内部参考

妥为保管

**土地观察**

2016第1期（总第11期）



2016年01月15日

**浙江大学土地与国家发展研究院**

**Land Academy for National Development Zhejiang University**

**【编者按】**人类经济社会发展消耗了大量的自然资源，资源及环境问题日益突出，土地资源承载力评价及自然资源核算问题受到人们前所未有的关注。土地管理最基础和最核心的任务是不断调控和提高土地资源的承载能力。本期《土地观察》刊载了浙江大学吴次芳、叶艳妹教授的《土地资源承载力研究的认识论突破和方法论创新》一文，探索了未来土地资源承载力研究需要认识论突破和概念框架创新的方向。浙江大学靳相木教授、柳乾坤博士的《自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论》一文，从生态足迹模型作为自然资源核算的生物物理性工具的角度，对生态足迹模型从一维模型向二维模型，并从二维模型向三维模型演进过程作了梳理和评论，认为生态足迹模型对自然资源消费核算方法的探索，弥补了国民经济核算体系下自然资源核算的不足。

吴次芳、叶艳妹：《土地资源承载力研究的认识论突破和方法论创新》，P2-P19。

靳相木、柳乾坤：《自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论》，P20-P43。

土地资源承载力研究的

认识论突破和方法论创新

吴次芳，叶艳妹

（浙江大学　杭州　310058）

 【导言】宇宙法则和第11条人类生态学的诫命告诉人们：人类生存无法超越土地资源的承载力，否则人类就会失去生存的未来。土地管理最基础和最核心的任务是不断调控和提高土地资源的承载能力。推进土地资源承载力研究，有利于促进国家的可持续发展、有利于提高全社会的幸福指数、有利于稳固土地管理事业的根基、有利于提升土地管理的科学化水平。传统土地资源承载力研究，都假设存在一个区域封闭系统，而且是一个静态系统。但在地球村时代和市场结构条件下，任何区域都是一个开放和动态系统，单纯以食物链进行约束的封闭系统或者静态承载力研究在很大程度上已经失去存在意义。未来土地资源承载力研究需要认识论的突破，需要概念框架的创新。从人地系统复杂的有机结构、物质和能量流动以及可实践性出发，可将土地资源承载力的概念定义为：在不损害土地健康和相关生态系统功能的前提下，某一给定区域可以允许的最大土地资源消耗和废物排泄率。这一概念包括以下两条底线和两块顶板：底线一：不损害土地健康，底线二：不损害相关生态系统功能；顶板一：不超越最大土地资源消耗，顶板二：不超越最大废物排泄率。按照人类工效研究方法论、多元评价研究方法论和底线控制研究方法论，可望解决土地资源承载力研究的理论和实践问题。

一、土地资源承载力研究的重要性

（一）有利于促进国家的可持续发展

玛雅文明的衰败，是人口超越土地承载能力的典型例子。当时由于人口剧增，不得不开发更多的边际土地，可是这些边际土地生产的食物严重缺铁，导致短时间内婴儿的死亡率剧增，从而人口在短时间内迅速减少并最终导致玛雅文明的衰落（拉马尔，2005）。古丝绸之路沿线文明的消失、美索不达米亚文明和环地中海文明的衰落，也都是由于类似的原因所致。苏丹、埃塞俄比亚、索马里、肯尼亚和坦桑尼亚等非洲国家，尤其典型的是博茨瓦纳，由于人口超越了土地的承载能力，过度开发未利用地导致沙漠化面积急剧扩大，国家正在与饥饿和贫穷做抗争（埃克霍姆，1982）。事实上，从非洲赤道地带至中东阿拉伯沙漠，经过前苏联中亚细亚，直至我国西部在横穿两大洲地带的沙漠化，几十处古代文明如今已成为一片废墟，其中重要原因都是人口超越土地承载量导致农业土地过度开垦造成毁灭的证据（吴次芳，2004）。

中华民族的摇篮－黄土高原，在盛唐时期还是繁华的天朝圣地。之后由于人口增加，尤其是明中叶以后，人口快速膨胀超越了土地的承载能力，对新辟农地的需求迫切，日常用材日增，于是情况急剧变化，开始出现连绵不断的秃山，生态灾难由此生成。西南地区的贵州省，石漠化和潜在石漠化面积占国土面积的1/3以上，至今仍是欠发达省份，人地关系失衡是其中的重要原因之一。入清以后，由于大量流民进入贵州省和清代长期稳定的社会环境带来的人口增殖，迅速改变了该省地阔人稀的景象。随着人口的增长和经济作物的发展，该省的粮食更加紧张。在这种情况下，玉米、红薯等高产作物在全省各地迅速滋生，特别是玉米较之甘薯更能抗寒耐旱，推广更加容易，因此便很快挤身于主要粮食行列。从清代贵州方志看，贵州全省“不论高山峻岭及岩石之中，均可种植，功省收倍，而且粘谷一石得米五斗，包谷一石竟可抵食米八斗，味甘养人，略亚于稻谷”，故数年之间便被大面积推广种植（陈国生，1994）。由于玉米、甘薯等旱作均种植在丘陵山地的缓坡或陡坡地上，于是水土流失和石漠化开始加剧，生态环境进一步退化。

可见，土地资源承载力是否适宜，对国家的生存和可持续发展具有根基性影响，在很多情景下可能是一个决定性的构件。

（二）有利于提高全社会的幸福指数

人类对清洁的空气、水、能源、开敞空间等所必需的资源需求愈多，则人口的数量更应该减少。人类生态学的诫命是：你不可逾越承载力。逾越承载力会使承载力进一步降低，对人类或牲畜都是一样的。单位面积承载人口的不断增加，不但会影响到个人的幸福，也会使整个社会的诸多问题更加棘手，比如交通堵塞、失业增加、环境污染、生态退化、资源短缺、食物品质不能充分保障、生活品质下降等等。2014年全球幸福指数排在前10位的国家，单位面积负荷的人口数量都非常低，平均人口密度为88人/平方公里，其中挪威12.6、瑞典21.1、加拿大3.50、芬兰17.3、奥地利98.0、冰岛3.3、澳大利亚2.91。

人类梦寐以求的幸福家园－“伊甸园”和“桃花源”已不复存在，惟有在“诺亚方舟”上的人们才得以生命的延续。原则上，人与山水林田湖构成生命共同体，生产、生活和生态空间处在一个有机组合状态下的环境构造，人类才会感到幸福。感受经济学有许多条定律，其中最主要的是感受优先定律。单位面积上承载过多的人口，人们首先感受的是拥挤，而不是幸福。按照景观生态学的说法，就是人类的栖息地在空间构成方面应该成马赛克式分布、表面呈多孔质构造、各种各样的场地内存有空隙，惟有如此才会感受到幸福的生存环境。

通过土地资源承载力研究，建构人与自然共生的地相环境，保全国土的自然生态，打造田园式的城市，提供温馨舒适的生存空间，必定会增进人类的幸福指数。

（三）有利于稳固土地管理事业的根基

联合国环发大会通过的“21世纪议程”，专列第10章—土地资源综合规划和管理，把土地管理提升到了前所未有的高度。其根本原因就是20世纪以来，随着世界人口剧增，人类对土地资源的需求大幅度增加，在人均资源占有量不断降低的情况下，人类为了生存与发展，一方面大肆开发土地资源，另一方面又滥用技术去任意支配和利用土地，造成地力消耗过度，后备资源迅速减少，土地生态环境急剧恶化，人地矛盾极为紧张，形成了全球性土地危机并威胁着人类自身赖以生存的地球。本质上，土地管理之所以上升为各国的关键战略，核心是人口日益增长的物质和文化需求逼近了土地资源承载力，在局部地区已经逾越了土地资源承载力，大部地区土地资源承载力正在急剧降低。

从人类世的角度看，土地管理研究的核心问题，一是要阐明人类需求与土地资源之间的相互作用过程、可持续性轨迹、演变规律和动力机制；二是要探索不同时空范围内土地资源系统的自我维持和自我调节能力，尤其是要查明该系统的弹性限度和抗干扰强度；三是要研究土地资源及其环境子系统对人口和社会经济活动的供容能力。控制人口和社会经济活动在土地资源系统的供容能力范围之内，是实现土地资源安全和区域可持续发展的最基本和首要条件；四是要查明维育某种生物个体或生物群体的土地资源条件，包括数量是否充裕，质量是否有保障，结构是否稳定，区际分布是否均衡等。以此为基础，通过土地工程和管理措施不断满足人类的功能需求，不断提高土地资源的人口承载力。因此，推进和强化土地资源人口承载力研究，是土地资源管理事业发展的根基性要求。

（四）有利于提升土地管理的科学化水平

在当代，土地管理的根本目的是为了更好的满足人们日益增长的物质文化需要对土地的需求，协调好人地关系是土地管理的存在前提和发展动力。规划管理、集约高效管理、质量生态管理始终是土地管理最主要的三大内容板块。所有这些管理，其科学化水平都依赖和取决于去探究、去查明、去诊断、去监测、去仲裁土地资源的承载能力，土地环境的缓冲能力和土地利用的抗干扰能力。

土地利用规划编制，如果没有查明不同区域和不同城市的土地开发利用潜力、空间结构优化前景、生态和社会文化需要，没有查明土地资源承载能力的影响因素和演变机理，没有查明不同尺度土地资源承载能力的空间差异，规划师将必然以“本能”代替“理性”，所编制规划的科学性将缺乏基础，土地管理的科学化水平也因此失去根基。

