

海洋自然资本评估中生物能值转换率的研究

丁洁琼¹, 魏方懿¹, 叶观琼^{1*}, 曾江宁², 林颖¹, 韩宇³

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021;

2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012;

3. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要:自然资本评估是研究生态系统服务与社会经济发展的重要方式。由于海洋具有特殊性和复杂性、开放性、流动性和多层次耦合性等特点,海洋自然资本评估方法的研究进展缓慢。能值分析理论通过能值转换率将生态系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为同一标准的能值,可衡量和比较不同等级的能量价值,系统完整地反映自然资本价值,这一特点是其他评估方法所缺乏的。为精确量化海洋生物资本价值,本研究引入海洋食物网信息能流图和生态系统能量传递规律,提出了生物能值转换率的经验公式,即 $T_n = T_1 \cdot E_L^{1-n}$ (T_1 为初级生产者的太阳能值转换率, n 为营养级, E_L 为林德曼效率)。为验证经验公式的可行性,选用相关案例进行了研究,得到海洋食物网中不同食性生物所处营养级及其相应的能值转换率。经验公式有一定误差,具体应用时应通过调研文献和相关数据,确定关键参数的取值范围以提高准确性。本研究得出的经验公式简化了海洋生物能值转换率的计算方法,促进了能值分析理论在海洋自然资本评估中的进一步应用。

关键词:海洋环境科学;自然资本;能值分析法;能值转换率;海洋生物

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2020. 02. 013

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2020)02-0253-08

目前,研究自然资本评估主要有三大理论体系,包括“生态足迹”、“生态系统服务”和“能值分析理论”^[1-3]。其中,前两者均是以人类为导向对自然环境提供的资源价值进行评估^[4],较少关注自然资本中未来可能提供的产品服务流及环境资产的自身存量,因此较难系统完整地反映自然资本价值。能值分析理论则是基于生态系统中生物链概念和热力学原理提出的,关注自然资源本身,通过能值转换率将生态系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为同一标准的能值,可衡量和比较不同等级的能量价值,包涵了物质过去、现在所有的信息,能系统完整地反映自然资本价值。就海洋生物本身来说,能值分析理论有其独特优势,可体现能量在生物之间的流动及其关系,而且评估结果不以人类的价值体系为转移,从而能够客观认识不同物种的生态价值。

由于海洋环境具有复杂、开放、流动、均质等属

性,海洋自然资本能值评估方法尚处于探索阶段^[5]。现有的研究多关注海岸带,包括滩涂^[6]、海草床^[7]、红树林^[8-9]和湿地^[10]等,综合性的海湾和海岛海域^[11]研究较少。而能值转换率是海洋生态系统能值计算中最核心的一个参数,它将一系列能量转换过程中各种形式的能量联系了起来。海洋生物作为海洋生态系统的重要组成部分,其能值转换率这一关键要素的研究尚处于初级阶段。本研究基于海洋食物网信息论^[12-13]和食物网营养级研究^[14-16]的发展,探索海洋生态系统中不同营养级之间能值转换率的计算,旨在为海洋生物自然资本量化提供关键参数。

1 研究现状

1.1 能值转换率

能值分析理论与方法是美国著名生态学家 Odum(1986)在能量系统分析的基础上发展形成

收稿日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41606124); 浙江省科技厅资助项目(2017F30012)

作者简介: 丁洁琼(1996—),女,硕士研究生; E-mail: 18252893945@163.com

* 通讯作者: 叶观琼(1984—),女,博士,副教授; E-mail: gqy@zju.edu.cn

的^[17]。能值是直接或间接用于形成某产品或服务的一种有效能。考虑到任何能量都始于太阳,实际应用中以太阳能值来衡量某一能量的能值。能值转换率是实现能量和能值之间转换的桥梁,实际使用的是太阳能值转换率,即形成每单位某种产品(能量或物质)所需的能值量^[18]。其计算公式^[3]如下:

$$T = \frac{E(t)}{N} \quad (1)$$

式(1)中: T 为某种物质(能量)的太阳能值转换率(sej/J), $E(t)$ 为直接或间接应用于形成该物质的总太阳能值(sej), N 为该物质或能量的量(J)。

