

DOI: 10.5846/stxb201305070969

郭贝贝, 杨绪红, 金晓斌, 周寅康. 生态流的构成和分析方法研究综述. 生态学报, 2015, 35(5): 1630-1639.

Guo B B, Yang X H, Jin X B, Zhou Y K. A review on the composition and analysis of ecological flow. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1630-1639.

生态流的构成和分析方法研究综述

郭贝贝, 杨绪红, 金晓斌*, 周寅康

南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 人类活动带来的生态环境和土地利用变化是全球变化研究的重点内容之一。在复杂的自然生态系统中, 各组分之间的物质循环、能量流动和信息传递通常以流态形式来表达, 其路径、方向、强度、速率等对生态系统产生重要影响。系统分析了生态流的起源与发展, 从能流、物质流和信息流三方面对生态流进行了解构, 并对相关原理和分析方法进行了总结和述评。在现有研究基础上, 以典型半人工半自然的农田生态系统为例, 通过生态网络连接度等指标与纯自然生态系统对比分析生态流的流向、路径和强度等, 人类活动增强了生态系统的灵活度, 但扰乱了原有的稳定性。生态学家一直专注于研究适用于统一计算生态流的方法, 其量化已具有一定的研究基础, 但仍存在许多问题, 在以后的研究中仍需系统地深入探索。

关键词: 生态流; 能值; 扩展火用分析; 生态系统

A review on the composition and analysis of ecological flow

GUO Beibei, YANG Xuhong, JIN Xiaobin*, ZHOU Yinkang

School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Ecological environment and land-use changes brought about by human activity are one of the highlights of the global change research. In complex natural ecosystems, among the various components of material cycles, energy flow and information delivery is usually expressed as a flowing form. Its path, direction, intensity, speed have an important impact on the ecosystem. This article analyzes the origin and development of ecological flow. The energy flow, material flow and information flow from the three areas to understand the ecological flow structure. And it gives a summary and review of relevant theory and analysis methods. On the basis of the existing studies, it analyzes the ecological flow in a typical half-sown semi-natural farmland ecological system. For example, through ecological indicators, such as network connections and the pure comparative analysis of natural ecosystems and ecological stream flows, paths and intensities of human activity enhances the flexibility of ecological systems, but disrupting the stability of the original. Conventionally, a single conservative medium is allowed as to the quantification of ecological flows, for example materials (e.g., grams of carbon) or energy (e.g., kilojoules), which is the major constraint during network construction. However, more than one kind of flow operates in ecosystem. Ecologists have been focused on applicable methods for a unification of all the eco-flows. Of which, energy analysis and extended exergy analysis were invented respectively. Energy analysis was to integrate the value of free environment investment, goods, services and information in a common unit of measurement via solar transformity, which makes it possible to evaluate all of the eco-flows (materials, energy, and information) with ecosystem. On the other hand, extended exergy analysis also provides a unified way to measure various flows with solid scientific basis, and provides a wide and clear vision of the use and degradation of resources and energy. Research foundation of ecological flow quantification have attained, but there are still many problems in future studies, which still need to be systematically explored.

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20120091110014); 国家自然科学基金资助项目(41201386); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13_0046)

收稿日期: 2013-05-07; 网络出版日期: 2014-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinxb@nju.edu.cn

Key Words: ecological flow; emergy; extended exergy analyze; ecosystem

随着全球生态环境问题凸显,采用生态学方法从不同时间和空间尺度对地球、大气、地表水和生物系统之间的相互作用以及人类活动对地球的影响进行分析,揭示生态系统的演变规律,研究全球变化对其影响和反馈得到学术界的广泛关注。IPCC 第四次评估报告^[1]中指出,全球化的能量、物质和信息流动跨越边界、国家,研究全球变化最大的挑战是整合全球环境变化、生态系统的水文和生物地球化学循环,生物多样性、生态干扰制度等,须了解全球环境变化对生态系统结构和功能的结合和互动效果的影响。

1 生态流的内涵、特征与结构

1864 年 Marsh^[2-3]的第一部关于生态环境的作品描述人与自然关系时记录人类活动对环境影响,推动了生态学研究进展^[4]。生态系统由 Tansley^[5]于 1935 年首次提出,指在一定时间和空间内、由生物群落及其环境组成的统一整体,各组成要素间借助能量流动、物质循环、信息传递而相互联系并相互制约,形成了具有自调节功能的复合体。在生态系统中,通常以“流”的形式定量表述各组分之间及其与环境之间不断地进行着物质的、能量的和信息的交换强度^[6]。自然生态系统一般被看作是相对恒定的,任何新的系统组成都有可能打破原平衡系统的稳态,系统通过“流”(包括路径、方向、强度和速率等)去影响其他组分并进行自我修复^[7]。

生态流是反映生态系统中生态关系的物质代谢、能量转换、信息交流、价值增减以及生物迁徙等的功能流,是种群(出生与死亡)、物种(传播)、群落(演替)、物质(循环)、能量(流动)、信息(传递)、干扰(扩散)等在生态系统内空间和时间的变化。生态系统中的生态流可以聚集和穿越生态系统进行水平扩散,但需要通过克服空间阻力来影响并实现与之相联系的斑块之间的相互作用及动态^[8],物质运动过程同时也伴随着一系列能量转化和信息传递过程,物质流可视为在不同能级上的有序运动,它们是生态过程的具体体现^[9]。目前,生态系统的退化现象较为普遍,生态流的研究方法可实现对国家到斑块等不同空间尺度下生态系统可持续性的衡量^[10]。