推进土地资源节约集约利用，最基础和最关键的是要明确不同土地利用方式的用地标准、不同土地利用类型的承载能力、不同时空条件下的容量区间和安全阀限，所有这些内容都属于土地资源承载力研究的范畴。只有把不同时空条件下的土地资源承载力研究清楚，才能科学的推进土地资源的节约集约利用。现阶段经常使用地均GDP和投资强度两个用于衡量不同城市之间土地节约集约利用水平的指标，其科学性都不是很充分的。例如GDP是个产值指标，只反映产出而不反映投入，而且即便是产出，也很难区别有多少是来自于土地利用的贡献。举一个很简单的例子，假定有一个占地10亩的工厂，生产某种品牌的纺织品，2013年的产量是5万件，2014年的产量不变，但是纺织品的价格由于市场供求关系的变动而下降了10%，这样这个工厂2013年的产值比2014年下降了10%，在计算GDP时，这个工厂的GDP也相应减少了，地均GDP自然而然地下降了。但我们不能因此判断这个工厂的土地集约利用水平下降了，事实上土地节约集约利用水平根本没有变化。再例如投资强度是经常用于考核工业用地尤其是工业园区土地节约集约利用水平的一个指标。这个指标的问题在于难以区别不可逆转的投入与可逆转的投入。假定两个工厂，甲厂为劳动密集型企业，厂房是二层楼，占地面积1000平方米，容积率1.5，除了建筑以外甲厂的主要资本投入是缝纫机，总价值100万元，不考虑建筑的情况下，投资强度为0.1万元/平方米；乙厂厂房为一层楼，占地面积也是1000平方米，容积率为0.6，主要的资本投入是某条流水生产线，价值200万元，在不考虑建筑投入的情况下，投资强度为0.2万元/平方米。从投资强度来看显然是乙厂高于甲厂，但是从土地节约集约利用水平来看，却是甲厂高于乙厂。因此，地均GDP和投资强度都只是一个参考指标，而不是最科学的评价土地节约集约利用水平的指标。当然，如果两个工业园区或两个城市的产业结构、经济结构和产品类型等基本相同，这两个指标也能在一定程度上反映出不同土地的节约集约利用强度。但是，如果明确了不同土地利用方式、不同土地利用类型、不同时空条件下的土地适宜承载能力和用地标准，土地节约集约利用管理就有了科学依据，就能够为人类提供生产高效、生活舒适和生态健康的土地条件。

土地质量和生态管理是未来土地管理的发展方向和重点领域。其科学依据主要是宇宙法则，包括二极对立宇宙法则和周期交替宇宙法则。按照二极对立宇宙法则，必须保持土地利用的多样性，以实现物质实体与反物质实体的对立统一；周期交替宇宙法则的核心是能量守衡法则或者说熵法则。根据这一法则，土地管理应当也必须促进土地系统的熵减少或负熵流增加。否则，如果人类对土地的开发利用和对土地环境的干扰破坏超越了土地系统的最大承载力（阀限），土地系统只能朝着熵增大的方向实行无序演化，最终倾向于各类过程的差异消失，变成完全均衡的混乱状态，即系统解体。可见，土地资源承载力研究已成为未来土地质量和土地生态管理的关键要素。

二、土地资源承载力研究存在的问题

（一）土地资源承载力研究的固有缺陷

无论对承载力做何种理解，其基本内涵主要指一个区域能永久供养的人口数量及人类活动水平。它假设存在一个区域封闭系统，测算系统内土地生产潜力对人口的承载能力。但是，在全球化和市场结构条件下，几乎任何区域都是一个开放系统，不断的与外界进行物质和能量的交换。正如批评家们认为的那样：任何逐个国家（地区）的承载能力研究都有缺陷，因为土地和气候不一定成为承载人口数量的制约因子。通过货币媒介和市场交易，所有资源（含非物质性知识、服务等）从理论上说均可挽回粮食的短缺。甚至水资源短缺，也可以通过重大工程建设，比如南水北调，解决承载力不足的问题。因此，假设存在一个封闭系统的承载力研究，其指导意义和实践价值就大打折扣。

更何况承载力原本属于工程地质领域的概念，它是指地基的强度对建筑物荷重的能力，是一个相对静态的概念。最初被借用来研究区域畜牧业的承载力时，问题并没有那么突出。因为畜牧业所养畜的区域和养畜的数量是相对固定的，在固定区域内计算放牧的承载力，也算比较接近承载力的最初概念。但是后来这一概念被广泛的引用到生态学、经济学、人口学、环境学、地理学、水资源学、土地资源学、旅游学等领域，就越来越偏离承载力的原本内涵和属性了。例如土地资源承载力，又称土地资源人口承载力，由于在当代社会人口的流动性是非常频繁的，一个区域的人口绝对不是一个静态的概念，人口流动的不确定性自然而然的就反映到对土地承载能力评估的结果上来，使得评估结果与实际状况会出现很大偏差。事实上，一个本身是相对静止的概念而被用于研究流动的问题时，缺陷或不合理性是必然会产生的。

（二）土地资源承载力研究的主要不足

1、基础理论研究不足。土地资源承载力研究，本质上是一个协调人地关系的过程，也是一个结构功能优化的问题，更是一个可持续利用的关怀。至今为止的承载力研究，缺乏对人地关系等基础理论问题的深入探索，严重忽视自然科学与人文科学交叉的理论研究，也缺乏以人类生态哲学观与人类生存空间观相结合的承载力基础研究。因此，缺乏基础研究积累和科学理论指导，是现阶段土地资源承载力研究的重要短板。

2、土地特性研究不足。土地是一个多功能体，不仅能生产人类食物、纤维、燃料或其他生物物质，也是动植物和微生物的栖息场所、全球能量平衡和水循环的决定者之一，还能提供资源和沉淀温室气体、提供聚集和娱乐空间、提供或制约动植物和人类的迁徙、提供人类使用的矿物和原料的储存场所、规定地表水和地下水的储存和流动、保存历史或史前记录（化石、过去的气候证据、人类遗迹等），成为化学污染物的缓冲器和过滤器或调节器。如果仅仅研究土地的生产功能，根据生产潜力来估算人口承载力，是很难从根本上揭示土地承载力内在规律的。不仅土地的数量影响承载力，土地的结构也会影响承载力，土地的区位、质量和类型更会影响承载力，土地的空间尺度不同承载力的结果也会不同。目前主要研究土地数量对承载力的影响，而忽视了土地类型、区位、质量、结构、尺度、过程、适宜性、区域分异等土地重要特性对承载力的作用机理，结果的可应用性必然受到很大限制。

3、人本需求研究不足。从根本上说，土地承载力是对人类需求的满足程度，其主体是人。但现有研究缺乏对人类需求多样性、动态性、区域性以及社会性和文化性进行深入的探索，自然难以科学揭示人类需求与土地资源之间的相互作用过程、时滞、惯性、限度和门槛值。从人体工效学的角度看，土地人口承载力是一个“人－土地－环境”系统，研究的目的是最大限度的满足人的需要，使人－土地－环境达到和谐匹配的状态，是人与人、人与地、地与环境、环境与人各个系统关系的整合。人对土地的需求除了食物需求外，舒适、健康、安全、功能、美观、愉悦、享受等同样重要。土地对人口的承载要极力显示以最大限度适应人活动的可能性，要求不抑制和不约束人的基本活动范围，以顺应人的生活进程，以满足人类日益增长的物质和文化需要。遗憾的是，土地承载力研究中有关人体工效学的研究，完全处于空白的状态。

三、土地资源承载力研究的认识论突破

（一）如何认识土地资源承载力

对于自然生态系统来说，土地承载对象的数量仅仅是通过食物链进行约束的关系，承载关系简单且缺少互动性。在自耕自足的传统社会或牧童经济时期，一个区域，尤其是规模比较大的区域，基本上可以假定其是一个封闭系统，以食物链为约束条件的承载力研究有其一定的实际价值。但是，当人类社会进入“地球村”时代，土地承载力的承载对象是具有一定主观能动性的人，土地生态系统也已经由自然状态演化成半人工或人工状态的生态系统。在这样的时代，区域是一个开放系统，区域内的短缺可以通过多种途径由区域外予以补给。不仅如此，作为承载主体的人，能够在很大程度上通过时、空、量、构、序的调整来改变土地的功能系统，并与土地利用形成互动，关系更加复杂化。单纯以研究土地能够供养或维系多少人或经济活动为目的的承载力研究已经在某种程度上失去实际意义。试图用一个简单静态的数量阀值来表征土地资源的人口承载力，是非常困难的。可见，土地资源承载力不是简单的根据土地生产能力计算能养活多少人的问题，或者说它不仅仅是一个资源承载力的问题。

