

DOI: 10.5846/stxb201304190750

曹慧明,董仁才,邓红兵,余丽军,刘建军,王豪伟,马赫.区域生态系统重心指标的概念与应用.生态学报,2016,36(12):3639-3645.

Cao H M, Dong R C, Deng H B, Yu L J, Liu J J, Wang H W, Ma H. The concept and application of centroids in the spatial analysis of regional ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3639-3645.

区域生态系统重心指标的概念与应用

曹慧明^{1,2}, 董仁才^{1,*}, 邓红兵¹, 余丽军³, 刘建军⁴, 王豪伟⁵, 马 赫⁵

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 丽江泸沽湖省级旅游区管理委员会, 丽江 674100

4 丽江泸沽湖旅游开发有限公司, 丽江 674100

5 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361003

摘要: 生态系统重心的变化可以反映生态系统整体的空间变化的特征和趋势, 但是, 目前生态系统重心这一指标只是简单作为指示社会经济变化的因子, 或是作为辅助的角色用于探索生态景观格局的变化, 其重要性一直未受到足够的重视。在阐述生态系统重心指标的概念及内涵, 总结国内外有关重心应用研究成果的基础上, 以川滇两省共同确立的泸沽湖生态保护区为例, 运用重心理论分析了 1990—2005 年该流域生态系统重心的变化及影响因素。结果表明, 泸沽湖流域农田、森林、草地、湿地和人居用地均具有相对独立且稳定的重心区间。相对来说, 人居用地和农田重心的变化幅度明显大于其他用地, 其重心均总体向东南方向偏移, 不断靠近泸沽湖水体。2005 年人居用地和农田重心均有所回撤, 这主要是因为 2003 年泸沽湖景区进行调整, 政策的强制干预导致其重心回撤。分析重心变化的影响因素发现, 区域旅游业发展带来的人类干扰加剧及国家的生态保护政策主导重心变化。在总结前人研究和应用案例具体分析发现, 由于重心理论假设区域背景为匀质平面, 分析是基于二维空间进行, 而不考虑海拔维度, 这就限制了重心模型应用的深度和广度。但是在泸沽湖这样地形复杂多变的区域, 地形因素在该区域生态系统变化过程中的作用不容忽视。因此, 应尽快完善在垂直空间应用重心理论的研究方法并加强相关研究。

关键词: 生态系统重心; 概念; 应用; 重心变化; 泸沽湖

The concept and application of centroids in the spatial analysis of regional ecosystems

CAO Huiming^{1,2}, DONG Rencai^{1,*}, DENG Hongbing¹, YU Lijun³, LIU Jianjun⁴, WANG Haowei⁵, MA He⁵

1 State Key Laboratory on Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

3 Provincial Tourism Zone Management Committee of Lugu Lake, Lijiang, 674100, China

4 Lijiang Lugu Lake Tourism Development Co., Ltd., Lijiang, 674100, China

5 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361003, China

Abstract: Analyzing the movement of an ecosystem's centroid has proven to be a powerful tool for assessing and monitoring its spatial variation. However, since centroid analysis is used as a simple indicator of change in economics or sociology, or as a minor part of studies of landscape pattern distribution and change, the importance of analyzing ecosystem centroids is often overlooked in the field of ecology. This study summarizes the applications of calculating ecosystem centroids from studies from around the world, in order to understand its global trends in correlation studies better, and to identify the

基金项目: 云南省科技计划项目 (2012CA013)

收稿日期: 2013-04-19; 修订日期: 2016-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongrencai@rcees.ac.cn

