
基于网络分析的森林资源代谢系统健康诊断

森林是人类和多种生物赖以生存和发展的基础，具有丰富的生物多样性、复合的生态结构和复杂的代谢过程。作为自然界最丰富和稳定的有机碳贮库、基因库、资源库、蓄水库和能源库，森林对于改善生态环境，维持生态平衡，保护人类生存发展的基本环境起着决定性和不可替代的作用^[1, 2]。正因为森林具有吸收二氧化碳、涵养水源、调节气候、防风固沙、保护生物多样性等生态功能，其兴衰直接关系到经济和社会的发展，也直接影响生态环境的健康^[3]。随着城市化进程的加速，森林资源能否有效供给的问题日益凸显。为此，科学的诊断森林生态要素的健康状况对于提高人们的环境意识以及正确处理社会经济发展与生态环境保护之间的关系具有重要的现实意义。

截止到 2019 年末，珠三角森林覆盖率达 52%，森林蓄积量超过 4 亿立方米，林业产业总产值 6544 亿元，连续多年位居全国前列^[4]。但是，《广东省林业发展“十三五”规划》报告中指出“广东省林业仍存在森林资源总体水平不高、生态产品需求与供给失衡、林业产业竞争力不强、林业建设资金投入不足、管理服务保障能力不强等问题”。这些问题在珠三角九市中尤为突出，这主要有两方面原因：1) 珠三角地区的木材安全问题形势严峻，供需结构性矛盾突出。这主要由于区域内可利用木材资源数量较少，导致其对外省以及海外木材资源的依赖度较高。2) 珠三角地区的森林生态系统功能脆弱，生态产品数量较少。尽管区域内林产企业数量众多，但企业整体素质不高，自主创新能力低下；且其发展主要依赖于低附加值产品，精深加工产品数量较少。这些问题不仅使珠三角整个林产业的发展较易受外部因素影响，更降低了该地区经济发展的可持续性。

在森林资源稀缺性日益显现的形势下，解决上述问题至关重要。因此，本研究围绕森林代谢系统，建立了森林投入产出分析模型和森林资源代谢网络分析模型，从森林生态要素层面为珠三角生态系统的健康诊断提供详细的科学依据。首先，为缓和日趋紧张的木材安全形式，需要系统了解珠三角目前的森林资源利用状况，定量分析各部门对木材产业的依赖程度，降低产业结构风险；利用开发的模型分别进行了 2012 年珠三角的木材资源投入产出分析以及 1987 年、1990 年、1992 年、1995 年、1997 年、2000 年、2002 年、2005 年、2007 年、2010 年、

2012 年和 2015 年珠三角的木材资源代谢网络动态分析；其中，森林资源投入产出分析包括木材依赖度分析、木材增加值依赖度分析和木材产出系数结果分析，森林资源代谢网络分析包括木材流动分析、拉动因子驱动因子分析、生态关系分析和系统鲁棒性分析。其次，应关注森林资源在各个经济部门中的流动情况，从产业链的角度探究森林资源相关产业对社会经济系统的多种直接、间接影响，从而优化森林资源配置，促进产业升级，提升系统效率；我们结合 RAS 方法对 2020 年珠三角森林资源代谢网络进行了模拟分析，分析内容涵盖部门、产业和系统多层次之间关系；根据分析结果提出相应的健康诊断报告及政策建议。

首先，我们对木材依赖度进行计算，具体来说，提出了木材依赖度指标来反映某部门在创造单位产值时消耗的木材量。直接木材依赖度（DTD）与间接木材依赖度（ITD）根据下列公式计算：

$$DTD = \frac{t_j}{X_j}$$

$$ITD = \frac{F_j}{X_j}$$

式中， t_j 代表 j 部门使用的直接木材量。

然后，我们根据下列公式对直接木材增加值依赖度（DTV_D）与间接木材增加值依赖度（ITV_D）反映每个部门消耗木材资源创造增加值带来经济效益的能力。其计算公式如下。

$$DTV_D = \frac{t_j}{V_j}$$

$$ITV_D = \frac{F_j}{V_i}$$

式中， V_j 为 j 部门的增加值合计。

之后，我们对木材产出系数进行计算，木材产出系数表示单位森林资源投入第 j 个工业部门产生的直接经济效益与间接经济效益，用来反映每个部门的木材消耗创造社会总产值的能力。直接木材产出系数（DTO）与间接木材产出系数（ITO）的计算公式如下：