在当代社会，尤其是在城市区域，土地资源承载力的本质是人地关系，是土地对人类需求的满足程度。从人的需求或从人体工效学的角度看，一个区域或城市的土地人口承载力，除了土地能够持续提供满足人的食物需求以外，还必须确保人们居住舒适、公共生活安全、生产安全以及对健康和文化的各种需求，维持区域的重要风景、游憩、教育、科技和自然价值以及保证此区域必要的环境标准，维持可持续的全球地质大循环和生物小循环。由此，土地承载力更多或更重要的是环境承载力、生态承载力、社会承载力和文化承载力。它不仅涉及土地自身的结构和功能，其它涉及的因素还包括：消费结构、公共设施供给、技术和制度、生产力变化、季节性或突发性环境变化、社会就业、社会秩序、水和能源供给、文化优雅性、政治制度、教育资源、土地制度、财政状况、管理水平、公共政策、灾害危机处理能力、天然灾害与疫病等。比如，人类对清洁空气、水、能源、开放空间等所必需的资源需求越多，则单位土地面积上人口的承载数量就更少。人类对物质消费水准的增加和生活品质的提升，最后也会使土地的承载能力降低。

由上分析不难看出土地承载力是一个复杂的系统，它由资源环境影响、城乡基础设施服务、公众感知、制度环境以及社会响应等部分组成的承载力并与水、能源等要素耦合在一起，不确定性是其最基本的特征，简单的线性思维已经无力解决土地承载力这样一个牵涉人类社会发展演化的复杂问题。可是，无论土地承载力问题复杂到何种程度，人类必须探索这个复杂系统的行为特征与变化规律，必须调控这个复杂系统的状态朝着有利于人类生存和发展的方向演化。因为宇宙法则或人类生态学的定律告诫人们：你不可逾越土地承载力。逾越承载力会使承载力降低，对人类和其它生物都是一种灾难。哈丁在公地悲剧（The Tragedy of the Commons）文中有更详尽的阐述，玛雅文明的衰败、黄土高原的变迁也都证明了这一点。由此看来，人类理性和智慧的选择，就是开发新的土地承载力概念内涵，突破传统土地承载力研究的方法论，充分认识土地承载力的演化规律，进而揭示土地承载力的“本体世界”。

（二）土地资源承载力的概念创新

在现代社会，土地承载力无论从概念还是内涵上与传统的承载力已经有了很大的差异，其存在意义是如何能在满足人类一定生活水平和对生态环境质量要求的基础上，维持土地生态系统的正常功能和健康水平。从人地系统这种复杂的有机结构、物质和能量流动以及可实践性出发，将土地资源承载力的概念定义为：在不损害土地健康和相关生态系统功能的前提下，某一给定区域可以允许的最大土地资源消耗和废物排泄率。这一概念包括以下两条底线和两块顶板：

1、底线一：不损害土地健康。土地健康是指土地在其生态系统界面内维持生产，保障环境质量，促进生物与人类健康和维护自我恢复的能力。土地如同生命体一样，有自身正常新陈代谢、自我调节和自我恢复能力。在内外扰动或压力不超过其防御能力时，当扰动或压力撤除以后系统能够从偏离平衡状态的位置重新恢复到原有的平衡态，这就是土地的恢复力（resilience）。如果土地受到外界冲击后具有自我恢复力，表明土地的状况是健康的，这与人体免疫力的情况相类似。如果外界冲击超过了土地的自我恢复力，导致土地健康退化，表明超越了土地承载能力。

2、底线二：不损害相关生态系统功能。地球生态系统的物质交换和能量流动主要是在土地界面发生的，土地连同环境中的生命体的总和构成地球生态圈。无论何种土地利用方式，都直接或间接地参与了地球生态系统独特的物流、能流循环运转过程。土地具有生物栖息和支撑、植物生产和生物养育、环境净化和修复、地球物质与能量循环、生态环境变迁历史记载等生态功能。如果人类活动对土地的干扰，导致相关生态系统功能的损害，例如物种退化或消失等，表明超越了土地承载能力。土地实体内的基因库对人类医疗与物种的延续具有无法估计的价值，随意开发利用将会导致地球生态系统的不可持续性。

3、顶板一：不超越最大土地资源消耗。所谓不超越最大土地资源消耗，就是人类的开发利用不破坏土地资源的最佳配置。土地有多种用途，包括耕地、园地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点用地、交通运输用地、水利设施用地、未利用地等；土地利用有多种目标，包括粮食安全、经济收益、生物能源、环境价值等，可持续的土地利用需要在不同用途上进行一般均衡分析（多用途均衡分析），找到一种最佳的配置结果。从边际分析的角度看，生产率更高的土地去生产效用更高的产品，而边际土地（生产率低）则用于生产效用相对低的产品，这样从总体上看，整个土地配置结果是最佳的。比如，如果把粮食安全和生物能源同时作为生产目标，假设粮食安全更重要，就不能把能源作物种植在优质耕地上，而是应种植在边际土地上，让耕地（生产率比边际土地高）用于生产粮食。此时，这种最佳配置的状态可能就是土地承载力的极值或顶板。任何不满足这种最佳配置结果的用途分配，不断的把边际土地投入到效用更高的生产中去，即超出了土地承载力的极限，都会造成土地本身的破坏。在实务上，可以通过分析土地资源在各种用途上的适宜性来确定这个顶板值。

4、顶板二：不超越最大废物排泄率。土地具有净化和修复功能，进入土地的排泄废物，可以通过扩散、分解，或沉淀、吸附，或生物和化学降解等途径，使排泄物暂时退出生物小循环。但是，当人类的废物排泄速度或强度超越了土地的纳废能力，土地的这种生态功能就会丧失。还需要特别注意的是，废物排泄具有累积效应，它是由许多人类活动相互作用形成的，这些人类活动单独看效果并不明显，而一旦集中积累起来，其效果就非常显著了。最大废物排泄率是纳废能力的函数，可以参照水环境纳污能力的计算模式，确定不同区域和不同城市的最大废物排泄率，从而确定最大废物排泄顶板值。如果人类生产和生活的排泄率超过了土地的最大纳废能力，即为最大废物排泄率。此时，就应该把活动总量或开发率控制在预先设定的顶板之下。

四、土地资源承载力研究的方法论创新

（一）人类工效研究方法论

人类工效研究方法论，就是按照人类工效学的原理，根据人的需求变化，研究人、土地、环境相互间的合理关系，以保证人类安全、健康、高效、舒适地生产和生活。土地的功能，主要是不断满足人类日益增长的物质和文化需求。土地资源承载力研究，本质上是揭示土地的功能和潜力是否能满足人类不断变化的物质和文化需求。因此，土地资源承载力研究首先要探索不同发展阶段人类的物质需求、生态需求和文化需求。按照不同的需求，确定满足人类不同需求的用地标准。如果区域或城市的土地不能满足这些需求，这说明超越了土地承载力的门槛，人类就需要采取规划、政策、个体行为调控等措施来改变土地承载力的过度负荷状态。确定用地标准，这是一项基础性的工作。它需要长期的定位观测，需要对需求人类学规律的深度把握，需要对人地互动机理学习和揭示。在很多情形下，最大的并不是最适的。当土地的空间潜力最大化时，不等于生活品质达到最高。在另一些情形下，最大多数人的最大幸福是毫无意义的。因为偏微分告诉人们，在同一时间里，人类无法使多个参数最大化。例如，城市土地紧凑利用可以解决资源短缺问题，但是如何处理废物排泄和解决开放空间问题，是同样不可忽视的。

（二）多元评价研究方法论

如上文所述，无论是不损害土地健康、不损害相关生态系统功能，还是不超越最大土地资源消耗，都可以通过建立有针对性的评价方法来进行控制。

1、土地健康评价。土地健康评价研究工作开始于20 世纪40 年代，虽然到现在为止尚不很成熟，但人类已经积累了非常有用的知识体系。尤其是20世纪90年代以来，随着土地健康问题的进一步突显，土地健康评价引起国内外的广泛关注，评价的方法论和具体的技术方法已经成型，总体上可应用于判断土地健康的状况。如果土地健康的状况持续下降，很可能是人类活动对土地的干扰超越了土地承载能力。

2、土地适宜性评价。土地适宜性评价是通过土地开发利用需求和土地质量的匹配来阐明土地开发利用的适宜用途，或者对具体土地用途的适宜性程度差异。它可分为农用土地适宜性评价、城市土地适宜性评价、风景旅游用地适宜性评价等类型，其方法论和具体的技术方法都已经很成熟。通过土地适宜性评价，可以大大减少对相关生态系统的损害，分析是否有不适宜土地的错位开发利用，或者有不适宜开发利用的土地投入了使用，从而使人类活动不超越最大土地资源消耗的顶板。

3、生态环境影响评价。生态环境影响评价是指对土地实施开发利用后可能产生的生态环境影响进行识别、分析、预测和评价，并在此基础上提出预防或减轻不良生态环境影响的对策和措施。具体可分为土地利用结构和规模调整的生态环境影响评价、土地利用空间布局调整的生态环境影响评价、土地开发整理复垦的生态环境影响评价和重大工程建设的生态环境影响评价。通过生态环境影响评价，可以判断人类对土地的干扰是否有损害相关生态系统的功能，也可以间接分析判断是否超越了最大土地资源消耗。

4、生态足迹评价。生态足迹是指在一定的经济规模条件下，维持特定人口的资源消费和废弃物消纳所必需的生物生产土地面积，它是一种测算人类对自然利用程度的新的综合指标。生态足迹分析评价是通过对生态足迹与生物承载力（区域能提供的生物生产土地面积）的计算和比较分析，来定量判断一个区域的发展是否处于土地生态承载力的范围内。生态足迹评价方法在国际上已经比较成熟，是解决土地承载力问题的一种相对有效方法。