能量在传递过程中衰竭,而能值不变,因此其所含的能值转换率不断增加。能值转换率是一种有量纲的效率比,用以衡量能量的质量即其在整个能量等级中的地位,其值越大表明该能量的等级越高。

能值转换率的计算是能值分析的基础和最大难点,也是能值分析理论得到广泛认可、应用和进一步发展的必要条件^[19]。国内外学者对具体能值转换率的计算开展了广泛研究。生物能值转换率的计算一般通过绘制能流图^[20],包含能量进出、储存、分散等各种途径,将已知系统投入的总太阳能值除以流入各组分能量得到系统内各对象的能值转换率。李璇等(2016)通过定量分析舟山大黄鱼(*Larimichthys crocea*)养殖系统的输入能值和输入热值,得到大黄鱼的能值转换率^[21]。化石能源及其衍生物的能值转换率可通过分析其生成的地球化学过程^[22]、实地考察炼油工艺^[23]计算得到。贺成龙(2016)在考虑水电工程建设主要投入产出的基础上计算出水力发电的能值转换率^[24]。纵观前人研究,能值转换率的计算方法以投入产出法为主,此外还有基于最小特征值模型^[25-26]、线性优化模型、矩阵模型^[27]等方法。基于目前静态的研究现状,动态的能值转换率研究和完善是下一步的研究热点^[28]。

1.2 海洋生物能值研究现状

在开创能值分析理论后,Odum等(1991)对封闭的虾类养殖池进行相关研究,通过投入的总太阳能值(可更新资源与不可更新资源能值之和)与产出虾的能量之比得到养殖虾的能值转换率^[29]。Brown等(1993)^[31]依据McRoy等(1992)研究^[30]中一系列营养网络和能量流构建了一个详细的威廉王子湾营养网络模型。结合林德曼效率,将威廉王子湾营养网络模型中的各种能量流输入NETWRK3软件^[32],得到不同物种的营养级和高营养级物种的能值转换率,同一营养层级的生物能值转换率相同。由NETWRK3软件得出的营养级与DeGange等

(1987)的研究结果^[33]相差很小,但是同一物种的能值转换率在取不同的林德曼效率(5%~30%)计算时,其值相差近一个数量级,在高营养级物种中差异更明显。该营养网络模型在缺乏能量流定量描述的情况下,将林德曼效率的值设为10%,纳入能值转换率的核算。但是在海洋生态系统中林德曼效率的变化范围很大,实际能量流的传递效率可能显著不同于文中核算结果。

Brown等(2006)基于食物网对佛罗里达大沼泽地的生物多样性进行分析^[34],将简单的线性优化方法^[35]应用于矩阵中计算禾本科沼泽湿地各组分的能值转换率。能值转换率的准确性取决于源数据的有效性,不同季节计算出的能值转换率有明显差异,高能值转换率往往出现于湿季。虽然系统中每个组分计算的能值转换率存在相当大的不确定性,但与其他方法所得结果相比有很高的一致性。Vassallo等(2007、2009)^[36-37]在分析近海鱼类养殖系统过程中运用Odum等(1996)的能值代数法和投入产出法^[3],对以年为期进行能值分析的方法进行改进,构建了金头鲷(*Sparus aurata*)水产养殖能值瞬时分析模型。上述两个研究案例表明,时间单位、投入的产品类别和服务以及产出效率,会对计算结果产生较大影响,如金头鲷的年能值转换率为 1.32×10^6 sei/J,其春季的能值转换率则为 5.55×10^5 sei/J。目前,海洋生物能值转换率的方法主要有投入产出法、能流图法和线性优化法,但相关研究涉及的海洋生物种类并不多,部分海洋生物的能值转换率如表1所示。