application potential based on its basic concept and connotations. The centroid theory has been applied in various fields, for example in social and economic development, agriculture, ecological monitoring, and mapping. In this study, we applied the centroid theory to analyze the temporal and spatial distribution of the ecosystem centroid in Lugu Lake, where its distinct boundary was collectively determined by Yunnan Province and Sichuan Province, and its surrounding areas. We also determined how the centroids changed from 1990 to 2005 (e.g., their positions, movement directions, and movement distances). The results showed each ecosystem had a relatively independent and stable centroid in the region. This was caused by the effective conservation efforts of local governments and organizations and, particularly, the effective policies and measures that have been implemented in recent years. Compared with forest, grassland, and wetland ecosystems, built-up land and cropland ecosystems changed more profoundly. As for the extent and direction of centroid changes, the centroids of forest, grassland, and wetland ecosystems moved continuously back and forth in a relatively small area, indicating that these ecosystems were in a relatively dynamic equilibrium. The centroids of built-up land and cropland generally moved from northwest to southeast, and they continuously got closer to the water to utilize the water resource more conveniently. In addition, the centroids of built-up land and cropland to some extent move back in the opposite direction in 2005. The latter was caused by the government's effective policy interventions in 2003, which regulate ecological patterns and coordinate conflicts between the environment and development. Furthermore, increased human-induced disturbances, especially tourism developments, can be a trigger for ecosystem centroids to move towards Lugu Lake, whereas national ecological protection policies lead to movements in the opposite direction of Lugu Lake. Additionally we found that currently, ecosystem centroid analyses are often conducted in two dimensions, without accounting for the third dimension of altitude due to the complexity of vertical space. However, in regions with complex terrain, like Lugu Lake, the terrain factors should not be ignored in the process of regional ecosystem changes. Therefore, the blank centroid theory in vertical dimension should be developed further, and the corresponding research methods completed urgently, in order to continuously expand and improve the applications of ecosystem centroids.

Key Words: ecosystem centroid; concept; application; movement of centroid; Lugu Lake

区域生态系统为区域的社会经济发展提供诸多服务功能,不但为人类生存提供了实物性生态产品,如木材、食物和工业原料等,还具有在区域尺度上调节气候,净化环境,减轻自然灾害等多方面功能^[1-3]。但随着人口的膨胀和区域社会经济的发展,人类对区域生态系统的开发和破坏逐步增大。人类对自然资源的过度开发和向生态系统中排放大量生活生产产生的污染物,导致了一系列威胁人类生存和发展的生态环境危机,其实质是人类对区域生态系统功能和重要性的认识不够深入。因此,如何科学的表征和研究区域生态系统的功能和变化至关重要。

景观格局的空间特征是景观生态学的核心,是景观异质性的具体体现,可以通过景观均匀度、聚集度、蔓延度等指标进行表征^[4],但是这些指标很难在区域景观水平反映生态系统类型整体的长期空间变化特征。许多研究表明生态系统重心可以综合反映某一子系统(斑块类型)空间位置、转移及结构^[5-6]。重心是地理学上表征同一类型要素不同样本之间的代表性区位,其空间变化可以揭示这一类型要素总体的空间动态格局。采用所有同质性斑块重心作为生态系统变化空间特征研究的关键依据,有助于揭示生态系统空间变化规律,能够综合评估生态系统变化趋势。重心转移往往与稳定系统的动态平衡、负反馈等特征之间存在矛盾或差异^[7],这就体现了重心转移的合理性评价的重要性,也使人为干预、控制和调节的可能性有理可循。

生态系统重心是借鉴人口重心的概念发展起来的^[8],对于自然生态系统来说,重心主要受到两个要素决定,生态系统中的每一子系统(斑块或者景观网格单元)的面积及其空间位置。对于既定的子系统来说面积一般是确定的,因此,确定每个子系统的地理位置是确定生态系统重心的关键^[9]。常用的方法是采用子系统的质心或者重心的坐标来表征。对于匀质的物体,重心的位置只跟物体的形状有关^[10]。因此,生态系统重心

是在假设一个区域为质地均匀的平面,区内的每一子系统各自为匀质物体的条件下,该子系统在该地区空间平面上力矩达到平衡的一点。基于这样的假设,生态系统重心也就是子系统形状分布的几何中心^[10]。由于系统重心由多个子系统共同决定,而斑块或者景观网格单元的分布常常是不连续的分散分布,因此,重心可能并不位于任何一个斑块或者景观网格单元内。因此,重心绝对位置意义不大,其运动方向、速度和强度是表征某一物质在空间上变化的有效指标^[6]。在一个独立的区域内,生态系统类型斑块个体相对离散并随环境压力存在较大变动,但所有同质性的斑块具有相对稳定的共同重心,这是能够体现生态系统类型变化状态的关键指标。稳定的生态系统必然有相对稳定的重心,其变化方向和程度应该是稳定在一定的空间范围内的,且变化是可逆的。

重心理论在众多领域被广泛应用,尤其是在社会经济领域,区域、国家及全球尺度均有研究涉及。研究对象从人口、经济、产业、城市及城市群的重心的分布特征、动态转移路径及空间演变规律、到食品和能源格局及安全等^[11-19]。重心还在专题制图中起到有效作用^[20-21]。