（三）底线控制研究方法论

底线，是人们可以承受或能够认可阈值的下限，或某项活动进行前设定期望目标的最低和基本要求。底线控制，是一种按照底线标准，注重后顾之忧、注重防患于未然、注重对危机风险防范为主要特征的强制性管理活动。实际上，上述提及的不超越最大废物排泄率、不超越最大土地资源消耗两块顶板，也是一种底线，只是表现形式不同而已。之所以要采用底线控制的方法论，主要是缘于土地承载力研究的复杂性、不确定性和动态性。正如上文所述，土地承载力不仅涉及土地自身的结构和功能，还涉及消费结构、公共设施供给、人口变化、技术和制度、生产力变化、季节性或突发性环境变化、社会就业、社会秩序、水和能源供给、文化优雅性、政治制度、教育资源、土地制度、财政状况、管理水平、公共政策、灾害危机处理能力、天然灾害与疫病等几十个因素，细化下来可能会多达几百个因素。其间的变化过程和影响机理很难掌控，或者说根本就无法掌控。按照控制论的黑箱方法，对土地承载力这样的复杂大系统，只需要考察系统的输入与输出关系就可以认识系统的功能和状态。土地承载力研究的底线控制方法论，就是按照黑箱研究的方法论，不拘泥于观察系统内部的状态及其变化，只注重系统的输入和输出结果，以达到对承载力调控的目的。在研究过程中只要确定不损害土地健康和不损害相关生态系统功能的底线，不超越最大土地资源消耗和不超越最大废物排泄率的顶板，就能够实现土地资源承载力研究的目的和存在价值。

总体来说，土地资源承载力研究应该是有历史价值和当代意义的。目前的主要问题是人云亦云，过于简单化，缺少系统和科学的探索。未来希望有更多的土地科学工作者来共同寻找新的理论视角，突破传统的思维方式，建构更加科学的方法和技术体系，共同促进问题的解决。

自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论

靳相木 柳乾坤

（浙江大学　杭州　310058）

 **【导言】**生态足迹模型作为一种从生态学角度对自然资源消费进行核算的方法，其发展经历了从一维模型向二维模型，并从二维模型向三维模型的演进过程，本文从科学问题、模型内涵、应用指向和解释能力等4个方面对生态足迹模型演进作了梳理和评论。研究结果表明：（1）生态足迹模型对自然资源消费核算方法的探索，弥补了国民经济核算体系下自然资源核算的不足，成为一种评价可持续发展的生物物理性工具。（2）一维模型开创性地引入生态生产性土地概念开展自然资源消费核算，以此来测算人类活动对生态的占用情况；二维模型在自然资源消费核算维度的基础上，引入自然资源生态承载能力维度，开拓了自然资源承载力评价的新视野；三维模型进一步从流量和存量两个维度理解自然资源生态承载能力，以圆柱体体积表达生态足迹，生动刻画人类活动对所处区域的生态压力。（3）一维模型是二维、三维模型的基础，但它们解决的科学问题各有不同，从而所适用的研究尺度、应用指向也有所差异。（4）生态足迹模型属于静态分析模型，无法解释生态经济社会系统的动态变化情况；二维和三维模型属于封闭模型，其计算结果不能准确反映区域真实的生态状况。

一、引言

自然资源服务于人类生活与社会发展，它是人类赖以生存与持续发展的物质基础，一个地区的自然资源禀赋是影响该地区人类生活质量与社会发展趋势的关键因素[1-3]。自80年代以来，人类社会经济发展消耗了大量的自然资源，资源问题、环境问题日益受到人们的关注，许多国际组织及有关经济学家敏感地意识到开展资源核算可能是缓解资源危机的重要途径之一[4]。

自然资源核算的提出和发展，是为了修正国民经济核算体系（System of National Accounts，SNA）的缺陷。80年代中期以来，美国、加拿大、挪威、法国、荷兰等国家政府或者科研机构展开了对自然资源核算体系的研究。随后，自然资源核算的研究层出不穷[5-11]，绝大部分的研究均是将自然资源使用作为反映可持续发展的关键因素，将其纳入国民经济核算体系，以修正国民经济核算体系只重发展速度，忽视生态环境的缺陷。传统的自然资源核算，是指对一定时间和一定空间内的自然资源，在合理定价的基础上，从实物、价值和质量等方面，统计、核实和测量其自然资源总量和结构变化，反映其平衡状况的工作。其中，实物核算主要是对自然资源的流量、存量及其变化情况进行统计；价值核算以实物核算为基础，将自然资源的实物量直接按照市场价格转化为价值量，对其价值以货币化的形式进行统计，其价格往往是采用如影子价格法、收益还原法、净价法和边际社会成本法等方法确定的[12-15]。但是由于自然资源不同于一般商品，其本身并没用凝结人类劳动，传统的自然资源核算存在明显的缺陷[16-21]：（1）价格不能反映自然资源的存量情况以及再生恢复情况；（2）其核算服务于国民经济核算体系，忽略了自然资源的使用对生态环境的影响；（3）传统经济学框架下的国民经济核算体系认为，自然资源是可以被人造资本代替的。

1992年，William Rees另辟蹊径，在前人研究的基础上，从生态学的角度出发，充分考虑人类社会与生物圈之间的相互作用关系，将土地作为自然资源的母体，突出土地的生态底色，提出生态足迹概念，对人类自然资源消费活动以生态生产性土地面积的形式进行核算，构建了自然资源核算的生物物理工具[22]。

在Rees之前， Borgstrom曾提出“幽灵公顷”（Ghost Acreage）[23]。他指出，一些国家或地区的发展已经超过了本土土地的承载能力，支撑超出部分的土地在本土是看不到的，他可能位于这个星球上的其他地方。幽灵公顷一般包括国外的陆地（Trade Acreage）和海洋（Fish Acreage）。Catton根据当时自然资源的数量和经济发展速度，提出了“幻影承载力”（Phantom Carrying Capacity）概念[24]，他将“幻影承载力”解释为：虚幻而又不可靠的土地承载力，这种土地承载力就是自然资本，因为当前人类所利用的大部分自然资本都是不可再生资源，现在的利用将会导致以后不能利用，这部分资源不能永久的支撑人类的发展。Catton对Borgstrom 的“幽灵公顷”作了拓展，他认为人们不仅依赖从其他区域进口资源，并且还依赖从过去的某些时期进口资源，化石燃料的最原始的能量来源是亿万年前大量植物通过光合作用所利用的太阳能[25]。Overby提出了“承载力需求”理论（Carrying Capacity Demand）[26]，他认为不管科技水平，人类的生存发展都要依赖于自然界提供的生态产品和服务，随着人口的增加和人均自然资源消费的增长，人类需要越来越多的生态产品和服务，并且这些生态产品和服务很有可能来自其他地方。Macneill及其研究团队成员发现，发达国家的空气、饮水、食物、就业等需求都依靠它们在本土外的腹地（Hinterland）来提供，这些腹地不但要为发达国家提供资源，还要吸纳它们产生的废物，Macneill把这些腹地称为发达国家的“影子生态”(Shadow Ecology) [27]。William Rees提出的生态足迹理论就是在以上研究成果的基础上形成的。

自William Rees提出生态足迹理论以来，迄今生态足迹模型的发展经历了从一维模型向二维模型，并从二维模型向三维模型的演进。本文从科学问题、模型内涵、解释能力和应用指向等4个方面对生态足迹模型演进作了梳理和评论，以期引起对生态足迹模型的新思考，促进生态足迹模型在自然资源核算理论研究和实际应用中有更进一步的发展。

二、一维生态足迹模型

（一）科学问题

当前，人类正面临着如何协调经济发展与生态保护关系的难题。人类在地球上的各种活动都在生物圈中进行，并且会对生物圈产生影响。该前提与Hardin提出的生态学第一定律[[1]](#footnote-1)相吻合。这种假设也可以用热力学第二定律[[2]](#footnote-2)来解释[28]。经济系统只是生态系统下的一个次级系统，要维持经济系统的有序状态，就要不断地从生态系统中摄取低熵物质，释放高熵物质。保持经济增长是以增加了生态系统的无序性（或熵值）为代价的[29]。如果经济系统向生态系统的索取超过生态系统的再生能力，生态系统的熵值增加，生态系统会向无序状态变化（如气候变化）。

人类经济社会作为生物圈的一个子系统，一定区域内人类发展对自然资源的需求在潜在意义上可能已经突破该区域所能提供的上限，区域以及全球的生态环境面临严峻的挑战。如何对自然资源消费的来源及其使用后的分解同化追根溯源，并提出一种以生态保护为指向的自然资源消费核算方法，揭示人类活动对生态的占用情况，成为学界、各类机构以及政府部门所关注的热点问题。生态足迹模型作为一种自然资源消费核算的生物物理性工具，对这一科学问题的解决，提供了独特的思路。