2 基于食物网信息论的能值转换率

2.1 食物网信息论

信息论作为一门学科,通常被认为是从二战期间的破译密码行为中发展形成的。信息论普及后不久,生态学家Macarthur(1955)阐明了信息论及相关概念在生态流网络的适用性^[40]。Ulanowicz(1986)认为信息论对定量生态学十分重要,提出了多个系统生长和发育的信息论指标用于分析食物网的大小和复杂性^[41];并总结了信息论在生态学中的应用,不但可以用来量化种群分布和生物数量,还可以定量研究营养过程相互作用的模式^[42]。Moniz等(2007)利用丰度时间序列上的信息论技术试图重构食物网的拓扑结构,发现信息统计数据能正确识别简单模型的食物网拓扑结构,比如验证消费者对某种食物的偏好^[43]。在生态环保方面,食物网理论为建立一整套基于生态系统的海洋资源管理方法奠

定了基础。

表 1 部分海洋生物能值转换率及方法
Tab. 1 Transformatities for some marine organisms

种类	能值转换率/(sej · J ⁻¹)	方法	参考文献
虾(投饵)	1. 30 × 10 ⁷	投入产出法	[29]
虾(不投饵)	1. 89 × 10 ⁷		
初级生产者	1. 10 × 10 ⁴	能流图法	[31]
食草动物	1. 00 × 10 ⁵		
小型底栖生物、微生物	2. 90 × 10 ⁵		
大型生物	8. 10 × 10 ⁵		
较低消费者	1. 10 × 10 ⁵		
顶级捕食者	1. 00 × 10 ⁶		
乌贼	1. 10 × 10 ⁶		
太平洋玉筋鱼(<i>Ammodytes hexapterus</i>)			
太平洋鲱鱼(<i>Clupea pallasii</i>)			
长额虾(<i>Pandalus</i> spp.)			
白胸拟鼠海豚(<i>Phocoenoides dalli</i>)	2. 30 × 10 ⁷		
白鲸(<i>Delphinapterus leucas</i>)	3. 60 × 10 ⁷		
座头鲸(<i>Megaptera novaeangliae</i>)	3. 10 × 10 ⁷		
港湾鼠海豚(<i>Phocoena phocoena</i>)	5. 10 × 10 ⁷		
大马哈鱼(<i>Oncorhynchus keta</i>)	5. 10 × 10 ⁶		
红大马哈鱼(<i>Oncorhynchus nerka</i>)	1. 10 × 10 ⁷		
太平洋鲑鱼(<i>Gadus macrocephalus</i>)			
太平洋大比目鱼(<i>Hippoglossus stenolepis</i>)			
虎鲸(<i>Orcinus orca</i>)	1. 70 × 10 ⁸		
太阳鱼(<i>Lepomis</i> spp.)	8. 38 × 10 ⁴ ~ 8. 83 × 10 ⁴	线性优化法	[34]
金头鲷(<i>Sparus aurata</i>)	1. 32 × 10 ⁶	投入产出法	[36]
金头鲷(春季)	5. 55 × 10 ⁵	投入产出法	[37]
金头鲷(秋季)	9. 92 × 10 ⁵		
大西洋鲑(<i>Salmo salar</i>)	9. 70 × 10 ⁶	投入产出法	[38]
罗非鱼(<i>Oreochromis</i> spp.)	5. 61 × 10 ⁵	投入产出法	[39]
大黄鱼(<i>Larimichthys crocea</i>)	1. 61 × 10 ⁶	投入产出法	[21]

2.2 海洋生物能值转换率经验公式

现阶段海洋食物网能量传递效率和生物能值研究较少,大部分仍然沿用 Brown 等计算的浮游植物、浮游动物、草食性鱼类、哺乳动物、顶级捕食者等海洋生物大类的能值转换率^[31]。为方便且准确的估算海洋自然资本能值价值,我们参考文献[44],构建了海洋食物网信息能流图(图 1),图中假定每年输入食物网的总初级生产力为 1 000 kcal/m²,外源有机质输入为 100 kcal/m²。最后结合生态系统能量传递规律,建立生物营养级与其能值转换率的经验公式。

根据生态系统能量流动的基本原理^[45],第 *n* 营养级生物固定的能量为

$$N_n = N_1 \cdot E_L^{n-1}$$

(2)