$$DTO = \frac{X_j}{t_j}$$

$$ITO = \frac{X_j}{F_j}$$

最后，通过 RAS 方法对珠三角森林资源代谢网络进行动态模拟分析。投入产出表可全面系统地反映国民经济各部门之间的投入产出关系，揭示生产过程中各部门之间相互依存和相互制约的经济技术联系。但是，统计区域投入产出表需要国家投入大量人力物力，通常每五年统计一次。因此，投入产出表的滞后性非常明显。许多研究受到投入产出数据不全的局限。由于 RAS 技术需要的信息少于基于调查的投入产出表所依据的信息，因此通常被称为部分调查，或者非调查方法。RAS 方法通常可以运用已知数据，用目标年中间使用合计作为行向控制量，目标年中间投入合计作为列向控制量，采用双边比例调整算法，以基年投入结构为出发点进行调整，寻找一个能满足行与列双重约束条件的中间投入矩阵。

假设已知给定基准年份（记为‘0’年）的 n 部门的技术矩阵 \mathbf{A}_0 ，需要计算目标年份（记为‘1’年）的技术矩阵 \mathbf{A}_1 。RAS 方法从目标年份（1）的三个方面的信息生成矩阵的估计值，即从总产出、总中间产出 $\sum_{j=1}^n f_{ij}$ （总产出减去最终需求的和 $x_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} + y_i$ ）、部门总中间投入 $\sum_{i=1}^n f_{ij}$ （总产出减去增加值的和 $x_j - v_j$ ）里找出一套行乘数（系数） \mathbf{R} 去调整已有（基期）直接消耗系数矩阵的各行元素，同时找出一套列乘数 \mathbf{S} 去调整已有直接消耗系数矩阵的各列元素，使得经过调整的直接消耗系数计算的总量等于各个控制数据。可用如下公式计算：

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{R}\mathbf{A}_0\mathbf{S}$$

$$\mathbf{R} = \cdots \mathbf{r}_3 \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_1$$

$$\mathbf{S} = \cdots \mathbf{s}_3 \mathbf{s}_2 \mathbf{s}_1$$

其中， \mathbf{r} 代表目标年份中间矩阵行和与基准年份中间矩阵行和的比值； \mathbf{s} 代表目标年份中间矩阵列和与基准年份中间矩阵列和的比值。