（二）模型内涵及特点

William Rees将生态足迹定义为支撑一个区域内一定数量人口的自然资源消费和同化其所产生废物所需要的生态生产性土地面积。他将生态足迹比喻为“一只负载着人类所创造的城市、工厂、农田……的巨脚踏在地球上留下的脚印”[30]。从该定义来看，生态足迹仅仅是一个数量概念，并不限制于特定空间，因此，本文将其称之为一维生态足迹模型（以下称为一维模型）。Rees的一维模型将人类所消费的生物产品和生态服务分为23类，并分别对应6种生态生产性土地类型，通过土地产能数据，将人类对自然资源消费折算成相应的生态生产性土地面积，同时提出了均衡因子来平衡各地类之间的产能差异，经均衡因子修正后的各地类面积数据可以进行加和汇总，得到区域人类活动的生态足迹。

一维模型由于其计算结果为土地面积数值，并不考虑空间概念，因此，一维模型可以应用到任何尺度的测算上。目前各种尺度上的生态足迹测算都有人尝试，学者们将其归纳为：全球[31-32]、地区[33]和国家[34-38]宏观尺度，省[39-41]和城市中观尺度[42]，机构[43]、群体活动[44]和个人[30]微观尺度。同时，在不同的尺度下进行生态足迹的测算，由于数据的获取方式和区域特点的不同，不同尺度的测算需要采用不同的计算方法（如表1）。

表1 研究尺度及其计算方法

Table 1 Study scale and calculation method

|  |  |
| --- | --- |
| 研究区尺度 | 计算方法 |
| 全球、地区 | 综合法 |
| 国家 | 综合法、投入产出法 |
| 省 | 综合法、投入产出法、能值法 |
| 市、县 | 综合法、投入产出法、能值法、成分法 |
| 机构、群体活动和个人 | 成分法 |

（三） 解释能力

一维模型有别于国民经济核算体系下的自然资源核算方法，它以社会经济系统为生物圈的一个子系统为前提，从生态环境的角度出发，对自然资源的消费和使用后的废物吸纳进行折算，并用生态生产性土地面积来表征自然资源的消费结果。与之前用货币形式来表征自然资源价值的核算体系相比，一维模型更能够反映自然资源作为一种生态产品，来源于生态系统，作用于人类经济社会，并对生态系统产生反馈影响的作用机制，且能够在生物物理层次上反映人与生物圈之间相互对立、相互制约、相互依赖的关系。

（四） 应用

自William Rees提出生态足迹概念以来，由于其模型新颖、概念形象、不限尺度、计算科学、全球可比等优点，很快成为学界众学者所研究、讨论和应用的对象，生态足迹的计算也成为一些组织机构和个人的实践活动[[3]](#footnote-3)。生态足迹的广泛应用中，绝大多数集中在对各种地域尺度、机构和个人所消耗自然资源的核算方面。

同时，针对传统的土地承载力定义“一定区域的土地所能持续供养的最大人口数量”，William Rees将生态足迹模型看作传统土地承载力的逆运算，将土地承载力理解为“一定区域所能支撑的最大负担”，并以生态足迹作为测算该负担的主要方法，提升了认识土地承载力的境界，开启了土地承载力评价的新视野[30]。

此外，参考生态足迹的计算方法，一些学者将生态足迹的概念向其他领域引申，提出一个地区的旅游足迹[45]、钢铁足迹[46]、交通足迹[47]等。这些足迹的提出，实现了对足迹家族的拓展。

三、二维生态足迹模型

（一） 科学问题

William Rees提出的一维模型，构建了一个基于生态系统的自然资源消费核算方法，其计算结果以生态生产性土地面积的形式表征了人类活动对生态的占用情况。但是一维模型仅仅是对资源消费的核算，如何定义区域自然资源的供给能力并对其进行核算，将自然资源的消费与供给对比分析，评价区域的自然资源消费是否在其生态承载能力之内，以此为目标建立一套可持续发展评价体系，评判经济社会与生态环境是否协调发展，成为学界对一维模型向二维模型方向改进的重要动力[48]。

（二） 模型内涵及特点

Wackernagel对一维模型进行了改进，引入了生态承载力概念来表征区域自然资源的供给能力，形成了二维生态足迹模型[48]（以下简称为二维模型）。二维模型通过计算一个区域的生态足迹，并与该区域的生态承载力进行比较，来测度人类自然资源消费对自然资源流量的占用，分析区域生态赤字或盈余情况。二维模型对生态承载力的核算实质上是对自然资源流量的核算。所谓自然资源流量，它表示区域一定面积的土地一年所能生产的资源数量[17]。二维模型以区域所能提供的生态生产性土地面积来表征该区域的生态承载能力，这事实上是赋予生态足迹模型以空间尺度的概念。

1、研究尺度

一维模型中，可以计算各个尺度上的生态足迹。在二维模型中，由于增加了生态承载力指标，并不是在所有的尺度上都适合对其生态承载力进行统计。因此，二维模型应用受到研究区尺度的限制。如在全球、地区、国家、省、市、县尺度下，由于区域其范围大，地类构成齐全，且其区域内部居民的消费活动相对完整，因此，在该类中、宏观尺度下统计区域所具有的生态生产性土地面积，进而进行二维模型分析，是有意义的。但如在社区、学校等社会机构的微观尺度下，由于区域范围太小，并且地类相对单一，将该区域的生态生产性土地面积作为生态承载力显然不合理，进行二维模型分析便失去了现实意义。所以，二维模型对研究对象的选择是有条件的，有其特定的适用尺度。

2、 参数及地类面积统计

在二维模型中，对均衡因子和产量因子的计算一直是讨论的焦点，因为这两个关键参数的计算中所采用的产能数据的不同，将直接影响到计算结果的大小和可比性[41,49-51]。若采用全球某种地类的平均产能计算均衡因子，即生态足迹的计算结果以全球公顷为单位，则不能反映该地区资源消费对本地区的真实的生态压力，但是却可以抵消一部分从不同国家进口资源折算土地面积所造成的误差，并且生态足迹计算结果可以在区域间进行比较。若采用研究区的某种地类的产能数据计算均衡因子，计算结果能真实反映区域消费对本地区土地的需求数量，即生态足迹的计算结果以国家公顷或者地区公顷为单位，在计算生态承载力时无须再运用产量因子进行修正。因此，若研究尺度为全球、地区和国家，则采用第一种计算方式所得的研究结果较为准确、合理；若研究尺度为省、市、县等，则第二种计算方式所得研究结果可能更具有实际意义和说服力。

一维模型中，将生态生产性土地分为耕地、化石燃料土地、林地、草地、建筑用地和水域。在二维模型的广泛应用中，往往引入均衡因子对各地类的生态足迹和生态承载力进行平衡，并进一步加总计算区域的生态盈余或赤字。有学者认为，很难找到一个合理的均衡因子来平衡不同地类的生产能力，且经平衡后的数据含义也将发生变化[52]。对各地类的生态足迹和生态承载力进行汇总，实际上就是假定不同地类之间存在着可替代性，尤其部分地类的生态盈余与部分地类的生态赤字会产生抵消，使得生态赤字计算结果偏小，对生态压力估计可能不足。因此，有学者提出不对生态足迹和生态承载力中的6类生态生产性土地面积进行加总，而是分地类分析分析生态足迹和生态承载力以及进行生态盈余和生态赤字的计算，这有利于更加清晰的认识区域资源的消费结构和土地结构之间的匹配程度 [53]。

（三）应用及解释能力

1、应用

二维模型是对一维模型在应用上的延伸。Wackernagel将其构建的二维模型定义为一个测度一个地区可持续发展状况的工具。运用生态足迹模型进行可持续发展评价，是Wackernagel建立二维模型的初衷。二维模型作为评价区域可持续发展状况的工具，大部分研究通过生态足迹模型计算区域的生态赤字或盈余，来判断区域的可持续发展状况。此外，由于生态足迹和生态承载力都是以生态生产性土地面积的形式来表示，也有学者将二维模型作为土地承载力评价的方法之一，来判断当前土地对于人类所施加的压力是否处于超载状态[54]。还有学者通过计算人均生态足迹，结合区域的生态承载能力，来计算区域所能承载的适度人口规模，并与当前实际人口规模进行比较，评判当前区域人口是否超载及其超载程度[55]。

2、解释力

与一维模型相比，二维模型不止于对人类的自然资源消费进行核算，进一步引入了生态承载力概念来表征区域自然资源的供给能力，并将生态承载力与生态足迹进行对比，计算所得出的生态盈余或赤字是表征区域可持续发展状态的重要指标，对评价区域可持续发展情况提供依据。因此，二维模型作为一种评价区域可持续发展的生物理性工具，其所要解决的科学问题更加明确，应用指向也更加清晰，为可持续发展评价和自然资源流量核算提供了新思路。

将区域所能提供的生态生产性土地面积作为区域的生态承载力，并与生态足迹进行比较，这实质上是将研究区作为一个封闭系统，假定区域所消费的资源均有本地提供，所得出的生态盈余或者赤字结果也只是假设所有的生态压力均施加在本区域的土地之上。因此，二维生态足迹模型的结算结果，反映的只是封闭状态下一个地区的生态压力和生态状况。然而，而在实际中，区域往往是开放的，二维模型的计算结果往往无法准确反映一个区域当前真实的生态状况。如对一些发达地区进行二维模型分析，结果通常显示生态严重超载，其发展处于不可持续的状态，但在实际中，发达地区因贸易对生态压力的转移，其生态环境往往要好于欠发达地区。