式(2)中:*N_n* 为第 *n* 级营养生物固定的能量(J),*N₁* 为初级生产者固定的能量(J),*E_L* 为林德曼效率。

假定能流网处于平衡、稳定的状态,处于不同营养级的生物都能充分利用太阳能值总量,则第 *n* 营养级生物的生物能值转换率公式如下:

$$T_n = \frac{E}{N_n}$$

(3)

$E = N_1 \cdot T_1$ (4)

式(3、4)中: T_n 为第 n 营养级生物的能量转换率(sej/J), E 为流入整个系统的太阳能值总量(sej), T_1 为初级生产者的能量转换率(sej/J)。

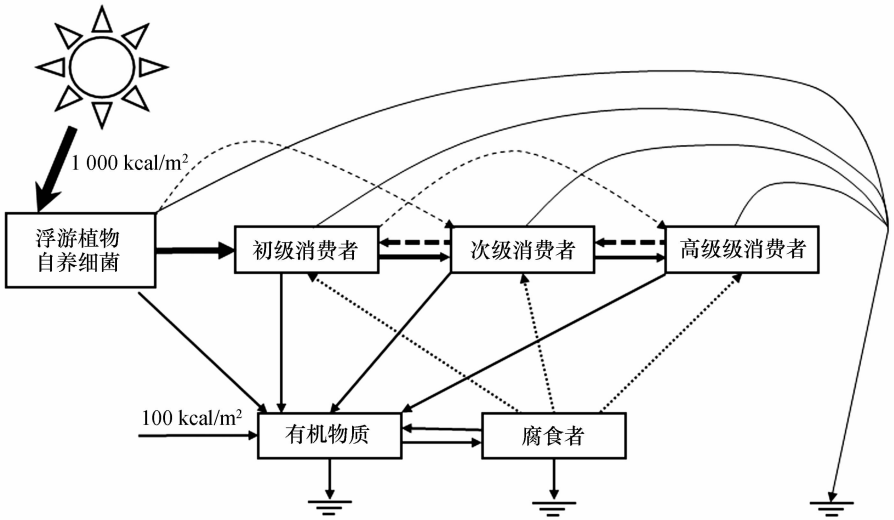


图 1 食物网信息能流图
Fig.1 Energy flow chart in a food web

由公式(2~4)建立生物营养级与其能量转换率之间的经验关系,推导出海洋生物能量转换率的经验公式如下:

$T_n = T_1 \cdot E_L^{1-n}$ (5)

根据公式(5),由初级生产者的太阳能值转换率、林德曼效率和营养级数据,可估算出某一物种的太阳能值转换率。前人的研究方法需要建立食物网模型,计算系统每一成分间流动的能量,而经验公式

简化了能量转换率的计算过程。

2.3 案例应用

根据生物能量转换率的相关研究,同时考虑数据的可获得性,选取表 2 中的生物进行案例研究,以 Brown 等的研究结果^[31]为参考,其初级生产者的能量转换率为 1.1×10^4 sej/J,林德曼效率 E_L 的取值则为 10%。

表 2 经验公式使用案例
Tab.2 A case of using empirical formula

项目	物种	营养级	经验公式计算的能值转换率/(sej · J ⁻¹)	相对误差/%	参考文献
1	罗非鱼	2.80	6.94×10^5	23.72	[14,46]
2	乌贼	3.00	1.10×10^6	0.00	[31]
3	大黄鱼	3.20	1.74×10^6	8.08	[14,46]
4	红大马哈鱼	4.00	1.10×10^7	0.00	[31]
5	座头鲸	4.33	2.35×10^7	-24.14	[31]
6	白鲸	4.40	2.76×10^7	-23.30	[47]

根据本研究提出的经验公式,计算得到表 2 中生物能量转换率,与表 1 中对应值相比,其相对误差的绝对值在 0%~25%之间。海洋生态系统的平均生态效率通常比陆地的高,植食性动物生态效率是 20%左右,较高营养级之间的生态效率可能在 10%~15% 范围内^[45]。由于部分海区缺乏调查研究,参考现有相关营养级数据,从而会产生一定误差。

