硝化酶活动和反硝化酶活动都显著减少.虽然总硝化作用没有受 CO_2 浓度升高而改变,但净硝化作用增强.

植物组织的化学成份变化对生态系统有着长期重要的影响.Norby等^[55]对 CO_2 浓度升高对叶片凋落物的化学和植物组织的分解进行了分析,发现天然开始衰老的叶凋落物的N的浓度比正常降低7.1%.与C、N循环相比, CO_2 浓度升高对分解率的影响很小.此外,Knorr等^[56]研究了外部N的添加与枯落物分解的关系,并分析了实验类型(野外试验-实验室培养)、施肥率、枯落物质量、周围N沉积水平、枯落物袋网眼大小、分解时间和气候等对这种关系的影响.整体来说,N的添加对枯落物的分解影响不显著.但施肥率、周围N沉积水平和枯落物质量会对其产生显著的影响.

Treseder^[57]对菌根丰富度的 CO_2 响应、Alberton等^[58]对外生菌根真菌和内生菌根真菌、外生菌根植物和内生菌根植物对 CO_2 浓度升高的反应也进行了整合分析.

2.2 生态系统对全球变暖的响应

全球变暖的效应对于环境以及人类的生活影响深远且变化多端.不断上升的气温已经开始影响生态系统.在生物学影响方面,Arft等^[59]对世界苔原植物实验(ITEEX)13个不同地点的1~4年的数据进行了整合分析,研究全球变暖对植物的生物气候学、生长和繁殖的影响,指出对变暖的不同反应表明,其主要的驱动力因不同气候带、功能团和时间各异,如草本比木本植物有更强和更一致的生长和生殖反应.最近,Walker等^[60]又对苔原区域的11个地点的变暖实验进行了整合分析,发现变暖增加了落叶灌木和禾本草类的高度和盖度,但减少了苔藓和地衣的盖度,降低了物种多样性.在更长的时间(6年)里,草本植物和灌木表现出较大的变化,与Arft等^[59]的草本植物有最强的起初生长反应的研究结果略有不同.这进一步说明了变暖实验中长期研究的重要性.Parmesan和Yohe^[3]对物种分布边界的变化和物候改变

进行了估计,发现物种以每10年6.1 km的平均速度向北极移动;每10年春季提前2.3天,且统计上都显著.这些研究的证据强烈支持全球变暖对动物和植物的显著影响是显而易见的.此外,Root等^[61]对关于全球变暖的(包括1473个物种在内)143个研究进行了整合,表明有80%的物种表现出的变化与温度相关,在高海拔地区尤其深受影响,因为这些地区温度上升得比低海拔地区明显;估计春天每10年提早5天到来.

土壤碳对温度的敏感性在全球碳循环和其对气候变化的反馈中起着重要作用^[62].但土壤碳对温度的长期敏感性仍是气候变化预测中不确定的因素^[56].近年来在土壤呼吸和土壤有机物分解对温度的敏感性方面进行了大量的研究^[56,62,63~68],但结论并不一致.如一些研究认为温度升高增加了土壤有机物的分解^[63,68],而另一些研究则不同^[64~66].虽然单个研究表现出很大的变异性,但整合分析表明^[2]0.3~6°C的土壤增温(2~9年试验)显著地增加土壤呼吸率约20%,净N矿化显著增加46%;其效应大小随着时间的增加而减少,同地理、气候或其他环境变量没有显著的相关关系.这指出了在不同时空尺度上理解具体影响因子的重要性.此外,Barnard等^[54]分析了硝化作用、反硝化作用和土壤 N_2O 通量对温度的反应,发现温度升高对硝化酶活动、反硝化酶活动和净硝化作用的影响都不显著.Dormann和Woodin^[69]对北极的气候变化实验分析,表明温度升高显著增加了植物的生殖和生理反应,从而可能对植物生物量产生正向反馈.未来北极植物变化的驱动可能是增加的有效养分,例如温度升高引起的矿化和N分解的增加.北极植物对环境变化的反应差异很大,灌木和草本对温度升高反应最强.这提出了划分植物功能型(组)的一种新方法,即根据植物对环境变化的反应来分组.Raich等^[70]对热带湿润成熟常绿林研究,发现枯落物量、树木生长和地下碳分配都随年均温的增加而显著增加.温度对地上生物量的周转率没有显著影响.土壤有机物的累计随温度增加而减少,表明温度升高引起的土壤有机物的分解率比NPP要快.