另外，二维模型其计算结果一般是以一年为时间跨度，所得结果反映的是某年年底时的生态占用和生态承载状况。但是，无论是生态系统还是社会经济系统都是一个随时处于动态变化中的系统，因此需要在一个较长的时间段内，用二维模型逐年分析，才能监测生态系统和社会经济系统的变化过程。如果停留在以一年为时间跨度的核算上，其结果及相应建议的实际意义不强。

四、三维生态足迹模型

（一） 科学问题

生态经济学家Daly提出自然资源的可持续利用要遵循三个准则[59]：（1）不可再生资源的消费速度不应快于其再生速度；（2）不可再生资源的消费速度不应快于相应可再生资源的替代速度；（3）污染和废气物的排放速度不应高于生态系统同化吸纳速度。据此，一旦不可再生资源的消费速高于其再生速度或者相应资源的替代速度，自然资源存量将会被消耗，自然资源便处于透支状态。尽管一维模型、二维模型均承认自然资源在可持续发展中的重要性，但其关注的重点均为自然资源消费量和自然资源流量，而非自然资源存量[56]。从自然资源存量和自然资源流量两个方面研究自然资源的属性非常必要[57-58]。因此，如何将模型的关注点由自然资源流量转向自然资源存量，突出自然资源存量恒定对维持区域生态系统平衡以及可持续发展的关键性作用，成为生态足迹模型进一步改进的重点[60]。

（二） 模型内涵及特点

Niccolucci等在二维模型的基础上，引入了足迹深度和足迹广度两个新的指标，以圆柱体体积表征生态足迹，以此来解释人类对自然资源流量和自然资源存量的占用情况，将二维模型的平面分析拓展至三维模型的立体分析，实现了生态足迹研究的纵向拓展[61]。与二维模型引入生态承载力来表征资源流量相比，在三维模型中引入自然资源存量的概念。自然资源存量是相对于自然资源流量而言的，当自然资源流量不能满足人类消耗时，额外的消耗来自于自然资源存量。

生态足迹模型由二维向三维的演变过程如图1所示，在三维模型中存在以下关系，

 （1）

式中，为生态足迹；为区域所能提供的生态生产性土地面积；为生态赤字。

在三维模型中，存在着以下关系：

 （2）

 （3）

 （4）

式中，为足迹广度，为足迹深度。

 

b

a

图1 生态足迹模型由二维向三维的演变[61]

Fig. 1 Ecological footprint model evoluting from two-dimension to three deminsion

在三维模型中，当生态足迹小于生态承载能力时，以足迹广度来表征人类活动对自然资源流量的占用程度，此时生态广度等于生态足迹（如公式（2））；当生态足迹大于生态承载力时，就会引入足迹深度指标来表征人类活动对自然资源存量的占用程度（如公式（3））。足迹深度等于生态足迹与生态承载力之比（如公式（4）），该比值可以表示满足区域发展需求，再生产人类一年中的资源消费量所需要的年数，或者理论上需要多少倍的生态生产性土地面积才可以满足自然资源消费需求。可以认为，足迹深度是一个在时间尺度上反映区域生态压力的指标[62-63]。

（三） 应用及解释能力

生态足迹模型自提出以来，从一维模型向二维、三维模型的演进，都没有背离其用于自然资源核算、可持续发展评价的初衷，三维模型的应用也是围绕这两个方面进行。三维模型的应用指向与二维模型基本一致，与二维模型不同的是，由于引入了足迹深度和足迹广度两个新的指标，其计算结果对自然资源消费核算、自然资源流量和存量占用以及区域可持续发展状况评价的解释能力更强。

在二维模型中，区域可持续发展情况是通过分析区域自然资源供给能否满足区域人口自然资源消费需求来判断的。二维模型与传统的经济模型相比，它承认自然资源在可持续发展中扮演着重要角色，但是并没有对自然资源的流量和存量做进一步区分，仅仅能反映一个地区生态系统是否处于超载状态，缺乏相应的指标对其超载程度进行解释。三维模型通过引入足迹深度和足迹广度两个指标，分析人类自然资源消费对资源流量和资源存量的占用情况，可以从横向上对是否超载，从纵向上对超载程度进行解释，并可以突出自然资源存量对生态系统的平衡以及可持续发展所起的不可替代的作用[64]。

但是，这里必须指出的是，Niccolucci等所提出的三维模型只是对生态赤字状态（即）下的二维模型进行了三维拓展，其足迹深度指标只能表征自然资源消费对自然资源存量的占用程度，而当自然资源消费仅占用自然资源流量时，仍然以足迹广度这样一个二维平面指标来表征生态足迹的大小。因此，Niccolucci等的三维模型无法对生态盈余状态（即）下自然资源消费对自然资源流量的占用程度以及自然资源流量的结余程度进行计量。

五、结论和讨论

本文通过梳理一维、二维和三维生态足迹模型的演进，得到以下结论：

（1）三种足迹模型均是从生态学的角度出发，将自然资源作为影响可持续发展的关键因素，以生态生产性土地面积的形式对自然资源进行核算和计量，弥补了国民经济体系下自然资源核算方法的不足，突出了自然资源使用对生态环境的影响。

（2）三种模型对于自然资源核算的侧重点不同。一维模型仅对人类活动所消费的自然资源进行核算；二维模型除核算人类的自然资源消费量之外，还对支撑人类自然资源消费的自然资源流量供给进行核算，通过对比人类每年资源消费量和自然资源流量供给，分析区域生态盈余和赤字情况；三维模型在一维和二维模型的基础上，进一步对自然资源存量进行核算，从时间尺度上分析了人类资源消费对区域自然资源存量的消耗程度。

（3）一维模型是二维和三维模型的基础，二维和三维模型分析在一维模型对生态足迹的计算结果上进行。因此，一维模型中，有关因子的计算方法对二维、三维模型的计算结果产生影响。由于二维、三维模型引入了涉及空间尺度的生态承载力概念，二维和三维模型不适用于社区、机构或个人等小尺度研究。

（4）生态足迹模型属于静态分析模型，其计算结果反映的是某年年底时的生态占用和生态承载状况，并不能反映该时间段内生态系统和社会经济系统的动态变化情况。尤其，二维、三维生态足迹模型均假定区域所消费的资源均有本地提供，所得出的生态盈余或者赤字也是假设所有的生态压力均施加在本区域土地之上，因此二维、三维模型的计算结果反映的只是封闭状态下一个地区的生态压力和生态状况。在实际中，区域往往是开放的。

生态足迹模型作为一种基于生态学角度的可持续发展评价的生物物理工具，它对于解决当前人类面临的自然资源核算问题，与传统的自然资源核算相比具有明显的优势。但是，由于自然资源生态价值测度始终是困扰学界的一个难题，生态足迹模型也仅仅是解决这个难题所迈出的一步。生态属性只是自然资源的属性之一，生态足迹模型作为自然资源消费核算的一种方法，其核算结果如何能够融入于国民经济核算体系，在国民经济核算体系中凸显自然资源的生态价值，需要今后进一步的深入研究。

从生态足迹模型结构优化的角度看，如何将生态盈余状态的二维分析三维化，并与生态赤字状态的三维模型分析融合为一体，形成一个统一的三维模型，是Niccolucci等的三维模型今后的一个重要改进方向。此外，自然资源在区域间的物质流动以及自然资源消费对生态环境影响在区域间的转移机制等，也是今后模型发展所要关注和解决的重要问题。

参考文献

[1] 谢高地，封志明，沈镭等. 自然资源与环境安全研究进展[J]. 自然资源学报，2010，9（25）：1424-1431.[XIE Gao-di, Feng Zhi-ming, SHEN Lei, et al. Research progress in natural resource and environment security. *Journal of Natural Resources*, 2010, 9(25): 1424-1431.]

[2] 庄立，刘洋，梁进社. 论中国自然资源的稀缺性和渗透性[J]. 地理研究，2010，30（8）：1351-1360.[ZHUANG Li, LIU Yang, LIANG Jin-she. Research on natural resource scarcity and penetration in china. *Geographical Research*, 2010, 30(8)：1351-1360.]

[3] 徐广才，康慕谊，史亚军. 自然资源适应性管理研究综述[J]. 自然资源学报，2012, 28（10）：1797-1807.[XU Guang-cai, KANG Mu-yi, SHI Ya-jun. A review of adaptive management research on natural resources. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 1797-1807.]

[4] 李金昌，钟兆修，高振刚. 自然资源核算的理论与方法[J]. 数量经济技术经济研究， 1991, (1):30-35. [LI Jin-chang, ZHONG Zhao-xiu, GAO Zhen-gang. Theory and method of natural resource accounting. *Journal of Quantitative and Technical Economics*, 1991, (1): 30-35.]

[5] 贺锡苹，张小华. 耕地资产核算方法与实例分析[J]. 中国土地科学，1994，（6）：23-27.[HE Xi-ping, ZHANG Xiao-hua. Farmland property accounting method and example analysis. *China Land Science*, 1994, (6): 23-27.]

[6] 高兴佑，郭昀. 可持续发展观下的自然资源价格构成研究[J]. 资源与产业，2010，12（2）：129-133.[ GAO Xing-you, GUO Yun. Study on price structure of natural resources from the point of view of sustainable development. *Resources & Industries*, 2010, 12(2):129-133.]

[7] Prudham W S, Lonergan S. Natural resource accounting(I)：A review of existing frameworks. *Canadian Journal of Regional Science*, 1993, 16(3)：363-386.