目前,生态流的研究已被应用于农田生态系统和城市生态系统等领域,但从进展来看,相关研究尚处在“概念引入”阶段,相应的分析范式、技术方法和典型分析尚不多见。本文拟在系统回顾与归纳具有自然特性的生态流结构组成和计算方法的基础上,对比各种生态流量化模型,并讨论生态流的统一计算方法,这在生态学和地理学的范式研究中均具有重要意义。

2 生态流的分析方法

在生态系统中,能量流动、物质循环和信息传递是其基本功能,也是地球上生命赖以生存和发展的基础,三者相互影响,缺一不可。生态流(物质流、能量流、信息流)和价值流是生态经济系统的四大要素,并通过多种形式、多种渠道进行着物质循环和能量转化,构成生态经济系统的网络系统。价值流是社会经济活动的产物,它仅仅在经济系统内部流动,并与生态流成相反的方向流动^[11]。因此,能流、物质流和信息流可以看作是自然生态系统的主要功能流。

2.1 能流和能值

根据热力学第一定律和第二定律,生态系统的能量在流动时,总有一部分能量转化为不能利用的热能而被耗散,但能的质量是逐步提高和浓集的。自 Tansley 以后, Lindeman R. 研究了生态系统营养物质流的规律^[12],根据计算第 n 种植物固定的能量 A_n 、吸收量 I_n 和净初级生产力 NPP (Net Primary Productivity) 出了著名的“百分之十”定律:

$$I_{n+1}/I_n = A_n/I_n \times \text{NPP}_n/A_n \times I_n + 1/\text{NPP}_n$$

各级之间的能量转化率 I_{n+1}/I_n 约为 10%,成为生态系统能流动态研究的奠基者,开启了生态学从定性向定量发展的新阶段^[6]。

1971 年 Odum E.P. 提出生态系统一定的空间内生物成分和非生物成分的能量和物质关系会产生不同特征的功能,建立了包括能量金字塔、数量金字塔和生物量金字塔三种类型的生态金字塔^[13]。20 世纪 70 年代,学者们开始使用实测数据和经验回归模型对生态系统能量流动过程中的初级生产力进行研究,其中具有代表性气候生产力模型^[14-18]见表 1。

表 1 典型 NPP 模型列表

Table 1 A list of typical Net Primary Productivity Models

代表性模型 Representative Model	研究变量 Study Variables	公式 Formula	特点 Characteristic
Global NPP	总第一生产力 (GPP)、消耗量 R_a	$NNP = GPP - R_a$	全面计算全球 NPP
Miami	年均温度 t	$NNP_t = 3000(1 + e^{1.315 - 0.1196t})$	根据 Liebig 最小因子定律,
	年降水量 r	$NNP_r = 3000(1 - e^{-0.000664r})$	可信度较差
Thornthwaite Memorial	年实际蒸散量 E	$NNP_e = 3000(1 - e^{-0.0009695(E-20)})$	因子全面,结果较为合理
Chikugo	辐射干燥度 (RDI)、净辐射 (R_n)	$NNP = 0.29e^{-0.216(RDI)^2} \cdot R_n$	有理论基础但应用范围有限
CASA (Carnegie Ames Stanford Approach)	光合有效辐射 (APAR)、光能转化率 ε	$NNP = APAR \cdot \varepsilon$	参数求取复杂

1983 年 Odum H.T. 创造了能值 (emergy)^[19] 的概念,创建了能量符号语言 (energy symbol language), 其中箭头指向代表能量流动的方向,并逐渐用于能流定量计算模型研究。Lotka^[20] 所建立的生物群落进化最大功率原理被 Odum 扩展为扩散系统进化的一般原理^[21], 后来多用于建立生态网络模型。20 世纪 90 年代, 闻大中^[22] 对近年来农业生态系统能流和能量分析方法研究进行了介绍和评述, 有很多学者^[23] 提出了能流和物质流计算模型设计方案。后来, Tilley 等^[24-25] 利用能流 (energy flow) 密度和能值密度 (emergy flow) 密度计算北卡罗莱纳州、德克萨斯州和佛罗里达州生态经济系统中能流。

在计算机技术高速发展之后, Cathy^[26] 等使用多智能体系统与人工智能技术建模, 信道模拟系统的能量和系统信息流理论提供了一种机制。研究表明: 它是可能的将这些组件集成到一个连贯的理论框架, 为其实施和测试奠定了基础。Zhang J.^[27] 使用最大功率原则建立进化生态网络计算能流。李中才^[28] 提出了生态网络能量传递的两类路径, 运用输入-输出流方法推导了两种模式下的能流计算公式, 以 Pilette^[29] 提出的生态网络系统为例, 计算两种模式能流大小。生态网络能量传递动力学方程:

$$T_i = \sum_n f_{ij} + z_i = \sum_n f_{ji} + y_i$$

式中, f_{ij} 代表节点 j 输入节点 i 的能量流; z_i 代表网络系统外环境输入节点 i 的能, y_i 代表节点 i 的能量损失流^[30]。Matis 和 Patten^[31-32] 提出的生态网络能量动力学方程:

$$dx/dt = F \times l + z = -F_t \times l - y$$

式中, x, z, y 是 $n \times l$ 维的矩阵, 分别代表某节点的能量存量、外界能量输入和能量消耗, l 是 n 维单位列向量, F_t 代表能量流矩阵 F 的转置矩阵。当生态系统能量传递达到稳定状态时, 有 $dx/dt = 0$, 由此可知, 能量流矩阵 F 的对角元素 $f_{ii} = -T_i$ 。如果将生态网络能量传递过程看作一个离散过程, 其动力学方程:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta x(t)$$

式中, $\Delta x = F\Delta t \times 1 + z\Delta t$ 。S. Thiede 等^[33] 通过吞吐量、能源效率、驱动因子、成本和对环境影响等指数建立模型对制造系统的能流数值模拟, 可见, 国内外学者对能流分析^[34] 已具有较丰硕的研究成果。