Campbell 等(2005)认为不同方法计算出的能量转换率保持在同一数量级即可,能量分析的最终目标是将计算结果与实际值的误差控制在 10% 以内^[48],表明本研究经验公式的适用性。基于海洋生物营养级相关研究^[14,46]、能量转换率的计算结果(表 2)以及本研究提出的经验公式,可得到海洋食物网不同食性生物所处营养级及能量转换率

(表 3),为海洋能值研究提供一定参考。其中,海洋生物营养位置变化与其生长发育阶段^[49]、生态系统类型、捕食策略等因素有关^[50],全球气候变化、极端气候事件^[51]和人类活动也会对其产生一定影响。具体应用时根据实际调查数据确定海洋生物的营养级,在缺乏数据时选择邻近且海洋生态系统相似海区的数据替代,同时相应调整林德曼效率,以提高计算结果的科学性。

表 3 食物网营养关系及能值转换率

Tab. 3 Nutritional relationship in a food web and emergy transformity

类别	营养级	能值转换率/(sej · J ⁻¹)
初级生产者	1.0	1.10 × 10 ⁴
草食性和杂食性消费者	2.0 ~ 3.0	1.10 × 10 ⁵ ~ 1.10 × 10 ⁶
低级肉食性消费者	3.2 ~ 4.0	1.76 × 10 ⁶ ~ 1.10 × 10 ⁷
高级肉食性消费者	4.2 ~ 4.9	1.74 × 10 ⁷ ~ 8.74 × 10 ⁷

2.4 讨论与应用前景

自然资源的价值评估具有复杂性且涉及许多假设,目前的研究大都以人类视角对生态系统服务功能价值进行评估,而生态系统内在价值评估方法和量化的研究不足^[52]。基于该现状,本研究构建海洋生物能值转换率计算的公式以期精确量化海洋生态系统内在价值,该公式主要由 3 部分组成,一是初级生产者的能值转换率,二是物种所处的营养级,三是林德曼效率。由于缺乏营养级间能量流传递效率、食物链的反馈机制等相关数据和研究,本研究在经验公式中取林德曼效率为 10%,该值目前已广泛应用于海洋渔业生产^[53]、水产品网箱养殖产量估算等方面。

然而海洋食物网是复杂的、动态的,需要进一步考虑林德曼效率的适用性^[54]及明确物种所处的营养级^[55]。海洋物种在食物网中的营养位置,最初是

通过体型大小判断、胃含物分析法^[56]等方法确定其营养级,而后碳氮稳定同位素分析法提供了估算营养级的新方法。目前同位素分析法广泛应用于陆地、盐沼湿地^[57]、河口、海湾^[58]、近海^[59]及大洋生态系统食物网和营养级生态位变化研究。随着 DNA 测序技术的发展,DNA 条形码法^[60]也已应用于海洋生物食性分析。但上述方法都存在一定的局限性,今后可运用综合性研究方法确定营养级关系以及能量流动,同时可将能值分析理论与地理信息系统(GIS)等工具相结合,有助于客观理解海洋生态系统能量代谢的动态变化过程^[61]。还可借鉴国际鱼类数据库(Fishbase)的经验,构建信息全面、实时更新、开放共享的全球海洋生物多样性数据库^[62],完善海洋食物网模型和食物网拓扑结构,便于开展能值转换率的精细化研究。

3 结论

能值分析理论作为一种自然资本研究方法,以太阳能值作为度量单位,是一种以生态系统为主体的研究方法,在海洋自然资本评估中有其独特优势。海洋自然资本能值研究进展缓慢,一方面是由于海洋生态系统内部结构和能量流动的复杂性,另一方面是因为能值分析理论正处于不断完善过程中,特别是能值转换率这一关键要素。为科学核算海洋生物资本价值,本研究提出基于食物链营养级和生态传递效率估算海洋生物能值转换率的经验公式($T_n = T_1 \cdot E_L^{1-n}$),计算得到海洋食物网中不同营养级生物的能值转换率,且实例应用表明该经验公式具有适用性。经验公式虽然简化了能值转换率计算过程,但其准确度依赖于人类对海洋食物网和生态传递效率的深入研究。随着新兴技术出现和能值分析理论不断趋于成熟,关键物种的能值转换率将取得突破,从而加快海洋自然资本量化研究进程。

参考文献:

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

[2] SCHUMACHER E F. Small is beautiful: economics as if people mattered[M]. New York: Harper Perennial, 1976.