重心理论在生态系统变化和监测过程中也发挥巨大作用。Hamel 等^[22]运用重心理论分析物种活动范围的重心。卢娜等^[10]通过重心理论分析我国农田生态系统碳净吸收的空间变化规律。Mao 和 Cherkauer^[23]分析了生态系统地理重心的转移对区域气候及水文状况的影响。通过植被重心迁移可以明确植被的时空演变过程,了解生态系统服务及价值的空间分布和变化^[24]。高志强等^[25]通过我国耕地面积的重心变化,分析了我国耕地质量下降的状况。重心变化耦合区域生态背景的分析有助于评价生态环境质量^[25-26],为土地利用的规划决策提供方向。而综合多项要素重心分布的空间结构和变化可以反映各要素之间的关联度的强弱,从该结构的动态变化中可分析出其运动趋势的合理性和对其变量产生的影响及影响程度。比如,区域环境污染重心识别及与经济重心的协同效应分析能识别出经济发展对区域污染的驱动效应^[27]。将土地利用重心与经济重心迁移进行对比研究,不仅有助于分析区域土地资源开发利用情况,揭示区域内社会经济发展空间差异,还可以从资源和经济两个角度对重心迁移进行相互印证研究,从而拓宽区域重心理论研究的领域。但是,研究发现由于区域的不均衡发展,不同要素重心往往呈现背离的现象,研究重心的背离程度可以为区域未来的协调发展提供指导方向^[28-29]。

但是,目前生态系统重心这一指标不是作为简单指示社会经济变化的因子,就是作为辅助的角色用于探索生态景观格局的变化,其重要性一直未受到足够的重视。因此,本文在阐述生态系统重心指标的概念及内涵,总结国内外有关重心应用的研究成果的基础上,以川滇两省共同确立的泸沽湖生态保护区为例,运用重心理论分析了近 15 年来该区域生态系统重心的变化,并分析重心变化的影响因素。

1 研究方法

1.1 区域概况

泸沽湖流域位于我国四川省和云南省的交界处,地理坐标为 $27^{\circ}36'55''$ — $27^{\circ}47'2''$ N, $100^{\circ}43'36''$ — $100^{\circ}54'20''$ E 之间。该区域位于低纬度高原季风气候带,垂直差异和小区域气候特征明显。由于湖水的调节功能,年温差较小。因地形起伏较大,有明显的立体气候特点。泸沽湖流域是摩梭人分布相对集中的地区,该区域是以保持摩梭人母系氏族文化特征,具高原湖泊景观特色,融自然山水与民族风情于一体的风景资源类型。

1.2 研究数据

利用 1990 年、1995 年、2001 年和 2005 年 4 期的 30m Landsat TM 遥感影像数据,依据泸沽湖流域的植被类型、土地利用特点,将泸沽湖流域主要生态系统类型分为农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统、湿地生态系统 4 个自然生态系统,以及 1 个人居环境子系统,共计 5 种类别。

1.3 计算方法

生态系统重心一般用研究要素的重心坐标来表达。这些要素既可以是基于分区(行政区或按需分区)的人口、产值、粮食产量等,也可以是基于斑块或者景观网格单元的面积或质量。本研究中某一生态系统重心坐

标是基于斑块的面积进行计算,可用下式表达^[11]:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}}$$
$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ti} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n C_{ti}}$$

式中, X_t 、 Y_t 分别表示第 t 年某斑块重心的经纬度坐标; C_{ti} 表示第 t 年斑块 i 的面积; X_i 、 Y_i 表示 i 的几何中心的经纬度坐标; n 为斑块个数。

设第 t 、 $t+n$ 年斑块重心坐标分别为 $P_t(X_t, Y_t)$ 、 $P_{t+n}(X_{t+n}, Y_{t+n})$,那么,重心 P_t 向 P_{t+n} 偏移的距离 d 可用下面的模型表示:

$$d = \sqrt{(X_{t+n} - X_t)^2 + (Y_{t+n} - Y_t)^2}$$

2 研究结果

2.1 生态系统重心变化

1990—2005 年各生态系统重心位置见表 1。可以看出,该区域农田、森林、草地、湿地和人居用地均具有相对独立且稳定的重心区间,这和该区域对泸沽湖及周边地区的保护密切相关。农田与人居用地的重心区域有所重叠,说明农田与人类活动的相关程度最高,相对受到较大的人为干扰和调控。相对来说,森林、草地和湿地的重心更稳定,而人居用地和农田重心的变化幅度相对较大。