Blenckner等^[71]检验了北大西洋的振动对生活史事件的发生时间、有机体生物量及不同营养水平的生物量的影响,发现对淡水、海水和陆地生态系统,北大西洋的振动对所有环境的生活史事件发生时间的影响相似,暖冬使生活史事件发生时间提早,但在高

纬度地区不显著;对生物量影响的强度与北大西洋的振动显著相关,在水生生态系统影响为正,在陆地生态系统为负;对不同营养水平的生物量的影响差异不显著。

对温度和CO₂浓度同时升高的影响的整合分析较少,也许与这方面的单个研究相对较少有关。Zvereva等^[72]对温度和CO₂浓度同时升高对草本植物和草食动物的相互关系进行了整合分析。温度和CO₂同时升高时,植物N的浓度和C/N比下降,但只升高温度时没有显著的影响。食草昆虫的行为在温度升高和CO₂浓度增加时分别受到不利、有利的影响,但二者同时增加时不受影响。温度和CO₂同时升高时有三种类型的关系:(1)对CO₂升高的反应由于温度而减弱(N, C/N, 叶的硬度);(2)对CO₂升高的反应不依赖于温度(如糖和淀粉, 裸子植物中的萜, 昆虫的活动);(3)反应只在二者同时作用下出现(裸子植物中的氮, 木本组织中的酚醛和萜)。CO₂升高对食草动物的负效应可通过温度升高而缓和。因此, CO₂浓度升高的研究结论不能直接扩展至现实的气候变化方案。

2.3 生态系统对O₃的响应

到2050年, O₃浓度将增加23%^[4]。这会导致植物产量和繁殖的实际减少。因此植物对O₃浓度增加的反应也得到广泛的研究。单个研究O₃对植物的影响差异很大,其效应受到暴露动态、养分和湿度状况、物种及栽培变种的影响。Morgan等^[73]将大豆对O₃浓度升高的反应进行了整合分析,发现与生长在无O₃环境中的植物相比,成熟时地上生物量干重平均减少了34%,种子产量减少24%;O₃的影响随发展阶段而增加,但都是温室实验。Searles等^[74]首次用整合分析研究通过增加UV-B来模拟O₃减少对野生维管束植物的影响,包括叶片色素、植物生长和形态、光合作用。结果表明:一些形态参数(如植物高和单位面积的叶量)对UV-B增加有着轻微或无反应,叶片的光合作用过程和光合色素也不受影响,枝的生物量和叶面积受到中等程度的减少。

2.4 土地利用变化或管理对气候变化等的影响

土地利用变化和土地利用管理都影响着CO₂, CH₄和N₂O的源和汇,并已引起广泛关注。Guo和Gifford^[18]对74篇关于土地利用变化对土壤碳贮量影响的文献进行了整合分析,发现从牧地变成人工林,土壤C下降10%;乡土森林到人工林下降13%;乡土树种到农作物下降42%,牧地到耕地下降59%。从乡土

森林到牧地,土壤C增加8%,耕地到牧地增加19%,耕地到人工林增加18%,耕地到次生林增加53%。一种土地利用变化减少土壤C,相反的过程常常增加土壤C。Ogle等^[75]对温带和热带地区湿润和干旱气候下农业土地利用变化和管理对土壤有机碳影响进行整合分析,发现管理影响对气候的敏感性按土壤有机碳的变化从小到大依次为:热带湿润、热带干旱、温带湿润、温带干旱;农业管理导致的土壤有机碳的变化随气候条件不同而不同,这些气候条件影响着驱动土壤有机质动态的植物和土壤过程。Zinn等^[76]将巴西的土地利用对土壤有机碳影响的趋势和幅度进行分析,发现集约经营(每年耕作)的土地利用系统下土壤有机碳在0~20 cm深处显著地减少10.3%;而非集约经营系统则不同,整体来说对土壤的0~20 cm和0~40 cm处的有机碳无显著影响,但粗结构土壤的有机碳在0~20 cm和0~40 cm处显著下降20%。