2.2 物质流

从生命周期 (从摇篮到坟墓) 的角度来看, 各个阶段生命周期的物质 (商品或服务) 所有相关的物质流和能流是可持续的^[35-36]。物质流又称资源流, “物质流分析” 的概念由 Ayres^[37] 引入, 早期建立在物质能量平衡的基础上。自 20 世纪 80 年代以来, 世界上开始建立国家和全球尺度的观测网络来研究生态系统的物质通量变化^[38]。C、N、P、S 的循环等的研究在全球范围内已有很多成果, 特别是碳循环与全球变暖的关系^[39-40] 研究

等。生态系统的物质循环一般指的是营养物质,可通过自然或人为的过程不断地在土壤、植物和动物间输入输出,因此物质的流动是选择性的。物质循环一般多是研究单一元素的循环过程,实际上,各元素在循环过程中会产生耦合作用,对整个生态系统会产生直接影响^[41]。例如,Schlesinger^[42]在海洋生态系统研究中发现一种元素的循环或过程可影响另一种元素的循环和过程。

对物质流的计算^[43-45]是从 20 世纪 90 年代开始的,主要根据原材料、土地等输入输出计算物质流。Grampietro^[46]等根据生态系统内植物有效水流量和水循环的能量耗散,使用总初级生产力与植物有效水流量的和对生态系统的生物物理资本进行估算,拓展了能流的单一计算,在能流计算的基础上加入了物质流。Pilette R^[29]对一个构造的小尺度生态系统进行碳的“流量—通量”转移分析,但这种非循环的程序是基于穷举搜索而不是矩阵操作和数据管理。

物质流分析(MFA)^[47-50]的目的是分析在特定的环境内和一定的时间范围内的物质流动,可为生态可持续发展和规划管理自然资源提供依据。John Barrett^[51]分析了所有物质进入和离开纽约的过程。MEFA 方法到现在为止没有被充分利用,因为在进行物质流与能流研究时空间尺度不同,迄今为止只有对不同区域物质流动进行研究,还没有上升到国家尺度^[52]。Haberla^[53-54]建立物质能量流核算(MEFA)框架,这个框架综合了生态和社会经济特别为土地可持续发展提供了一种非常有价值的工具,物质流和能流会随着时间推移和尺度改变而改变,因此它无法定义可持续发展阈值的精度。Zygmunt Kowalski^[55]运用生命周期理论计算 Na_2CrO_4 在生产系统中的循环物质流,以降低原材料生产成本。还有一些文献中指出物质流分析方法是一种程序方法^[56-57]。

2.3 信息流

信息传递是生态系统的重要功能之一,“信息”一次来源于拉丁文“informatio”,原意指解释、陈述。Hartley^[58]最早提出一种度量信息的方法,认为信息量与字母的选择次数成正比例关系,Shannon^[59]继承了 Hartley 关于排除主观因素的思想,提出了著名的 Shannon-Wiener 指数公式:

$$H = - \sum_{i=1}^S (p_i) (\log_2 p_i)$$

式中, H 为 N 个样本信息量, S 为物种数, P_i 为样本属于第 i 种个体的比例,对于第 i 个个体数 n_i ,则 $P_i = n_i/N$ 。这个公式用来度量信息量,而这个信息量是一种概率信息(热力学熵和信息熵的公式是一样的,信息熵用的是以 2 为底的对数,单位是 bits,或是以 10 为底的对数,单位是 Bell;生物多样性用的是以 10 为底的对数;热力学熵(波尔兹曼熵) S 用的是以 e 为底的自然对数, $S = k_b \ln W$,单位是 Nat)。之后 Shannon 等^[60]在《通讯的数学理论》中指出:“信息是不肯定程度减小的量”,即信息这个概念具有不确定的含意。Wiener^[61]认为:信息就是信息,不是物质,也不是能量,信息来源于物质,与能量密切关系,信息的实质就是“负熵”。信息熵与热熵正从不同方面揭示了事物的不确定性或无规则性的数值关系。物种的信息存储量很大,人们发现每个物种遗传密码中大概有 100 万到 100 亿比特的信息,都是几百万年进化过程中形成的^[62]。

韩博平根据贝利斯等^[63]的效用信息理论和熵值理论初步提出信息流的计算方法并分析了信息流与能流、物质流的关系^[64-66]。Md. Jamal Uddin^[67]建立孟加拉国农村综合信息系统(BD-IRIS),侧重于研究孟加拉国农村地区的访问信息流,特别是信息来源和渠道、系统和服务。目前信息流更多地应用于 IT 领域^[68],如 Shih-Chien Chou^[69-71]使用 OORBAC(object-oriented role-based access control)模型进行信息流控制。在农业生态系统中,当系统能量产投比大于 1 时,产出能高于投入能,农业系统的信息熵为负值,产投比大,负熵大。农业系统熵的负值(或绝对值)越大,农业系统的能量转换效率就越高,可以说农业辅助能的投入增加了农业生态系统中的信息熵,促进了信息流的变化。

3 生态流的应用进展

3.1 生态流模型研究

目前,对能流的研究已经渐趋成熟,而物质流和信息流的研究还处于探索阶段。以前生态流的计算都是

以单一的介质对其量化^[72],例如物质流($C \times g$)或能流(KJ),而一个复杂的系统不止存在一种流,学者们一直在寻找统一计算生态流的方法,其中具有代表的是 Odum 的能值(emergy)理论^[73-76]和火用(exergy)^[77-79]分析方法,列表对比各种模型的特点(表2)。