具体分析结果将在下列图表中展示：

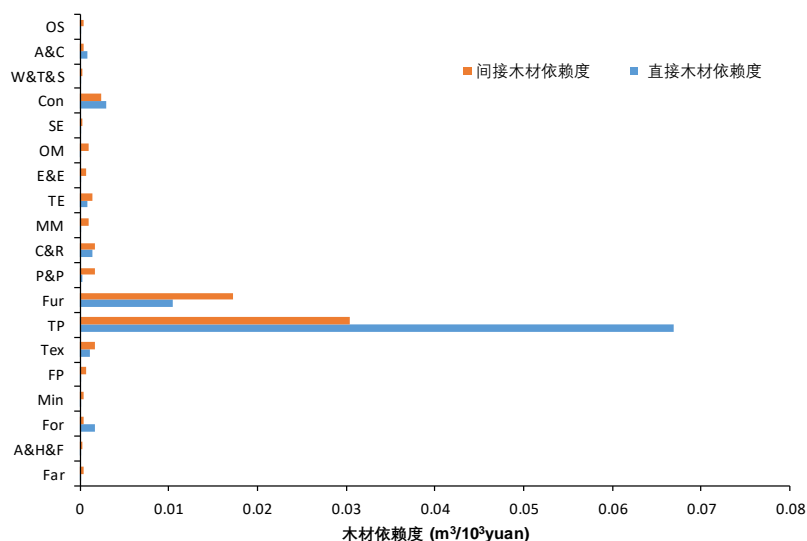


图 1 木材依赖度

木材依赖度可用于评估各产业木材使用效率,从而反映珠三角区域各部门木材使用的健康程度。部门特点不同造成直接木材依赖度差距较大。如图 1 所示,依赖度最高的为木材加工业,为 6689.18 立方米 / 亿元;紧随其后的是家具制造业,为 1051.47 立方米 / 亿元;之后是建筑业、林业、化学产品制造业和造纸印刷业等部门。这一结果与珠三角的木材加工产业及橡胶产业消耗大量本地木材加工产品的情况相符合。另外,虽然珠三角造纸行业也较强,但其原料 80% 以上来自国内外的废纸重复利用,因此造纸印刷业对木材的直接消耗相对于木材加工业与家具制造业较少。相比于直接木材依赖度,各部门间接木材依赖度比较均衡,较大的同样为木材加工业、家具制造业、建筑业和造纸印刷业等部门。通过计算间接木材依赖度占直接木材依赖度的比例可以发现,林业、木材加工业、住宿餐饮业和建筑业四个部门比重低于 50%,间接需求有限。其他部门比重均大于 50%,表明这些部门创造单位产值对间接木材依赖度较大。各部门的直接木材依赖度与间接木材依赖度不同,说明各部门的产业特点与利用木材资源的情况各不相同。我们发现木材依赖度较大的部门多集中在第二产业的初级制造业,第一产业和第三产业的直接木材依赖度则相对较小。木材加工业、家具制造业、建筑业和造纸印刷业等部门对木材需求较大,它们作为木材使用的第一环节,是森林资源利用

的主导群体,扮演为将木材的直接效用转化为间接效用的角色。相比于这些部门,从间接木材依赖度与直接木材依赖度的比值可以看出电气电子制造业、金属制造业、其他制造业、能源供应业、批发运输仓储业、农业和其他服务业等部门更加依赖间接森林资源,这也说明木材资源从第二产业的初级制造业向第二产业的高级制造业以及其他产业流动。

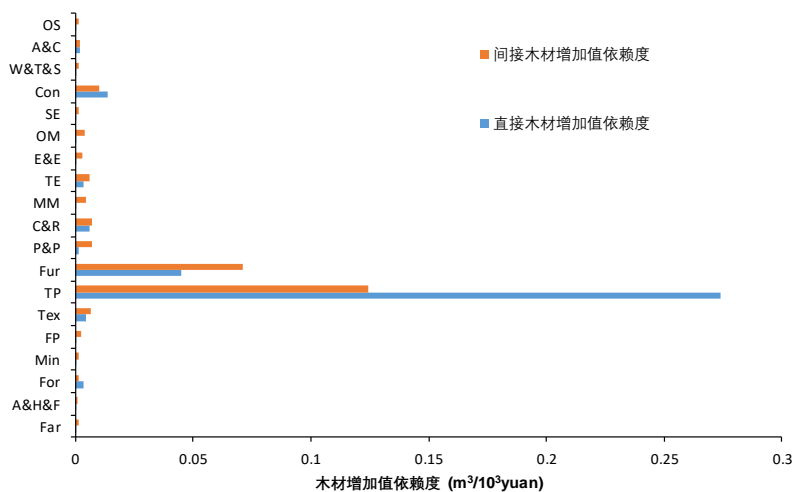


图 2 木材增加值依赖度

木材增值依赖度的计算结果如图 2 所示。木材加工业排在直接木材增加值依赖度的第一位,远远高于其他部门;家具制造业、建筑业部门位于直接木材增加值依赖度的第二位;化学产品制造业、服装纺织业、交通运输制造业等部门位于第三位。直接木材资源对于排名靠前的部门具有较大的创收能力。除了木材加工业、家具制造业之外,其他部门的间接木材增加值依赖度差距不大,且多数高于该部门的直接木材增加值依赖度。可以发现各产业部门利用木材来创造社会价值的能力不同,造成各产业直接木材增加值依赖度相差较大,例如木材加工业(39840.2 立方米 / 亿元)与食品制造业(238.3 立方米 / 亿元)间相差两个数量级。间接木材增加值依赖度差距不大这说明各部门使用木材相关产品带来的增加值创造能力基本相同。例如,采矿业(141.7 立方米 / 亿元)、能源供应业(135.2 立方米 / 亿元)和住宿餐饮业(165.6 立方米 / 亿元)的间接木材增加值依赖度均在 150 立方米 / 亿元左右。多数部门的间接增加值依赖度高于直接增加值依赖