了解森林经营对土壤C, N的影响非常重要。一方面它是决定肥力的重要变量,另一方面它在土壤作为全球尺度的碳源或汇作用方面非常重要。Johnson和Curtis^[77]对26篇文献的73个观测数据分析发现:总的来说,森林采伐对土壤C, N的影响较小,但不同采伐类型和物种间则有显著差异,原木采伐导致土壤C, N增加18%,而全树利用导致6%的减少。施肥和固N植物都导致了土壤C, N的显著增加。van Kooten等^[78]和Manley等^[79]用整合回归分析分别比较了传统的耕作制度向免耕耕作转变的费用、碳的累计、以及通过林业活动实现碳固定的成本,发现农业碳汇随区域和作物变异很大,免耕耕作制度增加的土壤碳受作物类型、区域、测定的土壤深度及免耕时间长短的影响。Geist和Lambin等^[80]也对热带林毁林的驱动力进行了整合分析,发现毁林是受多种因子影响的复杂过程,而对这些因素相互作用的详细理解是通过模型模拟来预测土地覆盖类型变化的前提。

2.5 干扰对生态系统生物地球化学循环的影响

Wan等^[81]研究了火对N库的6个变量的影响,发现火显著地减少燃料N量、增加土壤铵和硝酸盐的有效性,但对燃料N的浓度、土壤N总量或浓度没有影响。火对N的影响随植被类型、燃料类型、燃料消耗量和比例、火后时间和取样深度不同而不同。不同的生态系统有着不同的火后N恢复的机制和能力,因此应针对不同生态系统制定适当的火管理措施。Johnson和Curtis^[77]的研究也表明:整体上火对土壤C, N

没有显著的影响;但火后时间有显著的影响,与对照相比,火后10年土壤C、N增加.不同处理间也有显著差异,计划火导致土壤C降低,而自然火则有较高的土壤C.

可以看出,整合分析已被应用到全球气候变化的诸多领域,而生态系统对CO₂浓度升高和全球变暖的响应、人为活动的影响仍然是一个重点领域.因为它们对全球变化极为重要且在这一领域进行了大量的实验并仍在进行着.总的来说,整合分析尤其是对许多有争议的问题,它能定量地提供一种统计上的普遍结论,并能发现差异和提示差异背后的原因,指出新的研究方向.

3 问题与展望

3.1 问题

(i) 整合分析的一些共性问题仍然存在.如出版偏见、效应值的选择、选择文献时面临数据缺失的困难、文献的质量评估、单个研究之间的非独立性等^[8,11,14,23,82],仍将是整合分析中需要考虑的问题.其中关于出版偏见的讨论最多,因为它直接影响整合分析的结论.最近已有专著来系统讨论出版偏见的类型、可能的机理、存在的经验证据、描述它的统计方法和如何避免出版偏见等问题^[28].检验出版偏见存在的方法包括发表的统计上显著的文章所占的比例、漏斗图法和一些统计方法(失效安全数、加权分布、截尾抽样、秩相关方法等)^[83].在全球气候变化的研究中,反应比R的对数是用得最多的效应值指标.其好处是它将效应比线性化,小样本时能提供更多的正态分布,尤其是当小对样本的变化不敏感时^[4,84].从根本上说,整合分析的结论取决于单个独立研究的质量和数量.一些研究没有详细地报道样本大小和方差,使得整合分析中的加权分析难以进行.要有严格合理的研究设计和文献检索策略,严格的文献筛选和质量评价.但是,诸如发表偏见和数据缺失等问题在传统的文献综述中也存在,并不是整合分析本身的问题.需要作者对自己的实验研究进行更详细的报道以提高文章质量;另一方面,编辑策略上要出版所有高质量的研究,而不论其结果如何.这些都会改善整合分析的结果.