1987 年 Odum 以美国德克萨斯州大型农场构成的农业生态系统为例,绘制了农业生态系统的能流、物质流与资金流图,标明了资金流与能流、物质流和信息流的流向相反,他认为,以货币方式表示的劳务及一些零碎的杂物投入也包含一定的太阳能值,亦可通过能值/货币比换算成太阳能值^[80]。以能值为量纲,可把系统的各种能量与物质转换成同一标准能值加以分析,这样就可以将能流物质流乃至信息流都以某种形式的能值流来表示,通过能值分析,还可以探讨能流和物质流相互之间的关系。能值理论和分析方法为各种生态系统的定量分析提供了共同的度量标准,在理论上开拓了生态流综合分析研究途径。

表2 生态流模型研究

Table 2 Research of ecological flow models

生态流模型 Ecological Flow Model	研究对象 Object	研究内容 Contents	特点 Characteristic
能值模型 Emergy Model	农业生态系统	能流、物质流转换成能值计算生态流	能值的确定较单一
基线网络模型 Baseline Network Model	食物链	增加投入等八种情况下生态网络变化	假设前提是可用能储存和能源通流
食物网模型 Food Web Model	湖泊生态系统	食物链水平和食物网物质循环	缺失食物链上任一级能量数据便不能计算
矩阵代数模型 Matrix Algebra Model	富营养化咸水生态系统	施莱峡湾水域能流和物质流	仅用能值效率表示系统处于非均衡状态
生命周期评价模型 Life Cycle Assessment Model	森林生态系统	投入产出分析和可持续发展评价	分析方法不同,指标值便不同
生态网络模型 Ecological network model	城市生态系统	中国四个大城市网络路径和能值分析	城市网络较简单,模拟的精度较低
宇宙可用能模型 Embodied Cosmic Exergy Model	城市生态系统	分析北京市主要自然资源可用能(Jc)	仅预测未来发展方向,未验证模型的准确性

扩展火用分析具有坚实的科学基础,提供了资源和能源的使用和降解途径,是生态流统一计算较可行的方法之一。“exergy”这个概念是 19 世纪 50 年 Rant^[81]定义之后才被大家熟知,是热力学第二定律的应用,国内称之为火用,又称为可用能^[82-83]。在生态学中,假设系统环境的温度和压力($T = T_0, p = p_0$),在热力学定律

中, $Ex = RT_0 \sum_{i=0}^n c_i \ln \frac{c_i}{c_i^{eq}}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, 式中 R 为常数, c_i 和 c_i^{eq} 分别是系统内第 i 种物质的组分和平衡时组分^[77,84-85]。在可逆过程中, Ex 保持不变;在不可逆过程中, Ex 部分物质或能量会流失。

3.2 生态流整合研究

运用生态流方法将研究对象作为一个有机整体开展研究,近年来取得一系列进展^[74-76,86],这些方法被广泛应用于农业^[87-89]、工业^[90-91]、城市^[92-95]、生态经济流的综合模拟与应用^[96-101]。

以农田生态系统为例,它是一种典型的半人工半自然的生态系统,假设存在人类缺少参与的自然农田生态系统,对比分析两种情况下生态流的方向、路径和强度等,可定量研究人类活动对生态系统带来的影响,还可优化农田生态系统的生态功能。面对日益退化的生态系统,管理欠佳可能增加洪涝、干旱、农作物歉收,从而进一步加剧风险与脆弱性。

在农田生态系统中,作物为初级生产者,微生物为消费者和分解者,农田动物为次级生产者,将人类管理纳入农田生态系统中,设定人类为最高级消费者。如图 1 所示,图中节点 $a-j$ 代表农田生态系统中的要素,节点之间的弧代表两个成员要素之间具有物质、能量或信息的交换关系^[102-106]。生态网络模型的研究可为生态流的研究奠定基础,Cohen、Martines 等^[107-109]定义了生态网络连接度(C)的概念,将网络节点数定义为 n ,节

点间存在关联边的数目为 L , $C = L/n^2$; 平均连接数 $\bar{L} = L/n$ 。Hannon^[110]、Patten 等^[111]采用可达矩阵来描述生态网络节点之间的关系。在纯自然的农田生态系统中, $n_1 = 7$, $L_1 = 22$, $C_1 = 0.45$, $\bar{L}_1 = 3.14$; 在半自然半人工农田生态系统中, $n_2 = 10$, $L_2 = 34$, $C_2 = 0.34$, $\bar{L}_2 = 3.4$ 。考夫曼^[112]发现, 当生物体或介子的平均连接数小于 2 时, 整个系统的灵活性就不足以跟上变化, 在农田生态系统中, 人类活动参与之后并未阻碍系统的整体灵活性, 反而增加了系统的灵活性, 但使得网络连接度降低, 扰乱了生态系统, 降低了其稳定性。

系统中能流(E_e)、物质流(E_m)和信息流(E_i)的流动如图 1 所示。在 Pilette 和 Kincaid 提出的生态网络能量传递动力学方程基础上设立生态流计算方程^[113-117]:

$$\frac{dE_f}{dt} = (E_{e-in} - E_{e-out}) + (E_{m-in} - E_{m-out}) + (E_{i-in} - E_{i-out})$$

式中, E_f 为生态流矩阵; E_{e-in} 为能量输入流; E_{e-out} 为能量输出流; E_{m-in} 为物质输入流; E_{m-out} 为物质输出流; E_{i-in} 为信息输入流; E_{i-out} 为信息输出流。当生态系统达到平衡时, E_f 达到最大值^[118-119]。