度，表明这些工业部门所创造的社会价值主要依靠间接木材，例如食品制造业和其他服务业。

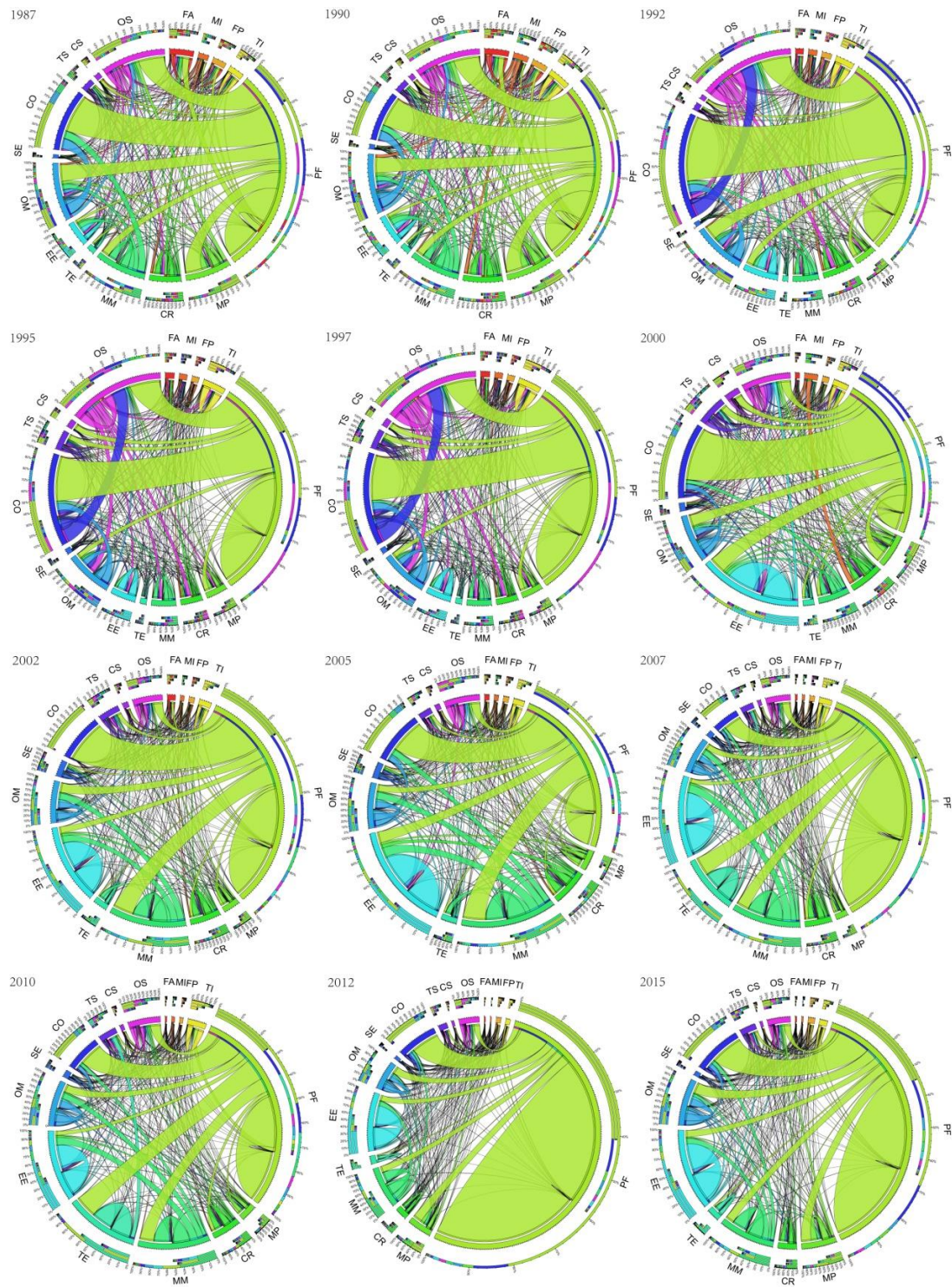


图 3 历年各部门木材流动图

森林生态要素中木材的部门间流动关系十分重要。它可以很好地反映产业链内不同层次加工部门木材原材料及其产品的供需状况, 辨识该系统健康代谢的关键环节。图 3 显示了历年各部门的间接木材流动情况。从该图可以看出部门之间木材的流进流出情况, 以及大体的使用情况。1987 年、1990 年、1992 年、1995 年、1997 年和 2000 年木材部门内部传递率分别为 23.5%、23.4%、25.5%、32.8%、31.5% 和 25.3%。但是从 2000 年之后, 2002、2005、2007、2010、2012 和 2015 年木材的部门内部传递率分别上升到 40.9%、35.7%、53.1%、44.6%、63.9% 和 52.7%。在木材的部门内部传递中, 木材加工及家具制造业占到了 40%-60%, 其中 2012 年高达 75.1%。这与木材加工及家具制造业自身特点相符合, 木材加工部门初步加工木材产品传递到了产业链下游的家具制造部门。相对于 1987-2000 年, 2002-2015 年木材部门内部传递率上升是由于上游产业链升级完善, 上下游搭配合理, 可以大量消化区域内粗加工产品。木材加工及家具制造业是木材产品流动最大的发起点, 其他服务业在 1987—1997 年积极与木材加工及家具制造业互动, 1997 年之后互动减少。建筑业始终与木材加工及家具制造业保持积极互动关系, 每年均有大量的相互流动。