(ii) 整合分析存在被错用的危险,必须十分谨慎地分析得到的结果.如Jablonski等^[49]利用整合分析对农作物和野生植物繁殖对CO₂升高的反应进行

研究后,认为相互作用的胁迫因子不是植物繁殖对CO₂浓度升高反应的重要驱动;而Körner^[85]对此结论提出了质疑,指出该研究中数据没有严格按照生长条件的肥力进行分层,因此,整合分析提供了非常有限的进展,除非对供试植物的资源状况有很清晰的认识.CO₂效应的整合分析必须说明供试植物的资源状况,植物年龄是另一个进行数据分组时的重要指标,建议数据处理的重点应从以技术或分类为核心的指标转向那些控制植物汇活动的指标,如养分、湿度和发展阶段.Lortie和Callaway^[86]对Maestre等^[87]的整合分析进行了进一步的分析,认为Maestre等^[87]的关于“干旱半干旱地区拒绝胁迫-梯度假设”的结论不能接受.因为能充分反映不同梯度的样本点的文献数量不足,许多文献并未按照胁迫梯度设计.采用更严格的文献选择原则、改变研究间的梯度长度等则不支持原来的结论.

(iii) 整合分析中的一些方法仍未在全球气候变化中得到应用.正如Gates^[88]所说,很多在医学上用来减少误差、提高综述的精度、可靠性和有用性的方法在生态学上仍未得到广泛应用.如累计整合分析(cumulative meta-analysis)、整合分析中的回归分析(meta-regression)、敏感性分析(sensitivity analysis)等仍未在全球气候变化中得到应用.累计整合分析就是按一定的原则如发表年代、样本数等逐个加入进行一系列的整合分析,从而揭示效应值大小的变化趋势,它还可以检验出版偏见,对更新整合分析的结果也很有用^[89].效应大小的时间变化最近被发现是生态学上的一个普遍现象^[90].回归分析可以定量地反映数据、方法及相关的连续变量等对效应值的影响并可以进行预测.由于整合分析中仍有部分主观因素,为保证结论的稳健性,需要对整合分析的结果进行敏感性分析.敏感性分析主要是检验采用不同的数据处理或模型方法后研究结论有无变化,如选用不同模型时效应合并值点估计和区间估计的差异;按文献质量评价标准从纳入的文献中剔除质量差的文献后重新进行整合分析;根据样本量的大小对纳入的文献作分层整合分析;改变纳入和剔除标准等^[91].这些在全球气候变化研究中都仍有一定的潜力.

(iv) 需要定期对某一主题的整合分析进行更新.科学证据的积累是一个动态过程,整合分析的平均效应值不可能在某一时间点得到满意的结果.即使对同一主题,在不同时间进行的整合分析可能得到

不同的结论. 因此, 需要定期对整合分析进行更新, 不断加入新的研究结果.

(v) 需要重视交互作用的影响和长期实验. 气候变化的影响领域涉及种群遗传学、生态生理学、生物气候学、植物地理学、古生物学、模型模拟和社会经济等领域. 目前在一些领域整合分析还未得到应用, 如气候变化对森林病虫害发生的影响、生态系统响应的模型模拟方面、气候变化对某一生态系统整体的影响等. 此外, 较少有涉及因子间交互作用的研究^[31], 但因子的交互作用在气候变化中是客观存在的事实, 如土壤呼吸速率除受温度、湿度的影响外, 还受其他因子(如凋落物、土壤PH值、土壤深度和植物生长状况等)的控制. 各种因子叠加在一起, 对土壤呼吸产生复杂的影响. 在FACE实验中, 虽然CO₂ 浓度升高增加了NPP, 但CO₂ 与温度、N和降水的相互作用对NPP的影响比正常情况下要少^[92]. 这些都说明了交互作用的重要性. 气候变化的影响随着时间而变化, 尤其是与树木的长周期性相比, 实验研究通常要短得多, 目前最长的森林FACE试验仅为 10 年¹⁾, 需要开展长期的研究.