[3] ODUM H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[4] MELLINO S, BUONOCORE E, ULGIATI S. The worth of land use: a GIS-emergy evaluation of natural and human-made capital[J]. Science of the Total Environment, 2015, 506: 137-148.

[5] VASSALLO P, PAOLI C, BUONOCORE E, et al. Assessing the value of natural capital in marine protected areas: a biophysical and trophodynamic environmental accounting model[J]. Ecological Modelling, 2017, 355: 12-17.

- [6] 朱洪光, 钦佩, 万树文, 等. 江苏海涂两种水生利用模式的能值分析[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1): 38-44.
- [7] VASSALLO P, PAOLI C, ROVERE A, et al. The value of the seagrass *Posidonia oceanica*: a natural capital assessment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 75(1/2): 157.
- [8] 赵晟, 洪华生, 张路平, 等. 中国红树林生态系统服务的能值价值[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 147-154.
- [9] QIN P, WONG Y S, TAM N F Y. Emergy evaluation of Mai Po mangrove marshes[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(2): 271-280.
- [10] 孟范平, 李睿倩. 基于能值分析的滨海湿地生态系统服务价值量化研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(增刊1): 74-80.
- [11] FRANZESE P P, BUONOCORE E, DONNARUMMA L, et al. Natural capital accounting in marine protected areas: the case of the Islands of Ventotene and S. Stefano (Central Italy)[J]. Ecological Modelling, 2017, 360: 290-299.
- [12] LINK J S, STOCKHAUSEN W T, METHRATTA E T. Food-web theory in marine ecosystems[M]//BELGRANO A, SCHARLER U M, DUNNE J, et al. Aquatic food webs: an ecosystem approach. Oxford: Oxford University Press, 2005: 98-115.
- [13] NORDSTRÖM M C, AARNIO K, TÖRNROOS A, et al. Nestedness of trophic links and biological traits in a marine food web[J]. Ecosphere, 2016, 6(9): 1-14.
- [14] 张波, 唐启升. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 393-404.
- [15] DU J G, CHEUNG W W L, YE G Q, et al. Impacts of fishing on the marine mean trophic level in Chinese marine area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 83-88.
- [16] PAULY D, CHRISTENSEN V, DALSGAARD J, et al. Fishing down marine food webs[J]. Science, 1998, 279(5352): 860-863.
- [17] ODUM H T. Emergy in ecosystems[C]//POLUNIN N. Ecosystem theory and application. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [18] ODUM H T. Self-organization, transformity, and information[J]. Science, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [19] ZHANG L X, YANG Z F, CHEN G Q, et al. Estimating transformity (UEV) with economic input-output models[J]. Emergy Synthesis, 2013, 7: 575-586.
- [20] 蓝盛芳, 钦佩. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [21] 李璇, 王伟轩, 赵晟. 养殖大黄鱼的能值转化率的计算[J]. 中国水运, 2016, 16(4): 124-127.
- [22] BASTIANONI S, CAMPBELL D, SUSANI L, et al. The solar transformity of oil and petroleum natural gas[J]. Ecological Modelling, 2005, 186(2): 212-220.
- [23] BASTIANONI S, CAMPBELL D E, RIDOLFI R, et al. The solar transformity of petroleum fuels[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(1): 40-50.
- [24] 贺成龙. 水力发电的能值转换率计算方法[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1958-1968.
- [25] ODUM H T, COLLINS D. Transformities from ecosystem energy webs with the eigenvalue method[J]. Emergy Synthesis, 2003, 2: 203-218.
- [26] THOMPSON W, BLANCHER I I, MISRA E C, et al. Emergy analysis and the eigenvalue method for solving transformities using Microsoft Excel[J]. Emergy Synthesis, 2007, 4(21): 1-8.
- [27] LI L, LU H, CAMPBELL D E, et al. Emergy algebra: improving matrix methods for calculating transformities[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(3): 411-422.
- [28] 刘耕源, 杨志峰. 能值分析理论与实践: 生态经济核算与城市绿色管理[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [29] ODUM H T, ARDING J E. Emergy analysis of shrimp mariculture in Ecuador[M]. Narragansett: Chemical Rubber Company Press, 1991: 23-34.
- [30] MCROY C P, WYLLIE-ECHEVERRIA T. Food webs of selected species from Prince William Sound[M]. Fairbanks: Institute of Marine Sciences, University of Alaska, 1992.
- [31] BROWN M T, WOITHE R D, ODUM H T, et al. Emergy analysis perspectives of the Exxon Valdez oil spill in Prince William Sound, Alaska[R]. Gainesville: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, 1993.
- [32] ULANOWICZ R E, KAY J J. A package for the analysis of ecosystem flow networks[J]. Environmental Software, 1991, 6(3): 131-142.
- [33] DEGANGE A R, SANGER G A. Marine birds[M]//HOOD D W, ZIMMERMAN S T. The Gulf of Alaska: physical environment and biological resources. Washington: National Oceanic and Atmosphere Administration, 1987: 479-526.
- [34] BROWN M T, COHEN M J, BARDI E, et al. Species diversity in the Florida Everglades, USA: a systems approach to calcu-