表 1 生态系统重心空间位置坐标
Table 1 The coordinate of ecosystem centroids

类型 Type	经度/纬度 Longitude/Latitude	年份 Year			
		1990	1995	2001	2005
农田 Cropland	E	100°43'15.6"	100°45'18"	100°46'40.8"	100°44'31.2"
	N	27°45'5.76"	27°44'47.04"	27°44'44.52"	27°45'3.96"
森林 Forestland	E	100°47'13.2"	100°48'25.2"	100°47'24"	100°47'60"
	N	27°44'23.28"	27°44'18.96"	27°44'22.2"	27°44'17.88"
草地 Grassland	E	100°47'16.8"	100°46'58.8"	100°46'4.8"	100°46'44.4"
	N	27°44'47.4"	27°45'7.92"	27°45'6.84"	27°44'58.2"
湿地 Wetland	E	100°47'20.4"	100°47'16.8"	100°47'38.4"	100°47'56.4"
	N	27°43'40.08"	27°43'28.2"	27°43'0.12"	27°43'25.68"
人居 Built-up land	E	100°43'37.2"	100°42'57.6"	100°44'34.8"	100°42'54"
	N	27°44'52.08"	27°45'29.52"	27°43'46.56"	27°44'47.04"

表中坐标表示法为(x,y),其中 x 坐标去除了北京 54 坐标系中的带号 17

重心是区域内各要素矢量的合力点,而各要素变化方向和速率迥异,因此,生态系统重心是一个动态的指标^[7],由于生态系统本身的反馈机制,稳定的生态系统的重心总是在一定的范围内通过不断的折返达到分布态势多年变化不大的情况。而处于扰动中的生态系统,其重心往往朝某个方向持续变化,直至达到新的相对稳定的状态。本研究中,草地、森林和湿地的重心变化范围较小,且呈不断折返的变化趋势,说明这些生态系统处于稳定的动态平衡中。而人居和农田用地的重心变化范围则相对较大。1990—2001 年,人居用地和农田的重心均总体向东南方向偏移,不断靠近泸沽湖水体,这说明人居环境和农田生态系统朝水资源应用更便利的方向移动,也是对水资源利用和干扰程度加强的表现(图 1)。

从重心偏移距离来看,1990—2001 年,除森林生态系统外的其他生态系统的重心偏移距离均呈不同程度的持续增加,农田和人居的重心变化距离相对较大,分别为 5675m 和 2576m。2005 年,这些生态系统重心偏