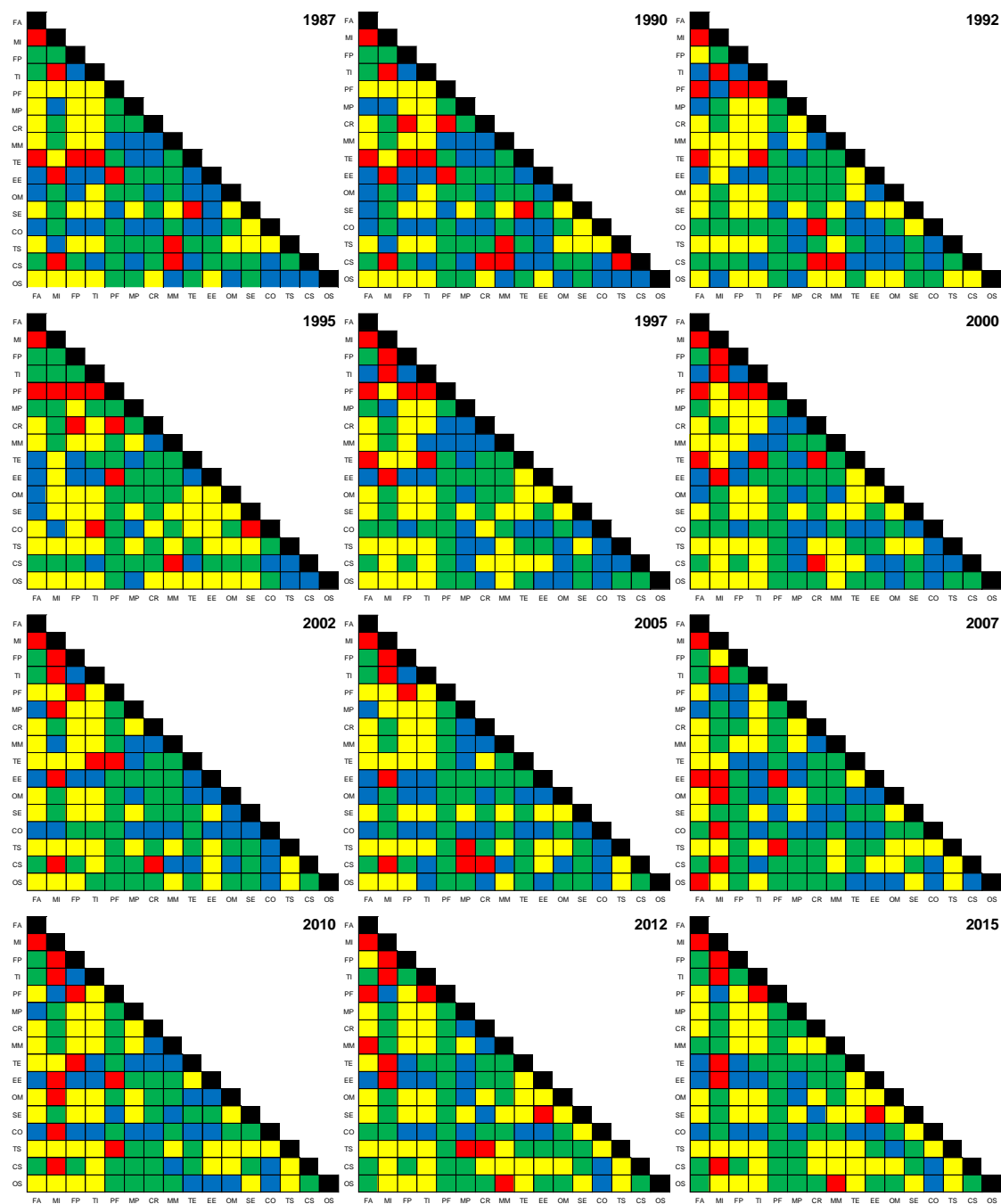


图 4 历年森林资源代谢部门间关系

在木材资源代谢网络中，各部门间存在直接和间接的相互影响。系统分析这些相互影响可以充分反映网络代谢能力，量化生态健康状况。为了方便呈现部门之间的关系，我们将系统内的所有部门之间的积分效用强度矩阵中元素的正负号转化为他们之间的生态关系（详见图 4），分别为互利共生关系（如 1987 年的金属制造业与住宿餐饮业）、竞争关系（如 2015 年电气电子制造业与造纸印刷业）、

剥削关系（如 2000 年化学产品制造业与服装纺织业）和被剥削关系（如 2005 年的交通运输设备制造业和批发零售仓储业）。从图中可以看出，研究期间每年具有互利共生生态关系的部门都在 10 对左右，其中 1990 年最多，为 15 对，1997 年、2005 年和 2015 年最少，为 9 对。交通运输设备制造业与农业和服装纺织业在 2000 年之前几乎每年都是互利共生关系，2000 年之后关系逐渐恶化。采矿业与农业从 1987 年到 2015 年始终保持互利共生关系。两部门关系良好合作共赢，除 1995 年之外，服装纺织业与采矿业始终保持互利共生关系。