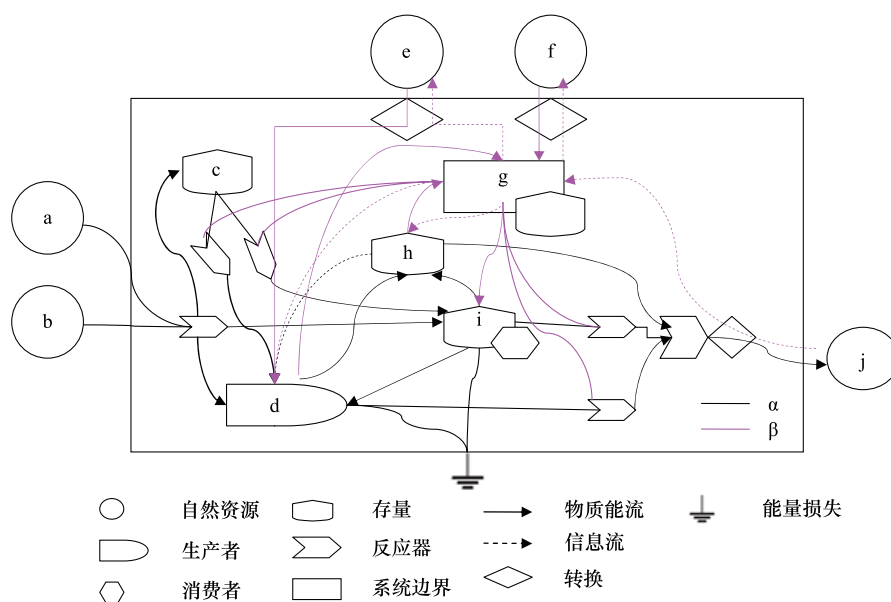


图 1 农田生态系统生态流框图^[75]

Fig.1 System diagram of farmland ecosystem in terms of ecological flows

a: 光照; b: 降水; c: 种子、农药、化肥等; d: 作物; e: 农田基础设施; f: 机械; g: 人类管理; h: 农田动物; i: 基质(土壤、微生物等); j: 生态输出; α : 自然生态流; β : 人工生态流

4 生态流研究展望

4.1 存在的问题

流动是复杂生态系统的普遍现象之一, 流的形式有很多种, 是否存在统一的可以描述复杂系统中流动现象的通用规律一直是生态学和统计物理学研究的难题之一。用流的形式来反映三者之间的交换方向、强度、速率; 用网络的形式来反映三者之间联系的路径, 可以描述复杂生态系统中物质、能量和信息的流动规律。人类活动对生态系统和生物多样性的影响都可用生态流的计算方法来定量描述。目前生态流的研究成果较多, 研究方法多样, 涉及到的领域也很多, 但是还存在着一些需要解决的问题: (1) 确定研究时间。不同时期生态系统稳定性不同, 生态流计算结果也不同, 因此, 在计算时要注意生态系统变化的时期一致性; (2) 确定研究范围。目前的生态流研究主要还是在宏观阶段, 应加强区域范围的微观尺度研究, 更能精确地描述系统中生态流; (3) 确定假设条件。自然生态系统和半自然半人工系统的生态流计算有区别, 需要假设在人类对自然进行改造后的环境与纯自然生态系统相比, 既具有优越性又有不足。 (4) 明确研究目的。生

态流计算的结果可能因时间、空间范围变化而改变,研究一定时期一定范围内两种生态环境下的生态流较具有可行性,同时对相关的地理时空变化研究具有一定意义。

4.2 展望

研究人类活动对生态环境影响的重要模型和方法有很多,例如:生态足迹是一种测算人类对自然利用程度的综合指标,该方法通过将区域的资源和能源消费转化为提供这种物质流所必需的各种生物生产土地的面积^[120-121];生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统得到物质资本,其主要研究向经济社会系统输入有用物质和能量、接受和转化来自经济社会系统的废弃物,以及直接向人类社会成员提供服务^[122];而生态流着重于研究生态系统中各种自然流动的路径和通量。

生态流的研究在我国尚在探索阶段,仍需要更系统地对其原理和研究方法进行深入探索。未来的重点可能在时空条件下物质、能量和信息的流动规律研究、生态流模型计算方面。生态系统是一个复杂的系统,生态流的定量计算方法并未统一,而生态流是生态系统中的重要组成部分。在农田生态系统中,由于人类活动引起的生态流变化仍会逐渐引起农作物及周围环境的变化,而改善生态系统网络连通度和生态流来优化生态功能是提高农田效益和稳定性的重要方法之一。目前,国内外学者的研究成果已具有一定基础,但是生态流的研究方法还存在一些问题,仍需要深入研究。

参考文献 (References):