- lating biodiversity[J]. Aquatic Sciences, 2006, 68(3): 254-277.
- [35] BARDI E, COHEN M J, BROWN M T. A linear optimization method for computing transformities from ecosystem energy webs [J]. Emergy Synthesis, 2005, 3: 63-74.
- [36] VASSALLO P, BASTIANONI S, BEISO I, et al. Emergy analysis for the environmental sustainability of an inshore fish farming system[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 290-298.
- [37] VASSALLO P, BEISO I, BASTIANONI S, et al. Dynamic emergy evaluation of a fish farm rearing process[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2 699-2 708.
- [38] ODUM H T. Emergy evaluation of salmon pen culture[M]. Gainesville: University Of Florida Press, 2001.
- [39] BROWN M T. Emergy analysis perspectives, public policy options, and development guidelines for the coastal zone of Nayarit, Mexico[R]. Gainesville: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, 1992: 140-156.
- [40] MACARTHUR R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. Ecology, 1955, 36(3): 533-536.
- [41] ULANOWICZ R E. A phenomenological perspective of ecological development[C]// POSTON T, PURDY R. Aquatic toxicology and environmental fate. Philadelphia: American Society for Testing and Materials International, 1986: 73-81.
- [42] ULANOWICZ R E. Information theory in ecology[J]. Computers and Chemistry, 2001, 25(4): 393-399.
- [43] MONIZ L J, COOCH E G, ELLNER S P, et al. Application of information theory methods to food web reconstruction[J]. Ecological Modelling, 2007, 208(2): 145-158.
- [44] BELGRANO A, SCHARLER U M, DUNNE J, et al. Aquatic food webs: an ecosystem approach[M]. Oxford: Oxford University Press, 2005: 74-76.
- [45] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [46] 张其永, 林秋眠, 林允通, 等. 闽南-台湾浅滩渔场鱼类食物网研究[J]. 海洋学报, 1981, 3(2): 275-290.
- [47] PAULY D, TRITES A W, CAPULI E, et al. Diet composition and trophic levels of marine mammals[J]. ICES Journal of Marine Science, 1998, 55(3): 467-481.
- [48] CAMPBELL D E, BRANDT-WILLIAMS S L, MEISCH M E A. Environmental accounting using emergy: evaluation of the State of West Virginia[R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2005: 53-54.
- [49] HELMS B S, BICKFORD N A, TUBBS N W, et al. Feeding, growth, and trophic position of redbreast sunfish (*Lepomis auriatus*) in watersheds of differing land cover in the lower Piedmont, USA[J]. Urban Ecosystems, 2018, 21(1): 107-117.
- [50] SANCHEZ-HERNANDZ J, AMUNDSEN P A. Ecosystem type shapes trophic position and omnivory in fishes[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(6): 1 003-1 015.
- [51] WERNBERG T, SMALE D A, TUYA F, et al. An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 78.
- [52] 徐虹霓, 盛华夏, 张路平. 海洋生态系统内在价值评估方法初探: 以厦门湾为例[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(4): 585-593.
- [53] LASKER R. Food chains and fisheries: an assessment after 20 years[C]// ROTHSCCHILD B J. Toward a theory on biological-physical interactions in the world ocean. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 173-182.
- [54] 陈进树. 浅析林德曼效率的适用前提和对象[J]. 中国科技信息, 2010(17): 24-26.
- [55] PACE M L, GLASSER J E, POMEROY L R. A simulation analysis of continental shelf food webs[J]. Marine Biology, 1984, 82(1): 47-63.
- [56] BAKER R, BUCKLAND A, SHEAVES M. Fish gut content analysis: robust measures of diet composition[J]. Fish and Fisheries, 2014, 15(1): 170-177.
- [57] 全为民. 长江口盐沼湿地食物网的初步研究: 稳定同位素分析[D]. 上海: 复旦大学, 2007.
- [58] 孙明, 王彬, 李玉龙, 等. 基于碳氮稳定同位素技术研究辽东湾海蜇的食性和营养级[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1 103-1 108.
- [59] 田甲申, 韩家波, 鹿志创, 等. 大连海域食物网连续营养谱[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 300-308.
- [60] VALENTINI A, MIQUEL C, NAWAZ M A, et al. New perspectives in diet analysis based on DNA barcoding and parallel pyrosequencing: the trnL approach[J]. Molecular Ecology Resources, 2009, 9(1): 51-60.
- [61] FRANZESE P P, RUSSO G F, ULGIATI S. Modelling the interplay of environment, economy and resources in Marine Protected Areas: a case study in Southern Italy[J]. Ecological Questions, 2008, 10: 91-97.
- [62] 岳昊, 欧阳海鹰, 曾首英, 等. 浅谈中国鱼类多样性数据库建设现状: 以 FishBase 为例[J]. 中国农学通报, 2013, 29