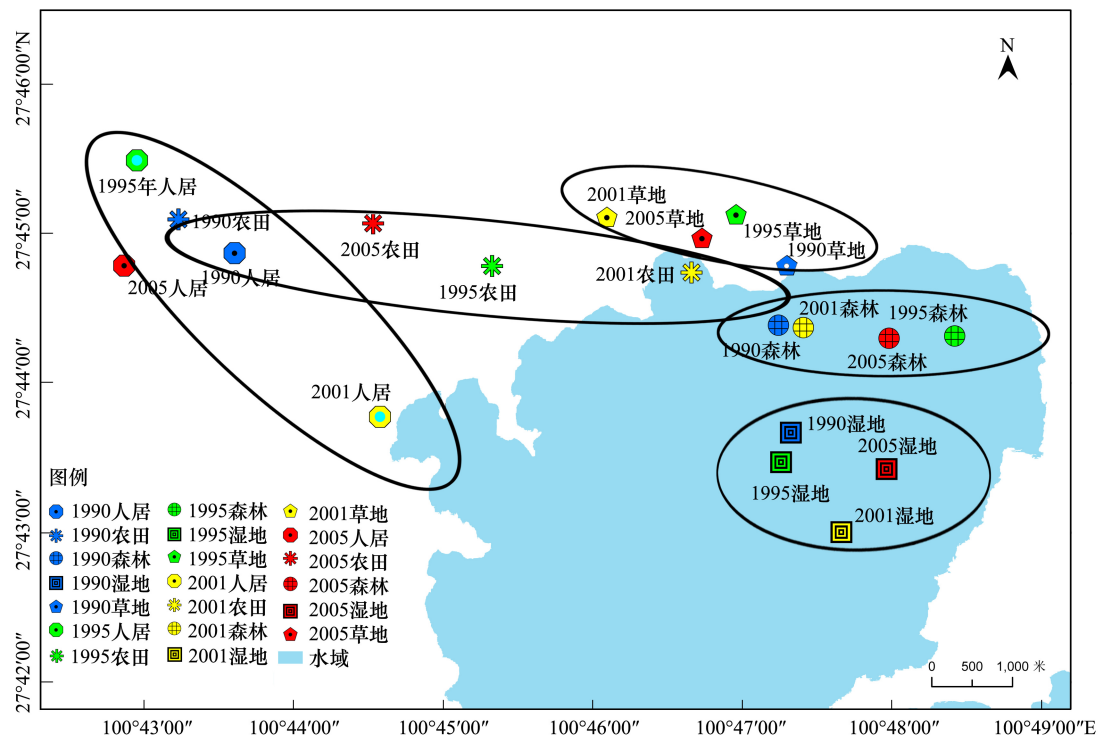


图 1 不同时期生态系统重心变化示意图

Fig.1 The scatter plot of ecosystem centroids in different year

移距离均呈不同程度的回撤,与 2001 年相比,农田、草地和人居重心的回撤距离超过 50%(表 2),这是 2003 年泸沽湖景区的强制干预政策起作用的体现。与其他生态系统不同的是,森林生态系统的重心一直在一定范围内呈折返变化,1990—1995 年森林的重心移动了 1942m,这也是研究期内森林重心移动的最大距离,之后重心折返,2005 年,重心总体呈相反方向变化,景区的干预政策对森林重心的变化方向几乎没有影响,这也间接证明了森林生态系统自身的稳定性。

表 2 生态系统类型重心的偏移距离/m

Table 2 Movement distance of ecosystem centroids

类型 Type	年份 Year			类型 Type	年份 Year		
	1995	2001	2005		1995	2001	2005
农田 Cropland	3494	5675	2139	湿地 Wetland	380	1348	1143
森林 Forestland	1941	276	1226	人居 Built-up land	1570	2576	1223
草地 Grassland	844	2068	994				

移动距离是以 1990 年为基准进行计算

2.2 重心变化的影响因素

1990 年,该区域旅游业刚刚起步,仅有少量的游客,旅游设施很少。泸沽湖风景区相对封闭,泸沽湖自然保护区的建设以绝对的生态保护为目的。周边各村均以农业收入为主,森林、草地生态系统不同程度的转化为农田生态系统,建筑用地少,人居环境系统与自然生态系统呈有机结合的状态^[30]。到 2000 年,泸沽湖风景区内基本形成以旅游为主导的经济发展模式。游客数量猛增,该地区的人居环境设施,包括居民地、道路、码头和旅游设施等逐年增长,且有加速上升的趋势(图 2),对流域内资源的需求和干扰持续增加。因此,人居环境的重心受人类活动干扰的影响,在景区管理政策强制干预前,人居环境重心一直朝泸沽湖水体靠近,表明人类活动增强对区域生态系统结构变化的影响。

旅游业作为该地区主要支柱产业前,周边各村均以农业收入为主,因此,森林、草地生态系统不同程度的

转化为农田生态系统,1995 年和 2000 年耕地面积分别比 1990 年增加 16.3%和 12.6%,随着国家大力推行退耕还林还草工程,天然林保护工程初见成效,到 2005 年,耕地面积比研究期内的历史最高值下降超过 40%。另外,野外调查和资料分析表明,泸沽湖流域退耕还林工程年均造林面积超过 130hm²,约占流域面积的0.6%。造林地立地类型主要分为坡耕地和荒地两种,泸沽湖水体周围有大量的耕地被退耕为林地。因此,耕地面积的变化和退耕还林工程的布局都直接影响区域耕地重心的变化。