- [1] GLP. Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No. 53/IHDP Report No. 19. IGBP Secretariat, Stockholm. 2005: 64-64.
- [2] Botkin D B. Discordant Harmonies: A New Ecology for the Twenty-First Century. New York: Oxford University Press, 1990.
- [3] Marsh G P. Man and Nature: Or, Physical Geography as Modified by Human Action. Cambridge, Massachusetts: Belknap Press, 1864.
- [4] Clements F E. Research Methods in Ecology. Lincoln, Nebraska: University Publishing Company, 1905.
- [5] Tansley A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. Ecology, 1935, 16(3): 284-307.
- [6] 戈峰. 现代生态学 (第二版). 北京: 科学出版社, 2008: 352-433.
- [7] 刘盛林, 华朝阳. 生态系统的信息流. 中学生物学, 2007, 23(8): 4-6.
- [8] O'Neill R V. Theory in landscape ecology // Wiens J A, Moss M R, eds. Issues in Landscape Ecology. Snowmass Village, Colorado: International Association for Landscape Ecology, 1999: 1-5.
- [9] 肖笃宁, 李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略. 生态学报, 2003, 23(8): 1615-1621.
- [10] Levine R S, Hughes M T, Mather C R. Sustainable city regions: Mega-projects in balance with the Earth's carrying capacity // Engineering Earth. Netherlands: Springer, 2011: 1057-1070.
- [11] 海江波. 农业生态经济系统生态流与价值流耦合机制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [12] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. Ecology, 1942, 23(4): 399-418.
- [13] Odum E P. Fundamentals of Ecology. 3rd ed. Philadelphia: Saunders Co., 1971: 574-574.
- [14] Whittaker R H, Likens G E. World productivity estimate, Brussels Symp. 1969, published in Whittaker (1970) and Whittaker and Woodwell (1971), 1971.
- [15] Lieth H. "Modelling the primary productivity of the earth. Nature and resources", UNESCO, 1972, VIII, 2: 5-10.
- [16] Lieth H. Introduction to phenology and the modeling of seasonality // Lieth H, ed. Phenology and seasonality modeling. Berlin: Springer-Verlag, Ecological Studies, 1974, 8: 3-19.
- [17] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation. (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.
- [18] Donmeza C, Berberoglu S, Curranb Paul J. Modelling the current and future spatial distribution of NPP in a Mediterranean watershed. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3): 336-345.
- [19] Odum H T. Systems Ecology: An introduction. New York: John Wiley and Sons, 1983: 644-644.
- [20] Lotka A J. The stability of the normal age distribution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1922, 8(11): 339-345.
- [21] Odum E P. The strategy of ecosystem development. Science, 1969, 164(3877): 262-270.
- [22] 闻大中. 农业生态系统能流和能量分析研究的某些新进展. 农村生态环境, 1995, 11(2): 43-48.
- [23] Levine R S, Yanarella E, Radmard T, Dumreicher H. Sustainable cities: A strategy for a post-terrorized world. Terrain. org: A Journal of the built and natural environments. 2003: 13 (Summer/Fall). Retrieved from www.terrain.org/articles/13/strategy.htm.
- [24] Tilley D R, Brown M T. The hierarchical pattern of energy flow in ecological-economic systems representing three geographic scales // Brown M T, Brandt-Williams S, Tilley D R, Ulgiati S, eds. Emergy Synthesis: Theory and Applications of the Emergy Methodology. Proceedings from the First

- Biennial Emergy Analysis Research Conference, Gainesville, Florida, September, 1999.
- [25] Tilley D R. Emergy Basis of Forest Systems [D]. Gainesville: University of Florida, 1999: 1-296.
- [26] Hawes C, Reed C. Theoretical Steps Towards Modelling Resilience in Complex Systems // Gavrilova M, et al, eds. Proceedings of ICCSA (1): 2006, LNCS 3980. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 644-653.
- [27] Zhang J. Energy flows and maximum power on an evolutionary ecological network model// Advances in Artificial Life: 9th European Conference. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 113-122.
- [28] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.
- [29] Pilette R, Kincaid D T. First flow-thru analysis in ecosystem studies. Ecological Modelling, 1992, 64(1): 1-10.
- [30] 李中才, 席旭东, 高琴, 李莉鸿. 基于输入-输出流分析的生态网络 φ 模式能流、 ρ 模式能流测度方法. 生态学报, 2011, 31(19): 5860-5864.
- [31] Matis J H, Patten B C. Environ analysis of linear compartmental systems; the static, time invariant case. Ecological Modelling, 1981, 48: 527-565.
- [32] Bernard C. Patten. Network integration of ecological extremal principles: exergy, emergy, power, ascendancy, and indirect effects. Ecological Modelling, 1995, 79: 75 - 84.
- [33] Thiede S, Herrmann C. Energy flow simulation for manufacturing systems // Seliger G, et al, eds. Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 275-280.
- [34] Chareondrat P. Energy Analysis Methods in Agricultural Production with Applications to Chiang Mai Valley, Thailand [D]. East Lansing: Michigan State University, 1977.
- [35] Schaubroeck T, Staelens J, Verheyen K, Muys B, Dewulf J. Improved ecological network analysis for environmental sustainability assessment; a case study on a forest ecosystem. Ecological Modelling, 2012, 247: 144-156.
- [36] M. Federici, S. Ulgiati, R. Basosi. A thermodynamic, environmental and material flow analysis of the Italian highway and railway transport systems. Energy, 2008, 33(5): 760-775.
- [37] Ayres R U. Resources, Environment and Economics: Applications of the Materials/Energy Balance Principle. New York: Wiley, 1978.
- [38] 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用. 地理科学进展, 2007, 26(1): 1-16.
- [39] Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China. Ecological Modelling, 2013, 252: 44-52.
- [40] Robinson D T, Brown D G, Currie W S. Modelling carbon storage in highly fragmented and human-dominated landscapes: Linking land-cover patterns and ecosystem models. Ecological Modelling, 2009, 220(9/10): 1325-1338.
- [41] Wollast R, Mackenzie F T, Chou L. Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [42] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. San Diego, California: Academic Press, 1997.
- [43] Steure A. Stoffstrombilanz Österreich, 1988. Schriftenreihe Soziale Ökologie. No. Band 26[R]. Wien: IFF/Abteilung Soziale Ökologie, 1992.
- [44] Lange C, Kuchenbuch A. Integrated controlling based on material and energy flow analysis: A case study in foundry industries // Wagner B, Enzler S, eds. Material Flow Management. Improving Cost Efficiency and Environmental Performance. Heidelberg, New York: Physica-Verlag HD, 2006: 91-129.
- [45] Environment Agency Japan. Quality of the environment in Japan 1992. Tokyo. European Environment, 1992.
- [46] Giampietro M, Cerretelli G, Pimentel D. Energy analysis of agricultural ecosystem management: human return and sustainability. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1992, 38(3): 219-244.
- [47] Bringezu S, Fischer-Kowalski M, Klein R, Palm V. Regional and National Material Flow Accounting: From Paradigm to Practice of Sustainability. Wuppertal: Institute for Climate, Environment and Energy, 1997.
- [48] Bringezu S, Schütz H. Material use indicators for the European Union, 1980-1997. Economy-wide Material Flow Accounts and Balances and Derived Indicators of Resource Use. EUROSTAT Working Paper. No. 2/2001/B/2. Wuppertal: Wuppertal Institute, 2002.
- [49] Amann C, Bruckner W, Fischer-Kowalski M, Grünbühel C. Material Flow Accounting in Amazonia. A Tool for Sustainable Development; Amazonia 21. Social Ecology Working Paper. No. 63. Vienna: IFF, Abt. Soziale Ökologie, 2002.
- [50] Chen X Q, Qiao L J. A preliminary material input analysis of China. Population and Environment, 2001, 23(1): 117-126.
- [51] Barrett J, Vallack H, Jones A, Haq G. A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York. Technical Report. York: Stockholm Environment Institute, 2002.
- [52] Muradian R, Martinez-Alier J. South-north materials flow: history and environmental repercussions. Innovation-The European Journal of Social Science Research, 2001, 14(2): 171-187.
- [53] Fischer-Kowalski M, Amann C. Beyond IPAT and Kuznets curves: globalization as a vital factor in analysing the environmental impact of socio-economic metabolism. Population and Environment, 2001, 23(1): 7-47.
- [54] Haberl H, Fischer-Kowalski M, Krausmann F, Weisz H, Winiwarter V. Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer. Land Use Policy, 2004, 21(3): 199-213.
- [55] Kowalski Z, Mazanek C. Sodium chromate-material flow analysis and technology assessment. Journal of Cleaner Production, 1998, 6(2): 135-142.