(8): 59-63.

Study on the solar transformity of organisms in marine natural capital assessment

DING Jie-qiong¹, WEI Fang-yi¹, YE Guan-qiong^{1*}, ZENG Jiang-ning², LIN Ying¹, HAN Yu³

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

2. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China;

3. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Natural capital assessment is an important way to study ecosystem services and socio-economic development. Due to the particularity, complexity, openness, fluidity and multi-level coupling of the ocean, the methods for the assessment of marine natural capital develop slowly. The emergy analysis method converts different types of energy and substances, including the flowing and the stored, in the ecosystem into the same standard emergy through the transformity in order to measure and compare different levels of energy value. Thus it can completely reflect the real natural capital value which characterized by no other methods. To accurately quantify the value of marine life capital, this paper introduces the energy flow diagram of marine food web and the law of energy transfer in ecosystem, then proposes an empirical formula of organisms' transformity, namely $T_n = T_1 \cdot E_L^{1-n}$ (where T_1 is the solar transformity of the primary producer, n is the trophic level, and E_L is the Lindeman efficiency). In order to prove the feasibility of the empirical formula, with cases studied we obtained some trophic levels and corresponding transformities of organisms in different feeding habits of a marine food web. Due to inherent error within the empirical formula and for a better accuracy, practically the value of the key parameters should be determined by literature and data surveys. The empirical formula obtained in this study simplifies the transformity calculation method and promotes the further application of emergy analysis in marine natural capital assessment.

Key words: marine environmental science; natural capital; emergy analysis; transformity; marine organism

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2020. 02. 013

(责任编辑:方建勇)