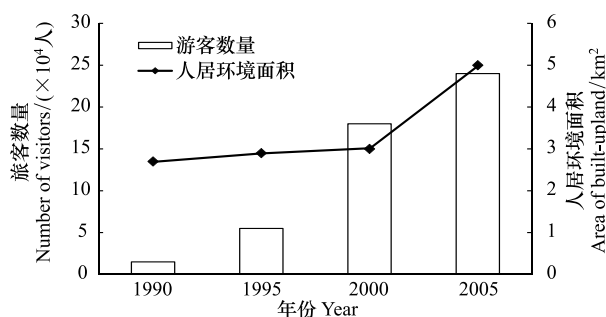


图2 泸沽湖流域游客数量及人居环境面积

Fig.2 The Tourists and built-up areas of Lugu Lake during 1990 to 2005

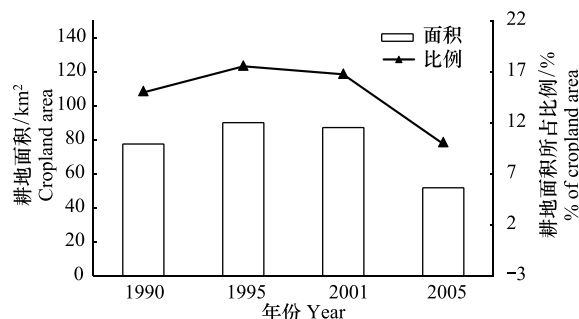


图3 泸沽湖流域耕地面积及比例

Fig.3 The area and proportion of cropland in Lugu Lake during 1990 to 2005

3 讨论

生态系统中的各种物质和能量在空间上的聚散和迁移,便产生了某一时刻的重心问题^[25],因此,重心研究可以在众多领域进行应用。生态系统重心的位置变化在探索生态系统变化时具有有效性和优越性。即使在生态系统类型总面积变化不大的情况下,其重心移动可能导致生态系统质量受到影响^[25],因此,重心是表征生态系统综合变化的有效指标。人居环境用地和耕地是泸沽湖流域受人类活动影响最大的两种类型,分析其重心变化及影响因素,有助于揭示区域发展的空间变化规律。重心变化是多项因素综合影响的结果,驱动因素复杂多变,人口增长和经济发展等人类干扰是主要因素。在泸沽湖流域,由于旅游业发展带来的人口增长等压力导致重心变化,并改变生态系统的结构和功能。

虽然重心理论已在生态系统研究中被广泛应用,但目前仍存在许多问题。针对基于遥感分类的景观斑块进行重心分析时,其面积、位置与分类设置(例如最小图斑面积)及处理精度密切相关,所选择的研究区域范围的大小也会直接导致重心发生不同的变化。此外,由于数据的可获得性和计算的简便,对某社会经济要素进行分析时,将研究区域根据研究需要分成不同的分区,假设各分区都为平面上的一个质点,研究要素集中在这些质点上,这种忽视分区内部异质性的简化将妨碍细节数据挖掘提供更精准的结果。另外,该理论假设区域背景为匀质平面,也就是说分析是基于二维空间进行,而不考虑海拔维度等地形条件,但海拔、坡度和坡向作为重要的生态因子,对植物的生长和分布以及人类活动的开展都有重要的影响^[31]。泸沽湖流域地形复杂多变,地形因素在该区域生态系统变化过程中的作用不容忽视^[32]。因此,在这些地形起伏较大的区域应用重心理论时应根据实际情况考虑高程、坡度与坡向等因子的影响。

目前重心理论在海拔、坡度和坡向等方面鲜有应用。这是因为,在研究生态系统垂直空间变化时,一般通过建立区域 DEM 模型提取地形数据,将生态系统类型时空变化数据与各地形数据进行叠加分析,获取各生态系统时空演变的地形特征^[31]。但是,重心由多个子系统(斑块或景观网格单元)共同来决定的,由于各斑块相对位置状况,重心可能并不位于任何一个斑块内^[25],例如本文中森林生态系统的重心分布在水面上,这就导致绝对位置本身并没有多少现实意义。因此,在研究生态系统重心在垂直空间的变化特征和规律时,就不能简单叠加 DEM 模型提取地形数据。但是目前,在垂直空间应用重心理论的研究方法还不完善,在今后的研究中应尽快完善研究方法,拓宽重心模型应用的广度和深度。

参考文献 (References):