[8] Harris M, Fraser I. Natural resource accounting in theory and practice: A critical assessment. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2002, 46(2)：139-192.

[9] Hambira W L. Natural resources accounting: A tool for water resources management in Botswana[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32(15)：1310-1314.

[10] 张宏亮. 自然资源估价理论与方法研究——基于宏观环境会计的视角[J]. 山西财经大学学报，2007, 29（3）：15-20.[ZHANG Hong-liang. Natural resources evaluation theories and method analysis-From the perspective of macro-environmental accounting. *Journal of Shanxi Finance and Economics University*, 2007, 29(3): 15-20.]

[11] 潘震宇，高清平. 基于可持续发展的资源核算理论方法探讨[J]. 科技进步与对策，2003，（3）：90-92.[PAN Zhen-yu, GAO Qing-ping. A resource accounting method based on sustainable development. *Science and Technology Progress and Policy*, 2003, (3): 90-92.]

[12] [封志明](http://www.cnki.net/kcms/detail/search.aspx?dbcode=CJFQ&sfield=au&skey=%e5%b0%81%e5%bf%97%e6%98%8e&code=05973571;10342190;25461771;)， [杨艳昭](http://www.cnki.net/kcms/detail/search.aspx?dbcode=CJFQ&sfield=au&skey=%e6%9d%a8%e8%89%b3%e6%98%ad&code=05973571;10342190;25461771;)，[李鹏](http://www.cnki.net/kcms/detail/search.aspx?dbcode=CJFQ&sfield=au&skey=%e6%9d%8e%e9%b9%8f&code=05973571;10342190;25461771;). 从自然资源核算到自然资源资产负债表编制[J]. 中国科学院院刊，2014，29（4）：449-456.[ FENG Zhi-ming, YANG Yan-zhao, LI Peng. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in china’s CO2 emission. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(4): 449-456.]

[13] 吴优，曹克瑜. 对自然资源与环境核算问题思考. 统计研究, 1998，（2）：59-63.[WU You, CAO Ke-yu. Thinking about the problem of natural resource and environment accounting. *Statistics and Researh*, 1998,(2): 59-63.]

[14] 马骏，张晓蓉，李治国. 中国国家资产负债表研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2012, 377.[MA Jun, ZHANG Xiao-rong, LI Zhi-guo. A Study of China’s National Balance Sheet. Beijing: Social Science Academic Press, 2012.]

[15] 陈红. 浅议自然资源核算[J]. 上海统计,1999，(2)：30-32.[CHEN Hong. Discussion on natural resource accounting. *Shanghai Statistics*, 1999, (2):30-32.]

[16] Solow R M. Intergenerational equity and exhaustible resources[J]. *The Review of Economic Studies*, 1974, 41(1): 29-46.

[17] 李金昌. 关于自然资源的几个问题[J]. 自然资源学报，1992，7（3）：193-207.[LI Jin-chang. Some problems about natural resource. *Journal of Natural Resources*, 1992, 7(3): 193-207.]

[18] 郝晓辉. 对自然资源核算的初步分析[J]. 自然资源，1995，（3）：6-8.[HAO Xiao-hui. Preliminary analysis of resource accounting. *Natural Resource*, 1995, (3): 6-8]

[19] 赫维人. 关于自然资源核算的若干问题[J]. 云南大学学报（自然科学版），1997,19（增刊）：109-112. [HE Wei-ren. Some problems about natural resource accounting. *Journal of Yunnan University*, 1997, 19(zk):109-112.]

[20] 吴新民，潘根兴. 自然资源价值的形成与评价方法浅议[J]. 经济地理，2003,23（3）：323-326.[WU Xin-min, PAN Gen-xing. Discussion on theform and methods of the natural resource' s value. *Economic Geography*, 2003, 23(3):323-326.]

[21] 姜文来，龚良发. 我国资源核算演变历程问题及展望[J]. 国土与自然资源研究，1999，（4）：43-46.[PAN Wen-lai, GONG Liang-fa. The evolution course problems and expectation on check and calculation of natural resources in China. *Territory and Natural Resources Study*, 1999, (4): 43-46.]

[22] Rees E W. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992 ,4 (2):121-130.

[23] Borgstrom G. The Hungry Planet: The Modern World at the Edge of Famine. [M], New York: Collier, 1965.

[24] Catton W. Overshoot-the ecological basis of revolution change[M]. Athens: University of Illinois Press, 1982.

[25] Catton W. Carrying capacity and the limits to freedom[C]. Xl World Congress of Sociology, New Delhi, 1986.

[26] Overby R. The urban economic environmental challenge: improvement of human welfare by building and managing urban ecosystems[C]. The POLMET 85 Urban Environmental Conference. Washington, DC: The World Bank, 1985.

[27] Macneill J, Winsemius P, Yakushiji T. Beyond Interdependence: The meshing of the World’s Economy and the Earth’s Ecology[M]. Oxford University Press，London and New York，1991.

[28] Williamson A G. The second law of thermodynamics and the economic process[J]. *Ecological Economics*, 1993, 7(1): 69-71.

[29] Ayres R U. Eco-Thermodynamics: Economics and the Second Law[J]. *Ecological Economics*, 1998, 26(2): 189-209.

[30] Wackernagel M, Rees E W. Our Ecological Footprint—Reducing Human Impact on Earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[31] York R, Rosa E, Dietz T. Footprints on the earth: the environmental consequences of modernity[J]. *American Sociological Review*, 2003, 68(2), 279-300.

[32] Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D, et al. Tracking the ecological overshoot of the human economy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99, 9266-9271.

[33] Galli A, Halle M, Grunewald N. Physical limits to resource access and utilization and their economic implications in Mediterranean economies[J]. *Environmental Science and Policy*, 2015, (51): 125-136.

[34] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. Ecological Foot prints of Nations[C]. Commissioned by the Earth Council for the Rio+5 Forum.International Council for Local Environmental Initiatives, Toronto, 1997.

[35] Wackernagel M, Onisto L, Bello P. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375–390.

[36] Haberl H, Erb K H, Krausmann F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926-1995[J]. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25-45．

[37] 谢高地，鲁春霞，成升魁等. 中国的生态空间占用研究[J].资源科学，2001，23（6）：20-23.[ XIE Gao-di , LU Chun-xia ,CHENG Sheng-kui, et al. Evaluation of natural capital utilization with ecological footprint in china[J]. *Resources Science*, 2001, 23(6): 20-23.]

[38] 徐中民，陈东景，张志强等. 中国 1999 年的生态足迹分析[J]. 土壤学报，2002，39（3）：441-445.[ Xu Zhong-min, Cheng Dong-jing, Zhang Zhi-qiang, et al. Calculation and analysis on ecological footprints of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3):441-445.]

[39] 徐中民，张志强，程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报，2000，55（5）：607-616.[ XU Zhong-min, ZHANG Zhi-qiang, CHENG Guo-dong. the calculation and analysis of ecological footprints of Gansu province. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 607-616.]

[40] 张志强，徐中民，程国栋等. 中国西部 12省 (区市) 的生态足迹[J]. 地理学报，2001，56（2）：599-609.[ ZHANG Zhi-qiang, XU Zhong-min, CHENG Guo-dong, et al. The ecological footprints of the 12 provinces of west China in 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2001,56(2):599-609.]

[41] 张恒义，刘卫东，林育欣等. 基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J]. 生态学报，2009，29（5）：2738-2747.[ZHANG Heng-yi, LIU Wei-dong, LIN Yu-xin. A modified ecological footprint analysis to a sub-national area: the case study of Zhejiang Province. *Acta Ecological Sinica*, 2009, 29(5): 2738-2747.]

[42] Folke C, Jansson A, Larsson J, Costanza R. Ecosystem appropriation by cities[J]. *Ambio*, 1997, 26(3): 167-172.

[43] Li G J, Wang Q, Gu X W, et al. Application of the componential method for ecological footprint calculation of a Chinese university campus[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(1): 75-78.

[44] Collins A, Jones C, Munday M. Assessing the Environmental Impacts of Mega Sporting Events: Two Options?[ J]. *Tourism Management*, 2009, 30(6): 828-837.

[45] 肖建红，于庆东，刘康等. 海岛旅游地生态安全与可持续发展评估——以舟山群岛为例[J]. 地理学报，2011，66（6）：842-852.[ XIAO Jian-hong, YU Qing-dong, LIU Kang, et al. Evaluation of the ecological security of island tourist destination and island tourist sustainable development: A case study of Zhoushan Islands. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(6): 842-852.]

[46] 贺成龙，吴建华，刘文莉. 成分法计算钢铁的生态足迹[J]. 环境科学学报，2009，29 (12)： 2651-2657.[HE Chen-long, WU Jian-hua, LIU Wen-li. Calculating the ecological footprint of the iron and steel industry with a component approach. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2009, 29 (12): 2651-2657.]

[47] Muliz I, Galindo A. Urban form and the ecological footprint of commuting, the case of Barcelona[J]. Ecological Economics, 2005, 55(4): 499-514.

[48] Wackernagel M. Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity：A Tool for Planning Toward Sustainability[D]. University of British Columbia，1994.

[49] 顾晓薇，王青，刘建兴等. 基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法[J]. 东北大学学报（自然科学版），2005，26（4）：295-298.[ GU Xiao-wei , WANG Qing , LIU Jian-x ing, et al. New method of urban ecological footprint calculation based on:“National Hectare”. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(4): 295-298.]