- [56] Sala S, Farioli F, Zamagni A. Progress in sustainability science; lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment; Part 1, life cycle sustainability assessment: from lca to lcsa // The International Journal of Life Cycle Assessment. Berlin; Springer-Verlag, 2012.
- [57] Rattanapana C, Suksaroj T T, Ounsaneha W. Development of Eco-efficiency indicators for rubber glove product by material flow analysis. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2012, 40: 99-106.
- [58] Hartley R V L. Transmission of Information. *Bell System Technical Journal*, 1928, 7(3): 535-563.
- [59] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [60] Shannon C E. Communication Theory of Secrecy Systems. *Bell System Technical Journal*, 1949, 28(4): 656-715.
- [61] Wiener N. The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society. New York; Houghton Mifflin, 1950.
- [62] Wilson E O. The Diversity of Life. Cambridge; Harvard University Press, 1992: 464-464.
- [63] Belis M, Guisasu S. A quantitative-qualitative measure of information in cybernetic systems. (Corresp.). *IEEE Transactions on Information Theory*, 1968, 14(4): 593-594.
- [64] 韩博平. 生态网络中物质、能量流动的信息指标及其灵敏度分析. *系统工程理论方法应用*, 1995, 4(1): 24-29.
- [65] 韩博平. 生态网络中物质、能量流动的时间链分析. *生态学报*, 1995, 15(2): 163-168.
- [66] 韩博平, 林鹏. 生态网络中信息分析的方法与应用. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1996, 35(4): 648-651.
- [67] Uddin M J, Mezbah-ul-Islam M. The flow of, and access to, information in Bangladesh: A village level case study. *The International Information & Library Review*, 2012, 44(4): 224-232.
- [68] Santen T. Preservation of probabilistic information flow under refinement. *Information and Computation*, 2008, 206(2/4): 213-249.
- [69] Chou S C. Dynamic adaptation to object state change in an information flow control model. *Information and Software Technology*, 2004, 46(11): 729-737.
- [70] Chou S C. Managing user associations and the factors of laws and cultures in an information flow control model for object-oriented systems. *Journal of Information Science and Engineering-JISE*, 2007, 23(3): 949-961.
- [71] Masri W, Podgurski A. Algorithms and tool support for dynamic information flow analysis. *Information and Software Technology*, 2009, 51(2): 385-404.
- [72] Chen S Q, Fath B D, Chen B. Information indices from ecological network analysis for urban metabolic system. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 720-724.
- [73] Odum H T, Odum E C, Brown M T. Environment and Society in Florida. Boca Raton, Florida; St. Lucie Press, 1997.
- [74] Odum H T. Emergy in ecosystems//Poluin N ed. Ecosystem Theory and Application. New York: John Wiley & Sons, 1986: 337-369.
- [75] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons, 1996: 370-370.
- [76] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology. New York: John Wiley, 1986.
- [77] Jørgensen S E, Ladegaard N, Debeljak M, Marques J C. Calculations of exergy for organisms. *Ecological Modelling*, 2005, 185(2/4): 165-175.
- [78] Jørgensen S E, Mejer H F. Ecological Buffer Capacity. *Ecological Modelling*, 1977, 3(1): 39-45, 47-47, 49-49, 51-51, 53-61.
- [79] Jørgensen S. Exergy of an isolated living system may increase // *Advances in Energy Studies*. 2^o International Workshop, edited by Sergio Ulgiati. SGEEditoriali Padova. Italy; Porto Venere, 2000.
- [80] Odum T, Odum E C. Ecology and Economy: Emergy Analysis and Public Policy in Texas. LBJ School of Public Affairs and Texas Dept. of Agriculture (Policy Research Publication No. 78). Austin; University of Texas, 1987: 178-178.
- [81] Rant Z. Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit". *Forschung im Ingenieurwesen*, 1956, 22: 36-37.
- [82] Gibbs J W. A method of geometrical representation of the thermodynamic properties of substances by means of surfaces // *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*. Yale; Yale University Press, 1873, 2: 382-404.
- [83] Wall G. Exergy-a useful concept within resource accounting. Göteborg; Institute of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, 1977.
- [84] Szargut J, Morris D R, Steward F R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. New York; Hemisphere, 1988.
- [85] Shieh J H, Fan L T. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials. *Energy Sources*, 1982, 6(1/2): 1-46.
- [86] Brown M T, McClanahan T R. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. *Ecological Modelling*, 1996, 91(1/3): 105-130.
- [87] 蓝盛芳, 陈飞鹏, 刘新茂. 农业生态经济系统的能值分析. *生态科学*, 1995, (2): 172-172.
- [88] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 129-131.
- [89] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 彭少麟. 农业生态系统能量分析. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 159-162.
- [90] 袁婕, 樊鸿涛, 张炳, 毕军, 王仕, 袁增伟. 基于能值理论的工业生态系统分析——以龙盛科技工业园为例. *环境保护科学*, 2008, 34(2): 74-77.
- [91] 刘子芳, 李敏, 张小洪, 邓仕槐. 基于能值的工业生产系统可持续性分析. *四川环境*, 2013, 32(1): 129-133.
- [92] Huang S L, Odum H T. Ecology and economy: Emergy synthesis and public policy in Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 1991, 32(4): 313-333.
- [93] 胡聃, 文秋霞, 李锋, 王震, 冯强, 张艳萍. 北京城市生态系统的能值动态分析. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(6): 1-4.
- [94] 吴玉琴, 严茂超, 许力峰. 城市生态系统代谢的能值研究进展. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1139-1145.