- [1] Reid W V, Laird S A, Meyer C A, Gamez R, Sittenfeld A, Janzen D, Gollin M A, Juma C. Biodiversity prospecting // Balick M, Elisabetsky E, Laird S A, eds. Medicinal Resources of The Tropical Forest: Biodiversity and Its Importance To Human Health. New York: Columbia Univ. Press, 1996: 142-173.
- [2] Ewel K. Water quality improvement: evaluation of an ecosystem service // Daily G, ed. Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystem. Washington D.C.: Island Press, 1997: 329-344.
- [3] 郑华, 欧阳志远, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. 自然资源学报, 2003, 18(1): 118-126.
- [4] O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, Jackson B, DeAngelis D L, Milne B T, Turner M G, Zygmunt B, Christensen S W, Dale V H, Graham R L. Indices of landscape pattern. Landscape Ecology, 1988, 1(3): 153-162.
- [5] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- [6] 孙倩, 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 丁建丽, 买买提·沙吾提, 韩桂红, 桂东伟. 渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究. 生态学报, 2012, 32(10): 3252-3265.
- [7] 杨桂山. 长江三角洲耕地数量变化趋势及总量动态平衡前景分析. 自然资源学报, 2002, 17(5): 525-532.
- [8] Hilgard J E. The advance of population in the United States. Scribner's Monthly Magazine, 1872, 4: 214-218.
- [9] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. 生态学报, 1998, 18(5): 478-483.
- [10] 卢娜, 曲福田, 冯淑怡. 中国农田生态系统碳净吸收重心移动及其原因. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(5): 119-125.
- [11] Li Y F, Zhu X D, Sun X, Wang F. Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4): 218-227.
- [12] 刘德钦, 刘宇, 薛新玉. 中国人口分布及空间相关分析. 遥感信息, 2002, 6(2): 2-6.
- [13] 乔家君, 李小建. 近 50 年来中国经济重心移动路径分析. 地域研究与开发, 2005, 24(1): 12-16.
- [14] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析. 地理科学, 2001, 21(5): 385-389.
- [15] 陈志刚, 王青, 黄贤金, 彭补拙. 长三角城市群重心移动及其驱动因素研究. 地理科学, 2007, 27(4): 457-462.
- [16] 侯景新. 论城市重心转移规律——以北京市为例. 北京社会科学, 2007, (5): 46-53.
- [17] Xu S W, Wu J Z, Song W, Li Z Q, Li Z M, Kong F T. Spatial-temporal changes in grain production, consumption and driving mechanism in China. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(2): 374-385.
- [18] Zhang Y, Zhang J Y, Yang Z F, Li J. Analysis of the distribution and evolution of energy supply and demand centers of gravity in China. Energy Policy, 2012, 49: 695-706.
- [19] Klein L R. Measurement of a shift in the world's center of economic gravity. Journal of Policy Modeling, 2009, 31(4): 489-492.
- [20] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析. 地理学报, 2009, 62(2): 202-210.
- [21] 关兴良, 方创琳, 鲁莎莎. 中国耕地变化的空间格局与重心曲线动态分析. 自然资源学报, 2010, 25(12): 1997-2006.
- [22] Hamel P B, Dawson D K, Keyser P D. How we can learn more about the Cerulean Warbler (*Dendroica cerulea*). The Auk, 2004, 121(1): 7-14.
- [23] Mao D, Cherkauer K A. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region. Journal of Hydrology, 2009, 374(1/2): 71-82.
- [24] He Y B, Chen Y Q, Tang H J, Yao Y M, Yang P, Chen Z X. Exploring spatial change and gravity center movement for ecosystem services value using a spatially explicit ecosystem services value index and gravity model. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 175(1/4): 563-571.
- [25] 高志强, 刘纪远, 庄大方. 我国耕地面积重心及耕地生态背景质量的动态变化. 自然资源学报, 1998, 13(1): 92-96.
- [26] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 周全斌, 王长有. 近 10 年中国土地利用格局及其演变. 地理学报, 2002, 57(5): 523-530.
- [27] 丁焕峰, 李佩仪. 中国区域污染重心与经济重心的演变对比分析. 经济地理, 2009, 29(10): 1629-1633.
- [28] Zhang C L, Liu Y, Qiao H J. An empirical study on the spatial distribution of the population, economy and water resources in Northeast China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 79-82: 93-99.
- [29] Fu X, Shen Y, Dong R C, Deng H B, Wu G. Analysis of urbanization based on center-of-gravity movement and characteristics in Songhua River Basin of China and its southern source sub-basin between 1990 and 2010. Chinese Geographical Science, 2016, 26(1): 117-128.
- [30] Weyerhaeuser H, Wilkes A, Kahrl F. Local impacts and responses to regional forest conservation and rehabilitation programs in China's northwest Yunnan province. Agricultural Systems, 2005, 85(3): 234-253.
- [31] 李双成, 高伟明, 周巧富, 刘逢媛. 基于小波变换的 NDVI 与地形因子多尺度空间相关分析. 生态学报, 2006, 26(12): 4198-4203.
- [32] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.