3.2 在中国气候变化研究中的应用前景

在气候变化影响的研究中, 全球格局的变化比单个研究要重要得多. 因此, 整合分析已经越来越多地应用在全球变化研究中, 尽管它存在一些缺陷和风险, 但与传统的叙述性综述相比, 仍被证明是一种更有用的定量综合单个研究的统计技术, 它提供了一种纵观全局的工具, 从而在更大的时空尺度上回答单个研究无法完全回答的问题. 中国的气候复杂多样, 从南到北跨热带、亚热带、暖温带、温带、寒带等气候带, 植被类型和土地利用类型多样, 在全球生态系统中起着重要的作用. 另一方面, 《京都议定书》生效后, 中国因其排放发展情况作为气候变化问题的关键, 政府面临着巨大的挑战和机遇, 需要在应对气候变化方面进行科学的决策. 中国科研工作者在气候变化方面进行了大量的实验, 积累了大量的原始数据和实验结果, 如中国陆地生态系统研究网络 (ChinaFlux)²⁾, 目前拥有 8 个微气象和 17 个箱式/气相色谱观测站, 覆盖了 10 种不同类型的陆地生态系统, 对不同生态系统 CO₂, CH₄ 和 N₂O 的排放量进

行长期连续测定; 中国生态系统研究网络(CERN)³⁾, 由 36 个野外试验站组成, 包括农田、森林、草地、沙漠和水体等生态系统. 有必要将这些数据和研究成果进行整合, 从而在更大的目标尺度上回答单个研究无能为力的全局性问题, 为政府部门应对气候变化的决策提供科学依据. 可以预料, 整合分析方法将会在中国的全球气候变化研究中得到更多的重视和更广泛、深入的应用和发展.

致谢 感谢两位审稿人提出的建议. 本研究得到中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“人类活动与生态系统变化”(批准号: CXTD-Z2005-1), 加拿大 NSERC 和中国国家留学基金管理委员会的共同资助.

参 考 文 献

- 1 IPCC. Climate change 2001- synthesis report: third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001
- 2 Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 2001, 126: 543—562[DOI]
- 3 Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421: 37—42[DOI]
- 4 van Wijk M T, Clemmensen K E, Shaver G R, et al. Long-term ecosystem level experiments at Toolik Lake, Alaska, and at Abisko, Northern Sweden: generalizations and differences in ecosystem and plant type responses to global change. *Glob Change Biol*, 2003, 10(1): 105—123[DOI]
- 5 Hedges L V, Olkin I. *Statistical Methods for Meta-analysis*. New York: Academic Press, 1985
- 6 Stuhlmacher A F, Gillespie T L. Managing conflict in the literature: Meta-analysis as a research method. *Int Negot*, 2005, 10(1): 67—78[DOI]
- 7 Glass G V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educ Res*, 1976, 5: 3—8
- 8 Gurevitch J, Curtis P S, Jones M H. Meta-analysis in ecology. *Adv Ecol Res*, 2001, 32: 199—247[DOI]
- 9 Gurevitch J, Hedges L V. Meta-analysis: combining the results of independent experiments. In: Scheiner SM, Gurevitch J, eds. *Design and Analysis of Ecological Experiments*. London: Chapman and Hall, 1993. 378—425
- 10 Arqvist G, Wooster D. Meta-analysis: synthesizing research findings in ecology and evolution. *Trends Ecol Evol*, 1995, 10: 236—240[DOI]
- 11 Osenberg C W, Sarnelle O, Cooper S, et al. Resolving ecological questions through meta-analysis: goals, metrics and models. *Ecology*, 1999, 80: 1105—1117[DOI]