[50] 白钰. 基于生态足迹的天津市土地利用总体规划生态效用评价[J]. 经济地理，2012，32（10）：127-132.[BAI Yu. Assessment of eco-efficiency of Tianjin land use master plan based on ecological footprint model. *Economic Geography*, 2012, 32(10): 127-132.]

[51] 刘某承、李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J]. 自然资源学报，2009，24（9）：1550-1559.[ LIU Mou-cheng, LI Wen-hua. The calculation of China' s equivalence factor under ecological footprint mode based on net primary production. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1550-1559.]

[52] 陈成忠，林振山. 生态足迹模型的争论与发展[J]. 生态学报. 2008，28（12）：6252-6263.[CHEN Cheng-zhong, LIN Zhen-shan. Debate and development of ecological footprint model during the last10 years. *Acta Ecological Sinica*, 2008, 28(12): 6252-6263.]

[53] 宋旭光. 生态占用测度问题研究[J]. 统计研究， 2003，16(4)：86-88.[SONG Xu-gaung. Study on the measurement of ecological appropriation. *Statistical Research*, 2003, 16(4): 86-88.]

[54] 许月卿. 基于生态足迹的北京市土地生态承载力评价[J]. 资源科学，2007，29（5）：37-42.[XU Yue-qing. Evaluation of ecological carrying capacity based on ecological footprint model in Beijing. *Resources Science*, 2007,29(5): 37-42.]

[55] 孙中锋，吴晨，周文静. 基于生态足迹法的生态适度人口研究—以皖江城市带为例[J]. 山西农业大学学报（社会科学版），2014，13（12）：1193-1197. [SUN Zhong-feng，WU Chen，ZHOU Wen-jing. Research on the eco-optimum population based on ecological footprint—Taking the city-cluster along the Yangtze River in Anhui for example. *Journal of Shanxi Agricultural University (Social Science Edition)*, 2014, 13(12): 1193-1197.]

[56] 徐中民, 程国栋, 张志强.生态足迹方法的理论解析[J].中国人口·资源与环境，2006, 16(6): 69-78. [XU Zhong-min, CHENG Guo-dong, ZHANG Zhi-qiang. A resolution to the conception of ecological footprint. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(6): 69-78.]

[57] Zhong F L, Xu Z M, Zhang Z Q. Identifying key differences between ecological economics and conventional economics[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(4): 401-407．

[58] 方恺，高凯，李焕承. [基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究，2013，31（12）：1700-1707. [FANG Kai, GAO Kai, LI Chen-Huan. International comparison of natural capital use: A three-dimensional model optimization of ecological footprint.](https://www.baidu.com/link?url=LFImrBoUT9rNmVrX5fZxUMZKmi-pfh_8nAaX_2lnUsnwluXSpI5ZVxoD7V92rq8lYdWAoX6KTEzOSHovSOtzWh49d5CqUB4YgqK0-VwuSzeujVU6A1_JR5KqhZImhI44kRX-MUrZaM-xn9_PoJ4C15GTCAh24_HEktNXM4sOZ76wchz0gDBBUoL4xDATBMaYAX3EgeGV9CiBGwCjGs7_3PCVWTrYvkQZ7zMPy29ab4fz6zCfBPBUJtgO66AeCD2zQO9itoSpxv3LpD1XO6Qhi4XDZtKprCDGXEUtDoLOUA5FomyihjZrWCFVltEmQLfm7OsPC-PVAgYe6S6fUHxvOxXPWMRG0cfeRfsrxXVEZvgw0KqzjZJXT89VhjKCObYPDGjS_PZeyCWiqNPs-EI9XWevJJZVyVwiHUfOd5zS6bxcnnchJtz1dCeG_K3RxzfsL9fqzC-5bQFSDvpPLxq-oJ64wYBA8yDfMnrDYYYEtBy&wd=&eqid=f92a287600064cf100000004567f52bf" \t "_blank) *[Geographical Research](https://www.baidu.com/link?url=LFImrBoUT9rNmVrX5fZxUMZKmi-pfh_8nAaX_2lnUsnwluXSpI5ZVxoD7V92rq8lYdWAoX6KTEzOSHovSOtzWh49d5CqUB4YgqK0-VwuSzeujVU6A1_JR5KqhZImhI44kRX-MUrZaM-xn9_PoJ4C15GTCAh24_HEktNXM4sOZ76wchz0gDBBUoL4xDATBMaYAX3EgeGV9CiBGwCjGs7_3PCVWTrYvkQZ7zMPy29ab4fz6zCfBPBUJtgO66AeCD2zQO9itoSpxv3LpD1XO6Qhi4XDZtKprCDGXEUtDoLOUA5FomyihjZrWCFVltEmQLfm7OsPC-PVAgYe6S6fUHxvOxXPWMRG0cfeRfsrxXVEZvgw0KqzjZJXT89VhjKCObYPDGjS_PZeyCWiqNPs-EI9XWevJJZVyVwiHUfOd5zS6bxcnnchJtz1dCeG_K3RxzfsL9fqzC-5bQFSDvpPLxq-oJ64wYBA8yDfMnrDYYYEtBy&wd=&eqid=f92a287600064cf100000004567f52bf" \t "_blank)*[, 2013,31(12):1700-1707.]](https://www.baidu.com/link?url=LFImrBoUT9rNmVrX5fZxUMZKmi-pfh_8nAaX_2lnUsnwluXSpI5ZVxoD7V92rq8lYdWAoX6KTEzOSHovSOtzWh49d5CqUB4YgqK0-VwuSzeujVU6A1_JR5KqhZImhI44kRX-MUrZaM-xn9_PoJ4C15GTCAh24_HEktNXM4sOZ76wchz0gDBBUoL4xDATBMaYAX3EgeGV9CiBGwCjGs7_3PCVWTrYvkQZ7zMPy29ab4fz6zCfBPBUJtgO66AeCD2zQO9itoSpxv3LpD1XO6Qhi4XDZtKprCDGXEUtDoLOUA5FomyihjZrWCFVltEmQLfm7OsPC-PVAgYe6S6fUHxvOxXPWMRG0cfeRfsrxXVEZvgw0KqzjZJXT89VhjKCObYPDGjS_PZeyCWiqNPs-EI9XWevJJZVyVwiHUfOd5zS6bxcnnchJtz1dCeG_K3RxzfsL9fqzC-5bQFSDvpPLxq-oJ64wYBA8yDfMnrDYYYEtBy&wd=&eqid=f92a287600064cf100000004567f52bf" \t "_blank)

[59] Daly H E，Farley J. Ecological Economics: Principles and Applications[M]．Washington: Island Press, 2004．

[60] 方恺，Heijungs Reinout. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. 地理科学进展，2012,31（12）：1700-1707.[FANG Kai, Heijungs Reinout. A review on three-dimensional ecological footprint model for natural capital accounting. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1700-1707.]

[61] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20) :2819-2823．

[62] Niccolucci V, Galli A, Reed A, etal. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16) : 2939-2944．

[63] 方恺, 李焕承. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资本利用省际格局. 自然资源学报, 2012, 27 (12): 1995-2005.[FANG Kai, LI CHENG-huan. Provincial pattern of China’s natural capital use: A modification and application of ecological footprint depth and size. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27 (12): 1995-2005.]

[64] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报,2013,33(1):267-274.[FANG Kai. Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 267-274.]

浙江大学土地与国家发展研究院成立于2014年，是国土资源部和浙江大学合作共建的专业研究机构。研究院以土地资源基础性、前瞻性重大理论和现实问题研究为重点，以建设一流的中国土地资源政产学研协调创新平台和高端人才培养基地为目标，在国土资源部的直接指导下，充分发挥浙江大学多学科的综合优势，依托广泛的国际和国内合作，努力打造高端智库，促进国家发展。

《土地观察》系本研究院主办的交流刊物，着重关注当下国家发展所面临的重大土地问题，特别支持有中国视角、有扎实根据和有创新观点的观察与思考。文章议题不限，篇幅约为一至三万字。来稿请提供300字以内的中文摘要，参考文献统一采用文后标注格式。

主编：吴次芳

副主编：叶艳妹 靳相木（常务）

编辑部地址：杭州市西湖区余杭塘路866号浙江大学蒙民伟楼128室（邮编310058）

电话：0571-56662127

传真：0571-56662127

电子邮件：jinxiangmu@zju.edu.cn

网站：www.land.zju.edu.cn

反馈意见敬请联系编辑部

1. 生态学第一定律认为我们的任何行动都不是孤立的，对自然界的任何侵犯都具有无数的效应，其中许多是不可预料的（You cannot do only one thing） [↑](#footnote-ref-1)
2. 热力学第二定律又称熵增定律。熵是描述一个系统有序程度的量。熵值越大越无序，熵值越小越有序。孤立热力学系统的熵不减少，总是增大或者不变。低温物体—高熵值系统（无序），高温物体—低熵值系统（有序），高熵值系统会向低熵值系统摄取低熵物质，以使自身达到低熵状态（有序）。 [↑](#footnote-ref-2)
3. 英国最大的环保运动“Going for Green”发起的名为“EcoCal”（Ecology Calculation）调查对一个家庭的生态足迹（Ecological Garden）进行了测算。 [↑](#footnote-ref-3)