此外，12 年中住宿餐饮业与采矿业出现了 7 次互利共生关系，化学产品制造业与住宿餐饮业出现了 5 次互利共生关系。采矿业出现了最多的 55 次互利共生关系，其次是木材加工及家具制造业（29 次）和服装纺织业（24 次）。出现互利共生关系较少的部门是其他制造业（2 次），其他服务业（3 次）、造纸印刷业（4 次）、建筑业（5 次）和能源供应业（5 次）。互利共生关系多集中在产业上游，产业下游的生态关系并没有上游乐观。2012 年和 2015 年竞争关系数量最少，均为 18 对。1990 年这种关系数量最多为 37 对。1990 年的互利共生关系最多，竞争关系也最多。建筑业与造纸印刷业、住宿餐饮业、电气电子制造业和其他制造业几乎始终保持竞争关系。12 年中造纸印刷业与交通运输设备制造业出现了 11 次竞争关系，金属制造业与化学产品制造业出现了 10 次竞争关系。出现竞争关系较少的部门为采矿业、木材加工及家具制造业和批发零售仓储业，而出现竞争关系较多的部门是造纸印刷业、电器电子制造业和建筑业。通过制定相关政策引导木材更多的向互利共生关系的部门流动，减少竞争部门之间的流动，可以使森林资源的代谢流动发挥更大价值，减缓部门间摩擦，并促进经济发展。