1) <http://c-h2oecology.env.duke.edu/site/face.html>

2) <http://www.chinaflux.org>

3) <http://www.cern.ac.cn>

- 12 赵宁, 余顺章. Meta-analysis: 一种新的定量综合方法. 中国慢性病预防与控制, 1993, 1 (6): 277—281
- 13 彭少麟, 唐小焱. Meta 分析及其在生态学上应用. 生态学杂志, 1998, 17(5): 74—79
- 14 柳江, 彭少麟. 生态学与医学中的整合分析. 生态学报, 2004, 24(11): 2627—2634
- 15 郑凤英, 彭少麟. 捕食关系的 Meta 分析. 生态学报, 1999, 19(4): 448—452
- 16 郑凤英, 彭少麟. 植物生理生态学指标对大气 CO₂ 浓度倍增响应的整合分析. 植物学报, 2001, 43(11): 1101—1109
- 17 Rosenthal R, DiMatteo M R. META-ANALYSIS: recent developments in quantitative methods for literature review. *Annu Rev Psychol*, 2001, 52: 59—82[DOI]
- 18 Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 345—360[DOI]
- 19 Kotiaho J S, Tomkins J L. Meta-analysis: can it ever fail? *Oikos*, 2002, 96: 551—553[DOI]
- 20 Jennions M D, Møller A P, Curie M, et al. Meta-analysis can “fail”: reply to Kotiaho and Tomkins. *Oikos*, 2004, 104: 191—193[DOI]
- 21 Noble G H. Meta-analysis: methods, strengths, weaknesses, and political uses. *J Lab Clin Med*, 2006, 147: 7—20[DOI]
- 22 Song F, Eastwood A J, Gilbody S, et al. Publication and related biases. *Health Technol Asses*, 2000, 4: 1—115
- 23 Møller A P, Jennions M D. Testing and adjusting for publication bias. *Trends Ecol Evol*, 2001, 16: 580—586[DOI]
- 24 Duval S, Tweedie R. Trim and fill: a simple funnel-plot-based method of testing and adjusting for publication bias in meta-analysis. *Biometrics*, 2000, 56: 455—463[DOI]
- 25 Duval S, Tweedie R. A nonparametric “Trim and Fill” method of accounting for publication bias in meta-analysis. *J Am Stat Assoc*, 2000, 5: 89—98[DOI]
- 26 Egger M, Davey S G, Schneider M, et al. Bias in meta-analysis detected by a simple graphical test. *Br Med J*, 1997, 315: 629—634
- 27 Macaskill P, Walter S, Irwig L. A comparison of methods to detect publication bias in meta-analysis. *Stat Med*, 2001, 20: 641—654[DOI]
- 28 Rothstein H R, Sutton A J, Borenstein M. Publication bias in meta-analysis-prevention, assessment and adjustments. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 1—374
- 29 Curtis P S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. *Plant Cell Environ*, 1996, 19: 127—137[DOI]
- 30 Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. Is there a trade-off between the plant's growth response to elevated CO₂ and subsequent litter decomposability? *Oikos*, 2003, 103: 17—30[DOI]
- 31 Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world. *New Phytol*, 2004, 162: 281—293[DOI]
- 32 Curtis P S, Wang X. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on woody plant growth, form, and function. *Oecologia*, 1998, 113: 299—313[DOI]
- 33 Wand S J E, Midgley G Y F, Jones M H, et al. Response of wild C₄ and C₃ grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO₂ concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. *Glob Change Biol*, 1999, 5: 723—741[DOI]