- [95] 吴玉琴, 严茂超. 广州城市代谢效率的模拟分析. 资源科学, 2011, 33(8): 1555-1562.
- [96] Yan M C, Odum H T. An eMergy evaluation of the seven year's development of Qianyanzhou ecological experimental station. The Journal of Chinese Geography, 1998, 8(3): 221-236.
- [97] Yan M C, Odum H T. Eco-economic evolution, emergy evaluation and policy options for the sustainable development of Tibet. The Journal of Chinese Geography, 2000, 10(1): 1-27.
- [98] 严茂超. 生态经济学新论——理论、方法与应用. 北京: 中国致公出版社, 2001.
- [99] Dong X B, Ulgiati S, Yan M C, Gao W S. Progress, influence and perspectives of emergy theories in China, in support of environmentally sound economic development and equitable trade. Energy Policy, 2008, 36(3): 1019-1028.
- [100] Dong X B, Ulgiati S, Yan M C, Zhang X S, Gao W S. Energy and eMergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China. Energy Policy, 2008, 36(10): 3882-3892.
- [101] Ulgiati S, Ascione M, Bargigli S, Cherubini F, Franzese P P, Raugeri M, Viglia S, Zucaro A. Material, energy and environmental performance of technological and social systems under a Life Cycle Assessment perspective. Ecological Modelling, 2011, 222(1): 176-189.
- [102] Jørgensen S E, Fath B D. Examination of ecological networks. Ecological Modelling, 2006, 196(3/4): 283-288.
- [103] Jiang M M, Chen B. Integrated urban ecosystem evaluation and modeling based on embodied cosmic exergy. Ecological Modelling, 2011, 222(13): 2149-2165.
- [104] Zhang Y, Yang Z F, Yu X Y. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems: Model development, and a case study of four Chinese cities. Ecological Modelling, 2009, 220(11): 1431-1442.
- [105] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D, Li S S. Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: Model development, and a case study of four Chinese cities. Ecological Modelling, 2010, 221: 1865-1879.
- [106] Thébaud E, Fontaine C. Stability of ecological communities and the architecture of mutualistic and trophic networks. Science, 2010, 329(5993): 853-856.
- [107] Cohen J E, Briand F, Newman C M. Community Food Webs: Data and Theory. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1990.
- [108] Martinez N D. Scale-dependent constraints on food-web structure. The American Naturalist, 1994, 144(6): 935-953.
- [109] Bersier L F, Dixon P, Sugihara G. Scale-invariant or scale-dependent behavior of the link density property in food webs: A matter of sampling effort? The American Naturalist, 1999, 153(6): 676-682.
- [110] Hannon B. The structure of ecosystems. Journal of Theoretical Biology, 1973, 41(3): 535-566.
- [111] Patten B C. Network ecology: Indirect determination of the life-environment relationship in ecosystems // Higashi M, Burns T P, eds. Theoretical Studies of Ecosystems: The Network Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 288-351.
- [112] Kauffman S A, Institute S F. Investigations. Oxford: Oxford University Press, 2000: 1-302.
- [113] Zhang J J, Gurkan Z R, Jørgensen S E. Application of eco-exergy for assessment of ecosystem health and development of structurally dynamic models. Ecological Modelling, 2010, 221(4): 693-702.
- [114] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [115] Forman R T T, Moore P N. Theoretical foundations for understanding boundaries in landscape mosaics // Hansen A J, di Castri F, eds. Landscape Boundaries: Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows. New York: Springer-Verlag, 1992: 236-258.
- [116] Myers N, Simon J L. Scarcity or Abundance?: A Debate on the Environment. New York: W W Norton Incorporated, 1994.
- [117] Bourne R. Some ecological conceptions. Empire Forestry Journal, 1934, 13(1): 15-30.
- [118] Chen H, Chen G Q, Ji X. Cosmic emergy based ecological systems modelling. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(9): 2672-2700.
- [119] Chen Z M, Chen B, Chen G Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 322-329.
- [120] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例. 生态学报, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [121] He Y Q, Che T, Wang Y. Ecological footprint and endogenous economic growth in the Poyang lake area in China based on empirical analysis of panel data model. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(4): 367-372.
- [122] 吕一河, 马志敏, 傅伯杰, 高光耀. 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估. 生态学报, 2013, 33(4): 1153-1159.