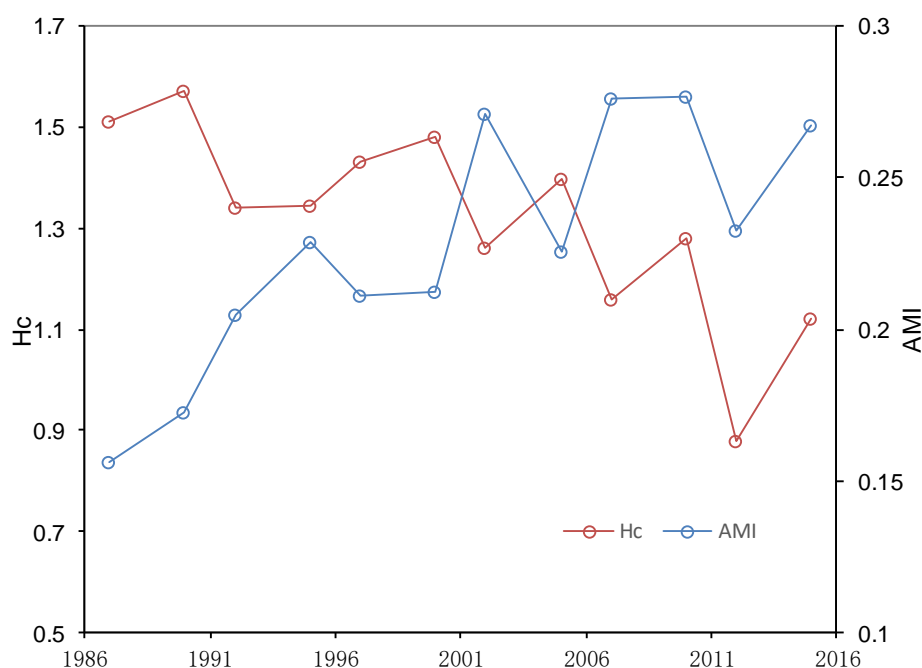


图 5 历年森林资源代谢系统平均交互信息（AMI）和系统剩余不确定性（He）

每个部门都有不同的社会职能和责任，其获取木材的方式也是多种多样的。木材流动所存在的复杂性，多样性和无序性造成了系统的不确定性。为了探究这一情况，我们对系统鲁棒性进行了研究。历年森林资源代谢系统平均交互信息（AMI）和系统剩余不确定性（He）计算结果如图 5 所示。系统的平均交互信息可以反映系统的秩序性和高效性，从结构角度展示系统的效率，这对于促进系统的运行和发展至关重要。相反，剩余不确定性用于评估系统的冗余度，代表网络中无组织和不协调的行为部分。较高的系统平均交互信息值表示网络更集中，具有更少的分散木材的路径，更有条理并且可以提供更多信息。它量化了系统中规则、有序、连贯和有效的行为。然而，对于木材流动路径更严格的限制意味着并行通道的选择更少，这使系统在面对振荡时将处于脆弱状态。因此，系统剩余不确定性保证系统稳定性并且从真实结构的角度减少崩溃的风险。2010 年系统平均交互信息的值最高为 0.28，表明森林代谢系统高秩序和高效率。系统平均交互信息的最低值出现在 1987 年为 0.16，这说明在森林资源代谢过程中存在许多干扰，削弱了系统中的秩序和效率。系统剩余不确定性在 1990 年最高为 1.57，2012 年最低为 0.88。综合来看，系统的系统平均交互信息呈现上升趋势而系统剩余不确定性呈现下降趋势，说明系统的秩序性和效率提高而冗余度下降。