- 34 Kerstiens G. Meta-analysis of the interaction between shade-tolerance, light environment and growth response of woody species to elevated CO₂. *Acta Oecol-Int J Ecol*, 2001, 22: 61—69[DOI]
- 35 Poorter H, Navas M L. Plant growth and competition at elevated CO₂: on winners, losers and functional groups. *New Phytol*, 2003, 157: 175—198 [DOI]
- 36 Medlyn B E, Badeck F W, De Pury D G, et al. Effects of elevated CO₂ on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. *Plant Cell Environ*, 1999, 22: 1475—1495[DOI]
- 37 Ainsworth E A, Davey P A, Bernacchi C J, et al. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 695—709[DOI]
- 38 Morgan P B, Mies T A, Bollero G A, et al. Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean. *New Phytol*, 2006, 170: 333—343[DOI]
- 39 Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol*, 2005, 165: 351—372[DOI]
- 40 Long S P, Ainsworth E A, Rogers A, et al. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Annu Rev Plant Biol*, 2004, 55: 591—628[DOI]
- 41 Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53—63
- 42 Morison J I L. Increasing atmospheric CO₂ and stomata. *New Phytol*, 2001, 149: 154—158[DOI]
- 43 Medlyn B E, Barton C V M, Broadmeadow M S J, et al. Effects of elevated CO₂ on photosynthesis in European forest species: a meta-analysis of model parameters. *New Phytol*, 2001, 149: 247—264[DOI]
- 44 Wang X Z, Curtis P. A meta-analytical test of elevated CO₂ effects on plant respiration. *Plant Ecol*, 2002, 161: 251—261[DOI]
- 45 Dermody O, Long S P, DeLucia E H. How does elevated CO₂ or ozone affect the leaf-area index of soybean when applied independently? *New Phytol*, 2006, 169: 145—155[DOI]
- 46 Drake B G, Gonzalez-Meler M A, Long S P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂. *Annu Rev Plant Physiol*, 1997, 48: 609—639[DOI]
- 47 Cowling S A, Field C B. Environmental control of leaf area production: implications for vegetation and land-surface modeling. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17: 1—14
- 48 Peterson A G, Ball J T, Luo Y Q, et al. The photosynthesis-leaf nitrogen relationship at ambient and elevated atmospheric carbon dioxide: a meta-analysis. *Glob Change Biol*, 1999, 5: 331—346[DOI]
- 49 Jablonski L M, Wang X Z, Curtis P S. Plant reproduction under elevated CO₂ conditions: a meta-analysis of reports on 79 crop and wild species. *New Phytol*, 2002, 156: 9—26[DOI]
- 50 Jastrow J D, Miller R M, Matamala R, et al. Elevated atmospheric carbon dioxide increases soil carbon. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 2057—2064[DOI]
- 51 Eliasson P E, McMurtrie R E, Pepper D A, et al. The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming. *Glob Change Biol*, 2005, 11(1): 167—181[DOI]
- 52 Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48:

- 1—6[DOI]
- 53 Subke J A, Inglimaw I, Cotrufo F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A metaanalytical review. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 1—23[DOI]
- 54 Barnard R, Leadley P W, Hungate B A. Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Glob Biogeochem Cycle*, 2005, 19: 2282—2298
- 55 Norby R J, Cotrufo M F, Ineson P, et al. Elevated CO₂, litter chemistry, and decomposition: a synthesis. *Oecologia*, 2001, 127: 153—165[DOI]
- 56 Knorr W, Prentice I C, House J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433: 298—301[DOI]
- 57 Treseder K K. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies. *New Phytol*, 2004, 164: 347—355[DOI]
- 58 Alberton O, Kuyper T W, Gorissen A. Taking mycocentrism seriously: mycorrhizal fungal and plant responses to elevated CO₂. *New phytol*, 2005, 167(3): 859—868[DOI]
- 59 Arft A M, Walker M D, Gurevitch J, et al. Response of tundra plants to experimental warming: meta-analysis of the international tundra experiment. *Ecol Monogr*, 1999, 69(4): 491—511[DOI]
- 60 Walker M D, Wahrenb C H, Hollister R D, et al. Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 1342—1346[DOI]
- 61 Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421: 57—60[DOI]
- 62 Davidson E A, Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440: 165—173 [DOI]
- 63 Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Func Ecol*, 1994, 8: 315—323[DOI]
- 64 Grace J, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404: 819—820[DOI]
- 65 Jarvis P, Linder S. Constraints to growth of boreal forests. *Nature*, 2000, 405: 904—905[DOI]
- 66 Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404: 858—861[DOI]
- 67 Luo Y, Wan S, Hui D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622—625[DOI]
- 68 Sanderman J, Amundson R G, Baldocchi D D. Application of eddy covariance measurements to the temperature dependence of soil organic matter mean residence time. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17: 1061—1075[DOI]
- 69 Dormann C F, Woodin S J. Climate changes in the Arctic: using plant functional types in a meta-analysis of field experiments. *Func Ecol*, 2002, 16: 4—17[DOI]
- 70 Raich J W, Russell A E, Kitayama K, et al. Temperature true influences carbon accumulations in moist tropical forests. *Ecology*, 2006, 87(1): 76—87
- 71 Blenckner T, Hillebrand H. North Atlantic oscillation signatures in aquatic and terrestrial ecosystems—a meta-analysis. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 203—212[DOI]
- 72 Zvereva E L, Kozlov M V. Consequences of simultaneous elevation of carbon dioxide and temperature for plant-herbivore interactions: a meta-analysis. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 27—41[DOI]
- 73 Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield. *Plant Cell Environ*, 2003, 26: 1317—1328[DOI]
- 74 Searles P S, Flint S D, Caldwell M M. A meta-analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia*, 2001, 127: 1—10[DOI]
- 75 Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 2005, 72: 87—121[DOI]
- 76 Zinn Y L, Lal R, Resck D V S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil Till Res*, 2005, 84(1): 28—40[DOI]
- 77 Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: Meta analysis. *For Ecol Manag*, 2001, 140: 227—238[DOI]
- 78 van Kooten G C, Eagle A J, Manley J. How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks. *Environ Sci Pol*, 2004, 7: 239—251[DOI]
- 79 Manley J, van Kooten G C, Moeltner K, et al. Creating carbon offsets in agriculture through no-till cultivation: a meta-analysis of costs and carbon benefits. *Clim Change*, 2005, 68: 41—65[DOI]
- 80 Geist H J, Lambin E F. What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. *LUCC Report Series 4*. 2001
- 81 Wan S Q, Hui D F, Luo Y Q. Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis. *Ecol Appl*, 2001, 5: 1349—1365
- 82 Curtis P S, Jablonski L M, Wang X Z. Assessing elevated CO₂ responses using metaanalysis. *New Phytol*, 2003, 160: 6—7[DOI]
- 83 Thornton A, Lee P. Publication bias in meta-analysis: its causes and consequences. *J Clin Epidemiol*, 2000, 53: 207—216[DOI]
- 84 Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80: 1150—1156[DOI]
- 85 Körner C. Nutrients and sink activity drive plant CO₂ responses- caution with literature-based analysis. *New Phytol*, 2003, 159: 531—538
- 86 Lortie C J, Callaway R M. Re-analysis of meta-analysis: support for the stress-gradient hypothesis. *J Ecol*, 2006, 94: 7—16[DOI]
- 87 Maestre F T, Valladares F, Reynolds J F. Is the change of plant-plant interactions with abiotic stress predictable? A meta-analysis of field results in arid environments. *J Ecol*, 2005, 93: 748—757[DOI]
- 88 Gates S. Review of methodology of quantitative reviews using meta-analysis in ecology. *J Anim Ecol*, 2002, 71: 547—557[DOI]
- 89 Leimu R, Koricheva J. Cumulative meta-analysis: a new tool for detection of temporal trends and publication bias in ecology. *Proc R Soc Lond Ser B-Biol Sci*, 2004, 271: 1961—1966[DOI]
- 90 Jennions M D, Møller A P. Relationships fade with time: a meta-analysis of temporal trends in publication in ecology and evolution. *Proc R Soc Lond B*, 2002, 269: 43—48[DOI]
- 91 Englund G, Sarnelle O, Cooper S D. The importance of data-selection criteria: meta-analyses of stream predation experiments. *Ecology*, 1999, 80(4): 1132—1141[DOI]
- 92 Nowak R S, Ellsworth D S, Smith S D. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂-do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New phytol*, 2004, 162: 253—280[DOI]

(2006-07-19 收稿, 2006-08-29 接受)