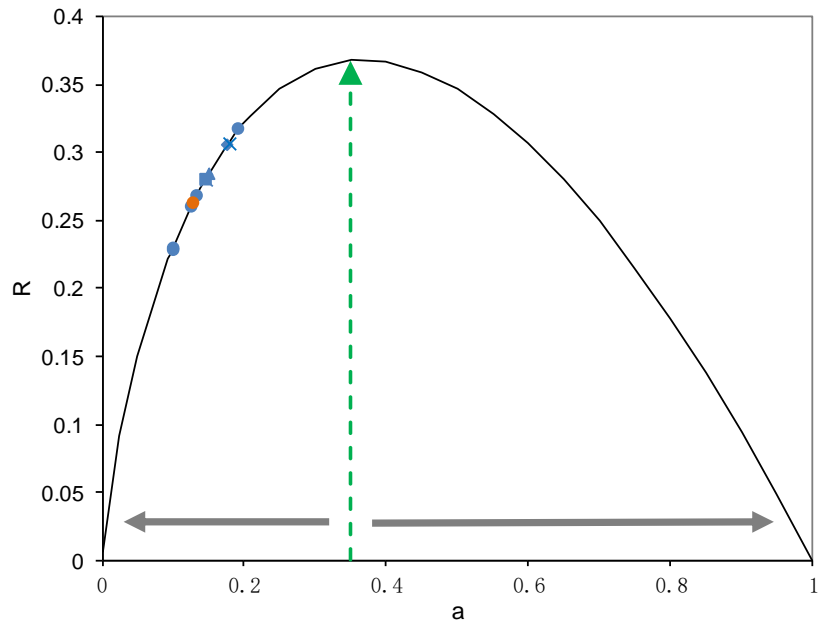
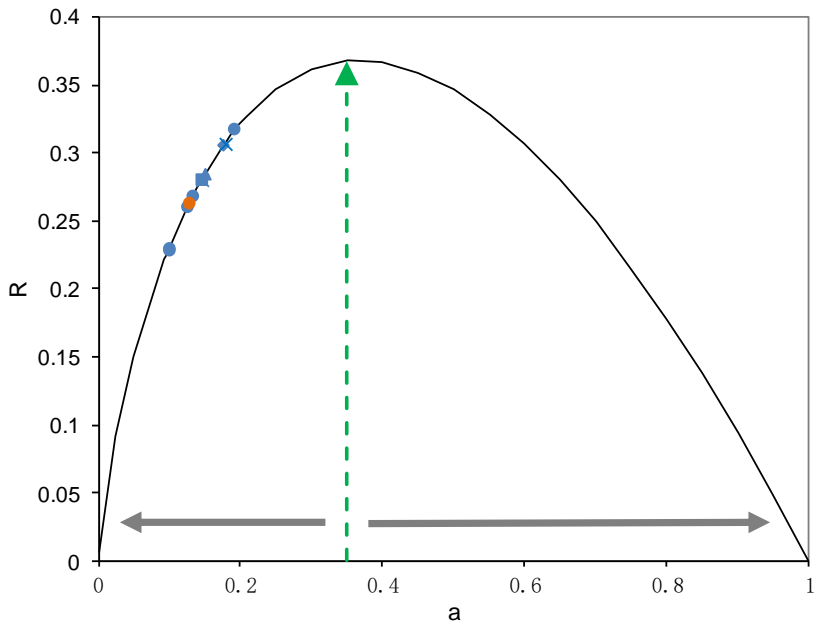


图 6 历年森林资源代谢系统相对效率 (a) 和鲁棒性 (R) 关系

效率和冗余的平衡对系统的鲁棒性的影响可从相对效率计算结果中得出。鲁棒性曲线说明系统稳健性的变化。如果结果位于曲线的左侧，则系统往往具有较低效率和更多的冗余。相反，则说明系统是脆弱的，因为效率太高会牺牲冗余。



如

图 6 所示，所有年份的点均位于鲁棒性曲线的左侧。虽然系统平均交互信息呈现上升趋势，但系统仍处于效率低下，冗余度较高的状态，这是由于系统的稳

定循环和相互作用所造成。2012 年系统的相对效率和鲁棒性的值最高，相对于其他年份森林代谢系统具有相对较强的连贯性、有序性和规律性。

综上所述，本研究围绕森林代谢系统，建立了森林投入产出分析模型和森林资源代谢网络分析模型，从森林生态要素层面为珠三角生态系统的健康诊断提供详细的科学依据。首先，从直接间接森林资源利用情况来看，木材依赖度较大的部门多集中在第二产业的初级制造业，这些木材资源通过产业链向第二产业的高级制造业以及其他产业流动，说明森林生态要素代谢状况较为合理，产业结构处于较为健康的状况；从森林生态要素部门间流动角度考虑，2002-2015 年木材资源部门内部传递率较之前大幅上升，这是由于上游产业链升级完善，上下游搭配合理，可以大量消化区域内粗加工产品，说明在这一时期内，珠三角城市群大力推进森林生态要素产业链的完整性管理，其代谢健康状况得到大幅改善；从森林代谢系统角度考虑，可以通过制定相关政策引导木材更多的向互利共生关系的部门流动，减少竞争部门之间的流动，从而使得森林资源的代谢流动发挥更大价值，减缓部门间摩擦，并促进生态系统健康安全发展。

参考文献

- [1] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报, 2004(04):480-491.
- [2] Faheemullah S, Qiang J, Ying F. Evaluating China's natural gas supply security based on ecological network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,139.
- [3] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005(08):2096-2102.
- [4] 秦琳, 丁胜, 杨志刚, 等. 珠三角国家森林城市群建设状况评价研究[J]. 林业调查规划, 2021,46(03):133-137.